המכונים לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

# שימור אנרגיה בבנייני מגורים בישראל

**אביתר אראל**

בהשתתפות

יצחק ברבי, אורי דומן, דוד כץ, אינה ניסנבאום,
ערן קפטן ועדה רויטגור

יוזמה ומימון:

משרד התשתיות הלאומיות,
האנרגיה והמים
www.energy.gov.il

המכונים לחקר המדבר ע"ש יעקב בלאושטיין
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

פברואר 2015

# שימור אנרגיה בבנייני מגורים בישראל

## אביתר אראל

בהשתתפות

**יצחק ברבי, אורי דומן, דוד כץ, אינה ניסנבאום,
ערן קפטן ועדה רויטגור**

האגף לשימור אנרגיה

**אדי בית הזבדי ודוד רודיק**

גרפיקה: קובי נהון

יוזמה ומימון:

משרד התשתיות הלאומיות,
האנרגיה והמים
www.energy.gov.il

# הקדמה

שימור אנרגיה הוא מונח כולל לייעול השימוש באנרגיה על ידי הצרכנים. באמצעות שימור אנרגיה ניתן להקטין באופן ניכר את השימוש באנרגיה ממקורות מתכלים, להגדיל את עצמאות משק האנרגיה הישראלי, לחסוך סכומי כסף ניכרים בחשבון הפרטי ובמאזנה הכולל של המדינה ולהקטין את הפליטות של גזי החממה, שמהווים גורם משמעותי בהתחממות כדור הארץ.

משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים, פועל מזה שנים לייעול השימוש באנרגיה בכל תחומי המשק. כשלושים אחוזים מצריכת החשמל הכוללת נצרכת בבנייני מגורים. לכן, ישנה חשיבות רבה למאמצים להמשיך ולקדם יוזמות לחיסכון בסקטור זה. המשרד קידם בשנים האחרונות מספר מהלכים כגון: עדכון תקינה להתייעלות אנרגטית, מתן תמריצים לטכנולוגיות יעילות אנרגטית, החלפת מכשירי חשמל ישנים ובזבזניים במכשירים חדישים ויעילים. פרסום המדריך שלפניכם, הוא חוליה נוספת בסדרה של מהלכים אלה, אשר נועדו להביא לבנייה של בניינים שיבטיחו איכות חיים משופרת לדיירים, לצד חיסכון באנרגיה – וזאת לאורך שנים.

הספר "שימור אנרגיה בבנייני מגורים בישראל", מחליף מדריך דומה, אשר נכתב ביוזמת המשרד והתפרסם בשנת 1989, בעריכת דן דבוסקין ונחום גרנות. מאז כתיבת המדריך הקודם חלף דור, וענף הבנייה בישראל שינה את פניו כמעט לבלי הכר. עקרונות יסוד של תכנון אדריכלי רגיש לשיקולי אנרגיה אמנם לא השתנו, אך האמצעים הטכנולוגיים העומדים לרשות המתכנן והקבלן היום, אשר שונים מהותית מאלו שהיו קיימים בעבר, הביאו את המשרד לעדכן ולשדרג את המדריך שלפניכם.

אני סמוך ובטוח כי תמצאו עניין ותועלת במדריך זה.

בברכה,

ד"ר יובל שטייניץ

שר האנרגיה

המדריך לשימור אנרגיה בבנייני מגורים בישראל במהדורה הנוכחית כולל ארבעה חלקים. החלק הראשון מציג רקע עיוני, וכולל פרקים העוסקים באקלים, תנאי פנים לתכנון ועקרונות מעבר חום. מומלץ לעיין בפרקים אלה לפני שניגשים לשאר פרקי הספר, משום שהם מקנים מושגי יסוד החיוניים להבנת חלק מהנושאים אשר הספר דן בהם בהמשך. החלק השני של הספר עוסק בחלקי הבניין השונים, ובהשפעתם על התפקוד האנרגטי שלו. פרקים אלה ערוכים לפי הסדר שהמתכנן יידרש אליהם במהלך התכנון: המתאר הכללי של הבניין, קירות, רצפות וגג, ומערכות זיגוג. החלק השלישי של הספר עוסק במערכות הבניין. פרקים אלו כוללים הסברים על מערכות למיזוג אוויר, אמצעים לחימום הדירה, מערכות פוטו-וולטאיות, מערכות לחימום מים ומערכות "בית חכם". החלק הרביעי של הספר דן בנושאים אשר מיועדים להרחיב את הבנת הקוראים בסוגיות אשר אינן הנדסיות, אך עשויות להיות בעלות השפעה רבה על תהליך התכנון או על צריכת האנרגיה בבניין. פרקים אלו נוגעים לשיקולים כלכליים בתכנון, לשיפוץ בניינים קיימים לשם חיסכון באנרגיה, להשפעת התנהגות הדיירים על דפוסי הצריכה, לתקינה הרלבנטית ולהדמיות מחשב של התפקוד האנרגטי של הבניין.

המדריך נועד בעיקר להפצה אלקטרונית. הקובץ כולל קישורים (hyperlinks) אשר מסייעים בניווט במסמך ובחיפוש מושגים חשובים. בעלי מסך מחשב גדול יוכלו לצפות בשני דפים זה לצד זה, כפי שנעשה בספר מודפס. לשם כך מומלץ לעדכן את ההגדרות בתוכנת Adobe Reader כך שהיא תציג שני דפים בעברית מימין לשמאל:

א. בתפריט View/Page Display, יש לסמן את האפשרויות Two Page View ו-Show Gaps between Pages.

ב. בתפריט File/Properties/Advanced, בשדה Reading Options, יש לבחור באפשרות Binding: Right Edge.

כאשר התצוגה מוגדרת נכון, השוליים הצבעוניים של שני עמודים עוקבים יוצגו קרוב לצידי המסך כפי שמדגים האיור הבא:

ניתן גם להדפיס את המדריך. המסמך מיועד להדפסה על שני צידי הנייר. לשם כך יש שוליים רחבים יותר בצד הפנימי, לאפשר כריכה. הפס הצבעוני יראה בשוליים החיצוניים של כל דף.

בהדפסה דו-צדדית אוטומטית, יש לוודא כי הגדרות המדפסת כוללות שדרית ימנית.

זכויות הקניין הרוחני במדריך זה שייכות למדינת ישראל - משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים. המשתמש רשאי לעשות "שימוש הוגן" במדריך תוך ציון המקור. אין לעשות שימוש מסחרי במדריך או בכל חלק ממנו ללא הסכמה מראש ובכתב מאת המשרד.

המדריך ומידע בנוגע לשימוש מסחרי נמצאים באתר המשרד.

# תוכן העניינים

## פרק א': מבוא


1. מגמות בצריכת אנרגיה בבנייני מגורים בישראל ..... 3
   1.1 שיעור צריכת החשמל במגזר הביתי ..... 3
   1.2 הבדלים בין משקי בית ..... 4
2. החשיבות בשימור אנרגיה בבניינים ..... 5
   2.1 תרומה למאבק בשינוי אקלים כדור הארץ ..... 5
   2.2 תרומה לכלכלה ולאיכות הסביבה בישראל ..... 6
   2.3 תרומה לביטחון אספקת אנרגיה ..... 9
   2.4 תרומה לקיימות ..... 10
3. שימור אנרגיה בבניינים בארץ ובעולם ..... 11
4. גורמים המשפיעים על צריכת אנרגיה ..... 11
   4.1 שיעור צריכת החשמל לאקלום ..... 13

מקורות ..... 15


## פרק ב': אקלים


1. גיאומטריית שמש ..... 19
   1.1 תנועת כדור הארץ במערכת השמש ..... 19
   1.2 סיבוב כדור הארץ סביב צירו ..... 20
   1.3 "מסלול השמש" ביחס לצופה על פני כדור הארץ ..... 21
   1.4 השפעת עונות השנה על מסלול השמש ..... 22
   1.5 השפעת קו הרוחב הגיאוגרפי על מסלול השמש ..... 22
   1.6 חישוב מקום השמש ..... 23
2. אזורי אקלים בישראל ..... 24
   2.1 חלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045 ..... 24
   2.2 מאפיינים אקלימיים של אזורי הארץ ..... 26
3. מיקרו-אקלים עירוני ..... 27
   3.1 האקלים בשכבת הגבול ..... 28
   3.2 כלים ומדדים לתיאור המרקם העירוני ..... 29
   3.3 אי החום העירוני ..... 30
   3.4 השפעת אקלים העיר על צריכת אנרגיה בבניינים ..... 33
4. נתוני אקלים לתכנון ..... 34
   4.1 יום לתכנון (design day) ..... 34
   4.2 שנה מטאורולוגית אופיינית (typical meteorological year) ..... 35
5. מקורות ..... 37


## פרק ג': מעבר אנרגיה


1. קרינה ..... 41
   1.1 בליעה, העברה והחזרה ..... 43
   1.2 קרינה בגלים קצרים (קרינת שמש) ..... 44
   1.3 קרינה בגלים ארוכים (קרינה אינפרה אדומה) ..... 45

2. הסעה.....45
2.1 שכבת הגבול ומעבר האנרגיה בין מוצק וזורם.....45
2.2 זרימה טורבולנטית וזרימה למינרית.....47
3. הולכה.....47
3.1 התנגדות תרמית ומוליכות תרמית.....47
3.2 אגירת חום.....51
3.3 דיפוסיביות ואפוסיביות תרמית.....52
4. אידוי מים.....54
4.1 הטבלה הפסיכרומטרית.....54
4.2 קירור באידוי.....56
מקורות.....57

## פרק ד': נוחות תרמית ואיכות האוויר בדירה

1. נוחות תרמית - הגדרה.....61
2. נוחות תרמית ומאזן האנרגיה בגוף האדם.....62
2.1 מאזן האנרגיה.....62
2.2 מנגנוני מעבר אנרגיה בין האדם לסביבה.....62
2.3 וויסות טמפרטורת הגוף.....63
3. גורמים המשפיעים על התחושה התרמית (thermal sensation).....63
3.1 גורמים סביבתיים.....63
3.2 גורמים פיסיולוגיים.....63
3.3 גורמים מקומיים לאי-נוחות.....64
3.4 אקלום.....65
3.5 שינוי בתחושה (alliesthesia).....65
3.6 השפעת מאפיינים אישיים כגון מגדר, גיל, או שיוך אתני על הנוחות התרמית.....65
4. גישות להערכת הנוחות התרמית.....66
4.1 הגישה הפיסיולוגית.....66
4.2 הגישה הסתגלנית (adaptive approach).....67
5. מדדים לנוחות תרמית.....69
5.1 מדדים מספריים.....69
5.2 הטבלה הפסיכרומטרית.....71
6. איכות האוויר בדירה.....72
1.1 דרישות לאוויר צח בבנייני מגורים.....73
7. המלצות מעשיות למתכננים.....75
7.1 חימום קרינתי.....75
7.2 אוורור נוחות.....76
7.3 אוורור לבקרת לחות.....78
8. סיכום.....78
מקורות.....78

## פרק ה': מתאר הבניין

1. קומפקטיות.....81
2. בידוד תרמי ומסה תרמית.....82
2.1 סוגי בידוד תרמי.....82
2.2 תפקידי הבידוד התרמי והמסה התרמית.....83

2.3 כמות הבידוד ..... 85
2.4 כמות המסה התרמית ומקומה בבניין ..... 85
2.5 מיקום הבידוד והמסה ברכיב מעטפת ..... 86
2.6 גשרים תרמיים ..... 87
3. צבע המעטפת ..... 87
4. חשיפה לשמש: אוריינטציה של חללים עיקריים ..... 88
5. חדירת אוויר ואוורור ..... 89
5.1 השפעת חילופי האוויר על הנוחות התרמית בבניין ..... 90
5.2 חדירת אוויר ..... 90
5.3 אוורור ..... 91
5.4 השפעת גודל החלון והיחס בין גודל פתח הכניסה ופתח יציאת האוויר ..... 92
5.5 מיקום פתחי האוורור ..... 93
6. צורת הבניין ..... 96
6.1 בנייה צמודת קרקע ..... 96
6.2 בנייה רוויה ..... 97
7. סיכום ..... 100
מקורות ..... 100

## פרק ו': קירות הבניין

1. חומרי בנייה ..... 103
1.1 בלוקים ..... 103
1.2 בטון ..... 106
1.3 בידוד תרמי ..... 106
1.4 חיפוי חיצוני ..... 106
1.5 חומרי גמר פנימיים ..... 107
2. קירות רב-שכבתיים ..... 108
2.1 קירות בבנייה קונבנציונלית ..... 108
2.2 קירות בבנייה מתועשת ..... 110
2.3 קיר כפול ..... 113
2.4 קירות בבנייה קלה ..... 114
2.5 קירות מסך כפולים (double facade) ..... 114
3. גשרים תרמיים בקירות ..... 115
3.1 רכיבים מיוחדים ..... 116
4. מחסום אדים ומחסום אוויר ..... 117
4.1 מחסום אוויר ..... 117
4.2 מחסום אדים ..... 118
5. סיכום ..... 118
מקורות ..... 118

## פרק ז': גג הבניין

1. גג בטון שטוח ..... 121
1.1 גג רגיל ..... 122
1.2 גג "הפוך" ..... 122
1.3 גשר תרמי בהיקף הגג ..... 123
2. גג קל משופע ..... 124
2.1 גיאומטריה ..... 124

2.2 חומרים..... 124
2.3 חלל גג..... 124
2.4 רעפים מאווררים..... 126
3. גגות לא מישוריים: קמרונות וכיפות..... 127
3.1 השיקול האקלימי..... 127
3.2 אנרגיה גלומה בתהליך הייצור..... 127
4. גגות 'קרירים' ('cool roofs')..... 127
5. גגות ירוקים..... 129
5.1 מהו גג ירוק?..... 129
5.2 התועלת שבגג ירוק..... 130
5.3 חסרונות של גג ירוק..... 133
6. רצפה וקורות יסוד..... 134
6.1 המגע התרמי עם הקרקע..... 134
6.2 בידוד קורות היסוד והיקף הרצפה..... 134
6.3 חומרי ריצוף..... 135
7. מרפסות..... 136
7.1 מרפסת גג..... 136
7.2 מרפסת זיזית..... 136
8. סיכום..... 137
מקורות..... 137

## פרק ח': מערכות זיגוג במעטפת הבניין

1. הגדרה..... 141
2. מעבר אנרגיה דרך מעטפת הבניין..... 141
3. גודל הפתחים במעטפת ומיקומם..... 142
3.1 פתחים החורגים ממישור הקיר..... 143
4. יחידת הזיגוג..... 144
4.1 השפעת הזיגוג על מעבר אנרגיה בקרינה..... 144
4.2 סימון התכונות של יחידות הזיגוג..... 144
5. תכנון מערכות הזיגוג..... 145
5.1 בחירת יחידת הזיגוג..... 146
5.2 תכונות המסגרת..... 150
5.3 מערכות הצללה..... 154
5.4 רשת חרקים..... 159
5.5 סוגי חלונות..... 160
6. חימום סולרי פסיבי בעזרת חלונות..... 160
6.1 חימום סולרי בשיטת הקליטה הישירה (direct gain)..... 160
6.2 פנות (orientation)..... 161
6.3 יתרונות וחסרונות..... 162
7. תאורה טבעית..... 163
7.1 העברת אור..... 165
7.2 מיקום החלון..... 166
7.3 אמצעים להכוונת האור..... 166
מקורות..... 168

## פרק ט': מיזוג אוויר


1. קירור בדחיסה (vapor compression) ..... 171
   1.1 עיקרון הפעולה ..... 171
   1.2 מערכות אינוורטר ..... 172
   1.3 מקדם הפעולה (COP) של מזגן ..... 173
   1.4 סוגי מזגנים ..... 173
2. קירור באידוי ..... 175
3. אמידת הספק הקירור הנדרש ..... 178
   3.1 פיזור אוויר הומוגני בחדר ..... 179
   3.2 חשיבות ההתקנה של מזגן בעל הספק מתאים ..... 179
4. בקרת הלחות בבניין עם מיזוג אוויר ..... 179
5. מערכות מיזוג אוויר בבניינים רבי קומות ..... 180
   5.1 יחידת קירור (package chiller) ..... 181
   5.2 מגדל קירור ויחידות קירור מים (chillers) ..... 181
   5.3 מערכת יחידות אזוריות (water source) ..... 181
6. נושאים נוספים ..... 182
   6.1 צינון באמצעות אוויר חיצוני – אוורור לילה או מערכות אקונומייזר ..... 182
   6.2 ניצול מי העיבוי של מזגנים ..... 182
   6.3 מסננים ..... 182
   6.4 מתי כדאי להחליף מזגן ישן בחדש? ..... 182

מקורות ..... 182


## פרק י': מערכות חימום


1. אופן הפקת החום ..... 185
   1.1 שריפת חומרי בעירה ..... 185
   1.2 התנגדות חשמלית ..... 186
   1.3 משאבת חום ..... 188
   1.4 מערכת מעבי קרקע למיזוג אוויר וחימום ..... 188
   1.5 מערכת סולרית ..... 190
2. פיזור החום בדירה ..... 190
   2.1 צנרת מים ..... 191
   2.2 תעלות אוויר ..... 191
   2.3 חימום תת-רצפתי ..... 191
3. בקרת הטמפרטורה ..... 193
   3.1 כיצד מודדים ..... 194
   3.2 היכן מודדים ..... 194
   3.3 ניהול אזורים שונים בדירה ..... 194
   3.4 מערכת מנייה ..... 194
4. סיכום והמלצות ..... 194

מקורות ..... 194


## פרק יא': מערכות "בית חכם"


1. מערכות "בית חכם" – רקע ..... 197
   1.1 מבוא ..... 197
   1.2 מהו בית חכם? ..... 198
   1.3 הבניין האינטליגנטי ומערכות בית חכם ..... 198

1.4 יתרונות וחסרונות ..... 199
2. עקרונות פעולת ותפקוד הבית החכם ..... 200
2.1 אינטגרציה בין-מערכתית ..... 202
2.2 מנייה חכמה ..... 203
2.3 תשתית "דואלית" ..... 204
3. יישומים והיבטים אנרגטיים של מערכות בית חכם ..... 205
3.1 פוטנציאל החיסכון בצריכת אנרגיה ..... 205
3.2 אמצעים ופתרונות טיפוסיים לחיסכון באנרגיה ..... 205
3.3 חיסכון ויעילות אנרגטית בבנייה "לגיל השלישי"(Ambient Assisted Living - AAL) ..... 207
4. תקינה ..... 208
4.1 ארכיטקטורה מוסכמת ..... 210
4.2 תפעוליות ביינית של מוצרים (product interoperability) ..... 210
4.3 בטיחות פונקציונלית (functional safety) ..... 210
4.4 מדידת תרומת מערכת "בית חכם" לביצועים אנרגטיים של מבנים ..... 210
5. שיקולים כלכליים בבחירת מערכת "בית חכם" ..... 211
מקורות ..... 211

## פרק יב': מערכות לחימום מים

1. מערכות סולריות ..... 215
1.1 עקרונות הפעולה של מערכות סולריות לחימום מים ..... 216
1.2 סוגי קולטים ..... 220
1.3 מערכות סולריות משותפות בבניינים גבוהים ..... 222
2. חימום מים בחשמל ..... 223
2.1 חימום בחשמל עם מיכל אגירה ..... 224
2.2 חימום במחמם מיידי ללא מיכל אגירה ..... 224
3. חימום מים במשאבת חום ..... 225
3.1 שילוב חימום מים במערכת למיזוג אוויר ..... 225
3.2 התקנת המערכות ..... 225
4. חימום מים בגז ..... 226
4.1 חימום מים מיידי ..... 226
4.2 חימום במחמם גז מרכזי עם מיכל לאגירת מים ..... 226
5. שיקולים בבחירת המערכת המתאימה ..... 227
6. אנרגיה גלומה במים ..... 228
מקורות ..... 228

## פרק יג': מערכות פוטו-וולטאיות

1. השמש כמקור אנרגיה ..... 231
2. עקרונות הטכנולוגיה הפוטו-וולטאית ..... 232
2.1 מבנה התא הבסיסי ..... 232
2.2 פיתוחים עתידיים בתחום התא הבסיסי ..... 234
2.3 המודול (module) – תת המערכת הבסיסי, תת המערכת (array) ..... 234
2.4 הממיר ורכיבי ההגנה ..... 235
2.5 תצורת האספקות ..... 237
3. יישום והתקנת מערכות פוטו-וולטאיות במגזר הביתי ..... 238
3.1 חלופות התקנה ..... 238

3.2 היבטים אדריכליים – עיצוביים ..... 239
3.3 הצללות: התמודדות ומניעה ..... 239
3.4 היבטים חשמליים של התקנות פוטו-וולטאיות ..... 241
3.5 היבטים מכניים של התקנות פוטו-וולטאיות ..... 242
3.6 כבילה חשמלית ..... 243
3.7 סיכוני קרינה בלתי מיננת ..... 244
3.8 היבטים מינהליים ביישום והתקנת מערכת פוטו-וולטאית ..... 244
4. חוקים ותקנות, תקינה והסדרה ..... 245
4.1 חוקים ותקנות ..... 245
4.2 תקינה ..... 245
4.3 רגולציה – הסדרה ..... 247
5. שיקולים כלכליים בבחירת מערכת פוטו-וולטאית ..... 247
5.1 מרכיבים טכניים ..... 248
5.2 שיקולי מימון ..... 248
5.3 מבט לעתיד - הפיכת הטכנולוגיה הפוטו-וולטאית לכלכלית ..... 249
מקורות ..... 249

## פרק יד' : תאורה מלאכותית

1. אור וראייה ..... 253
1.1 השפעות שליליות מקרינה אורית ומתאורה לא נכונה ..... 253
1.2 תהליך הראיה ומבנה העין ..... 254
1.3 ספקטרום הקרינה ורגישות העין ..... 256
2. יסודות תורת המאור ..... 257
2.1 שטף האור, עוצמת הארה ובהיקות ..... 257
2.2 טמפרטורת צבע ומסירת צבע ..... 258
2.3 פיזור האור במרחב ..... 258
2.4 נצילות אורית ..... 259
3. מקורות אור ..... 259
3.1 נורות ליבון ..... 260
3.2 נורות פריקה ..... 261
3.3 דיודות פולטות אור (Light Emitting Diodes – LED) ..... 265
3.4 השוואה בין מקורות האור השונים ..... 266
4. גופי תאורה ..... 267
4.1 בקרה על האור, נצילות גוף תאורה ועקום פוטומטרי ..... 267
4.2 מיון גופי התאורה ..... 269
5. תכנון תאורה ..... 269
5.1 פרמטרים לתאורה "נכונה" ..... 270
5.2 בחירה של גוף תאורה ..... 272
6. חיסכון באנרגיה בתאורה ..... 273
6.1 הקטנת הביקוש על ידי ניצול תאורה טבעית ..... 273
6.2 הקטנת האנרגיה הדרושה לספק עצמת הארה נתונה ..... 274
6.3 בקרה על זמן הפעולה של הנורות ..... 275
7. תחזוקה וניקוי של גופי התאורה ..... 276
8. תקנות ותקינה בתחום התאורה ..... 276
8.1 תקינה בנושא איכות המאור ..... 277
8.2 תקינה בנושא אנרגיה ..... 277

8.3 תקינה בנושא בטיחות ואיכות של רכיבי מערכות מאור ..... 278
9. המלצות מעשיות ..... 278
מקורות ..... 279

## פרק טו': שיקולים כלכליים

1. מבוא ..... 283
2. נקודת המוצא לחישוב ..... 284
3. מושגים כלכליים בסיסיים ..... 284
3.1 גמישות הביקוש ..... 284
3.2 אפקט הריבאונד (Rebound Effect) ..... 285
3.3 עלויות קבועות ועלויות משתנות ..... 285
3.4 עלות אלטרנטיבית / עלות ההזדמנות ..... 286
3.5 השפעה חיצונית ..... 286
3.6 עלות ההון ..... 286
3.7 ערך נומינלי וערך ריאלי ..... 286
3.8 היוון ושיעור ניכיון ..... 287
3.9 ערך נוכחי נקי (Net Present Value (NPV ..... 287
3.10 תקופת פירעון (payback period) ..... 288
3.11 ניתוח עלות-תועלת ..... 288
3.12 ניתוח יעילות-עלויות ..... 288
3.13 ערך שוקי וערך לא-שוקי ..... 289
4. מידול כלכלי של חיסכון באנרגיה ..... 290
4.1 קביעת נקודת בסיס להשוואה ..... 290
4.2 הגדרת הנחות הניתוח ..... 291
4.3 מבחני רגישות ..... 292
5. דוגמאות ..... 292
5.1 דוגמא 1: חישוב החזר פירעון (נקודת המבט לניתוח - הפרט) ..... 292
5.2 דוגמא 2: ניתוח עלות-תועלת ..... 293
5.3 דוגמא 3 – ניתוח יעילות עלויות ..... 296
6. העלות של רכיבים חוסכי-אנרגיה בבנייה למגורים בישראל ..... 298
מקורות ..... 299

## פרק טז': שיפוץ לשם חיסכון באנרגיה

1. מניעי הפרט והמדינה להשקיע בשיפוץ בניינים ..... 303
1.1 מניעי הפרט ..... 303
1.2 המדינה ..... 303
2. תועלות, עלויות וחסמים לביצוע שיפוץ לשם חיסכון באנרגיה ..... 304
2.1 תועלות משיפוץ ..... 305
2.2 חסמים ..... 306
3. בחינת חלופות לשיפוץ ..... 307
3.1 שיפוץ הגג ..... 307
3.2 שיפוץ הקירות ..... 308
3.3 שיפוץ מערכות הזיגוג ..... 309
4. כדאיות השדרוג של רכיבי בניין שונים ..... 310
4.1 תיאור המחקר ..... 310

4.2 השוואת האסטרטגיות המשולבות: בניין שלם ..... 311
4.3 הבדלים בצריכת אנרגיה וביעילות השיפוץ בין דירות שונות בבניין ..... 312
5. הכדאיות הכלכלית של שיפוץ ..... 314
5.1 הכדאיות הכלכלית של שיפוץ הנעשה רק לשם חיסכון באנרגיה ..... 314
5.2 העלות השולית של רכיבי חיסכון באנרגיה במסגרת שיפוץ כללי ..... 315
5.3 סיכום ..... 316
מקורות ..... 316

## פרק יז': התנהגות הדיירים

1. התפיסה המסורתית של חיסכון באנרגיה בבניינים ..... 321
2. מקומן של החלטות המשפיעות על צריכת אנרגיה בבנייני מגורים ..... 322
2.1 סוג ההחלטה ..... 322
2.2 מודלים לקבלות החלטות מתחומים אחרים ..... 323
2.3 גורמים מרחביים ..... 325
3. כלי מדיניות ..... 326
3.1 מועד הפעלת המדיניות ..... 326
3.2 התערבות חברתית ..... 326
3.3 הקניית מידע ..... 327
3.4 אמצעים המכוונים אל 'מתנהגים' במקום כלפי 'התנהגויות' ..... 328
4. תופעות הריבאונד והפריבאונד ..... 328
4.1 אפקט הריבאונד (rebound effect) ..... 328
4.2 אפקט הפריבאונד (prebound effect) ..... 330
5. המלצות להתנהגות חוסכת אנרגיה ..... 330
5.1 מערכות אקלום ..... 330
5.2 בקרת מצב החלונות ..... 332
5.3 בקרת מצב התריסים ..... 333
5.4 מכשירי חשמל עיקריים ..... 333
5.5 צריכת חשמל של מכשירים במצב המתנה ..... 334
6. סיכום ..... 334
מקורות ..... 335

## פרק יח': תקינה ישראלית

1. כללי ..... 341
1.1 הצורך בתקנים ..... 341
1.2 תחומי תקינה ..... 341
1.3 היחס בין תקינה ישראלית לתקינה בינלאומית ..... 341
2. מעמדם של התקנים הישראלים ..... 342
2.1 תקן וולונטרי ..... 342
2.2 תקן מחייב ..... 342
2.3 תקן רשמי ..... 342
3. תהליך הכנת תקן ..... 342
4. מבנה תקן ..... 343
5. תקינה ישראלית בתחום האנרגיה בבניינים ..... 344
5.1 ת"י 1045 חלק 1 - בידוד תרמי של בניינים: בתי מגורים ..... 344
5.2 ת"י 5068 - מערכות זיגוג בבניינים-סימון בתווית אנרגיה ..... 345
5.3 ת"י 5280 חלק 1.1 – אנרגיה בבניינים: מעטפת הבנין – בנייני מגורים ..... 345

5.4 ת"י 5281 חלק 2 - בנייה בת-קיימה (בנייה ירוקה): דרישות לבנייני מגורים ..... 346
5.5 ת"י 5282 חלק 1 - דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה: בנייני מגורים ..... 347
5.6 תקנים החלים על ציוד ומערכות ..... 348

## פרק יט': סימולציה תרמית של בניינים

1. עקרונות ההדמיה התרמית הממוחשבת של בניינים ..... 351
1.1 מהי הדמיה תרמית ..... 351
1.2 מידע הניתן לחישוב באמצעות הדמיה תרמית (פלט - Output) ..... 352
1.3 מידע הנחוץ להדמיה תרמית (קלט – Input) ..... 354
1.4 שיטות חישוב תרמי ..... 356
2. שילוב הדמיה ממוחשבת בתהליך התכנון האדריכלי ..... 357
2.1 ביצוע הדמיות בשלבי התכנון השונים ..... 359
2.2 תהליך ביצוע הדמיות במסגרת מחקר-מעשי ..... 360
3. יישום הדמיה תרמית בישראל ..... 362
3.1 השיטה תפקודית בתקן הישראלי 5282 ..... 362
3.2 ממשק ENERGYui ..... 363
3.3 תוכנות הדמיה תרמית אחרות ..... 364
4. הערות מסכמות ..... 369
מקורות ..... 370

**מילון מונחים**

**המחברים**

# פרק א:

# מבוא

# פרק א: מבוא

חלקו הראשון של הפרק הזה מציג מגמות של צריכת אנרגיה בבנייני מגורים בישראל. בהמשך, דן הפרק בשאלה מדוע יש חשיבות לשימור אנרגיה בבנייני מגורים, וסוקר בקצרה את הנעשה בתחום בארץ ובעולם. לבסוף, הפרק מציג באופן תמציתי את מרכיבי הצריכה בבניינים, ומדגיש את החשיבות שבטיפול בגורמים המשפיעים על צריכת האנרגיה לאקלום.

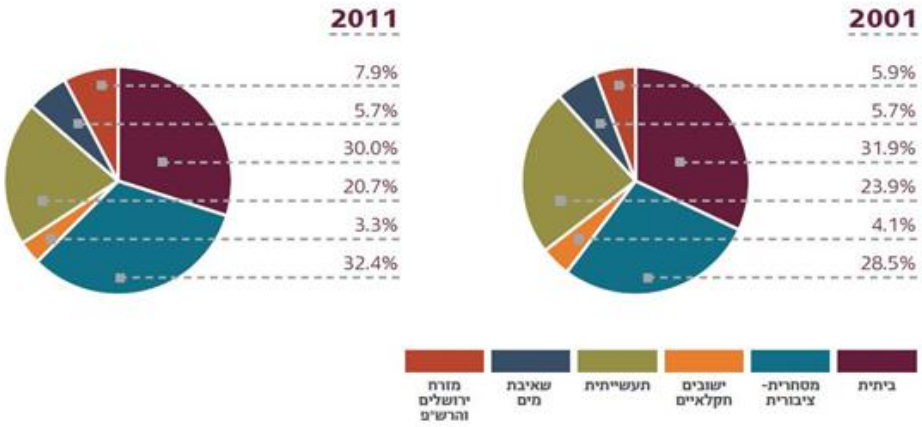
## 1. מגמות בצריכת אנרגיה בבנייני מגורים בישראל

במדינת ישראל, בשונה ממדינות רבות אחרות, חלקם של מקורות אנרגיה מלבד חשמל (כגון נפט, דיזל או גז לחימום וגז לבישול) במגזר הביתי קטן מאוד בהשוואה לחלקו של החשמל. לכן יש חשיבות לנתון צריכת החשמל כנתון המבטא את השינוי בצריכת האנרגיה בבניינים.

### 1.1 שיעור צריכת החשמל במגזר הביתי

חלקם של הבניינים (מכל הסוגים) בצריכת החשמל בישראל הוא כ-60 אחוז [1]: שיעור זה גדל בעשור האחרון ב-3 אחוז בערך (תרשים א-1). לפי נתוני חברת החשמל, היה במהלך העשור האחרון גידול של למעלה מ-20% בצריכת החשמל בבנייני מגורים (תרשים א-2), מעט פחות מהגידול הכולל בצריכה, אך חלקו של הסקטור הזה הוא עדיין 30.0% (בהשוואה ל-31.4% בשנת 2002).

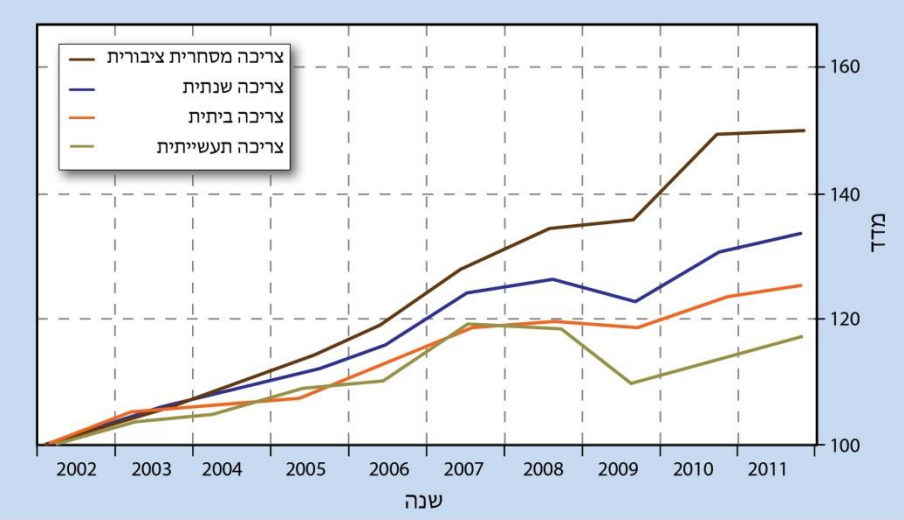
חשוב לציין כי המגמה של עליית הצריכה של חשמל בבניינים עומדת בסתירה לשיפור העקבי שהפגין המשק הישראלי ביעילות השימוש באנרגיה. לפי נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, עמדה בשנת 2000 אספקת האנרגיה לנפש על 3.10 שעט"נ לנפש[2] , ומאז ירדה לערך של 2.89 שעט"נ לנפש, שיפור של קרוב ל-7 אחוז. כאשר בוחנים את צריכת האנרגיה יחסית לתוצר המקומי הגולמי של המשק, השיפור מרשים אף יותר – משיא של 58.0 שעט"נ לכל מיליון ₪ בתוצר המקומי בשנת 1995, חלה ירידה נמשכת ובשנת 2011 נדרשו רק 42.6 שעט"נ בכדי להפיק אותה תוצרת – ירידה של יותר מ-26 אחוז.




**תרשים א-1: פילוח צריכת החשמל בישראל בשנים 2001 – 2011.**

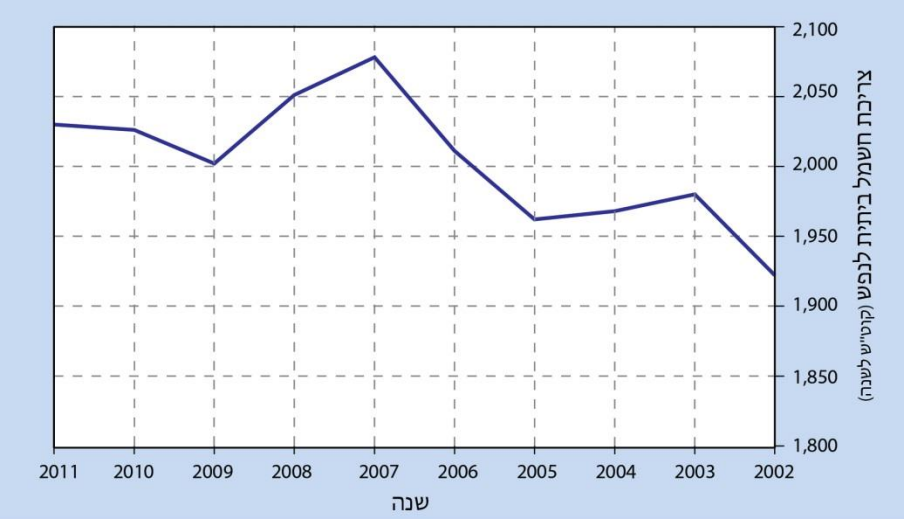
[1] חברת החשמל, 2011.

[2] שעט"נ - שווה ערך טון נפט – tons of oil equivalent. יחידה המשמשת להשוואת תכולת האנרגיה של דלקים שונים.




**תרשים א-2: מגמות בצריכת החשמל בישראל בשנים 2002-2011** [3]

הגידול בצריכת החשמל במשקי הבית נובע בעיקר מגידול האוכלוסייה. צריכת החשמל הביתית לנפש גדלה באיטיות בעשור שבין השנים 2002-2011, בשיעור ממוצע של בערך חצי אחוז בשנה. הצריכה בפועל מדי שנה הושפעה כנראה גם מהמצב הכלכלי במשק וממזג האוויר, כך שהשונות משנה לשנה מטשטשת מעט את המגמה הכללית.




**תרשים א-3: צריכת החשמל הביתית לנפש בשנים 2002-2011** [3]

## 1.2 הבדלים בין משקי בית

כמו במרכיבים אחרים של סל הצריכה, גם בצריכת אנרגיה ישנה שונות גדולה מאוד בין בעלי הכנסות גבוהות לבין מיעוטי היכולת. אמנם נתוני חברת החשמל מציגים חלוקה לעשירונים לפי צריכת חשמל (ולא לפי הכנסה) - אולם ניתן להניח כי ישנו מתאם טוב בין ההוצאות על חשמל לבין ההכנסה הכוללת, למרות שקיימים הבדלים הנובעים גם מגורמים כגון אקלים (וכפועל יוצא דרישה לחימום או קירור).

[3] (נתונים: חברת החשמל, דו"ח סטטיסטי לשנת 2011.)

| עשירון | צריכה שנתית ממוצעת לצרכן (קוט"ש) | חלק יחסי בכלל הצריכה הביתית (אחוז) |
|---|---|---|
| 1 | 1,607 | 2.0 |
| 2 | 3,070 | 4.0 |
| 3 | 4,024 | 5.2 |
| 4 | 4,933 | 6.4 |
| 5 | 5,883 | 7.7 |
| 6 | 6,937 | 9.0 |
| 7 | 8,189 | 10.7 |
| 8 | 9,813 | 12.8 |
| 9 | 12,298 | 16.0 |
| 10 | 20,148 | 26.2 |
| | **7,691** | **100.0** |

**טבלה א-1:**

**צריכת החשמל הביתית לפי עשירונים לשנת 2011 (לא כולל מתקנים משותפים בבנייני דירות)**

## 2. החשיבות בשימור אנרגיה בבניינים

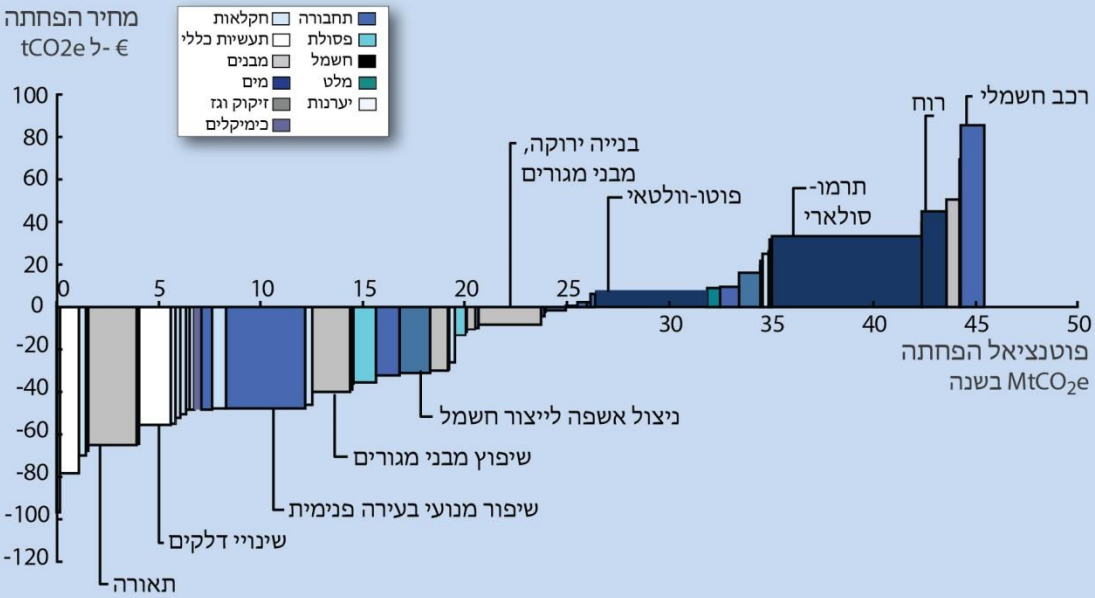
לשימור אנרגיה בבניינים יש מספר צידוקים: הקטנת השפעת צריכת האנרגיה על אקלים כדור הארץ; הפחתת השפעת ההפקה והצריכה של אנרגיה על איכות הסביבה בישראל; תרומה לביטחון אספקת אנרגיה; ותרומה לאיכות החיים של משפחות מעוטות אמצעים החסרות את היכולת לחמם ולקרר את דירתם.

### 2.1 תרומה למאבק בשינוי אקלים כדור הארץ

אקלים כדור הארץ משתנה. על עובדה זו כמעט אין חולק, לפחות בקהילה המדעית. מרבית חוקרי האקלים גם מסכימים כי השינוי, שהמאפיין הבולט שלו הוא התחממות, נגרם על ידי עלייה בריכוז דו-תחמוצת הפחמן ($CO_2$) באטמוספירה. מרבית החוקרים גם מקבל את הטענה שהעלייה בריכוז דו-תחמוצת הפחמן היא תוצאה של פעילות בני האדם. לפעילות זו מספר מאפיינים, כגון כריתת יערות (ובכך הקטנת כושר ספיגת הפחמן הנמצא באטמוספירה) אולם תרומה מרכזית לעלייה בריכוז הפחמן הדו-חמצני ניתן למצוא בפליטה של פחמן במהלך שימוש בדלק – בין אם מדובר בשריפה ישירה של דלק לצורך חימום או הנעת אמצעי תחבורה, ובין אם מדובר בשריפת דלק להפקת חשמל.

ישנם אמצעים רבים להפחתת פליטות הפחמן לאטמוספירה, כגון הפקת חשמל באמצעות מערכות פוטו-וולטאיות במקום מפחם, שיפורים בציוד מיזוג אוויר, לכידת פחמן בתחנות כוח (carbon capture and storage) ואפילו נטיעת עצים. למרבית האמצעים (למעט שינוי בדפוסי ההתנהגות של צרכני האנרגיה) יש עלות כספית, ולא כולם יעילים באותה מידה. חלקם עשויים להשתלם מבחינה כלכלית לטווח הארוך, וחלקם – אף שיביאו להפחתת פליטת הפחמן – יהיו בעלי עלות גבוהה ותועלת מועטה יחסית.

תרשים א-4 מציג את הקשר שבין פוטנציאל הפחתת הפליטות (המבוטא על ידי רוחב העמודות) לבין העלות הכספית (המבוטאת על ידי גובהן)[4]. עמודות בעלות גובה 'שלילי' מייצגות אמצעים אשר יישומם מביא לתועלת כספית אשר גדולה מעלותם.




**תרשים א-4: אמצעים שונים להפחתת פליטות גזי חממה [4]**

בחינת התרשים מעלה כי אחדים מהאמצעים היעילים ביותר והרווחיים ביותר מתייחסים למגזר הביתי. למשל: שיפור בגופי התאורה לא רק מביא להפחתה גדולה בפליטת פחמן, אלא גם לחיסכון כספי ניכר. בנייה ירוקה ושיפוץ המעטפת של בנייני מגורים קיימים אף הם משלבים תועלת כספית, לצד ההפחתה בפליטות. לעומת זאת, עלות ההתקנה של מערכות פוטו-וולטאיות גבוהה מהתועלת הכספית (אם לא מתחשבים בסובסידיה לצרכן).

## 2.2 תרומה לכלכלה ולאיכות הסביבה בישראל

ייצור החשמל מתבסס בעיקר על פחם ועל גז טבעי, ובמידה פחותה על נפט. הוא גורם עיקרי לזיהום הסביבה ואחראי לפגיעה בבריאות האדם ולתופעות סביבתיות קשות שהן תולדה של מזהמים אלה[5]. 17 אחוז מהפליטות של פחמן דו-חמצני ושל גזי חממה נוספים על פני כדור הארץ הן תוצאה של שרפת דלק לשם ייצור חשמל[6].

התועלת המצרפית לפרט ולחברה כתוצאה מהפחתת השימוש בחשמל היא הסכום של החיסכון הישיר לפרט, בתוספת התועלת הכוללת לאיכות הסביבה ולחברה כתוצאה מהפחתת ייצור החשמל (TSB – Total Social Benefits), אותה ניתן לייחס לשלושה גורמים:

- ערך המניעה של פליטות המזהמות לחברה בישראל כתוצאה מהקטנת השימוש בחשמל בבתי מגורים. (ANEE – Avoided Negative Environmental Effects).
- פוטנציאל החיסכון לחברה כתוצאה מהקטנת הביקוש לחשמל בשעות שיא (PHS - Peak Hour Saving).

[4] מקינזי, 2009.
[5] Hartkopf and Loftness, 1999.
[6] Jager-Waldau, 2007.

- ערך דחית הקמת תחנת יצור חשמל שבתכנון (VoD – Value of Delay).

הרווח הסביבתי-כלכלי הוא סכום השפעתם של שלושת הגורמים האלה, וכפי שיוסבר להלן, עומד על כ-10.78 אגורות לקוט"ש בנתוני 2010 [7].

**א. אומדן הערך הסביבתי-חברתי של הזיהום שמקורו בייצור חשמל (ANEE)**

חשמל בישראל מיוצר בעיקר באמצעות שריפת שלושה סוגי דלק (חברת החשמל, 2009): פחם כ-64.7 אחוז; גז טבעי כ-32.6 אחוז; מזוט וסולר כ-2.7 אחוז.

לכל טכנולוגית ייצור מזהמים שונים ורמות שונות של זיהום. המזהמים העיקריים הם חומר חלקיקי (PM); תחמוצת גופרית ($SO_2$); תחמוצת חנקן (NOX); ופחמן דו חמצני ($CO_2$). הכפלת כמויות המזהמים הנפלטות בזמן הבעירה של כל אחד מסוגי הדלק שבשימוש בערכו הכספי של כל מזהם מבטאת את הנזק לחברה כתוצאה מהפקת החשמל.

ערך מניעת זיהום האוויר על פי זמני תעריפי השימוש השונים, מתבסס על ההנחה שבזמן תעריף פסגה (peak), הקילוואט השולי מיוצר מדיזל, בזמן תעריף שפל - הקילוואט השולי מיוצר מפחם, והקילוואט השולי בתעריף גבע מיוצר מ-20 אחוז דיזל ו-80 אחוז פחם[8]. ערכי החיסכון מתייחסים לשער דולר 3.60 שקלים, והסכומים אינם כוללים מע"מ. בטבלה א-2 מוצג ערך מניעת זיהום האוויר על פי הרכב הדלק בישראל (נכון לשנת 2010).

**טבלה א-2: ערכי זיהום הסביבה כתוצאה מייצור חשמל, על פי הרכב הדלקים בישראל לשנת 2009.**

| סוג הזיהום | עלות יח' זיהום (סנט לגרם) | כמות מזהמים לפי סוג הדלק (גרם לקוט"ש) | | | עלות הזיהום לפי סוג הדלק (סנט לקוט"ש) | | | ערך הזיהום בזמני השימוש השונים (אג' לקוט"ש) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | גז | פחם | דיזל | גז | פחם | דיזל | פסגה | גבע | שפל |
| $SO_2$ | 0.319 | 0.03 | 2.5 | 1.2 | 0.01 | 0.80 | 0.38 | 1.37 | 2.57 | 2.87 |
| $NO_X$ | 0.24 | 0.5 | 2.5 | 2.6 | 0.12 | 0.60 | 0.62 | 2.25 | 2.18 | 2.16 |
| PM | 0.95 | 0.01 | 0.08 | 0.13 | 0.01 | 0.08 | 0.12 | 0.44 | 0.31 | 0.27 |
| $CO_2$ | 0.0007 | 461 | 872 | 925 | 0.32 | 0.61 | 0.65 | 2.33 | 2.22 | 20.2 |
| **סה"כ** | | | | | **0.46** | **2.18** | **1.78** | **6.39** | **7.28** | **7.50** |

החלק היחסי של צריכת החשמל במשקי בית מתוך כלל הצריכה בישראל משתנה בהתאם לשעות היממה ולעונות השנה. לפי נתוני חברת החשמל ובהתייחס להבדלים אלה, הצריכה בזמן פסגה מהווה 31.8 אחוז מכלל צריכת החשמל הביתית, הצריכה בזמן גבע מהווה 19.6 אחוז והצריכה בזמן שפל מהווה 48.6 אחוז.

כאשר משקללים את ערך הזיהום בזמני השימוש השונים (פסגה, גבע ושפל), בחלק היחסי של הצריכה בכל אחד מהזמנים, נמצא כי הנזק לסביבה כתוצאה מייצור חשמל הנצרך בבנייני מגורים הוא כ- 7.1 אגורות לקוט"ש.

---

[7] אראל וחוב', 2013.

[8] Becker et al, 2008

### ב. חסכון המתקבל מהקטנת השימוש בשעות שיא (PHS – Peak Hour Saving)

הביקוש לחשמל במשק אינו קבוע. הוא משתנה לאורך שעות היממה ותקופות השנה בהתאם להיקפי הפעילות אצל הצרכנים השונים. שיא הביקוש לחשמל נרשם במהלך ימים ספורים בהם שוררים תנאי מזג אויר קיצוניים. הצורך לתת מענה לביקוש בחשמל גם בשעות השיא, מחייב הקמת מערך ייצור אשר נדרש לספק חשמל בפועל רק במשך ימים ספורים בשנה. ייצור חשמל השולי בשעות השיא יקר מעלות ייצור החשמל הממוצעת משום שהוא מחייב שימוש ביחידות הייצור ובסוגי הדלק הפחות יעילים[9].

ניתן לחשב את החיסכון המתקבל מהקטנת השימוש בשעות שיא על ידי השוואת התעריף האחיד בו מחויבים הרוב הגדול של משקי הבית עם תעריף תעו"ז. התעו"ז הינו תעריף הנקבע על פי עומס המערכת וזמני הצריכה והוא משקף את עלויות ייצור החשמל על פני שעות היממה ועונות השנה באופן הבא:

- חלוקה לעונות השנה השונות: קיץ, מעבר וחורף. לכל עונה נקבע תעריף שונה.
- חלוקת לפי שעות היממה: פסגה, גבע ושפל. שעות הפסגה הן שעות של צריכת שיא במשק, שבהן התעריף הוא הגבוה ביותר, ושעות השפל הן השעות עם צריכת החשמל הנמוכה ביותר במשק, ובהתאם גם התעריף הוא הנמוך ביותר.

> "התעו"ז ממשם את העיקרון לפיו על הלקוח לשאת בעלויות שהוא גורם במערכת ייצור החשמל ואספקתו. צרכני התעו"ז משלמים עבור החשמל שהם צורכים בהתאם לעלות הפקתו, בעוד שצרכני התעריף האחיד משלמים תעריף המבוסס על העלות הממוצעת של מאפייני צריכתם השנתית הכוללת."

(הגדרת הרשות לשירותים ציבוריים, חשמל)

ההבדל בין תעריפי תעו"ז לבין התעריף הקבוע מייצג את העלות השולית (חיובית או שלילית) ליצור חשמל בישראל בכל רגע נתון.

**טבלה א-3: תעריפי החשמל לפי שעות היממה ותקופות השנה, אג'/קוט"ש, ללא מע"מ**
(לוח תעריפים מיום 1/2/2011)

| עונה | פסגה | גבע | שפל | התעריף האחיד |
|---|---|---|---|---|
| חורף | 91.25 | 53.47 | 30.51 | 41.32 |
| מעבר | 41.94 | 34.07 | 26.98 | 41.32 |
| קיץ | 100.89 | 43.16 | 27.89 | 41.32 |

העלות העודפת של החשמל הנצרך בתקופות השיא שווה להפרש בין תעריף התעו"ז לאותו זמן, בהתייחס לעומס ולעונת השנה, לבין התעריף האחיד. חישוב המביא בחשבון את ההבדלים בביקוש, לפי דפוסי צריכת החשמל בבנייני המגורים בישראל בפועל, מראה כי העלות הנוספת של חשמל בשעות השיא שווה לעלייה במחיר של כלל החשמל למגורים בישראל בשיעור של 3.66 אגורות לקוט"ש.

### ג. חיסכון כתוצאה מדחיית הקמת תחנת יצור שבתכנון (VoD)

חיסכון באנרגיה בהיקף רחב מאוד עשוי לדחות הקמה של תחנות ייצור (פחמיות) שבתכנון. עלות הקמת תחנות אלו והתשתיות הנדרשות להפעלתן מוערכים בחמישה מיליארד ש"ח (על פי תכנית

[9] Tietenberg, 2005

ההצטיידות של חברת החשמל לשנים 2011-2015), כשהריבית השנתית על סכום זה היא כ – 150 מיליון שקל (בהנחה ששיעור הריבית השנתית הוא 3%).

בהתחשב בכך ששיעור הגידול השנתי בביקוש לחשמל הוא כ-3% (כפי שהיה בעשור האחרון), הקטנת צריכת החשמל הכוללת ב-5 אחוז, הפחתה אפשרית בהחלט, שקולה לדחיית ההשקעה בהקמת תחנת ייצור שבתכנון בשנה וחצי, בקירוב. ערך הריבית בגין דחייה כזו, המחולק בשווי הכולל של תצרוכת החשמל השנתית במדינה (כ-50 מיליארד קוט״ש), שווה ערך ל-0.02 אגורות לכל קוט״ש נחסך, בקירוב.

## 2.3 תרומה לביטחון אספקת אנרגיה

ידוע כי קצב ההפקה של אנרגיה ממקור חדש, כגון נפט, גדל במהירות סמוך לאחר התגלית, מגיע לשיא, ואח״כ חלה ירידה הדרגתית בקצב הניצול. פרופיל השינוי לאורך זמן שונה לפי סוג המשאב, אולם המגמה הכללית ברורה: הזמינות של אנרגיה ממקורות משתנים חייבת להיות מוגבלת בזמן – אף כי יתכן שיעברו עוד עשרות או אף מאות שנים עד שיתכלו כל מקורות הנפט, הפחם והגז הניתנים לניצול. לפיכך, יש צורך להיערך לעתיד שבו דפוסי השימוש באנרגיה יהיו שונים מאלו המוכרים לנו היום. ההתאמה הזאת – אף שכאמור יתכן כי תתרחש רק בעוד זמן רב – תהיה קלה יותר ככל שהתלות באנרגיה בחיי היום-יום תהיה קטנה יותר.

במקביל לשינויים אפשריים במקורות האנרגיה בטווח הארוך, על הכלכלה העולמית להיערך גם לפגיעה בלתי צפויה באספקה, כגון אלו שהתרחשו בעקבות מלחמת יום הכיפורים ב-1973 והמהפכה באיראן ב-1979. משק מודרני אינו יכול לפעול ללא אספקה סדירה של אנרגיה, ופגיעות כאלו עלולות להביא לעלייה חדה במחיר ולשיבוש סדרי החיים התקינים.

המצב של ישראל הוא רגיש במיוחד, הן בשל היותה ׳אי אנרגטי׳, אשר אינו יכול להסתמך על אספקת אנרגיה (ובעיקר חשמל) ממדינות שכנות במקרה של תקלה בתשתית החשמל; והן בשל היותה חשופה לאיום מצד גורמים עוינים. הגילוי של מאגרי הגז התת-ימיים אמנם מקטינים את תלותה של המדינה ביבוא אנרגיה ממדינות אחרות – אך גם הופכת אותה לפגיעה יותר למשעי מלחמה.

מכל הטעמים האלה, רצוי כי התלות באנרגיה לחיי היום-יום תהיה מועטה ככל האפשר. היכולת לקיים אורח חיים תקין גם לנוכח הקטנה אפשרית ביכולת האספקה של מערכת החשמל, תקנה למשק (ולפרט) עמידות רבה יותר (resilience).

**א. תמהיל הדלקים במשק האנרגיה והסיכונים הנלווים**

משק החשמל הישראלי, ומשק האנרגיה בכלל, מתבסס על מספר מוגבל ביותר של מקורות אנרגיה. ייצור החשמל נמצא בתהליך של שינוי, כאשר את מרכיב תזקיקי הנפט כמקור לאנרגיה זמינה בשעות השיא מחליף הגז הטבעי. תכנית הפיתוח של משק החשמל צופה כי מגמה זו תימשך, ומרכיב הגז הטבעי בייצור החשמל יגדל עד לכדי אספקת כשני שליש מהביקוש. יחד עם זאת, בין היתר בשל מאפייני ההפעלה של התחנות הפועלות בפחם, הן תמשכנה לספק את המרכיב הקבוע (base load) בביקוש.

לגז הטבעי יתרונות רבים: מחירו נמוך יחסית, ופחות תנודתי בהשוואה לנפט; הוא מזהם פחות מכל מקורות האנרגיה המתכלים; וניתן להשתמש בו בתחנות כוח של מחזור משולב, שהן חסכונית בקרקע וזולות יחסית בהקמה. החיסרון המרכזי של השימוש בגז טבעי הוא הסיכון של פגיעה בסדירות האספקה: פגיעה בצנרת משבשת לחלוטין את הובלתו ממקורות מקומיים; האחסנה של יקרה ומוגבלת בהיקפה; והיבוא יקר וכרוך בהקמת תשתית הובלה מיוחדת.

לא מעט נכתב על הפוטנציאל של אנרגיה מתחדשת, ובעיקר אנרגיה סולרית, להקטין את התלות הצפויה בגז הטבעי. אין ספק כי ראוי להקדיש מאמצים רבים יותר מכפי שהושקעו עד כה בפיתוח מקורות אלה. יחד עם זאת, ראוי גם לקיים השוואה בין עלות אמצעי החיסכון לבין עלות אמצעי הייצור: מחקרים רבים הראו כי לשימור האנרגיה יתרון כלכלי מובהק במרבית התרחישים.

לשימור אנרגיה ישנם מספר יתרונות מובהקים על פני ייצור אנרגיה חלופית, ובפרט על פני אנרגיה חשמלית סולרית:

- חיסכון בתשתית הולכה: שימור אנרגיה אינו דורש תשתית אנרגיה כלשהי – בין זו הקיימת ממילא ובין תשתית נוספת מאתרי הייצור הסולריים.
- התאמה מרבית בין ביקוש להיצע בהיבט העיתי: החיסכון המרבי עשוי להתקבל דווקא בשעות שבהן הביקוש עלול היה להיות בשיאו.
- התאמה מרבית בין ביקוש להיצע בהיבט המרחבי: החיסכון המרבי עשוי להתקבל בדיוק באותם אזורים שבהם הביקוש היה עשוי להיות מרבי.
- חשיפה מזערית לפגיעה במקרה של מלחמה: מאחר וחיסכון אינו דורש תשתית אשר עלולה להוות מטרה בימי מלחמה, הוא בטוח לחלוטין בפני פגיעה ממקורות חיצוניים.
- תלות פחותה בתנאי מזג האוויר: שיאי הביקוש לחשמל מתרחשים בתנאי מזג אוויר קשים – ימים קרים בחורף או גלי חום בקיץ, בשל הגידול בביקוש לבקרת אקלים הפנים בבניינים (חימום או קירור). יחד עם זאת, לא קשה לתכנן בניינים אשר צריכת האנרגיה שלהם לאקלום היא קטנה ביותר, ובכלל זה בנייני מגורים, מבלי לפגוע בנוחות התרמית ובאיכות החיים של הדיירים.

## 2.4 תרומה לקיימות

### א. פיתוח בר-קיימא

ישנן הגדרות רבות לפיתוח בר-קיימא. ההגדרה הנפוצה ביותר היא ההגדרה שנוסחה על ידי הועדה לסביבה ופיתוח שכונסה על ידי האומות המאוחדות, והידועה בכינוי ועדת ברונטלנד[10]:

> "Humanity has the ability to make development sustainable – to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs."
>
> "לאנושות היכולת ליצור פיתוח בר קיימא – לוודא שהוא נותן מענה לצורכי ההווה מבלי לפגוע ביכולתם של הדורות הבאים למצוא מענה לצורכיהם."

הועדה גם קבעה כי:

> "Sustainable development is not a fixed state of harmony, but rather a process of change in which the exploitation of resources, the direction of investments, the orientation of technological development, and institutional change are made consistent with future as well as with present needs."
>
> "פיתוח בר קיימא אינו מצב הרמוני בלתי משתנה, אלא תהליך של שינוי אשר בו ניצול המשאבים, יעדי ההשקעות, הכוונת הפיתוח הטכנולוגי ושינויים מוסדיים נעשים תוך התייחסות לצורכי העתיד כמו גם להווה."

[10] United Nations, 1987

ההגדרה של ועדת ברונטלנד מדגישה את עקרון השוויון הבין-דורי, ואת שינוי ההשקפה על היחס בין האדם והעולם ומשאביו מיחס של בעלות, אדנות וניצול ליחס של אחריות, שמירה וניטור. היא מהווה גם הרחבה של מושג ההורות – מזה הפרטי והמובן מאליו של הרצון והחובה של הורים לדאוג לצאצאיהם לדאגה לחברה האנושית בכללותה. הדור הנוכחי חייב לדאוג לצרכיו (על ידי פיתוח) אולם הוא צריך לעשות זאת תוך כדי שמירה על משאבי הסביבה באופן כזה שגם הדורות הבאים יוכלו לדאוג לצרכיהם.

יישום הקיימות בבניינים חייב אפוא לבטא לא רק חיסכון בצריכת אנרגיה ממקורות מתכלים – בכדי לשמר את זכויות הדורות הבאים – אלא גם להבטיח תנאי חיים נאותים בהווה. כלומר, חיסכון בצריכת אנרגיה אמנם רצוי בפני עצמו, אך יש לבחון אותו בהקשר הרחב של פיתוח. השאלה שתידון במדריך הזה היא כיצד ניתן לשלב בין שני העקרונות באופן מיטבי.

## 3. שימור אנרגיה בבניינים בארץ ובעולם

בני האדם צרכו אנרגיה בבניינים כמעט משחר ההיסטוריה: נרות שימשו לתאורה ואש הובערה באח לחימום במשך אלפי שנים. לא מעט נכתב על האופן שבו הותאמו בניינים לסביבתם בכדי לספק מגורים נאותים בהעדר מערכות מתקדמות לבקרה על התנאים אשר שררו בהם. לא אחת נטען גם כי על החברה המודרנית ללמוד מהבנייה המסורתית בכדי להימנע מהשגיאות אשר אפיינו את הבנייה בעשרות השנים האחרונות, עת התפתחה תלות גוברת והולכת באנרגיה מתכלה. אולם חיקוי של דגמים היסטוריים, ללא הבנה מעמיקה של הסיבות אשר הביאו לגיבוש הפתרונות המאפיינים אותם, מתעלם ממספר היבטים חשובים:

א. גם אם הפתרונות היו מתאימים לזמנם, הצרכים היום שונים. הסיסמא אשר עודדה שימוש בחשמל בארץ בשנות הששים של המאה העשרים – "יותר חשמל – פחות עמל" מבטאת לא רק שאיפה לחיים נוחים יותר, אלא שינוי מהותי באורחות החיים ובמשך הזמן המוקדש למשימות אשר בעבר מילאו את עיקר זמנן של עקרות הבית (בעיקר), כגון כביסה.

ב. פיתוח של חומרים חדשים וטכנולוגיות אשר לא היו קיימים לפני מאות או אפילו עשרות שנים נותן בידי המתכנן אפשרויות אשר לא היו בידיו קודם – ולכן מרחב הפתרונות היום גדול יותר וכולל פתרונות אשר עשויים להיות טובים בהרבה. למשל: פיתוח ציפוי בעל פליטות נמוכה (low-e) המיושם על גבי זכוכית מאפשר להפחית מאוד את מעבר החום דרך השמשה, כך שבניין בעל שטחי זיגוג גדולים עשוי להרוויח חום מהסביבה גם באקלים קר מאוד.

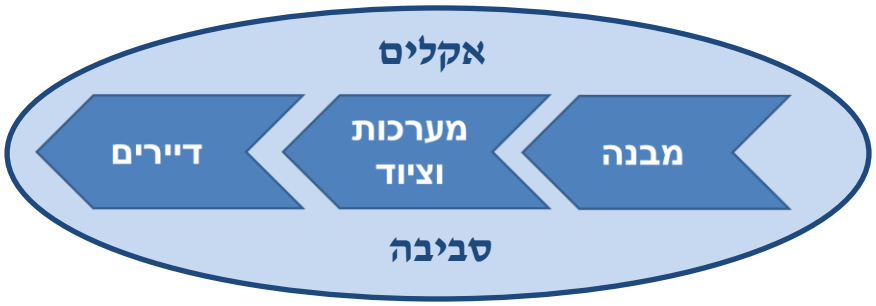
ג. הדמיון בין הבניין ההיסטורי לבין היישום המודרני עלול להיות שטחי, בעיקר בהיבט הצורני, בעוד שהבדלים לכאורה קטנים עשויים להתברר כמשמעותיים בהיבט התפקודי.

## 4. גורמים המשפיעים על צריכת אנרגיה

צריכת האנרגיה בבניינים מושפעת מארבעה גורמים עיקריים: מאפייני המבנה; המערכות המותקנות בו והציוד הנמצא בו; דפוסי ההתנהגות של הדיירים; והסביבה שבה נמצא הבניין, ובעיקר תנאי האקלים אליהם הבניין חשוף (איור א-1).

צריכת האנרגיה של בניין מושפעת **מתנאי האקלים והסביבה** אליהם הוא חשוף. מרבית האנשים נוטים לחשוב בהקשר הזה על טמפרטורת האוויר כאל גורם מכריע, אולם כפי שיוסבר בהמשך, הטמפרטורה היא רק אחד מתוך מספר גורמי אקלים המשפיעים על צריכת האנרגיה של בניין: הלחות ומידת החשיפה לקרינת השמש עשויים להיות בעלי השפעה רבה מאוד, ואפילו למהירות הרוח יש השפעה על מאזן האנרגיה של בניין. מידת החשיפה של הבניין לאקלים מושפעת ממיקומו ביחס לבניינים אחרים ומהטופוגרפיה, כך שייתכן שבבניינים זהים הנמצאים באותו ישוב תהיה

דרישה שונה לאקלום. גם דירות שונות באותו בניין עשויות לתפקד בצורה שונה, כאשר ההבדלים נובעים מהמפנה ומהגובה מעל פני הקרקע.




**איור א-1: גורמים המשפיעים על צריכת האנרגיה בבניין**

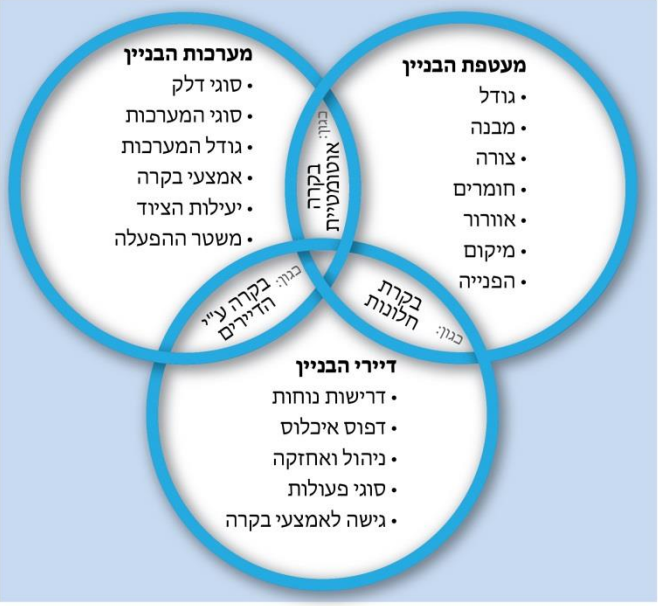
**מאפייני המבנה** עשויים להשפיע במידה רבה על דרישת האנרגיה לאקלום. הגורמים החשובים ביותר בהקשר הזה הם תכנון מערכות הזיגוג - גודלם של שטחי הזיגוג, המפנה שלהם וסוג ההצללה; ההתנגדות התרמית של מעטפת הבניין; מידת האטימות של הבניין לחדירת אוויר לא מבוקרת, ובמקביל הפוטנציאל לאוורור מבוקר; ויכולת הבניין לאגור אנרגיה (מסה תרמית). מרבית המאפיינים האלה נקבעים בזמן התכנון והבנייה של הבניין: האפשרות לערוך שינויים מהותיים אחרי שהבנייה הושלמה מוגבלת ביותר, ובדרך יקרה הרבה יותר מאשר יישום אותם אמצעים במהלך הבנייה הראשונית. לכן ישנה חשיבות רבה לבנות את הבניין 'נכון' מלכתחילה.

בנייה נכונה של המבנה אינה יכולה להבטיח, בפני עצמה, תפקוד יעיל בהיבט שימור האנרגיה. צריכת האנרגיה נעשית באופן ישיר לא על ידי שלד הבניין או המעטפת שלו – אלא על ידי **המערכות המותקנות בו והציוד** הנמצא בו. ראוי בהקשר הזה לעשות אבחנה בין מערכות הבניין (building services), המותקנות בו באופן קבוע ואשר תכונותיהן נקבעות במידה רבה עוד בזמן תכנון הבניין או עקב תכונות המבנה, ובין ציוד צורך אנרגיה אשר אינו מהווה חלק מהבניין עצמו. בקבוצה הראשונה ניתן לכלול מערכות לאקלום (במיוחד מערכות מרכזיות) ומערכות לחימום מים. בבניינים גבוהים מותקנות גם מערכות נוספות, כגון מעליות ומשאבות מים. תכנון יעיל של המערכות האלה עשוי לחסוך אנרגיה רבה לאורך שנים רבות, משום שאורך החיים שלהן עשוי להיות עשרות שנים. יחד עם זאת, חשוב כי המערכות יתוחזקו היטב, כי תהיה בקרה מתמדת על יעילות פעולתן וכי תבוצע תחזוקה שוטפת: לכל אלה השפעה על צריכת האנרגיה. בנוסף למערכות, בכל דירה ישנו ציוד צורך אנרגיה השייך לבעלי הדירה ואינו מהווה חלק ממנה, כגון מוצרי חשמל לבנים [11] ומערכות תקשורת, מידע ובידור. מערכות אלה הן בדרך כלל בעלות אורך חיים קצר יותר ממערכות הבניין, ובשנים האחרונות יעילותן האנרגטית הולכת וגדלה. עם זאת, תרומתן לצריכת האנרגיה הכוללת של הבניין הולכת וגדלה, משום שמספרן הולך וגדל ומשום שהשימוש בהן נעשה אינטנסיבי יותר. צריכת האנרגיה של מכשירי החשמל והאלקטרוניקה כמעט ואינו מושפע ממאפייני הבניין עצמו או מתנאי האקלים. מערכות התאורה בבניין ראויות להתייחסות מיוחדת: הן אמנם מותקנות בבניין (לפחות חלקן), ותכנון הבניין עשוי להשפיע על הצורך בהן והיקף השימוש, אך צריכת האנרגיה שלהן מושפעת במידה לא מעטה גם ממאפייני גופי התאורה ודפוסי השימוש של הדיירים.

[11] מוצרי חשמל 'לבנים' הם מכשירי חשמל ביתיים כגון מקררים, מכונות כביסה, מדיחי כלים וכו', אשר בעבר היה מקובל כי הם צבועים לבן.

גורם אשר יש לו השפעה רבה מאוד על צריכת האנרגיה הוא **התנהגות הדיירים**: אין די בתכנון נכון של המבנה ובאפיון של מערכות יעילות וציוד חסכוני – לגורם האנושי ישנה השפעה רבה על צריכת האנרגיה. לדיירים ישנה השפעה על צריכת האנרגיה בשני היבטים: התנהגותם וסגנון החיים שלהם משפיעים על הצורה שבו נעשה שימוש במערכות ובמכשירי החשמל; ומידת המודעות שלהם עשויה להיות בעלת השפעה רבה על בקרת התפקוד של מערכות הזיגוג, לרבות שימוש נכון באמצעי הצללה ופתיחה מתאימה של החלונות לאוורור.

איור א-2 מדגים את הקשרים ההדדיים בין מבנה הבניין, מאפייני המערכות והציוד והתנהגות הדיירים – ואת האופן שבו אלו משפיעים על צריכת האנרגיה. הדיירים יכולים להשפיע באופן ישיר על מעבר האנרגיה דרך מעטפת הבניין, ועל תפקוד המערכות. בנוסף לכך, ישנן מערכות אשר פעולתן מבוקרת באופן אוטומטי ולדייר אין בדרך כלל שליטה על אופן פעולתן, כגון משאבות מים או מעליות.




**איור א-2:**

**היחסים ההדדיים בין הגורמים המשפיעים על צריכת האנרגיה בבניין[12].**

על מנת להבין מהי חשיבותם של הגורמים השונים, יש לבחון ראשית את חלקם היחסי בצריכת האנרגיה בדירת המגורים האופיינית.

## 4.1 שיעור צריכת החשמל לאקלום

אין נתונים עדכניים ומבוססים על התפלגות צריכת החשמל בבנייני מגורים בישראל, היכולה להעיד על חשיבותם היחסית של מערכות למיזוג אוויר, למשל, בהשוואה למכשירי חשמל לבנים. דו"ח מקינזי (2009) מביא אומדן כללי להתפלגות צריכת החשמל בבנייני מגורים בישראל (תרשים א-5). לפי התרשים, התפלגות זו דומה להתפלגות במדינות מפותחות רבות אחרות, אולם הדו"ח אינו מציין את מקור הנתונים, וברור כי ייתכנו הבדלים בין מדינות שונות בצריכת האנרגיה למיזוג ולחימום הנובעים מתנאי האקלים.

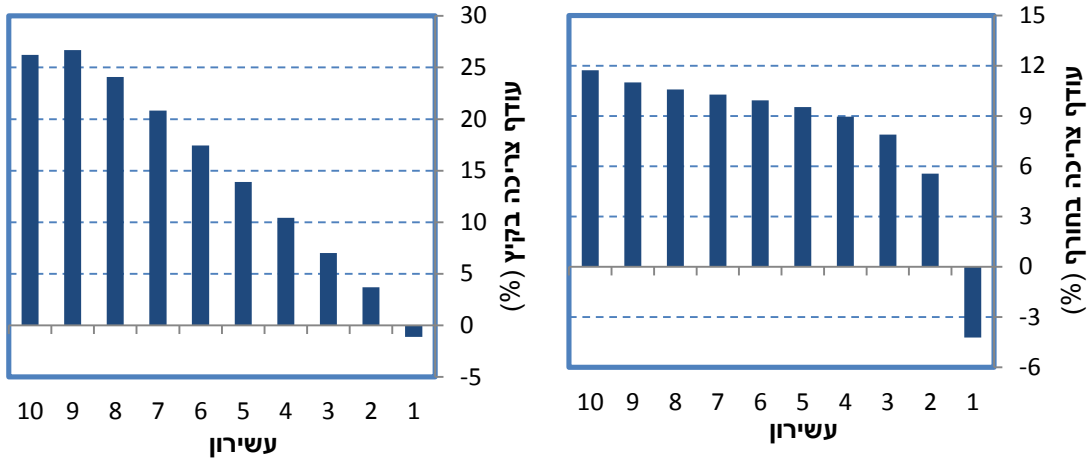
[12] CIBSE, 2004

**תרשים א-5:**

**התפלגות צריכת החשמל במבני מגורים בישראל**
(מקינזי, 2009)

לעומת זאת, כאשר משווים את צריכת החשמל בעונות השנה השונות, מתקבלת תמונה שונה. לפי נתוני חברת החשמל לשנים 2007-2011 (טבלה א-4), החודש בו צריכת החשמל הביתית היא הנמוכה ביותר הוא חודש אפריל, בו היתה צריכה הממוצעת במגזר זה בחמש השנים 2007-2011 כ-996 מיליון קוט"ש. אם מניחים כי בחודש אפריל כמעט ואין דרישה לחימום או לקירור, ומתעלמים מהבדלים בצריכת החשמל של מערכות אחרות שאף היא מושפעת מגורמים עונתיים (כגון תאורה וחימום מים), הרי שההבדל בין חודש אלה לחודשי הקיץ והחורף נובע בעיקר מדרישה לאקלום. באותה תקופה, היה הגידול בחודש אוגוסט גידול של כ-61 אחוז בממוצע (כ-1,607 מיליון קוט"ש) ובחודש ינואר גידול של כ-51% בממוצע (כ-1,506 מיליון קוט"ש). לבסוף, כאשר סוכמים את ההפרש המצטבר בין חודש אפריל לבין שאר חודשי השנה, מתקבל עודף צריכה של כ-3,410 מיליון קוט"ש, המהווים כ-22 אחוזים מצריכת החשמל השנתית במגזר הביתי. נתון זה נמוך במידה ניכרת מהאומדן שהוצג בדו"ח מקינזי.

צריכת החשמל לאקלום מושפעת במידה רבה מהמצב החברתי-כלכלי של משקי הבית. אף כי למעלה מ-81 אחוז ממשקי הבית היו בשנת 2011 בעלי מזגן אחד לפחות (לפי נתוני למ"ס), ואפילו בעשירון התחתון היתה הבעלות מעט יותר מ-50%, השימוש במזגנים בפועל מושפע מאוד מהיכולת הכלכלית לשלם עבור הפעלתם. לפי נתוני חברת החשמל, העשירון התחתון אינו צורך יותר חשמל בחודשי החורף והקיץ מאשר בחודשי האביב (למעשה – הצריכה אפילו מעט נמוכה יותר). אולם ככל שצריכת החשמל של משק הבית עולה – גדל גם ההבדל העונתי. הבדל זה, כאמור, מיוחס בעיקר לאקלום. עודף הצריכה בחודשי הקיץ (יולי-אוגוסט) בהשוואה לממוצע עונות המעבר (מרץ-יוני וספטמבר-נובמבר) עולה על 25% בקרב שני העשירונים העליונים, בהתייחס לצריכת חשמל, אך הינו זניח בשני העשירונים התחתונים.




**תרשים א-6: הגידול בצריכת החשמל בחורף ובקיץ בהשוואה לצריכה הממוצעת בעונות המעבר, לפי עשירונים** (נתונים: חברת החשמל, 2011).

**טבלה א-4: צריכת החשמל החודשית במגזר הביתי בשנים 2007-2011 (מיליון קוט"ש).**
**(מקור: חברת החשמל - דין וחשבון סטטיסטי לשנת 2011)**

| | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | ממוצע |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ינואר | 1,550.90 | 1,744.80 | 1,448.70 | 1,319.20 | 1,470.40 | 1,506.80 |
| פברואר | 1,263.90 | 1,504.60 | 1,261.70 | 1,034.20 | 1,306.40 | 1,274.16 |
| מרץ | 1,283.60 | 1,050.80 | 1,232.20 | 1,226.30 | 1,282.40 | 1,215.06 |
| אפריל | 1,006.80 | 964.10 | 934.10 | 1,040.30 | 1,039.50 | 996.96 |
| מאי | 1,001.80 | 1,043.30 | 1,045.20 | 1,002.10 | 1,038.90 | 1,026.26 |
| יוני | 1,178.20 | 1,202.40 | 1,253.20 | 1,248.30 | 1,272.50 | 1,230.92 |
| יולי | 1,474.60 | 1,469.30 | 1,596.40 | 1,575.10 | 1,601.80 | 1,543.44 |
| אוגוסט | 1,480.00 | 1,558.40 | 1,532.60 | 1,871.50 | 1,592.60 | 1,607.02 |
| ספטמבר | 1,313.60 | 1,297.60 | 1,315.40 | 1,663.20 | 1,430.90 | 1,404.14 |
| אוקטובר | 1,107.90 | 1,111.50 | 1,160.30 | 1,222.70 | 1,162.60 | 1,153.00 |
| נובמבר | 1,050.40 | 1,005.60 | 1,055.90 | 1,058.30 | 1,248.50 | 1,083.74 |
| דצמבר | 1,337.40 | 1,249.10 | 1,281.30 | 1,329.50 | 1,462.30 | 1,331.92 |
| שנתי | 15,049.00 | 15,201.40 | 15,117.00 | 15,590.80 | 15,908.60 | 15,373.36 |

## מקורות

[1] אראל א., בקר נ. ופרידמן ח. (2013). שיפוץ בנייני מגורים בישראל לשם חיסכון באנרגיה. דו"ח סופי במחקר, משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים. 129 עמ'.

[2] חברת החשמל לישראל (2012). דין וחשבון סטטיסטי לשנת 2011.

[3] לשכה מרכזית לסטטיסטיקה (2011). סקר הוצאות משק הבית 2011 : סיכומים כלליים.

[4] מקינזי (2009). פוטנציאל הפחתת גזי חממה בישראל. 123 עמ'.

[5] Hartkopf V. and Loftness V. (1999). Global relevance of total building performance. *Automation in Construction,* **8**(4), 377-393.

[6] Jager-Waldau A. (2007). Photovoltaics and renewable energies in Europe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* **11**(7), 1414-1437.

[7] The Chartered Institution of Building Engineers (CIBSE) (2012). Energy Efficiency in Buildings, CIBSE Guide F.

[8] Tietenberg, T. (2005). Environmental and Natural Resource Economics (Seventh Edition) Prentice-Hall, 656p.

[9] United Nations. (1987). Report of the World Commission on Environment and Development, General Assembly Resolution 42/187, 11 December 1987.

# פרק ב:
# אקלים

ב

# פרק ב: אקלים

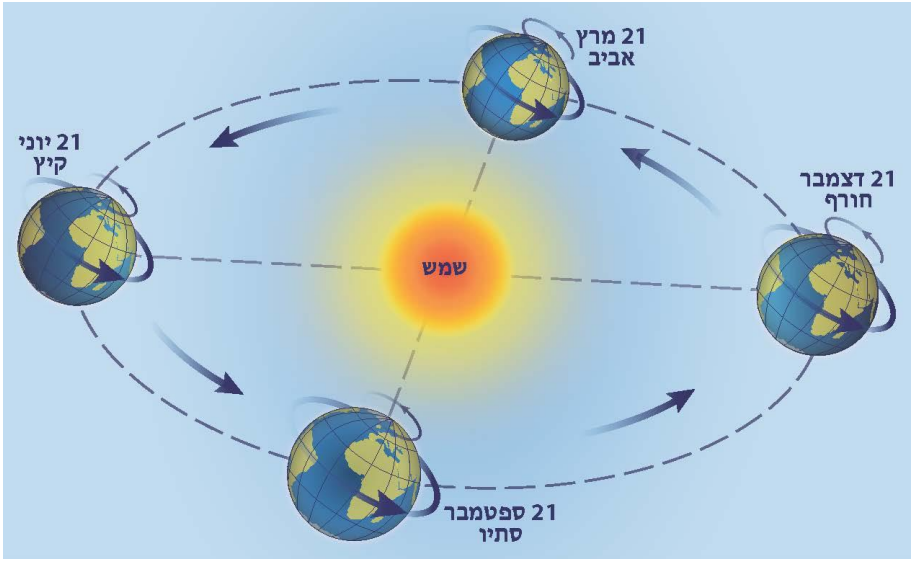
מידע אקלימי דרוש לכל מתכנן המבקש לקיים בחינה מדויקת של התפקוד האקלימי של הבניין כולו, או של רכיבים ומערכות מסוימים באופן פרטני. בחינה כזאת לא מתבצעת בדרך כלל במרבית הפרויקטים, הן משום שמרבית הפתרונות הם פתרונות 'מדף' מקורבים, והן משום שרבים מהמתכננים אינם יודעים לבצע את החישובים הנדרשים. אחדות מתוכנות המחשב הנמצאת כיום בשימוש מאפשרות לערוך הדמיות תרמיות, ולפעמים הן מצוידות גם בבסיסי הנתונים האקלימיים הדרושים. יחד עם זאת, חשוב להבין את העקרונות העומדים מאחורי הכלים, כמו גם את המגבלות שלהם. פרק זה יכלול סקירה של נתוני אקלים והשפעתם על תכנון הבניין, ויציג מושגי יסוד כגון יום לתכנון (design day) ושנה מטאורולוגית אופיינית (TMY).

## 1. גיאומטריית שמש

קרינת השמש מהווה מרכיב עיקרי במאזן האנרגיה בבניינים. בין אם מדובר באנרגיה רצויה, התורמת לחימום הבניין בחורף, ובין אם מדובר באנרגיה המגדילה את עומס החום על הבניין בקיץ – לא ניתן להתעלם מהשפעתה. הקושי העומד בפני המתכננים בהתייחס לקרינת השמש נעוץ בעובדה שעוצמתה משתנה כתלות בזמן ובמרחב, והמעשה האדריכלי חייב להביא זאת בחשבון.

### 1.1 תנועת כדור הארץ במערכת השמש

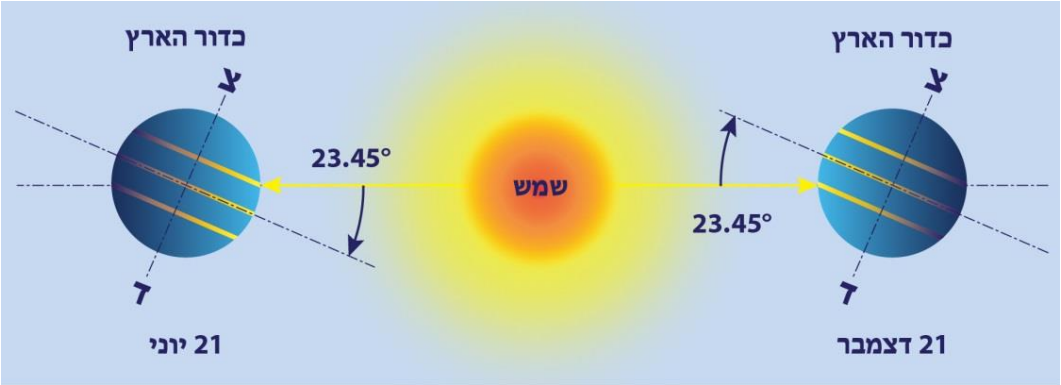
כדור הארץ הינו כוכב לכת בעל קוטר של 12,700 ק"מ בקירוב, המקיף את השמש בתנועה מעגלית במרחק של כ-150 מיליון ק"מ (איור ב-1). (למעשה, התנועה הינה מעט אליפטית, והמרחק של כדור הארץ מן השמש נע בין כ-147 מיליון ק"מ ב-1 בינואר ל-152 מיליון ק"מ ב-1 ביולי). הקפה שלמה של השמש אורכת 365.26 ימים. מאחר ועל פי הלוח ישנם רק 365 ימים בשנה, נהוג להוסיף יום אחד מדי ארבע שנים (שנה מעוברת), ויום אחד נוסף פעם במאה שנים בכדי לפצות על ההפרש הנותר.




**איור ב-1: תנועת כדור הארץ סביב השמש**

## 1.2 סיבוב כדור הארץ סביב צירו

מלבד התנועה סביב השמש, סובב כדור הארץ גם סביב צירו. משך הסיבוב הינו 24 שעות, ומהלך של סיבוב שלם מכונה יממה. ציר הסיבוב של כדור הארץ איננו ניצב למישור שבו סובב כדור הארץ את השמש, אלא נטוי ביחס אליו בזווית של 23.45 מעלות. זווית זו קבועה במרחב, ואינה משתנה במהלך סיבוב כדור הארץ סביב השמש (איור ב-2).



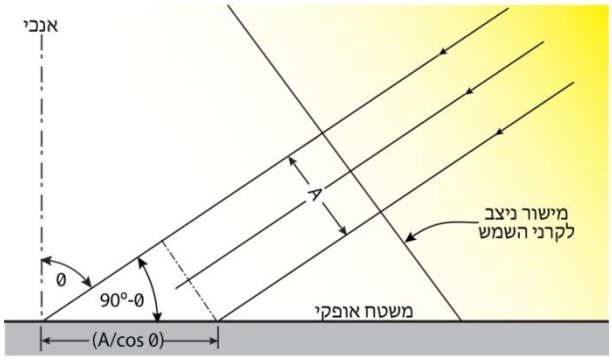

**איור ב-2: הזווית בין ציר הסיבוב של כדור הארץ לבין מישור התנועה שלו סביב השמש**

לנטייה של ציר הסיבוב ישנה השפעה מכרעת על הזמינות והעוצמה של קרינת השמש במקומות שונים על פני כדור הארץ, והיא אף הגורם להופעת עונות השנה.

- כאשר במהלך ההקפה פונה חצי הכדור הצפוני כלפי השמש, שורר בחצי הכדור הזה קיץ, בעוד שבחצי הכדור הדרומי שורר באותה עת חורף.
- כאשר במהלך ההקפה פונה חצי הכדור הדרומי כלפי השמש, שורר בחצי הכדור הזה קיץ, בעוד שבחצי הכדור הצפוני שורר באותה עת חורף.
- עונות המעבר (אביב וסתיו) מתרחשות כאשר שני חצאי כדור הארץ חשופים לשמש במידה דומה.

הזווית בין קרני השמש ופני כדור הארץ בנקודה כלשהי משפיעה על שטף הקרינה הפוגע בקרקע במספר אופנים:

- מאחר והאוויר אינו שקוף לחלוטין לקרינת השמש, חלק ממנה נבלע באטמוספירה. ככל שהמסלול שעל הקרניים לעשות באטמוספירה ארוך יותר, כך גדלה הבליעה וקטנה עוצמת הקרינה הנמדדת בסופו של דבר על פני הקרקע. המסלול הקצר ביותר מתרחש כאשר הקרניים פוגעות בניצב לפני הקרקע.
- את עוצמת קרינת השמש נהוג למדוד במישור הניצב לכיוון הקרניים. כאשר הקרינה אינה פוגעת בניצב לפני השטח, הקרניים מאירות שטח גדול יותר, ולכן שטף הקרינה נמוך יותר בהתאמה (איור ב-3). הירידה בעוצמת הקרינה הינה יחסית לקוסינוס הזווית בין המישור לבין הקרניים. כאשר הקרינה ניצבת למישור, כלומר זווית הפגיעה הינה 90 מעלות, יהיה קוסינוס הזווית שווה ל-1, ולא תהיה הפחתה בשטף הקרינה המתקבל.



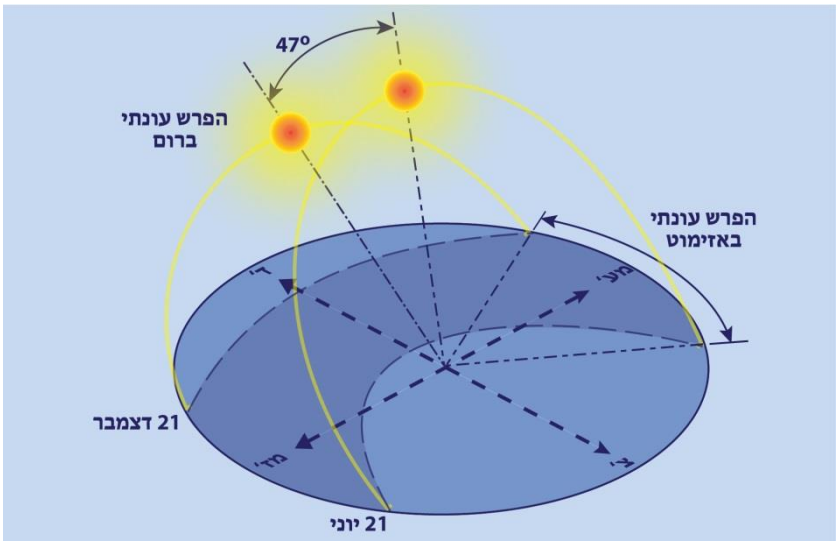

**איור ב-3:**

**השפעת זווית קרני השמש על שטף האנרגיה הפוגע בפני הקרקע.**

## 1.3 "מסלול השמש" ביחס לצופה על פני כדור הארץ

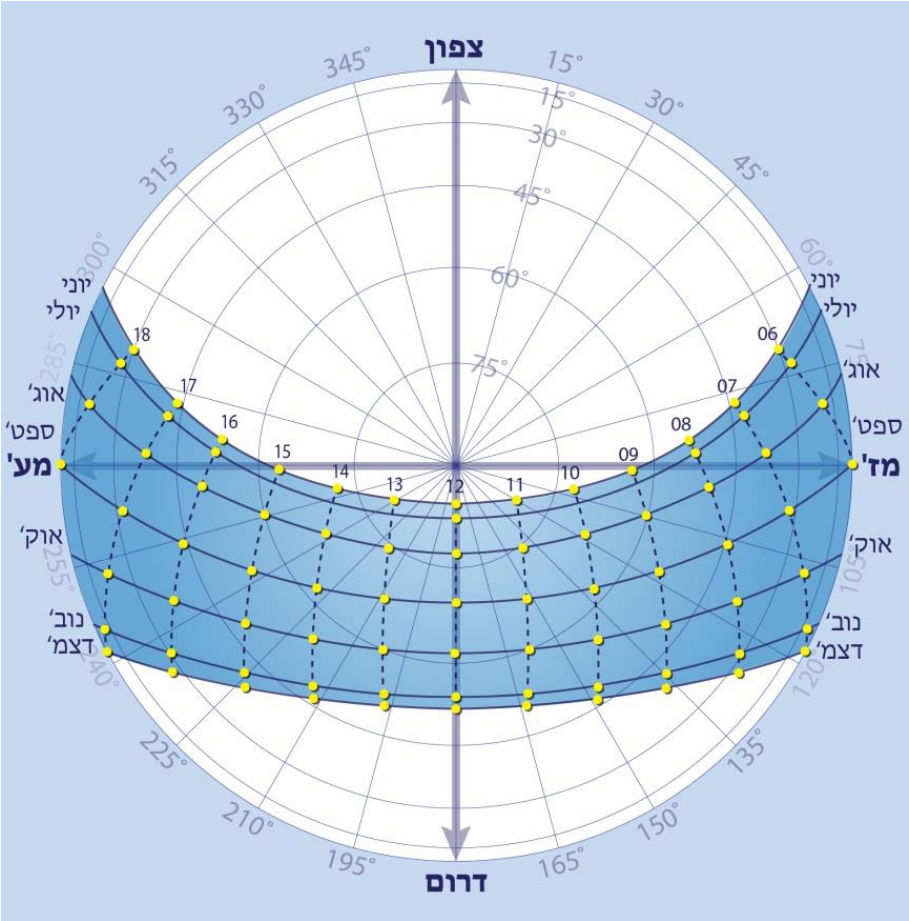
לצופה הנמצא על פני כדור הארץ נראה כאילו השמש נעה סביבו. כפי שתואר לעיל, התנועה היחסית הזו נובעת מסיבוב כדור הארץ סביב צירו וממהלך סיבובו סביב השמש. אולם מן הבחינה המעשית נוח יותר לתאר את התנועה על פי המיקום היחסי של השמש, כאשר מניחים שהצופה הוא נייח, הקרקע היא מישורית ואילו כיפת הרקיע מתוארת על ידי חצי כדור. את המיקום היחסי של השמש (להלן: "מיקום השמש") ניתן אפוא לתאר על ידי שתי זוויות (איור ב-4):

- רום (altitude) – הזווית שבין קרני השמש והמישור האופקי (נמדדת במישור אנכי)
- אזימוט (azimuth) – הזווית האופקית שבין השמש לבין הצפון הגיאוגרפי, הנמדדת עם כיוון השעון. כלומר, מזרח = $90^o$, דרום = $180^o$, מערב = $270^o$ וצפון = $360^o$.




**איור ב-4: מסלול השמש ברקיע ביחס לנקודה על פני כדור הארץ, בקיץ ובחורף.**

את מסלול השמש ביחס לצופה על פני כדור הארץ ניתן לתאר בצורה גרפית במספר שיטות. בשיטה הנפוצה ביותר מתואר הרום מעל האופק על ידי מעגלים קונצנטריים במרחקים שווים והכיוון ביחס לצפון על ידי קוים רדיאליים היוצאים ממרכז המעגל (איור ב-5). מהלך השמש מתואר על ידי עקומה אופיינית לכל יום בשנה, אולם מטעמי נוחיות נהוג לציין יום אחד בלבד בכל חודש. את שאר הימים ניתן למצוא על ידי אינטרפולציה.




**איור ב-5: תיאור מסלול השמש על גבי היטל אופקי עם מעגלים קונצנטריים שווי-מרחק, לפי שעות היממה ועונות השנה, עבור קו רוחב 32 צפון.**

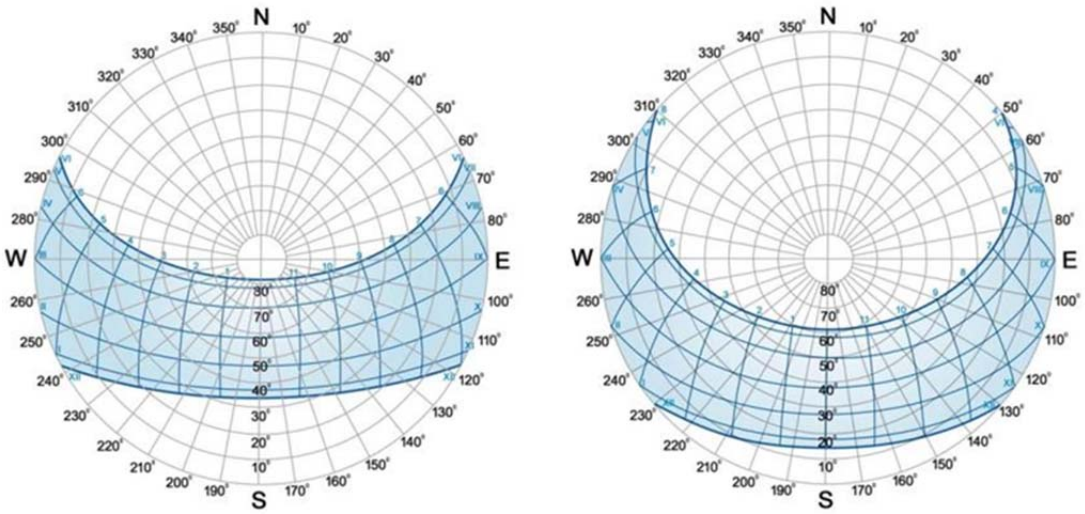
## 1.4 השפעת עונות השנה על מסלול השמש

מיקום השמש ברקיע משתנה לאורך היום במסלול קבוע וידוע מראש: היא זורחת במזרח, (בקירוב), ושוקעת במערב (גם כן בקירוב), בעוד שבצהרים היא נמצאת בדרום (בחצי הכדור הצפוני). אולם המיקום המדויק של השמש תלוי בעונות השנה (איור ב-5). בחורף, השמש זורחת בדרום מזרח ושוקעת בדרום מערב, ואינה מגיעה לרום של יותר מ- 35 מעלות בערך מעל האופק ביום הקצר ביותר בשנה, דהיינו ה- 22 בדצמבר (הנתון מתייחס לקו רוחב 31 צפון, העובר מעט מדרום לירושלים). בקיץ, השמש זורחת בצפון מזרח, שוקעת בצפון מערב, ומגיעה לרום מרבי של כ- 82 מעלות בשעה 12 בצהרים ביום הארוך ביותר בשנה, ה- 22 ביוני.

## 1.5 השפעת קו הרוחב הגיאוגרפי על מסלול השמש

מיקום השמש ברקיע תלוי לא רק בעונות השנה אלא גם בקו הרוחב הגיאוגרפי. ככל שמרחיקים מקו המשווה, ניתן להבחין בשינויים הבאים במסלול השמש (איור ב-6):

- הרום המרבי מעל האופק בצהרי היום קטן.
- מסלול השמש מתארך בקיץ ומתקצר בחורף. כלומר, בקיץ השמש זורחת ושוקעת הרבה צפונה מציר מזרח-מערב, ושוקעת הרבה דרומה ממנו. (בחורף התופעה הפוכה: השמש זורחת ושוקעת הרבה מדרום לציר מזרח-מערב.) באזורים הנמצאים מצפון לחוג הקוטב הצפוני (קו רוחב 67 בקירוב), השמש אינה שוקעת מתחת לאופק בקיץ ואינה זורחת כלל בחורף.




**איור ב-6: השפעת קו הרוחב הגאוגרפי על מסלול השמש: קו רוחב 32 צפון (שמאל) ו-52 מעלות צפון (ימין).**

## 1.6 חישוב מקום השמש

על מנת לחשב את מיקום השמש בכל רגע נתון במהלך השנה, יש לדעת שלושה נתונים:

- קו הרוחב הגיאוגרפי (f)
- הזווית בין קרני השמש למישור העובר דרך קו המשווה (d - declination). זווית זו משתנה בהתאם לתאריך בין 23.44 מעלות ב- 22 ביוני לבין 23.44– מעלות ב- 22 בדצמבר, וניתנת לחישוב בעזרת הנוסחה הבאה:

$$d = -23.44 \cdot \cos\left[\frac{360}{365} \cdot (D_s + 10)\right]$$

שבה $D_s$ הוא מספרו של היום בשנה (1 בינואר =1, 1 בפברואר =32 וכו') ו- d היא הזווית בין קרני השמש למישור העובר בקו המשווה.

- השעה, מיוצגת על ידי זווית השמש ביחס למיקומה בצהרים (w). מאחר וכדור הארץ סובב סיבוב שלם סביב צירו במשך 24 שעות, זווית הסיבוב במשך שעה הינה 15 מעלות (360/24). מקובל לסמן את השעות לפני הצהרים בסימון שלילי, כך שהשעה 0900 (בבוקר) תצוין על ידי הזווית 45- מעלות, בעוד שהשעה 1500 תצוין על ידי הזווית 45 מעלות.

את רום השמש מחשבים על פי הנוסחה הבאה:

$$\sin(g) = \cos(f) * \cos(d) * \cos(w) + \sin(f) * \sin(d)$$

שבה g הוא רום השמש במעלות, f קו הרוחב הגיאוגרפי, d הזווית בין קרני השמש למישור העובר דרך קו המשווה, ו-w זווית השמש ביחס למיקומה בצהרים.

את אזימוט השמש מחשבים על פי הנוסחה:

$$\cos(a) = \frac{\sin(d) - \sin(g) * \sin(f)}{\cos(g) * \cos(f)}$$

שבה a היא זווית האזימוט, הנמדדת במעלות ביחס לכיוון דרום, באופן שהיא מקבלת ערכים חיוביים אחר הצהרים וערכים שליליים בבוקר.

כיום ניתן למצוא באינטרנט תכנות לא מעטות המאפשרות לבצע את החישוב הנ״ל עבור כל פרק זמן נתון ולקבל קובץ ובו המהלך השעתי של מיקום השמש בהתאם לקואורדינטות הגיאוגרפיות של הישוב. כלי פשוט לחישוב המתבסס על גיליון אלקטרוני אקסל נמצא בנספח למהדורה האלקטרונית של מדריך זה.

## 2. אזורי אקלים בישראל

תכנון מיטבי של הבניין יאפשר קיום תנאי נוחות בדירות בהשקעה קטנה ככל האפשר של אנרגיה לאקלום ותאורה. תכנון כזה חייב להתבצע בהתחשב בתנאי האקלים האופייניים לאזור. באופן עקרוני, רצוי היה כי המידע אשר ינחה את המתכנן ייצג ככל האפשר את האתר שבו מתוכנן הבניין, אולם בפועל לא ניתן לקבל מידע פרטני עבור כל מגרש או אפילו כל יישוב במדינתה. לכן מסתפקים בנתונים מקורבים, הנלקחים מתחנה אשר מניחים כי התנאים השוררים בה מייצגים את התנאים אשר יתקיימו באתר המיועד, ברמת דיוק סבירה. בהתאם לכך נקבעו הנחיות למתכננים על ידי גופים מקצועיים כגון ASHRAE, ונוסחו דרישות רשמיות המוצגות בתקנים הרלבנטיים.

למרות שמדינת ישראל קטנה בשטחה, תנאי האקלים השוררים בחלקי הארץ השונים נבדלים במאפיינים חשובים – ולכן גם בארץ נעשה סיווג של כל הישובים למספר מצומצם יחסית של אזורים אשר בכל אחד מהם שוררים תנאים דומים.

את החלוקה לאזורי אקלים ניתן לבסס על משתנים שונים, בהתאם לצרכים. רוב המדדים הנמצאים בשימוש הגיאוגרפים, למשל, מתבססים על היחס בין האידוי הפוטנציאלי לכמות המשקעים, משום שגורמים אלו הם בעלי השפעה מכרעת על התפתחות הצמחייה. כפי שיוסבר בהמשך, החלוקה לאזורי אקלים המיועדת לשימוש המתכננים בתחום הבנייה מסתמכת בעיקר על טמפרטורת האוויר, אף כי גורמים נוספים כגון הלחות וקרינת השמש הם בעלי חשיבות רבה.

### 2.1 חלוקה לאזורי אקלים על פי ת״י 1045

המיפוי של המדינה לאזורי אקלים בהתייחס לתכן בניינים נעשה לראשונה בשנת 1979, בעת הכנת התקן לבידוד תרמי של בניינים (ת״י 1045), ועבר בחינה מחודשת בשנת 2002. הוא מופיע כעת בת״י 1045, חלק 10, ״בידוד תרמי של בניינים: סיווג יישובים לפי אזורי אקלים״. חשוב להדגיש כי מטרת הסיווג היתה מלכתחילה לקבוע דרישות לבידוד תרמי בהתאם לתנאי האקלים אליהם חשוף הבניין, בכדי להשיג שלושה יעדים עיקריים של התקן[13]:

א. הפחתת הסיכון לפגימה בנוחות התרמית עקב חילופי חום יתרים בקרינה בין גוף האדם לאלמנטי הבנייה

ב. חיסכון באנרגיה (לאקלום הבניין)

ג. הפחתת הסיכון לעיבוי על פני המשטחים הפנימיים של אלמנטי המעטפת בתקופות אשר בהן טמפרטורת אוויר החוץ נמוכה מטמפרטורת האוויר בתוך הבניין.

מלכתחילה היה ברור כי העומס התרמי העיקרי על בניינים נמדד בישובים מסוימים בקיץ, בעוד שבישובים אחרים הוא נמדד בחורף. למרות שמעבר החום בין הבניין לסביבתו תלוי בהפרש הטמפרטורה בין המשטח הפנימי של הקירות והתקרה, לבין הטמפרטורה החיצונית של אותם משטחים (ולא בהפרש בין טמפרטורות האוויר, כפי שרבים נוטים לחשוב, בטעות) – הסיווג לאזורי אקלים נעשה בהתייחס לטמפרטורות אוויר בלבד.

[13] פורשפן וחוב' (2002)

החלוקה לאזורי אקלים נעשתה לפי ניתוח נתונים אקלימיים רב-שנתיים של תחנות מטאורולוגיות בכל רחבי הארץ [1]. בישובים ללא תחנה מטאורולוגית חושבה הטמפרטורה בעזרת משוואת רגרסיה אשר הביאה בחשבון את השפעתם של פרמטרים גאוגרפיים כגון הגובה מעל פני הים, המרחק מהים והמבנה הטופוגרפי המקומי. נעשה מאמץ למנוע פיצול ישובים ליותר מאזור אקלימי אחד ולהתחשב ברצף העירוני הבנוי, אולם במספר מקרים, כגון חיפה וטבריה, לא ניתן היה להימנע מחלוקת הישוב לשני אזורים.

במסגרת התקן, נקבעה חלוקה לארבעה אזורי אקלים. איור ב-7 מראה את החלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045. (רשימה מפורטת של היישובים על פי שיוכם לאזורי אקלים מצויה בגוף התקן). כאשר נעשה הסיווג לאזורי אקלים עם הכנת המהדורה הראשונה של התקן, הוחלט כי באזורים א', ב' ו-ג' הקריטריון שיקבע את דרישת המינימום להתנגדות תרמית של אלמנטי המעטפת הוא מניעת עיבוי על המשטחים הפנימיים בחורף; לעומת זאת באזור ד' (הבקעה והערבה), שם סכנת העיבוי קטנה יותר, הקריטריון הקובע הוא הקטנת השפעתה של קרינה מהמשטחים בעונה החמה (תוך הנחה שטמפרטורת הפנים המרבית לא צריכה לעלות על 28 מעלות צלסיוס, ושהפרש הטמפרטורות המינימלי בין המשטחים הפנימיים לבין האוויר הפנימי הגורם לקרינת חום מורגשת הוא 3 מעלות צלסיוס).

כאשר נעשתה בחינה מחודשת של אזורי האקלים בשנת 2002, סיווג היישובים נעשה לפי הטמפרטורה היומית הממוצעת בקיץ ובחורף: הקריטריון אשר הפריד בין האזור החם ביותר (בקעת הירדן והערבה) לבין שאר האזורים היה הטמפרטורה היממתית הממוצעת בחודשי יולי-אוגוסט; הקריטריון אשר שימש להגדרת האזור הקר ביותר (אזור ההר) היה הטמפרטורה היממתית הממוצעת בחורף, בחודשים ינואר-פברואר.

**איור ב-7: החלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045 חלק 10**

חשוב להדגיש כי החלוקה לאזורי אקלים לצורך קביעת בידוד תרמי נעשתה כאמור על סמך פרמטר אקלימי אחד, דהיינו טמפרטורת אוויר. חלוקה זו איננה מביאה בחשבון גורמים אחרים כגון הלחות באוויר או קרינת שמש, העשויים להיות בעלי השפעה רבה על התכנון, במיוחד בכל האמור לאסטרטגיות לחימום סולרי פסיבי או לצינון באידוי. אף על פי כן, גם סדרת התקנים ת"י 5282, 'דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה', המבוססים על מאפיינים נוספים של הבניין מלבד הבידוד התרמי, נשענת על החלוקה אשר נקבעה בתקן 1045.כאשר נוסח תקן 5280 – אנרגיה בבניינים, הוחלט כי חלק 3 של התקן, שעניינו מערכות אקלום, יאמץ את התקן האמריקאי ASHRAE 90.1. בתקן זה ישנן דרישות שונות בהתייחס לאזורי האקלים בארה"ב, ונדרשה התאמה לאזורי האקלים בארץ, אף שהקריטריונים אשר שימשו את ASHRAE לצורך החלוקה שונים מהקריטריונים אשר עומדים בבסיס החלוקה אשר נקבעה בת"י 1045: החלוקה בתקן האמריקאי מתחשבת בימי מעלה להסקה (Heating Degree Days - HDD) וימי מעלה לקירור (Cooling Degree Days – CDD). בשלב שני נעשית חלוקת משנה המתייחסת ללחות. הקריטריון בפועל הוא טמפרטורה ופריסת

משקעים להגדרת אזור ימי (C – marine) או כמות משקעים שנתית להגדרת אזור יבש (B - dry), כאשר אזור A הוא אזור שאינו ימי ואינו יבש. חלוקת המשנה לפי לחות מתקיימת רק באותם אזורים אשר בהם ניתן להשתמש בצינון באמצעות אוויר צח (economizer), ואינו נעשה באזורים קרים שאין בהם צורך במיזוג אוויר. אזורי האקלים בארץ לפי שני התקנים מוצגים בטבלה ב-1.

**טבלה ב-1: אזורי האקלים בארץ לפי ת"י 1045 חלק 10 ולפי ASHRAE 90.1**

| אזור האקלים | |
|---|---|
| לפי ת"י 1045 | לפי ASHRAE |
| א | 2A |
| ב | 2B |
| ג | 3B |
| ד | 1B |

## 2.2 מאפיינים אקלימיים של אזורי הארץ

כפי שמראה איור ב-7, החלוקה אשר התקבלה על ידי ניתוח הטמפרטורות יוצרת ארבע רצועות המקבילות בקירוב לחוף הים התיכון ולגב ההר, למעט באזורים אשר בהם האזור ההררי אינו רציף (כגון בגליל התחתון). חלוקה זו אינה מביאה בחשבון מאפיינים אקלימיים אחרים אשר להם עשויה להיות השפעה רבה על תהליך התכנון.

חשיפה לקרינת השמש, ביחוד לקרינה ישירה, עלולה להוות מקור לרווח חום רב בבניין. מאחר וכל שטח המדינה מאופיין בשמיים בהירים במהלך כל הקיץ (למעט עננות בוקר בעיקר ברצועת החוף והשפלה), אין כמעט הבדל בין האזורים השונים במידת החשיפה לקרינת השמש בעונה זו. לא כך הדבר בחורף: כמות העננים פוחתת בהדרגה מצפון לדרום וממזרח לגב ההר, וכמות הקרינה אותה ניתן לנצל לחימום משתנה בהתאם. לדוגמא: אף שמהלך הטמפרטורות האופייני לירושלים ולמצפה רמון דומה, ושתיהן שייכות לאזור ג' לפי ת"י 1045, הרי שבעיירה הדרומית הפוטנציאל לחימום פסיבי בחורף גדול במידה ניכרת.

ללחות באוויר ישנה השפעה רבה על הנוחות התרמית בקיץ: עלייה בלחות גורמת להכבדה בעומס החום גם כאשר טמפרטורת האוויר נותרת ללא שינוי. החלוקה לאזורי אקלים על פי ת"י 1045 אינה מביאה לידי ביטוי הבדלים בלחות, הנגרמים בעיקר כתוצאה מהבדלים במרחק מן הים. לפיכך, יתכן כי בשני ישובים תשרור טמפרטורה דומה, אך ההבדל ביניהם בעומס החום עלול להיות גדול. לדוגמא: בעוד שבבית דגן הלחות היחסית הממוצעת בשעה 14:00 בחודש יולי הינה 54%, הרי שבבאר שבע הינה 32% בלבד.

להלן תיאור מקוצר של התנאים האופייניים לכל אחד מאזורי האקלים על פי תקן 1045. להמחשה ניתן להיעזר גם בטבלה ב-2, המציגה נתונים חלקיים של ארבע תחנות המייצגות את כל אחד מהאזורים. מומלץ לא להסתפק בתיאור זה ולהיעזר בנתונים מפורטים הנמצאים באטלס אקלימי לתכנון פיסי וסביבתי בישראל [2], וכן בגרסה האלקטרונית של האטלס באתר השירות המטאורולוגי הישראלי[14].

**אזור א' – אזור רצועת החוף**

אזור זה כולל רצועה צרה ברוחב של כק"מ מן הים בלבד, המושפעת מן הקרבה הישירה לים[15].

---

[14] אטלס אקלימי לתכנון פיסי וסביבתי: http://www.ims.gov.il/IMS/CLIMATE/ClimaticAtlas/

[15] רוחבה של הרצועה הוגדל באופן מלאכותי באזור גוש דן על מנת למנוע חלוקתם של ישובים בין שני אזורי אקלים.

הבדלי הטמפרטורה בין יום ללילה ובין קיץ לחורף מתונים באזור זה בשל ההשפעה של הים. הלחות בו גבוהה, כך שגם אם הטמפרטורות בקיץ אינן גבוהות, שורר בו עומס חום כמעט כל שעות היממה. בחורף הדרישה לחימום קטנה.

**אזור ב' – אזור מישור החוף והשפלה; הנגב, למעט הר הגב, העמקים הצפוניים ומקומות אחרים**

אזור זה כולל את כל חלקי הארץ אשר גובהם מתחת כ-430 מטר מעל פני הים, למעט רצועת החוף הצרה ואזור הבקעה והערבה. לפיכך התנאים השוררים בו אינם אחידים, וההבדלים בין הגליל התחתון לבין באר שבע, למשל, הם ניכרים. הגבולות בין אזור זה לבין רצועת החוף מצד אחד ואזור ההר מאידך אינם חדים. הגורם העיקרי המעצב את תנאי האקלים באזור זה הוא המרחק מהים, הגורם לכך שהטמפרטורות ביום גבוהות מאלו שלאורך החוף ונמוכות יותר בלילה, בעוד שהלחות באוויר פחותה בהשוואה לאזורים הסמוכים לים.

**אזור ג' – אזור ההר**

אזור זה מאופיין בתנאים נוחים בקיץ ובדרישה משמעותית להסקה בחורף. בשל הריחוק מהים והגובה הטופוגרפי, טמפרטורת האוויר לרוב נמוכה מזו שבשפלה, וכן גם הלחות באוויר, כך שאין כמעט עומס חום בקיץ.

**אזור ד' – בקעת הירדן והערבה**

החלק הדרומי של אזור זה, בין ים המלח לים סוף, מאופיין באקלים מדברי חם ויבש, שמים בהירים כמעט כל השנה וכמות משקעים קטנה מאוד ולא סדירה. בקיץ שורר עומס חום כל שעות היממה, אף שהאוויר יבש מאוד. בחורף מזג האוויר נוח: הטמפרטורות ביום נעימות והדרישה להסקה מינימלית. הרוח באזור זה נושבת כמעט תמיד מצפון או מצפון מזרח.

בחלק הצפוני של האזור, כמות המשקעים עולה בהדרגה מים המלח ועד לכנרת. הטמפרטורות בקיץ גבוהות כמעט כמו בערבה, אך הלחות גבוהה מעט יותר. הטמפרטורות בחורף נמוכות באזור זה ביחס לערבה, אם כי הדרישה לחימום בכל זאת נמוכה.

**טבלה ב-2: נתוני אקלים נבחרים מארבע תחנות המייצגות את אזורי האקלים בישראל על פי ת"י 1045 [2].**

| האזור | התחנה | חורף (ינואר) | | | קיץ (יולי) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | טמפ' מינ' יומית ממוצעת | טמפ' מכס. יומית ממוצעת | ימי מעלה להסקה | טמפ' מינ' יומית ממוצעת | טמפ' מכס. יומית ממוצעת | לחות יחסית בשעה 1400 |
| | | (מ"צ) | (מ"צ) | (מ"צ X ימים) | (מ"צ) | (מ"צ) | (%) |
| א | תל אביב | 9.0 | 17.3 | 541 | 22.0 | 28.8 | 65 |
| ב | באר שבע | 6.0 | 16.4 | 768 | 18.5 | 32.9 | 32 |
| ג | ירושלים | 4.3 | 11.8 | 1354 | 17.2 | 28.9 | 42 |
| ד | אילת | 9.2 | 20.8 | 242 | 25.2 | 39.4 | 15 |

## 3. מיקרו-אקלים עירוני

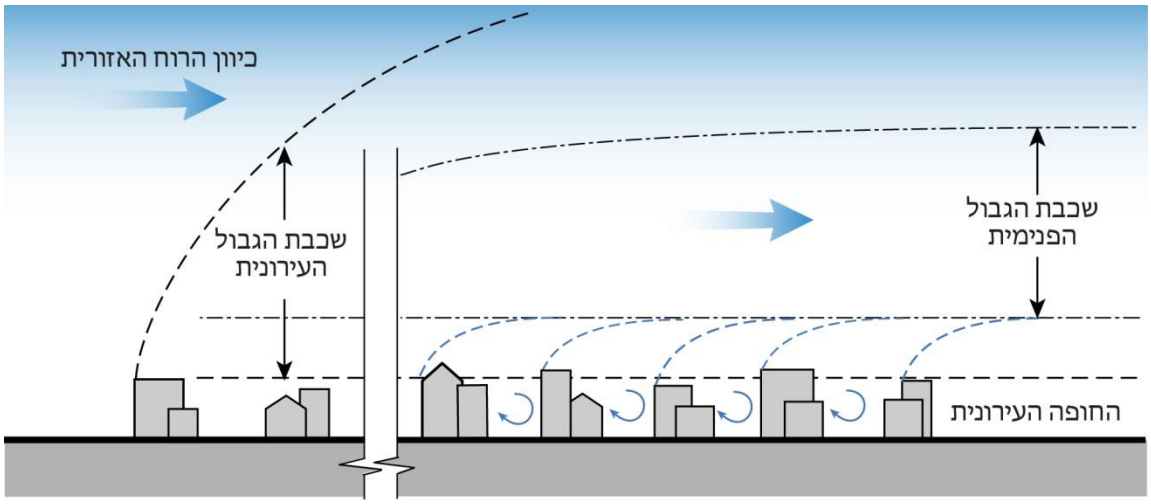
מרבית בנייני המגורים בנויים בשטח עירוני, ולאור מדיניות התכנון בישראל, מגמה זו צפויה להימשך אף ביתר שאת בעתיד לאור המחסור בקרקעות. לכן כל דיון על נתוני אקלים לתכנון חייב

להתייחס לעובדה שעצם קיומו של יישוב עירוני משנה באופן משמעותי את תנאי האקלים – הן בתוך השטח הבנוי והן מעבר לגבולותיו.

למיקרו-אקלים עירוני השפעה על תפקוד הבניינים הן כאשר הם מאוקלמים באמצעות מערכות לחימום או מיזוג האוויר, והן כאשר מערכות כאלה אינן פועלות (free-floating). השפעה זו הינה מורכבת, וחשוב להבין את מכלול הגורמים הסביבתיים הפעילים, משום שיש להם השפעה הדדית והתייחסות לגורם אחד במנותק מהאחרים עלולה להביא למסקנות שגויות.

## 3.1 האקלים בשכבת הגבול

יחסית לקוטרו של כדור הארץ, כ- 12,700 ק״מ, עובי האטמוספרה הינו דק מאוד – כ-30 ק״מ בלבד. רק חלק מהאטמוספירה מושפע באופן ישיר ממאפייני השטח – תבליט ותכסית: עובי השכבה הזו, המכונה 'שכבת הגבול', הוא בדרך כלל מאות מטרים בלבד. שכבת הגבול **העירונית** (Urban Boundary Layer) היא אותו חלק של האטמוספרה אשר מושפע מקיומו של השטח הבנוי: עוביה של שכבה זו עשוי להיות פי-10 או יותר מגובה המבנים, ואינו מוגבל רק לשטח הבנוי, משום שהשפעה של העיר מורגשת גם על שטח ניכר בכיוון מורד הרוח (איור ב-8).




**איור ב-8: מבנה האטמוספרה מעל העיר: שכבת הגבול העירונית מושפעת מהמאפיינים הכלליים של השטח הבנוי, אך אין בה ביטוי להשפעה של עצמים בודדים כגון בניינים. השפעתם של אלה מורגשת רק עד לגובה השווה לפי שניים עד פי שלושה מגובה הבניינים. השכבה המגיעה עד לגובה הגגות מכונה 'החופה העירונית'.**

את שכבת הגבול העירונית ניתן לחלק לשתי שכבות משנה:

**שכבת גבול פנימית** (Surface Layer) אשר בתוכה התנאים מושפעים מהמאפיינים הכלליים של פני השטח כגון צפיפות הבינוי, גובהם הממוצע של הבניינים וכמות הצמחייה. בשכבה זו לא ניתן להבחין בהשפעתם של מבנים בודדים, ולכן בכל גובה נתון התנאים הנמדדים (כגון טמפרטורה, לחות או מהירות רוח) נוטים להיות אחידים יחסית במרחב. הגבול העליון של השכבה עולה בכיוון הרוח, בדרך כלל עד לגובה של פי- 4-5 מגובה הבנייה הממוצעת, ומעל גבול זה ישנן השפעות משולבות של השטח הבנוי והלא בנוי. הגבול התחתון נמצא בגובה של בערך פי שניים עד פי שלושה מגובה הבנייה, ומתחת לגבול זה ישנן השפעות של מבנים בודדים – כך שבקרבת הגגות מדדים כגון מהירות הרוח משתנים מנקודה לנקודה.

**החופה העירונית** (Urban Canopy Layer) היא שכבת האטמוספרה המשתרעת בין פני הקרקע לבין גובה הגגות של הבניינים באזור. בניגוד לשכבת הגבול הפנימית שנמצאת מעל העיר, החופה העירונית מאופיינת בתנאים מאוד **לא אחידים**. בכל חלל עירוני נוצר 'מיקרו-אקלים' ייחודי, אשר

מבטא את השפעת הבניינים התוחמים אותו על האקלים המאפיין את המרחב כולו. בחופה העירונית ניתן למדוד הבדלים טמפרטורה של 5 מעלות או יותר בטווח של מאות מטרים בודדים, ומהירות הרוח עשויה להשתנות באופן קיצוני.

## 3.2 כלים ומדדים לתיאור המרקם העירוני

המרקם העירוני עשוי להיות הטרוגני מאוד, ולכן פיתחו המטאורולוגים כלים ומדדים פשוטים יחסית לתיאור התכונות הגיאומטריות של העיר. חשוב להבין כי כלים אלה אינם מאפשרים ביטוי של המורכבות כולה, אולם מחקרים רבים הראו שלמרות זאת הם נותנים בידי המדענים כלי חיזוי משוכללים למדי.

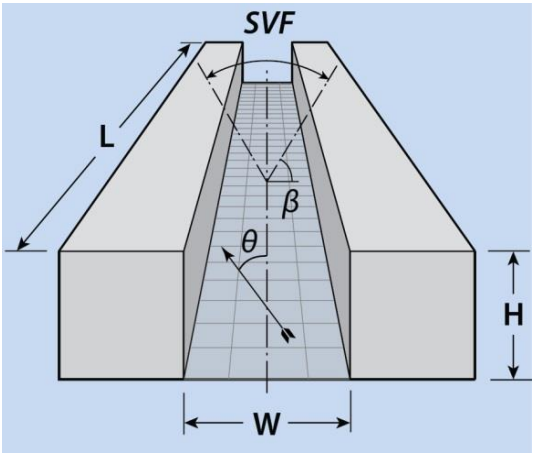
החשוב שבכלים המשמשים את החוקרים הינו הקניון העירוני, המוגדר כחלל עירוני תלת-ממדי ליניארי, כדוגמת רחוב ארוך אשר תחום בשני צדדיו ע"י בניינים רצופים בעלי גובה דומה (איור ב-9). המודל של קניון עירוני מאפשר תיאור כמותי של צורת הבנייה העירונית, באמצעות שלושה מדדים:

1) **כיוון הרחוב**, הנמדד כזווית בין ציר האורך לבין הצפון.

2) **יחס גובה-רוחב** (H/W) – היחס בין גובהם של הבניינים (H) לרוחבו של חלל הרחוב כולו, בין קירות המבנים (W).

3) **גזרת החשיפה לשמיים** (Sky View Factor - SVF) – נמדד כחלק היחסי של כיפת השמיים ה'נראה' מנקודה נתונה בתוך החלל. עבור קניון עירוני פשוט, ערך ה-SVF מחושב יחסית לנקודה בציר המרכזי של הרחוב, במפלס הרצפה.

$$SVF = \cos\beta$$
$$\beta = \tan^{-1}(H / 0.5W)$$




**איור ב-9: הקניון העירוני**

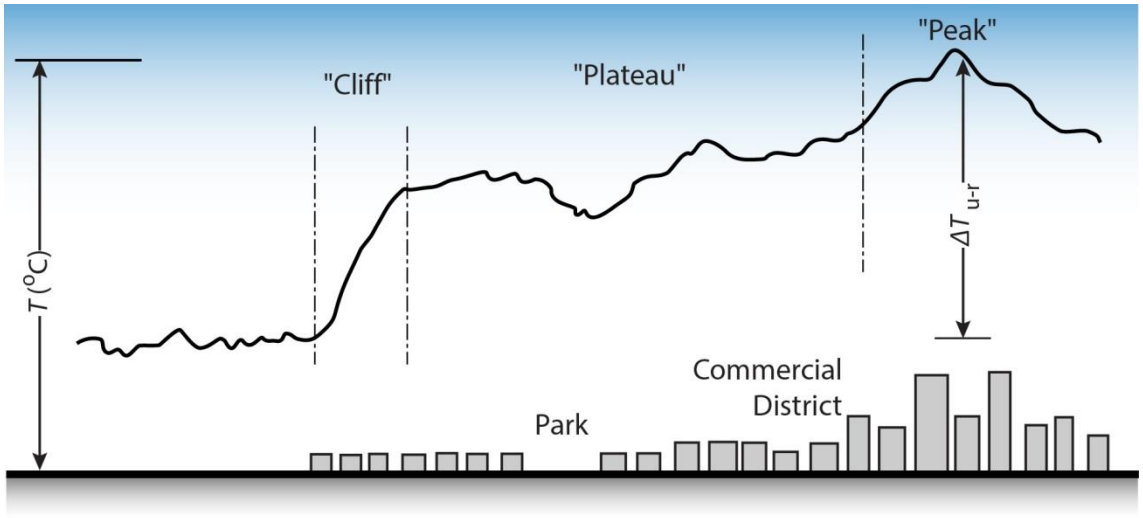
מדדים אחרים:

- **הצפיפות החזיתית** (Frontal Area Density) – היחס בין שטח החזיתות האנכיות המופנות לכיוון הרוח, לשטח האופקי הכולל;
- **צפיפות שטח הגגות** (Roof Area Density) – היחס בין שטח הגגות לשטח האופקי הכולל;
- **שיעור הכיסוי בצמחייה** (Vegetated Fraction) – היחס בין שטח התכסית הצמחית לשטח האופקי הכולל.

ראוי לציין שכל המדדים האלה הנם מדדים **גיאומטריים**, להבדיל ממדדי צפיפות אחרים כגון מספר יחידות דיור ליחידת שטח או אחוזי בנייה, אשר משפיעים על מיקרו-אקלים רק באופן עקיף.

### 3.3 אי החום העירוני

התופעה המזוהה יותר מכל עם מיקרו-אקלים עירוני היא תופעה המכונה 'אי החום העירוני' (urban heat island): מחקרים רבים הראו שבתנאים מסוימים, טמפרטורת האוויר בשטח הבנוי גבוהות ביחס לאלה שבסביבה הלא-בנויה. חשוב להדגיש כי התיאור הנפוץ של התופעה, המודגם באיור ב-10, הוא תיאור סכמתי בלבד.




**איור ב-10: חתך סכמתי המתאר את אי החום העירוני** [16]

ראשית, האבחנה בין שטח עירוני לשטח פתוח איננה חד משמעית וחדה. המאפיינים של שטח בנוי, כגון שיעור השטח המכוסה בצמחייה, גובהם של הבניינים והמורפולוגיה שלהם עשויים להשתנות באופן מדורג, כך ששטחה של העיר עשוי פסיפס שבו התכסית יכולה להיות מגוונת ביותר[17]. כפי שיוסבר בהמשך, הגורמים המביאים להיווצרות אי החום העירוני הם בעלי השפעה שונה בהתאם לאופי התכסית, ולכן עדיף להתייחס להבדלי טמפרטורה בין נקודות שונות בשטח העירוני (intra-urban temperature differences) מאשר להתייחס לנתון אחד אשר אינו בהכרח מייצג את המרחב העירוני כולו.

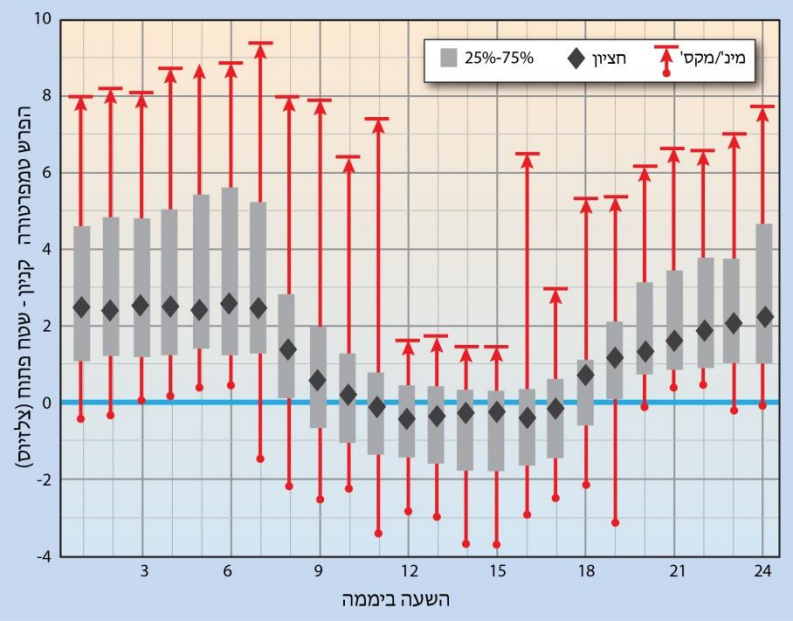
שנית, הבדלי הטמפרטורה במרחב העירוני משתנים בזמן, לפי דפוס יומי קבוע ובהשפעת מזג האוויר. אי החום נמדד בפועל רק חלק מהזמן, בעיקר בלילות בהירים ללא רוח. במרבית שעות היום, ההבדל בין טמפרטורת האוויר בשטח הבנוי לזו שבשטח הפתוח הינו קטן, ולעיתים נמצא כי העיר אף קרירה מעט יותר, כפי שמדגים איור ב-11.

ישנם מספר גורמים המשפיעים על היווצרות אי החום העירוני ועל העוצמה שלו. החשוב שבהם הוא הגיאומטריה של המרקם העירוני, כפי שהיא באה לידי ביטוי במנת הממדים של הרחובות (יחס H/W) או בגזרת החשיפה לשמיים (SVF). אי החום העירוני נוצר בראש ובראשונה כאשר לאחר השקיעה, שטח בנוי מתקרר לאט יותר מאשר שטח פתוח, משום שמרבית המשטחים (קירות הבניינים ופני הרחוב) אינם חשופים במלואם לשמיים, ולכן מאבדים פחות חום בקרינה. מחקרים אשר נערכו בערים רבות בכל רחבי העולם מראים כי ככל שהרחוב צר ועמוק יותר, כך גדלה עוצמת אי החום המרבית (איור ב-12).

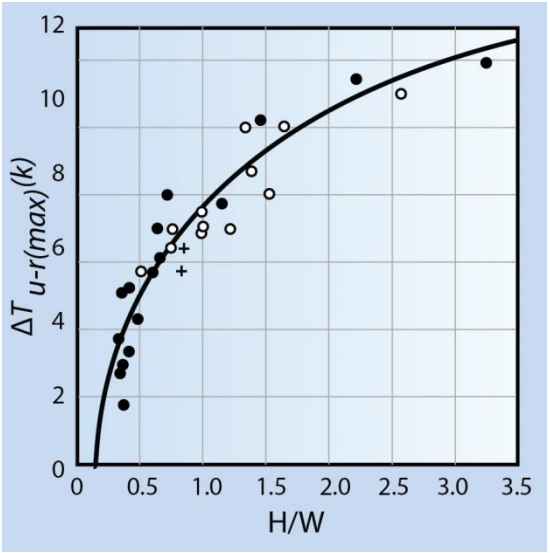
---

[16] Oke, 1976

[17] Stewart and Oke, 2012




**איור ב-11: המהלך היומי של הבדלי הטמפרטורה שנמדדו בין שתי נקודות בעיר אדלייד, אוסטרליה, במהלך שנת 2000 [18]. המרחק בין שתי הנקודות היה כ-1700 מטר: האחת היתה ברחוב צר מוקף בניינים גבוהים במרכז העיר, השנייה בפרבר עם בנייה נמוכה והרבה צמחייה.**




**איור ב-12: הקשר בין העוצמה המרבית של אי החום העירוני למנת הממדים של הרחוב[19].**

תהליך זה מתקיים ללא תלות בהשפעתם של גורמים אחרים המשפיעים על עוצמתו של אי החום:

א. **ייצור חום מפעילות אנושית** (anthropogenic heat): מרבית האנרגיה הדרושה לקיום הפעילות האנושית בעיר מתורגמת לבסוף לחום מוחש, בין אם מדובר באנרגיה חשמלית

[18] Erell and Williamson, 2007
[19] Oke, 1987

הנצרכת בבניינים לאקלום, הפעלת ציוד ביתי או מאור, ובין אם מדובר בשריפת דלק במכוניות (אשר רק חלקו הופך לאנרגיה מכנית). אף כי נדמה לעיתים שגורם זה הוא בעל חשיבות רבה, תרומתו להיווצרות אי החום העירוני היא מתונה בדרך כלל, למעט בערים בעלות אקלים קר מאוד או במרכזי ערים שבהן צפיפות הבנייה גבוהה ביותר.

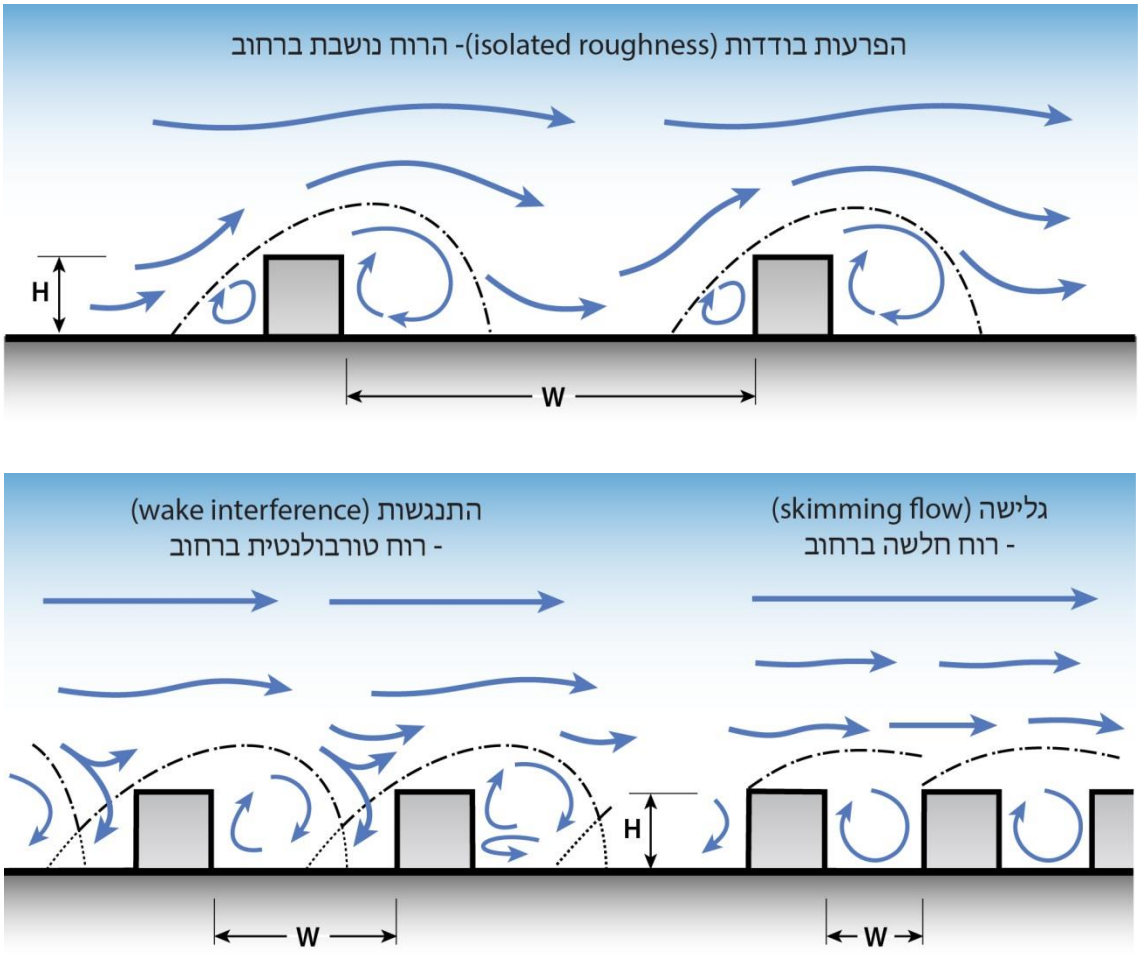
ב. **העדר צמחייה**: בערים רבות, אם כי לא בהכרח בארץ, השטח הפתוח שמסביב לעיר מכוסה צמחייה, בעוד שבשטח הבנוי כמות הצמחייה פחותה במידה ניכרת. לצמחייה השפעה מורכבת על מיקרו-אקלים: היא אמנם עשויה להגדיל את שיעור האידוי-דיות (evapotranspiration) בהשוואה לשטח חשוף, ובכך להביא להגדלת החום הכמוס והקטנת החום המוחש אשר נפלטים מפני השטח כאשר הוא חשוף לקרינת שמש. עם זאת, ההשפעה העיקרית על טמפרטורת האוויר היא כנראה תוצאה של הצללה (בעיקר על ידי עצים), ופחות של קירור באידוי: טמפרטורת האוויר בסביבתם של שטחי צמחייה נמוכה, כגון משטחי דשא גדולים, נמוכה רק במעט, אם בכלל, מטמפרטורת האוויר מעל משטחי קרקע חשופה. חשוב לזכור גם כי המרת אנרגיה מחום מוחש לחום כמוס אמנם מורידה את הטמפרטורה של האוויר – אך לא את האנתלפיה שלו, ולכן אינה מקטינה את העומס על מערכות מיזוג האוויר בקיץ.

ג. **קיבול חום רב**: המבנה התלת-ממדי המורכב של העיר, הכולל בניינים אשר השטח הכולל של המעטפת שלהם גדול פי כמה מההיטל שלהם על הקרקע, הופך את השטח הבנוי למחליף חום יעיל מאוד, בהשוואה לאזור פתוח. גם החומרים המרכיבים את המרקם העירוני, לרבות חומרים צפופים כגון בטון ואספלט, מתאפיינים בקיבול חום גבוה. הצירוף של שני מאפיינים אלה – שטח פנים גדול וקיבול תרמי גבוה – מביאים לכך שהשטח הבנוי נוטה למתן שינויים מהירים בטמפרטורת האוויר: עודף האנרגיה ביום נאגר בקירות ובמשטחים המרוצפים, ומשתחרר בלילה – כך שהמשרעת היומית של הטמפרטורה בעיר נמוכה יותר מאשר בשטח פתוח. ההבדל בא לידי ביטוי בעיקר בלילה, בדמות אי החום העירוני, אך גם ביום, במידה מתונה יותר, בהפחתה של הטמפרטורה המרבית.

ד. **אטימות השטח העירוני**: פני השטח העירוני כוללים שיעור גבוה של חומרים אטומים, לרבות גגות בניינים וחומרי ריצוף וסלילה. בזמן גשם, משטחים אלו אינם מחלחלים, ומרבית המים זורמים אל מערכות הניקוז העירוניות. פני השטח מתייבשים כאשר המים מתאדים, ומתקררים למשך פרק זמן קצר. לעומת זאת, קרקע מחלחלת עשויה לשחרר אדי מים לאורך פרק זמן ארוך, אשר במהלכו תהיה הטמפרטורה של פני השטח נמוכה במידה ניכרת מפני השטח האטומים בעיר.

ה. **האטת מהירות הרוח**: דפוסי זרימת האוויר בחופה העירונית הם מורכבים, ומושפעים מהיחס בין גובה הבניינים לבין רוחב הכבישים (איור ב-13). בנייה צפופה מביאה לכך שמהירות הרוח הממוצעת נמוכה יותר מאשר בשטח פתוח, אם כי היא גם טורבולנטית יותר, אבל לרוב התוצאה היא הפחתת היכולת לסלק מזהמים או אנרגיה מהחופה העירונית לשכבת הגבול האטמוספרית מעל הבניינים.

ו. **מקדם ההחזרה של קרינת שמש (האלבדו) של העיר נמוך**: בחלל צר ועמוק ישנן החזרות קרינה רבות בין המשטחים שונים, וכתוצאה מכך נבלע אחוז יחסית גבוה מקרינת השמש החודרת לתוכם. תופעה זו מתבטאת במקדם החזרה כללי (urban albedo) נמוך יחסית באזורים צפופים, ויוצרת מעין 'מלכודת קרינה' בחלל. חשוב לציין, עם זאת, שמקדם ההחזרה של צמחייה, שהוא כ-0.18-0.24, דומה למקדם ההחזרה של השטח הבנוי כולו. ההבדל בתחושה שלנו נובע מכך שחלק ניכר מקרינת השמש הנבלעת בצמחייה מותמרת לאנרגיה כימית (בתהליך הפוטוסינתזה) או לחום כמוס בתהליך הדיות.




**איור ב-13: השפעת צפיפות הבנייה על דפוסי זרימת הרוח בשטח בנוי [20].**

## 3.4 השפעת אקלים העיר על צריכת אנרגיה בבניינים

לכאורה, אי החום העירוני היה אמור להביא לירידה בדרישת האנרגיה לחימום בחורף, ולעלייה בדרישת האנרגיה למיזוג אוויר בקיץ – כפי שהראו מחקרים לא מעטים. אולם במציאות, התמונה יותר מורכבת, משום שהגורם העיקרי לאי החום העירוני, דהיינו הקטנת החשיפה לגזרת השמיים, גם מקטין את החשיפה של הבניינים לקרינת שמש. ההצללה ההדדית בין הבניינים מפחיתה אפוא את עומס החום על הבניינים בקיץ, ומקטינה את הפוטנציאל לחימום סולרי פסיבי בחורף. התוצאה של ההשפעות המנוגדות האלה תלויה בפרטי התכנון של הבניין, לרבות כמות הבידוד התרמי, אך בעיקר בשטח החלונות, בהפנייתם ובמידת החשיפה שלהם לקרינת השמש. מחקר אשר בדק את ההשפעה האפשרית של תוספת בנייה על גבי בניינים קיימים ברחוב אופייני בתל אביב במסגרת תמ"א 38[21] מצא כי למרות העלייה בטמפרטורת האוויר, השינוי בדרישת האנרגיה לאקלום של בניין מגורים אופייני יהיה מזערי.

כאמור, ההשפעה העיקרית של אי החום העירוני נמדדת בעיקר בלילה, ומתבטאת בהפחתה ניכרת של הפוטנציאל לקירור באמצעות אוורור טבעי. פוטנציאל הקירור תלוי בהפרש הטמפרטורה בין האוויר בתוך הבניין לבין האוויר בחוץ, ומאחר ובשעות היום האוויר החיצוני חם יותר, והבניין סגור

[20] Oke, 1987
[21] Kalman et al, 2013

וממוזג, ישנה חשיבות מיוחדת דווקא לטמפרטורת האוויר בלילה. הפגיעה בפוטנציאל זה קשה יותר גם ככל שמהירות הרוח קטנה, גם כן בהשפעת הבנייה הצפופה [22].

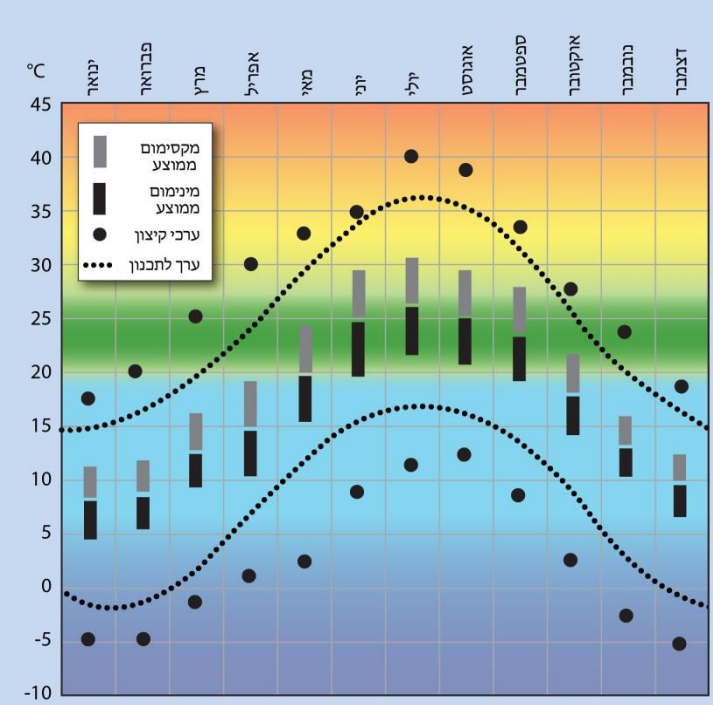
## 4. נתוני אקלים לתכנון

מבחינה מעשית, המתכנן זקוק לנתוני אקלים לשתי מטרות: הגדרת הביצועים הנדרשים ממערכות האקלום, ובחינת צריכת האנרגיה בשנה אופיינית בהתחשב במאפייני הבניין והמערכות. הנתונים הנדרשים לשתי מטרות אלו אינם זהים.

### 4.1 יום לתכנון (design day)

הספק מערכות האקלום נקבע לפי עומסי השיא החזויים בתנאי קיצון, בתוספת מקדמי ביטחון המחושבים בהתאם לנזק העלול להיגרם אם המערכת לא תוכל לספק את מלוא התפוקה הנדרשת. לשם כך, דרושה הגדרה של התנאים ביום לתכנון שעבורם נעשה החישוב, בקיץ ובחורף.

תנאים ביום לתכנון ניתן להגדיר בצורות שונות. לפי ASHRAE [23], התנאים ביום לתכנון הם תנאים אשר בהם ערכו של הפרמטר הנמדד, כגון טמפרטורת אוויר, חורג מערך סף שנקבע המייצג את האחוזון ה-95, 98, 99 או 99.6 עבור אותו פרמטר בתקופת הייחוס, כאשר מדובר בסף העליון (או האחוזון ה- 0.4, 1, 2 או 5 עבור הסף התחתון). מאחר וישנם 8760 שעות בשנה, המשמעות של מספרים אלו היא כי ערכו של הפרמטר יחרוג מערך הסף במשך 438, 175, 88 ו-35 שעות בשנה, בהתאמה. איור ב-14 מדגים את ההבדל בין המקסימום והמינימום היממתי הממוצע עבור כל אחד מחודשי השנה לבין ערכי הקיצון והערכים לתכנון עבור אותם חודשים.




**איור ב-14:**

**הגרף מדגים את היחס בין טמפרטורת התכנון לערכי הקיצון וערכי המינימום, המקסימום והממוצע עבור כל חודשי השנה.**

בחירת תקופת הייחוס משפיעה על ערכי הסף של הפרמטרים אותם בוחנים. ככל שתקופת הייחוס ארוכה יותר – כך גדל הסיכוי שמהלכה יתרחשו אירועי מזג אוויר קיצוניים, ולכן גם ערכי הסף יהיו

[22] Williamson and Erell, 2008

[23] ASHRAE – Association of Heating Refrigeration and Air conditioning Engineers – איגוד מהנדסי מיזוג האוויר האמריקאי

מחמירים יותר. משך הזמן המקובל על מטאורולוגים כתקופה מספקת לייצוג של אירועי מזג אוויר קיצוניים הוא 30 שנה. מדי מספר שנים, מעדכנים את בסיס הנתונים על ידי הוספת נתונים עדכניים והשמטת נתונים מהשנים הראשונות, כך שמתקבל קובץ המייצג באופן (כמעט) שוטף את 30 השנים האחרונות. מאידך, כאשר האקלים מושפע ממגמות ארוכות טווח, כגון התחממות כדור הארץ, בחירת תקופת ייחוס ארוכה מדי עלולה לתת משקל יתר לתנאי אשר שררו בעבר, אבל אינם אופייניים לשנים האחרונות. לכן מקובל גם לבחור תקופת ייחוס של 15 שנים בלבד. בהיעדר נתונים אקלימיים מלאים מספיק [24], ניתן להשתמש אפילו בנתונים אשר נמדדו במהלך 8 שנים בלבד.

הנתונים הרשומים ביום לתכנון מבטאים את ההשפעה המשולבת של מספר פרמטרים מטאורולוגיים, וכוללים טמפרטורת אוויר, לחות [25], קרינת שמש ומהירות רוח. הפרמטר האקלימי אשר לפיו בוחרים את היום לתכנון, שהוא כאמור יום קיצוני, ולא מייצג, תלוי בצרכי המתכנן: תכנון של מערכות מיזוג אוויר נעשה לפי טמפרטורת אוויר ולחות, בעוד שתכנון מערכת סולרית נעשה על סמך נתוני קרינת שמש. לכן יתכן שהיום לתכנון לא יהיה זהה כאשר מחשבים את התפוקה הנדרשת של מערכות שונות בבניין.

### 4.2 שנה מטאורולוגית אופיינית (typical meteorological year)

כאשר מבקשים לבצע הדמיה של צריכת האנרגיה של מערכת או בניין במהלך השנה, יש צורך בנתוני אקלים עבור שנה שלמה. נתונים אלה צריכים להיות 'אופייניים' למקום עד כמה שניתן, אבל בפועל קיים קושי בהכנת קובץ נתונים כזה, משום שהנתונים צריכים לעמוד במספר דרישות:

- הערכים הממוצעים של הפרמטרים השונים צריכים להיות קרובים עד כמה שניתן לממוצע הרב-שנתי של אותם פרמטרים לתקופת הייחוס (15 או 30 שנה), בכל אחד מחודשי השנה.
- השונות הטבעית הקיימת בכל אחת מתקופות השנה צריכה לקבל ביטוי גם בנתוני השנה האופיינית, כך שיהיה בה ייצוג הולם לתופעות כגון גלי חום, סופות גשם ורצפים של עננות.
- הנתונים לא יכללו ערכי קיצון חריגים, עבור אף לא אחד מהפרמטרים האקלימיים.
- היחסיים ההדדיים בין הפרמטרים השונים צריכים להישמר. כלומר – הקשר בין טמפרטורת אוויר לבין כיוון ומהירות רוח, למשל, צריך להיות זהה לזה שמתקיים בפועל.

הניסיון המצטבר בעולם מראה שלא ניתן למצוא שנה שלמה שניתן להגדיר אותה כשנה 'אופיינית' אשר תעמוד בכל הדרישות הללו. לכן, מסתפקים בכך שבוחרים תקופות אופייניות בנות חודש בלבד, שעבורן נמצא כי הן הקרובות ביותר לנתונים האופייניים לאותו חודש. את 12 קבצי הנתונים, אשר כל אחד ואחד מהם הוא רישום מדויק ומלא של כל הנתונים המטאורולוגיים אשר נרשמו בו-זמנית בתחנה המטאורולוגית במהלך חודש שלם בשנה מסוימת, מצרפים לקובץ אחד המהווה 'שנה מטאורולוגית אופיינית'. בכדי להימנע מנקודות של אי-רציפות בחיבור בין הקבצים השונים, מתבצע תהליך של התאמה של הנתונים לפרק זמן של 6 שעות לפני ואחרי נקודת הזמן הזאת.

ההחלטה מהו חודש 'אופייני' לצורך הרכבת שנה מטאורולוגית מושפעת במידה מסוימת מהמטרה שלשמה משמש הקובץ. בהתאם לכך ניתן שקלול המבטא את החשיבות של פרמטרים שונים, כגון משקעים, קרינת שמש או טמפרטורה. שנה אופיינית המיועדת לחישוב ביצועי מערכת סולרית תיתן

[24] קבצי נתוני האקלים כמעט תמיד חסרים נתונים עבור פרקי זמן מסוימים, בעיקר בשל תקלות במכשור. כאשר פרק הזמן הוא קצר, ניתן להשלים נתונים חסרים באמצעים סטטיסטיים, מבלי לפגוע יתר על המידה במהימנות הסדרה כולה.

[25] נתוני הלחות מבוטאים בדרך כלל כערכי נקודת הטל או טמפרטורת הגולה הלחה, ולא בלחות יחסית, התלויה גם בטמפרטורת האוויר.

משקל רב יותר לנתוני קרינת שמש, בעוד שקבצים המשמשים להערכת צריכת האנרגיה לאקלום בניין יבטאו דגש רב יותר לטמפרטורה ולחות.

כאשר משתמשים בתוכנה להדמיה תרמית של בניין, יש להשתמש בקובץ נתוני אקלים אשר בו מופיעים כל הנתונים בסדר ובפורמט המוגדרים על ידי אותה תוכנה. לא קיים היום תקן אחיד להכנת קבצי אקלים כאלה, ובפועל קיימים מספר סוגי קבצים כגון TMY, TMY2 או TMY3. השירות המטאורולוגי הישראלי הכין קבצים של שנה מטאורולוגית אופיינית עבור 4 תחנות בלבד – בית דגן, באר שבע, עטרות ואילת. תחנות אלו מייצגות את ארבעה אזורי האקלים אשר הוגדרו בת"י 1045 חלק 10 ואשר אומצו גם על ידי התקן לדירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה, ת"י 5282[26]. תקן זה מאפשר לדרג את הבניין באמצעות הדמיה תרמית בתוכנה ייעודית שפותחה לשם כך – ENERGYui. בחירת היישוב מתוך רשימה המופיעה בתקן, ואשר מבוססת על רשימת הישובים בת"י 1045, קובעת איזה קובץ אקלים ישמש לחישוב.

### א. יצוגיות המידע ומקורות לאי-וודאות

כאשר משתמשים בקובץ נתוני אקלים לביצוע חישובים או הדמיה של צריכת אנרגיה, מניחים כי הנתונים האלה מייצגים את התנאים אשר אליהם יהיה חשוף הבניין. תקפותה של הנחה זו בפועל היא לעיתים חלקית בלבד, מכמה טעמים:

א. חוסר ייצוג מרחבי: מאחר ואין תחנות מטאורולוגיות בכל יישוב בארץ, וקיים קושי לאסוף נתונים ברציפות לאורך תקופת זמן ארוכה, מספר התחנות שעבורן יש קובץ של שנה אופיינית הוא קטן. כך יוצא, למשל, שנתוני התחנה בבאר שבע משמשים להדמיה של בניינים בחלקם העליון של מורדות הכרמל בחיפה, אשר משויכים לאזור ב' – למרות הבדלים ניכרים בטמפרטורה, בלחות ובמשקעים.

ב. היעדר ביטוי לשינויים בזמן: השימוש בנתוני מזג אוויר היסטוריים לחיזוי התנהגות הבניין בעתיד מניח כי האקלים לא ישתנה במידה ניכרת. אולם ברור כיום כי בכדור הארץ מתרחש תהליך של שינוי אקלים, וכי ההנחה הזו איננה תקפה, לפחות לא במלואה. יתירה מזאת: אי-הוודאות לגבי היקף השינוי הגלובלי קטן בהשוואה לאי-הוודאות בכל הנוגע לשינויים במקום מסוים. לא די בכך שנדע, למשל, כי הטמפרטורה הממוצעת על פני כדור הארץ צפויה לעלות ב-1.5 מעלות עד סוף המאה ה-21. הפקת 'שנה מטאורולוגית עתידית' (future weather year) דורשת מידע מפורט על התפלגות השינויים בטמפרטורה לאורך עונות השנה ושעות היממה, ולשינויים הצפויים להתרחש במקביל גם בשאר הפרמטרים המטאורולוגיים. מידע כזה אינו קיים, לפחות בשלב הזה.

ג. היעדר ביטוי לשינויים בתכסית בסביבת הבניין, ובעיקר לתהליכים של עיור: גם אילו ניתן היה להפיק שנה מטאורולוגית אופיינית על סמך נתונים אשר נמדדו בסמיכות לאתר הבנייה המיועד, ולבטא בה את השינויים החזויים עקב התחממות כדור הארץ – לא היה בכך להבטיח כי ההדמיה תתבצע על סמך נתונים מהימנים ומדויקים. זאת משום שגם הסביבה של הבניין צפויה להשתנות במהלך השנים, עקב בניית בניינים נוספים או אפילו שכונות חדשות, שינויים בכמות ובסוג הצמחייה ועוד. כל אלה יוצרים מיקרו-אקלים אשר עלולה להיות לו השפעה ניכרת על הסביבה המיידית של הבניין ועקב כך על צריכת האנרגיה לאקלום. ניתן כיום לתת ביטוי חלקי לשינויים האלה באמצעות מודלים ממוחשבים אשר מפיקים 'שנה מטאורולוגית עירונית' על בסיס שנה מטאורולוגית אופיינית מתחנה אחרת באזור. באמצעות המודלים, ניתן לחזות את

[26] התחנה בבית דגן מייצגת את אזור אקלים א', אף שבפועל היא ממוקמת באזור אקלים ב'.

ב

ההשפעה האפשרית על מיקרו-אקלים העיר של תרחישים כגון תוספת בנייה במסגרת תמ"א 38 [27].

## 5. מקורות

[5] ביתן א. ורובין ש. (1994) אטלס אקלימי לתכנון פיסי וסביבתי בישראל. אוניברסיטת תל אביב, משרד התחבורה (השירות המטאורולוגי) ומשרד התשתיות הלאומיות.

[1] פורשפן א., רובין ש., בנימיני י. ובקר ר. (2002) "סיווג ישובים מעודכן לצורך בידוד תרמי לפי קריטריונים אקלימיים מוגדרים", משרד התחבורה (השירות המטאורולוגי) ומשרד התשתיות הלאומיות.

[2] Erell E. and Williamson T. (2007) "Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city". *International Journal of Climatology*, **27**:1243-1255.

[3] Erell E., Pearlmutter D. and Williamson T. (2011) Urban Microclimate: Designing the Spaces between Buildings. Earthscan/James & James Science Publishers, London, 266p.

[4] Kalman Y., Pearlmutter D. and Erell E. (2013). "Impact of increasing the height of Tel Aviv buildings on pedestrian comfort and building energy efficiency". Proceedings of the 29th PLEA International Conference – Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany, Sept. 10-12 2013.

[5] Oke, T. (1987). Boundary Layer Climates. Methuen & Co., London.

[6] Stewart, I. D., T. R. Oke, 2012: Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**, 1879–1900.

[7] Williamson T. and Erell E. (2008). "The Implications for Building Ventilation of the Spatial and Temporal Variability of Air Temperature in the Urban Canopy Layer". *International Journal of Ventilation*, **7**(1):23-35.

[27] Kalman et al, 2013.

# פרק ג:

# מעבר אנרגיה

ג

# פרק ג: מעבר אנרגיה

בכדי לשמר אנרגיה בבניין, יש לבקר את מעבר האנרגיה דרך המעטפת שלו – מהפנים כלפי חוץ ולהיפך. פרק זה יקנה כלים בסיסיים להבנת תהליכי מעבר האנרגיה.

**הגדרה:**

כל אימת שקיים הבדל טמפרטורה בין שתי נקודות במרחב מתרחש מעבר אנרגיה ביניהן. מעבר האנרגיה עשוי להתרחש בין אם הבדלי הטמפרטורה קיימים בנקודות שונות של אותו חומר ובין אם מדובר בחומרים שונים.

מעבר אנרגיה עשוי להתרחש בשלושה אופנים שונים:

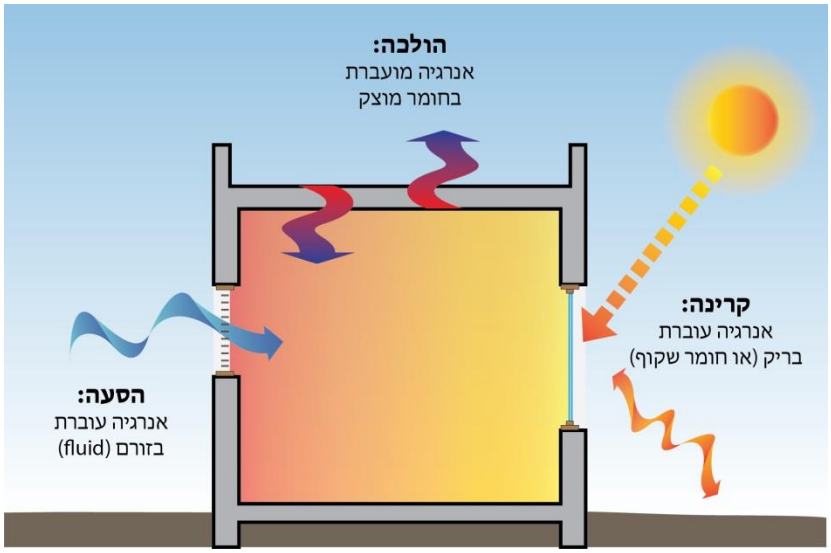
א. כל חומר פולט קרינה (radiation) אלקטרומגנטית. כאשר התווך בין שתי נקודות במרחב מאפשר מעבר קרינה (או בהיעדר תווך, כלומר במצב של ריק מוחלט), יתרחש מעבר אנרגיה ביניהן. אם הטמפרטורה השוררת בשתי הנקודות שונה, יהיה מאזן האנרגיה ביניהן שונה מאפס.

א. מעבר אנרגיה בין מוצק לנוזל או בין מוצק לגז[28], וכן מעבר אנרגיה בזורם הנמצא בתנועה קרוי הסעה (convection).

ב. כאשר שתי נקודות בעלות טמפרטורה שונה נתונות בחומר במצב צבירה מוצק, מעבר האנרגיה ביניהן יתרחש בתהליך הקרוי הולכה (conduction).

## 1. קרינה

בעוד שמעבר אנרגיה בהולכה ובהסעה מתרחש רק בנוכחות חומר, מעבר אנרגיה בקרינה עשוי להתרחש גם בריק. יתירה מכך, מעבר אנרגיה בריק יעיל יותר מאשר בכל חומר. אף כי גם נוזלים וכזים פולטים קרינה, התיאור שלהלן יתייחס מטעמי נוחיות בעיקר לפליטת קרינה ממוצקים.




**איור ג-1. מנגנוני מעבר חום בבניין**

[28] נוזלים וגזים ניתן לכנות בשם הכולל 'זורמים' (fluids)

דוגמא:

אנרגיה שמקורה בשמש נקלטת בקולטים לחימום מים, לאחר שעברה מרחק של מיליוני קילומטרים בחלל. מעבר האנרגיה מתבצע בקרינה.

שטף פליטת האנרגיה מגוף במרחב תלוי בטמפרטורה של פני השטח שלו ונתון על ידי המשוואה הבאה (חוק סטפן-בולצמן):

$$R = \varepsilon\sigma T^4$$

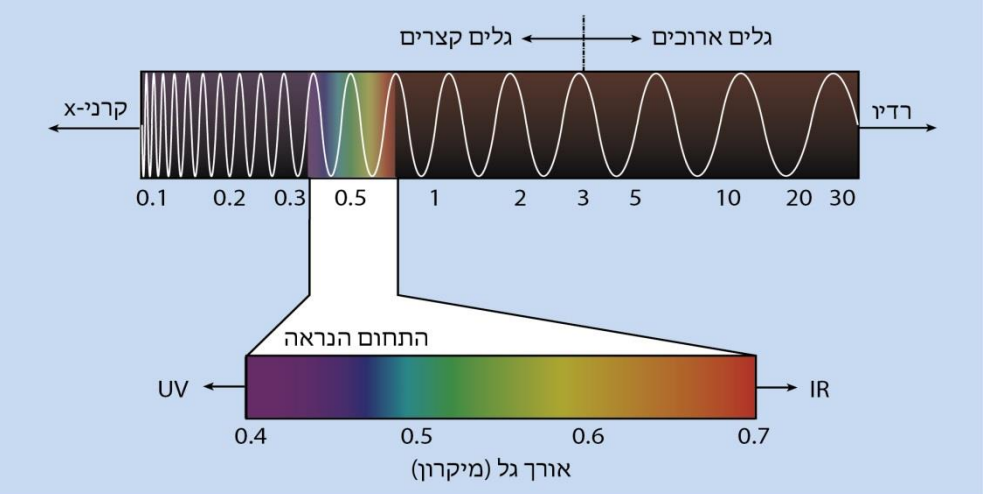
- R - שטף קרינה [$W/m^2$]
- $\varepsilon$ - מקדם הפליטה של פני השטח (emissivity)
- $\sigma$ - מקדם סטפן-בולצמן [$5.67X10^{-8}\ W/m^2\ K^4$]
- T - טמפרטורה מוחלטת, לפי סולם קלווין [K]

קרינה אלקטרומגנטית נהוג לאפיין על פי אורך הגל שלה. לקרינה באורכי גל שונים תכונות שונות, הבאות לידי ביטוי במעבר האנרגיה בתוך הבניין ובין הבניין והסביבה. אורך הגל של הקרינה תלוי בטמפרטורת הפנים של הגוף המקרין, ונתון על ידי המשוואה הבאה (חוק וין):

$$\lambda_{max} = \frac{2897}{T}$$

- $\lambda_{max}$ - אורך הגל שבו עוצמת הקרינה מרבית [μm]
- $T$ - טמפרטורה מוחלטת, לפי סולם קלווין [K]

הקרינה הנפלטת מגופים חמים מאוד, כגון השמש, שטמפרטורת הפנים שלה היא בערך 6,000 קלווין, מכונה **קרינה בגלים קצרים**. הקרינה הנפלטת מגופים קרים יותר, כגון פני כדור הארץ, שהטמפרטורה הממוצעת שלהם היא 300 קלווין בקירוב, מכונה **קרינה בגלים ארוכים** או קרינה אינפרה-אדומה.




**איור ג-2. ספקטרום הקרינה האלקטרומגנטית**

ג

## 1.1 בליעה, העברה והחזרה

כאשר קרינה פוגעת בפניו של גוף כלשהו, היא עשויה להיבלע בו, להיות מוחזרת ממנו, או לעבור דרכו. החלק היחסי של הבליעה, ההחזרה וההעברה של הקרינה תלוי, בזווית הפגיעה בפני השטח, באורך הגל של הקרינה ובתכונות החומר.

את תכונות החומר מייצגים בעזרת שלושה מקדמים, שסכומם שווה לאחד:

$$\alpha+\rho+\tau=1$$

- $\alpha$ - מקדם הבליעה (absorptivity)
- $\rho$ - מקדם ההחזרה (reflectivity)
- $\tau$ - מקדם ההעברה (transmissivity)

מקובל לתאר את תכונות החומר בהתייחס לקרינה הפוגעת בניצב לפניו, אולם חשוב להדגיש שוב כי ערכם של המקדמים עשוי להשתנות במידה משמעותית עם השינוי בזווית הפגיעה. חשוב להדגיש גם כי ישנם חומרים אשר מקדם הבליעה שלהם שונה לחלוטין כאשר מדובר בקרינה באורכי גל שונים, למשל קרינת שמש בהשוואה לקרינה אינפרה אדומה. לתכונה זו יש חשיבות מיוחדת בהקשר של **חומרי זיגוג**.

הנטייה של חומר לבלוע קרינה באורך גל מסוים, אותה מציינים באמצעות מקדם הבליעה, באה לידי ביטוי גם כאשר כיוון מעבר הקרינה הוא הפוך. על פי חוק קירכוף, מקדם הבליעה של חומר (absorptivity) זהה תמיד למקדם הפליטה שלו (emissivity), עבור כל אורך גל נתון, טמפרטורת פנים וזווית פגיעה (פליטה) של הקרינה:

$$\alpha_\lambda(T,\theta,\phi)=\varepsilon_\lambda(T,\theta,\phi)$$

- $\alpha$ - מקדם הבליעה (absorptivity)
- $\varepsilon$ - מקדם הפליטה (emissivity)
- $\lambda$ - אורך גל
- $T$ - טמפרטורה
- $\theta,\phi$ - קואורדינטות מרחביות

**טבלה ג-1. מקדמי בליעה ופליטה של קרינה עבור חומרי בנייה נבחרים**

| חומר | מקדם בליעה לקרינת שמש | מקדם פליטה בקרינה אינפרה אדומה |
|---|---|---|
| בטון | 0.60 | 0.88 |
| לבני חימר | 0.77 | 0.95 |
| אבן גיר | 0.57 | 0.95 |
| עץ (אורן) | 0.60 | 0.95 |
| פלדה מגולוונת (אחרי חשיפה ממושכת) | 0.85 | 0.28 |
| לוח אלומיניום מבריק | 0.15 | 0.08 |
| צבע לבן | 0.20 | 0.91 |
| צבע שחור | 0.90 | 0.90 |

דוגמא חישובית:

את השפעת מקדמי הבליעה של החומר באורכי גל שונים, שהם כאמור שווים למקדמי הפליטה באותם אורכי גל, ניתן להדגים באמצעות הדוגמא הבאה:

נניח שקרינת שמש פוגעת בלוח אלומיניום מבריק, אשר מקדם הבליעה שלו הוא 0.15 בלבד, כלומר 15% (ראו טבלה ג-1). מאחר ומקדם הפליטה של אלומיניום מבריק בתחום האינפרה אדום הוא 0.08 בלבד, החלק היחסי של קרינת השמש אשר תיוותר בלוח הוא

$$15 - (15 \times 0.08) = 13.8\%$$

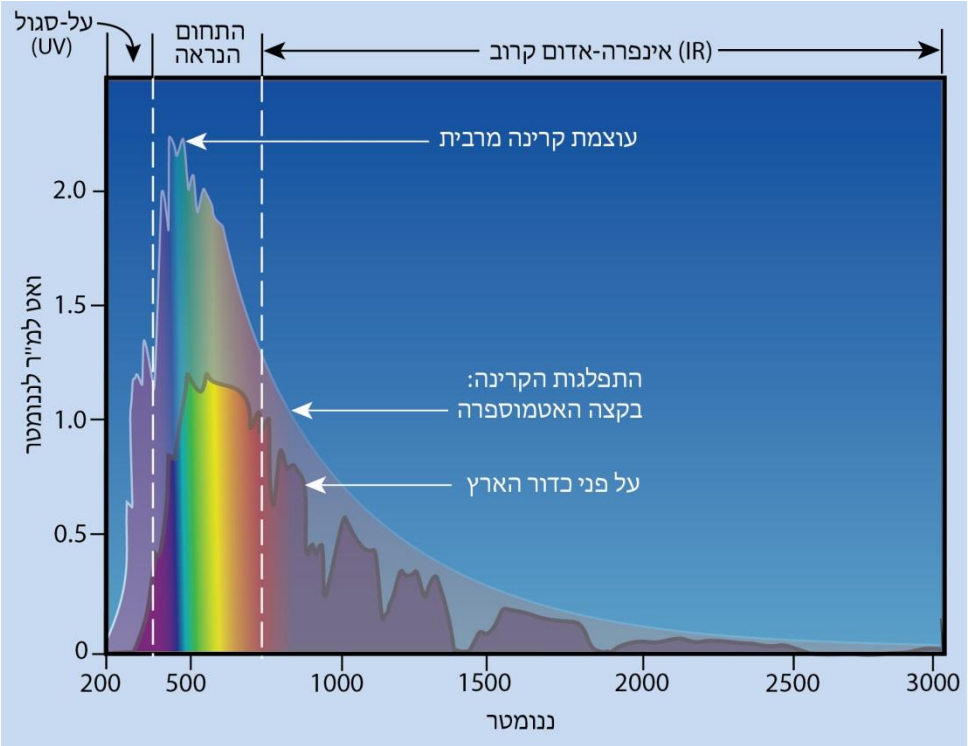
לשם השוואה, אם אותו לוח יהיה צבוע בצבע לבן מבריק, יהיה מקדם הבליעה שלו מעט גבוה יותר, 0.2, או 20%. מאחר ומקדם הפליטה של צבע לבן הוא כ- 0.9, החלק היחסי של קרינת השמש אשר יישאר בלוח יהיה קטן יותר במידה ניכרת:

$$20 - (20 \times 0.9) = 2.0\%$$

## 1.2 קרינה בגלים קצרים (קרינת שמש)

הקרינה הנפלטת מפני השמש נמצאת בתחום אורכי הגל שבין 0.15 מיקרון ו- 3 מיקרון, בקירוב. כ- 47% מקרינה זו נמצא בתחום הנראה לבני אדם, באורכי גל שבין 0.39 ו- 0.76 מיקרון; כ- 50% נמצאים בתחום האינפרה אדום הקרוב, בין 0.8 ו- 3 מיקרון, בערך; היתרה היא קרינה אולטרה-סגולה.

חלק ניכר מקרינת השמש הפוגעת בשכבה העליונה של האטמוספירה אינה מגיעה לפני כדור הארץ, לרבות קרינה בתחום הנראה. ראוי לציין כי האטמוספירה מסננת גם את כמעט כל הקרינה האולטרה-סגולה, העלולה לגרום לנזקים קשים לבני האדם.

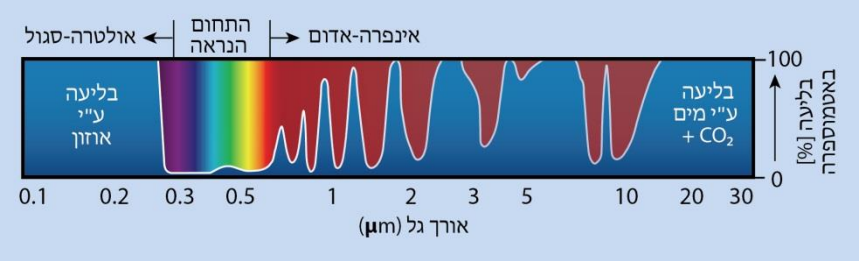



**תרשים ג-1. התפלגות עוצמת קרינת השמש לפי אורכי גל**

### 1.3 קרינה בגלים ארוכים (קרינה אינפרה אדומה)

מקובל להבחין בין קרינה אינפרה אדומה שמקורה בשמש (בתחום האינפרה אדום הקרוב) לבין קרינה אינפרה אדומה שמקורה בגופים קרים יותר, כגון עצמים על פני כדור הארץ, בתחום המכונה אינפרה אדום עמוק, המשתרע על פני תחום אורכי גל של בין 3 ו- 100 מיקרון.

האטמוספירה בולעת את החלק העיקרי של הקרינה האינפרה אדומה הנפלטת מכדור הארץ. המרכיבים העיקריים האחראים לבליעת הקרינה הם אדי מים ודו-תחמוצת הפחמן ($CO_2$) המצויים אמנם באטמוספירה בשיעורים נמוכים (פחות מאחוז אחד), אבל השפעתם על האקלים רבה מאוד.




**תרשים ג-2. בליעת קרינה באטמוספירה על ידי אוזון, אדי מים ופחמן דו-חמצני.**

מיעוט אדי מים באטמוספירה היבשה של אזורים מדבריים מאפשר **קירור קרינתי** יעיל יותר מכפי שמתרחש באזורים לחים, כגון מישור החוף, והוא אחת הסיבות לכך שהלילות במדבר קרים יותר.

## 2. הסעה

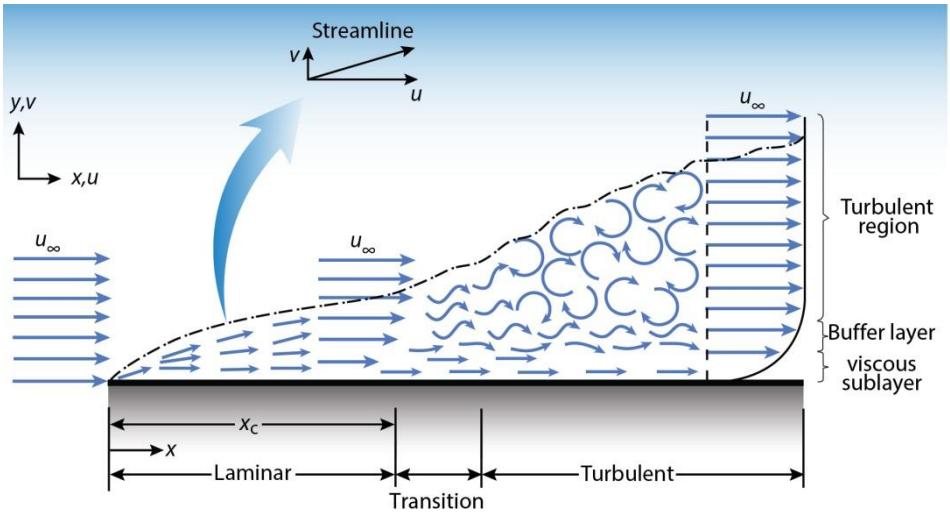
כאשר בין שתי נקודות בתוך תווך נוזלי (או גז) קיים הבדל טמפרטורה, מתרחש מעבר האנרגיה ביניהן בהסעה (convection), תהליך המתבצע בשני מנגנונים: בנוסף לתנועה האקראית של הפרודות המרכיבות את החומר (דיפוזיה), מתרחש מעבר אנרגיה כתוצאה מתנועה של נפח הנוזל (או הגז) כולו. גם מעבר האנרגיה מגוף מוצק אל תווך נוזלי הנמצא סמוך לו מתבצע בהסעה.

> דוגמא:
>
> כאשר מחממים מים בסיר, מקור האנרגיה הוא בלהבה שמתחתיו. החום מועבר מקרקעית הסיר אל שכבת המים הסמוכה אליה ומשם אל שאר המים, בהסעה.

חדירת אוויר חיצוני אל תוך הבניין או דליפה של אוויר פנים החוצה כרוכה בדרך כלל בהסעת אנרגיה, משום שרק לעתים רחוקות תהיה הטמפרטורה הפנימית זהה לזו השוררת בחוץ. כאשר מעבר האוויר הינו רצוי ומבוקר, הוא מכונה 'אוורור'. כאשר מעבר האוויר מתרחש בצורה של חדירה בלתי מבוקרת דרך חריצים במעטפת הבניין הוא מכונה 'אינפילטרציה'.

### 2.1 שכבת הגבול ומעבר האנרגיה בין מוצק וזורם

כאשר זורם נמצא בתנועה בסמוך למוצק, נוצרת שכבה אשר בה משתנות תכונות הזורם כתוצאה מהמגע עם המוצק. שכבה זו קרויה **שכבת גבול** (הידרודינמית), אשר התנאים בה משתנים בהתאם לתכונות הזורם, מאפייני הזרימה, הגיאומטריה של פני המשטח והמרחק ממנו. כאשר קיים הפרש טמפרטורה בין הגוף לבין הזורם, נוצרת שכבת גבול תרמית אשר בה מורגש הבדל טמפרטורות הנובע מהמגע עם הגוף המוצק. עובי שכבות הגבול ההידרודינמית והתרמית אינו בהכרח שווה.




**איור ג-3. שכבת הגבול סמוך לגוף מוצק.**

מעבר האנרגיה בין גוף מוצק לזורם תלוי בהפרש הטמפרטורה ביניהם ובמוליכות התרמית הפנית (surface heat transfer coefficient for convection), ונתון על ידי הביטוי הבא:

$$Q_H = h_c\,(T_s - T_a)$$

- $Q_H$ - שטף חום מוחש (sensible heat flux) [$W/m^2$]
- $h_c$ - מוליכות תרמית פנית [$W/m^2\,K$]
- $T_s, T_a$ - טמפרטורת המשטח וטמפרטורת האוויר [K]

גודלה של המוליכות התרמית הפנית מושפע מתכונות הזורם, ממאפייני הזרימה ומהיחסים המרחביים בין פני המוצק לבין הזורם. לא ניתן לחשב באופן תיאורטי את גודלה של המוליכות התרמית הפנית, והערכים המשמשים את המהנדסים, לרבות אלו המופיעים ב"י 1045, הם תוצאה של מחקרי שדה או ניסויים בנקבות רוח.

כל הנוסחאות אשר בעזרתן ניתן לאמוד את גודלה של המוליכות התרמית הפנית מבוססות על המהירות היחסית בין המוצק לזורם. הנוסחאות המובאות כאן מתאימות במיוחד לרכיבי בניין בסביבה עירונית[29]:

עבור משטחים אופקיים $h_c = 3.96 \times v + 6.42$

עבור משטחים אנכיים $h_c = 10.2 \times v + 4.47$

- $h_c$ - מוליכות תרמית פנית [$W/m^2\,K$]
- v - מהירות הרוח במרחק של 15 ס"מ מפני המשטח, כאשר המדידה מביאה בחשבון רכיבי מהירות בשלושה צירים ניצבים [m/s]

הקושי ביישום המודלים שפותחו נובע מן העובדה שבכדי ליישם אותם יש למדוד את מהירות הרוח בסמוך למשטח עצמו, או להשתמש בתוכנות מחשב מסובכות מאוד המנסות לחזות את המהירות המקומית על בסיס מדידות רוח בתחנה המטאורולוגית הסמוכה בהתחשב במורפולוגיה של הסביבה.

[29] Hagishima and Tanimoto, 2003

### 2.2 זרימה טורבולנטית וזרימה למינרית

כאשר זורם נמצא בתנועה בהשפעה של כוח חיצוני, הזרימה עשויה להיות חלקה, ומהירות הזרימה וכוונה יהיו אז אחידים לחלוטין לאורך זמן. זרימה כזו מכונה **זרימה למינרית**, והיא אופיינית לזורמים בעלי צמיגות גבוהה הנעים במהירות נמוכה מאוד.

זורמים הנעים במהירות גבוהה יחסית, או שהם בעלי צמיגות נמוכה, נעים **בזרימה טורבולנטית**. כלומר, מהירות התנועה של הזורם וכיוונה עשויים להשתנות מרגע לרגע וממקום למקום במרחב. זרימה טורבולנטית מאופיינת במערבולות בגדלים שונים ובעלות עוצמה משתנה.

תנועה טורבולנטית ניתן לתאר באמצעות שני רכיבים: רכיב ממוצע (בזמן ובמרחב) ורכיב משתנה. הרכיב המשתנה עשוי להיות אקראי, אולם במקרים רבים נוספת אל השינוי האקראי גם התנהגות מחזורית.

כאשר הזרימה היא למינרית, מעבר חום בניצב לכיוון התנועה מתרחש בדיפוזיה בלבד. מנגנון זה הינו חלש מאוד, וקצב מעבר האנרגיה עשוי להיות איטי מאוד ולא יעיל. כאשר הזרימה היא טורבולנטית, לעומת זאת, ישנה תנועת מסה גם בניצב לכיוון העיקרי של התנועה, ומעבר החום בכיוון זה עשוי להיות יעיל מאוד.

זרימת אוויר היא כמעט תמיד זרימה טורבולנטית, למעט בחלק דק מאוד של שכבת הגבול הצמוד לגופים מוצקים שעל פניהם נמדדת התנועה.

## 3. הולכה

כאשר בין שתי נקודות שונות בגוף מוצק שורר הבדל טמפרטורה, מעבר האנרגיה ביניהן יתרחש בתהליך הקרוי הולכה. הולכת אנרגיה בחומר מוצק מתרחשת ברמה המולקולרית, ואינה כרוכה בתנועה של המסה המרכיבה את הגוף.

> דוגמא:
>
> כאשר טובלים כפית בכוס מים חמים, גם החלק שאינו בא במגע עם המים מתחמם. חימום זה נובע ממעבר אנרגיה בהולכה.

### 3.1 התנגדות תרמית ומוליכות תרמית

קצב מעבר האנרגיה בהולכה בין שתי נקודות בגוף מוצק תלוי בהפרש הטמפרטורה ביניהן, במרחק המפריד ביניהן ובתכונות החומר. את הקשר בין הגורמים האלה ניתן להציג בנוסחה הבאה:

$$q' = -\lambda \frac{T_2 - T_1}{d}$$

- $q'$ - שטף האנרגיה ליחידת שטח $[W/m^2]$
- $\lambda$ - המוליכות התרמית $[W/m\ K]$
- $T_2, T_1$ - הטמפרטורה בנקודות $T_1$ ו- $T_2$ $[K]$
- $d$ - המרחק בין שתי הנקודות $[m]$

**א. המוליכות התרמית של חומרי בנייה שונים**

המוליכות התרמית (thermal conductivity) היא ביטוי לנטייה של החומר להוליך חום. חומרים בעלי מוליכות תרמית גבוהה מעבירים חום היטב. חומרים בעלי מוליכות תרמית נמוכה נקראים חומרי בידוד תרמי. דוגמאות למוליכות התרמית של חומרי בנייה נפוצים מובאות בטבלה הבאה:

**טבלה ג-2. המוליכות התרמית של חומרי בנייה נבחרים**

| החומר | מסה סגולית [kg/m$^3$] | מוליכות תרמית [W/m K] |
|---|---|---|
| פוליאוריתן מוקצף | 27 | 0.026 |
| פוליסטירן מוקצף (קלקר) | 20-40 | 0.033-0.040 |
| בטון תאי (כגון איטונג) | 400-700 | 0.14-0.22 |
| טיח צמנטי | 2,000 | 1.25 |
| בטון | 2,400 | 1.7-2.1 |
| פלדה | 7,800 | 45 |

עיון בטבלה מראה שהחומרים בעלי המשקל הסגולי הנמוך הם בדרך כלל מוליכים גרועים, כלומר מבודדים, בעוד שחומרים צפופים הם בדרך כלל מוליכים טובים.

מרבית חומרי הבידוד התרמי מקנים התנגדות למעבר חום הודות לאוויר אשר כלוא בחומר: בועות אוויר הן אלו המקנות בידוד לחומרים המוקצפים או מותפחים כגון פוליסטירן, פוליאוריתן וכן גם לבטון התאי; ואוויר אשר כלוא בין הסיבים הוא המקנה את הבידוד במזרוני הסיבים כגון צמר סלעים או צמר זכוכית.

### שינוי התכונות לאורך זמן

התכונות התרמיות של חומרי בנייה עלולות להשתנות לאורך זמן, בהשפעה של גורמים שונים. החשובים שבהם הם תכולת הרטיבות ודפורמציה מכנית (מעיכה).

עלייה בתכולת הרטיבות של בטון ומוצרי הבטון מעלה את המוליכות התרמית שלהם. הבעיה משמעותית במיוחד דווקא בחומרים הקלים, כגון בטון תאי, משום ששינוי קטן בערך המוחלט עלול להיות בעל השפעה יחסית גבוהה. בעוד שבמוצרי הבטון חדירת הלחות נעשית בדיפוזיה דרך החומר, במזרוני הסיבים תתכן חדירה של מים גם במצב הנוזלי. המים עלולים לחדור דרך הקיר, אם אינו אטום, או להצטבר כתוצאה מעיבוי על משטח קר. כאשר מעטפת מזרוני הבידוד מאפשרת חדירה של מים, וכן של אבק, היעילות שלהם פוחתת במידה ניכרת לאורך השנים.

כאמור, הבידוד של מרבית החומרים מתקבל כתוצאה מנוכחות אוויר כלוא בחללים קטנים בתוך החומר המוצק. אם החומר נתון ללחץ חיצוני וסובל ממעיכה (במקרה של הנחה אופקית) או שקיעה (מזרוני צמר במצב אנכי), המרקם של מוצר הבידוד נפגע ויעילותו פוחתת. התופעה חמורה במיוחד במזרוני בידוד בעלי צפיפות נמוכה אשר אינם מקבלים תמיכה מספקת בעת ההתקנה.

**ב. ההתנגדות התרמית האופיינית של רכיב בניין (r)**

כאשר מחשבים את מעבר האנרגיה בהולכה דרך רכיב בניין מסוים, כגון קיר, יש להביא בחשבון גם את עובי החומר: ככל שהחומר עבה יותר, כך גדלה ההתנגדות התרמית הכוללת של הרכיב. הקשר בין **ההתנגדות התרמית האופיינית** (thermal resistance) של רכיב בניין לבין עוביו והמוליכות התרמית של החומר נתון על ידי הביטוי הבא:

$$r = \frac{d}{\lambda}$$

- r - ההתנגדות התרמית האופיינית של רכיב בניין [W/m$^2$ K]
- d - עובי האלמנט [m]
- $\lambda$ - המוליכות התרמית של החומר [W/m K]

ג

### ג. התנגדות שכבת הגבול

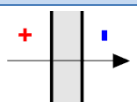
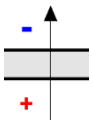
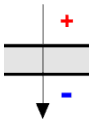
על מנת לחשב את מעבר האנרגיה דרך רכיב בניין המפריד בין חללים שונים בבניין או בין חלל פנימי לחלל חיצוני, יש להביא בחשבון גם את **ההתנגדות התרמית הפנית** שיוצרות **שכבות הגבול** בין הרכיב והאוויר הסמוך לו. **ההתנגדות התרמית הכוללת** של רכיב בניין (total thermal resistance) היא אפוא הסכום של ההתנגדות התרמית האופיינית של הרכיב וההתנגדות התרמית הפנית של שתי פאותיו:

$$R = \frac{1}{h_{in}} + r + \frac{1}{h_{out}}$$

- $R$ - ההתנגדות התרמית הכוללת של רכיב בניין [$m^2$ K/W]
- $r$ - ההתנגדות התרמית האופיינית של הרכיב [$m^2$ K/W]
- $h_{in}$ - העברות התרמית הפנית הפנימית [$W/m^2$ K]
- $h_{out}$ - העברות התרמית הפנית החיצונית [$W/m^2$ K]

הערכים הבאים של המוליכות התרמית הפנית מתייחסים למעבר אנרגיה בין רכיבי בניין לבין אוויר הבא איתם במגע.

**טבלה ג-3: מוליכות תרמית פנית של רכיבי בניין [30]**

| כוון זרימת החום | רכיב הפונה כלפי חוץ | | רכיב הפונה כלפי פנים | |
|---|---|---|---|---|
| | מוליכות תרמית פנית ($h_{out}$) [$W/m^2K$] | התנגדות תרמית פנית ($1/h_{out}$) [$m^2K/W$] | מוליכות תרמית פנית ($h_{in}$) [$W/m^2K$] | התנגדות תרמית פנית ($1/h_{in}$) [$m^2K/W$] |
|  | 25 | 0.04 | 8 | 0.13 |
|  | 25 | 0.04 | 10 | 0.10 |
|  | 25 | 0.04 | 6 | 0.17 |

ההבדל בין המוליכות התרמית הפנית של משטחים פנימיים ומשטחים חיצוניים נובע מהבדלים במהירות תנועת האוויר על פניהם. בעוד שבתוך הבניין תנועת האוויר היא איטית ביותר, הרי שהרוח הנושבת על פני משטחים חיצוניים מהווה גורם עיקרי במעבר חום בין רכיב הבניין והאוויר בסביבה.

המוליכות התרמית הפנית של משטח אופקי, כגון רצפה או תקרה, מושפעת מכיוון זרימת החום: כאשר הרצפה חמה יותר מאשר האוויר שמעליה, האוויר שבא איתה במגע יתחמם. הנטייה של אוויר חם לעלות תרחיק אותו מפני הרצפה ותביא לכך שתהליך מעבר האנרגיה יהיה יעיל. כאשר התקרה חמה יותר מאשר האוויר שמתחתיה, האוויר הסמוך לה יתחמם – אך יישאר כלוא בשכבה דקה בקרבתה. מעבר החום במקרה כזה הוא לפיכך יעיל פחות.

[30] מותאם מת"י 1045 חלק 0

ההעברות התרמית הפנית עשויה להוות חלק ניכר מההתנגדות התרמית הכוללת של רכיב בניין. להלן מובא לדוגמא חישוב ההתנגדות התרמית הכוללת של לוח זכוכית אנכי בעובי 4 מ״מ:

| | עובי החומר (d) [m] | מוליכות תרמית (λ) [W/m K] | התנגדות תרמית [$m^2$ K/W] |
|---|---|---|---|
| שכבת גבול פנימית ($1/h_{in}$) | | | 0.13 |
| זכוכית | 0.0004 | 0.8 | 0.0004/0.8=0.005 |
| שכבת גבול חיצונית ($1/h_{out}$) | | | 0.04 |
| | | סה״כ | ~ 0.17 |

זכוכית מוליכה חום היטב. מאחר ועובייה קטן מאוד, הרי שההתנגדות התרמית של לוח הזכוכית עצמו היא אפסית, ועיקר ההתנגדות מושגת בשכבות הגבול.

### ד. ההתנגדות התרמית הכוללת של רכיב בניין הכולל מספר שכבות מחומרים שונים

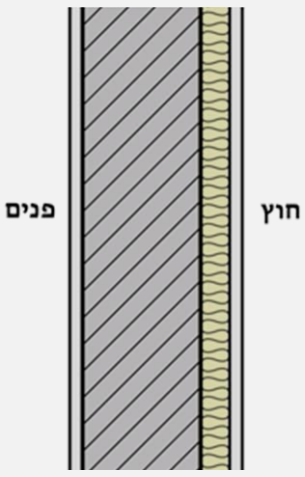
כאשר רכיב בבניין עשוי מספר שכבות בעלות תכונות תרמיות שונות, ההתנגדות התרמית האופיינית של הרכיב שווה לסכום החשבוני של ההתנגדויות התרמית של כל השכבות.

חשוב לציין שבעוד שניתן לחבר בצורה פשוטה וישירה את ההתנגדות התרמית של מספר שכבות בכדי לקבל את ההתנגדות התרמית הכוללת של רכיב בניין, אין הדבר נכון ביחס לחישוב **ההעברות התרמית הכוללת** (thermal transmittance). ההעברות התרמית הכוללת של רכיב (ערך U) שווה לערך ההופכי של סכום ההתנגדויות של כל השכבות (R), הכולל גם את ההתנגדות התרמית הפנית:

$$U = \frac{1}{R}$$

דוגמא:

חישוב ההתנגדות התרמית (R) וההעברות התרמית (U) של קיר בטון בעובי 20 ס"מ, עם בידוד תרמי של 5 ס"מ פוליסטירן מוקצף (קלקר) וחיפוי טיח בשני הצדדים:




| החומר | העובי (d) [m] | המוליכות התרמית (λ) [W/m K] | התנגדות התרמית של השכבה (r) [$m^2$ K/W] |
|---|---|---|---|
| שכבת גבול | | | 0.04 |
| טיח | 0.01 | 0.87 | 0.011 |
| בטון | 0.20 | 2.10 | 0.095 |
| פוליסטירן מוקצף | 0.05 | 0.04 | 1.250 |
| טיח | 0.02 | 0.87 | 0.022 |
| שכבת גבול | | | 0.13 |
| **ההתנגדות התרמית הכוללת של חתך הקיר (R)** | | | **1.64** |
| **ההעברות התרמית הכוללת של הקיר (U)** | | | **0.61** |

הערה: קיימים סוגים שונים של אותו חומר (כגון בטון או טיח) אשר המוליכות התרמית שלהם שונה. לצורך חישוב ההתנגדות התרמית הכוללת של חתך אופייני של קיר יש להיעזר בנתוני החומרים בפועל.

## 3.2 אגירת חום

כאשר התנאים אינם משתנים לאורך זמן, כלומר מתקיים 'מצב יציב' או 'מצב תמידי' (steady-state), הפרש טמפרטורות נתון יגרום למעבר החום דרך רכיב בבניין אשר יעמוד ביחס הפוך להתנגדות התרמית שלו – ללא קשר למאפיינים אחרים של החומר.

לדוגמא:
ההתנגדות התרמית של שכבת קלקר בעובי 1 ס"מ היא 0.3 מ"ר קלווין לואט – כמו שכבת בטון בעובי 63 ס"מ!

| חומר | מוליכות תרמית (λ) [W/m K] | עובי [m] | התנגדות תרמית (r) [$m^2$ K/W] |
|---|---|---|---|
| פוליסטירן מוקצף (קלקר) | 0.033 | 0.01 | 0.01 / 0.033 = 0.3 |
| בטון | 2.1 | 0.63 | 0.63 / 2.1 = 0.3 |

בפועל, ההתנהגות התרמית של שכבת קלקר בעובי 1 ס"מ שונה מזו של שכבת בטון עבה, משום שהטמפרטורה בשני צידי הרכיב משתנה לאורך זמן, ומעבר האנרגיה דרך רכיב בניין תלוי גם בקיבול החום של החומר.

הגדרה:

קיבול חום (נפחי) של חומר (volumetric heat capacity) הוא כמות האנרגיה אשר תביא לעליית טמפרטורה של מעלה אחת ליחידת נפח. קיבול חום מכונה גם 'מסה תרמית'.

בעוד שקיבול החום של חומר הוא תכונה הקשורה לנפח של גוף, החום הסגולי שלו מתייחס למסה. הקשר בין קיבול חום לבין חום סגולי נתון בביטוי הבא:

$$C = \rho \times c_p$$

- C - קיבול החום (הנפחי) של חומר [$KJ/m^3$ K]
- ρ - צפיפות החומר [$kg/m^3$]
- $c_p$ - החום סגולי של החומר [KJ/kg K]

כאשר רכיב בניין קולט אנרגיה, הוא מתחיל להתחמם. אם החומר ממנו הוא עשוי יהיה בעל קיבול חום גבוה, כמות האנרגיה אשר תיבלע בו עשויה להיות גבוהה, ולכן השינוי בטמפרטורה שלו יהיה מתון בהשוואה לגוף החשוף לתנאים דומים אך עשוי חומר בעל קיבול חום נמוך.

ישנם הבדלים גדולים בקיבול החום של חומרים שונים. טבלה ג-4 מציגה את התכונות התרמיות של חומרי בנייה נפוצים.

**טבלה ג-4. מסה סגולית, חום סגולי וקיבול חום נפחי של חומרים שונים**

| החומר | מסה סגולית $[kg/m^3]$ | חום סגולי [KJ/kg K] | קיבול חום נפחי $[KJ/m^3 K]$ |
|---|---|---|---|
| פלדה | 7,800 | 0.48 | 3,745 |
| זכוכית | 2,500 | 0.75 | 1,875 |
| בטון | 2,400 | 0.85 | 2,040 |
| בטון תאי (כגון איטונג) | 600 | 0.95 | 570 |
| עץ (אורן) | 425 | 2.25 | 955 |
| פוליסטירן מוקצף | 30 | 1.47 | 44 |
| אוויר (במנוחה) | 1.18 | 1.30 | 1.5 |

## 3.3 דיפוסיביות ואפוסיביות תרמית

כפי שתואר קודם, ההתנהגות של חומר החשוף לשינויים בטמפרטורה של הסביבה תלויה הן במוליכות התרמית והן בקיבול החום, גם יחד. ניתן לתאר אותה בעזרת שני מדדים משולבים: דיפוסיביות (diffusivity) ואפוסיביות (effusivity).

### א. דיפוסיביות תרמית (thermal diffusivity)

דיפוסיביות תרמית היא היחס בין המוליכות התרמית לבין קיבול החום הנפחי:

$$D = \frac{\lambda}{C}$$

- D - הדיפוסיביות התרמית [$מ^2$/שנייה]
- $\lambda$ - מוליכות תרמית [W/m K]
- C - קיבול החום (הנפחי) של חומר $[J/m^3 K]$

קל לראות כי ככל שהמוליכות התרמית של חומר (המופיעה במונה) גבוהה יותר, כך גדלה נטייתו להעביר חום. במקביל, ככל שקיבול החום (המופיע במכנה) גבוה יותר, דרושה כמות רבה יותר של אנרגיה להביא לעלייה בטמפרטורה. חומרים עם דיפוסיביות גבוהה משנים את הטמפרטורה שלהם במהירות בתגובה לשינוי בסביבה, וחומרים עם דיפוסיביות נמוכה מגיבים באיטיות לשינויים.

הדיפוסיביות של חומר משפיעה גם על העומק שבו יורגש שינוי הטמפרטורה בזמן נתון: ככל שהדיפוסיביות גבוהה יותר, כך יורגש השינוי בטמפרטורה בעומק גדול יותר מפני השטח.

ניתן להדגים את השפעת הדיפוסיביות על מהלך הטמפרטורה באמצעות השוואה בין צמר סלעים לאבן חול. לשני החומרים דיפוסיביות דומה, בערך $3 \times 10^{-6}$ $מ^2$/שנייה. אף שהחומרים הם בעלי מסה סגולית שונה מאוד, מהלך הטמפרטורה בהם בהשפעה של שינוי מחזורי בטמפרטורת הסביבה יהיה זהה.

ג

### ב. אפוסיביות תרמית (thermal effusivity)

אפוסיביות תרמית[31] נתונה על ידי השורש הריבועי של המכפלה של המוליכות התרמית וקיבול החום:

$$e = \sqrt{(\lambda\, C)}$$

- $e$ - האפוסיביות התרמית [$J/m^2\ K\ s^{0.5}$]
- $\lambda$ - מוליכות תרמית [W/m K]
- C - קיבול החום (הנפחי) של חומר [$J/m^3\ K$]

ככל שהאפוסיביות של חומר גבוהה יותר, כך גדל שטף האנרגיה אשר ייווצר בהשפעת שינוי בטמפרטורת פני השטח. כלומר, אם מבקשים לייצב את הטמפרטורה של חלל הפנים בדירה ולמנוע שינויים מהירים בתגובה למעבר אנרגיה מהסביבה, יש להשתמש בחומרים בעלי אפוסיביות גבוהה אשר יוכלו לבלוע את האנרגיה העודפת בסביבה או לשחרר את האנרגיה האגורה בהם בקצב מהיר.

נשוב אפוא ונבחן את החומרים אשר נכללו בטבלאות ג-2 ו- ג-3.

**טבלה ג-5. תכונות תרמיות של חומרים שונים**

| החומר | מוליכות תרמית W/m K | קיבול חום נפחי $KJ/m^3\ K$ | דיפוסיביות $m^2/s \times 10^{-6}$ | אפוסיביות[32] $J/m^2\ K\ s^{0.5}$ |
|---|---|---|---|---|
| פלדה | 45 | 3,745 | 12.0 | 12,980 |
| זכוכית | 1.05 | 1,875 | 0.56 | 1,400 |
| בטון | 1.7 | 2,040 | 0.83 | 1,860 |
| בטון תאי (כגון איטונג) | 0.18 | 570 | 0.40 | 315 |
| עץ (אורן) | 0.09 | 955 | 0.09 | 295 |
| פוליסטירן מוקצף | 0.033 | 44 | 0.75 | 38 |
| אוויר (במנוחה) | 0.026 | 1.5 | 14.7 | 7 |

בטבלה רואים בבירור כי אם מבקשים למתן את תנודות הטמפרטורה בדירה, ישנה עדיפות ברורה לבטון על פני בטון תאי או עץ.

לאפוסיביות של החומר ישנה גם השפעה רבה על הטמפרטורה בנקודת המגע בין שני גופים הנמצאים בטמפרטורות שונות[33]. אם מניחים שהמגע התרמי בין שני הגופים הוא טוב, אז הטמפרטורה בממשק ביניהם נתונה על ידי הביטוי הבא:

$$T_m = T_1 + (T_2 - T_1)\frac{e_2}{(e_2 + e_1)}$$

- $T_m$ - הטמפרטורה במשטח המגע בין הגופים [K]
- $T_1, T_2$ - הטמפרטורות של גופים 1 ו-2 [K]
- $e_1, e_2$ - האפוסיביות התרמית של גופים 1 ו-2 [$J/m^2\ K\ s^{0.5}$]

[31] המונח effusivity הוא חלופי למונח admittance – אולם המונח admittance משמש גם לתיאור ההולכה התרמית, ולכן המונח effusivity עדיף.

[32] Obata et al, 2005

[33] Van Laack, 2014

דוגמא:

נניח שאדם הולך יחף על רצפה שהטמפרטורה שלה היא 25 מעלות. טמפרטורת העור של כף הרגל היא בערך 35 מעלות, והאפוסיביות של כף הרגל היא בערך 1,120 $J/m^2\ K\ s^{0.5}$. אם הרצפה עשויה בטון, פני הרצפה הנמצאים במגע עם כף הרגל יגרמו לתחושה שהוא במגע עם משטח בטמפרטורה של 28.8 מעלות, בעוד שרצפה עשויה עץ תגרום לתחושה של מגע עם משטח בטמפרטורה של כ-32.9 מעלות. כלומר, רצפת הבטון תיתן תחושה של קרירות, הרצויה בקיץ – אך אינה רצויה כלל בחורף.

## 4. אידוי מים

התהליך שבו משתנה מצב צבירה של חומר מנוזל לגז קרוי אידוי. תהליך זה דורש השקעת אנרגיה, אשר מקורה עשוי להיות בגז אשר לתוכו מתאדה הנוזל, או מקור חיצוני.

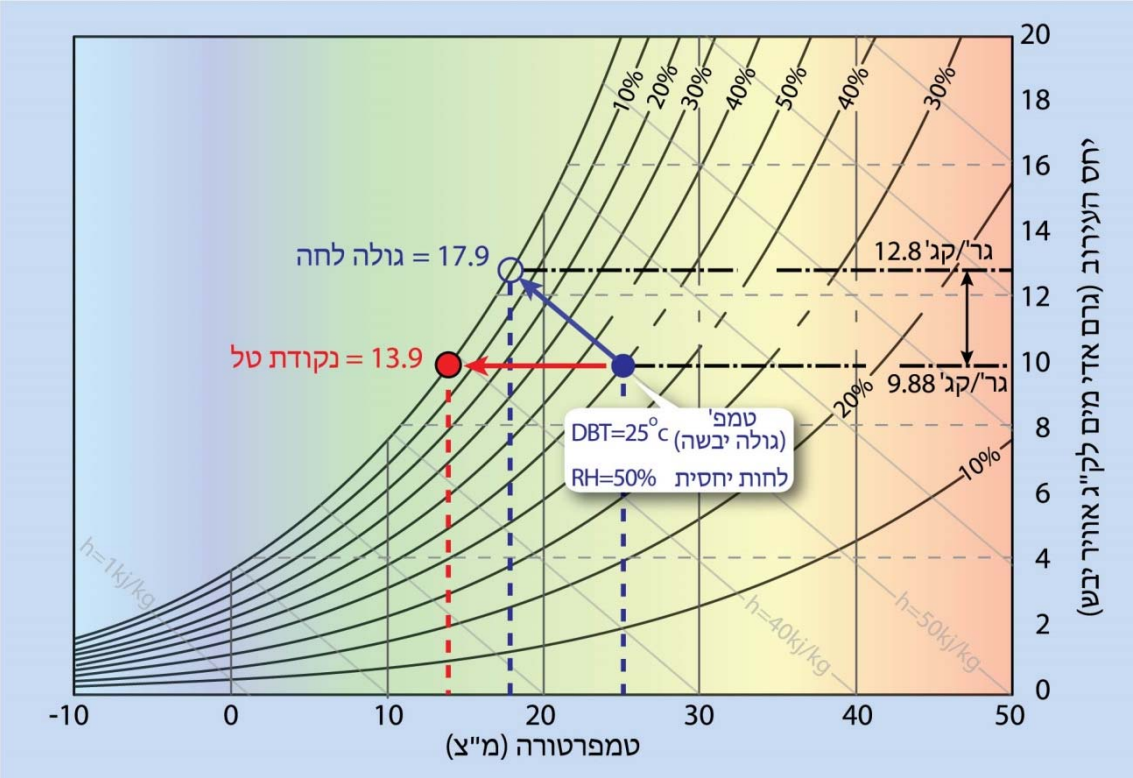
האטמוספירה של כדור הארץ, ובפרט האוויר אשר סביבנו, הינו תערובת של מספר גזים, אשר העיקריים שבהם הינם חנקן, חמצן, דו תחמוצת הפחמן ואדי מים. אולם בעוד שהחלק היחסי של אדי המים באוויר עשוי להשתנות בהתאם לתנאי הסביבה, הרי שחלקם היחסי של המרכיבים האחרים הוא פחות או יותר קבוע. מאחר וכל התהליכים הקשורים באדי המים באוויר אינם מושפעים מנוכחותם של הגזים האחרים, ניתן להתייחס אל האוויר כאל תערובת בעלת שני מרכיבים – 'אוויר יבש' ואדי מים.

את כמות אדי המים באוויר נהוג לחשב ביחס לכמות נתונה של 'אוויר יבש'. היא עשויה להשתנות מאפס (כלומר אוויר יבש לחלוטין), ועד לרוויה. כאשר האוויר נמצא ברוויה, לא ניתן עוד להוסיף אדי מים מבלי להביא לעיבוי של כמות דומה של מים. כמות אדי המים שהאוויר יכול להכיל תלויה בטמפרטורה שלו ובלחץ האטמוספירי: אוויר חם מסוגל להכיל כמות גדולה יותר של אדי מים מאשר אוויר קר.

### 4.1 הטבלה הפסיכרומטרית

את מכלול התכונות של אוויר לח נהוג להציג על גבי טבלה הקרויה **טבלה פסיכרומטרית**. הטבלה הפסיכרומטרית (תרשים ג-3) היא תרשים המתאר את הקשר בין טמפרטורת האוויר ומדדים שונים ללחות (וכן לצפיפות האוויר).

בטבלה הפסיכרומטרית כל נקודה מציינת שילוב יחיד של טמפרטורה ולחות האוויר (בתנאי לחץ אוויר נתונים). בעוד שאת הטמפרטורה נהוג להציג באמצעות ערכה של הגולה היבשה, הרי שאת הלחות באוויר ניתן להציג באמצעות מספר מדדים שונים: טמפרטורת הגולה הלחה, נקודת הטל, הלחות המוחלטת, הלחות היחסית או לחץ האדים החלקי.




**תרשים ג-3. הטבלה הפסיכרומטרית**

- טמפרטורת גולה יבשה - dry bulb temperature (קווים אנכיים שחורים הנמשכים אל הציר האופקי של התרשים): טמפרטורת האוויר המתקבלת בעזרת מדחום הנמצא בסביבה שבה מאזן הקרינה הוא ניטרלי, המדחום יבש ואין אידוי או עיבוי של מים. יחידות: $^{o}C$ או K.
- תכולת אדי מים באוויר, או יחס העירוב - humidity ratio[34] (קווים אופקיים הנמשכים אל הציר האנכי מימין): המסה של אדי מים באוויר ביחס ליחידת מסה של אוויר יבש. יחידות: g/kg או kg/kg.
- לחות יחסית - relative humidity (העקומות האקספוננציאליות): היחס בין תכולת אדי המים באוויר לבין תכולת אדי המים שהיו מביאים את האוויר לרוויה, באותה טמפרטורה ובאותו לחץ אטמוספירי. העקומה העבה מייצגת אוויר ברוויה, שבו הלחות היחסית היא 100%. יחידות: %.
- לחץ אדים חלקי (partial vapor pressure): אותו חלק מהלחץ האטמוספירי הנמדד כתוצאה מנוכחותם של אדי מים באוויר. יחידות: mb או kPa.
- אנתלפיה (enthalpy): אנתלפיה היא ביטוי לכמות האנרגיה המצויה בחומר. האנתלפיה של אוויר היא הסכום של **החום המוחש** (sensible heat) **והחום הכמוס** (latent heat) שלו. בטבלה הפסיכרומטרית מוצגים קווים של אנתלפיה סגולית, שהיא כמות האנרגיה ליחידת מסה של אוויר. יחידות: kJ/kg.

[34] את הלחות המוחלטת מודדים ביחידות של מסה לנפח. למשל: גר' אדי מים למ"ק אוויר יבש.

- נפח סגולי (specific volume): הנפח ליחידת מסה של אוויר, בלחץ אטמוספירי נתון. הנפח משתנה כפונקציה של הטמפרטורה של האוויר. יחידות: $m^3/kg$.
- נקודת טל (dew point): טמפרטורת אוויר המתקבלת כאשר מקררים אוויר עד לרוויה, ללא תוספת או גריעה של אדי מים. יחידות: $^oC$ או K.
- טמפרטורת גולה לחה - wet bulb temperature (הקווים האלכסוניים (אפורים): טמפרטורת האוויר המתקבלת כאשר לתוך נפח נתון של אוויר מאדים מים **בתהליך אדיאבטי** [35] עד שהתערובת מגיעה לרוויה. ניתן למדוד את טמפרטורת הגולה הלחה בעזרת מדחום הנתון בתוך שרוול לח וחשוף לתנועת אוויר בסביבה שבה מאזן הקרינה הוא ניטרלי. טמפרטורת הגולה הלחה משמשת כמדד ללחות של האוויר, אף כי היא נמדדת ביחידות של טמפרטורה. יחידות: $^oC$ או K.

## 4.2 קירור באידוי

לאנרגיה הפנימית של אוויר שני מרכיבים[36]: חום מוחש וחום כמוס.

- חום מוחש (sensible heat) הוא ביטוי לתנועתם של החלקיקים מהם מורכב החומר. עלייה בכמות החום המוחש בחומר תביא לעלייה בטמפרטורה שלו.
- חום כמוס (latent heat) הוא ביטוי לכוחות בין החלקיקים האחראים לקיומם של מצבי הצבירה השונים (מוצק, נוזל או גז).

אל האוויר ניתן כאמור להתייחס כאל תערובת בעלת שני מרכיבים: אוויר יבש ואדי מים. מאחר ובטבע האוויר היבש מצוי רק בצורת גז, הבדלים בחום הכמוס הם תוצאה ישירה של שינוי בכמות אדי המים. אף כי החלק היחסי של אדי המים באוויר הוא נמוך מאוד – פחות משני אחוזים בדרך כלל - לנוכחותם ישנה השפעה רבה על כמות האנרגיה הכוללת (האנתלפיה) של האוויר, כפי שמראה טבלה ג-6.

**טבלה ג-6. השפעת תכולת אדי המים על האנתלפיה של אוויר בטמפרטורה של 25 מעלות**

| תכולת אדי מים [גר׳/ק״ג] | לחות יחסית [%] | אנתלפיה [קילו-ג׳אול/ק״ג] |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 25.0 |
| 5 | 25 | 37.6 |
| 10 | 50 | 50.4 |
| 15 | 75 | 62.9 |
| 20 | 100 | 75.5 |

כפי שמראה טבלה ג-7, הסיבה לכך היא שבעוד החום הסגולי של אוויר יבש ושל מים הוא יחסית נמוך, הרי שחום האידוי (האנרגיה הדרושה לאדות מים לאדים באותה טמפרטורה - latent heat of vaporization) גדול מאוד.

[35] תהליך אדיאבטי: תהליך המתקיים ללא תוספת של אנרגיה ממקור חיצוני וללא איבוד אנרגיה אל הסביבה.

[36] הדיון כאן אינו עוסק באנרגיה כימית ואנרגיה גרעינית, המהווים אף הם מרכיבים של האנרגיה הפנימית של חומר.

ג

**טבלה ג-7. חום סגולי וחום האידוי של מרכיבי האוויר**

| | |
|---|---|
| חום סגולי של אוויר יבש (בטמפרטורה 10 $^{o}$C) | 1.01 kJ/kg $^{o}$C |
| חום סגולי של מים (בטמפרטורה 4 $^{o}$C) | 4.18 kJ/kg $^{o}$C |
| חום האידוי | 2,257 kJ/kg |

הערה: החום הסגולי מושפע במידה מסוימת מטמפרטורת החומר.

החשיבות של אדי המים באוויר מן הבחינה האנרגטית באה לידי ביטוי מעשי בפעולתן של מערכות צינון באידוי ומערכות מיזוג אוויר רגילות כאחת:

במערכות מיזוג אוויר רגילות, אדי המים הנמצאים באוויר מתעבים כאשר הם באים במגע עם מחליף החום הנמצא בטמפרטורה הקרובה לאפס מעלות. בתהליך העיבוי נפלטת אנרגיה רבה, הגורמת להתחממות האוויר. על מערכת מיזוג אוויר הפועלת באקלים לח להתמודד עם עומס גדול בהרבה ממערכת הפועלת בסביבה שבה הטמפרטורה של האוויר זהה אך הלחות נמוכה.

במערכות צינון באידוי, מיושם תהליך הפוך. אוויר חם יחסית ויבש בא במגע עם מים על מצע מיוחד או בצורת טיפות המרוססות לתוכו. אידוי של המים סופח אנרגיה רבה מן האוויר, וכתוצאה מכך עשויה לרדת הטמפרטורה שלו במידה ניכרת.

## מקורות

[1] מכון התקנים הישראלי (2011). ת"י 1045, חלק 0 – בידוד תרמי של בניינים: כללי.

[2] Hagishima, A. and Tanimoto, J. (2003) "Field measurements for estimating the convective heat transfer coefficient at building surfaces". Building and Environment, 38: 873-881.

[3] Obata Y., Takeuchi K., Furuta Y. and Kanayama K. (2005). Research on better use of wood for sustainable development: Quantitative evaluation of good tactile warmth of wood. Energy 30:1317-1328.

[4] Van Laack (2014). Measurement of Sensory and Cultural Influences on Haptic Quality Perception. Van Laack Buchverlag, Aaachen, 245p.

# פרק ד:

# נוחות תרמית ואיכות האוויר בדירה

ד

# פרק ד: נוחות תרמית ואיכות האוויר בדירה

אחת המטרות החשובות בבנייה היא ליצור סביבה נוחה לקיום הפעילות היומיומית שלנו, אשר התנאים בה עשויים להיות שונים מאוד מהתנאים השוררים מחוץ לבניין. קיום תנאים נוחים כרוך לעיתים קרובות בהשקעת אנרגיה – לתאורה, לבקרת לחות, לחימום או לצינון. פרק זה יבחן מהם התנאים הרצויים בדירה, וכיצד ניתן ליצור בסיבה אשר תסייע לקיים אותם. עיקר הפרק יעסוק בשאלה מהי 'נוחות תרמית', אך מאחר ולאקלום הדירה עלולה להיות השפעה מוחשית על איכות האוויר, יוקדש חלק מהדיון גם לשאלה הזו.

## 1. נוחות תרמית - הגדרה

*"Thermal comfort is that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environment."*

International Standards Organization [37]

מההגדרה עולה שתחושת הנוחות היא קודם כל עניין הקשור לתודעה. עוד משתמע שנוחות תרמית היא עניין סובייקטיבי, ואכן כך הוא. לא כל בני האדם שווים, ואנשים שונים עשויים להביע עמדות מגוונות באשר למידת הנוחות שהם חשים בסביבה נתונה. עם זאת, מחקרים רבים שנעשו בכל רחבי העולם במשך השנים מראים שמבחינה סטטיסטית, רוב האנשים חשים בנוח בתנאים דומים, ולכן ניתן לאפיין סביבה אשר מרבית בני האדם יחושו בה בנוח.

תחושת הנוחות התרמית מתקבלת בעקבות תהליך מורכב אשר מוסבר באופן סכמתי באיור ד-1. ראשית, האדם חשוף לסביבה אשר אותה ניתן לתאר באמצעות מדדים כמותיים מדויקים ואובייקטיביים, כגון טמפרטורת האוויר או שיעור הלחות. גוף האדם מקבל מידע על הסביבה באמצעות החושים, ועשוי להגיב על מנת לשמור על תנאים אופטימליים לתפקוד. התגובות הפיסיולוגיות אינן רצוניות, ומיועדות לשמור על טמפרטורה קבועה (בקירוב) של הגוף בהתאם לפעילות המטבולית. בניגוד למדדים הפיסיים, שהם 'אובייקטיביים', האופן שבו חשים בני האדם את הסביבה משתנה מאדם לאדם. יתרה מזאת, אף כי כל בני האדם מקיימים טמפרטורת גוף דומה, באמצעות מנגנוני רגולציה פיסיולוגיים זהים, הבדלים מטבוליים עשויים להביא לתגובות שונות לאותם תנאים סביבתיים. האופן שבו בני האדם חשים את הסביבה התרמית (thermal sensation) הוא הבסיס לקביעת עמדותיהם ביחס למצב הרצוי, כלומר העדפות תרמיות (thermal preferences). ההעדפה התרמית, שהיא כאמור היחס המודע לסביבה התרמית, מושפעת מגורמים פסיכולוגיים התלויים באישיות האדם ודפוסי ההתנהגות, העשויים בתורם להיות מושפעים ממוסכמות חברתיות.

[37] ISO 7730-2005: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria

**איור ד-1. הגורמים המשפיעים על הנוחות התרמית**

## 2. נוחות תרמית ומאזן האנרגיה בגוף האדם

מאחר והטמפרטורה של גוף האדם קבועה, הגוף נמצא במצב של שיווי משקל תרמי עם הסביבה, לאורך זמן. כלומר, האנרגיה (הביו-כימית) שהגוף מייצר תוך כדי תפקודו, בניכוי האנרגיה הדרושה לעבודה (במובן הפיסיקלי – הפעלת כוח לאורך מרחק), שווה לאנרגיה שעל הגוף לאבד אל הסביבה.

### 2.1 מאזן האנרגיה

את שיווי המשקל התרמי בין גוף האדם לסביבה אפשר לייצג בשוויון הבא:

$$M - W = E + \Delta C + \Delta R$$

שבו M היא הפעילות המטבולית, W העבודה אותה אנו מבצעים, E איבוד האנרגיה באמצעות נידוף זיעה, $\Delta C$ מאזן חילוף החום בהסעה ו- $\Delta R$ מאזן חילוף החום בקרינה.

### 2.2 מנגנוני מעבר אנרגיה בין האדם לסביבה

**א. קרינה**

גוף האדם פולט כל העת אנרגיה אל הסביבה באמצעות קרינה בגלים ארוכים. במקביל, קולט גוף האדם אנרגיה בגלים ארוכים מן הסביבה, אף זו ללא הפסקה. בשעות היום, קולט גוף האדם גם קרינת שמש (קרינה בגלים קצרים), בין אם הוא חשוף לה ישירות ובין אם היא מוחזרת מעצמים אחרים (קרינה מוחזרת) או מכיפת השמיים (קרינה מפוזרת). מאזן הקרינה עשוי לפיכך להיות חיובי, כאשר גוף האדם מרוויח יותר אנרגיה בקרינה מכפי שהוא מאבד אל הסביבה, או שלילי, כאשר קצב הפליטה עולה על קצב הקליטה.

**ב. הסעה**

גוף האדם מחליף אנרגיה עם האוויר שסביבו באמצעות הסעה. כאשר טמפרטורת האוויר נמוכה מטמפרטורת העור, הגוף מאבד אנרגיה. לעומת זאת, כאשר האוויר חם יותר מהעור, הגוף מתחמם כתוצאה מהמגע עם האוויר. כאשר ישנה תנועת אוויר – רוח – גדל קצב חילוף האנרגיה עם הסביבה, והגוף מתחמם או מתקרר יותר מהר.

**ג. נידוף זיעה**

כאשר טמפרטורת העור גבוהה מהרצוי, מפרישות בלוטות הזיעה נוזל אשר תהליך האידוי שלו סופח אנרגיה מן הגוף (וגם מן הסביבה) ומביא לירידה מקומית של טמפרטורת העור. קצב האידוי תלוי בטמפרטורת האוויר בסביבה, בלחות האוויר ובתנועה יחסית בין האוויר לבין הגוף (כגון רוח). ככל שהאוויר חם יותר ויבש יותר, וככל שמהירות תנועת האוויר גדולה יותר – כך יגדל קצב האידוי.

ד

### 2.3 וויסות טמפרטורת הגוף

לאדם, כמו לשאר היונקים, מנגנון וויסות יעיל, השומר על טמפרטורה פנימית קבועה. כאשר הגוף מתחמם, נכנסים לפעולה שני מנגנוני צינון: התרחבות כלי הדם, ואיתה עלייה בקצב זרימת הדם; והפרשת זיעה. כאשר הגוף מתקרר, פועלים שני מנגנוני חימום: היצרות של כלי הדם, הגורמת לקצב זרימת הדם לרדת; והגדלת ייצור האנרגיה הפנימי בגוף על ידי צמרמורת (רעידת שרירים). תגובת הגוף למצבי חום או קור אינה רצונית: מנגנוני וויסות הטמפרטורה ימשיכו בפעולתם כל עוד התנאים הסביבתיים יחייבו זאת.

## 3. גורמים המשפיעים על התחושה התרמית (thermal sensation)

כפי שמראה משוואת מאזן האנרגיה, התחושה התרמית מושפעת משתי קבוצות של גורמים: גורמים סביבתיים וגורמים אישיים. התחושה התרמית היא פועל יוצא של ההשפעה המשולבת של כל הגורמים האלה.

### 3.1 גורמים סביבתיים

- **טמפרטורת האוויר**, משפיעה על חילוף האנרגיה בין האדם וסביבתו בהסעה ובאידוי זיעה.
- **לחות האוויר** משפיעה על יכולתו של הגוף לנדף זיעה: ככל שהאוויר לח יותר, כך קטן קצב אידוי הזיעה ואיתו יעילות צינון הגוף.
- **מאזן הקרינה** מושפע בעיקר, אך לא רק, מחשיפה לשמש.
- **תנועת רוח** מגדילה את קצב חילוף האנרגיה בין הגוף והסביבה בהסעה, ובמקביל מגדילה את קצב אידוי הזיעה.

### 3.2 גורמים פיסיולוגיים

- **פעילות גופנית** משפיעה על קצב חילוף החומרים (מטבוליזם), אותו מקובל למדוד ביחידות הקרויות met (1 met = 58.2 ואט/מ״ר של שטח פני הגוף).
- **לבוש** יוצר שכבת חיץ המבודדת במידה מסוימת את הגוף מסביבתו. את מידת הבידוד אותו יוצרים הבגדים מודדים ביחידות הקרויות clo ( 1 clo = 0.155 מ״ר/קלווין ואט).

**טבלה ד-1. השפעת פעילות גופנית על הקצב המטבולי של אדם ממוצע**

| פעילות | קצב מטבולי | |
|---|---|---|
| | $W/m^2$ | met |
| שינה | 45 | 0.8 |
| ישיבה נינוחה | 58 | 1.0 |
| עבודה משרדית | 70 | 1.2 |
| הוראה | 95 | 1.6 |
| הליכה במישור (2 קמ״ש) | 110 | 1.9 |
| עבודה גופנית מאומצת | 380 | 6.5 |
| ריצה (15 קמ״ש) | 500 | 9.5 |

**טבלה ד-2: רמת הבידוד התרמי אשר מספקים בגדים שונים**

| סוג הבגד | רמת הבידוד | |
|---|---|---|
| | $m^2/K\ W$ | clo |
| מכנסיים קצרים | 0.009 | 0.06 |
| חולצה (שרוול קצר) | 0.014 | 0.09 |
| חולצה (שרוול ארוך) | 0.039 | 0.25 |
| מכנסיים | 0.039 | 0.25 |
| סוודר | 0.054 | 0.35 |
| ז'קט | 0.054 | 0.35 |
| מעיל עליון | 0.109 | 0.70 |

## 3.3 גורמים מקומיים לאי-נוחות

גם כאשר מערכת האקלום מבטיחה כי טמפרטורת האוויר תהיה נוחה, יתכן ואדם יחוש באי-נוחות הנובעת מגורמים מקומיים, כגון רוח פרצים או אסימטריה גדולה בטמפרטורת המשטחים המקיפים אותנו.

**א. אסימטריה בסביבת הקרינה** (radiant asymmetry)

בחלל אשר בו ישנם הבדלים גדולים בטמפרטורה בין שני משטחים, קשה יותר להבטיח נוחות תרמית. למשל: בחדר שבו זגוגית החלון קרה (ביחוד בלילות חורף, וכאשר ישנה שמשה יחידה) ונעשה שימוש בתנור קורן (כגון תנור הלוגן). לא ניתן לשפר את המצב על ידי התקרבות לתנור החם, משום שבמקרה כזה האסימטריה אף תחמיר. במקרה כזה, עדיף להתרחק מהחלון הקר, ואם מדובר בתופעה קבועה, להתקין וילון בד על החלון.

**ב. רוח פרצים** (draft)

בימים קרים, כאשר החלונות אינם אטומים היטב חודר אוויר קר מבחוץ. אדם השוהה בקרבת החלון יחוש צינון מקומי בחלקי גוף חשופים כגון הפנים, הידיים ולפעמים ברגליים. הירידה המקומית בטמפרטורת העור כרוכה בתחושת אי-נוחות גם אם המאזן התרמי הכולל של הגוף הוא תקין. אם לא ניתן לאטום את החלונות ולהפחית את האינפילטרציה, מומלץ לשנות את המיקום בחדר או את תנוחת הגוף כך שחלקי הגוף הרגישים יהיו פחות חשופים לתנועת האוויר.

**ג. הפרש טמפרטורה גדול בין ראש לרגליים**

בדרך כלל, טמפרטורת האוויר בחדר אחידה למדי, אולם אם מתפתחים הבדלי טמפרטורה העולים על 3 מעלות בין הרגליים לבין הראש, עלולה להיווצר תחושה של אי-נוחות גם כאשר על פי מדדי הנוחות התנאים אמורים להיות נוחים.

**ד. טמפרטורת הרצפה**

מגע ישיר בין כפות הרגליים יחפות לרצפה עשוי לשנות את תחושת הנוחות גם כאשר טמפרטורת הרצפה אינה שונה במידה ניכרת מטמפרטורת האוויר. זאת משום שהגוף מאבד (או מרוויח) אנרגיה בהולכה, בנוסף למעבר האנרגיה בהסעה ובקרינה. המגע עם הרצפה הקרירה עשוי להיות נעים בקיץ, אם בחורף הוא איננו רצוי. למעט חדרי רחצה, ניתן להימנע ממגע כזה ללא קושי. התופעה מורגשת במיוחד במגע עם משטחים קשים כגון מרצפות טרצו או קרמיקה, קיימת במידה פחותה ברצפות עץ או PVC ואינה קיימת על גבי שטיחים.

ד

**ה. שינויי טמפרטורה לאורך זמן**

כאשר אנו חשופים לשינויי טמפרטורה מבוקרים הנמצאים בשליטתנו, אין בכך שום פגם. אולם שינויים אשר אינם בשליטתנו עלולים לגרום אי-נוחות. ההפרעה האופיינית נגרמת על ידי תרמוסטטים לא תקינים במערכות חימום ומיזוג, אשר גורמים לכך כי יהיו הבדלי טמפרטורה גדולים מדי בין טמפרטורת המקסימום והמינימום בכל מחזור. מומלץ שהבדל זה לא יעלה 1.1 מעלות. גם שינוי הדרגתי של הטמפרטורה ('זחילה') עלול להיות לא רצוי אם הוא עולה על קצב של כ-2.2 מעלות בשעה או 1.1 מעלות לפרק זמן של רבע שעה (ASHRAE 55-2004).

## 3.4 אקלום

תהליך התאמת המנגנונים השונים של גוף האדם לתנאי אקלים חדשים מכונה אקלום. אקלום מלא לשינוי קיצוני עשוי להמשך כשלושה שבועות, אך התאמה חלקית לתנאים סביבתיים מושגת תוך ימים אחדים.

השפעת האקלום על ההעדפות התרמיות של אנשים עשויה להיות ניכרת. מחקרי שדה רבים הראו קשר ברור בין טמפרטורת האוויר אליה נחשפו הנבדקים לאורך תקופה ארוכה לבין ההעדפות התרמיות שלהם. ככל שטמפרטורת האוויר הממוצעת היתה גבוהה יותר, כך עלתה גם הטמפרטורה אותה ציינו הנבדקים כטמפרטורה הרצויה להם. נמצא גם כי ניתן ליחס את תהליך האקלום הן להתאמה לטמפרטורה אשר שררה בתוך הבניינים בהם שהו הנבדקים, והן לטמפרטורה החודשית הממוצעת של הסביבה.

המשמעות המעשית של ממצאים אלה היא כי בבניינים בהם מותקנות מערכות בקרת אקלים (צינון וחימום) יש להתאים את התנאים המתוכננים לתנאים הסביבתיים אליהם חשופים המשתמשים, בהתאם לעונות השנה ולאקלים השורר במקום. מדיניות כזו תבטיח לא רק התאמה טובה יותר להעדפות המשתמשים אלה גם חיסכון ניכר באנרגיה.

## 3.5 שינוי בתחושה (alliesthesia)

התגובה לשינוי בתנאי הסביבה אליהם אנו חשופים תלויה גם בהשפעה היחסית של השינוי: האם השינוי מהווה שיפור בהשוואה לתנאים הקודמים, או הרעה. לכן, אותה סביבה תרמית עצמה עשויה לגרום לתגובה חיובית או שלילית, אפילו אצל אותו אדם, כתלות במצב הגוף הקודם. תופעה זו נוסחה לראשונה על ידי חוקר בשם Cabanac [38], והיא מוכרת גם בתחומים נוספים מלבד הנוחות התרמית.

## 3.6 השפעת מאפיינים אישיים כגון מגדר, גיל, או שיוך אתני על הנוחות התרמית

מחקרים רבים **בתנאים מבוקרים**, בהם הנבדקים לבושים בגדים אחידים וחשופים לתנאים סביבתיים זהים, מראים כי למאפיינים אישיים כגון מגדר, גיל או גזע אין שום השפעה על ההעדפות התרמיות. נמצא כי ישנם הבדלים ניכרים בין נבדקים שונים המשתייכים לאותה תת-קבוצה (כגון נשים), אולם לא נמצא הבדלים בין הקבוצות. את הבדלים בין ההעדפות התרמיות של בני אדם המשתייכים לאותה קבוצה ניתן לייחס בין היתר לשוני ביחס בין נפח הגוף לשטח הפנים שלו, ולכמות שומן תת-עורי שונה: אלו משפיעים על שטף החום בין פנים הגוף לבין הסביבה, דרך מעטפת הגוף.

[38] Cabanac, 1971

**צילום ד-1.**

**האם ההבדלים בלבוש נובעים מאקלום, מגדר, מבנה גוף או שילוב של מספר גורמים?**

ההסבר לממצאים הסותרים המתקבלים ממחקרי שדה (לפי הגישה הסתגלנית) המייחסת העדפות שונות לבני קבוצות שונות טמון ככל הנראה באקלום, בהבדלים במאפייני הלבוש או ברמת פעילות גופנית שונה.

## 4. גישות להערכת הנוחות התרמית

הנוחות התרמית היא כאמור עניין אישי, אך בשל הצורך לתת בידי מתכנני הבניין הנחיות מעשיות, נערכו במשך השנים מחקרים רבים אשר מטרתם היתה לקבוע מדדים כמותיים מדויקים. המחקרים הונחו על ידי שתי גישות שונות:

### 4.1 הגישה הפיסיולוגית

מאחר ונוחות תרמית יכולה להתקיים לאורך זמן רק כאשר חילוף האנרגיה בין הגוף וסביבתו נמצא במצב של שיווי משקל, ניתן לחשב מהם התנאים הסביבתיים אשר בהם יתקיים שווי משקל זה עבור כל שילוב נתון של לבוש ופעילות גופנית.

לפי הגישה הזאת, יש להגדיר נוחות תרמית תוך התייחסות לתפקודים הפיסיולוגיים של גוף האדם:

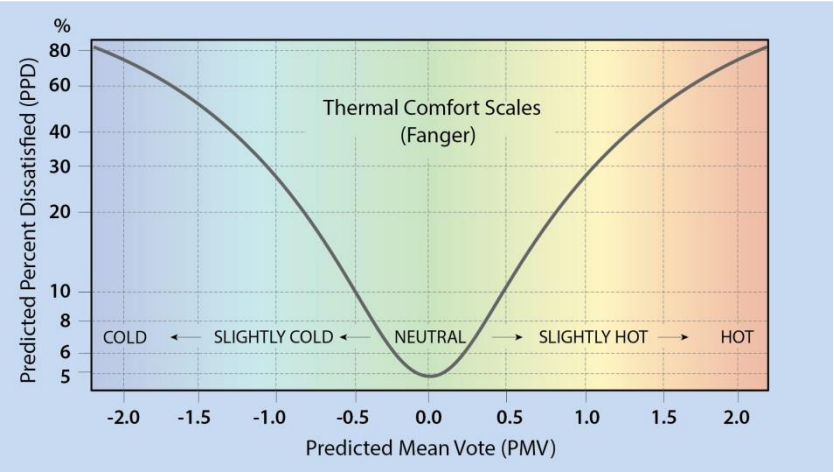
"נוחות תרמית היא מצב שבו טמפרטורת הגוף קבועה בתחום שבין 36.5 ו- 37.5 מעלות צלזיוס, הטמפרטורה הממוצעת של העור היא 33-35 מעלות, השרירים אינם מצטמררים והגוף אינו מזיע".

ראוי לשים לב כי הגדרה זו אינה מציינת מהם התנאים הסביבתיים בהם היא מתקיימת ואינה מעידה דבר על המצב הנפשי של האדם.

על פי הגישה הפיסיולוגית, נוחות תרמית אפשרית רק כאשר מאזן האנרגיה של הגוף הינו ניטרלי. עם זאת, גם מחקרים בתנאים מבוקרים מראים כי ישנה שונות מסוימת בין בני האדם, המתבטאת לא רק בתחושה הפיסיולוגית אלא גם בהעדפות. על מנת להציג את הקשר בין מכלול התנאים הסביבתיים והאישיים לבין ההעדפות התרמיות של בני האדם, פותח על ידי חוקר בשם Fanger [39] סולם פשוט בן חמש דרגות, אשר על פיהן ניתן לתאר את תחושת הנבדק ביחס לתנאים התרמיים בעזרת ציונים מספריים הנעים בין מינוס שתיים לפלוס שתיים: לתחושה ניטרלית ניתן הציון '0', בעוד סביבה חמה מתוארת על ידי ציונים חיוביים וסביבה קרה על ידי ציונים שליליים. באמצעות מאזן אנרגיה מפורט של גוף האדם ניתן לחזות מה יהיה הציון הממוצע שיתקבל כאשר קבוצה של נשאלים תתבקש להעריך את התנאים התרמיים על פי סולם זה (PMV - predicted mean vote). סדרה של מבדקים בתנאי ניסוי מבוקרים הניבו קשר סטטיסטי בין מאזן האנרגיה לבין הציון החזוי

[39] Fanger, 1970

הממוצע, שעל פיו ניתן לחזות מה יהיה שיעור הנבדקים אשר יביעו אי-שביעות רצון מהתנאים הנתונים (PPD - percent predicted dissatisfied). תרשים ד-1 מציג את העקומה המתארת את הקשר בין הציון החזוי הממוצע לבין שיעור הבלתי מרוצים. חשוב להדגיש כי גם בתנאים האופטימליים יחושו כחמישה אחוזים בממוצע מן האוכלוסייה שלא בנוח מן הבחינה התרמית.




**תרשים ד-1. שיעור הבלתי מרוצים מבחינה תרמית, לפי Fanger**

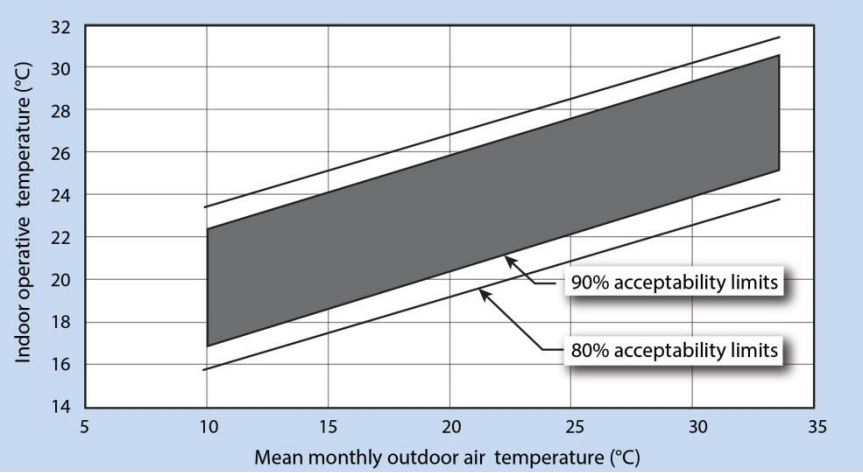
## 4.2 הגישה הסתגלנית (adaptive approach)

מחקרים רבים בתחום הנוחות התרמית התבססו על שאלונים בהם התבקשו הנבדקים להעריך את מידת הנוחות התרמית שלהם, במקביל לרישום התנאים הסביבתיים. הניסויים אשר התקיימו במשך קרוב למאה שנים, החל מתחילת המאה העשרים, בחנו את תגובות הנבדקים בתאים אקלימיים בהם ניתן היה לשלוט על התנאים הסביבתיים באופן מבוקר. לקראת סוף המאה הציעו מספר חוקרים, ובעיקר Humphreys ו- Nicol[40], לחקור את הנבדקים בסביבתם הטבעית (כגון במקומות העבודה או בבית). נמצא כי תוצאות המחקרים בשתי הגישות שונות במידה משמעותית. בעוד שהנבדקים אשר שהו בתנאים מבוקרים ציינו כי הם חשים בנוח בתחום טמפרטורות צר יחסית, הרי שהנבדקים אשר שהו בסביבתם הטבעית חשו בנוח בתנאים סביבתיים מגוונים, אשר היו לעתים חמים או קרים בהרבה מן התחום הצר אשר נמצא בתאים המבוקרים. ההבדל בתוצאות מוסבר בכך שמחקרי השדה משקפים את מכלול התנאים המשפיעים על בני האדם, לרבות הבדלים בסוג הלבוש ובאופי הפעילות, בעוד שהמחקרים המבוקרים בדרך כלל שאפו לנטרל את השפעתם של גורמים התנהגותיים.

כפי שהוסבר כאן, אנשים השוהים בבניינים ללא מיזוג אוויר נוטים להסתגל לתנאים אליהם הם חשופים בפועל. מחקרים רבים מצאו כי לא מדובר רק בקבלה של התנאים בבניינים אלה כגזרת גורל, אלא בשינוי של ממש בהעדפות. ביטוי לתופעה הזו נמצא גם בתרשים ד-2, הלקוח מתקן ASHRAE 55-2004 [41], ואשר מנחה את המתכננים אילו ערכים צפויים להיות מספקים בבניינים כאלה.

[40] Nicol and Humphreys, 2002

[41] ASHRAE 55-2004: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy




**תרשים ד-2. תחום הנוחות בבניינים ללא מיזוג אוויר, לפי ASHRAE 55-2004**

התרשים מציג את הקשר שבין הטמפרטורה החודשית הממוצעת מחוץ לבניין לבין הטמפרטורה האופרטיבית המומלצת בתוך הבניין. הקו המתאר את מרכז תחום הנוחות ניתן על ידי הביטוי:

$$T_{comf} = 17.8 + 0.31 \times T_m$$

שבו $T_{comf}$ היא מרכז תחום הנוחות ו- $T_m$ היא הטמפרטורה החודשית הממוצעת. רוחב הרצועה מושפע משיעור האנשים אשר יהיו שבעי רצון מהתנאים, ועומד על כ-2.5 מעלות מכל צד של הערך האמצעי עבור 90% מהאוכלוסייה ו-3.5 מעלות עבור 80% מהאוכלוסייה.

כפי שהתרשים מראה, תהליך האקלום מביא לכך שככל שהסביבה החיצונית חמה יותר – כך תגדל הנטייה להעדיף תנאים חמים גם בתוך הבניין. לתרשים יש שתי השלכות חשובות:

א. תהליך האקלום יביא לכך שנעדיף טמפרטורות גבוהות יותר בקיץ מאשר בחורף.

ב. תהליך האקלום יביא לכך שתושבי אזורים חמים יעדיפו טמפרטורות גבוהות יותר מאשר תושבי אזורים קרים.

לדוגמא:

הטמפרטורה החודשית הממוצעת בתל אביב בחודש אוגוסט היא 27.8 מעלות. על פי הגישה הסתגלנית במודל של ASHRAE, טמפרטורת הנוחות לבניין לא מאוקלם תהיה 26.4 מעלות, ו-90 אחוז מהאוכלוסייה יחושו בנוח בתחום 23.9-28.9 מעלות.

$$17.8 + 0.31 \times 27.8 = 26.4$$

חשוב להדגיש כאן כי התרשים אינו מביא בחשבון את השפעת הלחות.

המשמעות העיקרית של הגישה הסתגלנית היא הרחבת תחום הנוחות בהשוואה לתחום המומלץ בבניינים ממוזגים, בעיקר בתנאים חמים: בעוד שהטמפרטורה (האופרטיבית) הנמוכה ביותר אשר תספק 80% מהאוכלוסייה בבניינים לא מחוממים היא מעט פחות מ-18 מעלות, בדומה לטמפרטורה המומלצת בבניינים מחוממים, הרי שבאקלים חם במיוחד צפוי כי לפחות 80% מהאוכלוסייה יחושו בנוח בטמפרטורה העולה על 31 מעלות.

ד

# 5. מדדים לנוחות תרמית

כפי שהודגש כאן, טמפרטורת האוויר אינה מספקת מידע מספיק על התנאים התרמיים ולכן לא ניתן להשתמש בה כמדד בלעדי לנוחות. מאידך, חישוב מאזן האנרגיה על פי שיטתו של Fanger אמנם מאפשר לתת ציון לכל שילוב אפשרי של תנאים סביבתיים ואישיים, אך הוא מסובך מאוד ואינו מתאים לשימוש יום-יומי מעשי. במשך השנים פותחו אפוא מדדים שונים ומספר שיטות גרפיות שמטרתם לתאר את תחום הנוחות התרמית באופן פשוט יותר. בכדי להפחית את מידת המורכבות של הבעיה, כל השיטות מתייחסות לערכים נתונים של הגורמים האישיים (בדרך כלל פעילות מטבולית מתונה ולבוש קל) ומתמקדות במיפוי הגורמים הסביבתיים בלבד. חשוב להבין, אפוא, כי השיטות המוצגות להלן מיועדות בעיקר לסייע למתכנן לנתח את השפעת תנאי הסביבה על הנוחות התרמית של בני אדם העסוקים בפעילות יום-יומית רגילה. הן אינן מתאימות לתיאור התנאים הסביבתיים אשר יביאו לנוחות תרמית במקרה של פעילות גופנית מאומצת או היקף לבוש כבד במיוחד (או קטן במיוחד). במצבים מעין אלה אין מנוס מעריכת מאזן אנרגיה מלא.

מאחר והציבור רגיל להשתמש בטמפרטורה בכדי להעריך את הנוחות, מרבית הניסיונות לניסוח מדדים מורכבים המבטאים את ההשפעה המשולבת של טמפרטורת האוויר וגרמים סביבתיים נוספים שאפו להציג 'טמפרטורה' שקולה. הסקירה המובאת להלן מציגה אחדים מהמדדים החשובים, לרבות כאלה אשר נעשה בהם שימוש בתקינה.

## 5.1 מדדים מספריים

### א. מדד עומס חום

מדד עומס החום מבטא באופן כמותי את אי-הנוחות התרמית הנגרמת כתוצאה משילוב של טמפרטורה גבוהה ולחות גבוהה. המדד, אשר הוצע על ידי עזרה זוהר, מתאים לאקלים חם בלבד, משום שאינו מבחין בין תנאים נוחים לתנאים קרים מדי.

מקדם אי-הנוחות (discomfort index) מחושב על פי הממוצע של **טמפרטורת הגולה היבשה** (DBT) של האוויר, המבטאת את השפעת הטמפרטורה, ושל **טמפרטורת הגולה הלחה** (WBT) המבטאת את השפעת הלחות:

$$discomfort\ index = \frac{DBT + WBT}{2}$$

הערכים המופיעים בטבלה ד-3, המשמשת בין היתר את צה"ל, מתייחסים לבני אדם הנמצאים בצל בתנאים של היעדר רוח.

**טבלה ד-3: עומס חום ומקדם אי-נוחות**

| מקדם אי-נוחות | עומס חום |
|---|---|
| < 22 | אין |
| 22-24 | קל |
| 24-26 | מתון |
| 26-28 | בינוני |
| 28-30 | כבד |
| > 30 | כבד מאוד |

### ב. טמפרטורה קורנת ממוצעת ($T_{MRT}$ - mean radiant temperature)

הטמפרטורה הקורנת הממוצעת היא מדד להשפעת הטמפרטורה של כל העצמים המקיפים נקודה נתונה במרחב על מאזן הקרינה באותה נקודה.

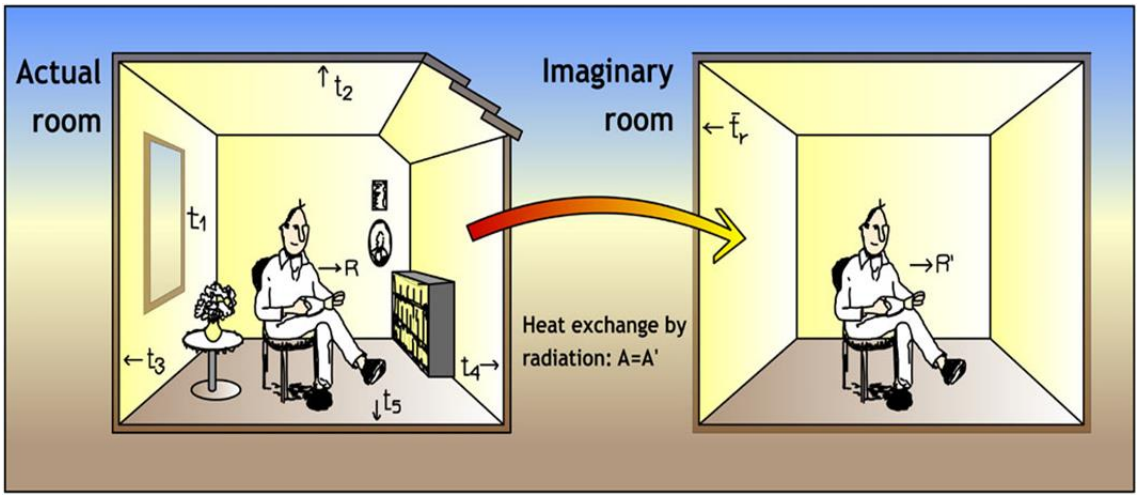
הגדרה:

הטמפרטורה הקורנת הממוצעת בנקודה היא הטמפרטורה (האחידה) של כדור 'שחור' דמיוני המקיף אותה ויוצר מאזן קרינה שווה לזה של הסביבה האמיתית.

את הטמפרטורה הקורנת הממוצעת לא ניתן למדוד ישירות, אולם ניתן לחשב אותה עבור נקודה נתונה 'p' המוקפת במשטחים בעלי טמפרטורות שונות וגדלים שונים על פי הנוסחה הבאה:

$$T_{MRT} = \sqrt[4]{\sum_n F_{p-i} \times (T_i + 273)^4} - 273$$

- $T_{MRT}$ - טמפרטורת קורנת ממוצעת [צלזיוס]
- $F_{p-i}$ - הזווית המרחבית אותה תוחם משטח i ביחס לנקודה p
- $T_i$ - הטמפרטורה של משטח i [צלזיוס]




**איור ד-2. הטמפרטורה הקורנת הממוצעת**

את הטמפרטורה הקורנת הממוצעת קשה לחשב במציאות, משום שיש צורך במדידת הטמפרטורה של מספר רב של משטחים, ולקבוע את גזרת החשיפה הגיאומטרית[42] של כל אחד מהם ביחס לנקודה המבוקשת. אולם ניתן למדוד ערך דומה המכונה טמפרטורת כדור שחור[43] ובעזרת נתון זה לאמוד אותה בקירוב טוב. היחס בין טמפרטורת הגולה השחורה וטמפרטורת הקרינה הממוצעת מושפע מתכונות הכדור ובעיקר מתנועת האוויר סמוך אליו. את הטמפרטורה הקורנת הממוצעת

[42] גזרת חשיפה גיאומטרית – view factor: הזווית המרחבית אותה תופס המשטח כפי שהיא נמדדת מהנקודה המבוקשת.

[43] טמפרטורת הכדור השחור (black globe) נמדדת במרכזו של כדור נחושת צבוע שחור. כדור הנחושת בולע את (כמעט) כל הקרינה הפוגעת בו, ומתחמם. ככל שעוצמת הקרינה גבוהה יותר – כך תהיה טמפרטורת הכדור השחור גבוהה יותר.

ד

($T_{MRT}$) בחדר אפשר לבטא בעזרת קשרים אמפיריים כגון [44] :

$$T_{MRT} = \sqrt[4]{(T_g + 273)^4 + 0.4 \times 10^8 |Tg - Ta|^{1/4} \times (T_g - T_a)} - 273$$

בנוסחה $T_a$ מבטא את טמפרטורת האוויר [גולה יבשה] ו- $T_g$ היא הטמפרטורה של כדור שחור תקני בקוטר של 15 ס״מ (שניהם במעלות צלזיוס), בהנחה שהאוויר בחדר נמצא במנוחה.

**ג. טמפרטורה אופרטיבית** (OT - operative temperature)

הטמפרטורה האופרטיבית הינה מדד מלאכותי אשר מיועד להציג את ההשפעה המשולבת של טמפרטורת האוויר ומאזן הקרינה על חילוף אנרגיה בין האדם והסביבה.

הגדרה :

הטמפרטורה האופרטיבית בנקודה נתונה הינה טמפרטורת הגולה היבשה של כדור ׳שחור׳ דמיוני המקיף אותה ואשר בו חילופי האנרגיה של אדם עם סביבתו בקרינה והסעה יהיה שווים לאלו המתקיימים בסביבה האמיתית.

ניתן לחשב את הטמפרטורה האופרטיבית בעזרת הנוסחה הבאה :

$$OT = \frac{h_r \times T_{MRT} + h_c \times DBT}{h_r + h_c}$$

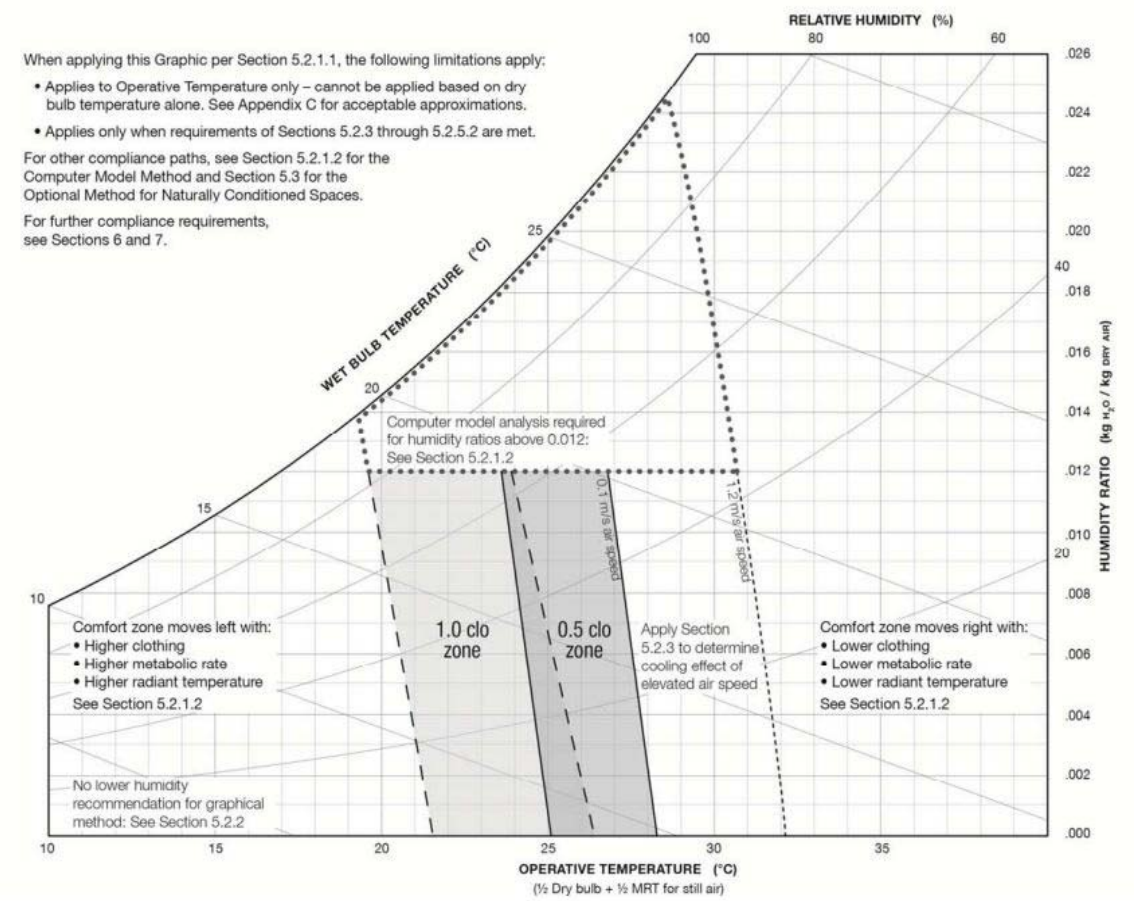
| | | |
|---|---|---|
| OT | - | טמפרטורה אופרטיבית [$^oC$] |
| $T_{MRT}$ | - | טמפרטורה קורנת ממוצעת [$^oC$] |
| DBT | - | טמפרטורת גולה יבשה [$^oC$] |
| $h_r$ | - | מקדם מעבר אנרגיה בקרינה [$W/m^2 K$] |
| $h_c$ | - | מקדם מעבר אנרגיה בהסעה [$W/m^2 K$] |

## 5.2 הטבלה הפסיכרומטרית

הטבלה הפסיכרומטרית, כפי שהוצגה בפרק ג׳, היא תרשים המתאר את הקשר בין טמפרטורת האוויר ומדדים שונים ללחות (וכן לצפיפות האוויר). מרבית התקנים המנחים את עבודתם של מהנדסי מיזוג האוויר, לרבות ISO 7730 ותקן ASHRAE 55, מציגים את תחום הנוחות הרצוי על גבי שרטוט זה.

כאמור, הטבלה הפסיכרומטרית קושרת בין טמפרטורת האוויר והלחות – אבל אינה מציגה את מכלול התנאים הסביבתיים המשפיעים על הנוחות התרמית. לשם כך יש לבטא גם את השפעת תנועת האוויר ומאזן הקרינה, ולהגדיר את סוג הביגוד ורמת הפעילות המטבולית. הפתרון אשר אומץ בתקינה נעזר בגרסה מיוחדת של הטבלה (תרשים ד-3), שבה מוצגת **הטמפרטורה האופרטיבית** במקום טמפרטורת הגולה היבשה של האוויר בציר האופקי. מאחר והתקן מיועד לשימוש בתוך הבניין, מניחים שמהירות האוויר נמוכה (פחות מ-0.2 מ/שנייה), ורמת הפעילות המטבולית מתונה – 1.0-1.3 met. הטבלה מציגה את תחום הנוחות עבור שתי דרגות לבוש : 0.5 clo, האופיינית לקיץ, ו-1.0 clo, המתאימה לחורף.

[44] הנוסחה והסברים נוספים נמצאים בתקן ISO 7726.




**תרשים ד-3. תחום הנוחות לפי ASHRAE 55-2010**

עיון בטבלה מעלה מספר נקודות חשובות:

א. לא מומלץ כי יחס העירוב יעלה על 0.012 ק"ג אדי מים לק"ג אוויר יבש, שהם 12 גר' לק"ג. (לשם השוואה: כאשר הטמפרטורה היא 30 מעלות והלחות היחסית 60%, תנאים אופייניים למישור החוף בקיץ, יחס העירוב הוא כ-0.016 ק"ג אדי מים לק"ג אוויר.)

ב. כאשר הלחות נמוכה, התקן מאפשר שמירה על טמפרטורה גבוהה יותר – כ-28 מעלות במקום 27 מעלות.

ג. הקפדה על לבוש 'רשמי', כגון חליפת עסקים, אשר ערך הבידוד שלה הוא כ-1.0 clo, יחייב צינון האוויר לטמפרטורה נמוכה יותר גם בקיץ, לפי תנאי ה'חורף'.

הטבלה מציגה מרשם גרפי פשוט המתאים לשימוש במרבית המצבים, אבל מאפשרת גם לחרוג ממנו בשני מסלולים אפשריים: ניתן לחרוג ממגבלת הלחות המרבית אם שילוב התנאים עומד בדרישות המתוארות במודל המחשב המלא; ניתן לחרוג ממגבלת הטמפרטורה אם נעזרים באוורור המביא לתנועת אוויר סמוך לדיירים. אפשרות זו מתוארת ביתר הרחבה בהמשך פרק זה.

## 6. איכות האוויר בדירה

בנוסף לנוחות התרמית, נדרש המתכנן להבטיח גם איכות אוויר נאותה בדירה. כיצד מוגדרת אפוא איכות אוויר נאותה?

ד

הגדרה:

"איכות האוויר היא נאותה (acceptable) כאשר אין באוויר מזהמים ידועים בריכוזים מסוכנים, כמוגדר על ידי הרשויות המוסמכות, וכאשר רוב גדול של האנשים (לפחות 80%) אינם מביעים אי-שביעות רצון." [45]

הגדרה זו מקפלת בתוכנה שני מרכיבים. הראשון – מרכיב בריאותי: האוויר חייב להיות נקי ממזהמים, מכל מקור שהוא. השני: מרכיב אישי, המשקף את רגישות האנשים לריחות.

בפועל, התקן קובע דרישות סף לאספקת אוויר צח, בהנחה שאוויר זה, אשר מקורו מחוץ לבניין, הוא אוויר נקי ממזהמים ומריחות. דרישות הסף נקבעות בהתאם לסוג הבניין ואופן השימוש בו, וכוללות שני מרכיבים: קצב אספקת אוויר לנפש, וקצב אספקת אוויר ליחידת שטח בחלל הנדון, בהנחות סבירות לגבי צפיפות האכלוס. הדרישה המעשית היא סכום שני המרכיבים האלה.

לדרישה לאספקת אוויר צח עלולות להיות השלכות משמעותיות על מאזן האנרגיה של הדירה. אם טמפרטורת האוויר בדירה שונה מטמפרטורת האוויר בסביבה, האוויר המסופק לדירה ידרוש חימום או צינון, בהתאם לעונה – ויגדיל את דרישת האנרגיה לאקלום. לכן מקובל לציין דרישות סף לאוורור המיועד להבטיח איכות אוויר נאותה.

## 1.1 דרישות לאוויר צח בבנייני מגורים

תקנות התכנון והבנייה, "חלק ב: גדלם, איוורם ותאורתם של חלקי בניין", קובעות גדלים מזעריים לחלונות המיועדים לאפשר אוורור טבעי של בניינים, אולם אינן מפרטות מהו קצב האוורור הנדרש. הנחייה ממשית רשומה רק עבור חללים אשר אינם מקבלים אוורור טבעי, ובהם מותקנת מערכת מכנית. בסעיפים 2.60 ו-2.61 נקבע כי בחדרי מגורים, חדרי שירותים ומטבחים בבנייני מגורים יספקו המערכות המכניות 3 חילופי אוויר בשעה.

**א. דרישות בסיסיות לאוורור איכות**

לפי ASHRAE, הדרישה לאוויר צח בבנייני מגורים עומדת על 2.5 ליטר לשנייה לאדם, בתוספת 0.3 ליטר לשנייה עבור כל מ"ר שטח רצפה של החלל.

> לדוגמא:
>
> עבור חדר בשטח של 12 מ"ר שבו שוהים שני אנשים, כדוגמת חדר שינה, יש לספק 8.6 ליטר לשנייה אוויר צח (2 x 2.5 + 12 x 0.3 = 8.6), שהם 34.2 מ"ק/שעה.
>
> אם נניח כי גובה התקרה בחדר הוא 2.6 מטר, יהיה נפח החלל 31.2 מ"ק, ויהיה צורך ב-1.1 חילופי אוויר בשעה.

אספקת אוויר צח בקצב הזה תבטיח כי ריכוז החמצן בחדר לא ירד מתחת לנדרש. במרבית בנייני המגורים בארץ, מידת האטימות של החלונות והדלתות אינה גבוהה, וגם כאשר אין הפרשי לחצים גדולים בין פנים הבניין לבין החוץ עקב הבדלים תרמיים או רוח, תהיה אינפילטרציה בקצב העולה על 1 חילופי אוויר בשעה גם כאשר כל הפתחים בדירה סגורים.

**ב. אוורור איכות בחדרים עם מקורות ריח פנימיים**

בדירות מגורים ייתכנו מקורות ריח פנימיים אשר יחייבו אספקת אוויר צח בקצב גבוה מהערך המזערי אשר הובא בדוגמא, כגון סילוק עשן סיגריות, ריחות בישול וריחות מחדרי שירותים. בנוסף

---

[45] ASHRAE 62-1: 2010

לכך, רצוי לאפשר אוורור מוגבר בחללים אשר בהם נוצר ריכוז אדי מים גבוה, כגון מטבחים (בזמן בישול ) או חדרי רחצה. טבלה ד-4 מסכמת את ההמלצות האלה.

**טבלה ד-4. דרישות מינימליות לאוויר צח להשגת אוורור איכות במבנה מגורים[46]**

| חלל ופעילות | קצב אוורור | | | |
|---|---|---|---|---|
| | טוב | סביר | מספר החלפות אוויר בשעה * | |
| | מ״ק לשעה | | | |
| סילוק ריחות של בני אדם בצפיפות של | | | | |
| - 5 מ״ר לנפש | 29 | 18 | 2.2 | 1.4 |
| - 10 מ״ר לנפש | 18 | 11 | 0.7 | 0.4 |
| - 15 מ״ר לנפש | 11 | 6 | 0.3 | 0.1 |
| סילוק עשן סיגריות (לכל מעשן בחדר) | 25 | | 1.0 ** | |

* חישוב מספר החלפות אוויר נעשה לפי 10 מ״ר לנפש ובהנחה שגובה התקרה הוא 2.6 מ׳.

**ג. מקורות נוספים למזהמים**

בניגוד למקובל במדינות רבות בעולם, השימוש בחומרי ריצוף כגון שטיחים או מוצרי עץ מלאכותי אשר עלולים לפלוט רעלנים לאוויר הוא עדיין מצומצם. במקביל לכך, עליית המודעות לנזקים הבריאותיים אשר עלולים להיגרם עקב חשיפה לריכוזים גבוהים של חומרים כאלה ויישומם של תקנים המציבים מגבלות כמותיות על השימוש בחומרים כאלה מפחית את הסכנה גם בישראל. חומרי הריצוף המסורתיים, לרבות מרצפות בטון וקרמיקה, אינם פולטים חומרים מסוכנים.

**ד. אוורור לבקרת לחות ומניעת עובש**

בבניינים רבים בעולם הפגיעה העיקרית באיכות האוויר נובעת מריחות עובש וריכוז גבוה של נבגים באוויר. נבגי עובש מצויים באוויר כמעט בכל מקום. לרוב הם אינם מהווים מטרד, אולם כאשר מתקיימים תנאים מתאימים, הם עלולים להיקלט על משטח בבניין ולהתרבות. התנאים להיקלטותם הם נוכחות של רטיבות; זמינות של חמצן; מקורות מזון; וטמפרטורה בין 15-30 מעלות[47]. מקורות מזון (פחמימות) קיימים כמעט תמיד בבניינים מאוכלסים, גם כאשר פני השטח נראים נקיים, ולכן האמצעי העיקרי למניעת הופעת כתמי עובש הוא מניעת לחות.

מקורות לחות

הלחות המאפשרת את התפתחות העובש עשויה להתקבל במספר אופנים:

א. חדירה של מים דרך המעטפת החיצונית, בעיקר בקרבת חלונות או עקב פגיעה באיטום של הגג, אבל גם דרך סדקים או חריצים בקירות. בארץ התופעה אופיינית בעיקר בקירות מערביים החשופים לגשם חזק בחורף.

ב. הרטבה של הקיר או התקרה עקבה נזילה מצנרת מים פנימית.

ג. תכולת אדי מים גבוהה באוויר החיצוני. התופעה אופיינית לאזור החוף ומורדות הכרמל בימות הקיץ, ופוגעת בעיקר בחללים לא מאווררים, לרבות ארונות סגורים.

ד. תוספת אדי מים לאוויר ממקורות פנימיים (ראו טבלה ד-5).

ה. עיבוי של אדי מים הנמצאים באוויר כאשר הטמפרטורה של המשטח יורדת מתחת נקודת הטל.

---

[46] Evans, 1980

[47] בקר, 1985.

ד

**טבלה ד-5. מקורות לחות פנימיים בדירה**

| מקור | תוספת אדי מים |
|---|---|
| נוכחות אנשים | 50 גר׳ לאדם לשעה |
| בישול | 150-500 גר׳ לשעה |
| ייבוש כביסה | 1,000 גר׳ לשעה |
| מקלחת | 500-1,000 גר׳ |
| תנורי חימום בגז או נפט | 100 גר׳ לשעה לכל קילוואט חימום |

### דפוסי אוורור

כאשר טמפרטורת האוויר החיצוני חורגת מטווח הטמפרטורות הרצוי בתוך הדירה, רצוי לצמצם את האוורור למינימום הנדרש על מנת לסלק אדי מים עודפים, על מנת להפחית את צריכת האנרגיה הדרושה על מנת לחמם או לצנן את האוויר הצח. הבעיה חמורה יותר בחורף מאשר בקיץ, משום שחדירת אוויר קר מורידה את טמפרטורת המשטחים הפנימיים, ולכן עלולה להחריף את בעיית העיבוי.

המלצות לדיירים:

א. לאוורר חדרי רחצה לפרק זמן של מספר דקות אחרי הרחצה, עד להיעלמות של המים ממשטחים לא סופגים כגון אריחי חרסינה או מראות. לאחר מכן, לשוב ולסגור את החלון או להפסיק את פעולת המאוורר (ונטה).

ב. להיעזר בקולט אדים במטבח, מהטיפוס המחובר אל צינור יציאה חיצוני (קולט אדים כימי אינו יעיל בסילוק אדי מים). אם אין קולט אדים מתאים, לאוורר את המטבח רק במהלך הבישול על ידי פתיחת חלון. אוורור נוסף ייעשה רק אם מבקשים לסלק ריחות.

ג. להימנע עד כמה שאפשר מייבוש כביסה בתוך חדרי המגורים בדירה.

ד. להימנע משימוש בתנורי חימום מוסקים בנפט או בגז. תנורים אלה דורשים אוורור רציף של החלל לא רק בכדי לסלק תוצרי בעירה ($CO$, $CO_2$) אלא בכדי לסלק אדי מים עודפים.

## 7. המלצות מעשיות למתכננים

בתכנון המסורתי של בניינים ממוזגים, נדרשה מערכת מיזוג האוויר לשמור על טמפרטורת אוויר קבועה (בקירוב), כל ימות השנה. ניתן להביא לחיסכון ניכר באנרגיה הדרושה לאקלום על ידי יישום מספר המלצות פשוטות.

### 7.1 חימום קרינתי

מאחר ותחושת הנוחות מושפעת ממאזן האנרגיה הכולל ולא רק מטמפרטורת האוויר, ניתן לחסוך באנרגיה על ידי שימוש בחימום קרינתי, במצבים מסוימים. לחימום הקרינתי שני מאפיינים חשובים אשר עשויים להיות יתרון על פני מערכת המיועדת לחימום האוויר, במצבים מסוימים. ראשית, השפעתו מיידית. מאחר והקרינה מתפשטת במהירות האור, אפקט החימום יורגש מיד עם הפעלת התנור. שנית, ניתן ליהנות מהחימום גם ברמה מקומית, מבלי שיש צורך לחמם את החלל כולו. לכן, החימום הקרינתי מתאים לחדרי אמבטיה, שם השהות היא בדרך כלל קצרה והמרחב הפיזי מצומצם. ניתן להיעזר גם בחימום קרינתי בחלק מצומצם של חלל גדול, כאשר לא מעוניינים

לחמם את החלל כולו. לשם כך יש למקם את התנור הקורן סמוך אלינו, ולוודא שנשמר קו ראייה בינו לבין התנור.

### 7.2 אוורור נוחות

כפי שכבר הוסבר כאן, תנועת האוויר בסמוך לעור עשויה לשפר את הנוחות התרמית בתנאים חמים על ידי הגדלת קצב נידוף הזיעה והגדלת קצב סילוק החום בהסעה (בתנאי שטמפרטורת האוויר נמוכה מטמפרטורת העור).

האמצעי הפשוט ביותר להביא לתנועת אוויר בסמוך לגוף עשוי להיות פתיחת חלון, במיוחד אם בחוץ נושבת רוח, אפילו רוח קלה. אולם אליה וקוץ בה: אם טמפרטורת האוויר בחוץ גבוהה מטמפרטורת האוויר בדירה, פתיחת החלון תביא לשיפור רגעי בתחושת הנוחות אבל תגדיל את עומס החום המצטבר במסה התרמית של הדירה. את עודף האנרגיה שנצבר כך יהיה צורך לסלק בשלב מאוחר יותר, אפשר שבאמצעות מזגן.

ניתן להביא לשיפור בתחושה התרמית גם על ידי יצירת תנועת אוויר באופן מלאכותי, באמצעות מאוורר. השימוש במאוורר אמנם צורך חשמל, אבל בשיעור נמוך בהרבה ממערכת מיזוג – מאוורר אופייני צורך כ-50-100 ואט לכל היותר, בהשוואה ל-1000 ואט או יותר במזגן (תלוי בהספק הקירור). לאנרגיה שהמאוורר צורך ישנה כמובן עלות כספית, אבל היא גם מגדילה, אמנם מעט, את עומס החום בבניין. מאחר ואין שום תועלת בפעולת המאוורר כאשר החלל אינו מאוכלס, משום שהוא אינו מביא לצינון האוויר, חשוב להפסיק את פעולתו.

הערה:

כאשר אוורור הנוחות נעשה רק באמצעות מאוורר המביא לתנועה באוויר הנמצא בדירה אך אינו מביא אוויר צח, יש להבטיח כי כמות האוויר הצח עומדת בדרישות לאוורור איכות.

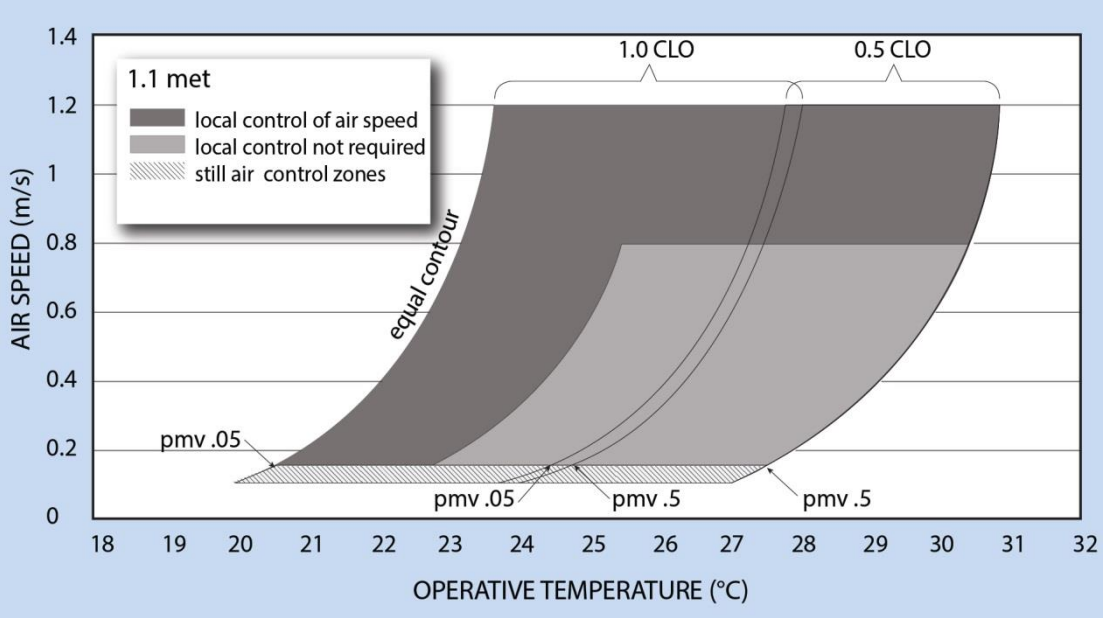
לסיכום: מומלץ בהחלט לפתוח חלונות ולאוורר את הבניין בשעות הקרירות – אבל בשעות החמות מומלץ להשאיר אותם אטומים ולהשתמש במאוורר.

**א. העלאת גבול הנוחות באמצעות תנועת אוויר – שליטה אישית**

עד כמה משפרת תנועת האוויר את הנוחות התרמית?

תרשים ד-3 אשר הוצג קודם מתאר את תחום הנוחות במונחים של הטמפרטורה האופרטיבית ושל הלחות. כלומר: הוא מבטא שלושה מבין ארבעה גורמי סביבה המשפיעים על הנוחות, למעט תנועת האוויר. לתנועת האוויר ישנה השפעה מורכבת, התלויה לא רק בטמפרטורת האוויר אלא גם בלחות שלו, וכן במידת החשיפה של אברי גוף שונים לתנועת האוויר ואפילו בהעדפות אישיות. לכן ניסויים מבוקרים אשר שילבו מדידות עם שאלונים אמנם הראו שאמנם ישנה השפעה ברורה, אולם קשה לכמת אותה. לכן התקינה מתבססת על מאזני אנרגיה על בסיס חישובי.

תרשים ד-4 מראה את התרומה המחושבת של תנועת אוויר לנוחות, כאשר הלחות קרובה לגבול העליון המותר (0.010 ק״ג לק״ג) וכאשר טמפרטורת האוויר שווה לטמפרטורה הקרינתית הממוצעת. בתרשים ניתן להבחין בשלושה אזורים: א) אזור מקווקו, המראה את תחום הנוחות כאשר האוויר במנוחה (בהתאם לדרגת הבידוד של הלבוש). ב) אזור בגוון אפור בהיר, שבו ניתן להיעזר בתנועת אוויר לשיפור הנוחות ללא הגבלה על צורת הבקרה. ג) אזור מסומן בגוון אפור כהה, שבו חלה חובה לאפשר לדיירים בקרה אישית על מידת החשיפה לתנועת האוויר.




**תרשים ד-4. השפעת תנועת האוויר על הנוחות התרמית בטמפרטורות גבוהות, לפי ASHRAE 55-2010**

המודלים מביאים בחשבון את העובדה שהטמפרטורה האופרטיבית (אשר בעזרתה מוצג תחום הנוחות) מושפעת לא רק מטמפרטורת האוויר אלא גם מהטמפרטורה הקרינתית, ולכן השפעת תנועת האוויר השפעת האוורור תהיה גדולה יותר כאשר הטמפרטורה הקרינתית גבוהה וטמפרטורת האוויר נמוכה יותר. במצב ההפוך – התועלת של האוורור פוחתת, משום שהעור בא במגע עם אוויר יותר חם.

התרשים ממחיש את ההשפעה הרבה של תנועת אוויר על הנוחות: מגבלת הטמפרטורה האופרטיבית המרבית המומלצת עולה מכ-27 מעלות עד למעט יותר מ-30 מעלות אפילו ללא בקרה אישית על תנועת האוויר, ואל כמעט 31 מעלות כאשר ישנה בקרה כזו.

המשמעות הכספית והאנרגטית של ניצול תנועת האוויר לשיפור הנוחות עשויה להיות ניכרת: העלאת התרמוסטט במעלה אחת עשויה לחסוך כ-3-4% מאנרגיית הקירור, והחיסכון המצטבר של העלאה ב-3 מעלות הוא אפוא כ-10 אחוזים!

**ב. השפעת הטורבולנטיות (מאוורר עם כיוון משתנה או עצמה משתנה)**

הטורבולנטיות של תנועת אוויר נמדדת לפי היחס בין סטיית התקן של השינויים במהירות לבין המהירות הממוצעת של האוויר בפרק זמן נתון. כאשר הטורבולנטיות עולה, תחושת הצינון חזקה יותר. כאשר תנועת האוויר אינה רצויה, משבים גורמים להפרעה גדולה יותר (למשל: כאשר יש רוח פרצים בחורף). לעומת זאת, יש יתרון למאווררים אשר משנים את כיוון האוויר או את מהירותו על פני מאווררים הגורמים לתנועת רוח אחידה. אפקט הצינון המרבי מושג כאשר תדירות המשבים היא בערך 0.5 הרץ: במצב זה, אפקט הקירור המתקבל שווה ערך להגדלת מהירות האוויר ב-40% או יותר[48].

[48] Xia et al, 2000; Zhu, 2011

### 7.3 אוורור לבקרת לחות

בכדי לסלק אדי מים החוצה, תכנון החלונות בחדרי רחצה ומטבחים צריך לעודד במידת האפשר תנועה של אוויר מהדירה כלפי חוץ, ולא בכיוון הדירה פנימה. מיקום החלון צריך להיות קרוב לתקרה, שם ריכוז אדי המים גבוה ביותר, והכנף חייבת לאפשר פתיחה מספקת לתנועה חופשית של האוויר כלפי חוץ.

מאחר וכיוון תנועת האוויר מושפע גם ממהלך הרוח מחוץ לבניין, מומלץ להתקין מפוחים חשמליים גם בחדרי רחצה אשר יש בהם חלון.

דיון על השפעתם של חומרי גמר שונים, ובפרט ההבדל בין חומרים סופגים (כגון טיח בגימור צבע אקרילי רגיל) לבין חומרים לא סופגים (כגון אריחי קרמיקה או חרסינה) נמצא בפרק ו' – תכנון קירות.

## 8. סיכום

הבנת הסוגיות השונות הקשורות לנוחות תרמית עשויה לתרום לא מעט לתכנון סביבה בנויה אשר משרתת את האוכלוסייה השוהה בה באופן מיטבי. כפי שהוסבר לעיל, ההעדפות התרמיות של אנשים מושפעות במידה לא מעטה מדפוסי ההתנהגות המקובלים בחברה לה הם שותפים. הבדלים בסגנון הלבוש, למשל, משפיעים במידה לא מעטה על מעבר האנרגיה בין האדם והסביבה, ובהתאם לכך על תחושת הנוחות בתנאים סביבתיים נתונים. לשינויים שחלו בדפוסי הלבוש בארץ במשך השנים ישנה, לפיכך, השפעה רבה על צריכת האנרגיה בבניינים מאוקלמים.

## מקורות


[1] השירות המטאורולוגי (2013). ערכי טמפרטורה רב שנתיים 1995-2009.
http://www.ims.gov.il/NR/rdonlyres/163FFF5E-ACA3-403F-91AF-5FFA16ED9297/0/TemperatureStation.pdf, accessed July 7 14.

[2] ASHRAE (2010). ASHRAE 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy

[3] ASHRAE (201). ASHRAE 62.1-2010. Ventilation for Acceptable Air Quality.

[4] Cabanac M. (1971). Physiological role of pleasure. Science, 173:1103-1107.

[5] Evans, M. (1980). Housing, Climate and Comfort. The Architectural Press, London.

[6] Fanger, P.O. (1970). Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill.

[7] International Standards Organization (1998). ISO 7726-1998: Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities.

[8] International Standards Organization (2005). ISO 7730-2005: Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

[9] Nicol F. and Humphreys M. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. Energy & Buildings 34:563-572.

[10] Xia Y., Zhao R. and Xu W. (2000). Human thermal sensation to air movement frequency. In Awbi, H. (Ed.) Air Distribution in Rooms, Proceedings of ROOMVENT 2000, p. 41-44.

[11] Zhu, Y. (2011). Dynamic thermal comfort and natural ventilation. Proceedings of ISHVAC 2011.
http://www.ishvac2011.org/uploadfiles/Natural_ventilation_and_dynamic%20thermal_comfort.pdf, , accessed July 7 14.

# פרק ה:

# מתאר הבניין

# פרק ה: מתאר הבניין

תכנון בניין יעיל מבחינת צריכת האנרגיה שלו מתחיל בקווי המתאר שלו (building form). קווי המתאר נקבעים בשלב התכנון הקונספטואלי של הבניין, עוד טרם הירידה לפרטים, ומושפעים מגורמים רבים מלבד התפקוד התרמי. פרק זה ידון בהשפעה של גורמים כגון מידת הקומפקטיות של הבניין או האוריינטציה של החזית העיקרית על התפקוד האנרגטי שלו.



## 1. קומפקטיות

חלק ניכר מצריכת האנרגיה בבנייני מגורים מוקדש לבקרה של הטמפרטורה והלחות, וכן למאור. תפקידה של מעטפת הבניין הוא לסייע בשימור תנאים שונים בתוך הבניין מאלו השוררים מחוצה לו, כאשר אלו אינם נוחים. תכנון מתאים של המעטפת יאפשר גם מעבר מבוקר של אנרגיה. למשל: בכדי לסלק עודפי חום לא רצויים על ידי אוורור (בעיקר בלילה), או לנצל את קרינת השמש לחימום פסיבי בחורף.

כלל ראשון בתכנון מעטפת הבניין הוא ליצור אבחנה בין חלקיה האטומים (קירות ותקרות) לבין מערכות הזיגוג:

- את חלקי המעטפת האטומים יש לתכנן כך שמעבר האנרגיה דרכם יהיה נמוך ככל האפשר, באמצעות בידוד תרמי ומסה תרמית שלהם. מעבר החום דרך המעטפת האטומה מתרחש בעיקר באמצעות הולכה, אולם אם היא אינה אטומה לגמרי, כפי שקורה לעיתים בבנייה הקלה, תתכן גם חדירת אוויר לא רצויה (אינפילטרציה).
- תפקידי מערכות הזיגוג הוא לאפשר מעבר אנרגיה מבוקר בקרינה (בעיקר – קרינת שמש) ובהסעה (לצורך אוורור). האתגר שמעמיד תכנון מערכת זיגוג הוא להפחית ככל האפשר את מעבר האנרגיה הלא מבוקר.

מידת הקומפקטיות של המעטפת, במונחים של היחס שטח המעטפת לבין שטח הרצפה השימושי, משקפת מתח מובנה בין שני רצונות מנוגדים:

א. ככל שהמעטפת קומפקטית יותר, מעבר האנרגיה בין פנים הבניין לבין החוץ קטן יותר, וקל יותר להפחית אותו. לכן, אם התנאים מחוץ לבניין קיצוניים (נניח טמפרטורות נמוכות מאוד), בניין קומפקטי ידרוש פחות אנרגיה לאקלום.

ב. ככל שהמעטפת קומפקטית יותר, יש פחות אפשרות לנצל מעבר חום רצוי עם הסביבה, באמצעות מערכת הזיגוג: חלונות קטנים יהיו בעלי פוטנציאל מופחת לאוורור או לחימום פסיבי.

הפתרון לניגוד המובנה הוא בהכרה שאת עיקרון הקומפקטיות יש ליישם בצורה מושכלת: להקטין את שטח המעטפת בהתאם לחשיפה הרצויה לתנאי הסביבה, התלויה באוריינטציה, ובכפוף להתקנת אמצעי הבקרה הדרושים במערכת הזיגוג. נושאים אלה יוצגו בהמשך הפרק הזה ובשלושת הפרקים הבאים אשר יעסקו בתכנון גג המבנה, קירותיו ומערכות הזיגוג.

גורם הקומפקטיות משולב בתקנים הישראליים ת"י 5282 ות"י 5280, בשיטה המרשמית בלבד. תקנים אלו מציעים מסלול פשוט אשר מאפשר למתכנן להימנע מכל חישוב של ערכים כגון

המוליכות התרמית הממוצעת של מעטפת יחידת הדיור. חשוב להדגיש כי תכנון מושכל מאפשר להמיר את הדרישה לקומפקטיות בבידוד תרמי מוגדל, ובכך לאפשר דירות מוצלחות ואטרקטיביות יותר.

## 2. בידוד תרמי ומסה תרמית

אחת מהדרכים הבסיסיות ביותר העומדת לרשות המתכנן לעודד חיסכון באנרגיה היא לבודד היטב את מעטפת הבניין: בידוד תרמי מקטין רווח חום בלתי רצוי בקיץ, ומצמצם את איבוד החום במשך החורף.



### 2.1 סוגי בידוד תרמי

לצורך הדיון כאן, נגדיר כאן את המונח 'בידוד תרמי' בצורה שונה מעט מהמקובל, ונתייחס לכל האמצעים להפחתת מעבר חום דרך מעטפת אטומה (כלומר – כל רכיבי הבניין שאינם מעבירים חלק מהקרינה ישירות, כפי שקורה בחומרי זיגוג). לפי הגדרה זו, ישנם שלושה אמצעים להפחתת מעבר החום: החזרה, התנגדות וקיבול חום (reflective, resistive and capacitive insulation).

**א. הפחתת מעבר חום באמצעות החזרה**

כאשר מנגנון מעבר חום עיקרי הוא קרינה, למשל בצד התחתון של גג רעפים, ניתן להפחית את מעבר החום על ידי שימוש ברדיד מבריק (לרוב רדיד אלומיניום), בעל מקדם בליעה נמוך ופליטות נמוכה (כ-0.02-0.05). התנאי ליעילות של הרדיד הוא התקנה שלו כך שהמשטח המבריק יפנה אל חלל אוויר, ולא יהיה במגע עם חומר מוצק, כך שמעבר האנרגיה יתרחש בעיקר בקרינה ולא בהולכה. תנאים נוספים, אשר קשה לקיים אותם בפועל, הם שחלל האוויר יהיה אטום וצר, כך שלא תהיה בו תנועת אוויר; ושמירה על ניקיון ויובש, כך שהיריעה תישאר נקייה ומבריקה, ללא אבק או עיבוי מים. כאשר היריעה מאבדת את הברק שלה, יעילותה פוחתת במידה רבה מאוד. את רדיד האלומיניום מתקינים בדרך כלל כשכבת ציפוי על חומר חזק יותר, כגון ניילון (עם או בלי בועות אוויר) או אפילו כלמינציה על לוחות גבס.

**ב. הפחתת מעבר חום באמצעות התנגדות**

מרבית חומרי הבידוד המקובלים הם בעלי התנגדות גבוהה למעבר חום בהולכה. התנגדות הכוללת של שכבת הבידוד תלויה בסוג החומר ובעובי השכבה, ולכן מקובל לכנות את החומרים האלה גם במונח 'בידוד נפחי' (bulk insulation). ניתן להבחין בין חומרים אשר מלבד ייעודם התרמי הם בעלי תפקיד קונסטרוקטיבי, כגון בלוקים מבטון תאי, לבין חומרים אשר ייעודם הוא להקנות בידוד תרמי, בלבד. ההתנגדות התרמית של חומרי הבידוד הטהורים גבוהה בדרך כלל פי ארבע או חמש מהחומרים בעלי הייעוד הכפול. בקבוצה זו ניתן למנות את החומרים המוקצפים (פוליאוריתן או פוליסטירן, למשל) ומזרוני צמר (סלעים או זכוכית). בשתי קבוצות החומרים, הבידוד התרמי מתקבל מאוויר כלוא בחללים קטנים בתוך התווך המוצק של החומר.

**ג. הפחתת מעבר אנרגיה באמצעות קיבול חום**

קיבול חום שונה באופן מהותי משני מנגנוני הבידוד הקודמים, משום שפעולתו אינה מיידית, ואפשרית רק במצב לא-תמידי, כלומר כאשר הבדלי הטמפרטורה בין שני צידי הרכיב משתנים לאורך זמן. כאשר חומר בעל קיבול חום גבוה נחשף לעלייה בטמפרטורה בצידו האחד, האנרגיה הנבלעת בו מביאה לשינוי איטי מאוד בטמפרטורה, ועובר זמן ממושך עד שהשפעת החימום מורגשת בצידו השני. אם במהלך הזמן הזה התנאים משתנים והטמפרטורה בצד החשוף יורדת, כיוון זרימת החום מתהפך, והאנרגיה עשויה להיפלט החוצה. כאשר מתקיים מצב תמידי, או כאשר התנאים קרובים לכך, זרימת החום היא קבועה ומתרחשת בכיוון אחד, ולכן אין תועלת בקיבול החום. קיבול

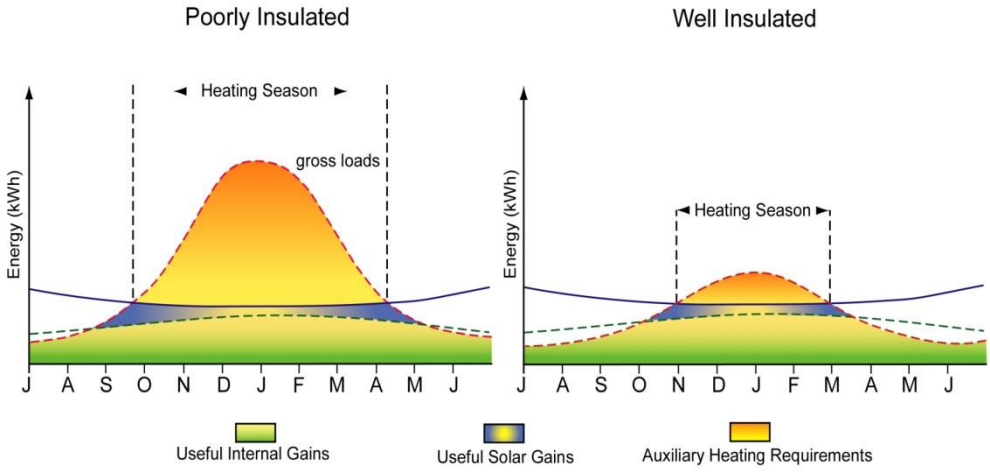
החום יעיל אפוא בהפחתת מעבר החום כאשר שינויי הטמפרטורה לאורך זמן הם מהירים יחסית, כפי שקורה באקלים מדברי, ויעילותו פחותה כאשר הבדלי הטמפרטורה איטיים וקטנים, כפי שקורה במישור החוף בקיץ.

## 2.2 תפקידי הבידוד התרמי והמסה התרמית

כפי שהוסבר כאן, לא יהיה זה נכון לעשות אבחנה חד-משמעית בין בידוד תרמי לבין מסה תרמית: פעולתם משולבת. יחד עם זאת, ראוי להדגיש היבטים מסוימים של השפעתם על צריכת האנרגיה בבניין.

**א. הבידוד התרמי "מוריד את הקו" ומקצר את עונת החימום**

תרשים ה-1 מראה בצורה סכמתית את השפעת הבידוד התרמי על דרישת האנרגיה לאקלום במהלך השנה, באקלים קר. כאשר מעטפת הבניין מבודדת היטב, דרישת האנרגיה הכוללת לאקלום פוחתת, ועונת החימום מתקצרת.



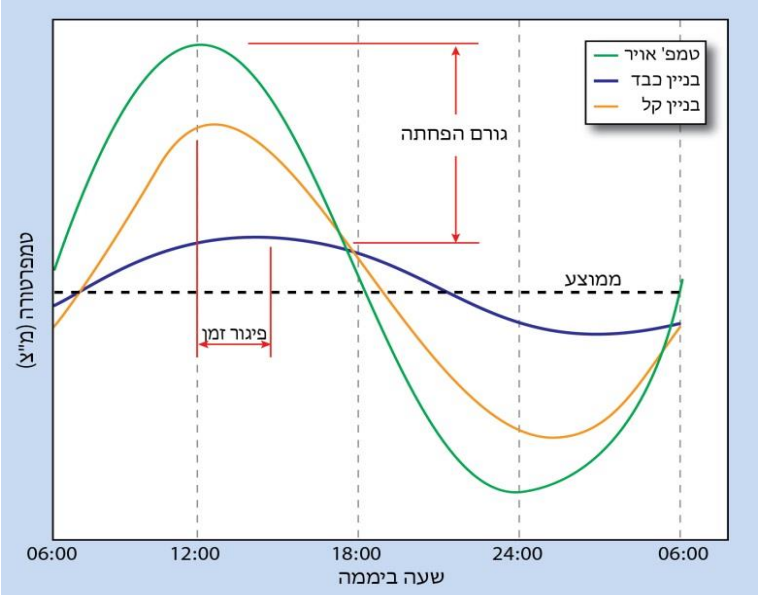

**תרשים ה-1. השפעת הבידוד התרמי על דרישת אנרגיה לחימום במהלך השנתי**

**ב. המסה התרמית "מיישרת את הקו"**

לנוכחות של מסה תרמית רבה בבניין עשויה להיות השפעה משמעותית על התפקוד התרמו-דינמי שלו. כפי שתרשים ה-2 מראה, לנוכחות של מסה תרמית שתי השפעות עיקריות:

א. המסה התרמית מקטינה את משרעת הטמפרטורה היומית: בבניין עם קיבול חום גבוה תנודות הטמפרטורה העלולות להיווצר בתגובה לעומסים חיצוניים (כמו קרינת שמש) או פנימיים (כמו חום הנפלט ממכשירי חשמל) תהיינה קטנות יותר מאשר בבניין עם קיבול חום נמוך.

ב. המסה התרמית מעכבת את מעבר האנרגיה דרך החומר, וגורמת לפיגור זמן בין השיא היומי של הטמפרטורה החיצונית לשיא בטמפרטורה הפנימית. פיגור הזמן הזה עשוי להיות בן מספר שעות.




**תרשים ה-2. תיאור סכימתי של ההשפעה של המסה התרמית על מהלך הטמפרטורות בבניין.**
(טמפ' האויר החיצוני עשויה להגיע בפועל למקסימום בין השעות 12 ועד 18.)

השילוב של שתי התופעות האלה מביא מספר יתרונות:

א. כאשר תנודות הטמפרטורה והעומסים התרמיים בבניין קטנים, ניתן להסתפק במערכות אקלום בעלות הספק קטן יחסית.

ב. כאשר שינויי הטמפרטורה איטיים והמשרעת היומית של הטמפרטורה קטנה, ניתן להימנע ממצבי קיצון העולים לגרום לאי-נוחות חמורה בבניין שאין בו מערכת אקלום.

ג. אגירת האנרגיה במחזור היומי מאפשרת לנצל את המחזוריות הטבעית בטבע. בחורף, קרינת שמש הנאגרת בשעות היום נבלעת במסה של הבניין מבלי שנגרמת עלייה חדה בטמפרטורה, ומשתחררת בהדרגה בשעות הלילה ומונעת התקררות מהירה. בקיץ, המסה התרמית אוגרת חום החודר לבניין במשך היום, ופולטת אותו בהדרגה בלילה, במיוחד אם נעשה שימוש באוורור לילה.

ד. הקטנת עומסי השיא בבניין, במקביל לדחייה שלהם בשעות אחדות, עשויה לסייע לחברת החשמל בניהול הביקושים ברשת הארצית.

ה. אגירת האנרגיה על פני מספר ימים מאפשרת לשמר את החום בבניין לאורך גל קור הנמשך ימים אחדים (בחורף), ומאיטה את התחממות הבניין במהלך גל חום בקיץ.

את המסה התרמית בבניין ניתן לקבוע במעטפת החיצונית שלו, בגג ובקירות, אולם במרבית הבניינים החלק העיקרי של המסה נמצא בשלד הנושא של הבניין – במיוחד בתקרות הביניים ובגרעין (מעליות ומדרגות), אך גם במחיצות פנימיות וחומרי גמר. כאשר המסה התרמית נמצאת במעטפת, היא משפיעה גם על מעבר החום דרכה, באופן ישיר. כאשר המסה נמצאת רק ברכיבי בניין פנימיים, השפעתה על מעבר החום דרך המעטפת באה לידי ביטוי רק אם יש מגע תרמי ישיר בין הרכיבים האלה לבין המעטפת, למשל במפגש בין תקרה לקיר חוץ.

על פי איזה קריטריונים קובעים את הכמות והמיקום של חומרי בידוד?

### 2.3 כמות הבידוד

כמות הבידוד התרמי הדרושה תלויה בהפרש הטמפרטורה בין שני משטחיו (הפנימי והחיצוני) של אלמנט המעטפת , ולא כפי שרבים נוטים לחשוב בהפרש הטמפרטורה בין האוויר בפנים לאוויר בחוץ. לכן כמות הבידוד הדרושה בגג, החשוף לקרינת שמש במשך כמעט כל שעות היום, גבוהה מכמות הבידוד הנדרש בקירות, החשופים לשמש ישירה רק מספר שעות בימים. יתירה מזאת: בקיץ הגג חשוף לעוצמת קרינה מרבית בשעות הצהריים, בעוד שהקירות חשופים לקרינה מרבית דווקא בשעות הבוקר או אחה"צ (קיר מזרחי ומערבי, בהתאמה), או בחורף (קיר דרומי).

ההשפעה של כמות הבידוד על החיסכון באנרגיה אינה לינארית. התועלת השולית המושגת הולכת וקטנה עם הגידול בעובי שכבת הבידוד מעל העובי האופטימלי, בהתחשב בעלות ובהשלכות של העובי הכולל על רכיבי המעטפת וטכנולוגיית הייצור שלהם, ולכן לא מומלץ לחרוג ממנו.

### 2.4 כמות המסה התרמית ומקומה בבניין

בבנייה המסורתית במזרח התיכון נעשה שימוש בקירות אבן עבים, ולעיתים נשמעת הטענה כי עוביים של הקירות מקנה להם תכונות תרמיות רצויות. האם באמת יש צורך במסה תרמית כה רבה?

**א. עובי שכבת המסה**

בכדי לענות על השאלה, יש לשוב ולבחון את תפקידי המסה.

א. אם בקירות הבניין אין כלל שכבת בידוד (שכבה העשויה חומר שההתנגדות התרמית החישובית שלו גדולה מ-0.5 מ' קלווין לואט, כמוגדר בת"י 1-5282), אז האבן עצמה אמורה לספק את ההתנגדות התרמית. אולם מאחר והמוליכות התרמית של האבן גבוהה (כ-2.1 מ' קלווין לואט), יידרש עובי גדול (כ-1.3 מטרים עבור קיר באזור א') אשר אינו מעשי.

ב. אם בקירות ישנה שכבת בידוד, אשר מיקומה יהיה מחוץ לשכבת המסה, מטעמים אשר יוסברו בהמשך, תפקיד המסה יהיה לאגור אנרגיה על מנת למתן את תנודות הטמפרטורה במחזור זמן נתון. מקובל להתייחס לפרק זמן של יממה, אשר במהלכה יהיה מאזן האנרגיה הכולל של המסה התרמית מאוזן. כלומר – היא תפלוט את כל כמות האנרגיה אשר נאגרה בה. עובי השכבה האוגרת אמור אפוא להיות העומק אליו תחדור במהלך היממה אנרגיה. עובי זה תלוי בשתי תכונות של החומר – המוליכות התרמית שלו וקיבול החום שלו, ובהפרש הטמפרטורה בין פני החומר לבין הנקודה העמוקה ביותר בשכבה הפעילה. עבור בטון, עובי הבטון הדרוש הוא כ-10 ס"מ (בהנחה שהבטון נמצא בצד הפנימי של הבניין). מעבר לכך – אין לו תרומה ממשית לתפקוד התרמי של הבניין.

**ב. מיקום המסה התרמית בדירה**

המסה התרמית מועילה כאשר היא פעילה מבחינה תרמית, כלומר: היא קולטת או פולטת אנרגיה בפרק זמן מתאים. לכן, התועלת הרבה ביותר במסה היא במעטפת הבניין, שם נעשה החלק העיקרי של מעבר האנרגיה.

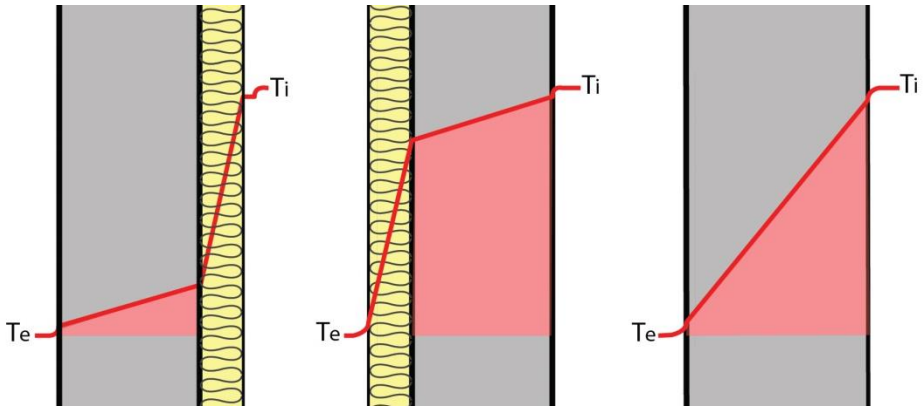
בנוסף לכך, יש תועלת גם במסה הנמצאת ברכיבי בניין פנימיים, כגון רצפה או מחיצות. לדוגמא: רצפה אשר חשופה לקרינת שמש ישירה החודרת מבעד לחלון ביום תאגור אנרגיה רבה ותתחמם בצורה מתונה ביום, ותשחרר את האנרגיה הזו בלילה. בדומה לכך, אם הקירות אגרו חום במשך היום בכדי למתן את עליית הטמפרטורה בקיץ, חשיפתם לתנועת אוויר בלילה, למשל על ידי פתיחת חלון, תסייע בסילוק עודף האנרגיה כך שיוכלו לשמש כגורם ממתן במהלך היום הבא. לעומת זאת,

בבניין רב קומות אשר יש בו גרעין מסיבי, הצימוד התרמי בין המסה הזו לבין פנים הדירה, שם היא דרושה, הוא לא משמעותי.

## 2.5 מיקום הבידוד והמסה ברכיב מעטפת

מיקום הבידוד בחתך רכיב המעטפת לא משפיע על ההתנגדות התרמית הכוללת שלו במצב תמידי. למרות זאת, למיקום הבידוד יש השפעה חשובה על התפקוד התרמי של המעטפת במצב דינמי, שבו זמינות האנרגיה משתנה במהלך היממתי האופייני, בין היום ללילה. כאשר הבידוד ממוקם בצד החיצוני של שכבת חומר מסיבי בקיר רב-שכבתי, הבידוד מפחית את התחממות המסה בשעות החמות של היום בקיץ, ואת התקררותה בלילות חורף קרים. בתקופות אחרות, הבידוד החיצוני פועל באופן הפוך: בלילות קיץ, הוא מאפשר חשיפת המסה הפנימית לאוויר קריר שזורם דרך החלל באמצעות אוורור מפולש, בעוד שבשעות היום בחורף הוא מאפשר חשיפה של אותה מסה פנימית לקרינת שמש, באמצעות קליטה ישירה .

איור ה-1 מדגים את השפעת המיקום של הבידוד על אגירת החום של קיר חיצוני בבניין במצב תמידי, כאשר מניחים שקיבול החום של שכבת הבידוד הוא זניח. מתוארים שלושה מצבים: הקיר ללא בידוד (מימין); הבידוד התרמי נמצא בצד החיצוני, באמצע; והבידוד מותקן בצד הפנימי, משמאל. באיור, הקו האדום מתאר את מהלך הטמפרטורה. בכל שלושה המצבים, הטמפרטורה הפנימית זהה, וכך גם הטמפרטורה החיצונית. בהנחה שהטמפרטורה בתוך הבניין ($T_i$) גבוהה מהטמפרטורה בחוץ ($T_e$), מפל הטמפרטורה העיקרי יתרחש לרוחב שכבת הבידוד. מאחר וכמות האנרגיה האגורה בחומר היא ביחס ישר לטמפרטורה שלו, ניתן לתאר את עודף האנרגיה האגורה בקיר בהשוואה לאנרגיה שהייתה נמצאת בו אילו היה כולו בטמפרטורה של הסביבה החיצונית באמצעות הפוליגון הוורוד. קל לראות שקיבול החום הגדול ביותר של הקיר מתקבל כאשר המסה היא בצד הפנימי והבידוד בצד החיצוני. כאשר הבידוד מותקן בצידו הפנימי של הבניין, תרומתו של הקיר למסה התרמית של הבניין קטנה ביותר.




**איור ה-1. השפעת הבידוד התרמי על קיבול החום של קירות**

אם החלל נמצא בשימוש רק בפרקי זמן קצרים ואינו מאוקלם ברציפות, עשוי להיות יתרון במיקום הבידוד התרמי בצד הפנימי דווקא, במיוחד עם נמצאים בו עומסי חום פנימיים גדולים. בחלל כזה, מניחים שיש צורך במערכת אקלום בכל מקרה, והיא תתוכנן כך שתביא את האוויר בחלל לטמפרטורה הרצויה תוך זמן קצר ככל הניתן. בחלל כזה אגירת אנרגיה במסה תרמית של המעטפת עלולה אפוא להיות בלתי רצויה. חללים כאלה אופייניים יותר לאולמות התכנסות ואינם מצויים בדרך כלל בבנייני מגורים, אולם יתכן וישולבו בבניינים גדולים שיש בהם גם פונקציות ציבוריות מלבד המגורים.

### 2.6 גשרים תרמיים

גשרים תרמיים הם רכיבים או חלקים מרכיבים במעטפת הבניין שההתנגדות התרמית שלהם נמוכה משמעותית מההתנגדות התרמית האופיינית של הרכיב כולו. להמצאות גשרים תרמיים ישנן שתי השפעות אפשריות על התפקוד התרמי של הבניין:

א. מעבר חום לא רצוי בין הבניין לסביבתו

ב. שינוי משמעותי בטמפרטורה של המשטח הפנים של הרכיב. לשינוי כזה ישנן שתי השלכות: פגיעה בנוחות התרמית של דיירי הבניין בכך שהטמפרטורה הקרינתית הממוצעת תהיה שונה (גבוהה בקיץ ונמוכה בחורף) מהטמפרטורה של שאר רכיבי המעטפת; ואפשרות להיווצרות עיבוי (קונדנסציה) ובעקבותיו הופעת עובש, בעיקר בחורף.

גשרים תרמיים ניתן למצוא בבנייה בארץ במספר מקומות אופייניים במעטפת. בבנייה המתועשת הם קיימים במפגש בין קיר נושא חיצוני לבין קיר נושא פנימי ניצב ובמפגש בין קיר חיצוני לרצפה/תקרה. בבנייה בלתי-מתועשת (בעיקר בנייה צמודת קרקע), נראה גשרים תרמיים באלמנטים קונסטרוקטיביים מבטון ללא בידוד חיצוני (עמודים וקורות). מרחבים מוגנים (ממ"דים) הם נקודת תורפה נפוצה בכל סוגי הבניינים, וכך גם מרפסות גג מרוצפות. מרבית המרפסות הזיזיות, אשר בהן רצפת הבטון הקונסטרוקטיבית בולטת מחוץ למעטפת המבודדת של הבניין, אף הן מהוות גשר תרמי משמעותי.

דיון מפורט יותר בטיפול בגשרים תרמיים נמצא בפרקים הבאים, העוסקים בתכנון קירות וגגות.

## 3. צבע המעטפת

לצבע המעטפת עשויה להיות השפעה על התפקוד התרמי של הבניין בכך שהוא משפיע על הטמפרטורה החיצונית של רכיב המעטפת. ככל שהצבע כהה יותר, כך הוא בולע יותר קרינת שמש ומתחמם יותר. לכך עשוי להיות יתרון בחורף, אולם בתנאי האקלים בארץ ראוי לתת דגש על עומס החום בקיץ, ולכן מומלץ להשתמש בחומרי גמר בהירים. יש לכך חשיבות מיוחדת כאשר מדובר בגג, אשר חשוף לקרינת שמש בעוצמה גבוהה ביותר דווקא בימות הקיץ, כמעט כל שעות היום. דיון מורחב בנושא ניתן לראות בפרק על גגות.

החשיבות של מקדם הבליעה של המעטפת קטנה ככל שהבידוד תרמי גדול יותר. לחילופין, התפקוד התרמי של בניין אשר אינו מבודד ישתפר מאוד בעקבות יישום צבע בהיר. מסורת הבנייה הים-תיכונית, אשר בה נהוג היה לסייד את הבניין – את הגג ולפעמים גם את הקירות – משקפת עיקרון זה.

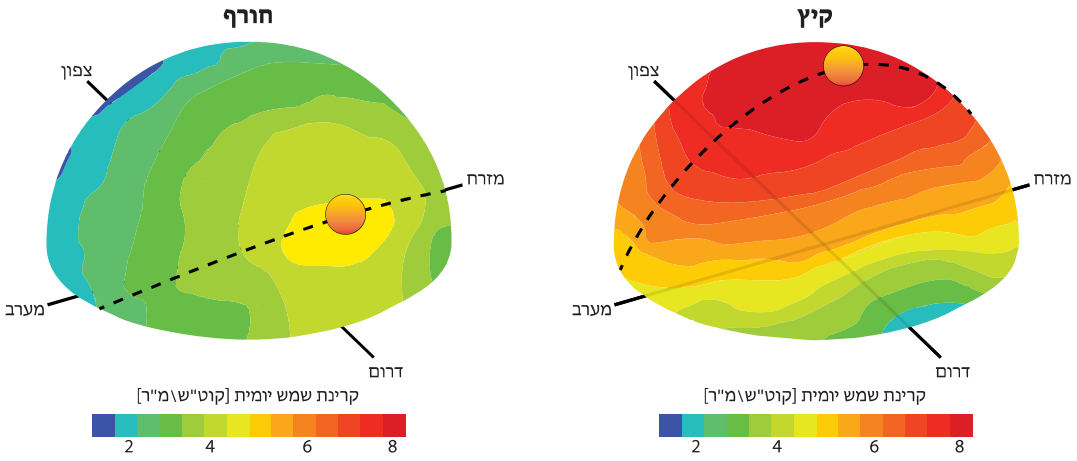
**צילום ה-2.**

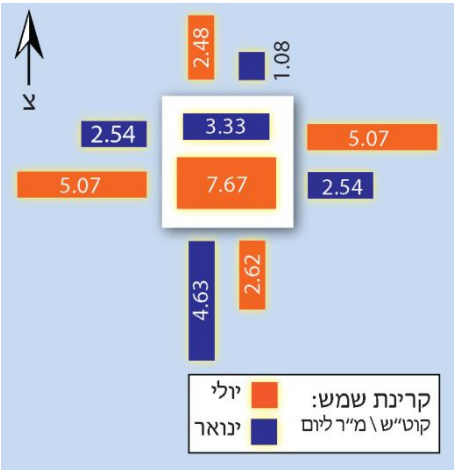
**בבנייה הים-תיכונית סיוד מעטפת הבניין נועד להפחית את רווח החום בקיץ.**

## 4. חשיפה לשמש: אוריינטציה של חללים עיקריים

המיקום של החללים העיקריים בדירת המגורים נקבע בדרך כלל בהשפעת הקשרים הפונקציונליים הפנימיים ובהתאם למיקום הדירה ביחס לבניינים שכנים ולרחוב. חלל המגורים (ה'סלון') ימוקם קרוב לכניסה ופונה אל הרחוב או אל החצר האחורית – אך לעיתים רחוקות יפנה אל חזית צידית, הן מטעמי פרטיות והן משום שחזית זאת לא נדרשת להיות ייצוגית. בהתאם לכך, גם שטח החלונות הפונה לכיווני השמים מושפע משיקולים שאינם קשורים לתפקוד התרמי של הדירה – אך עלולים להיות בעלי השעה גדולה מאוד עליה.

בכדי להבין את חשיבות האוריינטציה, יש לבחון את מידת החשיפה לקרינת שמש של משטח אנכי – כגון קיר או חלון – בכל אחד מהכיוונים. כפי שתרשים ה-3 מראה, שטף הקרינה היומי על חלון דרומי בחורף הוא כ-4.6 קוט"ש/מ"ר - כמעט פי שניים מהשטף היומי בקיץ. חלון הפונה למזרח או למערב, לעומת זאת, יזכה לכמות שמש כפולה בקיץ – כאשר החימום אינו דרוש, בהשוואה לחורף, כאשר הוא רצוי.




**תרשים ה-3. התפלגות קרינת השמש בישראל לפי עונות השנה והאוריינטציה המרחבית. למעלה: השטף היומי של קרינת השמש בקיץ גבוה ביותר על משטח אופקי (בקירוב), אך בחורף הוא יתקבל על משטח משופע לכיוון דרום. למטה: חלון הפונה לכיוון דרום יקבל בחורף כמעט פי שניים קרינת שמש מאשר בקיץ. בחלון מזרחי או מערבי, שטף הקרינה היומי עולה על 5 קוט"ש/מ"ר בקיץ – פי שניים מאשר בחורף.**

דוגמא:

כדי לתת משמעות למספרים, נמחיש את מאזן האנרגיה על דלת זכוכית כפולה, מהסוג הנפוץ בחדרי המגורים ביציאה למרפסת. נניח ששטח הזיגוג הוא 4 מ"ר (2 מ' גובה על 2 מ' רוחב). בהנחה שהדלת אינה מוצלת, שטף הקרינה היומי עליה מתואר בטבלה ה-1:

**טבלה ה-1. שטף הקרינה היומי על דלת זכוכית בשטח של 4 מ"ר**

| | שטף קרינה יומי (קוט"ש) | |
|---|---|---|
| | חורף | קיץ |
| דרום | 18.5 | 10.5 |
| מערב | 10.3 | 20.3 |

נניח כעת כי החזית הדרומית משמשת לחימום פסיבי בחורף, ולכן רווח החום הסולרי של הזיגוג הוא גבוה – 0.8. פוטנציאל החימום יהיה אפוא 14.8 קוט"ש ליממה: שווה ערך ל-10 שעות עבודה של מפזר חום חשמלי בעל הספק של 1500 ואט. רווח החום שיתקבל מדלת דומה בחזית המערבית יהיה קטן בכמעט 45%.

לעומת זאת, בקיץ העומס התרמי על הבניין בשל הזיגוג החשוף לשמש יהיה 8.4 קוט"ש ליום בחזית הדרומית, לעומת כמעט 16.25 קוט"ש עבור דלת זהה בחזית המערבית. גם אם נניח כי נעשה שימוש בזכוכית כהה או רפלקטיבית בעלת מקדם רווח חום סולרי של 0.33 בלבד – עדיין יהיה העומס על מערכת הקירור כמעט 6.7 קוט"ש ליום. סילוק כמות אנרגיה כזאת תחייב פעולה של מזגן אופייני בהספק של 1.5 כ"ס ומקדם פעולה (COP) של 3.0 למשך כשעתיים.

מהדוגמא ניתן לראות כי להפניית שטח זיגוג עיקרי לדרום במקום למערב ישנה משמעות כפולה: הגדלה ניכרת של פוטנציאל החימום בחורף, והקטנה משמעותית של העומס על מערכת המיזוג בקיץ.

## 5. חדירת אוויר ואוורור

אוורור הבניין דרוש על מנת להבטיח כי איכות אוויר הפנים תעמוד בדרישות בריאותיות וכן לסילוק ריחות רעים ומזהמים הנפלטים בו. חילופי אוויר בין הבניין והסביבה כרוכים גם במעבר אנרגיה כל אימת שישנו הבדל טמפרטורה ביניהם. מעבר האנרגיה הזה עשוי להיות רצוי, למשל כאשר מבקשים לקרר את הבניין בשעות הלילה בתקופת הקיץ. עם זאת, במהלך חלק ניכר מן השנה מעבר החום איננו רצוי: למשל, כאשר אוויר חיצוני קר חודר אל הבניין בחורף או כאשר אוויר חם חודר אליו בקיץ.

מעבר אוויר דרך מעטפת הבניין מתרחש בעיקר דרך פתחים במעטפת – חלונות ודלתות. בבנייה המסיבית המקובלת בארץ, מעבר האוויר דרך הקירות המסיביים או דרך הגג זניחה.

מעבר האוויר בין הבניין לסביבה הנעשה דרך חלונות פתוחים או בסיוע אמצעים מלאכותיים כמו מפוחים מכונה 'אוורור' (ventilation). תנועת אוויר לא מבוקרת – בין אם היא מועילה ובין אם היא גורמת לנזק, מכונה 'חדירת אוויר' או 'אינפילטרציה' (infiltration).

את קצב חילופי האוויר בין הבניין לבין הסביבה מקובל לציין במונח 'תחלופות אוויר בשעה' (ach - air changes per hour). תחלופה אחת בשעה (1 ach) מציינת כי במהלך שעה אחת מתחלף נפח אוויר השווה לנפח הפנימי של הבניין (או הדירה). אין בציון קצב תחלופות האוויר מידע לגבי איכות האוויר בבניין כולו - יתכן בהחלט שבחלקים ממנו לא היתה תנועת אוויר כלל. קצב חילופי

האוויר בבניין אשר בו כל הפתחים סגורים (דהיינו – באינפילטרציה) עשוי לנוע בין כ-0.3 חילופי אוויר בשעה בבניין אטום ברמה הגבוהה ביותר לבין 2-3 חילופי אוויר בשעה בבניין הבנוי באיכות נמוכה.

דוגמא:

בחדר ששטח רצפתו 10 מ"ר וגובה התקרה 2.4 מ' נמצא חלון פתוח בשטח (נטו) של 1 מ"ר. אם מהירות האוויר דרך החלון היא 1 מטר לשנייה (3.6 קמ"ש) בממוצע, כמה חילופי אוויר בשעה יהיו בחדר?

תשובה:

דרך החלון עוברים כל שעה 3,600 מ"ק אוויר (1מ"ר X 1 מטר לשנייה X 3,600 שניות). נפח החדר – 240 מ"ק (10 מ"ר X 2.4 מ'). מספר חילופי האוויר בשעה הוא אפוא 15 (3600 חלקי 240).

ה

## 5.1 השפעת חילופי האוויר על הנוחות התרמית בבניין

כפי שנאמר קודם, לחילופי אוויר בין הבניין לבין הסביבה ישנה השפעה רבה על מאזן האנרגיה של הבניין. רוב האנרגיה האצורה בבניין, ללא קשר למקורה, נאגרת במסה התרמית שלו - ברצפה, בקירות ובתקרה. כמות האנרגיה האצורה באוויר הנמצא בבניין זניחה, משום שקיבול החום הנפחי של האוויר נמוך מאוד. עם זאת, כאשר הפרש הטמפרטורה בין מסת הבניין לבין האוויר החיצוני גדולה, עשויה תנועת האוויר להסיע כמות משמעותית של אנרגיה ביניהם.

בקיץ, כאשר האוויר החיצוני קר יותר מן המסה של הבניין (בעיקר בלילה, ובמיוחד באזור ההר), אוורור הבניין עשוי לסלק עודפי חום אשר הצטברו בה במהלך שעות היום החמות. אוורור המיועד לצנן את מסת הבניין מכונה 'קירור מבני' (structural cooling).

המלצה: ניתן להשיג חיסכון ניכר באנרגיה הדרושה למיזוג אוויר אם מאווררים את הבניין בלילה, כאשר הקירור המבני יעיל במיוחד – גם אם החדר איננו מאוכלס בשעות האלה.

לאוורור ישנה גם השפעה נוספת, מוחשית יותר: תנועת האוויר גורמת להגברת הקצב שבו גוף האדם מחליף חום עם הסביבה: בדרך כלל, כאשר טמפרטורת האוויר נמוכה מטמפרטורת העור (כ-35 מעלות), תנועת האוויר מצננת את הגוף ותורמת לשיפור הנוחות התרמית שלנו. תנועת האוויר גם מגדילה את קצב נידוף הזיעה, ובכך מצננת את הגוף, ללא קשר לטמפרטורת האוויר. אוורור המיועד לצנן את בני השוהים בבניין על ידי האצת תנועת האוויר סמוך לגופם מכונה אוורור 'נוחות' ('comfort ventilation').

המלצה: אוורור נוחות עשוי לשפר את תחושת בני האדם השוהים בבניין גם כאשר טמפרטורת האוויר החיצונית גבוהה מזו שבתוך הבניין – אך בה בעת יגדיל את עומס החום הכולל על הבניין. בתנאים האלה, עדיף להשתמש במאוורר ליצור תנועה של האוויר הפנימי – ולא להכניס אוויר חיצוני חם.

## 5.2 חדירת אוויר

חדירת אויר מתרחשת בעיקר במקומות בהם אין אטימה בין מערכת הזיגוג לבין פתח הבנייה ובין רכיביה השונים של מערכת הזיגוג, וכן כאשר הפתח איננו סגור לחלוטין. חדירת אוויר היא בעלת משקל רב במאזן האנרגיה של בניין, במיוחד אם מעטפת הבניין מבודדת היטב.

ה

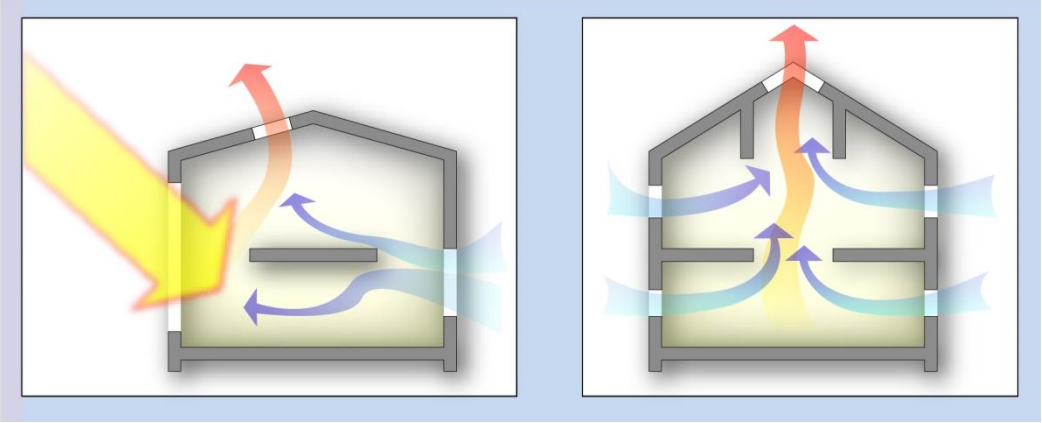
### 5.3 אוורור

מבחינים בין אוורור טבעי ואוורור מאולץ: אוורור מאולץ נעשה בעזרת מפוחים או מאווררים. אוורור טבעי מתקיים דרך פתחים במעטפת הבניין בהשפעת הפרשי לחצים בין האוויר בבניין ובין האוויר החיצוני.

הפרשי הלחצים הינם תוצאה של שני מנגנונים:

הפרש צפיפות ("אפקט הארובה") – נוצר כאשר קיים הפרש טמפרטורות משמעותי בין פנים הבניין לבין החוץ. טמפרטורה גבוהה יותר בתוך הבניין גורמת להקטנת צפיפותו של האוויר בו וכתוצאה מכך לתנועה כלפי מעלה. אם קיים בבניין פתח גבוה, האוויר החם ייצא דרכו ובמקומו יחדור לבניין אוויר חיצוני קריר יותר דרך פתח תחתון. יעילות המנגנון הזה תלויה בהפרש הטמפרטורה בין הפנים לחוץ, גודל הפתחים בבניין והפרש הגבהים בין (מרכזי) פתח הכניסה ופתח היציאה. איור ה-3 מדגים שני מצבים אשר בהם עשוי להתקיים אפקט הארובה.

הערה: הפרש צפיפות האוויר הנוצר בבניין הוא בדרך כלל קטן מאוד (אלא אם גובהו של הבניין גדול במיוחד). לכן תנועת אוויר בהשפעת אפקט הארובה היא חלשה מאוד, ואיננה מורגשת כאשר נושבת רוח סמוך לבניין.



**איור ה-3. אפקט הארובה בבניין: אוויר חם משתחרר דרך פתח גבוה ובמקומו חודר אוויר קריר יותר מבעד לפתח נמוך יותר.**

לחץ רוח – הלחץ המופעל על דפנות הבניין כתוצאה מרוח הנושבת סביבו. משפיע על אפשרות האוורור של הבניין. נוסחה אמפירית מקורבת להערכת פוטנציאל האוורור כתוצאה מלחץ רוח היא:

$$W_2 = C \times A \times V$$

כאשר $W_2$ הוא נפח האוויר [מ"ק/שניה], A הוא שטחו של הפתח [מ"ר], V מהירות הרוח מחוץ לבניין [מ/שנייה] ו- C מקדם יעילות הפתח.

ערכים מתאימים עבור C הם 0.5- 0.65 כאשר רוח הבאה מכיוון ניצב לפתח כניסת הרוח לבניין ו- 0.25-0.35 אם הרוח באה בזווית אליו.

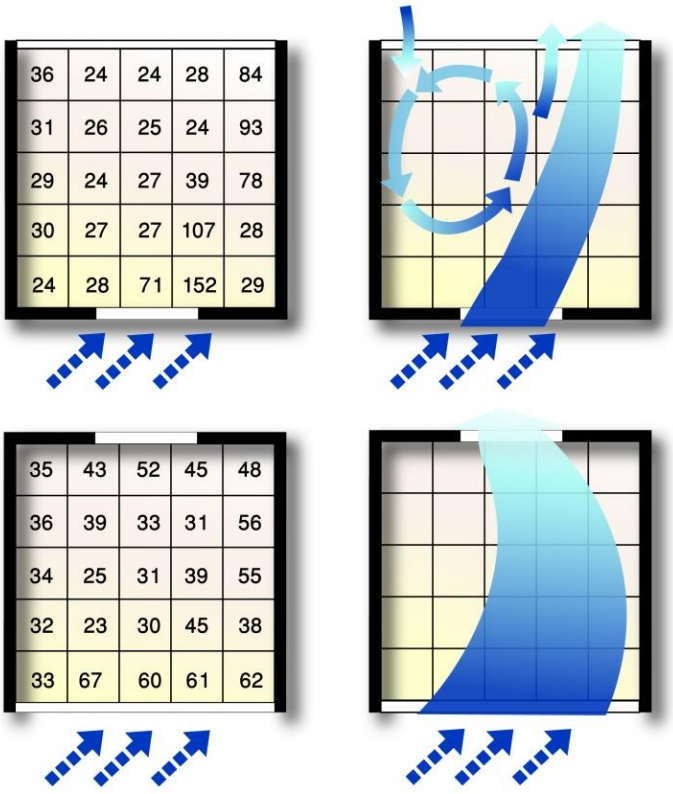
כאשר פתחי הכניסה והיציאה הם בעלי גדלים שונים, יש להציב בנוסחה את גודלו של הפתח הקטן מהשניים.

## 5.4 השפעת גודל החלון והיחס בין גודל פתח הכניסה ופתח יציאת האוויר

תקנות התכנון והבנייה (התוספת השנייה) קובעות ששטחם הכולל של חלונות בדירת מגורים יהיו לפחות:

- 8% משטח הרצפה בחדר מגורים
- 5% משטח הרצפה במטבח
- 0.3 מ״ר או 10% משטח הרצפה בחדר שירותים (לפי הערך הגדול)

כאשר בחדר ישנם לפחות שני פתחים (כגון חלון ודלת), יעילות האוורור תלויה ביחס שבין הגדלים שלהם. מהירות הזרימה הממוצעת בחדר נקבעת על ידי גודלו של הפתח הקטן יותר. עם זאת, גודלו ומיקומו של פתח הכניסה משפיעים על דפוס הזרימה בחדר, על היווצרות אזורים 'מתים', ועל מהירות הזרימה בסמוך לחלון (איור ה-4). כאשר פתח כניסת האוויר קטן, עשויה מהירות הרוח בסמוך לו להיות גבוהה אף מן הרוח החיצונית, אולם פיזור האוויר הטרי בחדר יהיה בלתי אחיד. כאשר פתח הכניסה גדול, תהיה מהירות הרוח דומה בכל תחומי החדר.




**איור ה-4. השפעת הגודל היחסי של פתחי הכניסה והיציאה של האוויר בחדר על מהירות הזרימה הממוצעת ועל מסלול תנועת האוויר.**
המספרים בתרשים מציינים את מהירות האוויר בחדר באחוזים ממהירות הרוח מחוץ לחלון. מקור: גבעוני, 1965.

תקן 5280 חלק 1.1 - "אנרגיה בבניינים: מעטפת הבניין - בנייני מגורים" מאפשר למתכנן לקבל הקלה בדרישות החלות על מעטפת הדירה (במסלול התפקודי בלבד) אם בדירה קיים אוורור טבעי. אוורור טבעי למטרת חיסכון באנרגיה מועיל כאשר תנאי אוויר החוץ מאפשרים השגת נוחות תרמית ללא חימום או קירור אקטיביים, או בתקופת הקיץ כאשר טמפרטורת אוויר החוץ מאפשרת קירור המסה התרמית הפנימית בדירה. התקן מציב דרישות החלות על פתחים במעטפת הדירה אשר יש לעמוד בהן אם מבקשים להבטיח אוורור טבעי יעיל.

הערה: אם לא ניתן לעמוד בדרישות לאוורור טבעי, אף אם הדירה עומדת בדרישות כל שאר התקנות, לא ניתן להתחשב באוורור הטבעי כאמצעי לחיסכון באנרגיה כאשר עורכים את החישוב בשיטה התפקודית.

התקן קובע כי אוורור טבעי יעיל יכול להתקיים רק כאשר:

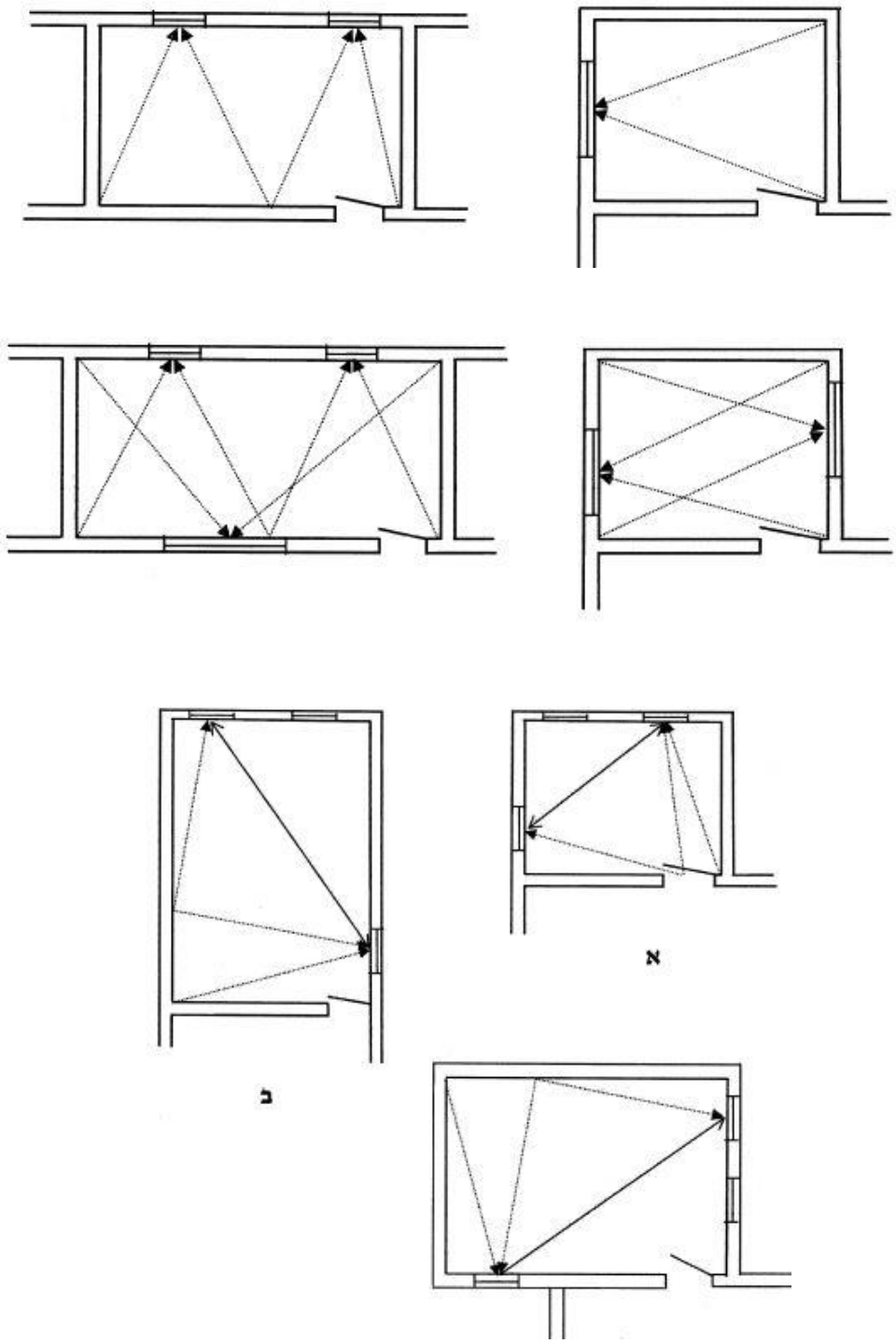
> "סך כל השטח של פתחי האוורור יהיה 4% לפחות מהשטח נטו של הרצפה. פתחי האוורור ימוקמו בקירות חוץ של יחידת התכנון. כאשר החדר המיועד לאוורור טבעי כולל פתחי אוורור בשני קירות מקבילים או בקירות הניצבים זה לזה, מותר שפתחי אוורור ימוקמו גם בקיר הפונה למרפסת סגורה, או בקיר הפונה לחצר פנימית, ובלבד שלפחות 25% מהשטח של פתחי האוורור שדרכו נכנס האוויר בפועל ימוקם בקיר חוץ."

## 5.5 מיקום פתחי האוורור

מיקומם של הפתחים במעטפת הבניין הינו בעל חשיבות רבה להשגת אוורור טבעי יעיל. בנוסף להנחיות הנוגעות לגודל הפתח, התקן הישראלי ת"י 5280 קובע גם את היחסים הגיאומטריים בין חלונות אשר יבטיחו כי האוורור הטבעי בחלל יהיה יעיל[49]. הדרישה לאוורור קשורה לגובה החלל (h). ככלל, על מנת ליהנות מאוורור טבעי יעיל בנקודה מסוימת, המרחק שלה ממרכז החלון הקרוב ביותר לא יעלה על 2h כאשר יש חלון חיצוני רק בקיר אחד. אם קיימים פתחים בקירות חוץ מקבילים המרחק יכול להגיע עד 5h. כאשר יש חלונות בשני קירות חוץ ניצבים, המרחק בין מרכזי שני החלונות הרחוקים לא יעלה על 5h, והמרחק אל מרכז החלון הקרוב של כל נקודה בשטח שמחוץ לקו הזה לא יעלה על 2h. איור ה-5, הלקוח מהתקן, ממחיש את הדרישות.

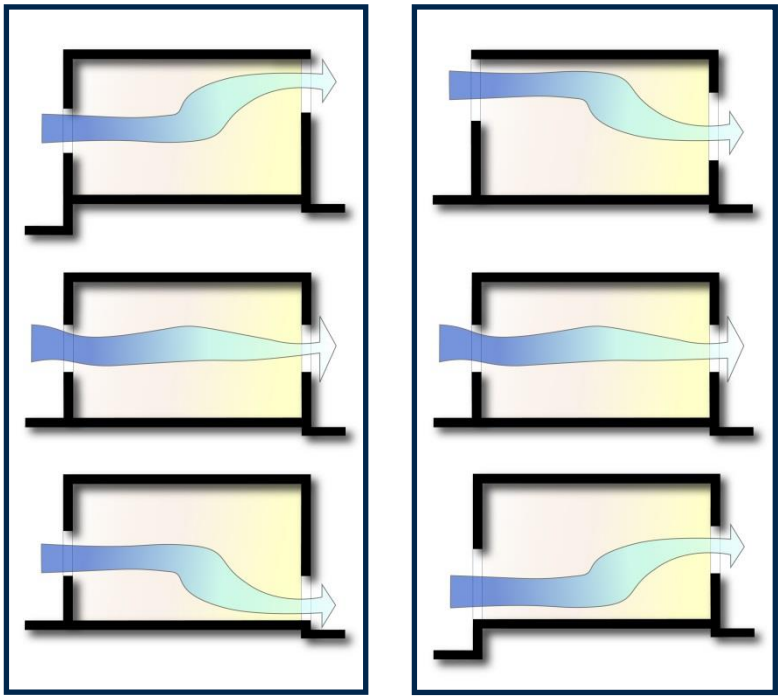
> הערה:
>
> תכנון הממלא אחר הנחיות אלה יבטיח אוורור טבעי יעיל – אך לפי שעה אין בתקן דרישה המחייבת כי אכן יהיה אוורור טבעי, ומותר לתכנן דירות מגורים אשר אינן עומדות בכל הדרישות האלה. תכנון על פי ההנחיות יאפשר לקבל 'בונוס' עבור אוורור טבעי כאשר הבניין נבדק לפי המסלול התפקודי.

[49] נספח ג' לת"י 5280-1.1 כולל הנחיות לתכנון חלונות אשר יבטיחו אוורור טבעי יעיל – אך לפי שעה אין בתקן דרישה המחייבת כי אכן יהיה אוורור טבעי. תכנון הממלא אחר ההנחיות יאפשר לקבל 'בונוס' עבור אוורור טבעי כאשר הבניין נבדק לפי המסלול התפקודי.




**איור ה-5. הנחיות גיאומטריות למיקום פתחים אשר יבטיחו אוורור טבעי נאות, לפי ת"י 5280-1.1. למעלה: פתחים בקיר חיצוני אחד. באמצע: פתחים בשני קירות מקבילים. למטה: חלונות בשני קירות ניצבים.**

מחקרים מראים שלמיקומו של פתח יציאת האוויר אין חשיבות רבה בקביעת מסלול ומהירות תנועת האוויר בחלל המאוורר. זאת משום שהשינויים בזרימת האוויר מתרחשים רק בסמיכות לפתח זה, ולא בנקודות הקרובות יותר לפתח כניסת האוויר. מאידך, מיקומו של פתח הכניסה לחלל הינו בעל חשיבות רבה, והבדלים במיקומו יגרמו למסלולי זרימה שונים ולמהירות שונה של האוויר בתוך החלל המאוורר (איור ה-6).



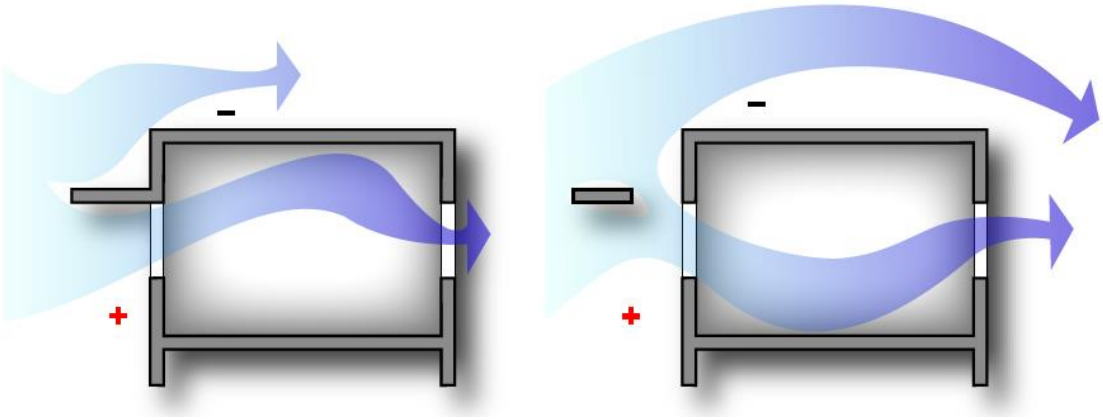
**איור ה-6. תנועת האוויר בחלל מושפעת בעיקר ממיקומם של פתחי הכניסה של הרוח, בעוד שפתחי היציאה הם בעלי השפעה מועטה על מסלול האוויר בחדר.**

מסלול תנועת האוויר בחלל חשוב משום שהיעילות של קירור נוחות תלויה בכך שתהיה תנועת אוויר באזורי הפעילות שבהם שוהים דיירי הבניין. מאידך, לעיתים קורה כי תנועת האוויר סמוך לבני האדם איננה רצויה, אך קירור מבני דווקא רצוי.

בלי קשר למיקום החלון ביחס לחלל הפנימי, ניתן לכוון את זרימת האוויר ולווסת את מהירותה באמצעות אביזרים המחוברים לקיר מחוץ לפתח או על ידי תריסים שונים (איור ה-7):

- גגון במפלס הגג או אלמנטים אנכיים בצידי הפתח יגדילו את לחץ האוויר בחזית הפתח ויגבירו אז זרימת האוויר דרכו.
- גגון בולט ורתום לקיר מעל הפתח יקטין את זרימת האוויר דרך הפתח, משום שיגרום להטיית זרימת האוויר אל מעל הגגון. גם מסלולו של האוויר בתוך החלל המאוורר יוסט כלפי מעלה, מעל למפלס הראש של הנוכחים בחלל (הקטנה באפקט "קירור הנוחות"). גגון שאינו רתום לחלוטין (לכל אורכו) אל קיר הבניין יפתור בעיה זו וזרימת האוויר בחלל תהיה דומה לזו שתיווצר במקרה שאין כלל גגון לפני הפתח.

- תריסי רפפה בפתח יטו את זרימת האוויר בכיוון ההטיה שלהם. יש להתחשב בכך שהטיה זו גם מקטינה את הגודל האפקטיבי של הפתח.




**איור ה-7. אמצעים להטיית זרימת האוויר מחוץ לחלון או כחלק ממנו.**

## 6. צורת הבניין

לאחר שהוצגו מספר גורמים המשפיעים על צריכת האנרגיה של בניין המגורים, לרבות קומפקטיות ואוריינטציה, ראוי לבחון כיצד משפיע המתאר הכולל של הבניין (building form). הבנייה למגורים בארץ מתבססת על מספר אבות-טיפוס עקרוניים: בנייה צמודת-קרקע (בתים חד-או דו-משפחתיים), ובנייה רוויה. את הבנייה הרוויה, המהווה כ-60-70 אחוז מהבנייה החדשה למגורים, ניתן בתורה לחלק למספר טיפוסי משנה [50]: בנייה טורית; מבנני חצר; בנייני 'ביתן' קומפקטיים; ומגדלי מגורים. לכל אחד מהטיפוסים האלה יתרונות וחסרונות בהיבט התפקוד התרמי.

### 6.1 בנייה צמודת קרקע

לכאורה, בנייה צמודת קרקע נהנית מגמישות מרבית בתכנון: ניתן למקם את הפתחים כך שיהנו מחשיפה מיטבית לשמש ולרוח, בהתאם לאזור האקלים. מאידך, בתים צמודי קרקע הם לא קומפקטיים בעליל: גם בבתים דו-משפחתיים, כמעט כל היקף הדירה חשוף לסביבה. לכן ישנה חשיבות רבה בבתים אלה להקפדה על בידוד תרמי נאות של כל מרכיבי המעטפת, בדגש על הגג. תרומת הבידוד התרמי, בניגוד לתרומה האפשרית של אמצעים שונים לחימום או צינון 'פסיבי', אינה דורשת תשומת לב והקפדה על הפעלה נכונה בהתייחס לעונות השנה, שעות היממה ותנאי מזג האוויר.

גורמים המקשים על יישום תכנון חוסך-אנרגיה בבנייה צמודת הקרקע (בנוסף כמובן למודעות של בעלי הדירה ושל המתכננים) קשורים למגרש וליחסים ההדדיים בין הבניין לבניינים שכנים. ממדי המגרש האופייניים, שהוא בדרך כלל מלבן שצידו הקצר פונה אל חזית הרחוב, עלולים להקשות על קביעת פתחים בשטח מספיק בכיוונים הרצויים, הן לאוורור והן לחשיפה לשמש. בבנייה צמודת קרקע, גם לטופוגרפיה עלולה להיות השפעה מכרעת על תכנון הבניין. הטופוגרפיה וממדי המגרש יחד עלולים למנוע מהבניין זכויות שמש או אוורור.

[50] החלוקה הטיפולוגית לטיפוסי בניינים נעשית בעקבות Martin & March, 1972. ניתוח אקלימי המתבסס על הסיווג הזה ניתן למצוא במאמרם של Ratti et al, 2003.

## 6.2 בנייה רוויה

בתי דירות מאפשרים ניצול טוב יותר של משאב הקרקע מאשר בנייה נמוכה. בישראל, שבה עתודות הקרקע קטנות, במיוחד באזורי הביקוש, ניתן להניח כי יהיה בסופו של דבר היפוך במגמת הגידול בבנייה הנמוכה, לטובת בנייה צפופה יותר. בתנאים קיצוניים, כגון אלה השוררים בהונג קונג, למשל, אין כנראה מנוס מבניית מגדלי מגורים. אולם ניתן להגיע לצפיפות גבוהה גם בטיפוסי בנייה אחרים – אשר נבדלים זה מזה באפשרות ליישם בהם פתרונות שונים לתפקוד תרמי יעיל.

חשוב להדגיש כי תפקוד הדירה יושפע מתכנון הדירה בפועל, ובעיקר מגודלם ומיקומם של החלונות. כאשר קירות הבניין מבודדים היטב והחלונות קטנים – השפעת האוריינטציה של הדירה קטנה, הן לחיוב והן לשלילה. חלונות גדולים עשויים לאפשר אוורור טוב ובעיקר חימום סולרי פסיבי, בתנאי שהם פונים לכיוונים המתאימים. בה במידה, שטחי זיגוג גדולים בכיוונים הלא נכונים – בעיקר מזרח ומערב – עלולים להטיל קנס כבד על תפקוד הבניין.

**א. בנייה טורית**

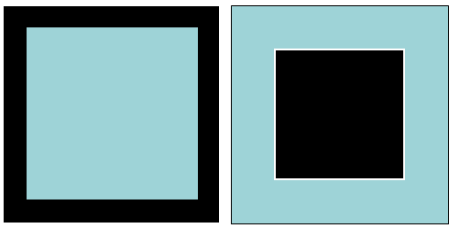
בבנייה הטורית, יחידת הדיור האופיינית חשופה לסביבה בשני קירות נגדיים. בבניינים נמוכים (2-3 קומות), יחידת דיור אחת עשויה להשתרע לכל גובה הבניין, ולהיות גם בעלת גג חשוף. בבניינים טוריים יותר גבוהים, אשר היו נפוצים בארץ בשנים הראשונות שלאחר קום המדינה, ישנם חדרי מדרגות וכל דירה משתרעת לרוחב קומה אחת בלבד. האוריינטציה של הדירה נקבעת לפי כיוון הרחוב וצורת המגרש. בעוד שבאירופה הבנייה הטורית מפנה את החזית הארוכה לרחוב, בישראל נבנו שיכונים רבים אשר בהם דווקא הגמלון פונה לרחוב, והחזית הארוכה היתה ניצבת לו.

מרבית הדירות בבניין טורי עשויות ליהנות מאוורור מפולש ומתאורה טבעית טובה. מידת החשיפה לשמש, אשר עשויה להקטין את עלות החימום בחורף, תלויה בפנות הדירה: דירה אשר לה חזית דרומית עשויה להיות חמה יותר בחורף מדירה עם חזית עיקרית הפונה למזרח או למערב.

**ב. מבנני חצר**

מבנני חצר הם למעשה רצף של בניינים טוריים המחוברים זה אל זה באופן התוחם חצר באופן חלקי או מלא. מלבד יחידות הפינה, אם ישנן כאלה, כל שאר יחידות הדיור דומות במאפיינים שלהן לדירות בבניין טורי. ההבדל המהותי בין מבנני חצר לבין מקבץ של בניינים טוריים הוא בהשפעת התנאים הנוצרים בחצר על תפקוד הבניין. אלו בתורם תלויים בממדי החצר, בגאומטריה שלה (היחס בין ממדי האורך, הרוחב והגובה) ובמידת הסגירות שלה.

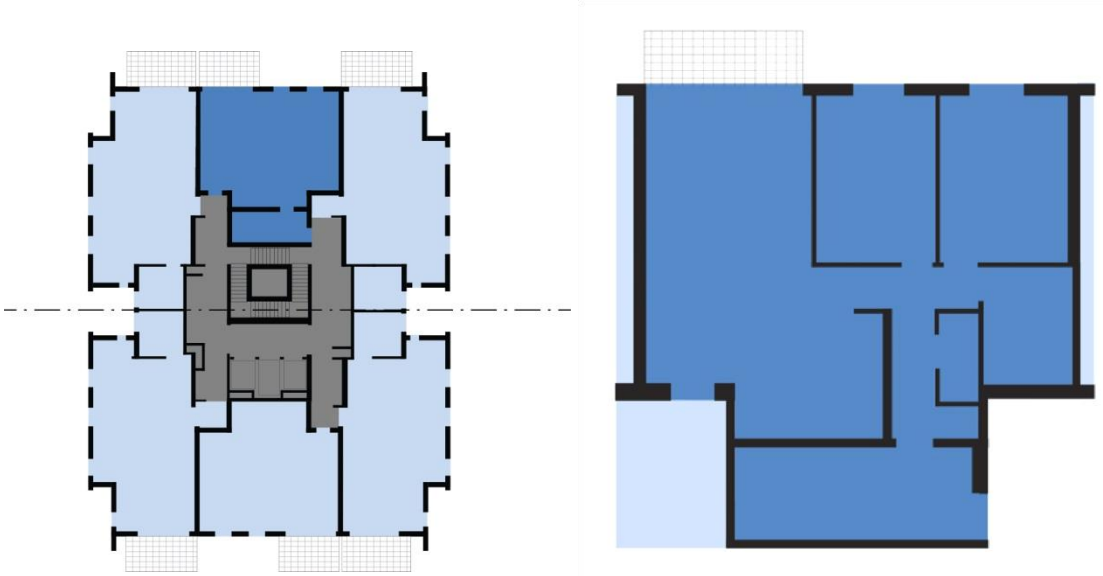
איור ה-8 מדגיש את ההבדל בקומפקטיות בין מבנני חצר למבני 'ביתן'.



**איור ה-8. השטח של הריבוע השחור (מימין) ושל המסגרת השחורה (משמאל) זהה – אבל שטח המעטפת החיצונית שלו הוא רק 1/3 ממעטפת המסגרת.**

### ג. בנייני 'ביתן' קומפקטיים

את מרבית הבניינים הנבנים בארץ ניתן לתאר במונח 'קומפקטיים', גם אם יחידות הדיור עצמן אינן תמיד כאלה. המכנה המשותף שלהן הוא קיבוץ של מספר דירות סביב גרעין תנועה אנכי אחד. מספר הדירות בכל קומה הוא בדרך כלל 4, בגרסאות שונות לבניין מטיפוס 'H' אשר בו כל דירה נהנית משני קירות חוץ ניצבים זה לזה. בשנים האחרונות מתוכננים גם בניינים אשר בהם יותר מארבע דירות בקומה. בדירות כאלה קשה יותר להבטיח אוורור טבעי או תאורה טבעית נאותים, כפי שמדגים איור ה-9.



**איור ה-9. בדירה האמצעית בכל קומה יש רק קיר חיצוני אחד.**

גם כאשר ישנן 4 דירות בקומה, אופן החשיפה של הדירות לסביבה בהכרח אינו מיטבי. ניתן להדגים זאת עבור בניין אשר חזית אחת שלו פונה בדיוק לדרום. במקרה כזה, ניתן לאפיין את הדירות כדירה דרום מערבית, דירה דרום מזרחית, דירה צפון מזרחית ודירה צפון מערבית. שתי הדירות הדרומיות ייהנו מחשיפה לשמש בחורף – בניגוד לשתי הדירות הצפוניות, אשר תהיינה קרות יותר. לעומת זאת, שתי הדירות המערביות, ובעיקר זו הצפון מערבית, ייהנו מהבריזה הימית בקיץ, בעוד שהדירות המזרחיות יזכו לאוורור פחות יעיל.

הבניינים אשר כונו כאן 'קומפקטיים' אינם בהכרח כאלה בהתייחס לדירת המגורים הבודדת. מתכננים יוצרים לעיתים מגרעות ובליטות במעטפת הבניין על מנת לעמוד בדרישות התקנות לתאורה טבעית ואוורור, כפי שהן באות לביטוי בהנחיות לתכנון חלונות.

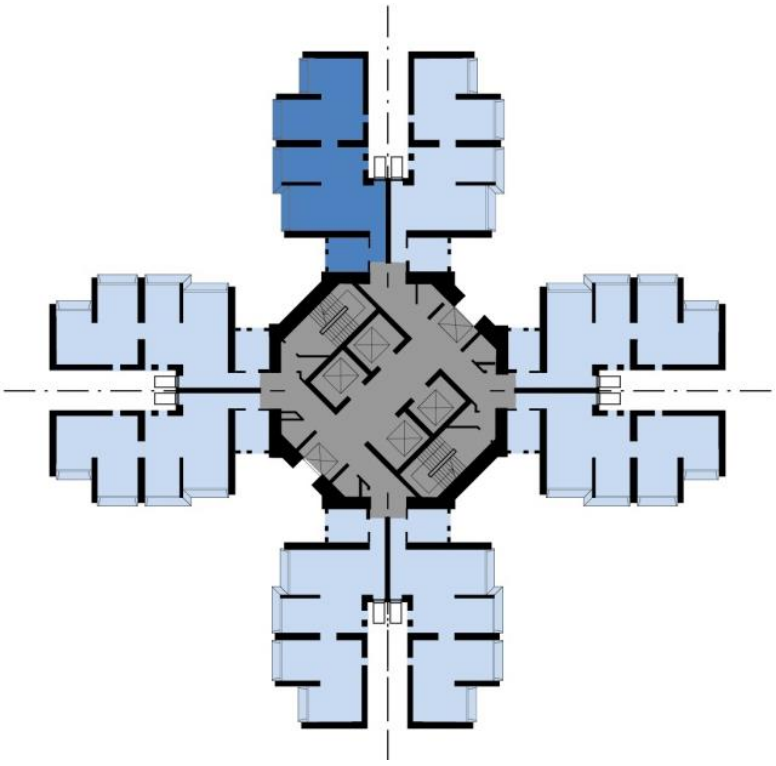
איור ה-10 מתאר תכנית של קומה אופיינית בשני מגדלי מגורים. בשניהם 4 דירות בקומה, אולם היקף הקירות החיצוניים שלהן החשוף כלפי הסביבה ביחס לשטח הדירות (גורם הקומפקטיות, לפי ת"י 5280), שונה בתכלית.

תכנון המגדיל את החשיפה של הדירות לסביבה באופן קיצוני מקובל בהונג קונג, כפי שממחיש איור ה-11 [51]. בניין זה מדגיש את המתח הקיים בין החיסכון המתקבל באקלום בניין קומפקטי לבין התועלת הפוטנציאלית בבניין שבו המגע עם הסביבה הוא מרבי. ללא בידוד תרמי מתאים, תהיינה עלויות המיזוג של בניין כזה גבוהות. מאידך, הוא מאפשר להשיג אוורור טבעי יעיל ותנאים מיטביים

[51] http://www.housingauthority.gov.hk/en/global-elements/estate-locator/standard-block-typical-floor-plans

כאשר אין מפעילים את מערכת האקלום. למותר לציין כי עלות הבנייה של בניין כזה גבוהה בהרבה מעלות בניין קומפקטי יותר, הן בשל הגידול בשטח המעטפת החיצונית, על כל העלויות הנובעות מכך, והן בשל תוספת הקונסטרוקציה והמערכות.

**איור ה-10. תכנית קומה אופיינית בשני בנייני מגורים בישראל. מימין: תכנית קומפקטית. משמאל: תכנית שבה כל הדירות קומפקטיות לכאורה, אבל בשתיים ישנה מעטפת חשופה כמעט לגמרי ("4 כיווני אוויר").**



**איור ה-11.**

**תכנית קומה אופיינית בבית דירות בהונג קונג.**

**ד. מגדלים**

מגדלי המגורים הם למעשה תת-קבוצה של הבניינים קומפקטיים. תכניות הקומה דומות לאלו של בנייני ה-H הנמוכים יותר, בהבדל אחד: גרעין הבניין גדול יותר, בשל הצורך להכיל מספר רב יותר של מעליות וכן חללי שירות נוספים כגון חדרי אשפה, פירים לצנרת, וחדרים טכניים. בבניינים אלה נמצא בין ארבע לשמונה דירות בקומה. ככל שמספר הדירות בקומה גדל, כך קשה יותר לתת חשיפה נאותה של יחידת הדיור לאוורור טבעי ולאור יום, והדירות נעשות תלויות במידה גוברת באוורור מלאכותי ובתאורה חשמלית, לפחות עבור חלק מהחללים.

למגדלי המגורים שני חסרונות נוספים המגדילים מאוד את צריכת האנרגיה בהם בהשוואה לבניינים קומפקטיים נמוכים יותר:

א. מגדלי המגורים חייבים מערכות תשתית שונות, כגון משאבות להגברת לחץ המים, אשר אין בהן צורך בבנייה נמוכה יותר.

ב. מאחר ושטח הגג של המגדלים קטן יותר ביחס לשטח הרצפה הכולל של הדירות, אין בהן די שטח להתקנות מערכות סולריות אשר עשויות לשרת את כל הדירות, בין לחימום מים ובין להפקת חשמל (פוטו-וולטאי).

## 7. סיכום

מעטפת בניין מבודדת היטב הנה חלק הכרחי של בניה מודעת אנרגיה בישראל, ויצירתה בדרך כלל דורשת חומרי בידוד ייחודיים. יש לקבוע את כמות הבידוד בהתאם לאקלים האזורי: יש צורך בבידוד מוגבר באזורים הרריים ויבשים. חשוב להרבות בבידוד הגג העליון ,ולא להזניח את הגשרים התרמיים הנוצרים במעטפת. מומלץ להתייחס לערכי הבידוד הרשומים בתקן ישראל 1045 כדרישה מינימלית, ולהגדיל את כמות הבידוד מעל סף זה בהתאם למגבלות מעשיות ,כלכליות ואחרות. בדרך כלל מומלץ למקם את הבידוד בצדו החיצוני של הקיר, כדי להגדיל את התועלת האפשרית של אמצעים פסיביים לחימום וקירור הבניין.

קיר מומלץ הוא קיר הבנוי שכבה פנימית מחומר מסיבי, כגון בטון או בלוק בטון, בדרך כלל בעל עובי מינימלי של 10 ס"מ, ושכבת בידוד חיצונית. המסה מספקת את האגירה התרמית הדרושה, והבידוד מקטין את מעבר החום דרך הקיר. הצורך במסה תרמית פנימית בולט באזורי הארץ בעלי תנאים תרמים קיצונים – כולל אזורי ההרים והמדבר. באזורים אלה ישנן תנודות טמפרטורה רחבות במחזור היומי, והמסה הפנימית עשויה למתן ולייצב את הטמפרטורות בתוך הבניין. אם הטמפרטורה היומית הממוצעת היא נוחה, מעטפת מסיבית עשויה לאפשר נוחות תרמית בכל שעות היממה ללא צורך במיזוג אוויר, למרות ההבדלים החדים בין יום ולילה.

## מקורות


[1] Givoni, B. (1965). Laboratory study of the effect of window size and location on indoor air motion. *Architectural Science Review* 8(2):42-46.

[2] Martin L. and March L. (Eds.) (1972). Urban Space and Structures. Cambridge University Press, UK.

[3] Ratti C., Raydan D. and Steemers K. (2003). Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate. *Energy and Buildings*, 35:49-59.

[4] מכון התקנים הישראלי (2013). תקן ישראלי ת"י 5280-1.1 - אנרגיה בבניינים: מעטפת הבניין – בנייני מגורים.

# פרק ו:

# קירות הבניין

# פרק ו: קירות הבניין

לקירות החיצוניים תפקיד מרכזי במעטפת הבניין, והתכנון שלהם חייב להביא בחשבון את תכונות האקלים. במרבית אזורי הארץ קיימות תנודות טמפרטורה רחבות בין יום ולילה לפחות חלק מהשנה, וטמפרטורת הסביבה החיצונית שונה מהטמפרטורה הרצויה בתוך הבניין. במצבים דינאמיים אלה יש יתרון לקירות חיצוניים בעלי שתי תכונות מנוגדות: מצד אחד, נדרש קיר בעל התנגדות תרמית גבוה, כדי להפחית מעבר חום בלתי רצוי. מצד שני, על הקיר להיות בעל יכולת אגירה תרמית גבוהה, שתאפשר מיתון של התנודות וניצול של 'אנרגיה טבעית' לחימום וקירור. פרק זה יעסוק בתכנון הקירות משני היבטים עיקריים: התכונות התרמיות של חומרי הבנייה והאופן בו נעשה שימוש בחומרים השונים בבניין.

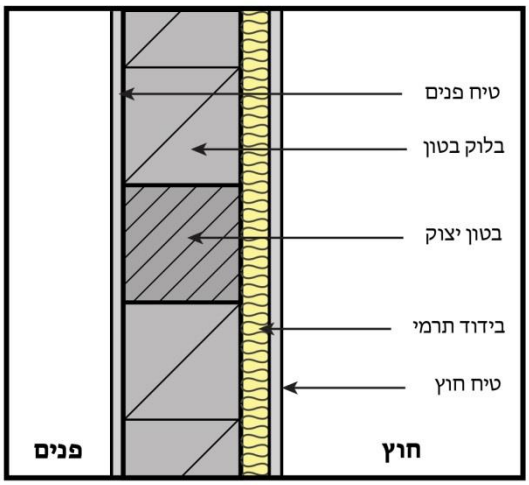


## 1. חומרי בנייה

את קירות הבניין, ובמיוחד קירות המעטפת, ניתן לבנות מחומרי בנייה רבים ומגוונים. הסקירה התמציתית המובאת כאן מתמקדת בתכונות התרמיות של החומרים, בנפרד ובחלק מקיר רב-שכבתי, ובתרומתם הכוללת לתפקוד התרמי של הבניין.

### 1.1 בלוקים

השימוש בבלוקים נפוץ בשל תכונותיהם הטובות ומחירם הנמוך יחסית. הבנייה בבלוקים מאפשרת גמישות ארכיטקטונית גבוהה בזמן הבנייה ומאפשרת שינויים עתידיים, והבלוקים חזקים ועמידים מבחינה מכנית. לאחדים מהבלוקים עשויים להיות יתרונות אקוסטיים ותרמיים.




**איור ו-1. חתך סכמתי בקיר חוץ בנוי בלוקים.**

חשוב להדגיש כי מעבר החום בקיר תלוי לא רק בתכונות התרמיות של הבלוקים עצמם, אלא במעבר החום דרך המישקים ובתרומה היחסית של הגשרים התרמיים. לכן לא ניתן להסתפק בנתונים אשר מספקים היצרנים אודות הבלוקים, ויש צורך לערוך חישוב של מעבר החום בקיר כולו לפי ת"י 5375[52].

[52] תקן ישראלי ת"י 5375 - שיטות חישוביות לקביעת התנגדות תרמית אופיינית של קירות בני

ניתן לסווג את הבלוקים לשלושה סוגים עיקריים: בלוקים חלולים, בלוקים נקבוביים (בעיקר בטון תאי) ובלוקים מלאים.

### א. בלוקים חלולים

בלוקים חלולים עשויים מחומר צפוף וכבד יחסית, כגון בטון, ובהם חללי אוויר. הם נבדלים זה מזה במספר מאפיינים: החומר ממנו הם עשויים, המידות החיצוניות שלהם (בעיקר העובי), מספרם וצורתם של חללי האוויר, והימצאותם של בליטות ושקעים המשמשים לשיגום הקיר. ערכים אופייניים לקירות בלוקים חלולים שונים ניתן למצוא גם בנספח א' לתקן ת"י 5 [53]. נתונים של אחדים מהבלוקים מובאים בטבלה 1 לשם המחשה.

#### בלוקים מאגרגט כבד

בעבר, מרבית הבלוקים החלולים בארץ היו מיוצרים מבטון העשוי חצץ, חול וצמנט. החצץ היה לרוב מאבן גיר מקומית, והוא חומר צפוף, כבד יחסית (המשקל המרחבי של אבן גיר – 2,700 ק"ג למ"ק, ושל חצץ העשוי מאבן זו – כ-1,800 ק"ג למ"ק). בלוקי בטון אלה עדיין משמשים לבנייה של קירות רבים, אבל בהדרגה הם מפנים את מקומם לבלוקים איכותיים יותר. ככל שמספר חללי האוויר בבלוק הבטון רב יותר, והחללים עצמם קטנים יותר, ההתנגדות התרמית של הבלוק עשויה להיות גבוהה יותר. בלוקים חלולים מחרס, אשר בהם חללי האוויר רבים יותר, נפוצים במרבית מדינות הים התיכון, אך אינם בשימוש רחב בארץ.

#### בלוקים מאגרגט קל

על מנת לקבל התנגדות תרמית גבוהה יותר, פותחו בלוקים חלולים בעלי מבנה דומה לבלוקי הבטון אשר בהם אגרגט קל מחליף את החצץ הכבד. האגרגט הקל עשוי מאבן נקבובית כגון טוף ובעיקר פומיס. המשקל המרחבי שלהם הינו כ-500 ק"ג למ"ק ו-900 ק"ג למ"ק בהתאמה, במצב יבש. בעוד שחצץ רגיל מיוצר במחצבות בארץ, את חצץ הפומיס יש צורך לייבא, בעיקר מיוון.

### ב. בלוקים נקבוביים

בלוקים נקבוביים (כגון מוצרים הידועים בשמם המסחרי איטונג ואשקלית) מיוצרים מתערובת של חול סיד ומים, בתוספת אבקת אלומיניום אשר גורמת להיווצרות של בועות אוויר ומביאה לתפיחתה, בדומה לתוספת שמרים באפיית בצק. בניגוד לבלוקי בטון, אשר עוברים אשפרה באוויר הפתוח בטמפרטורת הסביבה, בלוקים נקבוביים עוברים אשפרה באוטוקלב בטמפרטורה גבוהה (כ-180 מעלות צלזיוס), לחץ של כ-10 אטמוספירות ולחות. המשקל המרחבי של הבלוקים הנקבוביים עשוי להיות בין 450-700 ק"ג למ"ק. ככל שהבלוק קל יותר, יש בו יותר נקבוביות אוויר ולכן הוא בעל מוליכות תרמית נמוכה יותר – אבל גם בעל חוזק מכני חלש יותר. במקביל, לבלוקים הנקבוביים ישנה מסה תרמית מועטה ביחס לבטון או אפילו בלוקי בטון, אם כי גבוהה יותר מאשר לחומרי בידוד מוקצפים כגון פוליסטירן או פוליאוריתן.

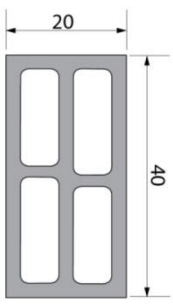
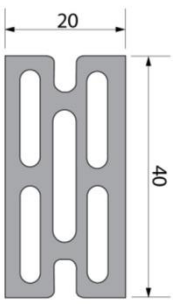
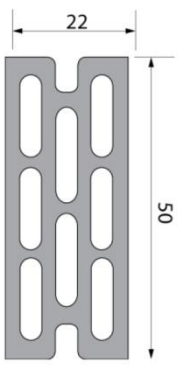
כפי שהוסבר בפרק ג', התכונות התרמיות של בלוקים נקבוביים מושפעת מתכולת הרטיבות שלהם. בתכנון הקיר, יש להקפיד שחישוב ההתנגדות התרמית הכוללת מתייחסת למוליכות התרמית של הבלוק כאשר תכולת הרטיבות היא במצב השירות [54], ולא עבור מצב יבש בתנור. ההבדל הוא משמעותי מאוד: תכולת הרטיבות של הבלוק עשויה להגיע ל-8% בצד הפנימי ועד 20% בצד החיצוני באזורים לחים או בחשיפה ממושכת למשקעים, והירידה הכוללת בהתנגדות התרמית עלולה להיות בשיעור של עשרות אחוזים.

---

[53] תקן ישראלי ת"י 5 – בלוקי בטון: בלוקי קיר.

[54] בדיקת המעבדה של המוליכות התרמית נעשית לאחר שהבלוק יובש בתנור. הערך שמתקבל מוכפל במקדם תיקון מתאים, לפי ת"י 1375 - שיטות מעבדתיות לקביעת התנגדות תרמית אופיינית של רכיבי בניין.

**טבלה ו-1. תכונות תרמיות של קירות בני אופייניים מבלוקי בטון (לפי ת"י 5)**

| עובי [מ"מ] | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| עובי | רוחב | אורך | גובה | מספר חלקים | מוליכות תרמית [W/m°K] | מוליכות תרמית [kcal/h°C] | סוג בלוק | צורת הבלוק |
| 030 | 20 | 40 | 20 | 4 | 1,188 | 19.0 | אגרגטים רגילים צמנט |  |
| 060 | | | | | 750 | 12.0 | אגרגטים קלים צמנט | |
| 040 | 20 | 40 | 20 | 5 | 1400 | 22.4 | אגרגטים רגילים צמנט |  |
| 070 | | | | | 838 | 13.4 | אגרגטים קלים צמנט | |
| 080 | 20 | 50 | 22 | 8 | 818 | 18.0 | תערובת אגרגטים קלים רגילים צמנט |  |
| 090 | | | | | 795 | 17.5 | | |

### ג. בלוקים מלאים

בלוקים מלאים או לבנים ניתן לייצר מבטון (על בסיס צמנט פורטלנד) או מתערובת של חול וסיד, ממנה מתקבלים בלוקי סיליקה. בלוקים מלאים דומים בתכונותיהם לאבן הגיר: הם מוליכים חום היטב, אבל הם גם בעלי קיבול חום גבוה יותר מאשר בלוקי בטון חלולים במידות דומות.

## 1.2 בטון

בניינים לא מעטים בארץ הם בעלי קירות בטון, הנותר חשוף בשני הצדדים או מטויח בצידו הפנימי בלבד. הבטון הוא חומר בעל קיים ארוך ודורש תחזוקה מועטה מאוד. מבחינה תרמית, הבטון תורם לבניין קיבול חום רב, אבל המוליכות התרמית הסגולית שלו גבוהה, ולכן קיר בטון מקנה מעט מאוד בידוד תרמי. בניינים שהקירות שלהם עשויים בטון, ללא בידוד תרמי נוסף, מאופיינים בטמפרטורות גבוהות מאוד בקיץ ונמוכות בחורף.

## 1.3 בידוד תרמי

חומרים נפוצים לבניית קירות בארץ, כגון בטון ומוצריו, מתאפיינים במוליכות תרמית גבוהה יחסית. מבלי לעבות את הקיר מעבר לעובי סביר, ניתן להשיג שיפור משמעותי בהתנגדות התרמית שלו רק תוך שימוש בחומרי בידוד תרמי – דהיינו, חומרים בעלי מוליכות תרמית נמוכה, שמתאפיינים כחומרים "קלים" מבחינת המסה הסגולית (הצפיפות) שלהם.

בבניית קירות בארץ נעשה שימוש נרחב במספר סוגי בידוד: חומרי בידוד מוקצפים, מזרוני סיבים ובלוקים מוקצפים. טבלה ו-2 מביאה ריכוז של התכונות האופייניות של חומרים אלה. חשוב לזכור כי התכונות הרשומות מתייחסות למצב תקני, אף יתכן שמצב השירות בפועל יהיה שונה, בעיקר עקב שינויים בתכולת הרטיבות.

**טבלה ו-2. נתונים תרמיים של חומרי בידוד נפוצים [55]**

| החומר | מסה סגולית מרחבית יבשה בתנור ($\rho$) [kg/m$^2$] | מוליכות תרמית חישובית ($\lambda$) [W/m K] | קיבול חום סגולי (c) [J/ kg K] |
|---|---|---|---|
| לוחות פוליסטירן מוקצף (קלקר) | 10-50 | 0.035-0.045 | 1,450 |
| לוחות פוליסטירן מוקצף מיוצר בשיחול | 20-65 | 0.035-0.045 | 1,450 |
| קצף פוליאוריתן מותז | 30-50 | 0.025-0.030 | 1,400 |
| צמר סלעים או צמר זכוכית | 40-160 | 0.033-0.040 | 1,030 |
| טיח תרמי | 150-250 | 0.10-0.13 | 1,000-1,100 |
| בטון תאי | 300-1,000 | 0.14-0.16 | 1,000 |

## 1.4 חיפוי חיצוני

### א. טיח

תפקידו של הטיח להסתיר פגמים בבניית הקיר ולהוות תשתית חלקה ואחידה עליה ניתן ליישם שכבת גמר כגון צבע או "שליכטה" מגוונת. בנוסף לכך, הטיח, ובמיוחד הרבצה עשירה בצמנט, עשוי להוות שכבות איטום המונעת חדירת מים דרך מישקים בבנייה.

הטיח עשוי תערובת של חול, צמנט וסיד בצפיפות גבוהה, והמוליכות התרמית שלו טובה. אך מאחר ושכבת הטיח היא דקה – כ-1-2 ס"מ, תרומתה להתנגדות התרמית של הקיר זניחה. ניתן להגדיל את

[55] ISO 10456:2007

כושר הבידוד של שכבת הטיח על ידי הוספת פתיתים של חומר בידוד כגון פוליסטירן (קלקר) בתערובת. השכבה המתקבלת מקנה התנגדות תרמית של בערך 1.0-1.3 מ״ר קלווין לואט עבור כל ס״מ עובי, השווה בערך לשליש מהבידוד המתקבל משכבת בידוד בעובי דומה העשויה כולה פוליסטירן.

לטיח תרמי יש שני יתרונות: הוא ניתן ליישום בצידו החיצוני של הבניין, והוא מהווה שכבה רציפה ואחידה. עם זאת, מאחר ולא ניתן ליישם שכבה שעובייה הכולל עולה על כ-4 ס״מ, לכל היותר, ניתן להשתמש בחומר זה רק במקומות שבהם חתך הקיר האופייני מספק את מרבית ההתנגדות התרמית הנדרשת, ואין גשרים תרמיים משמעותיים בקירות.

**ב. אבן**

בניגוד לבנייה המסורתית, שבה נעשה שימוש באבן כחומר בניין עיקרי לקירות נושאים, האבן משמשת כיום בעיקר לחיפוי של קירות הבנויים מחומר אחר. תפקידה של האבן בהקשר הזה אינו שונה מתפקידו של הטיח או כל חומר גמר אחר. התרומה של האבן לתפקוד התרמי של הבניין היא זניחה: האבן, כמו הבטון, היא בעלת מוליכות תרמית סגולית גבוהה, ומאחר שבתפקידה כחיפוי בלבד עובייה קטן – כ-3-4 ס״מ בלבד – ההתנגדות התרמית שלה נמוכה. במרבית בנייני המגורים, אבני החיפוי מקובעות על הבניין באמצעות גב בטון מחוזק בקשירה של חוטי נירוסטה, ולכן אין מרווח אוויר בין החיפוי לבין הקיר, כפי שנעשה בהתקנה יבשה, בעיקר בבנייני משרדים. בארץ נעשה שימוש בעיקר באבן בעלת גוון בהיר, ופני האבן בדרך כלל חלקים (עיבוד בניסור ולא בסיתות). לכן האלבדו שלה גבוה יחסית – אבן גיר בהירה וחלקה מחזירה כ-60 אחוזים מקרינת השמש הפוגעת בה.

**ג. אריחים**

בדומה לחיפוי אבן, התפקיד התרמי של אריחי החיפוי זניח: עוביים דק והמוליכות התרמית שלהם גבוהה. יתרונם של האריחים בהשוואה לחיפוי באבן הוא משקלם העצמי הנמוך יותר, אשר עשוי להקל על קיבוע האריחים לשכבה הקונסטרוקטיבית של הקיר. קיבוע כזה יכול להתבצע באמצעות ווי נירוסטה, בדומה לחיפוי באבן; בהדבקה לתשתית, לרבות שכבת בידוד – בתנאי שהאריחים קטנים מאוד (מוזאיקה), או בשילוב של שתי השיטות. רצוי כי הגוון של האריחים יהיה בהיר, בכדי למזער את בליעת קרינת השמש, אשר מלבד העומס המוגדל על מערכת המיזוג של הבניין עלולה להביא להתפשטות תרמית מוגדלת וכתוצאה מכך לניתוק מהתשתית אליה מקובע החיפוי.

## 1.5 חומרי גמר פנימיים

חומרי הגמר הפנימיים של הקירות משפיעים על מעבר הלחות בקיר. התקן לבידוד תרמי של בניינים, ת״י 1045, במהדורות אשר היו בתוקף עד לשנת 2009, קבע בהתאם לכך דרישות גבוהות יותר עבור קיר שהגימור שלו אינו סופג. האבחנה הזאת בוטלה רק משום שהדרישות להתנגדות תרמית מזערית הוגדלו, כך שבתנאים המקובלים בדירה טמפרטורת הקיר לא תגיע לנקודת הטל [56]. עם זאת, בחדרי רחצה עלולה הלחות באוויר לעלות במידה כה רבה לאחר הרחצה שבכל זאת יווצר עיבוי על פני הקירות, ולכן חשוב לאוורר חדרים אלה היטב לאחר הרחצה.

שכבת סיד, שהיתה מקובלת בעבר כחומר גמר לקירות פנימיים, היתה בעלת התנגדות מזערית למעבר אדי מים. גם מרבית הצבעים המקובלים היום, אף שהם ניתנים לרחיצה, אינם מונעים מעבר אדי מים לתוך שכבת הטיח, ולכן קירות צבועים נחשבים בדרך כלל לשטחים 'סופגים'.

[56] בקיר סופג, אם טמפרטורת פני השטח תגיע לנקודת הטל למשך זמן קצר וייוצר עיבוי, הלחות תיספג כך שלא יהיו מים נראים לעין. עודף הלחות יתאדה כאשר התנאים ישתנו: עלייה בטמפרטורה או ירידה בלחות.

מרבית אריחי החיפוי, לרבות חרסינה, קרמיקה או גרניט פורצלן הם אטומים למים, ולכן נחשבים כחומרים 'לא סופגים', אולם חלק מחיפויי האבן אינם אטומים לחלוטין. גם ציפויים כגון טפט וצבעי שמן נחשבים כלא-סופגים.

## 2. קירות רב-שכבתיים

כפי שהוסבר בפרקים קודמים, אין בנמצא חומרים המשלבים קיבול תרמי גבוה ומוליכות תרמית נמוכה. לכן יש יתרון לקירות הבנויים ממספר שכבות של חומרים שונים. בנייתם של קירות כאלה היא בדרך כלל מורכבת יותר מבניית קיר מחומר אחד. קיימות מספר שיטות המיועדות להבטיח כי הקיר לא רק יתפקד היטב מבחינה תרמית אלא גם מבחינה קונסטרוקטיבית. לכל אחת מהשיטות יתרונות וחסרונות.

### 2.1 קירות בבנייה קונבנציונלית

קירות בבנייה קונבנציונלית נבנים כיום בעיקר בבנייה צמודת קרקע, אולם ניתן עדיין למצוא גם בתי דירות הנבנים בשיטות כאלה.

איור ו-2 מתאר מספר דוגמאות של קירות בבנייה קונבנציונלית, ותיאור היתרונות וחסרונות שלהם.

#### טיח על שכבת בידוד

**יתרונות:**

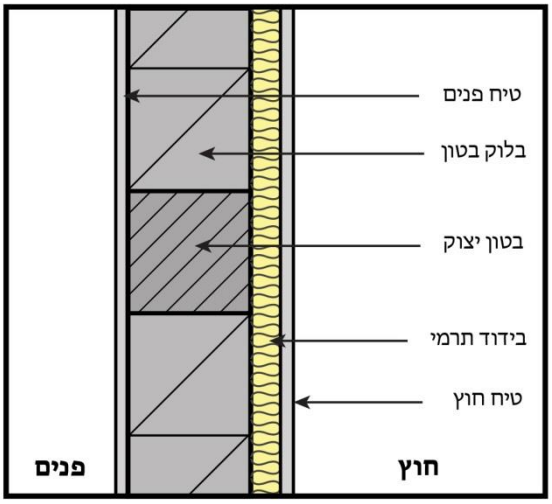
איכות תרמית גבוהה; מיקום הבידוד חיצוני; פני השטח החיצוני אחידים;

**חסרונות:**

חוזק מכני נמוך של שכבת הטיח החיצוני;

**כשלים אופייניים בביצוע:**

קיבוע לא טוב של שכבת הבידוד אל הקיר הקונסטרוקטיבי; הדבקות לא טובה של הטיח אל שכבת הבידוד; הופעת סדקים ופגמים במפגשים בין לוחות הבידוד




#### קיר בלוקים כפול עם בידוד אמצעי

**יתרונות:**

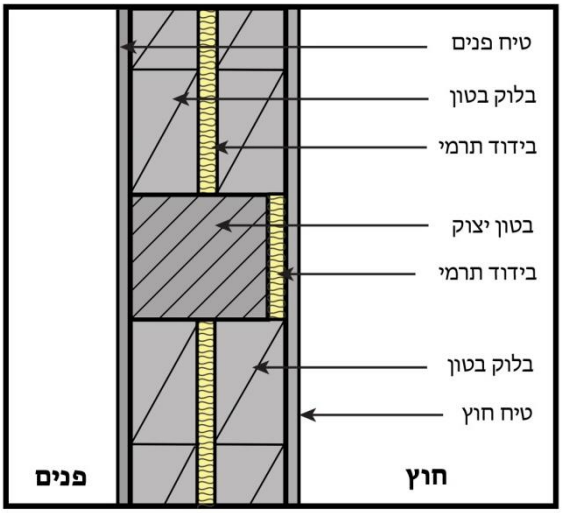
איכות תרמית גבוהה; שכבת הבידוד מוגנת (ברובה)

**חסרונות:**

נדרשת עבודה כפולה בבנייה; חוסר אחידות תרמית של השכבה החיצונית מביא לסידוק בנקודות המפגש עם תשתית שונה, והופעת כתמי עובש על הטיח החיצוני באזורי הגשרים התרמיים

**כשלים אופייניים בביצוע:**

טיפול לא מתאים בגשרים התרמיים



## קיר בלוקים כפול עם מרווח אוויר (עם או בלי רדיד אלומיניום)

**יתרונות:**

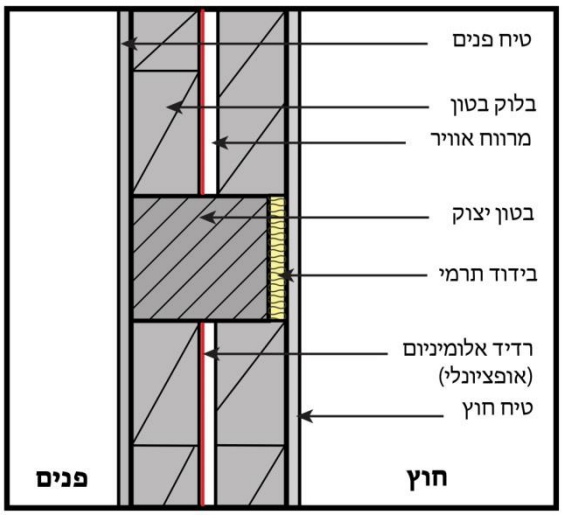
שכבת הבידוד מוגנת (ברובה)

**חסרונות:**

איכות תרמית בינונית; נדרשת עבודה כפולה בבנייה; חוסר אחידות תרמית של השכבה החיצונית מביא לסידוק בנקודות המפגש עם תשתית שונה, והופעת כתמי עובש על הטיח החיצוני באזורי הגשרים התרמיים; שילוב שתי שיטות בידוד;

**כשלים אופייניים בביצוע:**

לכלוך רדיד האלומיניום בזמן הבנייה; מרווח אוויר לא אחיד




## קיר בלוקים עם בידוד חיצוני וחיפוי אבן

**יתרונות:**

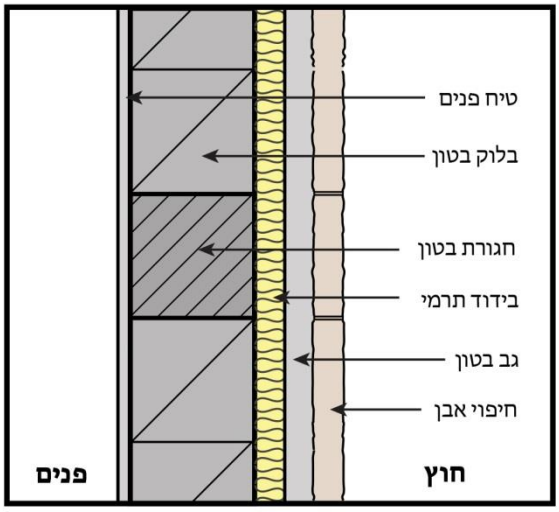
איכות תרמית גבוהה; שכבת הבידוד מוגנת היטב; קיים ארוך

**חסרונות:**

מחיר גבוה; נדרשת קשירה ידנית של כל אבן חיפוי אל רשת זיון בקיר הבנוי באמצעות פועל על פיגום

**כשלים אופייניים בביצוע:**

חוסר אחידות בשכבת הבידוד המותזת; חוסר אחידות בסידור אבני החיפוי; קשירה לא מיטבית של אבני החיפוי




## קיר בטון עם בידוד חיצוני וחיפוי אבן

**יתרונות:**

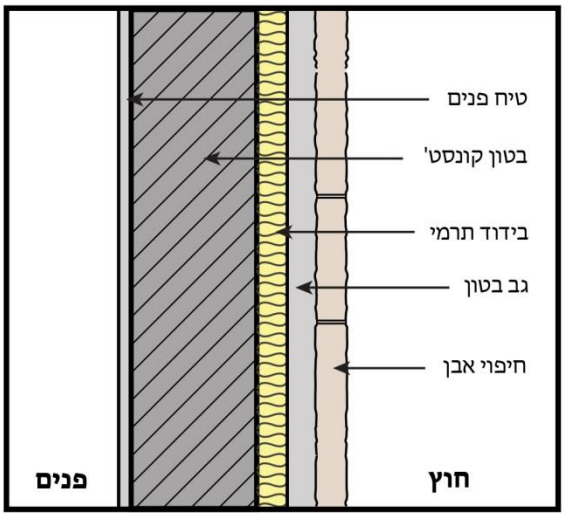
איכות תרמית גבוהה; שכבת הבידוד מוגנת היטב; קיים ארוך

**חסרונות:**

מחיר גבוה

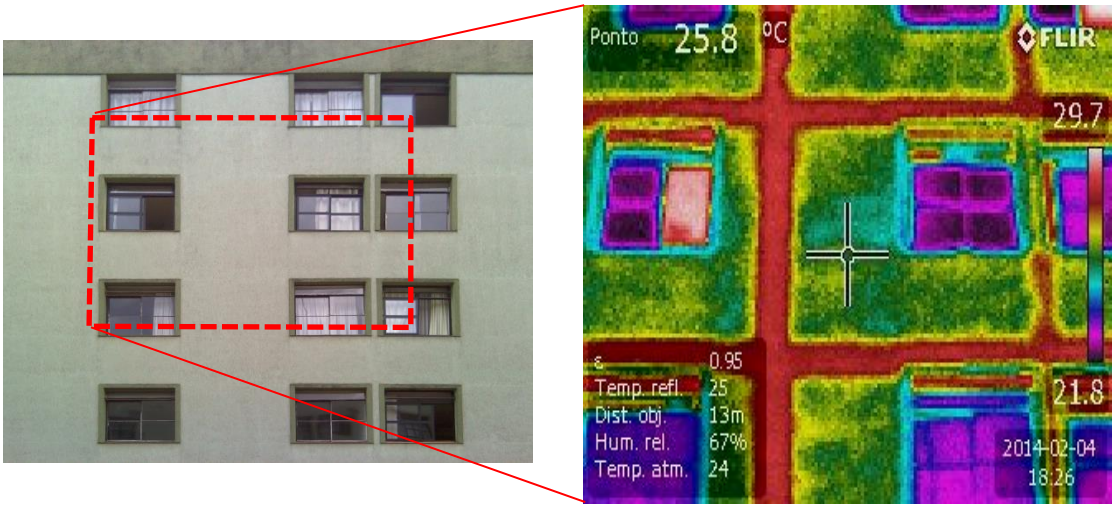
**כשלים אופייניים בביצוע:**

חוסר אחידות בשכבת הבידוד המותזת; חוסר אחידות בסידור אבני החיפוי




**איור ו-2. חתך סכמתי בקיר חוץ בנוי בלוקים.**

צמד הצילומים ו-1, אשר נעשה לקראת סוף יום קיץ בברזיל, מדגים את המשמעות של היעדר שכבת בידוד תרמי חיצוני רציפה. בצילומים נראים בבירור קיר המילואה הקריר יותר, שלד הבטון החם (עמודים ותקרות ביניים) וכן החלונות. ההבדלים בטמפרטורת הקיר, בגימור טיח חלק, נובעים הן מהבדלים בקיבול החום של חלקי הקיר והן מהבדלים בהתנגדות התרמית שלהם. ההבדלים בטמפרטורה עלולים להביא לסדיקה או לפגמים בצבע הנוצרים כאשר עיבוי נוצר על חלק מהקיר אך חלקים אחרים נותרים יבשים, משום שהם חמים יותר.




**צילום ו-1. החיפוי החיצוני נראה אחיד (שמאל), אבל בצילום התרמי (ימין) נראים הפרשי טמפרטורה ניכרים.**

**צילום ו-2.**

**עובש ופטריות אשר נוצרו עקב תכונות תרמיות לא אחידות של התשתית, בצירוף כושר התייבשות איטי של הטיח, פוגמים במראה הקיר. התופעה נפוצה יותר על קירות הבנויים בלוקי בטון תאי מאשר בקירות הבנויים מבלוק בטון חלול, אשר יש לו יותר מסה תרמית והוא מתקרר בקצב איטי יותר.** [57]

## 2.2 קירות בבנייה מתועשת

בבנייה המתועשת, בניית הקירות נעשית באחת משתי שיטות עיקריות:

א. יציקה של קיר שלם במפעל, בדרך כלל בשכיבה, והובלתו לאתר הבנייה לשם הרכבה; או,

ב. יציקה של הקיר באתר הבנייה, במקומו בבניין, לאחר שבתבנית הונחו אבני החיפוי החיצוני.

[57] בלוקל רביד: http://blockal.co.il/3000/page/FAQ#a18

השיטה הראשונה היתה נפוצה יותר לפני שנים רבות, כאשר נעשה שימוש בבנייה הטרומית לראשונה בארץ, ואילו השיטה השנייה היא השיטה הנפוצה ביותר כיום. בשתי השיטות, היתרון העיקרי בהשוואה לבניית קיר בשיטה הקונבנציונלית הוא החיסכון בזמן וייעול מלאכת החיפוי החיצוני (בדרך כלל באבן).

מבחינה תרמית, יש הבדל חשוב בין שתי השיטות: בעת היציקה של הקירות בשכיבה, ניתן היה לשלב שכבה של בידוד תרמי בתוך הבטון, בצורת רצועות של קלקר. הקיר שהתקבל היה בחתך סנדוויץ', עם גשרים תרמיים מודגשים בהיקף הקיר ובמרווחים בין לוחות הבידוד. כאשר היציקה נעשית באתר, הבידוד התרמי מותקן בצד הפנימי של הקיר.

**א. יישום בידוד תרמי פנימי**

א. בידוד תרמי מחופה בלוחות גבס על מסגרת פרופילי מתכת. חומר הבידוד הוא בדרך כלל מזרוני צמר מינרלי, אך יכול להיות גם לוחות פוליסטירן.

ב. הנחת בלוקי הבטון התאי כחלק מיציקת קיר החוץ, בסמוך לטפסה הפנימית. לאחר היציקה מתקבל קיר מקשי שחלקו הפנימי מחופה בבלוקי בטון תאי בהדבקה מלאה לבטון הקונסטרוקטיבי.

ג. בניית בלוקי בטון תאי בצמוד לקיר הבטון החיצוני, כחלק מעבודות הגמר. בניית הקיר בשיטה זו מבטיחה כיסוי ובידוד מלא של הקיר, כמו גם אפשרות לזהות כשלים נקודתיים בקיר הבטון החיצוני ולטפל בהם.

בידוד באמצעות בלוקי בטון תאי מחייב שימוש בבלוקים בעלי עובי גדול יחסית. באזורי אקלים ג' וד' , שבהם כמות הבידוד הנדרשת גדולה, השימוש בחומרי בידוד קלים מחופים בלוחות גבס מאפשר בניית קיר בעל התנגדות תרמית טובה בעובי מינימלי.

איור ו-3 מראה פרט עקרוני של בידוד פנימי בקיר המבוצע בשתי השיטות. רוחב רצועת הבידוד הנדרשת הוא כ-105 ס"מ (הנמדדים מהמישור הפנימי של הקיר), בתנאי שהשטח הכולל של הגשרים התרמיים במעטפת (לרבות מפגשי קיר-רצפה) הוא פחות מ-20% משטח הקיר. על מנת להבטיח כי ההתנגדות התרמית של המעטפת באזור הגשר התרמי תהיה לפחות 0.6 מ"ר קלווין לואט כנדרש בת"י 1045, ההתנגדות התרמית של הבידוד תהיה לפחות 0.50 מ"ר קלווין לואט, ודי לשם כך בלוח פוליסטירן בעובי של 1.5 ס"מ. החישוב מביא בחשבון שהתקרה עשויה בטון מקשי ועובי הקיר החיצוני, לרבות חיפוי אבן, הוא 23 ס"מ.

**ב. חסרונות הבידוד התרמי הפנימי בקירות מתועשים**

ליישום הבידוד התרמי בצד הפנימי של הקיר ישנם שני חסרונות משמעותיים מהבחינה התרמית, בנוסף להקטנת המסה התרמית הפנימית הכוללת של הדירה.

### חוסר רציפות במעטפת הבידוד

כאש הבידוד התרמי של הקירות מותקן בצידם הפנימי, קשה יותר למנוע גשרים תרמיים, משום שהרצפה והתקרה נמצאים במגע תרמי טוב עם קירות החוץ. הפתרון המקובל הוא להניח בידוד תרמי מתחת לריצוף ברצועה בהיקף הבניין סמוך לקירות החוץ, ומתחת לתקרה באופן דומה. הנחת הבידוד מתחת לרצפה לא יוצרת קושי מיוחד בביצוע ובדרך כלל אינה פוגעת בקיים של הבניין, מאחר והיא נמצאת מתחת לריצוף. התקנת הבידוד בחלקה הראשון של התקרה הוא בעייתי יותר. ראשית, משום שאם מבקשים שהתקרה תהיה מישורית, הבידוד בא על חשבון העובי הקונסטרוקטיבי של התקרה באזור בו מאמצי הגזירה הם גדולים. ושנית, משום שההבדל בחומרים עלול ליצור סידוק בטיח בתפר בין הבטון לבין רצועת הבידוד.

### חשיפת המסה התרמית לתנודות טמפרטורה גדולות יותר

חיסרון שני של הבידוד התרמי הפנימי הוא חשיפת המסה התרמית למאמצים תרמיים גדולים יותר. להבדלים המחזוריים בטמפרטורה של רכיבי הבטון ישנה השפעה מצטברת אשר עלולה להביא לסדיקה מואצת. התופעה קיימת גם באזורים שבהם טמפרטורת הקיר אינה יורדת מתחת לנקודת הקיפאון, כפי שקורה באזורים בעלי אקלים קר יותר.

#### קיר בטון מתועש עם חיפוי אבן חיצוני וקיר גבס פנימי

**יתרונות:**

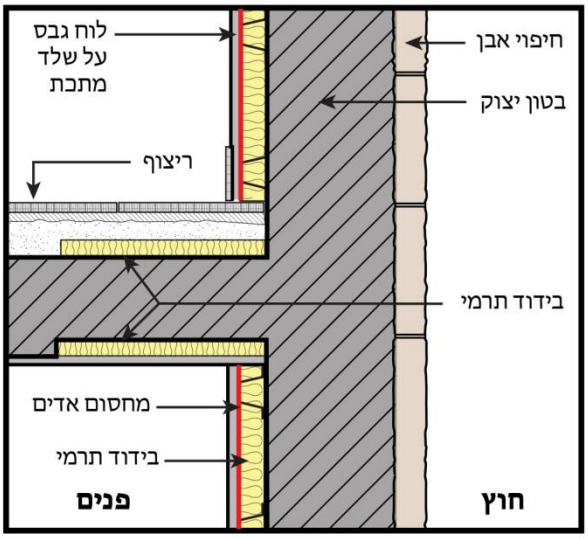
ניתן לקבל התנגדות תרמית גבוהה בעובי קטן; בנייה יבשה; התקנה נוחה של שרוולים וצנרת;

**חסרונות:**

המסה תרמית של הקיר מבודדת מהפנים; חשש לסידוק בטיח בתחתית התקרה במפגש החומרים; הקטנת העובי של התקרה סמוך למפגש עם הקיר הנושא;

**כשלים אופייניים בביצוע:**

יישום לא קפדני של הטיח בתקרה




#### קיר בטון מתועש עם חיפוי אבן חיצוני ובלוקי בטון תאי בצד הפנימי

**יתרונות:**

התקנה נוחה (יחסית) של שרוולים וצנרת;

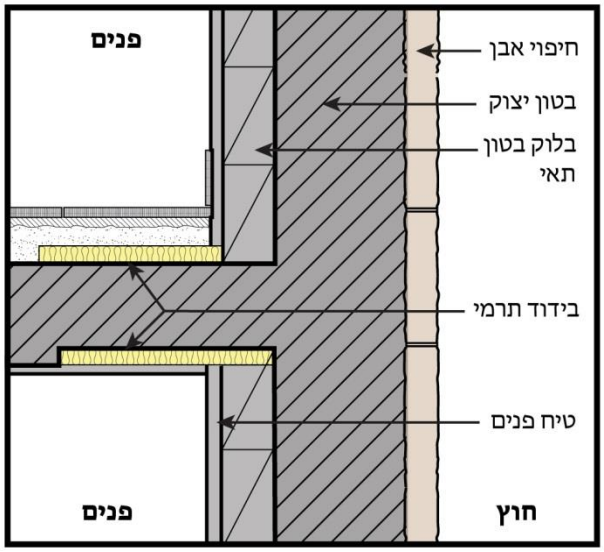
**חסרונות:**

הגדלה ניכרת של עובי הקיר על מנת לקבל התנגדות תרמית מספקת; בנייה רטובה; התקנה נוחה של שרוולים וצנרת;

המסה תרמית של הקיר מבודדת מהפנים; חשש לסידוק בטיח בתחתית התקרה במפגש החומרים; הקטנת העובי של התקרה סמוך למפגש עם הקיר הנושא;

**כשלים אופייניים בביצוע:**

חוסר רציפות ואי דיוק כאשר הבלוקים מותקנים בתבנית בעת היציקה; יישום לא קפדני של הטיח בתקרה




**איור ו-3. חתך סכמתי בקיר חוץ מתועש בנוי בטון עם בידוד תרמי פנימי.**

### ג. קירות מתועשים עם בידוד תרמי חיצוני

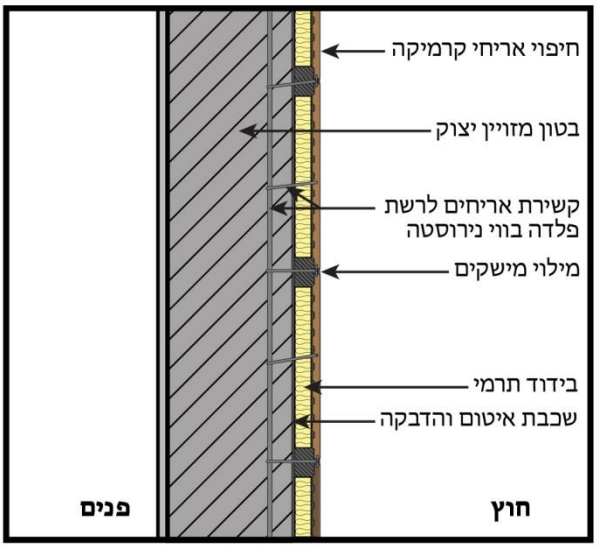
במענה לחסרונות אשר נמנו כאן, פותחו מספר פתרונות להתקנת הבידוד התרמי בצד החיצוני של קיר הבטון המתועש. הקושי עליו יש להתגבר הוא קיבוע שכבת החיפוי אל הבטון כאשר ביניהם

נמצאת שכבת בידוד תרמי בעובי של 2-4 ס״מ. החיפוי אמנם קשור אל השלד באמצעות חוטי פלב״מ, אולם בשל המרחק בין החיפוי לבטון קשירה כזו איננה מספיקה.

הפתרונות נחלקים לשניים:

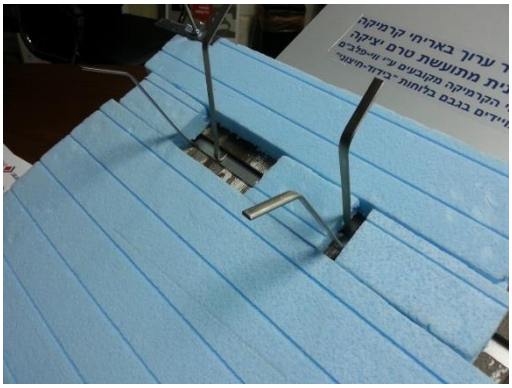
א. שימוש בחומרי חיפוי דקים וקלים יותר, כגון אריחי קרמיקה, אשר מעמיסים פחות על חוטי הקשירה. אריחים כאלה ניתן גם להדביק אל שכבת הבידוד התרמי. עיגון של האריחים אפשר לבצע גם באמצעות מוטות פלב״מ מחופים בבטון בזמן היציקה, אשר מחזק מאוד את העיגון (איור ו-4).

ב. תמיכה של אבני החיפוי בזויתן פלדה אשר מקובעת לשלד מידי מספר שורות, כך שחוטי הקשירה מיועדים בעיקר למנוע היפרדות של אבני החיפוי עקב כוחות אופקיים, ואילו זווית הפלדה נותנת מענה לכוח הגרביטציה.




**איור ו-4.**

**פרט להתקנת חיפוי אריחי קרמיקה על קיר בטון מתועש עם בידוד תרמי חיצוני.**



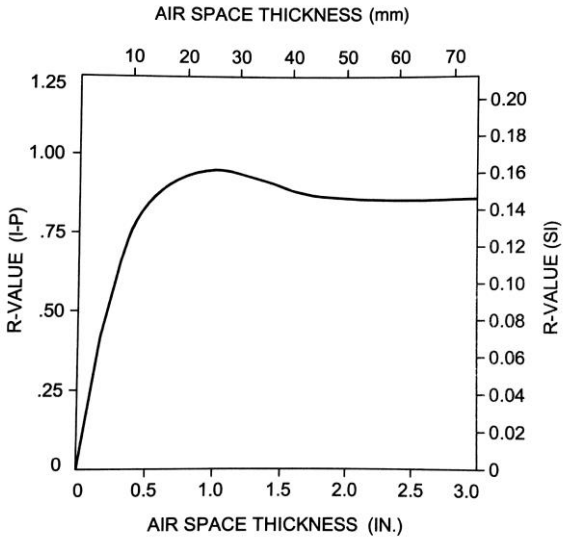
**צילום ו-3. אריח קרמיקה לחיפוי על קיר בטון מתועש עם בידוד תרמי חיצוני. קיבוע האריח אל הבטון נעשה בעזרת ווי פלב"מ המושחלים בחריץ בעל חתך T בצידו האחורי. האריח בעל חללי אוויר להקטנת המשקל העצמי.**

## 2.3 קיר כפול

קיר כפול ניתן לבנות גם בבנייה הקונבנציונלית וגם בבנייה המתועשת. בקיר כפול הבידוד התרמי מתקבל עקב נוכחות של שכבת אוויר בין הקיר החיצוני והקיר הפנימי. פתרון זה היה נפוץ מאוד בבנייה בלבנים במרבית מדינות אירופה, ועדיין מיושם בעיקר בבנייה צמודת קרקע. לקיר הכפול שני

יתרונות: יצירת תווך שבתוכו ניתן לנקז מים אשר חודרים את השכבה החיצונית בהשפעת רוח או גשם חזק (driving rain); והפרדה תרמית בין פני הקיר החיצוניים החשופים לסביבה לבין הקיר הפנימי. ההתנגדות התרמית אשר מקנה חלל האוויר אינה גבוהה, ונובעת מהימצאותן של שתי שכבות גבול סמוך לשני המישורים הפונים אל החלל. כפי שמראה תרשים ו-1, אין יתרון בהגדלת עובי מרווח האוויר, משום שכאשר המרווח גדל מתאפשרת תנועת אוויר הגורמת למעבר אנרגיה בהסעה. עובי המרווח האופטימלי הוא כ-20-25 מ״מ בלבד, וההתנגדות התרמית של המרווח היא 0.15-0.16 מ״ר קלווין לואט בלבד [58].

ניתן להגדיל את ההתנגדות התרמית של חלל האוויר הכלוא בקיר כפול על ידי תוספת של רדיד אלומיניום, אשר מקטין מאוד את מעבר החום בקרינה בין שני הקירות. ההתנגדות התרמית של חלל המחופה בצידו האחד ברדיד אלומיניום (הפונה כלפי החלל, ללא תלות בשאלה אם החיפוי הוא על הקיר החיצוני או הפנימי) היא כ-0.35 מ״ר קלווין לוואט, כלומר כפליים מאשר חלל ללא הרדיד. תוספת של חיפוי גם על הצד השני של החלל מגדילה עוד את ההתנגדות, אולם התוספת קטנה מאוד. חלל בעובי 20-25 מ״מ עם רדיד בשני הצדדים יהיה בעל התנגדות של 0.38-0.40 מ״ר קלווין לואט.




**תרשים ו-1.**

**הקשר בין עובי מרווח אוויר (כלוא) להתנגדות התרמית שלו.**

## 2.4 קירות בבנייה קלה

קירות בבנייה קלה ניתן למצוא בשני טיפוסי בניינים: בניינים בעלי שלד כבד, או לפחות רצפת בטון (בבתים צמודי קרקע), ובניינים אשר בהם גם השלד קל. בבניינים מהסוג השני המסה התרמית בדירה קטנה מאוד. בכדי להבטיח תפקוד תרמי נאות, דורשת התקינה הישראלית כי ההתנגדות התרמית של קירות חוץ קלים תהיה גבוהה במידה ניכרת מההתנגדות של קירות מסיביים.

בפועל, אין כל קושי לבנות קירות קלים העומדים בדרישות התקן, משום שהרווחב הנדרש מהשלד הנושא – פרופילים ממתכת או קונסטרוקציה מעץ - הוא גדול מספיק בכדי להכיל חומר בידוד בכמות מספקת, ולא נדרשת הגדלה של עובי הקיר.

## 2.5 קירות מסך כפולים (double facade)

בשנים האחרונות נבנים בניינים לא מעטים עם קירות מסך כפולים – double facade. מרבית הבניינים הנבנים בשיטה הזו מיועדים למשרדים, אך לאור השימוש הגדל בזכוכית גם בבניינים מגורים, ניתן להניח שבסופו של דבר ייבנו גם בנייני מגורים עם קירות מסך כפולים.

---

[58] Lechner, 2009

**צילום ו-4.**

**קיר מסך כפול עם תריס ונציאני במרווח בין שני הקירות**

כפי שמדגים צילום ו-4, קיר מסך כפול הוא קיר שבו בין שני הקירות יש מרווח ברוחב של כמה עשרות סנטימטרים אשר בו מתאפשרת תנועה חופשית של אוויר. הקיר הפנימי אטום בדרך כלל, כמו בקיר מסך רגיל, אם כי ניתן לקבוע בו חלונות נפתחים. הקיר החיצון משמש לבקרה תרמית ואקוסטית. בין שני הקירות ניתן להתקין אמצעי הצללה, לרבות אמצעים מתכוננים אשר לא ניתן לעשות בהם שימוש בבניינים החשופים לעומסי רוח משמעותיים. קיר מסך כפול מהווה פתרון יקר מאוד, ודורש תכנון קפדני של מערכות הזיגוג בכדי לממש את היתרונות שבו.

קיר המסך החיצוני עשוי להיות רציף, כך שאוויר החודר בו בצד התחתון יכול לצאת רק בצידו העליון. אולם מומלץ כי הקיר לא יהיה רציף, ויכלול רכיבים נפתחים במרווחים מדויקים לכל גובה החזית. תנועת האוויר במקרה כזה תתאפשר לאורך מקטעים בחזית.

**א. תפקוד בתנאי קיץ**

בקיץ, המרווח בין שתי שכבות הקיר יהיה פתוח ותתקיים בו תנועה חופשית של אוויר. מטרת הקיר החיצוני היא להגן על מערכת ההצללה מבחינה מכנית. ככל שהקיר הפנימי יהיה מוצל ובמגע עם אוויר הנמצא בתנועה, כך תהיה הטמפרטורה שלו נמוכה יותר. בתנאים מיטביים, תהיה הטמפרטורה של הזכוכית הפנימית קרובה לטמפרטורת האוויר בדירה.

**ב. תפקוד בתנאי חורף**

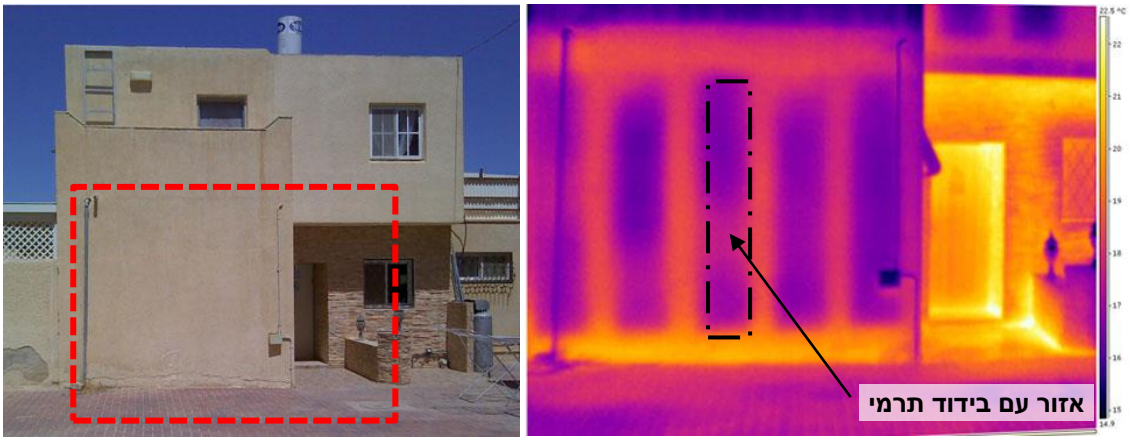
בחורף, ניתן לסגור את המרווח שבין שני הקירות על מנת ליצור חממה הצמודה לדופן הבניין. רווחי הקרינה מנוצלים להקטנת דרישת החימום בבניין, ומערכת ההצללה מופעלת בכדי לאפשר חשיפה מבוקרת של החזית הפנימית לשמש בהתאם לדרישות התרמיות ולנוחות הויזואלית של הדיירים.

## 3. גשרים תרמיים בקירות

בקירות מילואה או בקירות טרומיים מהסוג שהיה נפוץ בארץ בשנות ה-70 של המאה הקודמת, החלק היחסי של האלמנטים הקונסטרוקטיביים – עמודים, קורות וחגורות – עלול להגיע ל-30 אחוז או יותר מהשטח הכולל של הקיר. לכן יש חשיבות בטיפול תרמי מתאים באלמנטים האלה.

שני הצילומים הנראים למטה מדגימים גשרים תרמיים בקיר טרומי אשר לא תוכנן בצורה נאותה. המסגרת בקו מרוסק אדום בצילום שמשמאל תואמת בקירוב את גבולות הצילום התרמי הממוקם מימין, אשר נעשה בליל קיץ, לפנות בוקר. המלבנים הסגולים בצילום התרמי (אחד מהם מודגש במסגרת קו-נקודה בצבע שחור) מציינים אזורים קרים יחסית בצילום, בטמפרטורה של כ-16-17 מעלות. הטמפרטורה של שאר הקיר היא כ-19 מעלות. האזורים הקרים יותר נוצרו עקב נוכחות פסים של בידוד תרמי בתוך הקיר (קיר 'סנדויץ'): השכבה החיצונית של הקיר נוטה להתקרר כלפי

חוץ, אך זרימת החום המוגברת במסגרת הבטון שומרת על טמפרטורה קרובה יותר לטמפרטורה הפנימית בדירה, למעט באזורים שבהם קיים בידוד.




**צילום ו-5. צילומים תרמיים של קירות חיצוניים בבניין במצפה רמון (מימין, למעלה), ושל בית דירות בקוריטיבה, ברזיל, (מימין למטה). משמאל – צילומים אופטיים של הבניינים.**

מרבית הפתרונות לבידוד תרמי בקירות מתאימים לחתך האופייני של הקיר, אולם אין בהם מענה לאלמנטים מיוחדים במעטפת, כגון ארגזי תריס או כיסים לחלונות גרירה.

### 3.1 ארגזי תריס

ארגזי תריס מהווים נקודות תורפה תרמית במעטפת משתי בחינות: הם אינם אטומים לאוויר, והם אינם מבודדים כנגד מעבר חום בהולכה. ארגזי התריס מחופים בדרך כלל בצידם החיצוני בחיפוי אשר משתלב עם החיפוי של יתר הקיר. החיפוי מקובע אל גב בטון דק אשר אינו מקנה בידוד תרמי משמעותי, ולכן חלל התריס נמצא בטמפרטורה קרובה לטמפרטורה של הסביבה החיצונית. ניתן להתקין את ארגז התריס בצד הפנימי של שכבת הבידוד התרמי החיצוני, אולם התקנה זו, אף שהיא מקטינה את תנודות הטמפרטורה בחלל התריס, היא נדירה.

בשני הפתרונות, מומלץ לאמץ שני אמצעים להקטנת מעבר החום:

א. הפחתת חדירת האוויר לארז התריס באמצעות מברשת איטום אשר מותקנת בצורה אופקית לכל רוחב הארגז וצמודה אל פרופיל התריס, כמתואר בצילום ו-4. פרט זה אינו נפוץ, אולם הוא מסייע בהפחתת האינפילטרציה אם המכסה אינו אטום או דרך החריץ עבור הרצועה (כאשר אין מנוע חשמלי), והוא מפחית את קצב בריחת החום מחלל הארגז כלפי חוץ.

**צילום ו-6.**

**מברשת אטימה מקטינה את איבוד החום בארגז תריס גלילה.**

ב. יישום בידוד תרמי על פני המכסה של ארגז התריס, בצד הפונה אל חלל התריס. השיטה המקובלת היא הדבקה של לוח בידוד עשוי פוליסטירן. ת"י 1045 מחייב התנגדות תרמית מזערית של 0.5 מ"ר קלווין לואט, וניתן לעמוד בדרישה באמצעות לוח פוליסטירן בעובי של 1.5 ס"מ (בפועל נעשה שימוש בלוחות בעובי 1 או 2 ס"מ). מומלץ להשתמש בפוליסטירן בשיחול, שהוא עמיד יותר לאורך זמן.

ישנם גם ארגזי תריס אשר מותקנים באופן סמוי בתוך עובי הקיר, ואשר בהם הגישה לתחזוקת התריס היא מצידם התחתון. בארגזים אלה ניתן להתקין בידוד תרמי רק כאשר עובי הקיר גדול – ולכן הם אינם מומלצים מבחינה תרמית.

### 3.2 חלונות כיס

חלונות כיס הם בעלי יתרון ייחודי בכך שניתן לפתוח את החלון למלוא גובהו ורוחבו מבלי שהכנף תיראה או תהווה הפרעה, הן על המישור החיצוני של הקיר והן על המישור הפנימי. אולם אליה וקוץ בה: חלונות הכיס מאופיינים בנקודות תורפה משמעותיות מאוד מבחינת התפקוד התרמי.

א. חלל הכיס גורע מעוביו של הקיר, במיוחד אם הכיס מיועד להכיל גם את כנף התריס בנוסף לשמשה. בשל כך, יתכן ולא יוותר די עובי בכדי להתקין את הבידוד התרמי הנדרש, במיוחד בקירות הנבנים מבלוקים בשיטה הקונבנציונלית. בבנייה המתועשת, חלל הכיס בא על חשבון שכבת הבטון, וכאשר הקיר החיצוני הוא קיר נושא קונסטרוקטיבי, ישנן מגבלות קשות על רוחב הפתח. בפועל, חלונות כיס משמשים בבנייה המתועשת בעיקר עבור כנף חלון ההדף בחלונות ממ"ד.

ב. כמו כל חלונות ההזזה, חלון שבו הכנף נגררת לתוך כיס הוא בעל אטימות נמוכה לחדירת אוויר. נקודת תורפה מיוחדת היא המפגש בין הכנף לבין המשקוף בצד הפונה אל הכיס.

בתכנון הבידוד התרמי של כיס הגרירה יש להתייחס את הדופן הפנימית של הכיס כאל קיר חיצוני של הבניין. ניתן לבודד את הדופן בצד הפונה אל הכיס, או בצד הפונה אל החלל הפנימי בדירה. הפתרון השני עדיף כאשר הבידוד הוא פנימי בכל חתך הקיר, משום שאז נשמרת הרציפות בבידוד. כאשר הבידוד בחתך האופייני של הקיר נמצא בצד החיצוני, רצוי לבודד גם את דופן הכיס בצורה דומה. ההתנגדות התרמית המינימלית הנדרשת מכיס הגרירה תהיה שווה להתנגדות הנדרשת בחתך האופייני של הקיר.

## 4. מחסום אדים ומחסום אוויר

קירות הבניין הם לכאורה אטומים, אך בפועל יתכן שתהיה דרכם בכל זאת תנועה של אוויר, ובמרבית המקרים יתקיימו בהם שינויים בתכולת הרטיבות.

### 4.1 מחסום אוויר

מחסום אוויר (air barrier) הוא שכבה רציפה בקיר אשר מיועדת להפחית מעבר אוויר לא רצוי (אינפילטרציה). מעבר האוויר מתרחש מהצד שבו לחץ האוויר גבוה אל הצד שבו לחץ האוויר נמוך יותר, וכיוון התנועה תלוי בהפרשי הטמפרטורות וברוח. לפי התקן הישראלי ת"י 5280 1-1[59], מחסום אוויר יהיה בעל חדירות אוויר שאיננה גבוהה מ-0.075 מ"ק לשעה בהפרש לחצים של 75 פסקל.

[59] תקן ישראלי ת"י 5280-1.1 – אנרגיה בבניינים – מעטפת הבניין, בנייני מגורים

בבנייה המסיבית המקובלת בארץ, אין בדרך כלל מעבר אוויר דרך קירות הבניין, ויש צורך לטפל בעיקר בפתחים. בבנייה הקלה יש צורך להקפיד על הוראות התקן, המציע שורה ארוכה של חומרים המתאימים לשמש כמחסום אוויר.

### 4.2 מחסום אדים

מחסום אדים (vapour barrier) הוא שכבה רציפה בקיר אשר מיועדת להפחית מעבר של אדי מים. מעבר האדים מתרחש מהצד שבו תכולת אדי המים באוויר גבוהה (שהוא בדרך כלל גם הצד החם), בכיוון הצד שבו תכולת אדי המים באוויר נמוכה יותר (לרוב הצד הקר). התנגדות השכבה למעבר אדי מים לא תהיה קטנה מההתנגדות של יריעת פוליאתילן בעובי 0.15 מ״מ (דהיינו, $220x10^4$ מ״ר · שנייה · מ״מ כספית לגרם). כאשר ההתנגדות של השכבה היא משמעותית אך היא איננה מהווה מחסום מוחלט, היא תכונה ׳מעכב אדים׳ (vapour retarder).

מאחר והרטיבות בדרך כלל איננה רצויה בקירות, ואף עלולה לגרום לנזק מצטבר לחומרי בנייה מסוימים, רצוי שמחסום האדים יפחית את חדירת המים לתוכם, אך במקביל יאפשר שחרור עודף לחות אשר הצטברה בהם. לכאורה, שתי הדרישות האלה מנוגדות. בפועל, כיוון התנועה של אדי המים – אל תוך הקיר או החוצה ממנו – תלוי בלחץ האדים של האוויר סמוך לקיר. קיר אשר סופג אדי מים (בצד הפונה אל הדירה) עשוי בהמשך לשחרר אותם כאשר האוויר בדירה מתחמם או כאשר תכולת אדי המים יורדת.

כעיקרון, יש להתקין מחסום אדים כאשר קיים חשש כי הצטברות לחות, בעיקר בחורף, תביא לנזק. החשש העיקרי הוא מפגיעה במזרוני בידוד על בסיס סיבים, הן משום שהלחות מביאה לירידה בהתנגדות התרמית שלהם והן משום שספיחת המים עלולה לגרום לשקיעה של הסיבים בתוך המעטפת. בקירות כאלה יש להתקין את מחסום האדים בין מזרוני הבידוד לבין לוחות החיפוי (בדרך כלל גבס). בכל מקרה, אין להתקין מחסום אדים בשני הצדדים של שכבת הבידוד.

כאשר אין חשש מהיווצרות נזק בעקבות עיבוי, למשל כאשר הבידוד מתקבל באמצעות בלוקים נקבוביים או באמצעות לוחות פוליסטירן – אין צורך במחסום אדים.

## 5. סיכום

בכדי לענות על הדרישות בתנאי הסביבה המשתנים בכל שעות היממה ובכל עונות השנה, רצוי להתייחס אל הקירות החיצוניים של הבניין כמערכת רב-שכבתית, אשר בה חתך הקיר יהיה מורכב מחומרים שנותנים מענה על הצורך באגירת חום פנימית, התנגדות תרמית, ובגימור חיצוני חזק ועמיד.

## מקורות


[1] International Standards Organization. ISO 10456:2007. Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.

[2] Lechner, N. (2009). Heating, Cooling, Lighting – Sustainable Design Methods for Architects. Wiley, Hoboken, 698p.

[3] מכון התקנים הישראלי. תקן ישראלי ת״י 1375 - שיטות מעבדתיות לקביעת התנגדות תרמית אופיינית של רכיבי בניין.

[4] מכון התקנים הישראלי. תקן ישראלי ת״י 5 – בלוקי בטון: בלוקי קיר.

[5] מכון התקנים הישראלי. תקן ישראלי ת״י 5280-1.1 – אנרגיה בבניינים – מעטפת הבניין, בנייני מגורים.

[6] מכון התקנים הישראלי. תקן ישראלי ת״י 5375 - שיטות חישוביות לקביעת התנגדות תרמית אופיינית של קירות בני.

# פרק ז:

# גג הבניין

## (וקצת על הרצפה ותקרות ביניים)

# פרק 7: גג הבניין (וקצת על הרצפה ותקרות ביניים)

מבחינה אקלימית, הגג נמצא במקום החשוף והרגיש ביותר במעטפת הבניין:

א. בימי קיץ, הגג חשוף לקרינת שמש בעוצמה גבוהה יותר מאשר כל רכיב מעטפת אחר.

ב. בלילות חורף, הגג חשוף לאיבודי חום גדולים במיוחד, בקרינה ארוכת גלים וכתוצאה ממגע מוגבר עם האוויר הקריר.

ג. גג מקנה הגנה בפני גשם (וגם ברד ושלג באזורים גבוהים), ודורש תשומת לב מיוחד לפרטי איטום ולאחזקה וטיפול שוטף.

אילו תכונות נדרשות מהגג כדי להפוך אותו מנטל אנרגטי לנכס? הפרק יעסוק בניתוח התפקוד של גגות, ובנוסף יעסוק גם באמצעים המומלצים על מנת לשפר את התפקוד התרמי של הרצפה בקומת הקרקע.

## 1. גג בטון שטוח

גג בטון שטוח הוא הגג הנפוץ ביותר בבנייני מגורים בישראל. הוא עשוי בדך כלל מיציקת בטון מסיבי (תקרה מיקשית) או מיציקת בטון מצולע (תקרת צלעות). במקרה השני, חלקה התחתון של התקרה כולל בלוקי בטון חלולים, בטון תאי, תבניות קלות מפוליסטירן מוקצף (קל-קר) או חומר קל אחר, המאפשרים להקטין את המשקל העצמי של הגג במידה רבה. מעל התקרה הנושאת מבוצעת יציקה של בטון קל (בטון שיפועים) ומעליו מותקנת שכבת איטום לצורך ניקוז מי גשם. אם שכבת האיטום חשופה ישירות לקרינת שמש, היא משמשת כאחד מחומרי הגמר של המעטפת, ומומלץ שהיא תהיה צבועה בצבע בהיר.

מבחינה אנרגטית, תקרת בטון מכילה כמות ניכרת של מסה תרמית אשר עשויה לתרום באופן משמעותי לקיבול החום וליציבות התרמית של הבניין. ריכוז של מסה בתקרה חשוב במיוחד בימי הקיץ , כאשר אוויר חם יחסית עולה בתוך החלל כתוצאה מהסעה טבעי, ובא במגע עם התקרה. כאשר טמפרטורת התקרה נמוכה מזו של האוויר, הבטון יספוג חום מהחלל ויאגור אותו במשך שעות היום החמות. תהליך זה פחות משמעותי במקרה של תקרת צלעות, משום שהמילוי בין הצלעות עשוי מחומר קל (כגון איטונג) בעל מוליכות תרמית וקיבול חום נמוכים.

מאחר והגג חשוף לסביבה יותר משאר חלקי מעטפת הבניין, חשוב ביותר שהמסה של תקרת הבטון תהיה מוגנת היטב. הפתרון המומלץ למתן הגנה זו הנו שכבה עבה של בידוד תרמי מעל הבטון. חשיבותו של שילוב זה של מסה פנימית ובידוד חיצוני (עליון) רבה אפילו יותר מאשר החשיבות של קירות רב-שכבתיים. כאשר עובי שכבת הבידוד מותאמת לאזור האקלים, מסת הגג אינה מתחממת משמעותית בקיץ ואינה מתקררת משמעותית בחורף, והאלמנט המסיבי של הגג הופך לחלק מהמסה אוגרת האנרגיה של הבניין – ובכך מקטין את משרעת הטמפרטורה היומית בתוך המבנה. אם הגג מבודד בחלקו התחתון, הבידוד מנטרל במידה רבה את המסה התרמית שלו. בדרך כלל זהו חיסרון הפוגע בתפקוד האנרגטי של בניין.

ניתן להתקין את הבידוד התרמי החיצוני בגג השטוח בשתי שיטות: האחת מכונה 'גג רגיל' והשנייה 'גג הפוך'.

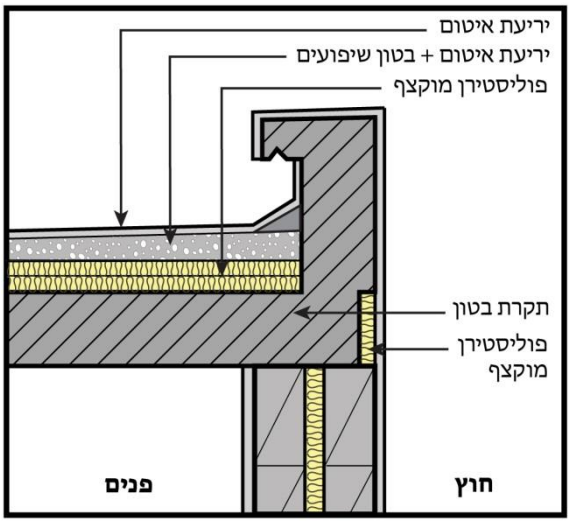
## 1.1 גג רגיל

בגג רגיל, לוחות פוליסטירן מוקצף (קל-קר) מונחים ישירות על הבטון ועל גבי שכבה זו מיושם בטון השיפועים ועליו יריעות האיטום, איור ז-1.

טכנולוגיה זו פשוטה לביצוע ותוצאותיה בדרך כלל משביעות רצון. כנגד יתרון זה יש מספר חסרונות:

שינוי לאורך זמן בגוון הגג: גם אם יריעות האיטום הן מלכתחילה בעלות גמר בהיר, מקדם ההחזרה של הציפוי עלול לרדת תוך חודשים ספורים מערך של 0.6 או יותר לערך של 0.3 או פחות. שינוי מקדם ההחזרה נובע מהשתנות הצבע בשל הזדקנות, לכלוך וכיסוי באבק וחול. בעקבות השינוי במקדם ההחזרה משתנות מאוד הטמפרטורות על פני הגג. באמצע הקיץ עלולה טמפרטורת המשטח העליון של גג לבן חדש לעלות ב-10 מעלות צלסיוס בקירוב מעל טמפרטורת האוויר, בשל בליעת קרינת השמש. לעומת זאת, הטמפרטורה של גג כהה יותר (מכוסה בחול ואבק) עלולה לעלות ב-20 או אף 30 מעלות צלסיוס מעל טמפרטורת האוויר בסביבה. הטמפרטורה של משטח בטון מצופה אספלט, ללא הלבנה, עלולה להגיע בימי קיץ חמים עד 70 מעלות צלזיוס או יותר.

פגיעה באיכות האיטום: כאשר יריעת האיטום נמצאת מעל לשכבת הבידוד וחשופה לסביבה, הקיים שלה קטן וישנה סכנה רבה יותר להיווצרות נזילות כאשר הגג מוצף. הפגיעה בשכבת האיטום נוצרת הן בשל החשיפה לקרינת שמש מזיקה, בעיקר בתחום האולטרה-סגול, והן משום שטמפרטורה גבוהה של פני השטח גורמת לפגיעה בחומרי האיטום הביטומניים.




**איור ז-1.**

**חתך עקרוני בגג בטון קונבנציונלי**

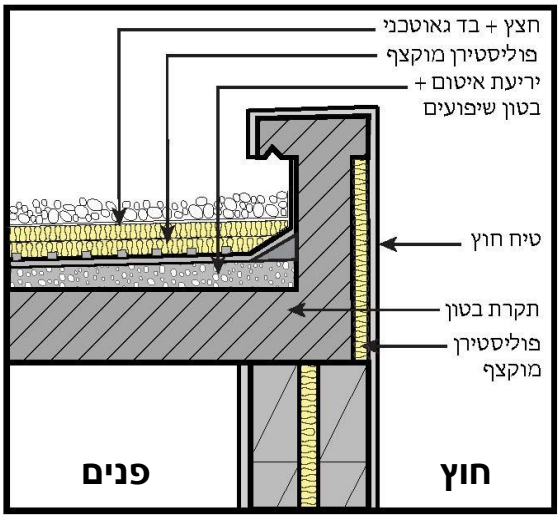
## 1.2 גג "הפוך"

בשיטת הגג ההפוך הבטון הנושא מכוסה בבטון שיפועים ונאטם בחומר איטום מקובל, ומעל שכבת האיטום מניחים לוחות פוליסטירן מוקצף (קל-קר) אשר מחורצים בתחתיתם כדי לאפשר ניקוז מי גשם (איור ז-2). על שכבת הבידוד מניחים אריג שאינו אטום למים (בד גיאוטכני) ושכבת חצץ, או לחלופין מרצפות, להגנה על הבידוד וקיבועו במקומו. בשיטה זו שכבת האיטום למים נמצאת מתחת לבידוד התרמי, ואינה חשופה לתנאי האקלים והבליה החיצוניים. היא מוגנת מהבחינות התרמית והמכנית וחייה מתארכים.

לגג הפוך ישנם גם חסרונות מעשיים. הנגישות אל שכבת האיטום למים לצורכי תיקון ואחזקה מסובכת ומסורבלת בהשוואה לגג מסיבי רגיל, וכרוכה בפירוק חלקים משכבות הכיסוי והבידוד. לכן יש להקפיד במיוחד בעת ביצוע שכבת האיטום ולבצע בדיקת הצפה לפני התקנת לוחות הבידוד

התרמי. חיבור מתקנים שונים והצבתם על הגג, כגון דודי שמש, מזגנים, או אנטנות מחייבת הכנה מראש של בסיסים מוגבהים, מאחר ולא ניתן לקבע מתקנים אל שכבת הבידוד.

כאשר מתקינים גג הפוך, היעילות של הבידוד תרמי קטנה מעט, משום שכאשר יורד גשם, חודרים מים קרים מתחת לשכבת הבידוד. אם הגג מנוקז היטב, הפגיעה היא קצרת טווח.




**איור ז-2.**

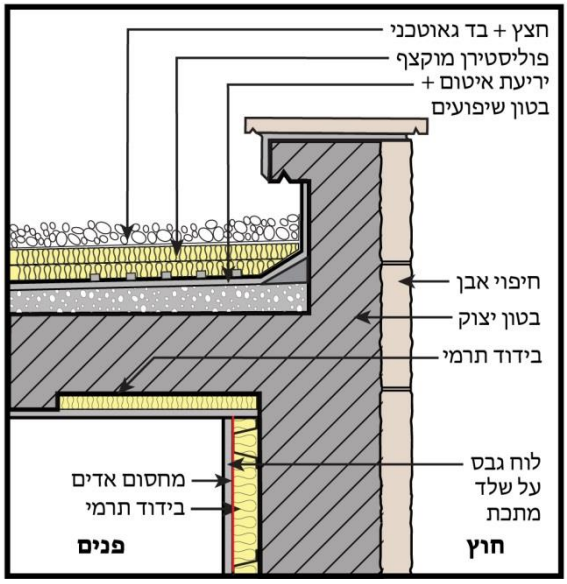
**חתך עקרוני בגג הפוך.**

## 1.3 גשר תרמי בהיקף הגג

בנוסף לצורך בבידוד תרמי של הפנים העליונים של הגג, יש צורך בבידוד תרמי בהיקף התקרה למניעת גשר תרמי, בדומה לבידוד המבוצע בתקרות בקומות הביניים. הבידוד יכול להתבצע בשני אופנים:

בבנייה הרגילה, בידוד היקף התקרה בפנים החיצוניים שלה, כפי שנעשה בעמודים וקורות. אם ישנם כרכוב בטון או קורה עליונה, הבידוד התרמי ימשך עד למפלס הפנים העליונים של שכבת הבידוד האופקית, לפחות.

בבנייה המתועשת, בידוד תחתית התקרה ברצועה סביב הקירות החיצוניים, כמו בתקרות הביניים (איור ז-3).




**איור ז-3.**

**בידוד תרמי בתחתית התקרה למניעת גשר תרמי בהיקף.**

## 2. גג קל משופע

גג משופע אופייני בנוי מקונסטרוקציה קלה (מסגרת עץ או מתכת) ומכוסה ברעפים, לוחות פח (׳איסכוריתי׳) או לוחות מבודדים הכוללים בנוסף לפח גם בידוד תרמי. החלל הפנימי עשוי להיות חשוף אל הגג המשופע, אולם במקרים רבים הקומה העליונה היא בעלת תקרה פנימית אופקית, אשר בינה לבין מישור הגג ישנו חלל גג כלוא. הגגות המשופעים ייבחנו כאן מבחינת הגיאומטריה שלהם ומבחינת החומרים שמהם הם עשויים.

### 2.1 גיאומטריה

כאשר זווית השמש גבוהה, גיאומטריית הגג אינה משפיעה משמעותית על כמות הקרינה הפוגעת בו (זהו המקרה הקשה, בצהרי הקיץ). כאשר זווית השמש נמוכה מזווית שיפוע הגג, עלול לגדול החתך שבו פוגע שטף קרינת השמש בגג והוא יבלע יותר אנרגיה מאשר גג שטוח המקרה שטח רצפה דומה. במקרה כזה תהיה גם זווית פגיעת קרני השמש בגג קרובה יותר לניצבת, וכמות הקרינה הנבלעת בגג תגדל עוד. לכן, בגג דו-שיפועי יש גם משמעות להפניה: כאשר רכס הגג מכוון לציר צפון-דרום ופני הגג המשופעים פונים למזרח ומערב, חלק ניכר מאנרגית השמש בקיץ נבלעת בשעות הבוקר ואחה"צ. כאשר הרכס הוא בכיוון מזרח-מערב, הפן הדרומי חשוף לקרינת שמש רבה יותר, בעיקר בחורף.

אם אין תקרה מבודדת בין החלל העיקרי של הבניין לבין עליית הגג, אז השטח האפקטיבי להחלפת חום בין הגג לבין החוץ יהיה גדול יותר במקרה של גג משופע מאשר בגג שטוח. בחורף יהיה שטח גדול יותר שדרכו יאבד חום, ובקיץ יהיה שטח גדול יותר שדרכו ייכנס חום אל תוך הבניין.

### 2.2 חומרים

גגות משופעים עשויים בדרך כלל מחומרים כהים, כגון רעפי חרס, רעפי בטון או לוחות מתכת. חומרים אלה בולעים את רוב קרינת השמש הפוגעת בהם, והטמפרטורה שלהם עולה בהרבה מעל לטמפרטורת האוויר. משום שלחומרים אלה יש מוליכות תרמית גבוהה, נוצרת עלייה משמעותית גם בטמפרטורת החלק התחתון של הגג, וכתוצאה מכך של החלל שמתחתיו. ככל שהגג קל יותר (למשל גג מפח או לוח דק על בסיס צמנט), העלייה של הטמפרטורה היא מהירה יותר. בהיעדר קיבול תרמי, לא נוצר כמעט פיגור זמן בין שיא החום בחוץ לעומס החום המרבי על החלל הפנימי בבניין, המתרחש בשעות אחר הצהריים המוקדמות.

### 2.3 חלל גג

גג משופע עשוי להוות גם תקרה לחלל הפנימי השימושי של הבניין, אך במקרים רבים קיימת תקרה (אופקית) נפרדת. המרווח ביניהם מכונה חלל הגג. ניתן לחלק גגות אלו לשני סוגים עיקריים: גגות אשר בהם ישנה זרימת אוויר חופשית בין תקרת הקומה העליונה לבין האלמנט המצל (להלן – גג מוצל), וגגות שבהם חלל הגג סגור ואין בו תנועת אוויר משמעותית (להלן – עליית גג). ההתנהגות התרמית של שני סוגי הגגות האלה שונה לחלוטין, ויש לתכנן אותם בהתאם.

**א. עליית גג**

כאשר חלל הגג סגור לחילופי אוויר, טמפרטורת האוויר בו עלולה להיות גבוהה מאוד בקיץ. אם הגג אטום היטב ואין החלפת אוויר מתחתיו, הטמפרטורה בתוך חלל הגג עלולה להתקרב לטמפרטורת המשטח החיצוני של הגג, אשר עלולה להיות גבוהה ב-20 מעלות או יותר מטמפרטורת האוויר. הבעיה חמורה במיוחד בקיץ, בשל העומס התרמי הנוצר מקרינת השמש, אבל עלולה להיות משמעותית גם בלילות חורף. הפתרון התרמי חייב לתת מענה לשני המצבים, אף כי אפשר שלשם כך ינקטו פתרונות שונים.

### הפחתת טמפרטורת הגג (בקיץ)

הפחתת טמפרטורת הגג אפשרית אם מקטינים את בליעת קרינת השמש מבלי לפגוע באפשרות לפלוט עודפי חום בקרינה. רעפים לבנים עדיפים על פני רעפים כהים, אם כי שימוש בציפויים 'קרירים' (ראו בהמשך פרק זה) עשוי לתת פתרון חלקי.

### התקנת יריעות רפלקטיביות

בין אם הגג חם מאוד ובין אם הטמפרטורה שלו נמוכה, ניתן להקטין את מעבר האנרגיה בינו ובין התקרה שמתחתיו על ידי התקנת יריעה רפלקטיבית (בדרך כלל רדיד אלומיניום). בחורף, רדיד מבריק פועל כמראה בתחום התרמי, ומחזיר קרינת חום (קרינה אינפרה-אדומה) הפוגעת בו. הגג עצמו נשאר לכן קר יותר, ומאבד פחות חום אל הסביבה. בקיץ, כאשר הגג מתחמם מאוד, הרדיד פולט מעט מאוד קרינה אינפרה-אדומה (בין 5-10 אחוז בלבד, בהשוואה למשטח שחור). לכן, בעוד שהגג נשאר חם מאוד, התקרה שמתחתיו מתחממת פחות.

ההתנגדות התרמית של חלל גג עם רדיד אלומיניום המותקן מתחת לרעפים (בין האגדים) כך שהצד המבריק פונה כלפי חלל הגג היא אמנם משמעותית, אך כפי שטבלה ז-1 מראה, רחוקה מלענות על דרישות התקן.

**טבלה ז-1. התנגדות תרמית שקילה (r) של חלל גג עם רדיד אלומיניום המותקן מתחת לרעפים (מ"ר קלווין /ואט)** [60]

| סוג הבנייה | אזור האקלים | |
|---|---|---|
| | א, ב, ג | ד |
| בנייה קלה | 0.50 | 0.50 |
| בנייה שאינה קלה | 0.15 | 0.50 |

הערה: רדיד האלומיניום יעיל בהפחתת מעבר אנרגיה בקרינה רק כל עוד הוא נקי ומבריק. הצטברות אבק או אדי מים על פני הרדיד מקטינים מאוד את התועלת שבו. התקנה על המישור התחתון של האלמנט כך שהרדיד פונה אל חלל פתוח שמתחתיו עשויה להפחית את הצטברות האבק.

### אוורור חלל הגג (בקיץ)

אוורור הגג באמצעות פתחי אוורור או מפוחים עשוי לסייע בסילוק עודפי חום בחלל הגג. הטמפרטורה של חלל זה עשויה, במקרה הטוב, לרדת אל טמפרטורת האוויר החיצוני – אולם יש בכך שיפור משמעותי מאוד בהשוואה לגג לא מאוורר. רצוי שמערכת האוורור – בין אם היא פסיבית ובין אן היא מכנית – תתוכנן כך שאפשר יהיה לנטרל את פעולתה בחורף.

**ב. גג מרחף**

התרומה העיקרית של גג מרחף היא הצללת הגג, המביאה להפחתת החשיפה לקרינת השמש הגורמת להתחממותו. לצורך זה די למתוח מעל הגג קרום דק העשוי מחומר קל כגון פח גלי, בד, רשת או עץ או אפילו צמחייה (במקרה של גג ירוק).

[60] לפי ת"י 1045, חלק 0.

ניתן גם לבנות גג רעפים מרחף לצורך הצללה, אך מומלץ במקרה זה שצבע הרעפים יהיה בהיר. זרימת אוויר חופשית בין הגג לבין האלמנט המצל מבטיחה כי טמפרטורת האוויר הבא במגע עם הגג לא תהיה גבוהה מטמפרטורת אוויר הסביבה. צילום ז-1 מראה גג מרחף אשר הותקן במהלך שיפוץ של בנייני מגורים בקיבוץ יוטבתה. הגג המרחף הותקן על גבי אשקוביות בטון בגובה של 1 מטר לפחות, והגמלון נשאר פתוח בשני הצדדים, על מנת לאפשר תנועה חופשית ככל האפשר של האוויר.

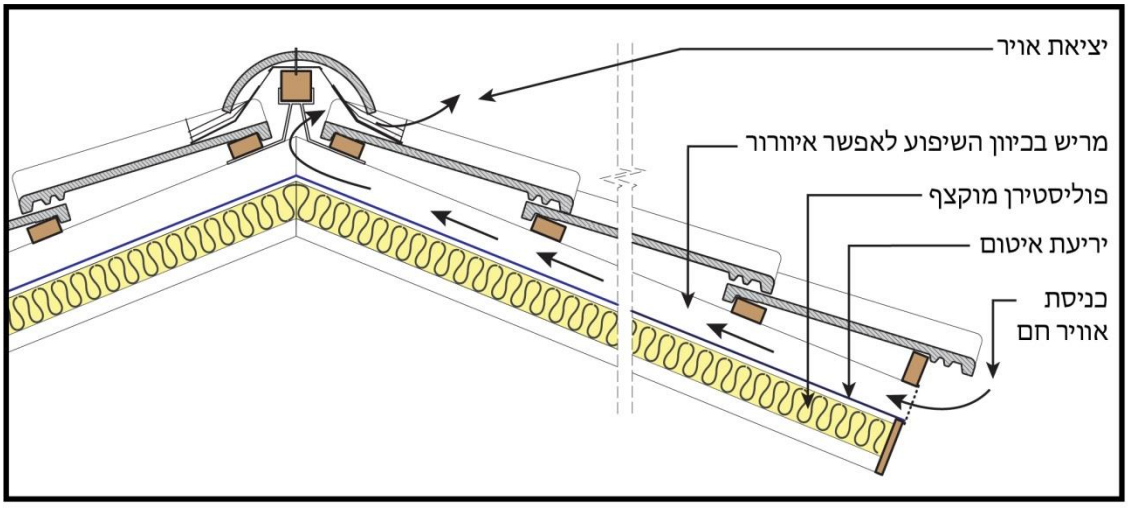
**צילום ז-1. בקיבוץ יוטבתה הותקנו גגות רעפים לבנים מעל גגות בטון שטוחים בבניינים קיימים.**

כאשר מותקן גג מרחף מאוורר, יש להבטיח כי הגג יבודד גם בהתאם לצרכים בחורף. אם החורף קר, יש להתקין בנוסף להצללה גם בידוד תרמי אשר יפחית את מעבר החום מהבניין החם אל הסביבה.

### 2.4 רעפים מאווררים

גג הרעפים מתחמם מאוד בקיץ, והטמפרטורה של רעף החשוף לשמש עלולה להגיע ל-50 מעלות או יותר. ניתן להפחית את הטמפרטורה של הרעפים, וכך להקטין את העומס התרמי על הגג בקיץ, אם מאפשרים תנועה חופשית של אוויר גם בצידם התחתון - כאשר האוורור נעשה מעל שכבת הבידוד התרמי. אם חלל הגג אינו שימושי, ניתן לאוורר את כולו, באופן טבעי או בעזרת מפוח, אך אם גג הרעפים מהווה גם את תקרת החלל השימושי, ניתן להיעזר ברעפים מאווררים.

התקנה של רעפים מאווררים נעשית על גבי רשת כפולה של מרישים: השכבה התחתונה מקבילה לשיפוע פאת הגג, ויוצרת את מרווח האוויר. השכבה העליונה כוללת מרישים אופקיים אשר אליהם קשורים הרעפים, כמקובל. בכדי לאפשר אוורור יעיל של המרווח שנוצר, יש לוודא שהפתח התחתון, בקו המרזב, חשוף ככל האפשר, למעט רשת למניעת חדירה של ציפורים או מזיקים; ולאפשר יציאה של האוויר החם בקו הרכס באמצעות רוכבים מיוחדים, אשר מוגבהים משורת הרעפים העליונה ואינם מקובעים במלט. חשוב להדגיש כי האוורור אינו מהווה פתרון העומד בפני עצמו, וכי תרומתו בחורף עלולה להיות שלילית; לכן יש להתקין מחסום אוויר ובידוד תרמי מתחת לשכבת האוורור בדומה לכל גג רעפים אחר. איור ז-4 מראה פתרון סכמתי של גג רעפים מאוורר.




**איור ז-4. פתרון סכמתי של גג רעפים מאוורר.**



## 3. גגות לא מישוריים: קמרונות וכיפות

למרות שגגות שטוחים ומשופעים הם הנפוצים ביותר בבניה ישראלית, יש יתרונות פוטנציאליים לגגות שאינם מישוריים – כגון כיפות וקמרונות.

### 3.1 השיקול האקלימי

שטחו של גג לא-מישורי גדול יותר מאשר שטחו של גג מישורי על פני אותו מפתח. בימי הקיץ, כאשר קרינת השמש מטילה עומס חום כבד במיוחד על פני הגג, לשטח פנים גדול עשוי להיות יתרון: בעוד שבזויות שמש גבוהות שטף הקרינה הישירה הכולל על הגג תלוי בהיטל האופקי שלו, בקירוב, ולכן יהיה דומה בשני החתכים, איבוד החום אל האוויר תלוי בשטח המגע בין הגג לאוויר. בהנחה שטמפרטורת האוויר נמוכה מטמפרטורת הגג, כיפה או קמרון יהיו בקיץ מעט קרירים יותר מאשר גג אופקי הבנויים מחומרים דומים ובעלי אותו גימור.

בנוסף, החלל הגבוה מתחת לקמרון מאפשר ריכוז של אויר חם יחסית מעל גובה הראש של משתמשי החלל, ובתכנון אווירודינמי מתאים, ניתן גם לשאוב את האוויר הזה החוצה דרך פתחי אוורור.

### 3.2 אנרגיה גלומה בתהליך הייצור

היכולת של תקרת בטון מישורית לשאת את משקלה תלויה בכשר ההתנגדות שלה לעומסי כפיפה – אשר דורשת חוזק גבוה בלחיצה וגם במתיחה. לבטון עצמו יש חוזק גבוה בלחיצה בלבד, והחוזק הדרוש במתיחה מתקבל מפלדת הזיון. ייצור הפלדה הוא תהליך עתיר אנרגיה, ולכן הפלדה המהווה מרכיב משמעותי בתקרת הבטון אחראית לחלק ניכר מהאנרגיה הגלומה בבניין, וגם מסך כל האנרגיה של הבניין במחזור החיים (life cycle energy). מאחר והיכולת של קמרון לשאת את משקלו העצמי נובעת בעיקר מחוזקו בלחיצה, בגג מקומר יש חיסכון גדול בפלדה בהשוואה לגג שטוח.

## 4. גגות 'קרירים' ('cool roofs')

מעבר החום בהולכה דרך רכיב בניין תלוי בהפרש הטמפרטורות בין פניו החיצוניים לפניו הפנימיים. בעוד שטמפרטורת המישור הפנימי של הרכיב תהיה בדרך כלל דומה לטמפרטורת האוויר (למעט

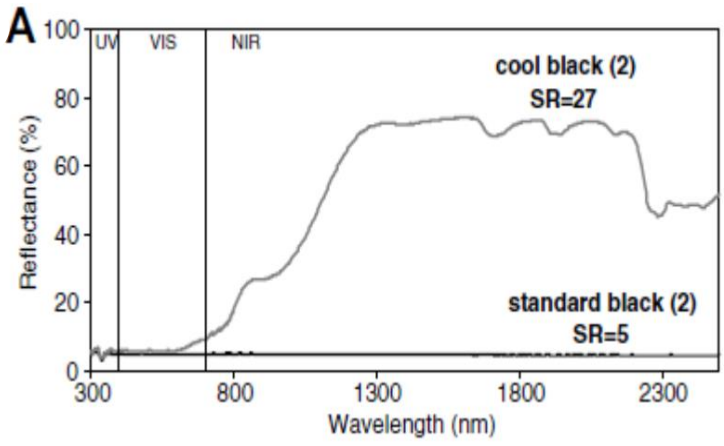
ברכיבים דקים מאוד או בעלי מוליכות תרמית גבוהה מאוד), טמפרטורת הפנים החיצוניים עלולה להיות גבוהה בהרבה מטמפרטורת האוויר בימות הקיץ החמים. הבדל זה הוא משמעותי במיוחד בגגות, אשר חשופים לקרינת שמש רבה.

לכאורה, די בכך שהגג יהיה בהיר ככל האפשר בכדי להבטיח שהטמפרטורה שלו בעת חשיפה לשמש תהיה נמוכה ככל האפשר. אולם המראה של הגג אינו מבטא באופן מלא את ההתנהגות התרמית של חומר הגמר, משום שהעין האנושית רואה רק חלק קטן מהספקטרום האלקטרו-מגנטי, ואפילו לא חצי מקרינת השמש. בכדי לתאר בצורה מלאה יותר את התפקוד של רכיב בניין החשוף לקרינת שמש, ניתן להשתמש במדד מורכב יותר, המכונה Solar Reflectance Index – SRI [61] . על מנת לחשב את המדד עבור משטח מסוים, יש צורך באלבדו שלו (היחס בין קרינת השמש המוחזרת ממשטח לבין קרינת השמש הפוגעת בו), ובפליטות שלו בתחום האינפרה אדום. הוא מחושב כך שערכו עבור משטח שחור סטנדרטי יהיה '0', ומשטח לבן סטנדרטי יהיה בעל ערך של '100'.

דוגמא:

| החומר | אלבדו | פליטות | SRI |
|---|---|---|---|
| צבע לבן טרי | 0.8 | 0.9 | 100 |
| יריעת איטום אפורה | 0.5 | 0.9 | 58 |
| רעפי חרס | 0.4 | 0.9 | 45 |
| פח מגולוון (ישן) | 0.5 | 0.3 | 32 |
| לוח מתכת מבריק | 0.85 | 0.1 | 91 |

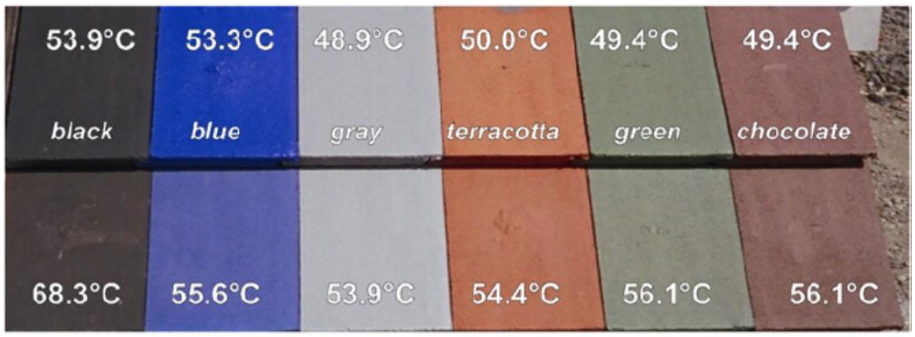
לפי שיטת החישוב של LEED [62], רצוי שערכו של מדד SRI עבור גג שטוח יהיה לפחות 79. ניתן להגיע לערך זה ללא קושי כאשר הגג צבוע בגוון בהיר, אולם מרבית החומרים הנפוצים בגגות משופעים, כגון רעפים או לוחות מתכת צבועים, הם בעלי גוון כהה יותר. מומלץ מאוד שגם בגגות משופעים יעשה שימוש בחומרי גמר בהירים, אולם ניתן להפחית את הפגיעה בתפקוד של הגג באמצעות ציפויים המכונים 'קרירים'. ציפויים אלה דומים מאוד במראה לחומרי גמר רגילים, אולם מחזירים חלק ניכר מקרינת השמש באורכי גל אשר אינם נראים לעין האנושית, כפי שמראה תרשים ז-1.




**תרשים ז-1. גגות 'קרירים' מחזירים אחוז ניכר מקרינת השמש הפוגעת בהם בתחום האינפרה אדום.**

[61] ASTM, 2011

[62] LEED – Leadership in Energy and Environmental Design. סדרה של תקנים בהוצאת המועצה האמריקאית לבנייה ירוקה.




**צילום ז-2. 'גגות קרירים' (בשורה העליונה) נראים כמו גגות משופעים רגילים, אבל הטמפרטורה שלהם עשויה להיות נמוכה במידה ניכרת.**

כפי שמראה צילום ז-2, ההבדל בטמפרטורה בין גג 'רגיל' לגג 'קרירי' הנראה דומה מאוד עשוי להיות משמעותי מאוד, ולהביא להפחתה של מספר מעלות בעת חשיפה לשמש מלאה.



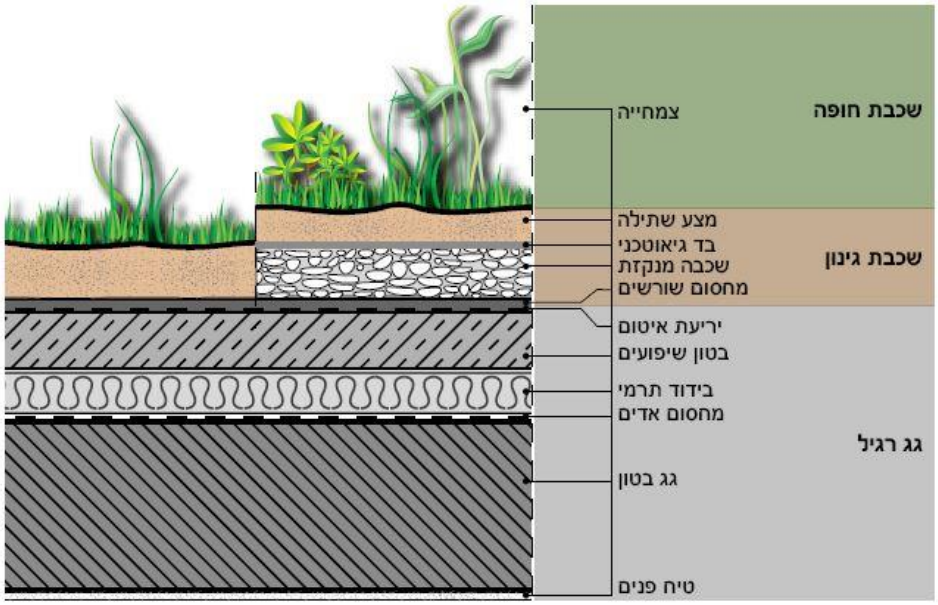
## 5. גגות ירוקים

### 5.1 מהו גג ירוק?

גג ירוק הוא גג אשר עליו הותקנו תשתית ומצע גידול ונשתלו צמחים המכסים את רוב השטח. הגגות הירוקים נעשים נפוצים יותר ויותר, ומייחסים להם יתרונות רבים. התקנה של גג ירוק והתחזוקה שלו לאורך זמן עלולים להיות יקרים ומורכבים בהשוואה לפיתרונות אחרים. לכן מומלץ לשקול היטב מהן המטרות אותן אמורה לשרת ההתקנה, והאם גג ירוק הוא אכן החלופה המתאימה להשגתן.

**א. מבנה הגג**

חתך עקרוני בגג ירוק מובא באיור ז-5:




**איור ז-5. חתך עקרוני בגג ירוק**

ישנם שני טיפוסים עיקריים של גג ירוק: אקסטנסיבי ואינטנסיבי.

### גג אקסטנסיבי

בגג אקסטנסיבי עובי מצע הגידול הינו קטן – כ-20 ס"מ לכל היותר. גג כזה הוא קל (יחסית), ולכן הגג הנושא בדרך כלל אינו דורש חיזוק מיוחד; הוא מתאים לגגות גדולים, לרבות גגות משופעים; והוא איננו דורש תחזוקה רבה. לכן מחירו זול (בהשוואה לגג אינטנסיבי). עם זאת, מגוון הצמחייה שהוא יכול לקיים מצומצם, והתועלת שלו פחותה.

**צילום ז-3: גג ירוק אקסטנסיבי**

### גג אינטנסיבי

בגג אינטנסיבי עובי המצע גדול ומאפשר גידול צמחייה עשירה ומגוונת. עם זאת, הוא דורש חיזוק של הקונסטרוקציה הנושאת את התקרה, ויקר מאוד בהשוואה לגג אקסטנסיבי. הוא איננו מתאים לגגות משופעים, ומגוון הצמחייה הגדול בדרך כלל דורש תחזוקה. תרומתו בתחומים שונים (ראו בהמשך) רבה מזאת של הגג האקסטנסיבי.

**צילום ז-4: גג ירוק אינטנסיבי**

## 5.2 התועלת שבגג ירוק

גג ירוק שונה באופן מהותי משאר טיפוסי הגגות ה'מקובלים' בבנייה בארץ, כמו בשאר העולם. לגגות ירוקים מיוחסים יתרונות רבים (אם כי לא תמיד יש בסיס מוצק לכל הטענות):

**א. תרומה לסביבה העירונית**

### הפחתת אי-החום העירוני

אחת הסיבות לאי החום העירוני היא מיעוט הצמחייה וריבוי המשטחים המרוצפים והבנויים. ניתן להשיב חלק משטחי הצמחייה האבודים לעיר על גבי הגגות, אם כי יש לזכור כי ככל שהבניינים גבוהים יותר, השפעת הגג על התנאים בגובה פני הקרקע מועטה יותר.

### ספיחת דו-תחמוצת הפחמן ומזהמים

צמחים מקבעים דו-תחמוצת הפחמן מן האוויר בתהליך הפוטוסינתזה – תרומה רצויה לכל הדעות בסביבה העירונית אשר בה נפלטת כמות גדולה של גז זה לאטמוספירה. מחקרים שונים מראים גם כי חלק מן הצמחים לוכדים אחדים מן המזהמים הנפלטים לאוויר כתוצאה מפעילות האדם. עם זאת, חשוב לציין כי התרומה הישירה של הגגות לאיכות האוויר סמוך לפני הקרקע קטנה מאוד, משום שאין בהכרח ערבוב יעיל בין האוויר אשר נמצא מעל גובה הגג לבין האוויר בגובה נמוך יותר.

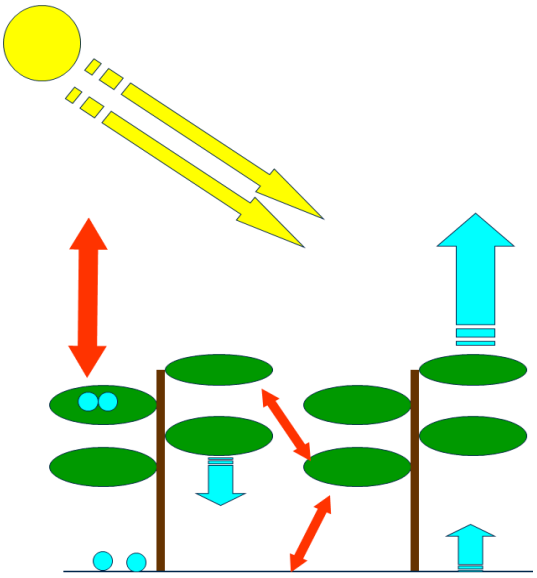
### יצירת בתי גידול ותמיכה במגוון הביולוגי

המגוון הביולוגי בשטח העירוני קטן יותר ושונה ממגוון בעלי החיים המתקיים בסביבה הטבעית. תוספת שטחי צמחייה וקרקע מאפשרים קיום של מיני בעלי חיים אשר קיומם בעיר היה מצטמצם מאוד ללא אזורי מחייה מתאימים.

## ב. תרומה לתפקוד הבניין

### מאזן האנרגיה בגג ירוק

התקנת גג ירוק יוצרת סביבה מורכבת מאוד מבחינת תהליכי מעבר האנרגיה. איור ז-6 מדגים את היחסים ההדדיים בין הצמחייה, התשתית (חיפוי קרקע), הגג הנושא והסביבה [63].



**איור ז-6.**

**התהליכים התרמיים בשכבת הצומח בגג ירוק**

- קרינת השמש נבלעת בעלים או בתשתית
- מתקיימים חילופי קרינה ארוכת גלים בין חופת הצמחייה לבין השמיים, בין הצמחייה לבין התשתית ובין העלים לבין עצמם
- אידוי-דיות (evapotranspiration) מתרחש בעלים
- על פני תשתית השתילה (קרקע) מתרחש אידוי מים הנמצאים בתשתית. לעתים רחוקות יתרחש גם עיבוי (טל).
- חילופי חום מתרחשים בהסעה בין עלי הצמחייה לבין האוויר שמעליהם וביניהם, וכן בין הפנים העליונים של התשתית לבין האוויר שמעליה.
- מעבר חום ומסה (אדי מים) בין התשתית לבין האוויר שמעל הגג.

### גורמים המשפיעים על התפקוד התרמי של גג ירוק

פרסומים רבים מביאים נתונים על השפעת הגג הירוק על התפקוד התרמי של הבניין ועל החיסכון המתקבל באנרגיה. בפועל, גגות ירוקים שונים מאוד זה מזה, ותרומתם לתפקוד הבניין תלויה בגורמים רבים. קשה מאוד לאמוד את התרומה הצפויה בלי נתונים מפורטים על מבנה הגג הנושא, שכבת הבידוד התרמי (אם קיימת), תכונות מצע השתילה ותכונות הצמחייה.

[63] Palomo del Barrio, 1998

בגג ללא צמחייה, התכונות התרמיות אינן משתנות במידה משמעותית לאורך זמן, למעט ירידה בגורם ההחזרה של גגות לבנים אשר צוברים אבק ולכלוך. גג ירוק, לעומת זאת, מהווה מערכת אשר תכונותיה משתנות, לעיתים בפרקי זמן קצרים. לכן קשה מאוד לאמוד את הבידוד התרמי השקול של גג כזה.

הגורם הראשון אשר משתנה לאורך זמן הוא הצמחייה עצמה. כאשר היא מתפתחת, מדד צפיפות העלים (Leaf Area Index) גדל, כמו גם היקף הכיסוי של מצע השתילה. כיסוי מלא וצפוף מקנה הצללה מלאה כמעט ומשפר את התפקוד בהשוואה לגג עם כיסוי חלקי. גם גובה הצמחייה משפיע על תפקוד הגג: ככל שהצמחייה גבוהה יותר, גדל עובייה של שכבת האוויר המבודדת.

מצע השתילה המהווה תשתית לצמחייה מקנה בידוד תרמי לגג. ההתנגדות התרמית של המצע גדלה ביחס ישר לעובי השכבה, אך תלויה גם בצפיפות של המצע ובעיקר בתכולת הרטיבות. קרקע לחה מוליכה חום היטב, ולכן ערך הבידוד המתקבל אחרי אירוע גשם או בעקבות השקיה נמוך בהרבה מהבידוד אשר מקנה שכבת קרקע יבשה.

ניתוח ההשפעה הכוללת של כל התהליכים האלה באקלים הישראלי ממחיש כי התרומה העיקרית של הגג הירוק להתנהגות התרמית של הבניין היא בכך שהוא מצל על הגג הנושא. לאידוי המים – מן הקרקע או מן הצמחים – ישנה השפעה משנית. בכל מקרה, הטמפרטורה של התשתית איננה נמוכה מטמפרטורת האוויר הרצויה בקיץ, בכל אזורי הארץ לרבות במישור החוף. לכן לא ניתן להתייחס לגג ירוק כאל מערכת קירור.

חשוב לציין גם כי הדרישה לבידוד תרמי של גגות בניינים בישראל נובעת במידה רבה מן הצורך להקטין את איבוד החום בחורף. מאחר ותרומתו של גג ירוק להתנגדות התרמית הכוללת היא קטנה מאוד, ונופלת בהרבה מן הבידוד הנדרש אפילו באזור החוף – חיוני לבודד את הגג כראוי בלי קשר לתרומתו של הגג הירוק. התקנת בידוד תרמי מתחת לתשתית הצמיחה – אפילו שכבה של 2-3 ס״מ קלקר – הופכת את התרומה של הגג לתפקוד התרמי של הבניין לשיקול שולי בהשוואה לשאר השיקולים בנוגע להתקנת גג כזה בישראל.

### תפקוד אקוסטי

גגות ירוקים עשויים להפחית את מעבר הקול דרך התקרה העליונה של הבניין. התשתית (קרקע) בולעת את התדרים הנמוכים, בעוד שהצמחים עשויים לבלוע חלק מן התדרים הגבוהים. (עם זאת, חשוב להזכיר שעיקר הרעש חודר לבניין דרך החלונות – מבעד לזיגוג עצמו ומבעד לרווח בין כנף החלון לבין המשקוף.)

### הגנה על שכבת האיטום

בגגות שטוחים (שלא כמו בגגות משופעים), יש צורך בשכבת איטום על מנת למנוע חדירת מים למבנה. שכבות האיטום המקובלות בארץ כוללות יריעות (ביטומניות, PVC) וחומרים המיושמים בהברשה או התזה. כל החומרים נפגעים במשך הזמן כתוצאה מן החשיפה לסביבה, בשל הפרשי הטמפרטורות הגדולים ובעיקר עקב ההשפעה המזיקה של קרינת השמש. התקנה של גג ירוק – בדומה לגג ההפוך – מגינה על שכבת האיטום ומאריכה את חייה. עם זאת, במידה ומתגלה פגיעה בשכבת האיטום בגג ירוק – קשה יותר לאתר אותה ולתקן אותה. כמו כן, יש להבטיח כי שורשי הצמחייה לא יפגעו באיטום, על ידי התקנת הפרדה מתאימה.

### השהית נגר עילי ומיתון ספיקות שיא בזמן גשם

כאשר יורד גשם, חלק מן המים הופך לנגר עילי וחלק נספג בקרקע או נספח לעלים בצמחייה. בשטח עירוני, שיעור הנגר העילי עלול להיות גדול מאוד, משום שרוב המשטחים אטומים. לכן, כאשר יורד גשם חזק, רוב המים הופך לנגר עילי, וזרימות חזקות עלולות להתפתח על פני השטח, עד כדי היווצרות שיטפונות. כאשר הגג מכוסה צמחייה, הוא מעכב את ניקוז המים אל המערכות העירוניות ומקטין את ספיקות השיא.

עם זאת, חשוב לציין כי המים הנאגרים בתשתית הגג הירוק אמנם עשויים לשמש להשקיית הצמחייה עליו – אך נגרעים מפוטנציאל מי הגשם הכולל של המדינה. זאת משום שהם מתאדים על פני הגג במהלך הזמן, בעוד שאת המים הנאספים קרוב לקרקע ניתן להפנות לאגירה בתת הקרקע, שם הם נוספים למי התהום הזמינים של המדינה.

## 5.3 חסרונות של גג ירוק

לגגות ירוקים יתרונות רבים, אולם בצידם ישנם גג מספר חסרונות.

**א. עומס סטטי על גג הבניין**

לתשתית הצמיחה ואפילו לצמחים עצמם ישנו משקל, המתווסף לעומס הסטטי על קונסטרוקציית הבניין. כאשר מדובר בגג אקסטנסיבי, העומס הזה איננו גדול מאוד – כ-300 ק״ג למ״ק של תערובת שתילה קלה, שהם כ-30 ק״ג למ״ר בלבד עבור שכבה בעובי של 10 ס״מ. עם זאת, חשוב לזכור כי כאשר התערובת רוויה מים, משקלה המרחבי עולה ל-1100 ק״ג למ״ק או יותר – עומס לא זניח.

כאשר מדובר בגג אינטנסיבי, אין ספק כי יש צורך בחיזוק משמעותי של קונסטרוקציית המבנה. לחיזוק הזה יש עלות ניכרת, הנמדדת לא רק במונחים כספיים, אלא חומרי גלם (תוספת בטון ופלדה) אשר יש בהם אנרגיה גלומה ניכרת – ולכן גם פגיעה משמעותית בסביבה.

**ב. צריכת מים**

ברוב ארצות העולם, גג ירוק יכול להתקיים כל השנה ללא השקיה. באקלים הארץ, לעומת זאת, שבו שיעור האידוי השנתי עולה במידה רבה מאוד על כמות המשקעים אפילו בצפון המדינה, גג ירוק לא יכול להתקיים ללא השקיה. גם צמחים חסכוניים במים, כגון זיפנוצה חבויה (דשא קיקויו), אפטניה לבובה, ססוביום ומלוחית הרגלה דורשים השקיה בכמות של 3-8 ליטר למ״ר ביום בחודשי הקיץ באזור החוף הלח, ואף יותר מכך באזורי הארץ האחרים [64]. כאשר עובי התשתית קטן (10-20 ס״מ), מצטברים בה בהדרגה מלחים הנמצאים במי ההשקיה, כך שיש צורך להביא בחשבון החלפה תקופתית של המצע או נטיעת צמחייה המתאימה לקרקעות מליחות. לבסוף, יש להביא בחשבון את יכולתם של הצמחים לשרוד תקופות ממושכות יחסית ללא השקיה. כאשר מביאים בחשבון את כל הדרישות האלה, במקביל לתועלת המתקבלת מן ההגנה על הגג, נמצא כי האפטניה, שלה עלווה בשרנית בצבע ירוק עז ופרחים אדומים, היא הצמח המתאים ביותר לגגות אקסטנסיביים בישראל. חשוב להדגיש, עם זאת, כי גם האפטניה צורכת מים לא מועטים, וכי יישום בקנה מידה רחב של גגות ירוקים על בניינים בכל הארץ יגדיל את הביקוש למים במידה משמעותית – דווקא בתקופה שבה המחסור במים נעשה מוחשי מתמיד.

**ג. עלות**

עלות ההתקנה של גג ירוק גבוהה במידה ניכרת מהעלות של גג לא צמחייה. בתמורה, בעלי הבניין מצפים ליהנות מיתרונותיו של הגג. מחקר אשר בחן את הערך הכלכלי ארוך הטווח של גגות ירוקים בארה״ב [65] בהשוואה לגגות ללא צמחייה מצא שבסיכום כל התועלות אשר אותן ניתן לכמת במונחים כספיים, הגגות הירוקים היו פחות כדאיים מגגות לבנים ואפילו מגגות כהים. המחקר בחן את התועלת המצטברת בתקופה של 50 שנה, והביא בחשבון לא רק את החיסכון בעלויות מיזוג אוויר וחימום אלא גם את הערך של הפחתת הזיהום ופליטת פחמן דו-חמצני בעת הפקת החשמל עקב חיסכון זה, את ההקטנה בנגר העילי ואגרת הניקוז, את אורך החיים של הגג ואת ההבדלים בעלויות האחזקה השוטפות, לרבות השקית הצמחייה. אולם לא פחות חשובה מהמסקנה הסופית היא העובדה שבבניינים אשר נבחנו במדגם, בכל רחבי ארצות הברית, נמצאו הבדלים גדולים מאוד

[64] Schweitzer et al, 2014.
[65] Sproul et al, 2014

אשר הושפעו מהאקלים המקומי וממאפייני הגגות – אך רק גג ירוק אחד מתוך 22 בניינים במדגם נמצא כדאי מבחינה כלכלית, והעלות הנוספת הממוצעת של גג ירוק לאורך מחזור החיים, בהשוואה לגג לבן, היתה 96 דולר למ״ר.

## 6. רצפה וקורות יסוד

בבניינים רבי קומות קומת הקרקע משמשת במקרים רבים כמבואה, איננה מאוכלסת באופן קבוע ולפיכך גם אינה מאוקלמת. בבניינים צמודי קרקע אין הדבר כך: קומת הקרקע היא הקומה החשובה ביותר, וההתנהגות התרמית שלה מושפעת במידה לא מעטה מתכונות הרצפה והטיפול בקורות היסוד כמפורט להלן.

### 6.1 המגע התרמי עם הקרקע

שינויי הטמפרטורה בקרקע תלויים בתכונות התרמיות של האדמה, ומושפעים בין היתר מתכולת הרטיבות שלה. אפשר לאפיין אותה בשתי תכונות עיקריות:

א. ככל שהעומק מתחת לפני השטח גדל, כך קטנה משרעת הטמפרטורה. בעוד שפני הקרקע עשויים להתחמם לטמפרטורה העולה על טמפרטורת האוויר ב-15 מעלות או יותר בימי קיץ בהירים, ולהתקרר אל מתחת לטמפרטורת האוויר בלילות חורף ללא עננים, הרי שבעומק של עשרות סנטימטרים בודדים הטמפרטורה תהיה קבועה (בקירוב) במהלך היומי.

ב. ככל שהעומק מתחת לפני השטח גדל, כך גדל פיגור הזמן ביחס לטמפרטורת השיא החיצונית. בעומק של כ-1.5-2 מטרים מתחת לפני הקרקע, הטמפרטורה קבועה (בקירוב) במהלך החודשי, ושווה בערך לטמפרטורה היומית הממוצעת של האוויר – בפיגור של חודש.

לדוגמא:

נתוני אקלים ארוכי טווח מראים טמפרטורת הקרקע בהר הנגב (שדה בוקר) בעומק של 1 מ' אינה יורדת מ-14 מעלות, בקירוב, ואינה עולה על כ-28 מעלות.

| | **טמפרטורה שנתית** (צלזיוס) | | |
|---|---|---|---|
| | אוויר | פני הקרקע | קרקע בעומק 1 מ' |
| מינימום | 0.2 | -2.4 | 13.8 |
| ממוצע | 18.4 | 21.0 | 21.0 |
| מקסימום | 39.3 | 54.0 | 27.4 |

כאשר נבנה בניין על הקרקע, נוכחותו מנתקת את הקרקע אשר מתחת רצפתו מהמגע עם הסביבה (אוויר וקרינת שמש), ומעבר החום עשוי להתרחש במהלך אופקי בקרקע עצמה. למגע התרמי עם הקרקע עשוי אפוא להיות יתרון – הקרקע תשמש כמסה תרמית נוספת לבניין, בטמפרטורה אשר במרבית השנה תהיה בתחום הנוחות או קרובה לכך.

### 6.2 בידוד קורות היסוד והיקף הרצפה

על מנת ליהנות מיתרונות המגע התרמי עם הקרקע, יש למנוע מעבר חום דרך קורות היסוד ובהיקף הרצפה, עד למרחק של לפחות 1 מ׳ מהיקף הבניין, ובאזורים בהם הטמפרטורה גבוהה או נמוכה

במיוחד (אזורים ג' או ד' – 2 מ'). זאת משום שהקרקע ברצועה הזאת עלולה להיות חשופה לטמפרטורות נמוכות מדי בחורף וגבוהות מדי בקיץ.

**א. בידוד קורות היסוד**

הבידוד התרמי של קורות היסוד יכול להתבצע באמצעות לוחות פוליסטירן בשיחול, שהינם עמידים במים ובעלי קיים ארוך, המיושמים בתוך התבנית לפני היציקה. לחלופין, ניתן להשתמש בתבניות מחומר מבודד המתחברות זו לזו כמו אבני לגו [66], כמתואר בצילום ז-3 :

**צילום ז-3. יציקת קורות יסוד בתבניות פוליסטירן מבטיחה בידוד תרמי מעולה והגנה על הבטון.**

**ב. בידוד הרצפה**

אם גובהן של קורות היסוד קטן מ-1 מ', יש צורך לבודד גם רצועה ברוחב של כ-1מ' בהיקף הרצפה. הבידוד ייעשה באמצעות לוחות פוליסטירן אשר יונחו על גבי ארגזי היציקה (אף שאלו עשויים גם הם פוליסטירן מוקצף, בדרך כלל, העובי האופייני הוא כ-1 ס"מ בלבד). עובי הבידוד התרמי הנוסף הדרוש הוא כ- 2 ס"מ. הבידוד הנוסף דרוש בעיקר באזורי אקלים ג' וד'.

## 6.3 חומרי ריצוף

לחומרי הריצוף ישנה השפעה על התפקוד התרמי של הדירה ועל הנוחות התרמית של הדיירים. ההשפעה באה לידי ביטוי במספר תכונות שונות של החומרים – ההתנגדות התרמית שלהם, קיבול החום שלהם והאפוסיביות שלהם.

חומרי הריצוף המסורתיים בארץ הם חומרים בעלי מוליכות תרמית גבוהה וקיבול חום גבוה, כגון מרצפות טרצו, מרצפות קרמיקה וריצוף אבן או בטון מלוטש חשוף. ריצוף זה תורם ליציבות התרמית של הדירה גם בזכות עצמו וגם משום שהוא נמצא במגע תרמי טוב עם התשתית ועם הרצפה הנושאת.

[66] תבניות כאלה, המכונות באנגלית ICF – Insulating Concrete Forms - משמשות גם ליציקת קירות, אולם יישום כזה פחות מומלץ משום שחלק מהבידוד התרמי פנימי.

בשנים האחרונות נעשה שימוש רב יותר בחומרי ריצוף כגון פרקט (בעיקר מעץ מעובד אך גם מעץ טבעי) ושטיחים. חומרים אלה הם בעלי קיבול חום נמוך ומוליכות תרמית נמוכה. לכן הם תורמים מעט מאוד ליציבות התרמית של הדירה, וגם יוצרים חיץ בין חלל הדירה והמסה התרמית הנמצאת ברצפה הנושאת. דירה המרוצפת בפרקט צפויה להתחמם מהר יותר בחשיפה לקרינת שמש, ולהתקרר מהר יותר בלילה בהשוואה לדירה עם ריצוף קשיח כגון קרמיקה.

כפי שהוסבר בפרק ד', האפוסיביות הגבוהה של בטון יוצרת תחושה של קרירות כאשר כף הרגל החשופה באה איתו במגע. לכך יש יתרון בקיץ, אך חיסרון בחורף – בלי קשר למאזן האנרגיה של הדירה כולה.

## 7. מרפסות

מרפסות מהוות כמעט תמיד נקודת תורפה במעטפת התרמית של הבניין, ודורשות טיפול מיוחד.

### 7.1 מרפסת גג

את מרפסת הגג יש לבודד כפי שמבודדים כל גג חשוף של הבניין. לכאורה, אין בכך קושי טכני: מניחים לוחות של בידוד תרמי קשיח (כגון פוליסטירן מוקצף) על הגג הנושא ומתחת לריצוף בעובי אשר יבטיח התנגדות תרמית מתאימה, לפי הנדרש בתקן בהתאם לאזור האקלים. מעל הבידוד התרמי יוצקים בטון שיפועים ומתקינים את האיטום למים, ומעליהם את הריצוף, לרוב על מצע חול. כאשר הפרש הגבהים הדרוש על מנת להבטיח ניקוז יעיל קטן, ניתן לוותר על בטון השיפועים וליצור את הניקוז באמצעות שכבת מדה אשר עליה יודבק הריצוף. את האיטום למים אפשר במקרה כזה לבצע ישירות על הגג הנושא, מתחת לבידוד התרמי.

בפועל, הצורך לבצע שיפועים בריצוף לניקוז מי הגשם, מקשה מאוד על קבלת ריצוף במפלס זהה למפלס הרצפה הפנימית בדירה, אלא אם המרפסת קטנה והמרחק למרזב קטן. כאשר מוסיפים לכך את העובי הדרוש לשכבת הבידוד עצמה – כ-5 ס"מ - לא ניתן לשמור על מפלס אחיד בין הריצוף הפנימי והחיצוני. אם מבקשים להימנע מסף מוגבה ביציאה למרפסת, ניתן ליישם אחד מהפתרונות הבאים:

- הגבהת המפלס של הרצוף הפנימי באופן מלאכותי, למשל באמצעות לוחות פוליסטירן מוקצף.
- יצירת הפרש גובה בתקרת הבטון הנושאת, כך שהמרפסת תהיה נמוכה יותר, דבר המחייב תיאום גם עם תכנית הדירה בקומה הנמוכה.

### 7.2 מרפסת זיזית

בעבר היתה המרפסת בדרך כלל רכיב חיצוני, לפעמים עשוי כולו עץ ולפעמים נשען על קורות עץ או פלדה, או אפילו על עמודים חיצוניים. כיום, ובעיקר בבניינים רבי קומות, רצפת המרפסת מהווה המשך רציף של תקרת הביניים הפנימית, היצוקה בטון. מרפסת זיזית כזו עלולה להוות מחליף חום יעיל מאוד עם הסביבה, בדומה לצלע ברדיאטור: שטח הפנים שלה הוא גדול והיא חשופה מכל צדדיה. לכן יש להתייחס אל מרפסת כאל גשר תרמי לכל דבר. ישנם מספר פתרונות אשר ניתן ליישם על מנת להפחית את מעבר החום דרך רצפת המרפסת.

- הוספת פס הפרדה תרמי בתוך רצפת הבטון. הקשר בין שני חלקי הרצפה – הפנימי והחיצוני – מתקיים רק באמצעות פלדת הזיון. פתרונות כאלה מיושמים בארצות עם אקלים קר, אבל דורשים זיון מיוחד ברצפה והקפדה מיוחדת על הביצוע.
- השענת המרפסת על זיזי פלדה אשר יוכלו לקבל בידוד תרמי מקומי ביתר קלות.

- הוספת בידוד תרמי בתחתית הרצפה ומעליה ברצועה ברוחב של כ-1.2-1 מ' בהיקף המעטפת. פתרון זה זהה למעשה לאחד הפתרונות המקובלים למניעת גשר קור במפגש בין תקרת ביניים לקיר חיצוני בבנייה המתועשת. רוחב רצועת הבידוד נקבע כך שההתנגדות התרמית של הבטון במקביל למישור הרצפה לא יהיה פחות מהנדרש לגשרים תרמיים אחרים (0.6 מ"ר קלווין / ואט), בתנאי שהשטח הכולל של הגשרים התרמיים לא יעלה על 20% משטחו של הקיר החיצוני. עובי שכבת הבידוד, הן מעל הרצפה והן בתחתיתה, יענה אף הוא על הדרישות לגשרים תרמיים (שווה ערך ל-2 ס"מ פוליסטירן מוקצף). את רצועת הבידוד ניתן גם ליישם בצד החיצוני של מישור הקיר, פתרון עדיף מבחינה תרמית, אם כי יש להניח שאם הבידוד התרמי בשאר הדירה הוא פנימי, הבידוד יהיה פנימי גם כאן.

## 8. סיכום

כדי להעניק הגנה אקלימית אמתית, הגג חייב להקטין ככל האפשר את עומס החום הקרינתי שמוטל עליו. האמצעי הבסיסי להשגת מטרה זו הנו שכבת בידוד תרמי בעל התנגדות גבוהה כדי למנוע התחממות יתר בקיץ והתקררות יתר בחורף. מומלץ שהשכבה המסיבית של הגג תהיה פנימית (מתחת לבידוד) ושהבידוד עצמו יהיה מוגן ע"י חומר גמר בהיר או אמצעי הצללה עליונים. ניתן להפחית עוד מהעומס האנרגטי באמצעות תכנון צורני תלת-ממדי, אשר מפזר את קרינת השמש ומאפשר קירור יעיל בימי הקיץ – וגם חוסך באנרגיית ייצור.

## מקורות

[1] השירות המטאורולוגי (2013). ערכי טמפרטורה רב שנתיים 1995-2009.

[2] ASTM International (2011). E1980 – Standard Practice for Calculating Solar Reflectance of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces. http://enterprise1.astm.org/DOWNLOAD/E1980.000143312-1.pdf, accessed July 17 2014.

[3] Levinson R., Akbari H. and Reilly J. (2007) "Cooler tile-roofed buildings with near-infrared-reflective non-white coatings". Building and Environment 42:2591:2605.

[4] Palomo Del Barrio E. (1998) "Analysis of the green roofs cooling potential in buildings", Energy and Buildings 27:179-193.

[5] Schweitzer O. and Erell E. (2014) "Evaluation of the energy performance and irrigation requirements of extensive green roofs in a water-scarce Mediterranean climate". Energy and Buildings, 68:25–32.

[6] Sproul J., Wan M., Mandel B. and Rosenfeld A. (2014). Economic comparison of white, green, and black flat roofs in the United States. Energy and Buildings 71:20-27.

[7] Synnefa A., Santamouris M. and Apostolakis K. (2007) "On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment". Solar Energy 81:488-497.

[8] Urban B. and Roth K. (2010). Guidelines for Selecting Cool Roofs. U.S. Dept. of Energy. http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/coolroofguide.pdf, accessed Jul 17 2014.

# פרק ח:

# מערכות זיגוג במעטפת הבניין

# פרק ח: מערכות זיגוג במעטפת הבניין

הפתחים בבניין מהווים את אחד מהאמצעים החשובים ביותר לעיצוב האדריכלי, ולעיתים קרובות גודלם ומיקומם נקבע מטעמים אסתטיים, ולאו דווקא על פי צורכיהם של דיירי הבניין. אף על פי כן, ואולי דווקא בשל כך, יש לפתחים השפעה מכרעת על התפקוד האנרגטי של הבניין, ולמערכות הזיגוג השפעה רבה ביותר על התפקוד התרמי של הבניין – לטובה ולרעה. בעוד שאת חלקי המעטפת האטומה של הבניין (קירות, רצפה ותקרה) יש לתכנן כך שמעבר האנרגיה דרכם יהיה מזערי, הרי שמערכת הזיגוג, בעצם מהותה, מיועדת להעביר אנרגיה (אור) או מסה (אוויר). תכנון הפתחים בבניין – גודלם, מיקומם והרכבם, הוא נושא פרק זה.

## 1. הגדרה

מערכת זיגוג במעטפת החיצונית של בניין כוללת יחידת זיגוג אחת או יותר, ויכולה לכלול גם מסגרת, פרופילי חלוקה (פרופילים המחלקים את השמשה) ואמצעי הצללה אינטגרלי. יחידת הזיגוג יכולה להיות עשויה זכוכית, פלסטיק או כל חומר אחר שדרכו יכול לעבור אור.

בארץ ובעולם קיים מגוון גדול מאוד של מערכות זיגוג הנבדלות זו מזו באופן ההתקנה שלהן, באופן השימוש בהן ובהשפעתן על צריכת האנרגיה הדרושה לאקלום הבניין, לאוורורו ולהארתו. לא ניתן להגדיר מערכת זיגוג 'אופטימלית' אלא בהקשר של המאפיינים של בניין נתון ושל דפוסי השימוש בו.

## 2. מעבר אנרגיה דרך מעטפת הבניין

ככלל, רצוי שחלקי מעטפת הבניין האטומים לאור יתוכננו וייבנו כך שמעבר האנרגיה דרכם יהיה מזערי. זאת ניתן להשיג באמצעות שילוב מתאים של בידוד תרמי ומסה תרמית בחומרים מהם עשויה המעטפת. פתחי המעטפת, ובפרט מערכות הזיגוג, מיועדים אפוא לאפשר מעבר אנרגיה מבוקר דרך המעטפת – לתאורה, לאוורור או לחימום. המטרה האחרונה – דהיינו חימום – קיבלה בעשורים האחרונים תשומת לב הולכת וגדלה, והיא נדונה בהרחבה בהמשך פרק זה, תחת הכותרת חימום פסיבי.

מעבר האנרגיה דרך מערכות הזיגוג בבניין מתרחש בהולכה, כמו דרך המעטפת האטומה, אך גם בקרינה – משום שחומר הזיגוג הוא שקוף (במידה כזו או אחרת), וגם בהסעה – בין אם המערכת מתוכננת לפתיחה לצורך אוורור, ובין משום שלרוב מערכת הזיגוג איננה אטומה לגמרי למעבר אוויר גם כאשר היא סגורה.

מערכת הזיגוג יכולה להיות נטל או נכס, כתלות בשלושה גורמים אשר לכולם השפעה מכרעת על מידת התועלת שהפתח מביא בפועל:

א. תכנון מתאים

ב. ייצור והרכבה ברמה נאותה

ג. תפעול נכון של הדייר

די בכך שאחד מן הגורמים בשרשרת אינו ממלא את תפקידו כראוי בכדי להביא לכך שהפתח לא ימלא את ייעודו בבניין.

## 3. גודל הפתחים במעטפת ומיקומם

במרבית בנייני המגורים בארץ, נקבע גודלם של הפתחים המזוגגים (בעיקר חלונות ודלתות זכוכית) לפי נוהג, אשר נוצר בהשפעת הניסיון המצטבר וההעדפות של מרבית הדיירים, וכן משיקולי עלות ודרישות תקנות הבנייה. כך למשל, גודלם של חלונות בחדרי שינה הוא בדרך כלל בערך כמטר רבוע אחד, בעוד שבחדרי המגורים מקובל לתכנן דלתות הזזה גדולות המאפשרות יציאה אל המרפסת, בשטח כולל של כארבעה מ״ר או יותר. מיקומם של הפתחים נקבע אף הוא לפי נוהג, הקובע, למשל, שהפתחים הגדולים בחדרי המגורים (והמרפסת) פונים אל הרחוב, כחלק מהחזית הקדמית הראשית או כלפי החזית האחורית. תכנון גודלם ומיקומם של הפתחים המזוגגים אינו מושפע, בדרך כלל, מהפנות שלהם, כך שתכנון דירה הפונה מערבה עשוי להיות זהה לתכנון של דירה הפונה דרומה. מההיבט האקלימי והאנרגטי – אין טעות קשה מזו!

כפי שהוסבר בפרק ה׳, חלונות הפונים לכיוונים שונים יהיו חשופים לקרינת השמש במידה שונה, בהתאם לעונות השנה. בעוד שחלון דרומי ייהנה מחשיפה רבה לשמש בחורף וחשיפה פחותה בהרבה בקיץ, הרי שחלונות הפונים למזרח או למערב יזכו למעט שמש בחורף, כאשר אנרגית השמש רצויה, והרבה מאוד שמש בקיץ, כאשר האנרגיה אינה רצויה (ראו תרשים ה-4). לכן, חלונות גדולים הפונים לכיוון לא מתאים (בעיקר מזרח ומערב) גורמים לנזק כפול: ראשית, משום שאינם מאפשרים ליהנות מאנרגית שמש לחימום בחורף; ושנית, משום שהם גורמים לעומס מיותר בקיץ.

בהתאם לכך, קובעים התקנים הישראליים מגבלות על גודלם של החלונות, בנוסף לדרישות הקיימות בתקנות התכנון והבנייה:

לפי ת״י 5280-1.1 (אנרגיה בבניינים: מעטפת הבניין – בנייני מגורים), בשיטה המרשמית:

> ״השטח הכולל של מערכת הזיגוג של יחידת התכנון לא יהיה גדול מ-20% משטח רצפת היחידה. בחישוב השטח של מערכת הזיגוג כוללים את השטח ברוטו של כל המערכת, על כל חלקיה הקבועים והניידים, לרבות חלקים מזוגגים, מסגרות, פרופילי חלוקה וכדומה.״

ת״י 5282-1: דרוג בניינים לפי צריכת אנרגיה – בנייני מגורים, מציב דרישות מפורטות יותר, המתייחסות לגודלם של החלונות – לפי הכיוון ולפי הדירוג המבוקש, בהתאם לאזורי האקלים השונים בארץ. כך למשל באזור אקלים ד׳ (אילת והערבה), על מנת לזכות בדירוג גבוה יש להתקין חלונות קטנים, במיוחד בחזיתות מזרח ומערב (ראו טבלה ח-1, המציגה את דרישות התקן). זאת על מנת להפחית את עומס החום, הן בקרינה והן בהולכה.

### טבלה ח-1. דרישות ת"י 5282-1 ביחס לגודל חלונות באזור אקלים ד'.

**טבלה 14 - השטח היחסי של חלונות יחידת דיור באזור אקלים ד**

| השטח הכולל של מערכות הזיגוג בכל הכיוונים יהיה קטן מ-20% משטח הרצפה הכולל של יחידת דיור. | | | | |
|---|---|---|---|---|
| סך שטח מערכות הזיגוג בכיוונים השונים: | | | | |
| כיוון החזית | דרגה | | | |
| | E או D | C | B | A |
| צפון(א) | - | - | - | - |
| דרום | - | - | - | - |
| מזרח | - | - | עד 10% | עד 10% |
| מערב | - | עד 8% | עד 8%(ב) | עד 5%(ב) |
| צפון מזרח | - | - | - | - |
| צפון מערב | - | - | - | עד 8%(ב) |
| דרום מזרח | - | - | - | עד 8%(ב) |
| דרום מערב | - | עד 8% | עד 8%(ב) | עד 5%(ב) |

**הערה לטבלה:**

(א) כאשר מערכת החלונות בכיוון צפון היא מעל 10%, תבניין ידורג בדרגה אחת יותר גבוה (כולל דרגה A+).

(ב) החלונות הנוספים חייבים לפנות לכיוונים צפון או צמ״ז.

באזור ג' (אזור ההר), לעומת זאת, מעודד התקן התקנת חלונות גדולים בכיוון דרום – בכדי להגדיל את פוטנציאל החימום הפסיבי בחורף, בצד חלונות קטנים בשאר החזיתות (טבלה ח-2), בכדי להפחית את מעבר החום בהולכה.

**טבלה ח-2. דרישות ת"י 5282-1 ביחס לגודל חלונות באזור אקלים ג'.**

**טבלה 12 - השטח היחסי של מערכות הזיגוג ביחידת דיור באזור אקלים ג**

| השטח הכולל של מערכות הזיגוג בכל הכיוונים יהיה קטן מ-25% משטח הרצפה הכולל של יחידת דיור. | | | | |
|---|---|---|---|---|
| השטח היחסי של מערכות הזיגוג בכיוונים השונים: | | | | |
| כיוון החזית | דרגה | | | |
| | D או E | C | B | A |
| צפון | - | עד 20% | עד 20% | עד 10% (ב) |
| דרום (א) | - | - | - | - |
| מזרח (ב) | - | עד 20% | עד 20% | עד 10% |
| מערב (ב) | - | עד 20% | עד 20% | עד 10% |
| צפון מזרח+ צפון מערב (ב) | - | עד 20% | עד 20% | עד 10% |
| דרום מזרח | - | - | - | - |
| דרום מערב | - | - | - | - |

**הערה לטבלה:**

(א) כאשר השטח הכולל של מערכות הזיגוג בכיוונים דרום ודמ"ז הוא מעל 15% משטח הרצפה, הבניין ידורג בדרגה אחת יותר גבוה (כולל דרגה A+), בתנאי שלפחות 50% משטח הזיגוג בחזיתות אלו יהיה חשוף לשמש ישירה ביום 21 לדצמבר בשעות 11:00 ו- 12.00.

(ב) החלונות הנוספים חייבים לפנות לכיוונים דרום או דמ"ז.

## 3.1 פתחים החורגים ממישור הקיר

מקובל שמערכת הזיגוג מותקנת בפתח אשר נבנה לשם כך במישור הקיר. הגדרת הכיוון של מערכות הזיגוג בתקן תואמת את האופן שבו מיוצרים מרבית החלונות בפועל. אולם ניתן לבנות חלון בקיר כך שמישור הזיגוג לא יפנה לאותו כיוון כמו שאר הקיר. מישור הזיגוג יכול להיות לא רק בנסיגה כלפי פנים אלא גם בזווית, כפי שמראה צילום ח-1. היתרון העיקרי בפתרון זה הוא האפשרות לקבל הצללה עמוקה של מישור הזיגוג, וחשיפה לקרינה מפוזרת ללא קרינת שמש ישירה. החסרונות, לעומת זאת, הם הגדלת שטח המעטפת, יצירת חלל פנימי לא רגולרי וייקור הבנייה.

**צילום ח-1. מישור הזכוכית נמצא בזווית כלפי מישור הקיר.**

פתרון מקובל יותר הוא הבלטת החלון כלפי חוץ. בארצות הקרות הדבר נעשה במטרה ליצור פינת ישיבה חשופה לשמש – bay window. בארצות ערב הפתח משולב במשרביה ויוצר פינת ישיבה מאווררת ומוצלת. בשני המקרים, מדובר בהגדלה משמעותית של מעטפת הבניין, אשר עלולה להביא למעבר אנרגיה לא מבוקר בהיקף משמעותי. אולם בשני המצבים עשוי להיות יתרון – בחשיפה לשמש או לאוורור, אשר בתכנון נכון עשוי להיות מבוקר ומועיל.

**צילום ח-2. החלון בולט החוצה ממישור הקיר, ומגדיל את שטח המעטפת ואת החשיפה לסביבה. מימין: bay window. משמאל: משרביה.**

## 4. יחידת הזיגוג

יחידת הזיגוג מהווה את החלק העיקרי במערכת הזיגוג, אולם בנוסף אליה עשויים להיות גם מסגרת ומערכת הצללה. יחידת הזיגוג מיועדת בראש ובראשונה להחדיר אור לבניין. לרוב, אם כי לא תמיד, היא מאפשרת גם מבט החוצה בעדה. הזיגוג מותקן בדרך כלל בצורת לוח שטוח אשר עוביו דק מאוד, המכונה שמשה, אך הוא עשוי להיות גם רכיב בעל ממדים שונים לגמרי, כגון לבני זכוכית. לסוג הזיגוג ישנה השפעה מכרעת על מעבר החום בהולכה ובקרינה, ולפיכך על תפקוד מערכת הזיגוג כולה.

### 4.1 השפעת הזיגוג על מעבר אנרגיה בקרינה

כאשר קרינה פוגעת בשמשה, חלקה עובר דרך הזיגוג, חלקה מוחזר ממנו וחלקה נבלע בו. עד לפני שנים לא רבות, היו השמשות במערכות הזיגוג הנפוצות 'שקופות'. כלומר, הן יוצרו כך שתהיינה להן השפעה מזערית על מעבר קרינת השמש, ובפרט על מעבר אור (נראה). היום, ניתן להזמין יחידות זיגוג אשר כוללות שמשות המעבירות רק חלק מקרינת השמש: היתרה נבלעת בשמשה או מוחזרת ממנה.

### 4.2 סימון התכונות של יחידות הזיגוג

תכונות יחידות הזיגוג נתונות על ידי היצרן. הסימון המקובל כולל את התכונות הבאות:

- העברות אור (VT - visible transmissivity): החלק היחסי מקרינת השמש בתחום הנראה לבני אדם העובר דרך הזיגוג. הסימון יכול להופיע באחוזים או כשבר עשרוני.
- מקדם רווח חום סולרי (SHGC - solar heat gain coefficient, או מקדם g): היחס בין רווח החום הסולרי ליחידת שטח של הזיגוג כתוצאה מפגיעת קרינת השמש בה, לבין שטף הקרינה הפוגעת. בחישוב רווח החום הסולרי מביאים בחשבון לא רק את ההעברות

(transmissivity) של הזיגוג אלא גם את קרינת השמש הנבלעת בשמשה, מחממת אותה ואח״כ נפלטת לתוך הבניין בצורת קרינה אינפרה אדומה או בהסעה.

הערות:

1. בחישוב רווח החום הסולרי מביאים בחשבון לא רק את ההעברות (transmissivity) של הזיגוג אלא גם את קרינת השמש הנבלעת בשמשה, מחממת אותה ואח״כ נפלטת לתוך הבניין בצורת קרינה אינפרה אדומה או בהסעה.

2. הנתונים אשר מספקים היצרנים הם עבור קרינה הפוגעת בניצב למישור הזיגוג. עם שינוי זווית הפגיעה משתנה היחס בין ההחזרה לבליעה ולהעברה. בזווית פגיעה של כ-$60^{o}$ ומעלה יעלה מקדם ההחזרה (R) לערך של כמעט 1, וכמעט כל הקרינה שתפגע בזיגוג תוחזר ממנו (גם בזיגוג ׳רגיל׳, ללא ציפוי מראה).

3. בעבר היה נהוג לסמן את רווח החום דרך שמשה באמצעות ׳מקדם ההצללה׳ (SC- shading coefficient), שהוא היחס בין רווח החום הסולרי ליחידת שטח של הזיגוג כתוצאה מפגיעת קרינת השמש בה לבין רווח החום המתקבל בשמשת ייחוס בעובי 3 מ״מ. ניתן להמיר את מקדם ההצללה למקדם רווח חום סולרי של שמשה על ידי מכפלה בערך 0.87. לדוגמא: מקדם ההצללה של שמשה שקופה בעובי 3 מ״מ מן הסוג שהיה מקובל להתקין ברוב החלונות בבנייני המגורים בארץ הוא ׳1׳, אך מקדם רווח החום הסולרי של אותה שמשה הוא 0.87.

- החזרת קרינת שמש (reflectivity): היחס בין קרינת השמש המוחזרת מן השמשה לבין שטף הקרינה הפוגעת. חלק מן היצרנים מסמנים בנפרד את ההחזרה עבור כל אחד מצידי השמשה (פנימי או חיצוני), במיוחד כאשר על הזיגוג קיים ציפוי מיוחד, כגון ציפוי בעל פליטות נמוכה (low-e).
- מקדם הבליעה של הזיגוג (absorptivity): היחס בין קרינת השמש הנבלעת בשמשה לבין שטף הקרינה הפוגעת.
- מוליכות תרמית (U-value - thermal transmittance): מעבר חום ליחידת זמן דרך יחידת שטח של הזיגוג ושכבות הגבול של האוויר הנמצא במגע איתו, כתוצאה מהפרש טמפרטורות של מעלה אחת בין הסביבות שבשני צידי המערכת. הסימון נעשה ביחידות של ואט/מ״ר קלווין.

## 5. תכנון מערכות הזיגוג

לא ניתן להמליץ על זיגוג מסוים כ״זיגוג אידיאלי״, משום שבחירת חומר הזיגוג תלויה בשיקולים רבים, כגון מבט אל הנוף, תאורת יום או שיקולי עיצוב. לכל מערכת זיגוג יתרונות וחסרונות, ויש לשקול כל מקרה לגופו.

תכנון מערכות הזיגוג חייב להביא בחשבון את השפעתן המורכבת על הבניין ועל השוהים בו. אם מערכת הזיגוג לא תאפשר נוחות ויזואלית ותרמית של דיירי הבניין, עלולים אלה לנקוט בצעדים אשר משמעותם נטרול התועלת שבה. כאשר הזיגוג חסום על ידי אמצעי הצללה – תקניים או מאולתרים – האפשרות לנצל את קרינת השמש לתאורה טבעית או לחימום פסיבי פוחתת.

במערכת זיגוג יעילה קיימת הפרדה בין חלקיה השונים, בהתאם לתפקודם: חלק ממנה עשוי להיות מיועד לתאורה טבעית, חלק לחימום פסיבי, וחלק שלישי לאוורור. כל אחד מחלקי המערכת בחלל נתון עשוי להיות בעל מאפיינים שונים, כגון גודל, מיקום, סוג זיגוג, פתיחה וכיו״ב.

**בדרך כלל לא ניתן לשלב את כל התפקודים ביחידת זיגוג אחת!**

## 5.1 בחירת יחידת הזיגוג

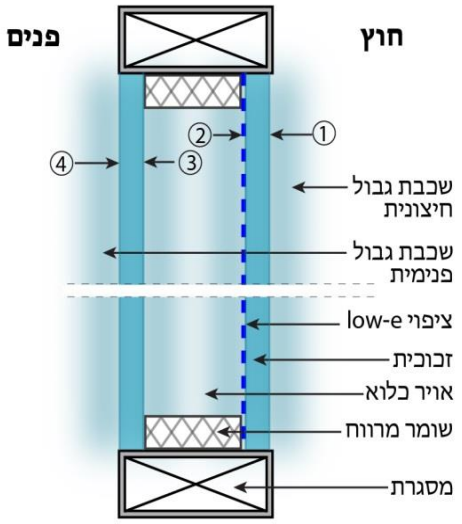
יחידת זיגוג יכולה להיות מורכבת משמשה יחידה או ממספר שמשות, בהרכבים שונים. עד לאמצע המאה העשרים, עיקר השיפור בשמשות לבניין התבטא באפשרות לייצר יחידות זכוכית שטוחות בממדים הולכים וגדלים ובעלות שקיפות רבה ככל האפשר, ללא עיוותים וללא פגיעה בהעברת הצבע. ההתפתחויות בטכנולוגית ייצור הזכוכית בשנים האחרונות הולידו מוצרים אשר שינו לחלוטין את ההתייחסות לזכוכית כרכיב מעטפת בבניין. כיום ניתן לקבל שמשות בעלות תכונות אופטיות שונות, ולהרכיב באמצעותן מערכות זיגוג משוכללות בהתאם לצרכים. עם זאת, הידע הנדרש על מנת לאפיין מערכת זיגוג מתאימה הוא רב יותר. מאחר והנטייה בשנים האחרונות היתה להגדיל את השימוש בזכוכית כאלמנט מעטפת, ישנה חשיבות רבה בבחירה של מערכת מתאימה.

**א. זיגוג 'חם': שימור אנרגיה בבניין**

באזורים קרים, כאשר דרוש חימום בחלק ניכר מן השנה, החלונות מהווים נקודת תורפה משמעותית במעטפת הבניין, אשר דרכה עלול להתרחש איבוד אנרגיה רב. לפיכך, מערכות זיגוג באזורים אלו צריכות להיות בעלות מוליכות תרמית נמוכה ככל האפשר. מוליכות תרמית נמוכה אפשר לקבל רק באמצעות מערכת זיגוג העשויה מספר שמשות.

בתנאי הארץ אין צורך במערכת זיגוג בעלת יותר משתי שמשות (זיגוג כפול), אולם רצוי כי באחת השמשות יהיה ציפוי בעל פליטות נמוכה (low-emissivity coating, או בקיצור ציפוי low-e). ניתן להסתפק בכך שהחלל שבין שתי השמשות יהיה מלא אוויר, ואין צורך במילוי של גז אציל כגון ארגון, בו נהוג להשתמש בארצות קרות מאוד.

איור ח-1 מציג מבנה עקרוני של מערכת זיגוג כפול.




**איור ח-1. מבנה סכמתי של חלון עם זיגוג כפול.**

מקובל לסמן את משטחי הזיגוג מהחוץ פנימה: משטח '1' הוא החיצוני ו-'4' הוא הפנימי.

מאחר ולזכוכית עצמה ישנה מוליכות תרמית גבוהה מאוד, הרי שעיקר ההתנגדות למעבר חום בחלון בעל שמשה אחת היא תוצאה של שכבות הגבול הנוצרות באוויר הסמוך אליה, בשני צדדיה. בזיגוג כפול, ישנן ארבע שכבות גבול, ולא שתיים, ולכן היא מבודדת בערך פי שניים מזיגוג יחיד. לעובי הזכוכית, שהוא קטן מאוד ביחס לעובי הקיר (3-10 מ״מ, בד״כ) השפעה זניחה על ההתנגדות התרמית של מערכת הזיגוג. מאידך, לרוחב מרווח האוויר בין שתי השמשות ישנה חשיבות רבה: הבידוד התרמי המרבי מתקבל כאשר עובי המרווח הוא כ-15 מ״מ. מרווח קטן יותר יביא לירידה בהתנגדות התרמית.

הערה: המרווח בין השמשות המקובל בארץ בחלונות בבנייני מגורים הינו 6 מ״מ בלבד. הסיבה להקטנת המרווח ביחס לגודל האופטימלי מבחינת ההתנגדות התרמית היא הרצון לחסוך בעובי הפרופיל הנושא, ובהתאם לכך בכמות האלומיניום ובעלות החלון כולו.

תוספת ציפוי low-e על אחת מן השמשות מונע כמעט לחלוטין מעבר חום בקרינה בין השמשות, ומפחית את מעבר החום דרך מערכת הזיגוג לרבע מן הערך המקביל לזכוכית יחידה, בקירוב.

**המלצה: באזורים הקרים בארץ, רצוי להתקין זיגוג כפול עם ציפוי low-e, על מנת להפחית את איבוד החום בחורף. הציפוי יושם על משטח ׳2׳ או ׳3׳.**

### ב. זיגוג ׳קריר׳: הפחתת רווחי חום דרך הזיגוג בבניין

ברוב אזורי הארץ, למעט אזור ההר, עומס החום בקיץ הוא השיקול העיקרי בתכנון האקלימי של הבניין. על מנת להפחית את העומס התרמי על הבניין דרך הזיגוג, יש להתקין זיגוג אשר יאפשר תאורה טבעית נאותה אך יהיה בעל מקדם רווח חום סולרי נמוך ככל האפשר. בעבר היה מתאם גבוה בין מעבר האור ורווח החום הסולרי של זיגוג, אולם כיום ניתן למצוא זכוכיות אשר בהן היחס בין מקדם מעבר האור לבין מקדם רווח החום הסולרי (ערך K) עולה בהרבה על 1. למשל, זיגוג בעל מקדם מעבר אור של 0.65 ומקדם רווח חום של 0.45 ייתן יחס של 1.44. בזכוכיות הסלקטיביות הטובות ביותר בשוק כיום ניתן לקבל ערכי K הקרובים ל-2 או אף מעט למעלה מכך.

ישנן שתי שיטות עיקריות להפחית את רווח החום דרך הזיגוג:

1. זיגוג מגוון (׳כהה׳): סוג זיגוג זה מקטין את מעבר הקרינה דרכו בכך שחלק גדול מהקרינה הפוגעת נבלעת בו. הקרינה הנבלעת גורמת לעליית הטמפרטורה של הזכוכית בצורה ניכרת (זיגוג כזה יכול להגיע בתנאי הארץ לטמפרטורה של $50^{o}C$ או יותר ביום שטוף שמש). במקרה כזה, הזיגוג עצמו הופך לגוף חימום המקרין חום רב כלפי החלל הפנימי. על מנת להפחית את חימום הבניין, יש למנוע את פליטת החום כלפי פנים באמצעות ציפוי low-e.
2. זכוכית מחזירה (׳מראה׳): זיגוג בזכוכית מחזירה ימנע במידה הרבה ביותר את חדירת קרינה השמש אל הבניין. מאחר ורצוי שהזכוכית לא תהיה אטומה לחלוטין (כדי שניתן יהיה לראות דרכה את החוץ ובכדי לקבל מעט אור), גם פניה המחזירים (כלומר המבריקים) לא יחזירו את כל הקרינה הפוגעת בזיגוג, ועדיין תהיה חדירת קרינה בסדר גודל של 10-35%, לפי סוג הזיגוג שנבחר. יש לזכור כי השימוש בזכוכית מראה על פני חזיתות גדולות עלול לגרום מטרד לסביבה, או אף לגרום בעיה בטיחותית של סנוור אם הקרינה חוזרת אל כביש סמוך.

**המלצה: ברוב אזורי הארץ מומלץ להתקין מערכות זיגוג בעלות ערך K גבוה ככל האפשר, בעיקר בבניינים אשר בהם ישנם עומסים פנימיים גדולים כגון בניינים למשרדים, תעשייה עילית או מסחר.**

### ג. גוון הזכוכית

לעתים קרובות, גוון הזכוכית מהווה שיקול חשוב בעיצוב החיצוני של הבניין. עם זאת, חשוב לזכור כי לגוון הזכוכית השפעה על איכות האור ועל העברת הצבע בתוך הבניין. כך למשל חלון בעל גוון כחול יהיה בעל השפעה דומה לזה של מקור אור בעל פילטר כחול. כאשר כל החלונות בשדה הראיה הם בעלי גוון זהה, קשה להבחין בהבדלים בין הגוונים, אולם כאשר מעבר האור דרך הזיגוג הוא נמוך, החלל נראה חשוך והגוונים של עצמים בתוכו נראים עמומים. זכוכית אפורה היא בעלת ההשפעה המועטה ביותר על איכות העברת הצבע, אולם לא ניתן לפי שעה לקבל זכוכית אפורה בעלת ערך K גבוה.

**המלצה: בדרך כלל יש להעדיף זיגוג עם ערך K גבוה ככל האפשר, ולבחון חלל ניסיוני באתר בכדי לוודא שאין השפעה רבה מדי על גוון האור.**

**ד. זיגוג חלבי**

זיגוג שקוף מאפשר לראות בעדו, בעוד שזיגוג חלבי עשוי להעביר כמות אור דומה מבלי לאפשר מבט דרכו. זכוכית חלבית מתאימה למצבים אשר בהם אנו מעוניינים למנוע מבט מטעמי פרטיות, אך עם זאת לאפשר מעבר אור, או כאשר אנו מעוניינים לקבל אור מפוזר ורך. לא מומלץ להשתמש בזיגוג חלבי בחלונות נמוכים בלב שדה הראייה משום שהם עלולים להוות מקור לסנוור.

**ה. זכוכית שכבות ("טריפלקס")**

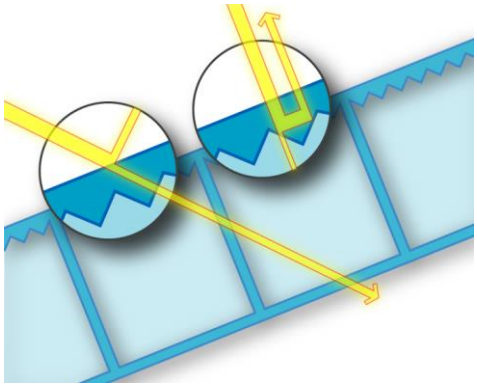
זכוכית שכבות עשויה שתים או שלוש שכבות של זכוכית וביניהן יריעה פלסטית דקה מאוד. היישומים העיקריים של זכוכית שכבות הם לצרכים אקוסטיים או קונסטרוקטיביים: זכוכית שכבות עמידה יותר בפני נזק מכני מאשר זכוכית יחידה בעובי דומה, ואיננה מתנפצת לרסיסים גם כאשר היא נשברת. עם זאת, ליריעה הפלסטית עשויים להיות גם יתרונות בתחום האופטי והתרמי. יריעות PVB מסננות את קרינת ה-UV כמעט לחלוטין, ובכך מקטינות מאוד את הנזק הנגרם לחפצים שונים בבניין כתוצאה מחשיפה לקרינת השמש. ניתן גם לגוון את היריעה, ובכך להקטין את מעבר האור דרכה.

> הערה: קבלנים ומתכננים רבים מייחסים לזכוכית השכבות בידוד תרמי גבוה – ואין הדבר כך! מרבית שמשות ה"טריפלקס" הן בעלות העברות תרמית (ערך U) דומה לזכוכית יחידה בעובי דומה, ולכן הן אינן יכולות להוות תחליף לזכוכית כפולה עם מרווח אוויר.

**ו. חומרי זיגוג אחרים (מלבד זכוכית)**

זכוכית היא חומר הזיגוג הנפוץ ביותר, משום שהיא בעלת קיים ארוך מאוד, חוזק מכני גבוה (איננה נשרטת בקלות) ומשום שניתן להתאים אותה ליישומים שונים ומגוונים. עם זאת, ישנם גם סוגי חומרי זיגוג אחרים בעלי תכונות מועילות.

פוליקרבונט: פוליקרבונט הוא חומר פולימרי דמוי זכוכית, הן מבחינת מראהו והן מבחינת התכונות האופטיות שלו. הוא מעביר כ-85% מהקרינה הפוגעת בו, מתחמם פחות מזכוכית החשופה לתנאים דומים וגם חסין מפני שבר במכה. החומר גמיש, נוח לעבודה, ושימושי גם במקרים בהם מבקשים זיגוג לא מישורי. החומר זמין כשקוף, מגוון בדרגות שונות או "חלבי". בשוק קיימים מספר מוצרים תעשייתיים המבוססים על פוליקרבונט. המוצר הנפוץ ביותר הוא לוח דו-שכבתי שבין שכבותיו צלעות ניצבות לפני המשטח, אשר מיוצר בתהליך של שיחול (extrusion). המוצר הסופי הוא מעט פחות שקוף מזכוכית או מזיגוג פוליקרבונט חד-שכבתי, אבל שכבת האוויר הסגורה בין השכבות מעלה את ההתנגדות התרמית שלו. מוצר מעניין במיוחד הוא זה שבו פניה הפנימיים של אחת השכבות הם בעלי חתך של שיני משור הגורם להחזרות פנימיות של קרינה המגיעה אליהן. חתך זה מאפשר לשנות את היחס בין העברת הקרינה לבין החזרתה על ידי שינויים בזווית ההתקנה של הלוח כלפי מקור הקרינה: מידת העברת הקרינה או החזרתה יהיו תלויים אז בזווית הפגיעה של הקרינה במשטח הפוליקרבונט (איור ח-2 ).



**איור ח-2.**

**החזרה פנימית של קרינת שמש בלוח פוליקרבונט עם העברה סלקטיבית לפי זווית הפגיעה.**

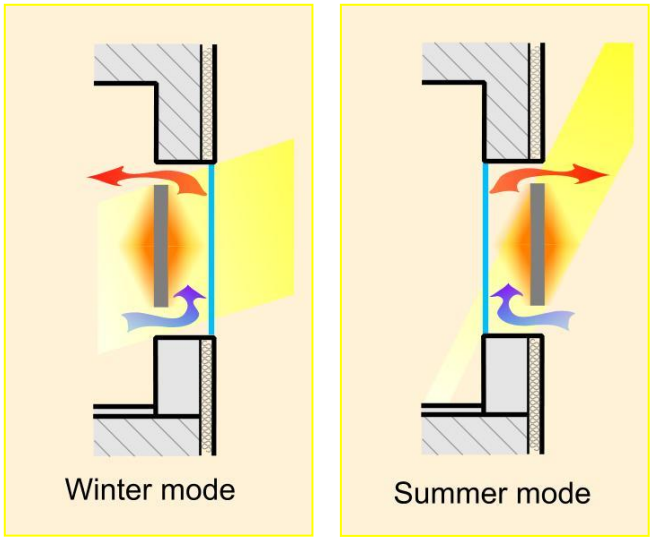
פיברגלס: החומר המכונה "פיברגלס" עשוי למעשה מפוליאסטר משוריין בסיבי זכוכית. החומר זמין במספר גדלי גלים, עוביים וגוונים. הוא אינו מאפשר מבט דרכו ועמידותו בתנאי חוץ קשים אינה טובה במיוחד. החומר יכול לשמש להקטנת חדירת כמות האור החודרת דרך פתח ולפיזורו, וגם גיוונו במידה והדבר נדרש. בישראל החומר מצוי בעיקר בגוונים של לבן חלבי, שקוף (פחות מזכוכית בכל מקרה) ובגוונים שונים של אדום, כחול, ירוק ועוד. פיברגלס נמצא בשימוש בבנייני מגורים בעיקר בכיפות תאורה.

לוחות אקריליים: לוחות אקריליים זמינים בצבעים שונים ובדרגות שקיפות שונות. לוחות אלה פחות שבירים מזכוכית, אבל הם רגישים לקרינת UV הפוגעת בהם ומתבלים יותר מהר מזכוכית. באזורים מדבריים נוספת גם התבלות בשל שחיקה מאבק וחול המונעים על ידי רוח והשורטים את פניהם. אחד היתרונות העיקריים של לוחות אלו היא עמידותם בפני שבר ממכה.

**ז. מערכות זיגוג עם תכונות משתנות**

האמצעים השונים לבקר את מעבר קרינת השמש דרך החלון בכדי לשפר את הנוחות הויזואלית של דיירי הבניין, אינם מתמודדים עם אחת הבעיות המאפיינות את מרבית הבניינים הסולריים: התקנת חלונות גדולים בכיוון דרום, המיועדים לקלוט קרינת שמש בחורף ולחמם את הבניין בשיטת הקליטה הישירה ('direct gain') היא אמנם יעילה מאוד מבחינה תרמית, אך יוצרת סנוור בחלל הפנימי וטמפרטורה קורנת גבוהה בקרבת החלון. כל אמצעי ההצללה הקיימים, לרבות מערכות הזיגוג הקריר, נותנים מענה לחסרונות אלה רק במחיר של הפחתת רווחי החום הרצויים לחימום הבניין.

מערכת זיגוג המאפשרת נוחות ויזואלית ותרמית מבלי להפחית את רווח החום הסולרי פותחה בישראל. עיקרון הפעולה של מערכת הזיגוג (איור ח-3) מבוסס על המרת אנרגית שמש קצרת-גל לקרינה ארוכת גל ולאוויר חם. בחורף משמשת האנרגיה הזו לחימום החלל הפנימי הסמוך לחלון, ובקיץ האנרגיה נפלטת לסביבה החיצונית. מערכת הזיגוג מורכבת משתי יחידות: האחת זכוכית שקופה (רגילה או כפולה), המשמשת לאטימת הפתח לאוויר ולמים; השנייה היא זכוכית בעלת מקדם בליעה גבוה במיוחד, בדרך כלל בעלת גוון כהה. המרווח שבין שתי היחידות מאוורר באמצעות פתחים בצד התחתון ובצד העליון של הזכוכית הכהה. שתי היחידות מהוות מערכת אחת, המורכבת בפתח כך שניתן להפנות את הזכוכית הכהה כלפי פנים בחורף וכלפי חוץ בקיץ.




**איור ח-3. עיקרון הפעולה של חלון העונות – אשר תפקודו עשוי להשתנות לפי עונות השנה.**

**צילום ח-3.**

**אבטיפוס של חלון העונות**



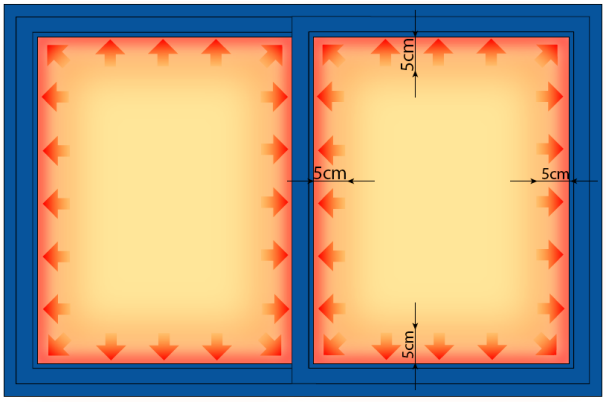
בחורף, המערכת מאפשרת לנצל את קרינת השמש לחימום החלל הפנימי, אך מונעת בוהק בקרבת החלון ומקטינה מאוד את הנזק העלול להיגרם לריהוט וציוד אחר בתוך הבניין כתוצאה מחשיפה לקרינת שמש ישירה. בקיץ, המערכת מקטינה את החדירה של קרינת שמש בלתי רצויה, ובכך מונעת התחממות יתר של החלל הפנימי ובוהק ליד החלון, מבלי להפריע למבט דרך החלון. בתנאים מסוימים עשויה המערכת אף לבטל את הצורך בתריס חיצוני על החלון.

## 5.2 תכונות המסגרת

למסגרת החלון השפעה רבה על מעבר האנרגיה במערכת הזיגוג.

**א. הולכה תרמית**

הרוב הגדול של מערכות הזיגוג בישראל נתון במסגרות העשויות מתכת, בדרך כלל פרופילי אלומיניום. מסגרת עשויה מתכת מוליכה חום היטב, כך שגם אם יחידת הזיגוג מבודדת (למשל – זיגוג כפול), חלק ניכר ממעבר החום דרך מערכת הזיגוג כולה יתרחש דרך המסגרת (איור ח-4). לכן, רצוי, משיקולים של מעבר חום, להמעיט ככל האפשר במספר החלוקות של הזיגוג.



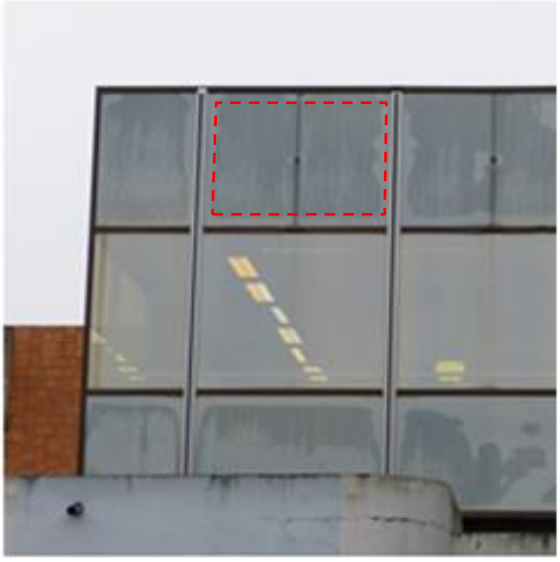

**איור ח-4.**

**המוליכות התרמית של יחידת הזיגוג באה לידי ביטוי רק במרכז הזכוכית. בשולי הזיגוג של חלון עם מסגרת מתכת, עד למרחק של בערך 5 ס"מ מן המסגרת, חלק ניכר ממעבר החום מתרחש דרך המסגרת (כיוון החיצים מתאים לזרימת חום בקיץ).**

מסגרות העשויות חומרים אשר אינם מוליכים חום באותה מידה כמו מתכת - כגון עץ או PVC, מבודדות טוב יותר ואינן סובלות מהיווצרות עיבוי בלילות החורף, בדומה למסגרות המתכת. ניתן

גם להתקין מסגרות אלומיניום עם הפרדה תרמית, אם כי עלותן גבוהה ואיננה מוצדקת בדרך כלל בתנאי האקלים בארץ.

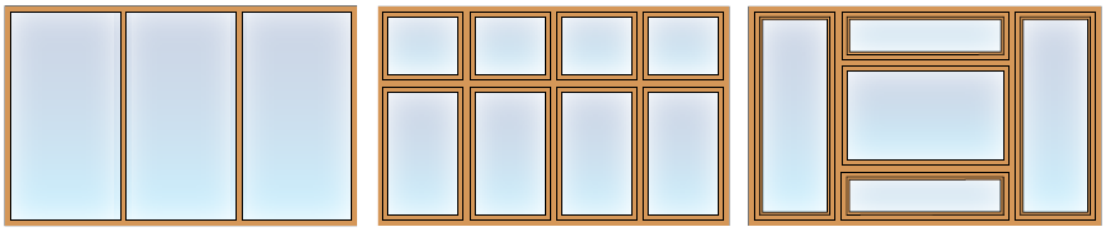
צילום ח-4 ממחיש את מעבר החום דרך מסגרת הזיגוג.



**צילום ח-4. בבניין הנראה בצילום, ישנו עיבוי (טל) רק על הזכוכיות אשר מאחוריהן מותקנת שכבת בידוד, ולא על השמשות בשורה האמצעית הבאות במגע ישיר עם האוויר החם בחלל הפנימי. מסגרת המתכת אף היא מוליכה חום כלפי חוץ, ולכן לא נוצר עיבוי קרוב לשולי הזכוכית (ראו סימון בקו אדום מרוסק).**

**ב. רוחב המסגרת**

רוחב הפרופילים מהם מיוצרת המסגרת נובע בעיקר מהתכונות המכניות שלהם, ומהצורך להבטיח כי החלון יהיה בעל החוזק הנדרש. המסגרת של הזיגוג מהווה חלק ניכר מהשטח הכולל של פתח הבנייה, ולפיכך היא עלולה להקטין במידה ניכרת את חלק הפתח אשר דרכו עובר אור. כפי שמדגים איור ח-5, המסגרת עלולה להוות בין רבע לשליש (!) משטח הפתח, ביחוד כאשר מדובר בחלונות אלומיניום קטנים עם הרבה חלוקות.



**איור ח-5. מסגרת החלון עלולה לחסום חלק ניכר ממעבר האור דרך פתח הבנייה בו מורכב החלון (שיעור החסימה מימין – 40%; באמצע – 25%; משמאל – 10%).**

חלונות PVC, שהם נפוצים מאוד באירופה ובארה״ב, הם בעלי מסגרת רחבה במיוחד. גם חלונות האלומיניום הם בעלי רוחב גדול יחסית, אם כי ניתן לקבל פרופילים צרים יחסית (אך בעלי עובי דופן גדול), בדומה לפרופילי פלדה. כאשר החלון עשוי פלדה (פרופיל 'בלגי'), ניתן לקבל אלמנטים דקים יחסית, ומשום כך יש אדריכלים רבים המעדיפים אותם.

**ג. אטימות המסגרת**

אטימות החלון לחדירה לא מבוקרת של אוויר היא אחד המאפיינים החשובים ביותר של מערכת הזיגוג. האטימה מתבצעת באמצעות מערכת של אטמים אשר נוספים למסגרת החלון – לכנף או למשקוף, ולעיתים – לשניהם גם יחד.

על מנת שתתקיים אטימה טובה לאורך זמן, ישנה חשיבות לשמירת הגיאומטריה של הכנף כך שבמצב סגור יהיה מרווח אחיד וקבוע אשר בו יותקן האטם. כאשר הכנף חסרה את היציבות המרחבית הנדרשת – כתוצאה מפיתול או מעיוות אלכסוני – האטם לא יוכל למלא את תפקידו כראוי. רצוי שקיבוע הכנף במצב הסגור יתבצע ביותר מאשר נקודה אחת (למשל, בחלון תלוי – בשני בריחים בצלע הנגדית לצירים, ולא בתפס אחד).

ישנם שני סוגים של אטמים – אטמים גמישים המיועדים להפעלה בלחץ (בחלונות תלויים), ואטמי מברשת המיועדים בעיקר לחלונות הזזה. אטמים גמישים עשויים להיות בעלי אטימות טובה יותר מאטמי מברשת. בשני הסוגים עלול להיות בלאי לאורך זמן, המתבטא באובדן גמישות או בשחיקה.

דרגת האטימות של מערכת הזיגוג, לפי ת״י 1068, נקבעת על ידי מכון התקנים בבדיקה המודדת את קצב חדירת האוויר בהשפעת הפרש לחצים משני צידי החלון, אשר נדרש להיות פחות מ-7 מ״ק אוויר לשעה עבור מרווח באורך של 1 מטר במסגרת. ככל שהחלון עומד בהפרש לחצים גבוה יותר מבלי לחרוג ממגבלת חדירת האוויר – דרגת האטימה שלו גבוהה יותר. הסימון של מערכות הזיגוג בהתייחס לרמות האטימות נעשה באותיות לועזיות, כאשר דרגה A היא הנמוכה ביותר ודרגה E ניתנת לחלון האטום ביותר. חשוב להדגיש כי סימון החלון נעשה אך ורק לפי בדיקת האטימות ולא לפי מיקום הבניין בארץ – אך הדרישות המופיעות בת״י 1045 ובת״י 5280 מתחשבות במידת החשיפה לרוח, ולכן בבניינים גבוהים באזור ההר הדרישות מחמירות יותר מאשר בבניינים צמודים קרקע בשפלת החוף, למשל.

**ד. תקינה**

המורכבות של מערכות הזיגוג והשפעתן הרבה על התפקוד התרמי של הבניין הביאו את משרד התשתיות הלאומיות ליזום תקן ישראלי אשר יסדיר את האופן בו יחושבו ויוצגו התכונות של מערכות הזיגוג בבניינים. התקן, אשר פורסם בשנת 2009, מכונה ת״י 5068 – ״מערכות זיגוג בבניינים – סימון בתווית אנרגיה.״

טבלה ח-1, הלקוחה מת״י 1045, חלק 0 – ״בידוד תרמי של בניינים – כללי״, ממחישה את ההבדלים הגדולים בתכונות התרמיות והאופטיות של מערכות זיגוג אופייניות הנפוצות בארץ.

## טבלה ח-3. העברות תרמית, מעבר אור ורווח חום סולרי בחלונות אופייניים

| | מסגרת | דיגום | מרווח אוויר (מ"מ) | תכונות הזיגוג | | | תכונות חלון במידות 1.10X0.95 מ' | | | תכונות חלון במידות 1.40X0.95 מ' | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Tvis | SHGC | U $W/m^2 K$ | Tvis | SHGC | U $W/m^2 K$ | Tvis | SHGC | U $W/m^2 K$ |
| 1 | עץ | זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] | - | 0.90 | 0.89 | 5.96 | 0.62 | 0.64 | 4.84 | 0.65 | 0.67 | 4.97 |
| 2 | עץ | זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] | 6 | 0.81 | 0.76 | 3.17 | 0.56 | 0.56 | 3.10 | 0.59 | 0.59 | 3.12 |
| 3 | אלומיניום | זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] | - | 0.90 | 0.89 | 5.96 | 0.67 | 0.72 | 5.91 | 0.69 | 0.74 | 5.92 |
| 4 | אלומיניום | זכוכית שקופה 6 מ"מ [2] | - | 0.88 | 0.84 | 5.87 | 0.66 | 0.68 | 5.84 | 0.68 | 0.70 | 5.84 |
| 5 | אלומיניום | זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] | 6 | 0.81 | 0.76 | 3.17 | 0.60 | 0.63 | 4.04 | 0.63 | 0.65 | 3.95 |
| 6 | אלומיניום | זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] | 16 | 0.81 | 0.78 | 2.72 | 0.63 | 0.64 | 3.11 | 0.63 | 0.65 | 3.55 |
| 7 | אלומיניום | זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] low-e + [3] | 6 | 0.78 | 0.60 | 2.10 | 0.58 | 0.51 | 3.27 | 0.60 | 0.52 | 3.14 |
| 8 | אלומיניום | זכוכית כהה 3 מ"מ [4] low-e + [3] זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] | 6 | 0.46 | 0.28 | 2.41 | 0.34 | 0.26 | 3.45 | 0.36 | 0.27 | 3.33 |
| 9 | PVC | זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] זכוכית שקופה 3 מ"מ [1] low-e + [3] | 16 | 0.78 | 0.61 | 1.83 | 0.54 | 0.44 | 2.05 | 0.56 | 0.46 | 2.03 |

(Tvis – העברות אור של הזיגוג; Tsol – העברות קרינת שמש של הזיגוג; e – פליטות בתחום האינפרה-אדום של הציפוי; U – העברות תרמית; SHGC – מקדם רווח חום סולרי)

[1] Tvis = 0.90, Tsol = 0.83

[2] Tvis = 0.88, Tsol = 0.77

[3] e=0.08

[4] Tvis = 0.51, Tsol = 0.20

הערות:

א. החישוב נערך בתנאי סביבה לפי ת"י 5068.

ב. תכונות הזיגוג מתייחסות למרכז השמשה (center of glass), עבור קרינה הפוגעת בניצב למישור הזכוכית. אם יש יותר משמשה אחת (זיגוג כפול), הנתונים מביאים בחשבון את ההשפעה של שתי השמשות, הציפויים ומרווח האוויר.

ג. הנתונים מתייחסים לחלון בגובה 0.95 מ' וברוחב 1.1 מ' או 1.4 מ', עם חלוקה אנכית אחת (כדוגמת חלון הזזה אופקי בעל שתי כנפיים או חלון תלוי-צד עם שתי כנפיים).

ד. החישוב עבור מסגרת עץ מתייחס לרוחב פרופיל (במישור החלון) של 69.8 מ"מ. שטח המסגרת מהווה 31% משטח חלון ברוחב 1.1 מ' ו-27% משטח חלון ברוחב 1.4 מ'. ההעברות התרמית של המסגרת הינה U=2.27 ואט למ"ר קלווין.

ה. החישוב עבור מסגרת אלומיניום מתייחס לרוחב פרופיל (במישור החלון) של 57.2 מ"מ. שטח המסגרת מהווה 26% משטח חלון ברוחב 1.1 מ' ו-22% משטח חלון ברוחב 1.4 מ'. ההעברות התרמית של המסגרת הינה U=5.68 ואט למ"ר קלווין.

ו. החישוב עבור מסגרת PVC מתייחס לרוחב פרופיל (במישור החלון) של 69.8 מ"מ. שטח המסגרת מהווה 31% משטח חלון ברוחב 1.1 מ' ו-27% משטח חלון ברוחב 1.4 מ'. ההעברות התרמית של המסגרת הינה U=1.70 ואט למ"ר קלווין.

ז. תכונות החלון מבטאות את התרומה הכוללת של הזיגוג ושל המסגרת, ומתאימות רק לחלונות במידות הנתונות. את התכונות של חלונות במידות שונות או עם שילובים אחרים של מסגרת וזיגוג יש לחשב בהתאם לת"י 5068.



## 5.3 מערכות הצללה

מערכות הצללה מיועדות להפחית את קרינת השמש החודרת מבעד למערכת הזיגוג, למטרות שונות: שיפור הנוחות הויזואלית, הקטנת עומסי החום, שמירה על פרטיות ועוד. בארץ מצוידים מרבית החלונות בבנייני קומות בתריסים הניתנים לפתיחה, ויש לכך חשיבות רבה מאוד מהבחינה התרמית. את החשיבות הרבה ממחישה הדרישה המופיעה בת"י 5280 (בשיטה המרשמית בלבד) כי כל חלון ששטחו עולה על 0.5 מ"ר יצויד בתריס חיצוני (בפועל, הכוונה היא לכל החלונות למעט חלונות קטנים בחדרי שירותים).

את מערכות ההצללה ניתן לסווג לפי שני קריטריונים: מיקום מערכת ההצללה ביחס לזיגוג, והאפשרות לבקר את אופן פעולתה בכדי לשנות את כמות הקרינה החודרת לבניין על ידי שינוי מקומו של רכיב ההצללה או שינוי הזווית שלו ביחס לחלון.

### א. מיקום מערכת ההצללה ביחס לזיגוג

למיקום מערכת ההצללה (ביחס למישור הזיגוג) השפעה מועטה יחסית על הנוחות הויזואלית של אדם השוהה בחדר. עם זאת, יש למיקום השפעה מכרעת על היעילות שלה בהקטנת עומס החום על הבניין. כאשר מערכת ההצללה ממוקמת בתוך הבניין, למשל בצורת וילון, השפעתה על המאזן התרמי מועטה. זאת משום שמרבית הקרינה החודרת מבעד לזכוכית נבלעת באמצעי ההצללה, גורמת לו להתחמם ונפלטת אל חלל החדר בהסעה (כאוויר חם) או בקרינה אינפרה אדומה. כאשר אמצעי ההצללה נמצא מחוץ לבניין, קרינת השמש הנחסמת על ידו איננה משפיעה כמעט על המאזן התרמי של הבניין. סוג זה של הצללה עדיף אפוא לאין שיעור מן הבחינה התרמית (צילום ח-5).

**צילום ח-5. הצללה חיצונית עדיפה על הצללה פנימית מבחינה תרמית.**

כאשר אמצעי ההצללה ממוקם בין שתי שכבות של זיגוג – למשל תריס ונציאני הכלוא בין שתי השמשות של חלון בעל זיגוג כפול או תריס הממוקם בין שתי מערכות הזיגוג של חזית כפולה, מעבר האנרגיה תלוי במידה רבה במאפיינים של שכבת הזיגוג הפנימית. זאת משום שהתריס מתחמם כתוצאה מן האנרגיה הפוגעת בו, ופולט חום אל הסביבה. כאשר השמשה הפנימית מצוידת בציפוי low-e, מעבר החום כלפי החלל הפנימי פוחת מאוד, ועיקר האנרגיה נפלט כלפי חוץ. אם התריס הוא בעל גוון בהיר מאוד או ציפוי מבריק, שטף האנרגיה המועבר לחלל הפנימי פוחת במידה ניכרת.

הערה:

בארץ מקובל בדרך כלל ליישם את ציפוי low-e על משטח מספר 2 (מסמנים את פני הזיגוג מן החוץ כלפי פנים, כך שמשטח 2 הוא צידה הפנימי של הזכוכית החיצונית). כאשר השמשה החיצונית היא מגוונת ואין בחלון תריס כלוא, יש לכך הצדקה, משום שכאשר זכוכית זו כוללת ציפוי בצידה הפנימי, החום הנאגר בה נפלט בעיקר כלפי חוץ. כאשר מערכת הזיגוג כוללת תריס ונציאני כלוא, מומלץ ליישם את ציפוי ה-low-e דווקא על משטח 3 (הצד החיצוני של השמשה הפנימית). בקיץ, כאשר התריס מתחמם, הוא פולט קרינה אינפרה אדומה אשר עלולה לגרום לחימום השמשה הפנימית – והציפוי מפחית מאוד השפעה לא רצויה זו. בחורף, אם מעוניינים לאפשר חימום פסיבי, אוספים את שלבי התריס כלפי מעלה, קרינת השמש חודרת בעד הזיגוג השקוף אך החום הנצבר בחלל הפנימי אינו נפלט כלפי חוץ בשל ציפוי low-e על השמשה.

**ב. הצללה חיצונית קבועה**

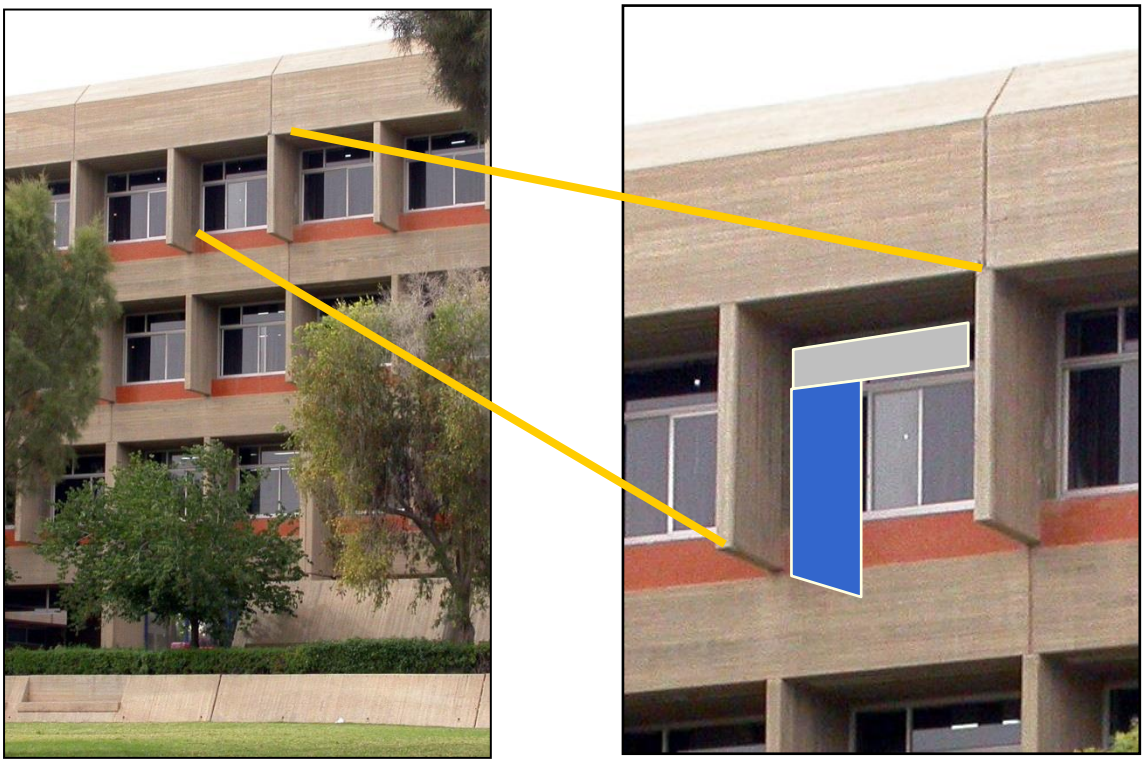
למערכת הצללה חיצונית קבועה עשויים להיות שני רכיבים: רכיב אופקי מעל החלון, ורכיבים אנכיים בצידי החלון. ניתן להתקין את הרכיבים האלו בנפרד או במשולב, בהתאם לפנות החלון, לטכנולוגית הבנייה ועוד.

הרכיב האופקי מעל החלון (המכונה לעיתים 'גגון') מיועד לחסום את קרינת השמש הישירה כאשר השמש נמצאת גבוה מעל האופק. הוא מתאים בעיקר לחזית הדרומית, ומביא תועלת מעטה כאשר הוא מותקן מעל פתחים בחזיתות האחרות.

הרכיבים האנכיים בצידי החלון מיועדים לחסום את קרינת השמש הישירה המגיעה כאשר השמש נמצאת יחסית נמוך מעל האופק, כלומר במערב או במזרח, בתנאי שהחלון איננו פונה ישירות לכיוונים אלה. הצללה זו מתאימה אפוא לחלון בחזית דרום-מערבית או דרום-מזרחית.

צילום ח-6 מראה את התרומה של רכיבי מערכת ההצללה על חלון בחזית דרומית. הצל המוטל על ידי הבליטה האופקית מסומן באפור, בעוד שהצל המוטל על ידי הרכיב האנכי מודגש בכחול.

חשוב לציין כי בעוד שקל יחסית לתכנן הצללה קבועה יעילה לחלון בחזית הדרומית, הרי שלא ניתן כמעט להגן על חלון בחזית מזרחית או מערבית בלי לחסום כמעט לחלוטין את המבט מבעד לחלון החוצה. זאת משום שכאשר השמש נמצאת במזרח או במערב, היא קרובה מאוד לאופק, וכיוון הקרינה הוא כמעט ניצב למישור החלון.



**צילום ח-6. הצללה חיצונית קבועה הכוללת מצליל אופקי מעל החלון ומצלילים אנכיים משני צדדיו.**

### ג. תריסים חיצוניים

ישנם שני סוגים עיקריים של תריסים: תריסי גלילה ותריסי רפפה. לכל אחד מהסוגים יתרונות וחסרונות. הטבלה ח-4 מאפשרת השוואה ביניהם.

החומרים שמהם מיוצרים שלבי התריס עברו שינויים במהלך השנים, ובעוד שבעבר היה שימוש נרחב בעץ ואחר כך בחומרים פלסטיים (בעיקר PVC), הרי שכיום מרבית התריסים מיוצרים מאלומיניום. קיימים שני סוגי שלבים: שלבים מ'פרופיל משוך' או 'פרופיל מוקצף'. הפרופיל המשוך עשוי אלומיניום בעובי דופן גדול יחסית, והוא בעל חוזק מכני רב. עם זאת, משקלו גדול, ועלותו גבוהה יותר (בשל כמות האלומיניום הרבה שבו). הפרופיל המוקצף עשוי מפח אלומיניום דק עם מילוי של פוליאוריתן מוקצף שתפקידו העיקרי לסייע בשמירת הצורה. הוא חלש יותר מבחינה מכנית, ולכן אינו מתאים לכל סוגי התריסים (למשל – תריס אור), ומוגבל למפתחים קטנים יותר.

כאשר התריס סגור, הוא יוצר חיץ בין פני הזיגוג ובין האוויר החופשי. לחיץ זה יש חשיבות במיתון מעבר החום דרך מערכת המיזוג, בנוסף להצללה שהתריס מספק. אם התריס סגור לגמרי, שכבת האוויר כלואה, ואיבוד החום (בחורף) קטן במידה ניכרת, במיוחד כאשר מדובר בתריס עם שלבים מוקצפים. לכן יש חשיבות לסגירת התריס בשעות הלילה. לתריסים עם שלבים מוקצפים ישנו יתרון גם בכך שהם מקרינים פחות חום פנימה בימות הקיץ.

**טבלה ח- 4. השוואה בין תריסי גלילה לתריסי רפפה**

| | תריסי גלילה | תריסי רפפה |
|---|---|---|
| **ויסות כמות האור** | האור חודר דרך המרווחים בין השלבים, או בחלקו התחתון של התריס כאשר הוא מורם חלקית | ניתן לווסת את כמות האור בכל מידה מבוקשת על ידי פתיחה חלקית של הרפפות |
| **הכוונת אור בחלל** | לא ניתן | ניתן לכוון לעומק החלל באמצעות ויסות זווית הרפפות |
| **מידת הפתיחה** | פתיחה מלאה באמצעות איסוף לתוך ארגז התריס | פתיחה מלאה על מסילות חיצוניות, בצירי צד או לתוך כיס גרירה |
| **אפשרות לאוורור והצללה בו-זמנית** | מוגבלת מאוד. פתרון חלקי ניתן בתריס שבו המרווח בין השלבים גדול (״תריס אור״) או בתריס שחלקו התחתון ניתן לפתיחה כלפי חוץ על גבי מסילה עם פרק אמצעי | טובה |
| **הפעלה מתוך הבניין (ללא פתיחת החלון)** | פשוטה (ידנית או חשמלית) | הפעלה ידנית, דורשת פתיחת החלון |
| **נקודות תורפה בהתקנה** | מכסה ארגז התריס לא מבודד, ולפעמים אינו אטום | כיס גרירה לא מבודד |

בתנאי הארץ, שהיא בעלת אקלים שטוף שמש, לתריסים יתרונות רבים מאוד. יחד עם זאת, ההתקנה שלהם היא לעיתים בעייתית, ויוצרת נקודות תורפה במעטפת הדירה. נקודות תורפה כאלה ניתן למנוע בקלות כאשר מדובר בתריסי גלילה, על ידי התקנת בידוד תרמי על הדופן של מכסה הארגז. הפתרון לכיסי גרירה מסובך יותר לביצוע: הוא מחייב התקנה של בידוד תרמי על הדופן הפנימית של הכיס, ולפיכך הוא מבוצע רק לעיתים רחוקות.

**ד. בקרת מערכת ההצללה**

מערכת ההצללה הניתנת לבקרה, כגון תריס או וילון, עשויה לתת מענה טוב יותר לשינויים בתנאי הסביבה ולצרכים המיוחדים של דיירי הבניין מאשר מערכת קבועה, כגון גגון חיצוני מעל החלון. אף על פי כן, בניינים רבים מצוידים גם בהצללה קבועה. מהם אפוא היתרונות והחסרונות של כל אחד מסוגי ההצללה?

**טבלה ח-5. השוואה בין הצללה קבועה להצללה ניתנת לבקרה (ניידת)**

| | הצללה קבועה | הצללה ניתנת לבקרה |
|---|---|---|
| **יתרונות** | * דורשת מעט מאוד אחזקה<br>* איננה דורשת תשומת לב מדיירי הבניין<br>* בד"כ זולה יותר<br>* בד"כ חיצונית לזיגוג, ולכן עדיפה מבחינה תרמית | * עשויה לתת מענה מיטבי בכל שילוב של מיקום השמש, תנאי מזג אוויר שונים והעדפות הדיירים<br>* עשויה לתת מענה טוב גם לקרינה לא כיוונית |
| **חסרונות** | * איננה נותנת מענה מיטבי בהתאם למסלול העונתי של השמש [67]<br>* איננה נותנת מענה לתנאי מזג אוויר משתנים<br>* איננה נותנת מענה להעדפות השונות של הדיירים<br>* נותנת מענה חלקי בלבד לקרינה מפוזרת מכיפת הרקיע ולקרינה מוחזרת מן הקרקע | * דורשת אחזקה<br>* בהיעדר תשומת לב מדיירי הבניין, עלולה להיות במצב לא מתאים, כגון תריס סגור כאשר דרושה אנרגית שמש לחימום, או להיפך<br>* בד"כ מותקנת בתוך הבניין, ולכן פחות יעילה מבחינה תרמית |

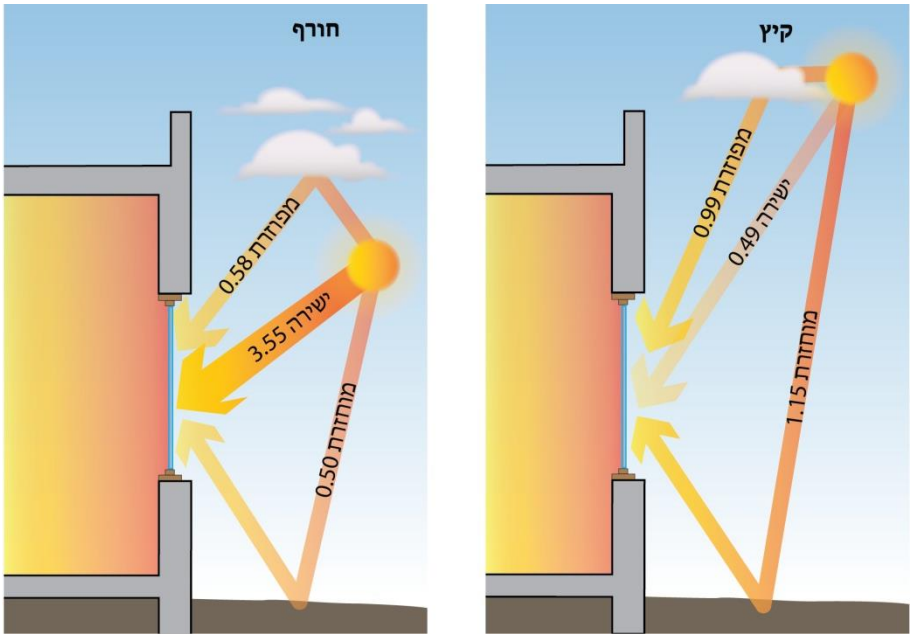


### ה. קרינה מפוזרת ומוחזרת

מרבית אמצעי ההצללה החיצוניים הקבועים על חזיתות הבניינים מיועדים לחסום את קרינת השמש הישירה, ומתוכננים בהתאם למיקומה בשמיים בשעות שבהן קרינת השמש איננה רצויה. ההתייחסות למיקומה של השמש ברקיע מאפשר לחסום את הקרינה הכיוונית, אך חשוב לזכור כי חלק ניכר מן הקרינה איננו מגיע ישירות מן השמש, אלא מוחזר מבניינים סמוכים או מפני הקרקע, בעוד שחלק אחר מגיע מכיפת הרקיע כקרינה מפוזרת. איור ח-7 מראה את החלק היחסי של רכיבי הקרינה על קיר דרומי בנגב, בקיץ ובחורף.

לא ניתן לחסום את הקרינה הלא-כיוונית המגיעה אל מישור החלון באמצעות אמצעי הצללה חיצוני, אלא במחיר של חסימה משמעותית של המבט כלפי חוץ ושל הפוטנציאל לתאורה טבעית, למשל על ידי גגון עמוק מאוד החוסם חלק ניכר מכיפת הרקיע או על ידי רפפות צפופות.

[67] בשל קיבול החום של כדור הארץ, הטמפרטורות המקסימליות נמדדות כחודש עד חודש וחצי אחרי היום הארוך ביותר, בעוד שטמפרטורות המינימום נמדדות כחודשיים אחרי היום הקצר ביותר. בישראל, למשל, שבה היום הארוך ביותר הוא ה-21 ביוני, החודשים החמים הם יולי ואוגוסט, בעוד שהחודשים הקרים ביותר הם ינואר ופברואר, למרות שהיום הקצר ביותר חל ב-21 בדצמבר. לפיכך, הצללה קבועה המיועדת לחסום את קרינת השמש הישירה באוקטובר (שהוא חודש חם יחסית) למשל, תמנע גם את רווח החום הרצוי בחודש פברואר הקר.




**איור ח-6. התפלגות מרכיבי קרינת השמש (ישירה, מוחזרת ומפוזרת) על חלון דרומי, בחורף ובקיץ [68].**

## 5.4 רשת חרקים

רשתות נגד חרקים מותקנות במרבית החלונות בבנייני המגורים בארץ. בנוסף לתפקידן במניעת חדירת חרקים לבניין, לרשת ישנה השפעה גם על התפקוד האנרגטי של החלון. ראשית, נוכחות הרשת מפחיתה במידה ניכרת את תנועת האוויר דרך הפתח. כאשר הרשת תקינה ונקייה, ההפחתה במהירות האוויר דרך הפתח עלולה להיות בשיעור של כ-50 אחוזים. רשת מלוכלכת, באבק או שומן (מאדי בישול), עלולה לחסום את תנועת האוויר אף למעלה מכך. שנית, נוכחות הרשת מפחיתה את רווח החום בקרינה ואת מעבר האור, משום שהחוטים חוסמים כמעט חצי מהשטח אותה היא מכסה. כאשר עורכים הדמית מחשב לדירה, יש לוודא אפוא כי השפעת הרשת מקבלת ביטוי נכון, הן במאזן הקרינתי והן בפוטנציאל האוורור.

מיקום הרשת במערכת הזיגוג אינו משפיע על מעבר האוויר או האור, אך יש לו משמעות בהתייחס לרווח החום בקרינה. כאשר הרשת ממוקמת בצד החיצוני של הזיגוג, היא מפחיתה את רווח החום, אך כאשר היא מותקנת בצד הפנימי – השפעתה על התפקוד האנרגטי של מערכת הזיגוג קטנה מאוד. התקנה כזאת אינה נפוצה בארץ, משום שהרשת עלולה להפריע לפתיחת מרבית סוגי החלונות. יחד עם זאת, היא בעלת עדיפות ברורה בחלונות המיועדים לספק חימום סולרי פסיבי בחורף, ובמיוחד בחלונות הזזה.

המלצה: אם בעונת החורף החלונות כמעט ואינם נפתחים לאוורור, ניתן להסיר את רשתות החרקים ולאפסן אותן עד לאביב. פתרון זה ישים בעיקר בבתים צמודי קרקע, אינו דורש מיומנות מיוחדת וכרוך במעט מאוד מאמץ.

[68] מאיר וחוב, 1990. הנתונים חושבו על סמך מדידות של קרינת שמש כוללת שנעשו בעבדת על ידי Evenari (1987), בהנחה של אלבדו קרקע = 0.3. ייתכנו הבדלים קטנים באזורי הארץ האחרים ובתנאי חשיפה שונים.

### 5.5 סוגי חלונות

לסוג החלון ישנה השפעה על מספר היבטים של התפקוד האנרגטי, במיוחד בכל הקשור למעבר אוויר – בין לאוורור ובין כחדירת אוויר לא רצויה. תקן 1068 מסווג את החלונות לפי סוג הפתיחה, והם כוללים:

- חלונות תלויים (על צירי סיבוב): תלוי צד, תלוי מעלה ותלוי מטה
- חלונות נטויים (על אביזרים שאינם צירי סיבוב), המכונים גם חלונות 'קיפ': סובב מוטה-צד, סובב-עולה וסובב-יורד
- חלונות מסתובבים (על צירים מרכזיים): מסתובב אנכית, מסתובב אופקית
- חלונות הזזה: אופקיים - לתוך כיס או על מספר מסילות מקבילות (לרוב שתיים עד שלוש), בנוסף למסילה עבור הרשת; ואנכיים ('גיליוטינה'), בעלי כנף אחת ניידת או שתי כנפיים ניידות
- חלונות פתיחה כפולה ('דרה-קיפ')
- חלונות רפפה
- חלון קבוע

מאפייני החלון משפיעים על יעילותו כאמצעי אוורור בשני היבטים: החלק היחסי של הפתח אשר מאפשר תנועת אוויר, והאפשרות לכוון את תנועת האוויר בחלל באמצעות הכנף.

כל החלונות הנפתחים, מלבד חלונות ההזזה (האופקית או האנכית), מאפשרים הטיה של הרוח החודרת לחדר במישור האנכי (כלפי מעלה או מטה), או במישור האופקי (לצדדים). חסרונם בכך שתנועת הכנף מחייבת כי חלק מהחלל הפנימי בחדר יהיה פנוי. לעומת זאת, הם עשויים להבטיח אטימות טובה לאוויר, מאחר וסגירתם כוללת הפעלת לחץ על אטם גמיש.

חלונות ההזזה נפוצים מאוד בארץ, הן בשל מחירם הזול ביחס לכל החלונות האחרים, והן משום שפתיחתם אינה דורשת שהחלל הפנימי הסמוך להם יהיה פנוי. עם זאת, לחלונות אלה מספר חסרונות בולטים: ראשית, הם אינם מאפשרים פתיחה מלאה לאוורור (אלא חצי בלבד, כאשר לחלון שתי מסילות, או 2/3 בערך, כאשר לחלון 3 כנפיים). שנית, הם אינם מאפשרים להטות את זרם האוויר הנכנס. ולבסוף – הם אינם מאפשרים אטימה גבוהה כנגד חדירת אוויר, הן באזור החפיפה בין הכנפיים סמוך למסילה, והן כאשר מברשות האטימה מאבדות את גמישותן אן מתבלות.

חלונות רפפה נמצאים בשימוש בעיקר בפתחים קטנים במרפסות שירות או בחדרי שירותים. חשוב לציין כי מבחינה תרמית הם נחותים בכל פרמטר בהשוואה לכל חלון אחר, ומומלץ לא לעשות בהם שימוש כאלמנט מעטפת בדירה.

## 6. חימום סולרי פסיבי בעזרת חלונות

על מנת לחמם את הבניין באופן פסיבי, יש לאתר בסביבה מקור אנרגיה זמין ומתאים לשימוש. האנרגיה הזו עשויה להיות גיאותרמית, למשל, אך ברוב ארצות העולם (כולל אלו באקלים קר מאוד), מקור האנרגיה העיקרי הינו קרינת השמש. מאחר ובישראל קרינת השמש מצויה בשפע, בעוד שמקורות אחרים לאנרגיה מתחדשת הם זניחים, מומלץ לנצל את חלונות הבניין לחימום פסיבי בחורף.

### 6.1 חימום סולרי בשיטת הקליטה הישירה (direct gain)

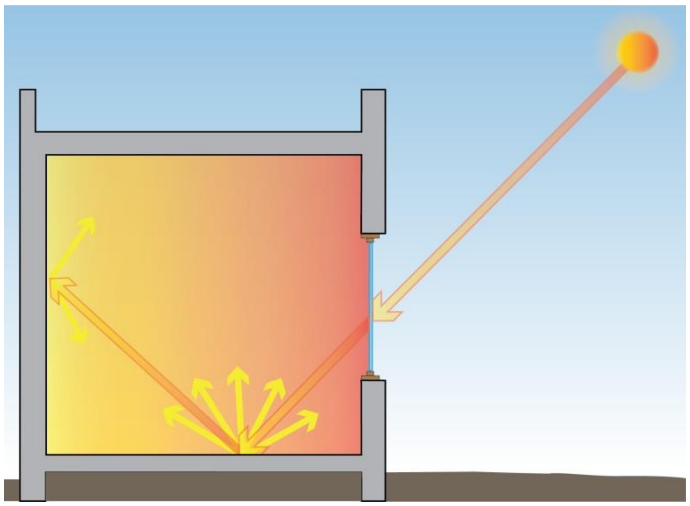
הקולט הסולרי הפשוט והנפוץ ביותר בבנייני מגורים הינו חלון - חלון רגיל בקיר או בגג, אשר דרכו חודרת קרינת שמש ומחממת את הבניין. שיטה זו מכונה חימום סולרי 'בקליטה ישירה' ( direct

gain). "הרווח הסולרי" (solar gain) של המערכת הסולרית הוא ההפרש בין כמות אנרגית השמש המנוצלת לחימום הבניין הנצברת על ידה לבין הפסדי האנרגיה מהבניין המתרחשים דרכה. כך למשל חלון החשוף לשמש מחדיר לבניין את מרבית קרינת השמש הפוגעת בו, אבל גם מפסיד אנרגיה מהבניין החוצה בהולכה ובקרינה.

מערכת לחימום הסולרי בקליטה ישירה בבניינים דומה בעיקרון לכל מערכת סולרית וכוללת קולט, מערכת אגירה ומערכת הולכת אנרגיה. לשם המחשה, ניתן להשוותה למערכת הנפוצה לחימום מים לשימוש ביתי – דוד השמש המצוי על גגותינו. במקרה של דוד השמש הנפוץ, יחידת הקליטה כוללת לוחות גדולים, מזוגגים וכהים אשר מוצבים על הגג; מערכת האגירה הינה דוד המים, אשר בדרך כלל מוצב אף הוא על הגג; ומערכת ההולכה היא צנרת המים המובילה אל הברזים בתוך הבניין. בבניין, החלונות מהווים את הקולט, מערכת האגירה היא המסה של הבניין ו'מערכת ההולכה' היא האוויר בדירה הבא במגע עם משטחים אשר התחממו בקרינת השמש, כגון הרצפה או הקירות.

## 6.2 פנות (orientation)

כפי שהוסבר בפרק ה', בחירת הפנות הנכונה של החלונות היא אחת ההחלטות החשובות ביותר בתהליך התכנון של הבניין. בישראל הפנות המועדפת לצורך זה היא תמיד הדרומית: בחורף, כאשר יש צורך באנרגיה לחימום, שטף קרינת השמש על חלון הפונה לכיוון דרום גבוה בהרבה משטף הקרינה על חלונות הפונים לכיוונים אחרים, ואילו בקיץ הוא חשוף לקרינה פחותה בהרבה בהשוואה לחלונות הפונים למערב או למזרח. בשל זווית הגובה הנמוכה יחסית של השמש בחורף, קרינת השמש הישירה פוגעת בחלון – בעיקר בשעות הצהריים בהם הקרינה חזקה במיוחד - בזויות הקרובות לניצב, כך שכמעט כל הקרינה חודרת לבניין מבעד לזכוכית. בקיץ נמצאת השמש בזוית רום גבוהה יותר, ולכם זווית הפגיעה של קרניה בזיגוג היא שטוחה יחסית, וחדירתה דרך הזיגוג קטנה יותר. (עם זאת מודגש שתכונה זו בלבד לא תמנע התחממות חללי הבניין במשך הקיץ כתוצאה מהקרינה, ויש להגן על משטח הזיגוג באמצעים אחרים).



**איור ח-7. חתך סכמתי בבניין המחומם בקליטה ישירה**

הבניין הסולרי זקוק לכמות מספקת של מסה לאגירת האנרגיה הנקלטת על ידי החלונות הדרומיים. לצורך זה משמשים הקירות החיצוניים (בתנאי שהבידוד התרמי הוא חיצוני), תקרות, רצפות ומחיצות פנימיות הבנויות מבלוקי בטון (אך לא מחיצות גבס). במשך היום המסה הזו אוגרת את קרינת השמש הפוגעת בה, ובלילה היא משחררת אותה לחלל הבית. כך מושגת בתוך הבניין משרעת

טמפרטורה קטנה בהרבה מזו הקיימת בחוץ. כל רכיבי המערכת הסולרית חייבים להיות מתואמים ביניהם: חלונות גדולים מדי ומסת אגירה מעטה מדי, למשל, עלולים לגרום להתחממות יתר.

**צילום ח-7. החזית הדרומית של בית פרטי המחומם בקליטה ישירה.**



### 6.3 יתרונות וחסרונות

**א. יתרונות מערכת הקליטה הישירה:**

מערכת 'קליטה ישירה' היא המערכת הפשוטה ביותר בין מערכות החימום הסולרי, והיא המערכת היחידה כמעט בה נעשה שימוש בישראל, בעיקר בגלל שיקולי עלות. עלותה הנמוכה של המערכת הזו נובעת מכך שעיקרה הוא רכיבים הקיימים ממילא בבניין הישראלי האופייני – הקליטה נעשית באמצעות החלונות ואגירת החום נעשית בקירות וברצפה. לעתים יש צורך לשנות במקצת את גודלם של הרכיבים האלה, אבל בעיקרו של עניין אין תוספות משמעותיות לעלות הבניין.

- מערכת הקליטה הישירה היא המערכת הפשוטה והזולה ביותר להתקנה. ברוב המקרים היא דורשת רק למקם חלונות ופתחים מזוגגים הדרושים בלאו הכי בבניין בחזית הדרומית (בעדיפות על פני החזיתות האחרות) והתאמת גודלם לשיעור האנרגיה שמבקשים להשיג מקרינת השמש.
- כל החומרים והאמצעים הטכניים הדרושים לבניית מבנים עם קליטה ישירה זמינים מהמדף ואינם מייקרים כמעט את עלות הבניין.
- כל רכיבי המערכת אינם מתחממים לטמפרטורות גבוהות, ולכן ההפסדים קטנים.

**ב. חסרונות מערכת קליטה ישירה:**

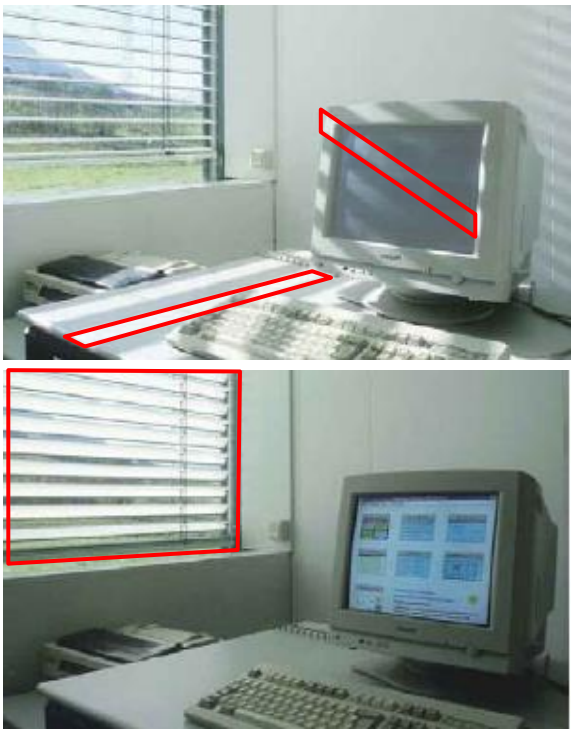
- ניתנת ליישום רק בחללים אשר יש בהם חלון הפונה לדרום.
- שטחי זיגוג גדולים יכולים לגרום לבוהק בחלל המחומם.
- הקרינה האולטרה-סגולה (UV) שהיא חלק מקרינת השמש גורמת לדהיית חפצים בחדר המחומם.
- הטמפרטורה הקרינתית הממוצעת במקומות בהם ישנם כתמי שמש בתוך החדר גבוהה מאוד אפילו בחורף, ויכולה לגרום לאי-נוחות תרמית.
- אם אין אפשרות לבודד את החלונות בלילה (למשל באמצעות תריסים), נגרם איבוד אנרגיה רב.
- חלונות גדולים עלולים לגרום לאובדן פרטיות, בעיקר בלילה.

## 7. תאורה טבעית

נוחות וויזואלית תלויה הן בכמות האור והן באיכותו. מניעת סנוור הינה חיונית: חלל עם עצמת הארה (illuminance) מספקת המושגת בעזרת אור טבעי אך עם סנוור לא יאפשר תפקוד יעיל, ולכן סביר להניח שבחלל כזה תידרש האפלת החלונות והפעלת תאורה מלאכותית.

הועדה הבינלאומית למאור (CIE) מגדירה סנוור כ"מצב אשר בו יש חוסר-נוחות בראייה או הפחתה ביכולת לראות עצמים או פרטים, הנוצר כתוצאה מבהיקות (luminance) בתחום לא מתאים או בפילוג מרחבי לא נוח, או כתוצאה מניגודים קיצוניים בשדה הראייה".

הסנוור יכול להיגרם על ידי חדירה של קרינת שמש ישירה אל העיניים, אך גם כאשר השמש יוצרת כתמים בהירים מאוד באזור בו מתבוננים (במרכז שדה הראייה) כגון שולחן עבודה, מסך מחשב או ספר שבו קוראים (צילום ח-8, למעלה). עם זאת, סנוור יכול להיגרם גם ללא חדירת קרינת שמש ישירה, כאשר חלק משדה הראייה בהיר מאוד בהשוואה לשאר הרקע – כמו בדוגמא הנראית בצילום ח-8, למטה.



**צילום ח-8. סנוור מחדירת שמש ישירה (למעלה) ומבהיקות גבוהה של הרקע (למטה).**

לסנוור ישנם שני ביטויים עיקריים:

- סנוור ליקוי (disability glare) – סנוור המביא להפחתה ביכולת להבחין בפרטים, אם כי לא בהכרח כרוך באי-נוחות. למשל, החזרים מנייר לבן מבריק עלולים להפריע בקריאה; השתקפויות על גבי מסך מחשב או על גבי מסך טלוויזיה מפריעות לראות את התצוגה.
- סנוור טורד (discomfort glare) – גם כאשר אין הפחתה ניכרת ביכולת להבחין בפרטים, הימצאותם של מוקדי אור בוהקים מאוד בשדה הראייה גורמים לאי-נוחות.

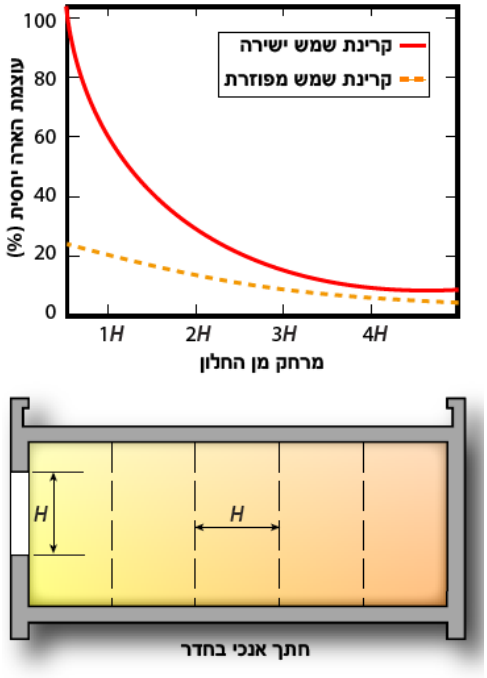
הקושי בתכנון תאורה טבעית, דווקא בארץ שטופת שמש כנו ישראל, נובע ממספר סיבות:

א. עוצמת ההארה על משטח אופקי בחוץ עשויה להיות 100,000 לוקס או יותר – כלומר פי 100 או יותר מן הנדרש בתוך הבניין.

ב. שטף קרינת השמש הפוגע בחלונות בכיוונים השונים איננו אחיד, ולפיכך עוצמת ההארה אשר תתקבל באמצעות חלון בגודל נתון שונה מחזית לחזית של הבניין.

ג. שטף קרינת השמש המתקבל על קיר נתון משתנה בהתאם לעונות השנה, לשעות היממה ולתנאי מזג האוויר.

עוצמת ההארה הטבעית בחלל הבניין יורדת ביחס ישר לריבוע המרחק מן החלון, בהתייחס לגובה הפתח (המרחק מן הסף למשקוף). ראו איור ח-8.




**איור ח-8. עוצמת ההארה פוחתת במהירות כאשר מתרחקים מהחלון**

קל לראות שלא ניתן להשיג תאורה טבעית יעילה כאשר כל החלונות בבניין, ללא תלות בחזית בה הם ממוקמים ובתכנון החלל הפנימי דומים בגודלם, במיקומם ובאופן ההצללה עליהם.

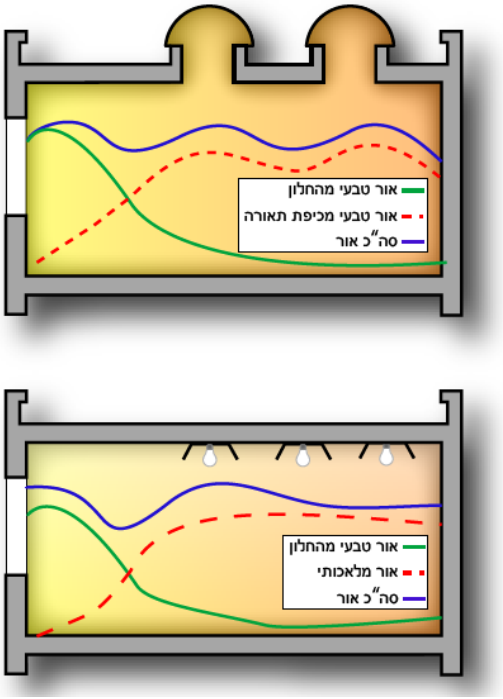
מדוע כדאי אפוא להתאמץ בכדי להשיג תאורה טבעית, במקום להסתפק בתאורה מלאכותית (חשמלית)?

ראשית, משום שמחקרים רבים מראים כי דווקא השינויים בתאורה הטבעית, החלים למעשה כמעט ללא הרף במהלך היום, תורמים לתחושת הרווחה ולבריאות שלנו ומגדילים את פריון העבודה. אור טבעי – בתנאי שניתן לבקר את העוצמה שלו – כמעט תמיד עדיף על תאורה מלאכותית. ושנית, משום שחלקה של התאורה החשמלית בהוצאות האנרגיה הישירות והעקיפות של בניין עשוי לנוע בין כ-10 אחוזים בבנייני מגורים ועד ל-40 אחוזים או יותר בבנייני משרדים. כלומר, ניצול יעיל של תאורה טבעית עשוי להביא לחיסכון ניכר בהוצאות התפעול השוטפות, בעיקר במשרדים.

תכנון נכון של התאורה הטבעית אינו רק חוסך בעלות הישירה של החשמל לתאורה, אלא אף עשוי להביא לחיסכון גם בעלויות מיזוג האוויר, משום שהיעילות האורית של אור השמש, שהיא בדרך כלל בין 90-120 לומן לואט (עבור קרינת שמש ישירה, תלוי בזווית מעל האופק), ועשויה להגיע אף ל-150 לומן לואט (עבור קרינה מפוזרת משמים בהירים) גבוהה מזו של רוב מקורות האור החשמליים.

כלומר, עומס החום על הבניין הנוצר עקב קליטה של כמות אור יום נתונה קטן מזה הנוצר על ידי הפקת אותה כמות אור באמצעות נורות חשמליות. הרחבה בנושא נמצאת בפרק י"ז. עם זאת, מן הראוי לציין כי בדרך כלל עוצמת ההארה הטבעית המתקבלת באמצעות החלונות גבוהה מן הנדרש, ביחוד סמוך לקיר החיצוני: במקרים כאלה, נוצר עומס מיותר על מערכות מיזוג האוויר.

תאורה אחידה יותר בחלל יכולה להתקבל על ידי שילוב מתאים של מקורות אור נוספים (מלבד החלונות בקירות החיצוניים), במיוחד במקומות הרחוקים יחסית מהפתחים האלה. תוספת זו יכולה להתבצע על ידי תאורה טבעית נוספת (למשל באמצעות פתחי תאורה בתקרה בקומה העליונה) או על ידי תאורה מלאכותית (איור ח-9). חשוב מאוד שהבקרה על אמצעי התאורה המלאכותיים תאפשר הפעלה נפרדת של גופי התאורה באזורים הפנימיים הנמצאים רחוק מהחלון.




**איור ח-9. בכדי לקבל תאורה אחידה בחלל, דרושים מקורות אור נוספים מלבד החלונות בקיר החיצוני.**

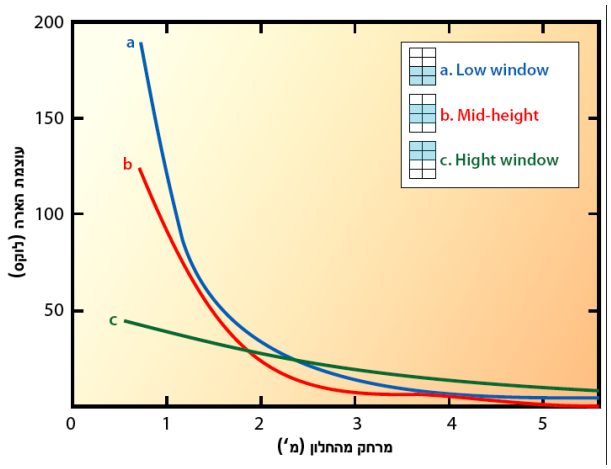
## 7.1 העברת אור

טעות נפוצה בקרב המתכננים היא ההנחה שבכדי למנוע סנוור, די בהתקנת מערכת זיגוג הכוללת שמשה עם זכוכית מגוונת הבולעת חלק ניכר מקרינת השמש הפוגעת בה. זאת משום שהפחתה אחידה של עוצמת ההארה על המשטחים השונים בחדר איננה משנה את הניגודים בבהיקות שלהם. מאחר והעין האנושית מסוגלת להתאים את עצמה לרמות אור שונות, כל עוד הבהיקות המוחלטת איננה יורדת לערכים מאוד נמוכים, עלולים הניגודים בין משטחים בהירים לבין משטחים כהים יותר לגרום להיעדר נוחות ויזואלית. בסדרת ניסויים אשר נערכה בארץ בימים שטופי שמש, לא נמצא כמעט הבדל בתגובות הנבדקים ביחס לסנוור בסביבת העבודה כאשר שמשה שקופה הוחלפה עם שמשה בעלת מעבר אור של 50% בלבד. מאידך, התקנת שמשות בעלת מעבר אור של פחות מ-20%, אשר יבטל כמעט לחלוטין את תחושת הסנוור, כרוך באובדן כמעט מוחלט של הפוטנציאל לתאורה טבעית.

**המלצה: חלון המשמש לתאורה טבעית (כגון חלון מעל מדף אור) יהיה בעל מעבר אור גבוה ככל האפשר – לפחות 60%. חלון המיועד בעיקר למבט החוצה יהיה בעל מעבר אור של 30-50% בלבד, ויצויד במערכת הצללה ניתנת לכיוון.**

## 7.2 מיקום החלון

למיקום החלון בקיר החיצוני של החדר, ובעיקר לגובהו מעל הרצפה, ישנה השפעה מכרעת על התפלגות התאורה הטבעית בחלל הפנימי. כפי שמראה איור ח-10, חלון הממוקם קרוב לתקרה יוצר התפלגות כמעט אחידה של התאורה בגובה משטח העבודה (כ-70-80 ס״מ מן הרצפה). לעומת זאת, כאשר גובה החלון נמוך יותר, עוצמת ההארה בסמוך לקיר החיצוני גבוהה ביותר, במיוחד אם חודרת מבעד לזיגוג קרינת שמש ישירה. במקרה כזה, עוצמת ההארה על משטח העבודה עלולה להגיע ל-50,000 לוקס או יותר (כלומר, בערך פי 100 מן העוצמה הרצויה).




**איור ח-10. השפעת גובה החלון על פיזור האור בחדר**

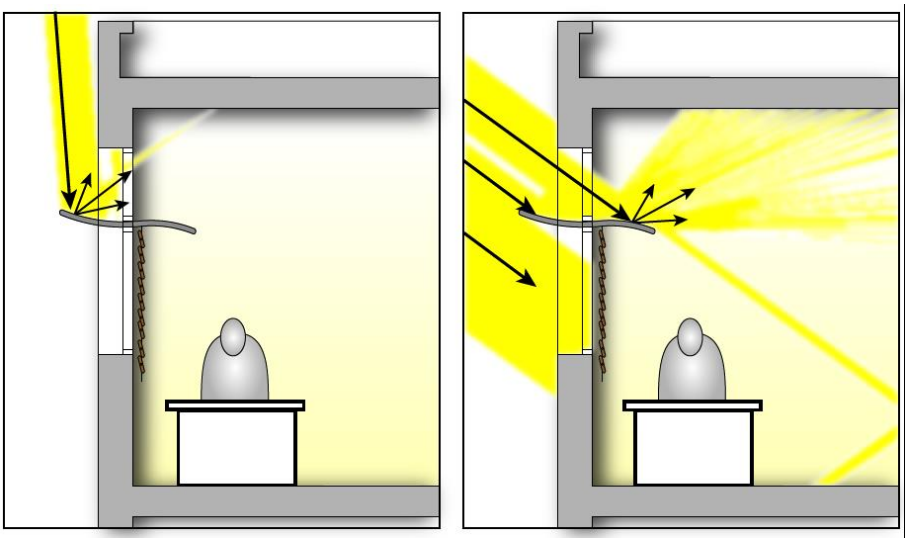
## 7.3 אמצעים להכוונת האור

כיוונן של קרני השמש הפוגעות בשמשה איננו בהכרח הכיוון הרצוי לנו. למעשה, כמעט תמיד רצוי לכוון את הקרינה אל התקרה, וכתוצאה מכל לקבל באזור הפעיל אור רך ומפוזר במקום קרינת שמש ישירה. לשם כך ניתן להיעזר באמצעים שונים, אשר אותם ניתן לסווג לשתי קבוצות: אמצעים קבועים ואמצעים ניתנים לכיוון. יתרונם של האמצעים הקבועים הוא בכך שאינם דורשים תשומת לב מדיירי הבניין, ובכך שמלבד ניקיון תקופתי הם אינם דורשים תחזוקה ואינם מתקלקלים. כל האמצעים הניתנים לכיוון נותנים מענה לתנאי תאורה משתנים ולצרכים השונים של הדיירים, אבל אינם נותנים מענה מספק ללא התערבות הדיירים, נוטים להתקלקל ודורשים ניקיון ותחזוקה.

אמצעי קבוע פשוט אשר מתאים ליישום כאשר החלון הוא גבוה (קרוב לתקרה) הינו מדף אור (צילום ח-9). מדף אור ניתן להתקין מחוץ למישור הזכוכית, בתוך החלל או בשני צדדי החלון גם יחד. המדף החיצוני משמש להצללת הפתח התחתון ולניתוב אור לתקרת המשרד מקרינת שמש אשר ללא קיום המדף הייתה מגיעה לפתח התחתון (איור ח-11). ישנו יתרון מסוים למדף חיצוני אשר צדו החיצוני נוטה מעט מעלה בכדי לכוון את החזר האור יותר לעומק תקרת המשרד (במיוחד בשעות בהן זוויות השמש הינן באמצע גובה הרקיע). ישנו יתרון גם למדף בעל פרופיל קעור (כלפי מעלה) בשל יכולתו לרכז את החזר קרינת השמש דרך הפתח לעומק תקרת המשרד). המדף הפנימי משמש לעצירת קרינת השמש הישירה המגיעה מהפתח העליון להגיע לסביבת העבודה ובכך מקטין את ההסתברות לסנוור ומפחית את עומס חום על השוהים בחדר (איור ח-11). בד״כ עומק מדף זה אינו מאפשר מניעה מלאה של חדירת קרינת השמש כאשר זוויות השמש נמוכות, ולכן נדרשים אלמנטי הצללה וניתוב אור גם בצמוד לפתח העליון. ישנו יתרון מסוים למדף פנימי בעל פרופיל קמור (כלפי

מעלה) בשל יכולתו לפזר אור לשטח רחב יותר של התקרה, ובכך לאפשר תאורה טבעית אחידה יותר במשרד. תכנון מדפי אור גם בחוץ וגם בפנים הינו הפתרון האידיאלי, ויאפשר את התרומה המרבית. מומלץ כי גימור מדפי האור יהיה בעל צבע בהיר ורפלקטבי בכדי לאפשר החזרה מרבית. לצורך החזר אור מיטבי יש צורך בניקיון של המדפים. מומלץ לשקול את המשכיות מדפי האור מעבר לרוחב הפתח בכדי לאפשר הצללה וצמצום הסנוור בשעות בהן קרינת השמש מגיעה לחלון בזווית נמוכה (כגון בבוקר ואחה"צ).

**צילום ח-9. מדף אור פנימי בחדר ישיבות. מבעד לחלון ניתן להבחין גם במדף חיצוני [69].**

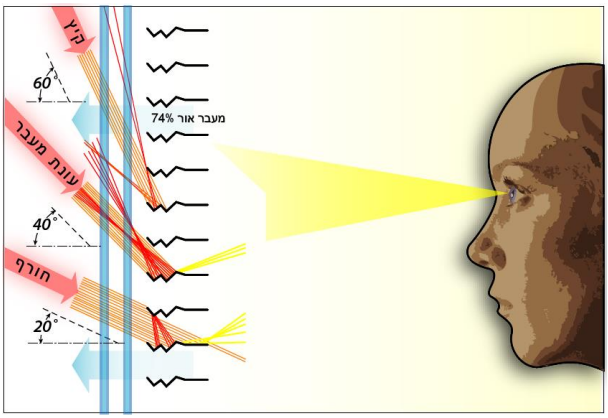


**איור ח-11: מדף אור בשילוב עם תריס ונציאני למניעת חדירת קרינת שמש ישירה בזויות נמוכות (ימין). חלקו החיצוני של מדף האור משמש גם כאמצעי הצללה כאשר השמש גבוהה (שמאל) [70].**

כאשר לא ניתן להתקין מדף אור, אך גם בשילוב עם התקן זה, ניתן לשפר את פיזור האור בחלל באמצעות תריסים פנימיים הניתנים לכיוון, כגון רפפות אנכיות או רפפות אופקיות (תריסים ונציאנים). לתריסים תפקיד כפול: הצללה של השמשה כאשר פוגעת בה קרינת שמש ישירה, והכוונת קרינת השמש לעומק החלל.

[69] Vogen Horn, 2008
[70] אראל וקפטן, 2011

הפרופיל המסורתי של התריסים הוונציאנים הוא קמור (אם הם עשויים מתכת דקה) או שטוח (אם הם עשויים עץ). עם זאת, ניתן להיעזר בפרופילים משוכללים יותר הנותנים מענה חלקי לפגיעת קרינת שמש בזוויות שונות, בהתאם לעונות השנה. דוגמא לפרופיל משוכלל ניתן לראות איור ח-12 :




**איור ח-12:**

**תריס ונציאני עם פרופיל משוכלל** [71]

## מקורות


[1] נאמן א., 2002. תאורה טבעית בבניינים - עקרונות והנחיות תכנון. המשרד התשתיות הלאומיות והטכניון, חיפה. 467 עמ'.

[2] אראל א., קפטן ע. ומוצפי-הלר ו. (2011). נוחות ויזואלית וחיסכון באנרגיה במשרדים עם תאורה טבעית באזורים שטופי שמש. דו"ח סופי במחקר עבור המשרד לתשתיות לאומיות.

[3] Baker N. and Steemers K., 2002. Daylight Design of Buildings. James and James, London, 250p.

[4] Baker N., Fanchiotti A. and Steemers K. (eds.), 1993. Daylighting in Architecture – A European Reference Book. James and James, London.

[5] Carmody J., Selkowitz S., Arasteh D. and Heschong L., 2007. Residential Windows. W. W. Norton, New York, 247p.

[6] Evans B., 1981. Daylight in Architecture. McGraw-Hill, New York, 204p.

[7] Evenari M., Faiman D., Gordon J., Govaer D., Mazigh D. and Tadmor N. (1987). Global insolation measurements at Avdat during the period 1969-1977. Jacob Blaustein Institute for Desert Research Internal Report ASCU 87/26.

[8] Fontoynont, M. (Ed.) 1999. Daylight Performance of Buildings. James and James, London, 304p.

[9] Illuminating Engineering Society of North America (IESNA), 1999. Recommended Practice of Daylighting.

[10] Johnson T., 1991. Low-E Glazing Design Guide. Butterworth Architecture, Boston, 200p.

[11] Koster H., 2004. Dynamic Daylighting Architecture. Birkhauser, Basel, 463p.

[12] Lawrence Berkeley National Laboratory: Tips for Daylighting with Windows

[13] Muneer T., Abodahab N., Weir G. and Kubie J., 2000. Windows in Buildings. Architectural Press, Oxford, 258p.

[14] Olgyay, A., and Olgyay, V. (1957). Design with Climate: Solar Control and Shading Devices, Princeton University Press, New Jersey, 201p.

[15] Vogen Horn, A. (2008). Daylighting Collaborative: Light every building using the sky. USGBC presentation. http://www.daylighting.org/usgbc2008presentation.pdf


[71] Koster, 2004

# פרק ט:

# מיזוג אוויר

מאת יצחק ברבי

# פרק ט: מיזוג אוויר

אחד התפקידים העיקריים של הבניין הוא להבטיח לדיירים נוחות תרמית. בתכנון מתאים אפשר לקיים בבניין נוחות תרמית בצורה פסיבית, כלומר ללא הפעלת מערכות כלשהן, במרבית ימות השנה. אולם בתנאי הקיץ בישראל, יהיו ימים רבים אשר בהם עומס החום יהיה גבוה גם בדירה המתוכננת היטב, ולכן יש צורך במערכות אשר יביאו לשיפור התנאים התרמיים. כפי שתואר בפרק ד', נוחות תרמית איננה מושפעת רק מטמפרטורת האוויר, אלא גם מתכונות אחרות של הסביבה כגון לחות האוויר, תנועה שלו, ומאזן הקרינה. מערכות האקלום אמורות לטפל בכל הגורמים האלה, אולם בפועל, הקריטריון הבלעדי (כמעט) לנוחות תרמית בדירה הוא טמפרטורת האוויר, והאמצעי לוויסות הטמפרטורה הוא מערכת מיזוג אוויר.

האמצעי העיקרי לשיפור הנוחות התרמית בדירות המגורים בארץ בעונת הקיץ הוא מערכות מיזוג אוויר אשר מטרתן העיקרית היא להוריד את טמפרטורת האוויר. הורדת הטמפרטורה של האוויר עשויה להתבצע באחת משתי שיטות עיקריות: צינון בדחיסה (compression cooling) וצינון באידוי.

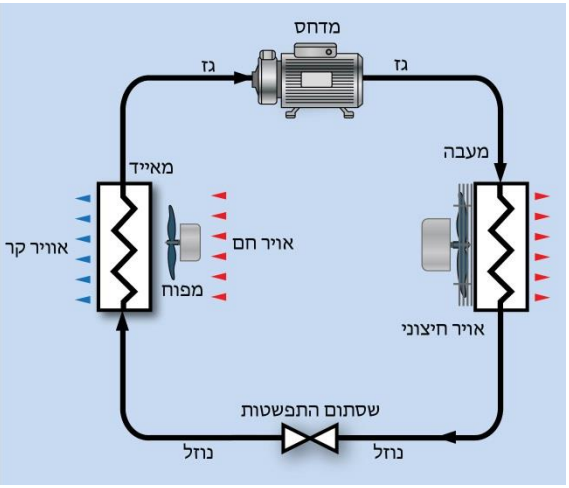
פרק זה יציג את סוגי מערכות המיזוג, ובנוסף גם את תרומתם של אמצעים אחרים כגון מאווררים, אשר אינם משפיעים על הטמפרטורה אך עשויים לשפר את התחושה.

## 1. קירור בדחיסה (vapor compression)

### 1.1 עיקרון הפעולה

כמעט כל מערכות מיזוג אוויר המותקנות כיום בבנייני מגורים פועלות באמצעות מעגל דחיסה, בשיטה אשר פותחה על ידי המהנדס האמריקאי קרייר (Carrier) עוד בשנת 1902.

איור ט-1 מדגים את עיקרון הפעולה של המערכת.




**איור ט-1.**

**מבנה סכמתי של מערכת מיזוג אוויר בדחיסה. המעבה עשוי להיות מקורר מים או אוויר.**

במערכות קירור בדחיסה, הקירור מתקבל בתהליך הכולל שינויים במצב הצבירה של גז הקירור (ה'קרר') הנמצא במערכת. במעגל הקירור הטיפוסי ישנם ארבעה רכיבים: מדחס, מעבה, מאייד ושסתום התפשטות. המדחס דוחס את גז הקירור, ועליית הלחץ מביאה לעלייה בטמפרטורה שלו.

הגז זורם אל המעבה, הנמצא מחוץ לחלל המקורר, ופולט את החום אשר נאגר בו אל הסביבה, מחוץ לחלל המקורר. פליטת החום גורמת לירידת הטמפרטורה של הגז ולעיבוי. הנוזל עובר דרך שסתום ההתפשטות, וירידת הלחץ המתקבלת מביאה לאידוי שלו, בתהליך המביא לירידה בטמפרטורה. הגז הקר עובר במאייד, המשמש כמחליף חום אשר סופח אנרגיה מהחלל המקורר. אחרי שספח חום מהחלל המקורר, הגז מגיע שוב למדחס, בכדי להתחיל את התהליך מחדש.

בכדי שהמערכת תוכל לפעול בתחום הטמפרטורות המתאים, גז הקירור חייב לשנות מצב צבירה מנוזל לגז ('לרתוח') בטמפרטורה של 4 מעלות לערך. בעבר היה נהוג להשתמש בגז פריאון (Freon-12), אולם בעקבות יישומה של אמנת מונטריאול להפסקת השימוש בגזים הגורמים נזק לשכבת האוזון באטמוספירה, נעשה שימוש בחומרים אחרים, כגון גזי קירור המכונים R-134a או R-22. בשנים האחרונות נמצא כי גם החומרים האלה גורמים נזק רב לסביבה, משום שהם גזי חממה פעילים מאוד: הפוטנציאל של R-22 כגז חממה גדול פי 1,800 מהפוטנציאל של מסה דומה של דו-תחמוצת הפחמן ($CO_2$). יצרני המזגנים נדרשים אפוא לשוב ולהחליף את גז הקירור, ודו-תחמוצת הפחמן (המכונה גם R-744) הוא החומר המועדף, למרות שיש לדחוס אותו בלחץ גבוה יותר בכדי להשיג הספק קירור דומה, בהשוואה לגזים המקובלים היום.

הערות:

- מפוח מאיץ את מעבר האנרגיה בין המאייד לאוויר של החלל המקורר. מפוח נוסף יותקן גם בכדי לסייע בסילוק החום בין המעבה לאוויר אל הסביבה מחוץ לבניין.
- ניתן לסלק את החום מהמעבה ישירות אל האוויר החיצוני, כפי שנעשה במרבית המזגנים בארץ, אולם ניתן גם לסלק את החום באמצעות מחליף חום עם מים. המים שחוממו על ידי חומר קירור במעבה יכולים אז לשמש לחימום המים המשמשים לרחצה(ראו פרק י"ד).

> בשינוי לא גדול, ניתן להפעיל את מערכת מיזוג אוויר גם כמערכת חימום (הנקראת משאבת חום). במקרה כזה, הופכים את כיוון הזרימה של הנוזל במערכת, מחליף החום הפנימי משמש כמעבה ומחליף החום החיצוני כמאייד. המזגנים המפוצלים המשווקים כיום בארץ פועלים אפוא כמשאבת חום, הן בחימום אוויר והן בצינון אוויר.
>
> לפירוט נוסף ראו פרק י'.

## 1.2 מערכות אינוורטר

במרבית המזגנים הפועלים כיום, ברקת הטמפרטורה נעשית על ידי הפעלה של המדחס כאשר הטמפרטורה עולה מעל ערך מסוים, והפסקת הפעולה כאשר הטמפרטורה יורדת שוב מתחת לטמפרטורה הנדרשת. בכדי למנוע הפעלה והפסקה לעיתים תכופות מדי, קיים הפרש טמפרטורות בין הרף העליון לסף התחתון, השווה בדרך כלל ל-2 מעלות, בקירוב. לשיטת עבודה זו מספר חסרונות:

א. ראשית, אופי הפעולה הזה אינו יעיל מבחינה אנרגטית.

ב. שנית, המדחס נדרש לעבוד בהספק מלא גם כאשר ניתן היה להסתפק בתפוקה נמוכה יותר.

ג. האופי המחזורי של העבודה גורם לבלאי מואץ של המערכת.

ד. ולבסוף, הטמפרטורה בחלל הממוזג אינה קבועה, אלא נעה באופן מחזורי בין ערכי מינימום ומקסימום השונים מהטמפרטורה המבוקשת.

מערכת מיזוג האוויר המכונה 'אינוורטר' באה לענות על חסרונות אלה. במערכת זו, המכונה גם VRF (variable refrigerant flow), ניתן לשנות את ספיקת נוזל הקירור על ידי שינוי מהירות הסיבוב של המדחס. לשם כך נדרשת המרת זרם החשמל מזרם חילופין לזרם ישר, ומכאן הכינוי 'אינוורטר'.

במערכת מיזוג אוויר מטיפוס אינוורטר המדחס יסתובב בשיא מהירותו בעת דרישה לתפוקת קירור מלאה, ובמהירות חלקית כאשר נדרשת תפוקה נמוכה יותר. הממדים הפיזיים של המעבה והמאייד קבועים, כך שהזרמת ספיקה מסית קטנה יותר של גז הקירור על פני המעבה או המאייד, כפי שנעשה בתפוקה חלקית, תביא לרתיחה או עיבוי טובים יותר ולהעלאת מקדם הפעולה (COP) של המערכת. החיסכון המתקבל באנרגיה החשמלית בתנאים אלה עשוי לנוע בין 30-50% בהשוואה למזגן רגיל, בהנחה שהמזגן אינו עובד בתפוקה מלאה כל הזמן, אלא רק בימים של עומס חום קיצוני.

מאחר ופעילות המדחס במערכות אינוורטר היא מדורגת אך רציפה, נחסכים זרמי ההתנעה הגבוהים והעומס על רשת החשמל יותר יציב.

## 1.3 מקדם הפעולה (COP) של מזגן

מקדם הפעולה של מזגן (COP – Coefficient of Performance) הוא היחס בין תפוקת הקירור לבין האנרגיה המושקעת בהפעלת המתקן. בניגוד למרבית מתקני החימום אשר בהם מתקיימת בעירה (של עץ או גז), או חימום באמצעות התנגדות חשמלית - ראו פרק י' – במרבית המזגנים יהיה מקדם הפעולה גדול מ-1. כלומר: תפוקת הקירור תהיה גבוהה מהאנרגיה החשמלית הדרושה להפעלתם. אין בכך סתירה של חוק שימור האנרגיה: מזגן הפועל כמשאבת חום מסיע אנרגיה מהסביבה פנימה (במצב חימום) או מהחלל הממוזג החוצה (במצב קירור) – והסעת החום דורשת פחות אנרגיה מהפקתו.

מקדם הפעולה תלוי בתכונות ההנדסיות של המזגן, אך גם בהפרש הטמפרטורה בין הצד החם לבין הצד הקר של המערכת. לכן, בקיץ מזגן יהיה יעיל פחות ככל שהטמפרטורה החיצונית עולה או ככל שהטמפרטורה המתקבלת בתוך הבניין נמוכה היותר.

מקדם הפעולה התיאורטי המרבי נתון על ידי הביטוי הבא:

$$COP_{max} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

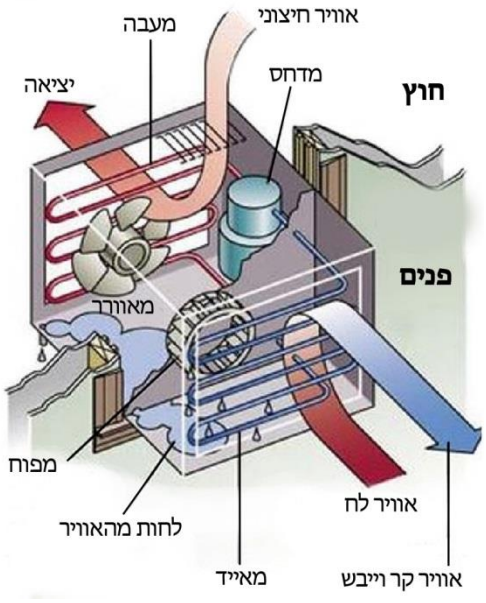
כאשר הטמפרטורות נקובות בקלווין. אם נניח כי הטמפרטורה בצד החם ($T_H$) היא 35 מעלות צלזיוס (כ-308 קלווין), והטמפרטורה בצד הקר ($T_C$) היא 24 מעלות צלזיוס (כ-297 קלווין), יהיה מקדם הפעולה המרבי שווה ל-27 בקירוב. בפועל, מרבית המערכות המשווקות כיום הן בעלות מקדם פעולה של 3 עד 3.5, כפי שנמדד בתנאי פעולה תקניים.

## 1.4 סוגי מזגנים

ניתן לסווג את המזגנים לפי המבנה שלהם – יחידה אחת או מספר יחידות - ולפי אופן אספקת הקירור – ישירות או באמצעות תעלות אוויר.

**א. מזגן אוויר הבנויים מיחידה אחת (כגון "מזגן חלון")**

מזגן אוויר זה הוא המזגן הוותיק מבין המזגנים הביתיים, בו כל רכיבי מעגל הקירור מותקנים במארז אחד, המותקן בפתח במעטפת החיצונית של הבניין. ברבות מההתקנות הוא היה מורכב על חשבון חלק מהחלון, ומכאן שמו מזגן חלון. המבנה של המזגן מתואר באיור ט-2.




**איור ט-2.**

**מבנה עקרוני של מזגן עשוי יחידה אחת**

למזגני אוויר הבנויים מיחידה אחת מספר חסרונות:

א. התקנתם מחייבת פתיחת פתח במעטפת החיצונית של הבניין.

ב. לכן לא תמיד ניתן יהיה להתקין את המאייד במיקום המיטבי לפיזור האוויר בחדר.

ג. מאחר והמדחס נמצא סמוך לחדר, פעולת המזגן רועשת.

**ב. מזגן הבנוי ממספר יחידות (מזגן מפוצל)**

במזגן מפוצל, מאייד אחד או מספר מאיידים ('מזגן רב-מאייד') מותקנים בתוך הדירה, והמעבה (עם המדחס) ביחידה נפרדת מחוץ לבניין. הקישור בין יחידות המאייד והמעבה נעשה באמצעות צינור נחושת המוביל את גז הקירור. צינור זה אמנם מבודד, אך ככל שאורכו גדול יותר (כלומר המרחק בין המאייד למעבה גדול יותר) – כך גדלים ההפסדים במערכת והמזגן יהיה פחות יעיל. בבנייה חדשה, תותקן צנרת גז הקירור בין המעבה למאייד וכן צינורית לניקוז מי עיבוי בצורה סמויה בתוך הקירות.

את יחידות המאייד ניתן להתקין בכל נקודה בחדר, במטרה להבטיח פיזור אוויר מיטבי. כאשר המאייד מותקן סמוך לתקרה, בהתקנה המכונה 'מזגן עילי', פתח יציאת האוויר מכוון כלפי מטה. כאשר המאייד מותקן סמוך לרצפה, התקנה המכונה 'מזגן רצפה', פתח יציאת האוויר מכוון כלפי מעלה.

למזגן העילי מספר יתרונות:

א. מאחר והאוויר הקר נוטה לרדת, פיזור החום יהיה אחיד יותר. בחורף, כאשר המזגן ישמש לחימום, יהיה בכך דווקא חיסרון.

ב. תנועת האוויר פחות מושפעת מנוכחות רהיטים

ג. המאייד אינו תופס מקום אשר עשוי היה לשמש להתקנת ריהוט אחר

חשוב להדגיש כי המזגן המפוצל אינו מספק אוויר טרי לחלל החדר, אלא מחמם או מצנן את האוויר הנמצא בו, בלבד. אף על פי כן, מומלץ כי בזמן פעולת המזגן יהיו החלונות והדלתות סגורים, בכדי להפחית מעבר חום לא מבוקר. אם בדירה ישנה הצטברות של ריחות לא נעימים או אדי מים בכמות רבה מאוד (בעיקר בחורף), רצוי לאוורר אותה לפני הפעלת מערכת האקלום. במרבית דירות

המגורים בארץ, ישנה אינפילטרציה של אוויר חיצוני טרי בכמות מספקת גם כאשר כל הפתחים סגורים. ראו הסברים מפורטים יותר בשאלה זו בפרק ד'.

בהתקנה המקובלת, ישנה יחידת מעבה אחת עבור כל מאייד. כאשר בדירה גדולה או בבית פרטי יש צורך במספר מזגנים, התקנה כזאת העלולים לגרום מפגע אסתטי בחזית או על גג הבניין. במקרים אלה ניתן להתקין 'מזגן רב-מאייד' אשר בו יותר מאשר מאייד אחד עבור אותה יחידת מעבה חיצונית. מערכת כזו עשויה להיות חסכונית יותר בהתקנה בהשוואה למערכת שבה ישנו מעבה לכל מאייד, אולם ההפעלה שלה פחות יעילה והבקרה על הפעולה אינה מאפשרת בקרה מיטבית על התנאים בכל החללים המקוררים .

**ג. מזגן מפוצל המספק אוויר דרך תעלות למספר חללים**

'מזגן מתועל' עשוי לספק אוויר למספר חללים בדירה באמצעות מערכת של תעלות אוויר המוזנות על ידי מאייד אחד. התעלות מותקנות בדרך כלל מעל תקרה מונמכת. בכל חדר ישנו פתח המכוסה ברפפה, אשר באמצעותה ניתן לווסת את כיוון זרימת האוויר ואת כמות האוויר המסופקת לחלל. היתרון העיקרי של המזגן זה הוא בחיסכון הכספי בהשוואה להתקנה של מספר מזגנים מפוצלים המשרתים כל חלל בנפרד.

עם זאת, למערכת כזו ישנם מספר חסרונות:

א. ניתן לבקר בנפרד את הטמפרטורה בכל אחד מהחדרים על ידי התקנת תרמוסטט בכל חדר ותריס חשמלי אשר יווסת את ספיקת האוויר המוזרם לחדר – אך פעולת המעבה נשלטת על ידי תרמוסטט אחד בלבד.

ב. הפעלת המערכת נדרשת גם כאשר יש צורך במיזוג של חלל אחד בלבד.

ג. ישנם הפסדי ספיקה בתעלות האוויר, מאחר והאוויר אינו מסופק ישירות לחלל המגורים.

א. מערכת התעלות עלולה להיות כר מחייה למיקרו-אורגניזמים מחוללי מחלות, כמו במערכות המותקנות לעיתים בבנייני משרדים, ואשר נמצאו תורמות תרומה לתסמונת הבניין החולה (SBS – sick building syndrome).

## 2. קירור באידוי

התהליך שבו משתנה מצב צבירה של חומר מנוזל לגז קרוי אידוי. תהליך זה דורש השקעת אנרגיה, אשר מקורה עשוי להיות בגז אשר לתוכו מתאדה הנוזל, או מקור חיצוני.

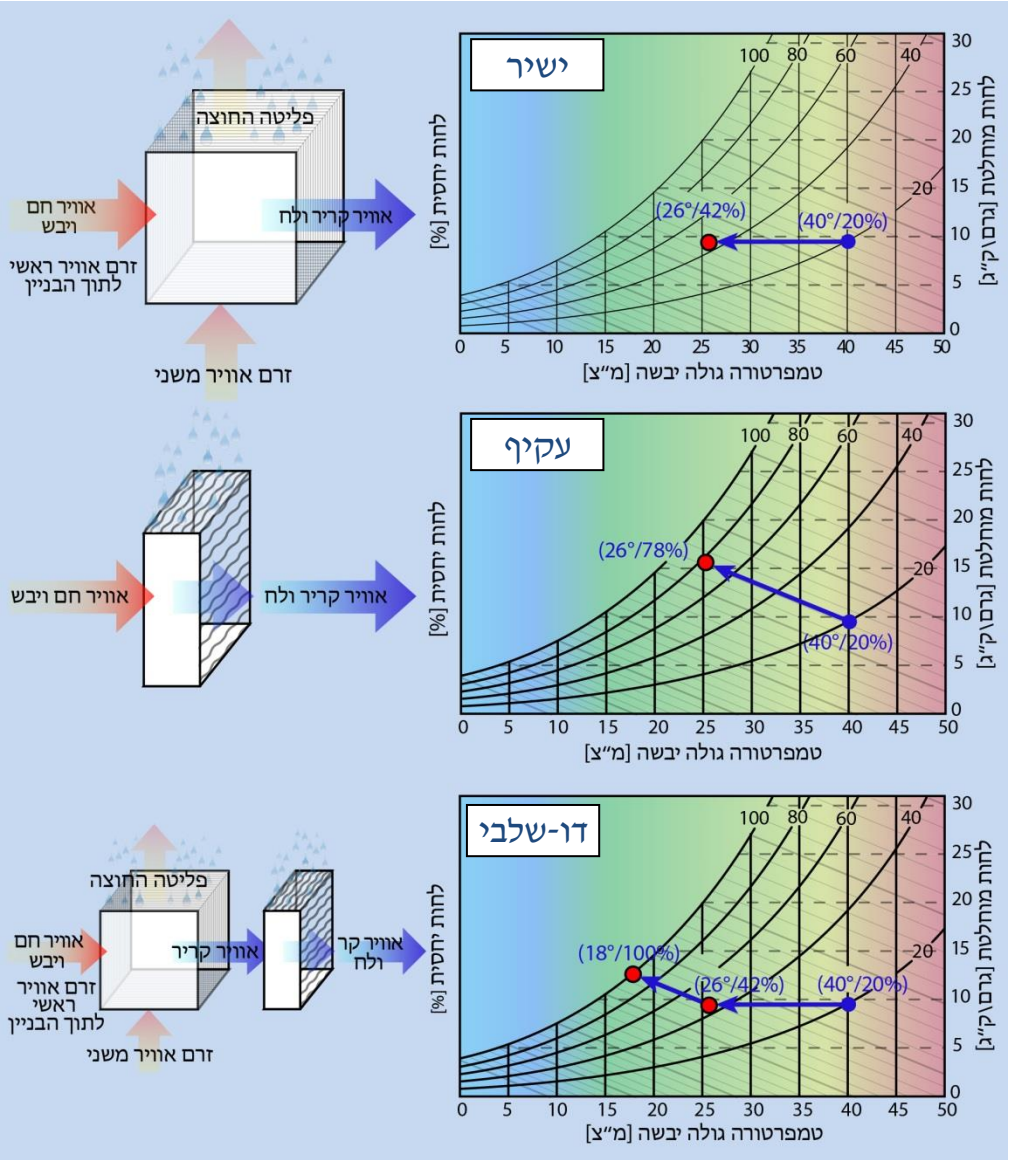
לאנרגיה הפנימית של אוויר שני מרכיבים [72]: חום מוחש וחום כמוס.

חום מוחש (sensible heat) הוא ביטוי לתנועתם של החלקיקים מהם מורכב החומר. עלייה בכמות החום המוחש בחומר תביא לעלייה בטמפרטורה שלו.

חום כמוס (latent heat) הוא ביטוי לכוחות בין החלקיקים האחראים לקיומם של מצבי הצבירה השונים (מוצק, נוזל או גז).

מתקנים לקירור באידוי ממירים את החום המוחש הנמצא באוויר לחום כמוס, ובכך מורידים את הטמפרטורה אך מעלים את הלחות. ישנם מספר סוגים של מתקנים בהם מיושם קירור באידוי (איור ט-3):

[72] הערה: הדיון כאן אינו עוסק באנרגיה כימית ואנרגיה גרעינית המהווים אף הם מרכיבים של האנרגיה הפנימית של חומר.




**איור ט-3. תהליך הקירור במתקני קירור באידוי מטיפוסים שונים.**

קירור באידוי ישיר מתקבל כאשר המים מתאדים ישירות אל האוויר אשר מסופק לבניין. האוויר אשר מתקבל הוא אפוא לא רק קריר יותר, אלא גם לח מאוד.

קירור באידוי עקיף נעשה כאשר האוויר המסופק לבניין מקורר באמצעות מחליף חום, אשר דרכו זורם גם אוויר אשר מקורר באידוי ישיר באופן ששני מסלולי הזרימה אינם באים במגע. האוויר המסופק לחלל הוא קריר יותר, אך תכולת אדי המים בתוכו אינה גדלה. (אם כי הלחות היחסית עולה, משום שהטמפרטורה יורדת!)

קירור באידוי דו-שלבי נעשה במתקן אשר משלב את שני התהליכים אשר תוארו למעלה: אוויר אשר קורר בקירור עקיף מצונן עוד על ידי אידוי מים ישירות בתוכו, לפני שהוא מסופק לבניין. בשיטה זו ניתן להגיע לטמפרטורות הנמוכות ביותר.

היישום של קירור באידוי בבניינים תלוי בתנאי הסביבה. האגן הסביבתי (environmental sink) במקרה זה, כמו בהסעה, הוא האוויר הנמצא מחוץ לבניין, אליו נפלט עודף האנרגיה מהבניין. אלא שכאשר מדובר באידוי, הפוטנציאל לקירור איננו תלוי רק בטמפרטורה של האוויר (הנתונה על ידי טמפרטורת הגולה היבשה שלו), אלא גם בתכולת אדי המים בו (המתוארת על ידי טמפרטורת הגולה

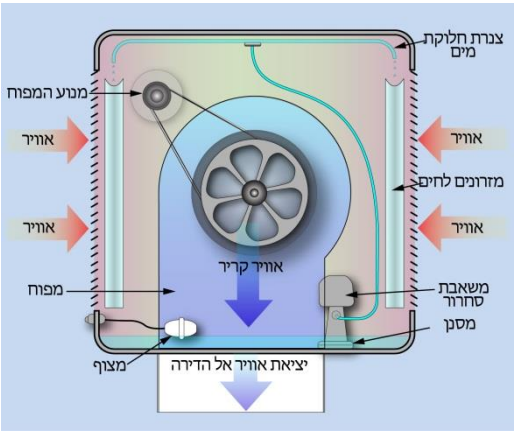
הלחה). מבחינה תיאורטית, טמפרטורת הגולה הלחה היא הטמפרטורה הנמוכה ביותר אליה אפשר לצנן את האוויר על ידי אידוי מים בלבד, בתהליך אדיאבטי. מבחינה מעשית, רוב מתקני הקירור באידוי אינם מספקים אוויר בטמפרטורה זו, אלא בטמפרטורה הגבוהה ב-2-3 מעלות יותר. בהנחה שאנו מעוניינים שהאוויר המקורר יסופק לבניין בטמפרטורה של 23-24 מעלות לכל היותר (ורצוי אפילו פחות מכך), לא ניתן להשתמש בקירור באידוי ישיר בסביבה שבה טמפרטורת הגולה הלחה של האוויר החיצוני עולה על כ-21 מעלות. בקירור עקיף או בקירור דו-שלבי ניתן להגיע לטמפרטורות נמוכות יותר, כפי שאכן נעשה במגדלי קירור בבניינים מסחריים רבים.

**מצנן אוויר איודי עם סחרור מים (מצנן מדבר)**

מתקן פשוט לקירור באידוי, המכונה מצנן מדבר (צילום ט-1), היה נפוץ מאוד באזורים עם לחות נמוכה, כגון בנגב עד לפני שנים אחדות, אולם לאחרונה נדחק בידי המזגנים. איור ט-2 מראה חתך עקרוני במצנן מדברי: האוויר המסופק לבניין נשאב באמצעות מפוח ומצונן כאשר הוא בא במגע עם הדפנות הלחות של המתקן. הדפנות, אשר עשויות חומר נקבובי וסופג (בדרך כלל צלולוזה), מורטבות באמצעות משאבה קטנה. עודפי המים נאספים בתחתית המיכל ומסופקים שוב לדפנות באמצעות המשאבה.

**צילום ט-1.**

**מצנן מדבר מותקן על הדופן החיצונית של בניין.**




**איור ט-4: חתך עקרוני במצנן מדבר**

עלות התפעול של מצנן מדברי נמוכה יותר מזו של המזגן, והוא יכול לספק כמויות גדולות של אוויר מצונן. עם זאת, לא ניתן למעשה לשלוט בטמפרטורה של האוויר המסופק, והיא תלויה בטמפרטורת הגולה הלחה של האוויר החיצוני. חשוב לציין כי פעולתו התקינה של מצנן מדבר מבוססת על צינון אוויר חיצוני חם אך יבש מאוד, ואספקתו לחלל הפנימי. מאחר ולא ניתן לצנן אותו לטמפרטורה נמוכה כדוגמת זו המושגת באמצעות מזגן, על המצנן לספק נפח אוויר גדול יותר. בהתאם לכך יש

צורך להשאיר פתח גדול דיו לשחרור אוויר מתוך החדר אל הסביבה, בספיקה הדומה לזו של האוויר הטרי אשר מספק המצנן.

כאמור, במצנן מדברי ניתן להשתמש רק באזורים בהם הלחות נמוכה. הדוגמא המובאת כאן ממחישה מדוע מתקן כזה אינו מתאים בעמק בית שאן, למשל.

דוגמא:

האם ניתן להשתמש במצנן מדברי (קירור באידוי ישיר) בעמק בית שאן?

לצורך הבדיקה נשתמש בנתוני אקלים מתחנת השירות המטאורולוגי בחפציבה, מתוך אטלס אקלימי למתכננים:

* טמפרטורת מקסימום חודשית ממוצעת בחודש יולי: 39.1 מעלות
* לחות יחסית ממוצעת בשעה 14:00 בחודש יולי: 35%
* לחץ אטמוספירי סטנדרטי ברום 80 מ' מתחת לפני הים: 102.1 קילופסקל

טמפרטורת הגולה הלחה המתקבלת בתנאים האלה היא 26 מעלות. כלומר, הטמפרטורה הנמוכה ביותר (תיאורטית!) שמתקן צינון באידוי יוכל לספק היא 26 מעלות - אך אז האוויר יהיה רווי. בפועל, האוויר שיסופק יהיה חם ב-2-3 מעלות מן הגולה הלחה, כלומר הוא יסופק ב-28-29 מעלות, בלחות של כ--85 90%. תנאים אלה אינם מבטיחים נוחות תרמית לדיירים.

**מצנן פנימי נייד**

בשנים האחרונות משווקים בארץ גם מצננים מדבריים קטנים וניידים אשר מוצבים בתוך החלל המקורר ולא מחוץ לו. משום כך, יעילותם פחותה, ובשימוש מוגבר הם אינם תורמים כלל לנוחות התרמית. זאת משום שכאשר אוויר מתוך החלל מצונן באופן רצוף על ידי אידוי מים, תכולת אדי המים עולה מעל התחום אשר בו עדיין ניתן לחוש בנוח. שימוש מתמשך במתקנים מעין אלה יוצר שילוב של טמפרטורה גבוהה ולחות גבוהה – ולכן עומס חום גבוה.

**מגדלי קירור**

מערכות לצינון מים באידוי מקובלות גם במתקני מיזוג אויר מרכזיים גדולים, כאשר קירור המעבה נעשה על ידי המים (מי עיבוי). מגדל קירור מצנן את מי העיבוי החמים הבאים מהמזגנים ומחזירם אותם מצוננים. מערכות כאלה מותקנות בעיקר בבנייני רב קומות (ראו בהמשך פרק זה).

## 3. אמידת הספק הקירור הנדרש

אמידת הספק הקירור הנדרש נובעת מחישוב העומס התרמי בחלל המקורר, ועליו להביא בחשבון הן את עומס החום המוחש והן את עומס החום הכמוס. העומסים נובעים מחדירת חום לחלל המקורר דרך מעטפת הבניין (תקרה, רצפה, קירות וחלונות); עומסי חום פנימיים (מכשירי חשמל ותאורה); הסתננות אויר חיצוני; ותוספת לחות ממקורות פנימיים (כגון אדי מים בחדרי רחצה או במטבח). ניתן להביא בחשבון גם את תרומתם של בני האדם הנוכחים בדירה לעומס, אולם בניגוד לחללים בהם מספר האנשים רב, כגון אולמות אירועים, בדירות מגורים גורם זה הוא בדרך כלל זניח.

מטרת החישוב היא לאפשר למתכנן לבחור מתקן קירור בעל תפוקת קירור מתאימה [73].

[73] 1 BTU הוא כמות האנרגיה הדרושה לחמם ליברה אחת של מים במעלה אחת פרנהייט. 1 BTU = 1054-1060 ג'אול או 252-253 קלוריות (כתלות בטמפרטורת המים).

**מילון מונחים**

- את תפוקת הקירור של מערכות מיזוג האוויר נהוג בארץ לסמן ביחידות BTU ( British Thermal Unit) לשעה.
- תפוקת קירור של יחידות גדולות יותר מסמנים ביחידות של 'טון קירור': 1 טון קירור שווה ל 12,000 BTU לשעה.
- את צריכת החשמל של המזגן מכנים לעיתים גם במונחי כוח סוס: 1 כוח סוס (כ"ס) = 746 ואט.

### 3.1 פיזור אוויר הומוגני בחדר

נוחות תרמית הנדרשת בחלל תושפע גם מאופן החלוקה של האוויר המצונן בו. כאשר מתקן הקירור ממוקם בנקודה אשר אינה מאפשרת פיזור מיטבי ואחיד של האוויר המקורר בחלל, עלול להיות מצב שיהיו אזורים חמים יותר או קירור יתר באזורים אחרים. מכאן חשיבות רבה לחלוקה ופיזור מתאים לחללים ממוזגים.

### 3.2 חשיבות ההתקנה של מזגן בעל הספק מתאים

ישנם חסרונות להתקנה של מזגן בהספק לא מתאים – הן גדול מדי והן קטן מדי.

**א. התקנת מזגן גדול מהנדרש לחלל המקורר**

מזגן בעל הספק גדול מדי עלול לפעול במחזורי עבודה קצרים מדי (Short Cycling). ריבוי ההתנעות מקצר את אורך החיים של המזגן ומזיק לרשת החשמל הדירתית עקב זרמי ההתנעה. מזגן גדול הוא בדרך כלל גם יקר יותר, וצורך יותר אנרגיה.

**ב. התקנת מזגן קטן מהנדרש לחלל המקורר**

מזגן בעל הספק קטן מדי עלול לא להבטיח נוחות תרמית בחלל המקורר, במיוחד בימים החמים ביותר. במזגן כזה, המדחס יפעל כמעט ללא הפסקה בעומס מרבי, ובכך עלול להתקצר אורך החיים שלו.

## 4. בקרת הלחות בבניין עם מיזוג אוויר

כאשר אוויר החדר בא במגע עם המשטח הקר של המאייד, בדרך כלל ייווצר על פניו עיבוי, משום שהטמפרטורה שלו נמוכה מנקודת הטל. מי העיבוי מתנקזים אל אגן בתחתית המאייד, ומשם מובלים בצינור אל מחוץ לבניין. בכך משמש אפוא המזגן לא רק אמצעי להורדת הטמפרטורה בחדר, אלא גם להורדת הלחות.

חלק מהאנרגיה שהמזגן מסלק מהחדר היא אפוא חום כמוס. כאשר האוויר לח מאוד, התרומה של הורדת הלחות לנוחות התרמית עשויה להיות חשובה לא פחות מהקטנת החום המוחש, הבאה לידי ביטוי בהורדת הטמפרטורה. כפי שהוסבר בפרק ב', ניתן להתייחס אל האוויר כאל תערובת בעלת שני מרכיבים: אוויר יבש ואדי מים. מאחר ובטבע האוויר היבש מצוי רק בצורת גז, הבדלים בחום הכמוס הם תוצאה ישירה של שינוי בכמות אדי המים. אף כי החלק היחסי של אדי המים באוויר הוא נמוך מאוד – פחות משני אחוזים בדרך כלל - לנוכחותם ישנה השפעה רבה על כמות האנרגיה הכוללת (האנתלפיה) של האוויר. הסיבה לכך היא שבעוד החום הסגולי של אוויר יבש ושל מים הוא יחסית נמוך, הרי שחום האידוי - האנרגיה הדרושה לאדות מים לאדים באותה טמפרטורה (latent heat of vaporization) - גדולה מאוד.

**טבלה ט-1: חום סגולי וחום האידוי של מרכיבי האוויר**

| | kJ/kg °C | kcal/kg °C |
|---|---|---|
| חום סגולי של אוויר יבש (בטמפרטורה 10 °C)* | 1.01 | 0.24 |
| חום סגולי של מים (בטמפרטורה 4 °C)* | 4.18 | 1.0 |
| חום האידוי | 2,257 | 540 |

- החום הסגולי מושפע במידה מסוימת מטמפרטורת החומר.

**טבלה ט-2: השפעת תכולת אדי המים על האנתלפיה של אוויר בטמפרטורה של 25 מעלות.**

| תכולת אדי מים [g/kg] | לחות יחסית [%] | אנתלפיה [kJ/kg] |
|---|---|---|
| 0 | 0 | 25.0 |
| 5 | 25 | 37.6 |
| 10 | 50 | 50.4 |
| 15 | 75 | 62.9 |
| 20 | 100 | 75.5 |



החשיבות של אדי המים באוויר מהבחינה האנרגטית באה לידי ביטוי מעשי בפעולתן של מערכות צינון באידוי ומערכות מיזוג אוויר כאחת:

- במערכות מיזוג אוויר, אדי המים הנמצאים באוויר מתעבים כאשר הם באים במגע עם מחליף החום הנמצא בטמפרטורה הקרובה לאפס מעלות. בתהליך העיבוי נפלטת אנרגיה רבה, הגורמת להתחממות האוויר. על מערכת מיזוג אוויר הפועלת באקלים לח להתמודד עם עומס גדול בהרבה ממערכת הפועלת בסביבה שבה הטמפרטורה של האוויר זהה אך הלחות נמוכה.
- במערכות צינון באידוי, מיושם תהליך הפוך. אוויר חם יחסית ויבש בא במגע עם מים על מצע מיוחד או בצורת טיפות המרוססות לתוכו. אידוי של המים סופח אנרגיה רבה מן האוויר, וכתוצאה מכך עשויה לרדת הטמפרטורה שלו במידה ניכרת.

## 5. מערכות מיזוג אוויר בבניינים רבי קומות

מערכות מיזוג האוויר מיועדות לגרוע חום מהבניין הממוזג ולפלוט אותו לאטמוספירה. במרבית הבניינים, ניתן להתקין מערכות עצמאיות ונפרדות לכל דירה או כל חלל ממוזג, אשר בהן המעבה, המותקן מחוץ לבניין, ממוקם קרוב יחסית למאייד המקרר ישירות את האוויר בתוכו. המעבה ימוקם במרפסת שירות באופן שיאפשר את פליטת החום אל הסביבה אך גם יהיה נגיש לאחזקה במקרה הצורך. שיטה זו מאפשרת לשמר במידה רבה את העצמאות של הדיירים ולהימנע ממערכות משותפות אשר דורשות אחזקה מרכזית היוצרת תלות הדדית ואשר עלולה להוות מקור לסכסוכים.

יחד עם זאת, ישנם לא מעט בניינים רבי קומות אשר בהם מותקנת מערכת מרכזית. מערכת כזו מבטלת את הצורך בהתקנת מערכת נפרדת במרפסת השירות, ומתאימה לדיירים המעוניינים להימנע מהעול של אחזקה שוטפת של המערכות. בבניינים כאלה ניתן להתקין מערכת המספקת מים קרים ממרכז אנרגיה אחד אל יחידה פנימית בתוך כל אחת מהדירות. את המים האלה ניתן לספק בשתי שיטות: מיחידת קירור או מגדל קירור באידוי.

## 5.1 יחידת קירור (package chiller)

במערכות אלו, קירור המים ייעשה באמצעות יחידת קירור (׳צ׳ילר׳) עם מעבה מקורר אוויר אשר מותקנת על גג הבניין. המים המקוררים יסופקו בצנרת לכל אחת מהדירות. התקנת יחידת קירור על הגג מפחיתה את ההשפעה האקוסטית של המערכת על הסביבה (בהשוואה להתקנת מעבים לכל גובה הבניין), ואינה דורשת שטח בתוך הבניין עצמו. הטכנולוגיה פשוטה יחסית ואינה דורשת אחזקה יקרה. עם זאת, כאשר מספר הקומות גדול, שטח הגג עלול לא להספיק לכל יחידות הקירור. כמו כן, כאשר קיים מרחק רב בין יחידת הקירור על הגג לבין היחידה הפנימית בדירה נצילות המערכת קטנה. לכן יחידת קירור מטיפוס זה מתאימה רק לבניינים אשר בהם מספר צרכנים מצומצם.

## 5.2 מגדל קירור ויחידות קירור מים (chillers)

כאשר לא ניתן להתקין יחידת קירור מקוררת אוויר, ניתן להתקין על גג הבניין מגדל קירור באידוי, אשר תפקידו לפלוט את חום המעבה אל הסביבה. השטח הנדרש למגדל קירור (כ-0.2 מ״ר לטון קירור) קטן בחצי לערך בהשוואה לשטח של יחידת קירור מקוררת אוויר בהספק דומה (כ- 0.3 מ״ר לטון קירור). לרוב יחידות קירור המים (צ׳ילרים) ממוקמות בחדר מכונות בתוך הבניין, בדרך כלל באחת מקומות המרתף.

פליטת החום במגדל הקירור מבוצעת בעזרת אידוי מים. קצב האידוי מושפע מאוד מתנאי הסביבה, והוא עשוי להיות בערך 0.15-0.2 ליטר לדקה עבור כל טון קירור שיספק המתקן. כמות המים הכוללת אשר אובדת בישראל בצורה זו במתקני מיזוג אוויר בבניינים היא כ-50 מיליון מ״ק לשנה [74].

מאחר ומי הרשת בארץ עשירים במינרלים (מים ׳קשים׳), הם דורשים טיפול על מנת לצמצם היווצרות של משקעי אבנית על מחליף החום על ידי ריכוך המים. פעולת הריכוך דורשת אחזקה שוטפת וקפדנית, ודורשת ידע מקצועי.

למגדלי קירור ישנן השלכות שליליות נוספות על איכות הסביבה, הנובעות מהוספת הכימיקלים למים למניעת שיקוע אבנית, למניעת קורוזיה ולחיטוי. אידוי מים במגדלי הקירור מייצר תמלחת מרוכזת פי שלושה בהשוואה לריכוז המלחים במי ההספקה, אותה יש לנקז למערכת הביוב. תהליכי הטיפול הרגילים במי השפכים אינם מסוגלים לסלק מלחים אלה.

## 5.3 מערכת יחידות אזוריות (water source)

מערכת זאת בנויה מזגן העשוי כיחידה אחת, לרבות המדחס, המותקן בחלל הממוזג. קירור המעבה נעשה בעזרת מים המסופקים ממגדל קירור מרכזי לכל הבניין, באמצעות צנרת מרכזית במחזור סגור. שיטה זו מאפשרת מתן עצמאות לכל אחד מדיירי הבניין בהפעלת מזגני האוויר, לרבות תשלום עבור האנרגיה החשמלית ישירות לחברת החשמל. היא אינה מחייבת פליטת החום מכל מערכת פרטית ישירות לאטמוספרה, ובכך נמנע הצורך למקם את יחידות המעבים על פני מעטפת הבניין. העלות הראשונית של מערכות כאלה נמוכה בהשוואה למערכת מרכזית להספקת מים מצוננים ליחידות פנימיות בדירה, אולם הן צורכות יותר מים ויותר אנרגיה (עד 30%) [75].נוסף לכך, מערכת זו תלויה גם כן במגדל הקירור המשותף על גג הבניין, על כל המשתמע מכך.

[74] אומדן המשרד להגנת הסביבה
[75] בן-דרור, 2001.

## 6. נושאים נוספים

### 6.1 צינון באמצעות אוויר חיצוני – אוורור לילה או מערכות אקונומייזר

כאשר טמפרטורת האוויר החיצוני נמוכה מהטמפרטורה הרצויה בתוך הבניין, ניתן לנצל זאת לחיסכון באנרגיה הדרושה לאקלום, בשני אופנים:

א. אוורור נוחות, המיועד לצנן את דיירי הבניין באופן ישיר.

ב. צינון מסת הבניין, גם אם החלל אינו מאוכלס.

את האוויר החיצוני ניתן לספק באמצעים פסיביים, דהיינו – פתיחת חלונות לאוורור טבעי. אם מבנה הבניין או משטר הרוחות אינם מבטיחים ספיקת אוויר מספקת, ניתן להיעזר במפוחים. זרימת האוויר תתוכנן בהתאם לייעוד העיקרי – סמוך לתקרה או לקירות כאשר הכוונה היא לצנן את מסת הבניין, או לעבר מרכז החדר כאשר הכוונה היא לשפר את נוחות הדיירים באופן מיידי.

בבנייני מגורים אשר בהם מותקנת מערכת מיזוג אוויר מרכזית מתועלת, המפוחים עשויים גם להזרים אוויר צח לצינון הדירה. מערכת כזו, הקרויה אקונומייזר (economizer), אופיינית לבניינים שבהם העומסים הפנימיים גדולים ואין בהם אפשרות לאוורור פסיבי ישיר באמצעות פתיחת חלונות, כגון בנייני משרדים מסוימים או אולמות אירועים. עם זאת, יתכן כי בתנאים מסוימים יהיה יתרון בהתקנת מערכת כזו גם בבנייני מגורים.

### 6.2 ניצול מי העיבוי של מזגנים

במישור החוף, שם האוויר לח מאוד, פולטים המזגנים בקיץ כמות מים בשיעור העשוי להגיע עד 2 ליטר למ״ר ליום. כלומר, נפח מי העיבוי שיתקבלו מדירה בשטח של 100 מ״ר הממוזגת ברציפות עשוי להגיע ל-200 ליטר ביום, וכאשר מדובר בבניין רב קומות שבו 60 דירות, יתקבלו עד 12 מ״ק מים ביום! מי העיבוי של המזגנים הינם מים נקיים, ואם צנרת הניקוז מתוחזקת כראוי ניתן להשתמש בהם להשקיית הגינה בשימוש מיידי או בעזרת מערכת עם מיכל אגירה המבוקרת כנדרש.

### 6.3 מסננים

בכל המזגנים האוויר המסופק לחדר עובר סינון, בין אם מדובר באוויר המסופק באמצעות תעלות אוויר ובין אם מדובר באוויר החדר המצונן ביחידת המאייד. ניתן לסנן האוויר באמצעים שונים כגון מסננים מכניים או פחם פעיל. מאחר והאוויר במרבית הדירות בארץ אינו נקי, מצטבר על המסננים אבק, אשר עלול להקטין במידה ניכרת את ספיקת האוויר. יש לבצע ניקוי תקופתי של המסנן, בהתאם לקצב הצטברות האבק והנחיות היצרן.

### 6.4 מתי כדאי להחליף מזגן ישן בחדש?

החלפת מזגנים ישנים מועילה יותר ככל שהמזגן הקיים ישן יותר, משני טעמים. ראשית, משום שככל שהמזגן ישן יותר, כך גדלים הסיכויים שיתקלקל בקרוב. לכן, ההפסד בגין השימוש הפוטנציאלי שעוד נותר במזגן הישן קטן. שנית, משום שמזגן חדש יהיה יותר יעיל מהמזגן הישן.

חשוב לבחון אם היקף השימוש במזגן מצדיק את ההחלפה. ככל שהשימוש בו גדול יותר (בין בחימום ובין בקירור) – כך גדלה הכדאיות בהחלפתו. אין כדאיות כלכלית בהחלפת מזגן אשר נמצא בשימוש מועט בלבד במהלך השנה.

## מקורות

ד. בן-דרור, י. (2001) ״ סקר השוואתי של מערכות מיזוג אוויר בעלות מעבים מקוררי אוויר ומקוררי מי מגדל והשפעתן על החיסכון במים והמלחת מקורות מים בישראל״. המשרד לאיכות הסביבה, דו״ח מחקר 0-501.

# פרק י:

# מערכות חימום

# פרק י: מערכות חימום

תכנון מתאים של מעטפת הבניין עשוי להפחית את החימום הנדרש בחורף, הן מבחינת ההספק המרבי הנדרש והן בחישוב הכולל של אנרגיית החימום במהלך השנה כולה. גם להתנהגות הדיירים תרומה חשובה, אשר תבטיח כי הפוטנציאל לחימום פסיבי מנוצל עד תומו ואיבוד חום מיותר מופחת למינימום. אולם בסופו של דבר, במרבית אזורי הארץ יש צורך בחימום נוסף.

פרק זה יציג את סוגי מערכות החימום המתאימות לבנייני מגורים. את מערכות החימום אפשר לסווג לפי אופן הפקת החום ולפי האופן בו האנרגיה מסופקת לכל חלקי הדירה.

## 1. אופן הפקת החום

### 1.1 שריפת חומרי בעירה

האמצעי המסורתי לחימום הבית, מזה אלפי שנים, הוא הבערת חומר בעירה כגון עץ. תהליך השריפה פולט חום, והאנרגיה הזו מחממת את סביבתה הישירה. הבעירה יכולה להתבצע במתקן קבוע המיועד לכך, כגון אח עם ארובה או קמין, או במתקן קטן ונייד. ניתן גם לנצל את תהליך הבעירה לחמם נוזל כגון מים, אשר בעזרתו ניתן לספק חימום לאזורים מרוחקים ממקום שריפת חומר הבעירה.

**א. שריפת גזרי עץ באח**

חומר הבעירה הנפוץ ביותר בעבר היה עץ. השריפה נעשתה באח אשר בו הובערה אש גלויה. האח מחממת באופן ישיר את החלל אליו היא פונה, הן בקרינה והן בהסעה. כאשר האח והארובה בנויים בבנייה מסיבית (מלבנים או אבן) וממוקמים בלב הבניין, המסה שלהם מתחממת גם כן בכל משך בעירת גזרי העץ. החום הזה עשוי לחמם חללים אחרים בבניין הגובלים בהם למשך זמן ארוך, גם לאחר כיבוי האש באח. שיטת חימום זו מאוד לא יעילה מבחינה תרמית, משום שחלק ניכר מתפוקת החום נפלט דרך הארובה, יחד עם העשן.

**ב. קמין**

השימוש בקמין להבערת גז, גזרי עץ או אפילו סולר, דומה מאוד להבערת עץ באח. המתקן קטן יותר ובטוח יותר, משום שהאש אינה חשופה, אולם גם הקמין מאוד לא יעיל מבחינה תרמית.

**ג. נפט**

תנורי נפט ניידים היו נפוצים מאוד בארץ בשנים שאחר קום המדינה. בתנורים אלה, הבעירה מתקיימת על גבי פתיל טבול באגן רדוד אשר מוזן על ידי מיכל הנפט. האש מחממת רשת מתכת אשר ממוקמת במרכזו של מקרן מתכתי מבריק המכוון את עיקר החום כלפי חזית התנור. לתנורי הנפט חסרונות רבים:

- הבערת אש גלויה במתקן קטן ונייד הינה מסוכנת, וגרמה למספר לא מבוטל של שריפות.
- מאחר והתנור חסר ארובה, תוצרי הבעירה, כגון עשן, $CO_2$ או CO נפלטים אל חלל החדר, ועלולים לגרום לפגיעה בבריאות הדיירים.
- לכן חובה להבטיח כניסת אוויר צח בזמן ההפעלה ואחריה, פעולה הגורמת לפגיעה ביעילות התרמית.

**ד. גפ"מ (גז פחמימני מעובה)**

תנורים ביתיים ניידים אשר בהם נעשית בעירה של גפ"מ (או בקיצור – 'גז') היו תחליף לתנורי הנפט, ועדיין משמשים בבתים לא מעטים בארץ. בעירת הגז (בדרך כלל פרופאן או בוטאן) היא נקייה יותר מאשר בעירת הנפט, אך המתקן סובל מכל הליקויים והחסרונות המאפיינים את תנורי הנפט. בנוסף לכך, מאחר ותנור הגז מחובר אל צנרת אספקת הגז בצינור גומי גמיש, יש חשש לדליפות בחיבורים או בסדקים זעירים בצינור.

## 1.2 התנגדות חשמלית

באזורי הארץ בהם דרישת החימום בחורף אינה גבוהה, וגם כגיבוי למערכות הסקה דירתית, ניתן להיעזר בתנורי חימום חשמליים. את התנורים האלה ניתן לסווג למספר קבוצות לפי אופן פיזור החום, אולם המכנה המשותף של כולם הוא אופן הפקת החום: זרם חשמלי בהספק גבוה עובר דרך סליל בעל התנגדות חשמלית גבוהה וגורם לעליית הטמפרטורה שלו.

**א. מפזר חום (קונבקטור)**

מפזר החום החשמלי הנייד הוא מתקן אשר בו הפצת החום בחדר נעשית בעזרת מפוח חשמלי קטן המסיע אוויר על פני סליל התנגדות חשמלי. פעולת המפוח להסעת האוויר צורכת מעט אנרגיה, וגם יוצרת רעש אשר אף הוא כרוך בהפחתה בתפוקת החום, ולכן מקדם הפעולה של מפזר החום נמוך מעט מזה של תנורי החימום האחרים. יתרונו העיקרי של מפזר החום הוא מידותיו הקטנות וניידות שלו, המאפשרות להעביר אותו בקלות מחדר לחדר. מאידך, הספק החימום שלו מוגבל (2,000 ואט לכל היותר), והוא אינו מתאים לחימום חללים גדולים. ישנם גם מפזרי חום גדולים מעט יותר אשר ניתן להשתמש בהם ללא הפעלת המפוח, משום ששטח הפנים של סליל החימום מבטיח שהוא לא יתחמם מעבר למידה גם ללא תנועת אוויר מאולצת.

**צילום י-1: מפזר חום חשמלי עם מפוח (מימין) ועם אפשרות פעולה ללא מפוח (שמאל).**

**ב. רדיאטור עם רפלקטור**

ברדיאטור חשמלי אין מפוח, והפצת האנרגיה בחדר נעשית בעיקר באמצעות קרינה. הרדיאטורים הראשונים שמשו בעיקר בחדרי רחצה, והספק החימום שלהם היה מוגבל. רדיאטורים בעלי הספק חימום גדול יותר, המצוידים ברפלקטור מתכתי מבריק, מתאימים לחימום חדר בינוני.

היתרון העיקרי של רדיאטורים על פני מפזרי חום הוא בכך שכאשר הם מופעלים, תרומתם לנוחות התרמית של אדם הנמצא מולם היא מיידית: שטף הקרינה תורם לנוחות התרמית עוד לפני שטמפרטורת החלל מתחילה לעלות. עם זאת, חשוב לציין גם כי מאחר והרדיאטורים מצוידים ברפלקטור הממקד את קרינת החום לגזרה צרה יחסית, תרומתם לנוחות התרמית של אדם אשר אינו חשוף ישירות לקרינה היא קטנה, ועשויה להתקבל רק אחרי שטמפרטורת האוויר בחלל כולו עלתה.

**צילום י-2: רדיאטור הלוגן חשמלי לחדר (ימין) ורדיאטור לחדר אמבטיה (שמאל).**

לתנורי רדיאטור יש יתרון מיוחד על פני מפזרי החום בחללים אשר בהם השהות היא קצרה, משום שכאמור, תרומתם מיידית. הדברים נכונים במיוחד בחדרי רחצה, שם הגוף כולו חשוף לקרינת החום ואינו מוגן על ידי בגדים. אדם בחדר רחצה עשוי לחוש בנוח למרות שטמפרטורת האוויר נמוכה, בתנאי שיהיה חשוף לשטף קרינה מספיק. חימום קרינתי יעיל במיוחד ניתן לקבל מתנור המותקן בתקרת החדר, בדומה למנורת תקרה.

**צילום י-3: רדיאטור תקרה לאמבטיה.**

**ג. רדיאטור צלעות**

ישנם רדיאטורים חשמליים ניידים אשר דומים לרדיאטורים המותקנים על הקירות במערכות הסקה מרכזית. ברדיאטורים אלה נמצא נוזל (בדרך כלל שמן) המחומם בעזרת גוף חימום חשמלי. בניגוד למפזרי חום או לרדיאטור בעל רפלקטור, הטמפרטורה של תנור מסוג זה אינה גבוהה, והוא בטוח לשימוש גם בחללים בהם שוהים ילדים. עם זאת, תהליך החימום שלו איטי, ועובר זמן לא מועט עד אשר הוא תורם תרומה משמעותית לחימום החלל. לאחר הכיבוי של התנור, הוא ימשיך לספק חום במשך זמן מה, עד אשר נוזל החימום יתקרר לטמפרטורת החדר.

צילום י-4: רדיאטור צלעות נייד.

לכל התנורים החשמליים מספר יתרונות משמעותיים בהשוואה להבערת חומרי דלק בחלל הדירה:

- לתנורים החשמליים אשר נמנו כאן מקדם הפעולה (COP) שווה, בקירוב, ל-1.0: כמעט כל האנרגיה החשמלית הנדרשת לפעולתם מתקבלת כחום בחלל החדר, ואין צורך לאוורר את החדר לסילוק עשן או גזים רעילים.
- פעולתם של התנורים החשמליים (למעט הרדיאטורים בעלי הרפלקטור) בטוחה יותר מאשר תנורים אשר יש בהם אש גלויה.
- בכל התנורים למעט הרדיאטורים בעלי הרפלקטור, ניתן לבקר את פעולת התנור החשמלי באמצעות תרמוסטט אשר יפסיק את החימום כאשר הטמפרטורה מגיעה לערך המבוקש.

## 1.3 משאבת חום

מזגנים עשויים לשמש גם כמשאבת חום, ולספק חימום בחורף. כפי שהוסבר בפרק ט', משאבת החום היא בעלת מקדם פעולה של כ-3. כלומר, על כל ואט של אנרגיה המושקעת בהפעלת המתקן, תתקבל תפוקת חימום של 3 ואט.

**למזגן עדיפות אנרגטית ברורה על פני כל מערכות החימום האחרות – הן על פני הסקה בשריפה של חומר דליק בחלל עצמו והן על פני כל תנורי החימום החשמליים.**

בדומה למפזרי החום הניידים, המזגן מפזר בעזרת המפוח את האוויר החם בחלל המחומם. צורת חימום זאת היא בטוחה, אולם רבים מוצאים שהתנועה של האוויר החם בחדר אינה נעימה.

כאשר השימוש העיקרי במזגן הוא לקירור, יש יתרון בהתקנת המאייד קרוב לתקרה. להתקנה זו יש לפיכך חיסרון בחורף, משום שפיזור החום בחלל אינו מיטבי, ולעיתים נמצא שיש ריבוד (stratification) אשר כתוצאה ממנו האוויר החם נמצא סמוך לתקרה והאוויר קרוב לרצפה חם פחות.

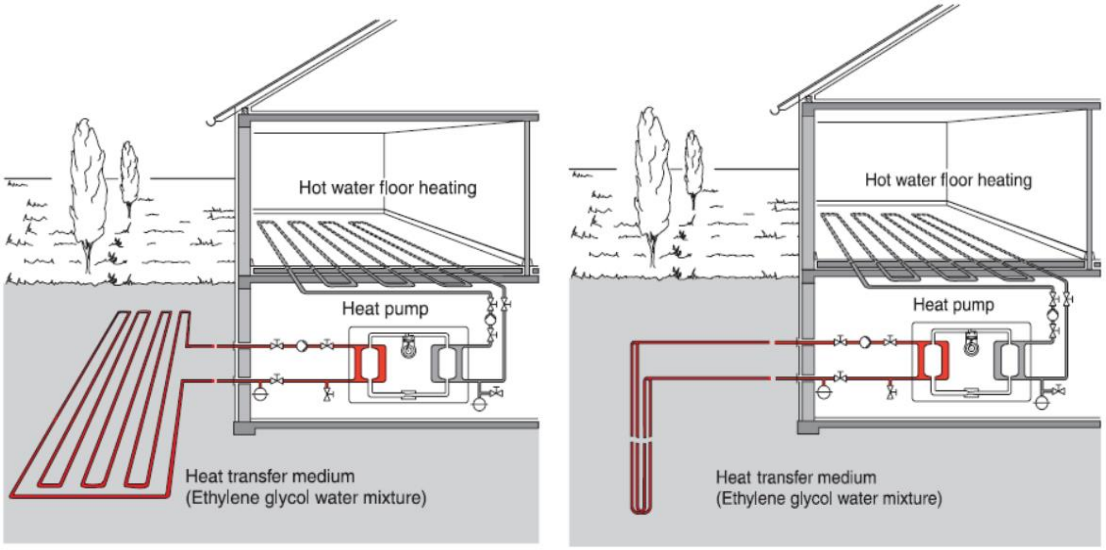
## 1.4 מערכת מעבי קרקע למיזוג אוויר וחימום

במשאבת חום, האנרגיה המשמשת לחימום הדירה בחורף מתקבלת מהאוויר בסביבת הבניין. ככל שהאוויר קר יותר, יעילות משאבת החום פוחתת. בקיץ, לעומת זאת, כאשר משאבת החום פועלת במצב קירור, יעילות המערכת קטנה ככל שטמפרטורת האוויר החיצוני עולה.

בעוד שטמפרטורת האוויר החיצוני עשויה להשתנות על פני טווח גדול מאוד לאורך השנה, במעבה האדמה בעומק של כ-20 מטר ומעלה שוררת טמפרטורה קבועה. טמפרטורה זו תלויה במהלך

הטמפרטורה לאורך השנה מעל פני השטח ובתכונות התרמיות של הקרקע, ובארץ היא עשויה להיות כ-16-19 מעלות.

ניתן להשתמש בקרקע כאגן תרמי (thermal sink), אשר יהיה המקור לאנרגיה כאשר משאבת החום פועלת במצב חימום ואשר אליו יפלטו עודפי החום במצב קירור. משאבת חום הכוללת מחליף חום עם הקרקע מכונה בשם ground source heat pump (GSHP). במערכת כזו מותקן מחליף חום אשר נמצא במגע תרמי עם הבניין, ומחליף חום נוסף הטמון בקרקע במקום יחידת המעבה הרגילה. מחליף חום זה כולל בדרך כלל צנרת פלסטית ארוכה מפוליאתילן בצפיפות גבוהה (– HDPE high density polyethylene ) אשר דרכה זורם נוזל. ניתן להתקין צנרת זו במספר אופנים – במקביל לפני הקרקע, בפריסה דמוית סליל, או בקידוחים עמוקים בניצב לקרקע.




**איור י-1: תרשים סכמתי של משאבת חום עם מעבה קרקע בפרישה אנכית (ימין) ואופקית (שמאל).**

ניתן ליישם שיטה זו רק אם מתקיים לפחות אחד משני התנאים הבאים:

א. משאבת החום פולטת אל הקרקע בקיץ כמות חום דומה לזו שהיא מקבלת מהקרקע בחורף. אם לא ניתן להביא את כמות האנרגיה לאיזון בחשבון השנתי, הטמפרטורה בתת-הקרקע תשתנה ויעילות המתקן תרד.

ב. בתת-הקרקע מתקיימת זרימה של מי תהום במהירות המספיקה לשמור על איזון תרמי בסביבת הצנרת.

מומלץ מאוד כי המערכת תעמוד בתנאי הראשון, מטעמים עקרוניים ומעשיים כאחד. את התנאי השני ניתן לאמץ רק במקרה של בניין מבודד הנמצא במרחק רב מבניינים אחרים, שאם לא כן יופר האיזון התרמי בתת-הקרקע.

מקדם הפעולה (COP) של מערכות מעבי קרקע עשוי להגיע לערך של 5 או יותר, בהשוואה לערכים של 3-4 במעבים החשופים לאוויר הסביבה. מקדם הפעולה מושפע מהתכונות התרמיות של הקרקע ומאפייני המערכת (בעיקר – אורך הצנרת), ורגיש מאוד למגע התרמי בין הצינור לבין הקרקע. לכן יש להקפיד כי בעת החדרת הצינור לקידוח ייעשה שימוש בבנטונייט בכל היקף הצינור.

היתרונות התרמיים של מערכות מעבי אדמה הם רבים, ולכן הן מותקנות במספר הולך וגדל של פרויקטים בחו״ל, למרות החסרונות שלהם. מחירן הראשוני של המערכות גבוה, בשל הצורך בקידוחים לעומק רב. אם הצנרת מותקנת מתחת לבניין, כפי שנעשה בשטח עירוני צפוף, לא ניתן

לגשת אליה לצרכי תחזוקה, ולכן חיוני לבצע את ההתקנה באופן קפדני במיוחד ולבחון את תקינות המערכת לפני שמתקדמים בבניית הבניין.

בארץ קיים ניסיון מועט בתחום, ומערכות כאלה לא הותקנו בבנייני מגורים גדולים אלא בעיקר בבנייני ציבור, אך מערכת אחת כזו פועלת בהצלחה בבניין מגורים ברמאללה[76].

### 1.5 מערכת סולרית

כשם שניתן לחמם מים לרחצה במערכת סולרית, ניתן לחמם מים גם לשימוש בחימום אוויר הדירה. את המים החמים מספקים למערכת המפזרת את החום בדירה, כגון רדיאטורים או חימום תת-רצפתי. ניתן גם לאגור את המים במיכל אגירה לשימוש בשעות הלילה.

למערכת סולרית לחימום מים להסקה ישנם מספר חסרונות, אשר צמצמו עד כה את היקף השימוש בה:

א. תפוקת המערכת קטנה דווקא בימים שבהם הדרישה לחימום היא גבוהה ביותר: ימים קרים ומעוננים. לכן יש צורך בהתקנת מערכת גיבוי בעלת הספק מלא אשר תיתן מענה לצרכים גם בימים הקרים ביותר.

ב. בבניין משותף גבוה, שטח הגג עשוי לא להספיק לקולטים לחימום מים הן להסקה והן לרחצה.

ג. שטח הגג הדרוש לקולטים עשוי לשמש גם להתקנת מערכת פוטו-וולטאית לאספקת חשמל.

בבית פרטי, כאשר מותקנת מערכת הסקה דירתית המבוססת על בעירה של גז, ניתן להשתמש במערכת סולרית בכדי לספק חימום מקדים של המים במערכת (pre-heating). במהלך עונת החורף עשוי להצטבר חיסכון ניכר בעלות הכוללת של החימום, גם אם התפוקה של מערכת החימום הסולרית לא תענה על כל הצרכים.

## 2. פיזור החום בדירה

כל אמצעי החימום אשר תוארו עד כה היו מתקנים נקודתיים, אשר סיפקו חום לסביבתם המיידית. מתקנים אלו אינם דורשים בדרך כלל התקנת תשתית המאפשרת פיזור החום בכל שטח הדירה, ולכן יש צורך במספר תנורים אם מבקשים לחמם שטח גדול.

במערכות הסקה מרכזית לבניין (או במערכת דירתית מרכזית), הפקת החום נעשית במרוכז בנקודה אחת, ומערכת החימום כוללת צנרת חלוקה המאפשרת לפזר את החום בכל הדירה ולחמם אזורים מרוחקים. ישנן מספר שיטות לחלוקת החום – באמצעות תעלות אוויר, באמצעות צנרת לנוזל (לרוב מים) המזינה מחליפי חום (רדיאטור, קונבקטור או מערכת חלוקה תת-רצפתית).

בעבר, מרבית המערכות להסקה מרכזית היו מבוססות על סולר. כיום, הפקת החום במערכת מרכזית (המיועדת למספר דירות) או למערכת דירתית מבוססת בדרך כלל על מבער גז. ניתן גם להשתמש במשאבת חום בעלת הספק גבוה המיועדת לספק מים חמים ואשר מתאימה לאקלום שטח גדול.

במערכות המרכזיות המיועדות לחימום מים, ניתן להתקין שני מחליפי חום: אחד למערכת המיועדת לחימום מים לרחצה, ושני למערכת סגורה המזינה רדיאטורים וקונבקטורים בדירה או

[76] http://www.med-enec.com/building-projects/pilot-projects/palestine/pilot-project-palestine

חימום תת-רצפתי. חימום המים לרחצה יכול להתבצע במעגל פתוח, אך במערכת המזינה מספר דירות מקובל לספק את המים החמים למיכלי אגירה דירתיים עם מחליף חום, באופן דומה למערכת הסולרית המרכזית (ראו פרק י"ד).

## 2.1 צנרת מים

מרבית מערכות ההסקה המרכזית או הדירתית בארץ מבוססות על הפצת אנרגית החימום באמצעות צנרת מים המזינה מספר יחידות של רדיאטור המותקנות על הקיר בכל אחד מחדרי הדירה. הרדיאטורים האלה משמשים כמחליפי חום פסיביים, כלומר – אינם כוללים מפוח המגביר את תנועת האוויר סמוך לצלעות המתכת. למערכות אלו אין בדרך כלל תרמוסטט [77], וזרימת המים החמים דרכן ניתנת לוויסות באמצעות ברז ידני השולט על כניסת המים לרדיאטור.

מערכות הסקה המוזנות במים חמים המתקבלים ממשאבת חום ניתן להמיר בקיץ לפעולה כמתקני מיזוג אוויר. בהתקנה מסוג זה, המים מוזנים ליחידות מפוח-נחשון. יש צורך במפוח משום שהפרש הטמפרטורה בין המים במחליף החום לטמפרטורת האוויר בחדר הוא קטן – כ-15-20 מעלות לכל היותר, ויש צורך לפצות על כך בספיקה גבוהה של אוויר. (הטמפרטורה של המים הקרים אינה יכולה לרדת מתחת לאפס מעלות: גם אילו היה ניתן למנוע את הקיפאון בנוזל, הרי שאדי המים באוויר החדר היו קופאים במגע עם צלעות הקירור ופוגעים ביעילות מחליף החום). במצב חימום, לעומת זאת, טמפרטורת הנוזל מוגבלת רק משיקולי בטיחות, והטמפרטורה של הרדיאטור החשוף תהיה בפועל כ-50 מעלות, כלומר כ-30 מעלות יותר מטמפרטורת האוויר בחדר.

יש חשיבות רבה לתכנון יעיל של צנרת חלוקת המים, במיוחד במערכות המספקות חימום למספר דירות, על מנת להפחית את הפסדי החום. כמו כן, חובה לבודד היטב את הצנרת בבידוד תרמי מתאים, לכל אורכה.

## 2.2 תעלות אוויר

מערכות מיזוג אוויר מרכזיות המספקות אוויר מחומם או מקורר באמצעות תעלות מותקנות בדרך כלל במשרדים, ואינן נפוצות בבנייני מגורים, למעט במזגן מפוצל מתועל. היתרון של מערכות מיזוג אוויר אלו טמון בעובדה שכל המערכות המכניות – יחידה לטיפול באוויר (יט"א), מפוחים וכו' - נמצאות במרחק מחלל המגורים, אשר מקבל אוויר מטופל בספיקה מדודה, ובתכנון נאות - כמעט ללא מטרדי רעש. מערכת כזו מתאימה גם לאספקה של אוויר צח בכמות מבוקרת בחללים אשר אטומים כלפי הסביבה ברמה גבוהה.

לתעלות האוויר שני חסרונות עיקריים:

א. התעלות הן בעלות שטח חתך גדול, ודורשות התאמות מיוחדות בשלד הבניין ובחללים המאוקלמים (כגון תקרה מונמכת).

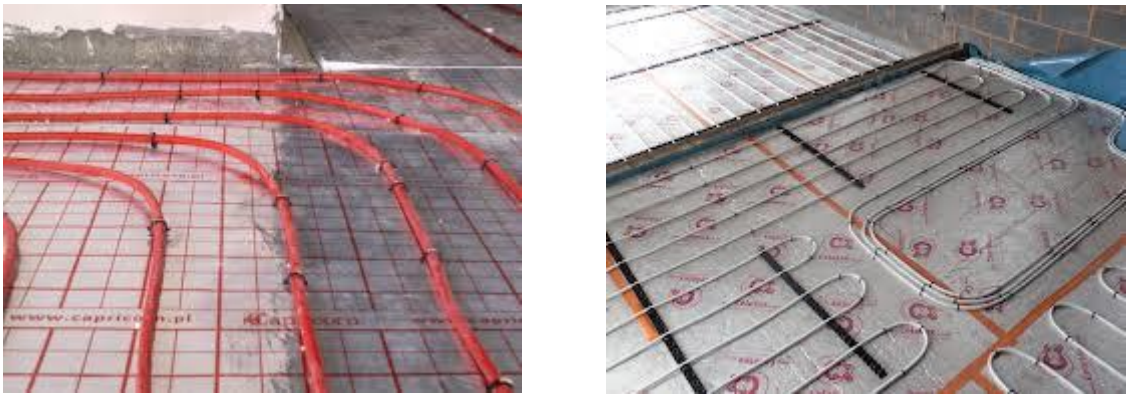
ב. התעלות הן כר רבייה נוח למיקרו-אורגניזמים הניזונים מהאבק והלחות המצטברים בהן. רבות מהתלונות בעניין תסמונת הבניין החולה (sick-building-syndrome) מקורן במערכות מיזוג מסוג זה (ראו פרק ד').

## 2.3 חימום תת-רצפתי

ישנם שני סוגים של חימום תת-רצפתי – מבוסס על חימום מים או מבוסס חשמל. בשתי המערכות, רשת צפופה הפרושה מתחת לריצוף בכל שטח החדר מפיצה חום המביא לעליית הטמפרטורה של הריצוף, אשר בתורו מחמם את אוויר החדר. במערכת חימום תת-רצפתי מבוססת מים, מקור המים

[77] אם כי ניתן להתקין ברז חשמלי עם תרמוסטט

החמים עשוי להיות מבער גז, סולר או אפילו אנרגיה סולרית. במערכת חשמלית, מקור החום הוא בגופי חימום חשמליים, בהספק של כ-150-200 ואט לכל מ״ר שטח רצפה.



**צילום י-5. מערכת הסקה תת-רצפתית. ימין: מבוססת חשמל. שמאל – מבוססת מים.**

### א. יתרונות וחסרונות למערכת תת-רצפתית

מבחינה אנרגטית, היעילות של מערכות תת-רצפתיות לחימום הדירה תלויה בעיקר במקור החום: כאשר המים החמים מופקים באמצעות משאבת חום תהיה היעילות גבוהה יותר מאשר מערכת אשר בה המים החמים מתקבלים על ידי הבערת גז או סולר. כאשר מקור החום הוא חשמל, מקדם הפעולה יהיה בהכרח נמוך מ-1. אולם למערכת התת-רצפתית יתרונות וחסרונות לא מבוטלים בהשוואה למערכות האחרות לפיזור חום בדירה, שאינם נוגעים רק ליעילות האנרגטית.

#### יתרונות

- **אחידות החום:** בחימום תת-רצפתי יתקבל פיזור חום אחיד, בקירוב, בכל החלל המחומם: מקור החום הוא כאמור פרוש על פני כל שטח החדר, ומאחר והאוויר החם נוטה לעלות, אספקת החום בנקודה הנמוכה ביותר בחדר תפחית למינימום את הריבוד התרמי. מתקני חימום אחרי, כגון רדיאטורים או מפזרי חום מחממים קודם כל את סביבתם המיידית, ופינות מרוחקות בחלל יהיו חמות פחות.
- **הרצפה החמה תורמת לנוחות התרמית** מעבר לתרומתה לחימום האוויר (ראו פרק ד׳).
- **אסתטיקה:** החימום התת רצפתי אינו נראה ומוסתר לחלוטין, כך שהחלל השימושי אינו מופר והוא נקי מאביזרים או מתקנים גלויים.
- **החימום אינו כרוך במטרדים סביבתיים בחלל החדר,** כגון תוצרי הבעירה של תנור הגז, רעש של מפזר חום או מזגן, או הסעה של אוויר יבש.

#### חסרונות

- **התקנה יקרה**: בהשוואה למזגן או לרדיאטורים המקובעים לקירות, אשר התקנתם פשוטה יחסית, התקנת חימום תת רצפתי ניתנת לביצוע רק לפני הנחת הריצוף בדירה, או בפירוק הריצוף אם מדובר בשיפוץ דירה קיימת.
- **מהירות החימום:** בניגוד לשיטות חימום אחרות, אשר פעולתן מורגשת באופן מיידי (חימום קרינתי) או תוך זמן קצר יחסית, מערכת חימום תת-רצפתי מביאה לחימום מלא של הדירה רק כעבור מספר שעות. מאידך, מאחר והמערכת מחממת את המסה של הרצפה, תרומתה מורגשת גם במשך זמן מסוים אחרי הפסקת פעולתה. לפיכך, היא מתאימה יותר לאזורים אשר מחוממים ברציפות או שהשהות בהם היא ארוכה, במיוחד אם היא נעשית לפי שגרה או ידועה מראש, כך שניתן להפעיל את החימום די זמן מראש לפני שהחלל מאוכלס בפועל.

- **היעדר גישה לאחזקה:** מכיוון שהצינורות נמצאים מתחת לריצוף, התיקון של תקלות או נזילות הוא יקר ומסורבל.

**ב. מערכת חשמלית או מערכת מבוססת מים?**

מערכות החימום התת-רצפתיות עשויות לספק תפוקת חימום דומה ותחושה דומה לשוהים בחדר, כך שהשאלה איזו מהן עדיפה תלויה בשקלול המאפיינים הטכניים שלהן.

א. ההתקנה של מערכת חשמלית פשוטה יותר מאשר מערכת מבוססת מים, ובהנחה שהחיווט החשמלי לא נפגע בזמן הפרישה שלו, עשויה להיות אמינה יותר. לפיכך היא גם זולה יותר בהתקנה.

ב. במערכת מבוססת מים ניתן לגוון את מקורות המים החמים, ולשלב אנרגיה סולרית עם משאבת חום לגיבוי, כך שהיא עשויה להיות יעילה יותר מבחינה אנרגטית. אם מקור החום הוא מבער גז או סולר, היעילות האנרגטית של מערכת מבוססת מים דומה לזה של מערכת חשמלית, או אף נופל ממנה בשל הפסדי חום בצנרת האספקה.

ג. מערכת חשמלית יוצרת שדה אלקטרו-מגנטי בזמן פעולתה. כאשר גוף החימום הוא בעל מוליך דו-גידי, ההשראה האלקטרו-מגנטית קטנה מאוד. יחד עם זאת, משרד הבריאות השוויצרי ממליץ כי החימום הראשוני של החלל, אשר כרוך בזרמים חשמליים גדולים יותר, ייעשה כאשר החלל אינו מאוכלס. כן מומלץ להימנע מהנחת מזרונים ישירות על גבי הרצפה, משום שעוצמת השדה המגנטי קטנה יותר ככל שמתרחקים ממקור ההשראה [78].

**ג. בידוד תרמי**

בכל מערכת חימום תת-רצפתית יש חשיבות רבה מאוד להנחת בידוד תרמי מתחת לגוף החימום. תפקיד הבידוד התרמי הוא להפחית את קצב מעבר החום לחלל הנמצא מתחת לחלל המחומם. את הבידוד יש להניח גם אם החלל הנמוך שייך לאותה יחידת דיור, בכדי לאפשר בקרה נפרדת של מערכת החימום בכל אזור בדירה.

מאחר והטמפרטורה של השכבה המקיפה את גוף החימום עשויה להיות גבוהה במידה משמעותית מטמפרטורת החדר, קצב מעבר החום ממנה אל החלל הנמצא מתחתיה עלול להיות גבוה אף מקצב מעבר החום בין הדירה לבין הסביבה החיצונית. לכן ההתנגדות התרמית הנדרשת תהיה לפחות 1.5 מ״ר קלווין לואט (שווה ערך, בקירוב, לבידוד אשר יתקבל משכבת פוליסטירן מוקצף בעובי 5 ס״מ). מאחר ומעבר החום מתחת בין מערכת החימום לבין הרצפה הנושאת הוא בהולכה, ולא בקרינה, לא ניתן להשתמש בבידוד רפלקטיבי (כגון רדיד אלומיניום).

## 3. בקרת הטמפרטורה

במערכות המצוידות בבקר טמפרטורה (תרמוסטט), פעולת מערכת החימום תלויה באופן מדידת הטמפרטורה. הבקר מצויד במערכת אשר מאפשרת לקבוע את הטמפרטורה הרצויה, ובמרבית המערכות החדשות גם חווי של הטמפרטורה הנמדדת בפועל.

בקרה נכונה של הטמפרטורה בדירה עשויה לתרום מאוד לחיסכון באנרגיה, אולם בפועל קשה מאוד לממש מערכת בקרה טובה, מכמה טעמים:

[78] http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/05139/index.html?lang=en

### 3.1 כיצד מודדים

ישנן מספר שיטות למדידת טמפרטורה, המבוססות על עקרונות פיסיקליים שונים. שינוי הטמפרטורה עשוי להשפיע על ההתנגדות החשמלית של חומר או לגרום להתפשטות תרמית. המכנה המשותף לכל מדי הטמפרטורה הוא העובדה שהם מודדים את הטמפרטורה העצמית שלהם – ואנו מניחים כי טמפרטורה זו מייצגת את טמפרטורת הסביבה אותה מבקשים לדעת. הטמפרטורה העצמית של החיישן עלולה להיות מושפעת מחילופי אנרגיה בקרינה, ואינה בהכרח זהה לטמפרטורת האוויר.

### 3.2 היכן מודדים

רצוי שמדידת הטמפרטורה המשמשת לבקרת מתקן החימום תיעשה בנקודה המייצגת את התנאים בחלל, אולם בפועל מדידה נעשית בדרך כלל במתקן החימום עצמו. במזגנים חדישים ובחלק ממערכות ההסקה המרכזית ישנו חיישן המותקן ביחידת פיקוד המותקנת על הקיר או בשלט רחוק נייד. מומלץ להתקין מערכות בהן ישנה מדידת טמפרטורה כזו. כאשר המערכת אינה כוללת מדידת טמפרטורה סמוך לדיירי החדר, מומלץ לקנות מדחום נפרד ולהיעזר בו לכיול הפעולה של התרמוסטט, ולא להסתמך על החווי במתקן עצמו.

### 3.3 ניהול אזורים שונים בדירה

כאשר בדירה מותקנת מערכת הסקה מרכזית (או דירתית), חובה לתכנן אותה כך שתהיה אפשרות להפעיל את החימום באזורים שונים בדירה באופן עצמאי. לשם כך מומלץ לא רק להתקין אמצעי בקרה, כגון ברזים המנתקים את אספקת המים החמים לרדיאטורים שאין בהם צורך, אלא גם מערכת מדידת טמפרטורה נפרדת לכל חלל.

### 3.4 מערכת מנייה

במערכות הסקה מרכזית אשר הותקנו בארץ בעבר לא היתה מערכת מנייה נפרדת לכל דירה. התשלום עבור ההסקה נעשה באמצעות ועד הבית, בדרך כלל על בסיס החלק היחסי של הדירה בשטח הכולל של הבניין המשותף כולו – ולא על בסיס צריכת החימום בפועל. מערכות כאלה עדיין פועלות בבתים משותפים רבים בארץ, וכתוצאה מכך אין תמריץ כלכלי ישיר לחיסכון בהוצאות החימום בכל אחת מהדירות. היתרון של דירה אחת כלפי דירה אחרת, הנובע למשל מחשיפה שונה לשמש, ואשר מתבטא בצריכת אנרגיה שונה לאקלום, אינו בא לידי ביטוי בחשבון החימום ולכן אינו משפיע על ערך הדירה.

ניתן להתקין מוני מים אשר יאפשרו מעקב על צריכת מי החימום במערכות מרכזיות, ללא קושי ובעלות נמוכה. התקנה כזאת אפשרית גם במסגרת שיפוץ של מערכות קיימות, ועשוי להביא לחיסכון של ממש בצריכת האנרגיה הכוללת בבניינים משותפים.

## 4. סיכום והמלצות

מערכת החימום החסכונית ביותר מבחינה אנרגטית בתנאי הארץ היא ללא ספק משאבת חום. מערכת זו ניתנת להפעלה גם לצורך מיזוג אוויר בקיץ. ניתן להתקין משאבות חום בהספק המתאים לחדר בודד או לבניין עם מספר דירות, הן בבנייה חדשה והן במסגרת שיפוץ של בניינים קיימים.

## מקורות

[12] Federal Office of Public Health, Switzerland. Electric Floor Heating Systems. . http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/05139/index.html?lang=en Accessed 31-10-2014.

## פרק יא:

# מערכות "הבית החכם"

מאת אורי דומן

# פרק יא: מערכות "בית חכם"

*"חכמות בנתה ביתה חצבה עמודיה שבעה"* (משלי פרק ט', פסוק א')

"Smart houses should be energy efficient and ideally more efficient than conventional houses. If designed with intelligent power management and low power devices, a smart house has the potential to provide significant energy savings."

(source: SmartHouse Code of Practice, CENELEC document, CWA 50487).

ההגדרה לעיל מציינת באופן תמציתי את מטרת הפרק ואופן מימושו.

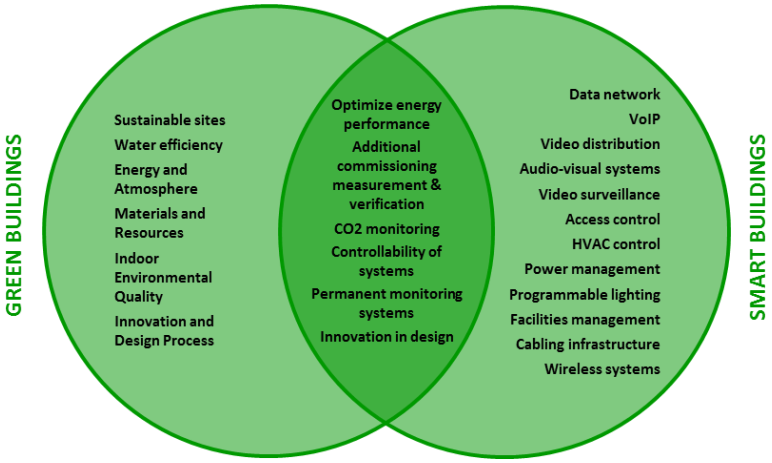
## 1. מערכות "בית חכם" – רקע

### 1.1 מבוא

פיתוחים טכנולוגיים היוו מאז ומתמיד ויהיו גם בעתיד זרז בתעשיית הבנייה. אופן וצורת הבנייה, תרבות הבנייה והליכי התכנון והביצוע, הושפעו לא רק מהאזור הגיאוגרפי בו נבנה הבניין, אלא בין היתר ובמידה רבה מהרמה הטכנולוגית של כל בעלי העניין – היזם/הלקוח, הצוות ההנדסי, בעלי המקצוע והסביבה האנושית הבלתי אמצעית.

עד לפני שלושים שנה הייתה טכנולוגיית הפיקוד, התקשרות, ההפעלה והבקרה של מערכות הבניין ברמה בסיסית ביותר וכללה: מערכות טלפוניה – פנים וחוץ, מערכות אלקטרומכניות לפיקוד ובקרה של מתקני מיזוג אוויר, תאורה, אינסטלציה, ניטור מערכות גיבוי (גנרטור, אל-פסק) ופה ושם תחילתן של תשתיות העברת נתונים. נושא ההתייעלות והחיסכון האנרגטי נשארו בשוליים (אם בכלל). מהפכת טכנולוגיית המידע והתקשורת Information and Communication Technologies (ICT) בשילוב המודעות לפיתוח בר-קיימא – Sustainable Development וההכרה שזמינות מקורות האנרגיה המתכלים – מוגבלת, הביאו לפריצת דרך בגישה לתכנון מבנים בכלל ומערכות המבנה בפרט. התפתחות תפיסת 'הבניין האינטליגנטי' וכחלק אינטגרלי ממנו – 'מערכות בית החכם' (home automation systems) הינה איפה אחת התוצאות הישירות של התהליך.

בתחילת שנות השמונים החלה להתפתח בארה"ב ובריטניה תפיסה שראתה את הבניין בראייה אינטגרטיבית הכוללת ארבעה מרכיבים המשולבים אחד במשנהו: (א) הירוק; (ב) הגמיש – המגיב (resilient); (ג) הכלכלי (cost effective); ו-(ד) "החכם". המטרות העיקריות בבסיס התפיסה היו שינוי תפיסתי בהליכי הקמת המבנה משלבי 'העריסה' ועד 'להריסה' (from cradle to grave). השינוי, אשר יושם תחילה בבנייה המוסדית, נעשה במטרה לשפר את נוחות המשתמש הסופי, להעלות את פריון העבודה, לשמר אנרגיה, לבטא גישה "ירוקה" לסביבה הפנימית והחיצונית, ולהקנות גמישות ויכולת לקלוט מערכות חדשות ולבצע שינויים והתאמות במבנים בצורה יעילה ותוך הפרעה מינימלית לסביבה. תקנות, חוקים סביבתיים, זרזים מסחריים ומודעות ציבור הצרכנים הביאו לחדירת המגמה גם למגזר המגורים, עם דגש על המרכיב "הירוק והחכם".




**איור יא-1: הבית החכם תורם להשגת יעדי הבנייה הירוקה**

## 1.2 מהו בית חכם?

בית חכם, הינו מבנה שבו מערכות התפעול של חלק או כל ציוד החשמל, הנוחות, התקשורת והבטיחות, נשלטות באופן מרוכז או מבוזר בצורה אופטימלית המתאימה את עצמה באופן גמיש ללא שינויי חיווט וכבילה לדרישות המשתמש, באמצעות יחידת שליטה מתאימה [79]. בתקינה הישראלית מכונה מערכת כזו "מערכת אלקטרונית ביתית", או בראשי תיבות – מא"ב.

תפיסת הבית החכם מבוססת על גמישות המאפשרת הענות של המערכות לשינויים בפרופיל הצרכן ובתנאי הסביבה לאורך זמן. גמישות כזו דורשת אינטגרציה של המערכות האלקטרו-מכניות ומערכות המתח הנמוך, אשר מקושרות ומשולבות אחת בשנייה באופן שקוף על ידי כבילה אחידה. פרוטוקול התקשורת חייב להיות 'פתוח' ולאפשר חיבור של ציוד המיוצר על ידי יצרנים שונים, ללא הגבלה. ההתאמה נעשית באמצעות תוכנה שאיננה מחייבת שינויים בחיווט (בהנחה שהוכנה תשתית מתאימה). במבנים קיימים בהם לא קיימת אפשרות להכנת תשתית מתאימה, הטמעת המערכת יכולה להתבצע באמצעות רכיבים המקושרים ביניהם אלחוטית, בתדר מוסכם ומאושר (ראה סעיף 1.3 להלן).

בתכנון מיטבי יכולה מערכת ההפעלה של בית חכם לחסוך אנרגיה הן בתחום המערכות הקבועות, כגון תאורה ומיזוג אוויר, והן בציוד חשמלי ומכשירי חשמל ביתיים כגון מקרר או מכונת כביסה – בתנאי שמכשירים אלו הותאמו מראש לפעולה תחת בקרה מרכזית. שיעור החיסכון עשוי להגיע ל-30%, ובמקרים מסוימים אפילו עד 50% (ראו סעיף 3.1 להלן).

## 1.3 הבניין האינטליגנטי ומערכות בית חכם

יישום מערכות הבית החכם במגזר המגורים אופיין בחידושים הבאים:

א. הפעלה חכמה ויעילה של המערכות האלקטרו-מכניות (מיזוג אוויר, תאורת פנים וחוץ, דודים, תריסים), כתלות במשטרי העבודה ובראיית ההתייעלות האנרגטית כמרכיב מרכזי.

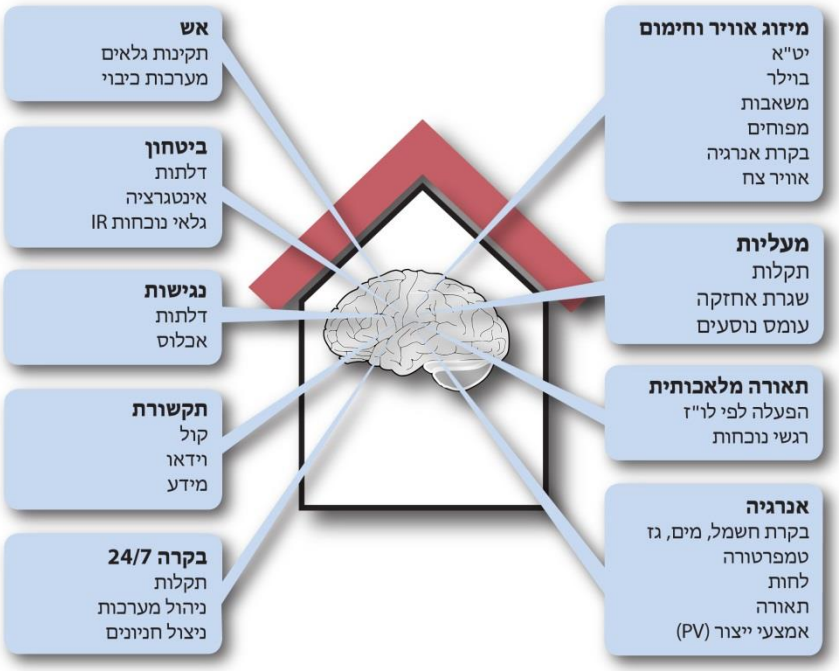
ב. תפעול מכשירים "לבנים חכמים" בעלי יכולת קבלת החלטות (מקררים, מכונות כביסה וייבוש, מדיחי כלים), לא רק בראיית נוחות המשתמש כמו ניטור תקלות, דיווח על מלאי וחידושו (במקררים), ייעול צריכת המים (במכונות כביסה ומדיחים), אלא גם בהיבט "גורם היוקרה".

ג. אפשרות לשליטה מרכזית בציוד אור-קולי.

[79] דומן, 2010

ד. אינטגרציה – שילוב הפעלות/שליטות שפורטו לעיל, תחת מערכת יחידה אשר פתוחה למספר בלתי מוגבל של יצרנים.

ה. פיתוח פרוטוקולים של תקשורת פתוחה דוגמת KNX, ZIGBEE המאפשרים רשת תקשורת ביתית משולבת ומלאה (ראו סעיפים 2.2, 3.4 להלן).




**איור יא-2: הבית החכם על מערכותיו על פי המודל של המכון לחקר הבניה בבריטניה [80]**

## 1.4 יתרונות וחסרונות

אין ספק שמערכת בית חכם תהייה בעתיד אבן יסוד בתעשיית הבניה. יחד עם זאת, כיום קיימת בחלקים לא מבוטלים של ציבור הצרכנים רתיעה (או אפילו התנגדות) לחידושים מסוג שהבית החכם מייצג. ראוי אפוא להציג הן את היתרונות והן את החסרונות של המערכת, לפי תפיסת ה-SWOT (Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats):

**א. Strengths**

- תרומה לייעול וחיסכון באנרגיה
- גמישות בהתקנה הראשונית ובתפעול לאורך חיי המתקנים
- נוחות למשתמש (כפוף לשילוב הדייר /צרכן בכל הליכי הרכש)
- סטטוס – הן לדייר והן ליזם [81] : בידול שיווקי במכירה הראשונית ולאורך חיי המבנה ומיצוב המבנה כחדשני
- הכנת הבניין לפלטפורמה המאפשרת ניצול מרבי של הטכנולוגיות הקיימות והעתידיות עם דגש לביצועים אנרגטיים (של מכשירי חשמל ביתיים חכמים).

[80] מעובד מאיור ב-BRE, 2009
[81] Kastner, 2005

**ב. Weaknesses**

- התקנת המערכת דורשת מודעות ותשומת לב של הדייר בשלבי התכנון, הביצוע וההרצה (commissioning), בכדי למנוע תכנון יתר (over-design) או אף יצירת פיל לבן שהינו יותר מטרד מאשר יתרון.
- לעיתים קיימים פערים בין ההבטחות בשלבי השיווק לביצועים בפועל (לרבות בתחום האנרגיה).
- המערכת מחייבת תמיכה של כוח אדם הנדסי מיומן 'מהעריסה ועד להריסה'.
- רכישת מערכת לא תקנית ושאינה פתוחה מביאה לתלות מוחלטת בספק יחיד – ללא אפשרות התנתקות (ראו פיסקה 2 להלן). הערה: נכון למועד הכנת מסמך זה – תקני "בית חכם" – מא"ב – אינם רשמיים ואינם מחייבים.
- המערכת מחייבת הקצאת חללים גדולים יותר ללוחות החשמל מאשר המערכות הקיימות
- התשתית בדירה שונה מתשתית קונבנציונלית (ראו גם תשתית דואלית סעיף 2.4 להלן).

**ג. Opportrunities**

- פיתוחים בתחום הבינה המלאכותית (AI – Artificial Intelligence) יאפשרו למערכת לקבל החלטות עצמאיות ברמת הבית ורמת הרשת
- פיתוח אלגוריתמים להעלאת רמת היעילות האנרגטית
- קישוריות לרובוטים שיחליפו גורמים אנושיים

**ד. Threats**

- השתלטות המערכות על הדיירים
- פיתוחים מהפכניים שיבטלו את יתרונות המערכות



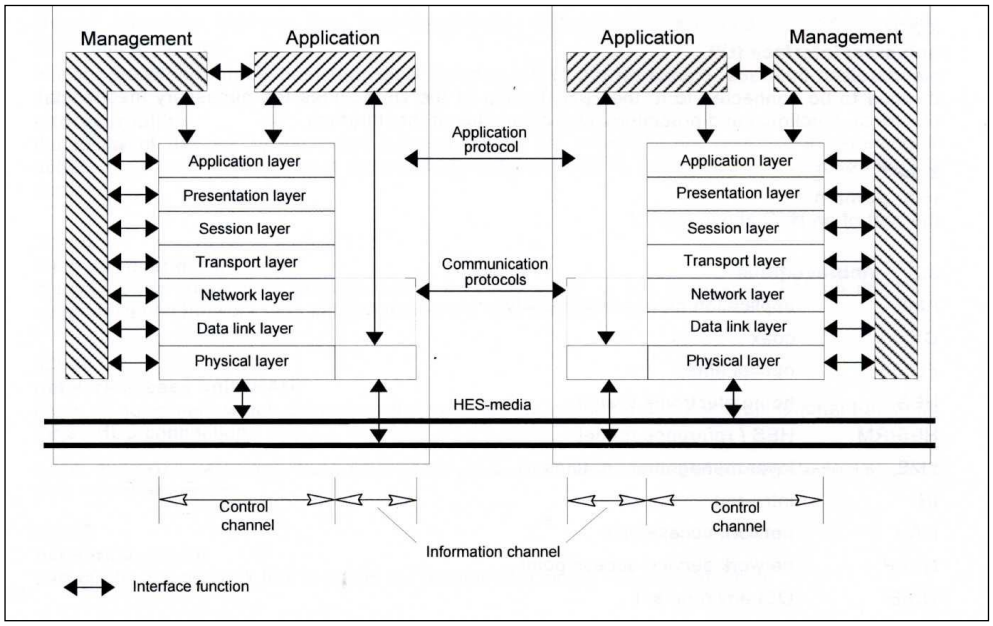
## 2. עקרונות פעולת ותפקוד הבית החכם

מרכיבי הבית החכם כוללים חומרה (בקרים, ספקי כוח, לחצני הפעלה/מסכי מגע, כבילה וכיו"ב) ותוכנה הפועלים בתקשורת מוסכמת. התקשורת בין מרכיבי החומרה השונים של מערכת הבית החכם מתבצעת על ידי סדרת פקודות במסגרת פרוטוקול התקשורת. פרוטוקול המאפשר תפעוליות ביניות (interoperability) – שקופה של יותר מאשר צרכן/ספק אחד מוגדר כפרוטוקול 'פתוח' על פי ת"י 18012 חלק 1 והינו תנאי בסיסי לא רק להתאמה לתקן הישראלי אלא לפעולה אמינה לאורך חיי המערכת. משטרי ההפעלה השונים נקבעים באמצעות תכנות ייעודי, המותאם לצרכי המשתמש (תוספת ציוד, שינויים מבניים, התאמה לגיל וכיו"ב) והניתן לשינוי בכל זמן על פי הדרישות העדכניות של הצרכן/דייר.

הבסיס לארכיטקטורת מערכת הבית החכם הינו מודל גנרי המכונה מודל שבע השכבות (Open Systems Interconnection/Reference Model OSI/RM), ומודל שלוש הרמות של בקרת המבנה. המודלים אינם קשיחים ולעיתים לא מוגדרות או משמשות כל השכבות.

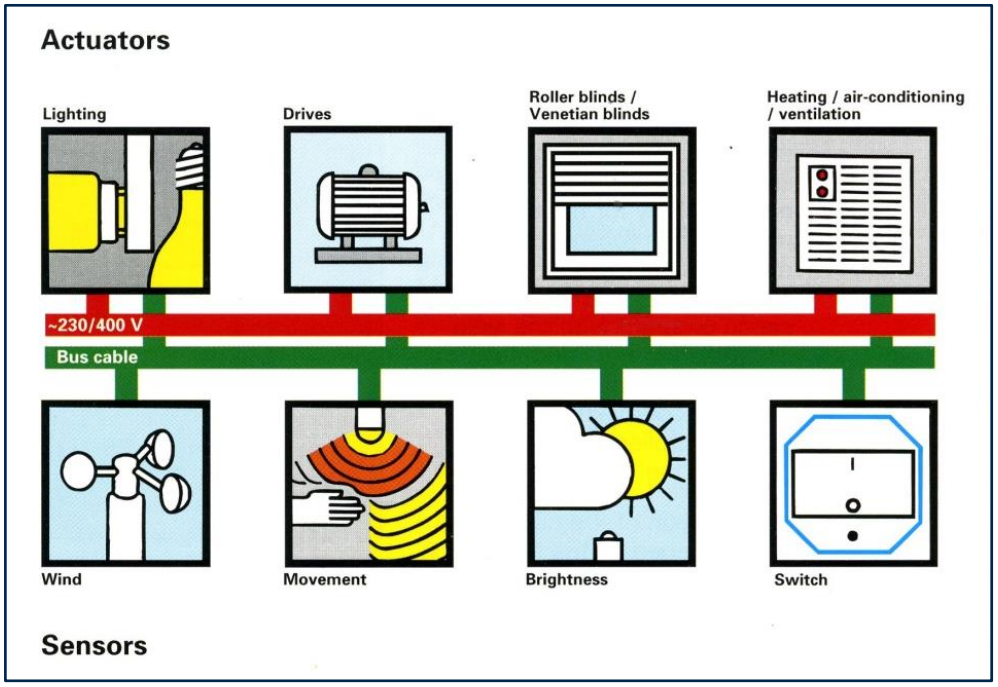
מערכת בית חכם אינה משתמשת בכל שבע השכבות, כך לדוגמה לצורכי הגדרת פרוטוקול ה- KNX (ארגון ה- KNX מאגד בתוכו את מרבית ספקי ויצרני ציוד המיתוג והחלוקה הביתיים באירופה הפועלים על בסיס שילוב של פרוטוקולי ה- EIB, EHS ו-BATIBUS) המערכת מוגדרת על פי חמש שכבות, ואינה נדרשת לשכבות 5 ו-6 (Presentation & Session). לעיתים קרובות, מוגדרות גם שכבות ה- Session, Presentation, Application (שכבות 5,6,7) כשכבה אחת. בהיבט אפיון

האינטגרציה (סעיף 2.2 להלן) יש לשכבות ה- Physical, Data, Network, Application חשיבות לממשק בין התעשייה לבין הלקוח [82].




**איור יא-3: תיאור כללי של ערוצי המידע והבקרה של מערכת "בית חכם"**
(מערכת אלקטרונית ביתית על פי הגדרת ת"י 14543 חלק 2.1)

השוני העיקרי בין מערכת מיתוג קונבנציונלית למערכת בית חכם הוא בהפרדה המוחלטת בין מרכיבי הכוח (Power) למרכיבי התקשורת/מידע (Data) – ראו איור יא-4 להלן. ההפרדה בין מרכיבי הכוח למרכיבי המידע מחייבת תשתית שונה מהמקובל במתקן קונבנציונלי (ראו פירוט בפסקה 3 להלן).




**איור יא-4: עקרון התפעול וההפרדה בין מרכיבי הרשת והתקשורת** [83]

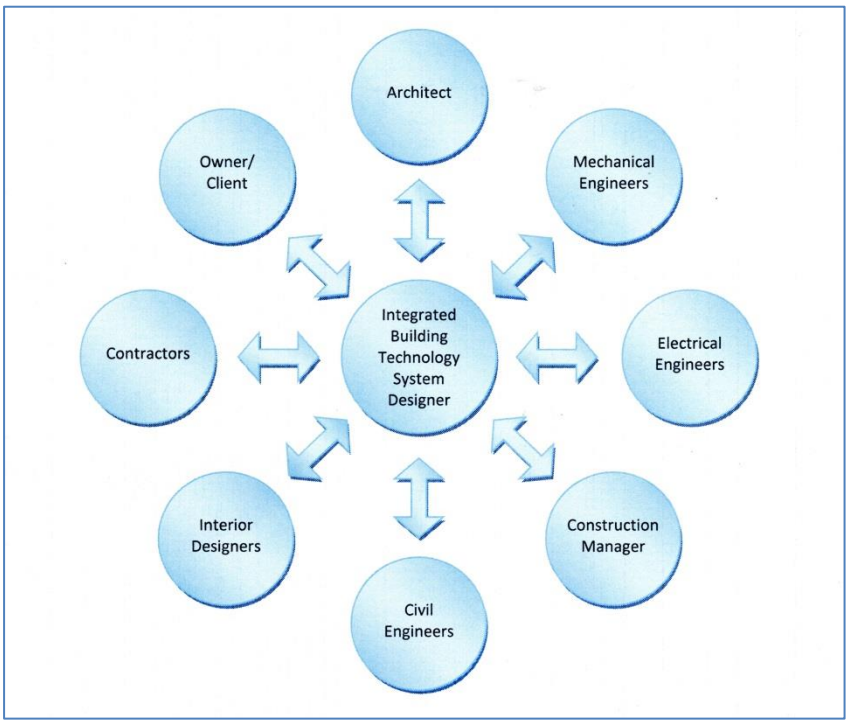
[82] Sinopoli, 2010

מערכות בית חכם נבדלות בסיסית בין מערכות קוויות בהן המידע מועבר על גבי כבלי תקשורת ומערכות אלחוטיות בהן המידע מועבר אלחוטית. היישום העיקרי של מערכות אלחוטיות הינו בבנייה קיימת או בבנייה בה ביצוע תשתית ייעודית להעברת המידע/תקשורת מהווה קושי או בלתי ניתן לביצוע. הביצועים של מערכות אלחוטיות עדיין נחותים בהשוואה למערכות קוויות בשל אילוצים טכניים שונים, ולכן ככל שניתן יש לתת עדיפות למערכות קוויות. טבלה יא-1 מפרטת את סוגי הפרוטוקולים הקוויים והאלחוטיים הנפוצים.

## 2.1 אינטגרציה בין-מערכתית

מהי אינטגרציה בין-מערכתית, ומדוע היא חשובה?

התפיסה האינטגרטיבית רואה יתרון בשילוב כל תתי המערכות בבניין למערכת אחת. שילוב המערכות במבנה מאפשר לצרכן מיצוי מרבי של היתרונות אשר נמנו בסעיף 1.4 לעיל, על פי העיקרון שטבע הגל – "השלם הוא יותר מסך חלקיו" [84]. זאת מדוע? כאשר מערכות המבנה כולן פועלות על פלטפורמה משותפת - בהיבט הזמן, מיקום נקודות ההפעלה, פרוטוקול התקשורת, לוגיקת (אלגוריתם) ההפעלה וקישוריות שקופה - אזי היעילות (effectiveness) והנצילות (efficiency) הם מרביים בהשוואה לכל חלופה אחרת, כגון הפעלה בודדת לכל תת-מערכת או הפעלה בו זמנית של מספר תתי-מערכות. לדוגמא: שילוב של מערכת מיזוג אוויר לחימום או לקירור (שהינה תת-מערכת אלקטרו מכנית) עם תחנת מזג אוויר של הבית החכם עשויה להגדיל את יעילותו האנרגטית של מתקן מיזוג האוויר. מידת האינטגרציה והשקיפות שלה עשויים להיות מדדים עיקריים ליעילות הבית החכם ותרומתו לאורך זמן.




**איור יא-5: האינטגרציה כפלטפורמה לשילוב בין-מערכתי [85]**

[83] Merten
[84] דומן, 2003
[85] Doman, 2000

להטמעה יעילה של תפיסת האינטגרציה, נדרשים שלושה תנאים:

א. הכנת פרוגרמה המפרטת את רצונות הדייר והמותאמת ליכולותיו ברמה הטכנית – תפעולית. הפרוגרמה המוסכמת הינה תוצר של סבב פגישות בין היועץ והדייר (או המזמין, אם זהות הדייר אינה ידועה בשלב התכנון), סיורים במבנים עם מערכות דומות והתאמה טכנו-כלכלית ליכולות הדייר או היזם. הפרוגרמה המוסכמת הינה הבסיס לתכנון המפורט ולאחר מכן להתקשרות המסחרית.

ב. כבילה אחודה המאפשרת העברת המידע על כבל אחד ויחיד (בהנחה שהתקשורת הינה קווית).

ג. פרוטוקול תקשורת פתוח ולא קנייני (non-proprietary protocol). תנאי זה בא להבטיח שקיפות בין כל המערכות, חוסר תלות בספק יחיד ויכולת לקלוט מערכות וציוד בעתיד ללא שינויים בחומרה או בתשתיות המבנה.

מערכת בית חכם העשויה בהתאם לעקרונות לעיל תאפשר שילוב שקוף של מערכת מניה חכמה וקישוריות לרשת החכמה (smart grid) - ראו סעיף 2.3 להלן.

**איור יא-6:**
**יחידת לחצנים אינטגרטיבית [86]**

**איור יא-7:**
**מסך מגע – touch screen אינטגרטיבי [87]**

## 2.2 מנייה חכמה

מנייה חכמה הינה מרכיב נוסף במארג של אמצעי ייעול הצריכה וחיסכון באנרגיה במבנה. ההערכה הינה שמנייה חכמה תאפשר חיסכון של כ-5-10 אחוז בצריכת האנרגיה וכפועל יוצא גם בפליטת $CO_2$. נכון למועד הכנת מסמך זה, המנייה החכמה עדיין לא משולבת במערכת הבית החכם, כאשר הסיבה העיקרית הינה אי-הסכמה על פרוטוקול אחיד שיאפשר אינטגרציה בין שתי המערכות.

למנייה החכמה מספר מאפיינים:

א. תקשורת דו-כיוונית בין הצרכן לבין חברת החשמל מאפשרת לספק השירות (חברת החשמל) לבנות פרופיל של דפוסי שימוש האנרגיה של הצרכן

ב. בבית הצרכן ישנה תצוגה קבועה ומפורטת של צריכת האנרגיה. התצוגה עשויה להעלות את המודעות לדפוסי הצריכה ושיאי הביקוש על פי מצבת המכשירים בדירה ומועדי ההפעלה שלהם.

ג. קריאה מרחוק של הצרכנות ועריכת חשבונות מדויקים.

ד. ניתוק והפעלה מחדש מרחוק של מכשירי חשמל זוללי אנרגיה בכדי לווסת את העומסים ברשת ולהפחית שיאי ביקוש.

[86] Merten
[87] Panja

ה. מדידת הצריכה במסגרת תעריפים המשתנים לפי עומס וזמן (תעו"ז).

**איור יא-8:**
**מונה "חכם" עם תצוגות ערכי הצרכנות השונים**
[88]

בראייה העתידית המונה החכם יהיה השער (gateway) שיחבר בין מערכת הבית החכם לרשת. שילוב תשתיות מנייה מתקדמות – AMI (Advanced Metering Infrastructure) יאפשר גם ניטור תקלות ברשת החשמל, בעיקר ברשת החלוקה [89].

## 2.3 תשתית "דואלית"

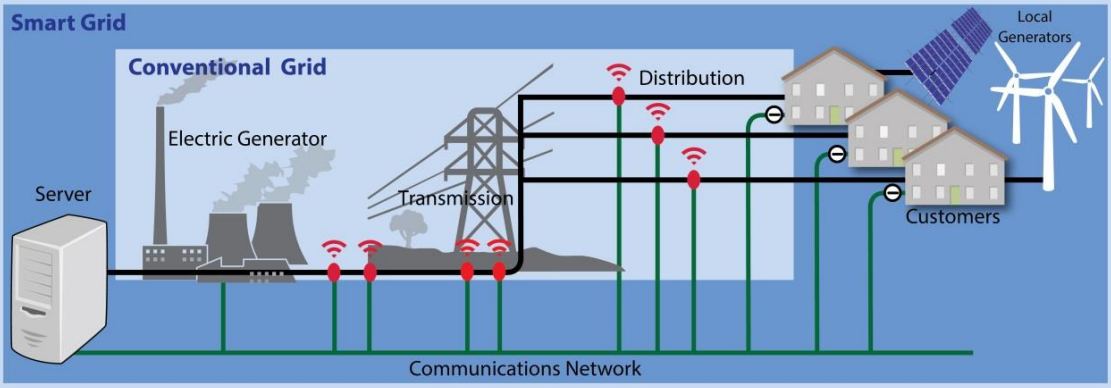
א. עיקרון ההפרדה בין מרכיב הרשת למרכיב התקשורת (על פי איור יא-3) מחייב גם הפרדה בתשתית הפיזית, דהיינו הצנרת והכבילה. במתקן החשמל הקונבנציונלי, הצנרת והכבילה מותאמים רק למרכיב הרשת, זאת בהיעדר מרכיב התקשורת. בתשתית ייעודית לבית חכם התשתית מופרדת (פיזית) לשני מסלולים – רשת ותקשורת - התואמים את דרישות ההפרדה על פי חוק החשמל עד ללוח החשמל המזין את המתקן [90]. התשתית הפיזית, בין אם קונבנציונלית או חכמה, הינה קשיחה: לאחר גמר שלד המבנה והמחיצות היא אינה ניתנת כמעט לשינוי. לאחר גמר השלד והמחיצות, שינויים והתאמות - בין אם שדרוג המבנה לבית חכם, או לחילופין החזרת המבנה למערכת קונבנציונלית - כרוכים בחציבת וחירוץ בקירות, הרמת ריצוף, פירוק תקרות וכיו"ב. לעבודות כאלה ישנן כמובן עלות כספית נוספת.

ב. הפתרון המוצע, אשר נוסה ויושם בשטח, הינו התקנת תשתית דואלית, המשלבת הובלת חשמל ותקשורת. העלות הנוספת של תשתית דואלית בהשוואה לתשתית המקובלת כיום היא זניחה (כ-1,500-1,000 שקלים בדירה בת 5 חדרים, בהנחה שתוספת הצנרת באה לידי ביטוי בתכנון ובתמחור המקורי). התוספת מתבטאת בצנרת מקשרת "יבשה" (ללא חיווט) בין שתי המערכות במספר מוקדים. הקישור מאפשר לדייר הנוכחי, או לכל דייר עתידי, גמישות מרבית בהתקנת נקודות חשמל בכל מקום בדירה, לרבות שינויים בעקבות ארגון מחדש של החדרים והחללים העיקריים - ללא שינויים פיזיים בתשתית החשמל עצמה.

ג. מומלץ להכין תשתית תקשורת יבשה נוספת ליד כל בית תקע המיועד למכשירים "הלבנים" וצרכני החשמל העיקריים. תשתית זו תבטיח אפשרות להשלת עומסים מרחוק ממרכז הבקרה של רשת החשמל החכמה במקרה של שיאי ביקוש במערכת הארצית. שילוב מכשירים "חומים" (ציוד בידור, מחשבים ותקשורת) בבית החכם מחייב הקצאת בתי תקע ייעודיים הממותגים על ידי בקרי המערכת, בעיקר למניעת צריכת אנרגיה בשעות בהם הציוד במצב שינה או המתנה (ראו פיסקה 3 להלן).

---

[88] Alan, 2009
[89] Venables, 2009
[90] שפיגל, 2011




**ד. איור יא-9: עקרון "הרשת החכמה"** [91]

# 3. יישומים והיבטים אנרגטיים של מערכות בית חכם

## 3.1 פוטנציאל החיסכון בצריכת אנרגיה

חברות המספקות מערכות חכמות טוענות שהתקנת מערכות בית חכם עשויות להביא לחיסכון של 50% בצריכת האנרגיה בהשוואה לבית רגיל. ייתכן שניתן להגיע לחיסכון כזה בתנאי מעבדה, אך סביר יותר להניח כי החיסכון שיתקבל בפועל בדירות מגורים לא יעלה על 30%, ובמרבית המקרים יהיה נמוך הרבה יותר. הפוטנציאל לחיסכון משתנה בהתאם לסוג הציוד הקיים ולדפוסי השימוש בו. במרכיב התאורה, למשל, החיסכון הצפוי הינו יחסית גבוה – מעל ל-50%. לעומת זאת, החיסכון בחשמל הנדרש להפעלת המכשירים הלבנים צפוי להיות קטן הרבה יותר, באופן יחסי.

הפוטנציאל העיקרי לחיסכון באנרגיה בעקבות התקנת מערכת בית חכם נובע משינויים בדפוסי הפעלת הציוד החשמלי. היכולת לקבוע משטרי עבודה (כיבוי, הדלקה, עמעום, או חנייה של ציוד תקשוב) התואמים את פרופיל המשתמש הינה המשמעותית ביותר, נכון למועד הכנת מסמך זה. בעתיד, עם שילוב אלמנטים של בינה מלאכותית (AI) ומערכות מומחה (Expert System) המערכת תלמד את דפוסי התנהגות של המשתמש ותבקר את הפעלת הציוד בצורה מיטבית.

## 3.2 אמצעים ופתרונות טיפוסיים לחיסכון באנרגיה

**א. תאורה**

בקרת התאורה עשויה להביא לחיסכון באנרגיה בתרחישים שונים, לרבות:

- ✓ עמעום האורות באופן אוטומטי לפי הצורך, בהתאם לאופי הפעילות לפעילויות שונות (קריאה, האזנה למוסיקה/צפייה בטלוויזיה, אירוח וכיו"ב)
- ✓ כיבוי תאורה בחללים בהם אין נוכחות משתמשים
- ✓ הדלקה וכיבוי אוטומטי של התאורה באמצעות בקר המחליף את "שעון השבת" הרגיל במערכת אסטרונומית מדויקת המותאמת לקווי רוחב בהתאמה לכניסה ויציאה של שבתות ומועדי ישראל
- ✓ שליטה מדויקת ואפקטיבית על תאורת החוץ – גינה, ביטחון או אפקטים מיוחדים.

[91] Wacks, 2011

### ב. מיזוג אוויר קירור וחימום

הפעלה חכמה של מערכות מיזוג אוויר עשויה להביא לחיסכון בכמה תרחישים:

- ✓ וויסות דינמי לפי נתונים המתקבלים מתחנת מזג אוויר, בהתייחס לתנאים הקיימים ולתנאים החזויים בפרקי זמן שונים
- ✓ כיבוי המערכת בחללים בהם אין נוכחות משתמשים
- ✓ שליטה מרכזית על יחידות מיזוג האוויר
- ✓ הבטחת תנאי נוחות תרמית אופטימליים
- ✓ שילוב עם מערכות אחרות אשר להן השפעה על עומסי המיזוג, כגון הצללת חלונות, בכדי להבטיח חיסכון באנרגיה במקביל להשגת נוחות ויזואלית ותאורה טבעית
- ✓ שילוב מערכות אקלום עם מערכות לאספקת מים חמים
- ✓ תכנות אשר יווסת את פעולת המערכת בהתאם למאפיינים של המבנה, לרבות בידוד תרמי ומסה

### ג. ציוד תקשוב ובידור

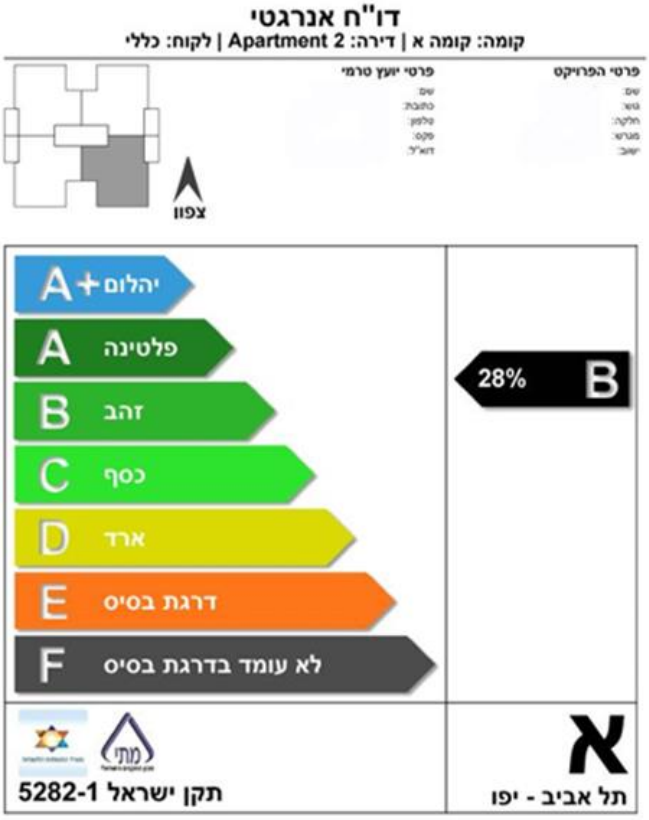
רוב ציוד התקשוב והבידור הביתי (ICT), המכונה גם ציוד "חום", צורך אנרגיה גם כאשר אינו פועל, אלא נמצא במצב שקט או מצב המתנה. תקינה עדכנית (מסמך CWA 50487:2005) דורשת כי צריכה שקטה של מכשיר חשמלי לא תעלה על 1 ואט למכשיר, אולם ישנם מכשירים, כגון ממירים של טלוויזיה בכבלים (או לווין) הצורכים 25 ואט או יותר – גם כאשר הטלוויזיה כבויה (!). לצריכה השקטה ישנה אפוא משמעות מצרפית משמעותית, וכיבוי מוחלט של הציוד עשוי להביא לחיסכון ניכר באנרגיה ובכסף. היקף החיסכון שיתקבל יושפע מסוג הציוד ומאפייני השימוש בו. מאחר והמשתמש הרגיל אינו מסוגל לבקר ציוד זה באופן מיטבי, ממגוון סיבות (כגון אי ידיעה, שכחה או הזנחה), מערכת חכמה עשויה להיות מענה יעיל.

### ד. מכשירים "לבנים חכמים"

מכשירים "לבנים" מתחלקים לשני קבוצות: אלו הפועלים קבוע (דוגמת המקרר) ואלו המופעלים ומופסקים על בסיס דרישה פרטנית בהתאם לצרכי המשתמש, כגון מדיח כלים. (א) במקרר חכם, צריכת האנרגיה תותאם לכמות וסוג המזון המאוחסן (ב) בציוד המופעל פרטנית צריכת האנרגיה תותאם לכמות הכלים /כביסה ומאפייניהם. ציוד כזה ניתן להפעיל גם בזמנים אופטימליים בהתאם למצב רשת החשמל הכללית (ועל פי תעריפי התעו"ז), או לחילופין בשילוב עם מערכות אנרגיה מתחדשות כגון תאים פוטו-וולטאים.

### ה. דירוג אנרגטי

צריכת האנרגיה של בית חכם מושפעת לא רק מניהול צרכני החשמל והקשרים ביניהם, אלא גם ממאפייני הציוד והדירה עצמם, הבאים לידי ביטוי בדירוג האנרגטי שלהם. דירוג זה יכול לבטא את צריכת האנרגיה במהלך תקופה אופיינית כגון שנה, כאשר מדובר בבניין מגורים (איור יא-10), עבור מחזור פעילות אחד, כאשר מדובר במכונת כביסה, או במשך שעת עבודה, כאשר מדובר במזגן.




**איור יא-10:**

**מדבקה של דירוג אנרגטי לפי ת"י 5282 חלק 1 (על בסיס צריכת אנרגיה שנתית למ"ר שטח מבונה)**

יא

### 3.3 חיסכון ויעילות אנרגטית בבנייה "לגיל השלישי" (Ambient Assisted Living - AAL)

חידושים רפואיים, עליה במודעות הציבור לבדיקות תקופתיות, שינויים בהרגלי התזונה, עלייה באיכות החיים – כל אלו תרמו ותורמים להגדלת תוחלת החיים. יחד עם זאת, הרפואה לא הצליחה להתגבר על הירידה התלולה ביכולת הקוגניטיבית של בני "הגיל השלישי". מאפיין טיפוסי של הגיל השלישי אשר יש לו השלכות על צריכת האנרגיה הינו השכחה (ובמקרים לא מעטים בלבול וחוסר התמצאות במרחב). כל מכשיר חשמלי הפועל שלא לצורך או פועל פעולת סרק, גורם לצריכה מיותרת ולבזבוז אנרגיה, אך עלול גם להוות מפגע בטיחותי (תנור חמום או בישול לדוגמה).

המגמה של רבים מבני "הגיל השלישי" להישאר בבית (עם עזרה או בלעדיה) ולא לעבור לדיור מוגן נמצאת בעלייה. ההשלכות המצרפיות של צריכת אנרגיה מיותרת הינן משמעותיות והן תלכנה ותגדלנה עם הצטרפות יותר ויותר גילאים מתקדמים למגזר אוכלוסייה זה. תחום ה- Ambient Assisted Living - AAL - מתפתח בצעדי ענק בכל ההיבטים (רפואיים שוטפים ורפואיים לא שגרתיים, נוחות, בטיחות וכיו"ב).

איור יא-11 מתאר פריסת רגשים ואלמנטים המתריעים לדייר על הצורך בלקיחת תרופות, הרגלי קימה והיגיינה וכיו"ב. שילוב מערכת בית חכם במערכות רגשים ובקרים או התאמת משטרי התפעול והעבודה של מצבת הציוד החשמל במערכות AAL נמצא בפיתוח של חברות מובילות בעולם ומבטיחה פתרונות יעילים (ולא יקרים) כערך מוסף למערכות הבסיסיות.

**איור יא-11: פריסת רגשים בבית מגורים טיפוסי במסגרת תפיסת Ambient Assisted Living - AAL [92]**

## 4. תקינה[93]

תפיסת הבית החכם מיצבה עצמה בשני העשורים האחרונים כמרכיב מבדל בין בנייה סטנדרטית לבנייה ברמה איכותית גבוהה (ולאו דווקא בהיבט האנרגטי). חדירת החברות השונות לתחום זה נעשתה באופן בלתי סדיר, שווקו מוצרים חסרי מכנה משותף וחלק גדול מהטכנולוגיות שהובאו לארץ הוטמעו כמערכות סגורות – כאלו היוצרות תלות בלעדית בספק הציוד (proprietary systems). צרכנים לא מעטים שבביתם הותקנה מערכת בית חכם מצאו עצמם בפני שוקת שבורה כאשר יצרן או יבואן המערכת (הסגורה) נעלם מהשוק.

מורכבות הנושא, שהוא בעל היבטים בטיחותיים, תפעוליים וכלכליים, הביאו את מכון התקנים הישראלי בשיתוף מקבלי החלטות ברמה הלאומית להחלטה שיש למסד את התחום, במטרה להגן על הצרכן והמשתמש הסופי. התקן יבוא במקביל ובנוסף לחוק החשמל על תקנותיו, הוראות ועדת הפירושים והנחיות נוספות של גופים ציבורים ורשויות אחרות (כגון חברת החשמל, המשטרה וכיבוי אש) שמטרתם הבטחת בטחון המשתמשים, בטיחות המתקנים ואמינות אספקת החשמל.

בהיבט פרוטוקולים "פתוחים" המיועדים למערכות ביתיות, ניתן לציין את פרוטוקול ה- KNX (המיועד ליישומים קווים ואלחוטיים) ופרוטוקול ה- ZIGBEE (אלחוטי) – כמובילים. טבלה יא-1 להלן מפרטת את רשימת הפרוטוקולים "הפתוחים והסגורים" הנפוצים בשוק הביתי והלא ביתי (שני הפרוטוקולים המוזכרים לעיל, גם מצוינים בטבלה כמתאימים ביותר – על פי האפיון ורמת הניקוד).

[92] דומן, 2005
[93] דומן, 2010

### טבלה יא-1: פרוטוקולים פתוחים וסגורים לבקרת מבנים [94]

| Network protocol | Media/Option | Standard | Applications for lighting | Sector of application | Main Advantages |
|---|---|---|---|---|---|
| BACnet | IP, Ethernet, PTP, ZigBee, MS/TP, Lontalk, Arcnet | Yes ISO 16484-5 | ••• | Building automation | Norm<br>Many networking options |
| LonWorks | IR, PLC, TP, RF, IP | Yes EN 14908 | ••• | Building and home automation | Norm |
| KNX | IR, PLC, TP, RF, IP | Yes ISO 14543 | •••• | LB and HA | Norm |
| PROFIBUS | IP, TP | Not a norm but an industrial standard | • | Industrial | Robustness |
| MODBUS | IP ,PTP, MS/TP | De facto | •• | Industrial | Robustness<br>Simplicity |
| WorldFIP | IP, TP | EN50170 | • | Industrial | Robustness |
| X10 | PLC, RF | OPEN not a norm | ••• | HA | lot of products |
| Bluetooth | RF | IEEE 802.15.1 | • | Electronics | low cost |
| ZigBee | RF | Base on IEEE 802.15.4 | •••• | LB and HA | low consumption |
| DALI | TP | IEC 62386 | ••••• | Lighting control | Dedicated to lighting |
| DMX | MS/TP | YES | ••••• | Theatre lighting | Dedicated to lighting |
| Zwave | RF | Not a norm but Industrial standard | •••• | LB and HA | Low consumption<br>Many application in USA |
| INSTEON | RF, PLC | Proprietary | ••• | HA | Robustness<br>Simple to use |
| Wavenis | RF | Proprietary | ••• | HA | Simple to use |
| IN ONE | RF, PLC | Proprietary | ••• | HA | Simple to use<br>Simple to install |
| Enocean | RF | Proprietary | •••• | HA | Battery less<br>Many products |

Very few lighting applications : •
Few lighting applications : ••
Some lighting applications exists : •••
Many lighting applications exists : ••••
Dedicated to lighting : •••••

IP: *Internet Protocol*, RF: *Radio Frequency*
IR: *Infra Red*, PLC: *Power Line Communication*
PTP: *Pear to Pear*, TP: *Twist Pair*,
MS/TP: *Master Slave/ Token Passing*
LB: *Little Building*, HA: *Home Automation*

התקינה הבינלאומית ISO/IEC JTC 1 והאירופאית (EN) והתקינה ישראלית הקיימת, מאפשרת היום ליצרן הציוד, לקבלן/מתקין לפעול בפלטפורמה רב-תחומית ולמשתמש הסופי מציעה מוצר או מערכת אופטימלית התואמים את התקנים להלן:

1. ארכיטקטורה מוסכמת - סדרת ת"י 14543
2. תפעוליות ביינית (inter-operability) - ת"י 18012 חלק 1
3. בטיחות פונקציונלית (functional safety) - ת"י 14543 וטיוטת ת"י 14762
4. התייעלות אנרגטית ואמצעים למדידת רמת היעילות (החיסכון) על בסיס מכנה משותף - EN 15232 Energy Performance of Buildings – Impact of Building Automation, Controls and Building Management

[94] Halonen et al, 2012

### 4.1 ארכיטקטורה מוסכמת

נושא הארכיטקטורה - הבסיס לתקינת הבית החכם (מא"ב) נדון בפרק 2 לעיל (ת"י 14543). מטרות ת"י 14543 הינן: (1) הגדרת מאפייני מרכיבי המא"ב; (2) קביעת ארכיטקטורת התפעול (הפרוטוקול) והממשקים בין מרכיבי המערכת; (3) שיוך האמור לעיל למודל ה- OSI; (4) התייחסות לתשתיות הפיזיות – הכבילה; ו-(5) הבטחת יכולת הניוד של הצרכנים מספק לספק.

### 4.2 תפעוליות ביינית של מוצרים (product interoperability)

מטרתו של ת"י 18012 חלק 1 לאפשר שקיפות, אמינות ותפעוליות ביינית (הדדית) בין ספק/יצרנים שונים. התקן מגדיר את גבולות המערכות השונות ואת חלקי המערכות הפועלים בתוך הרשתות השונות, ובמיוחד מערכות התאורה, מיזוג אוויר, הנוחות הבטיחות והביטחון המשולבים במערכת. התקן מגדיר תפעוליות ביינית בהיבטים שונים: בטיחות, אמינות, מיעון (addressing), יישומים, העברת/מסירת מידע, ניהול ושילוב ציוד ומיקומם במערכת/תת-מערכת.

את התקן ניתן ליישם ברשתות/מערכות עצמאיות בתחום המגורים או מתקנים מקומיים (קטנים); ברשתות מעורבות; באלמנטים המוגדרים אוטומטית; ובהנחיות למתקין/ספק הציוד /מערכת.

### 4.3 בטיחות פונקציונלית (functional safety)

מערכות בית חכם מפעילות ישירות או באופן עקיף מערכות חשמל הפועלות במתח נמוך (על פי הגדרת חוק החשמל 50 וולט – 1,000 וולט). מעבר לדרישה שהמערכות תעמודנה בדרישות חוק החשמל והתקנות הנלוות, לרבות התקנים, קיימים סיכונים נוספים שאליהן מתייחסת הצעת *טיוטת* ת"י 14762, אשר מפורטים תחת כותר התקן בטיחות פונקציונלית: (א) היכולת לחזות שימוש לא נכון/שגוי של המערכת; (ב) תקלות; (ג) הפרעות חולפות. הצעת ת"י 14762 מתמקדת בדרישות והסיכונים האפשריים הנובעים משימוש במערכת אלקטרונית ביתית, לרבות שיטות להקטנת ושיכוך הסיכונים (risk mitigation).

### 4.4 מדידת תרומת מערכת "בית חכם" לביצועים אנרגטיים של מבנים

הסוגיות הכרוכות ביישום, מדידה, קביעת אמות מידה (benchmarks) וניהול של התייעלות אנרגטית בכלל ותרומת מא"ב בפרט, מורכבות ומחייבות תקינה מתאימה.

אימוץ התקן האירופאי EN 15232 אמנם עדיין טרם הגיע לדיון במכון התקנים, אך מפאת חשיבותו ותרומתו מאוזכר במסמך זה.

התקן עוסק בתחומים הבאים:

(א) הגדרת דרישות מינימום בהיבט בקרת ואוטומציית המבנה, ניהול המערכות לחיסכון באנרגיה וקביעת אמות מידה אנרגטיות מותאמות לרמת מורכבות המבנה

(ב) מתודולוגיה לקביעת תרומת מערכת אלקטרונית ביתית לביצועים האנרגטיים של המבנה

(ג) הנחיות לחישובי מאזן אנרגטי פרטני וכולל של הדירה

(ד) מתודולוגיה לקביעת אופני הערכות החיסכון האנרגטי בהתחשב באמור לעיל.

התקן מיועד למקבלי החלטות בכל הדרגים והתחומים, במיוחד בתחומי הגדרת פרוגרמות ראשוניות ומפורטות שבהן משולבות מערכות אלקטרוניות ביתיות ומיזמי התייעלות אנרגטית.

מדידת ביצועי הבניין והמערכות הינה בעלת חשיבות מיוחדת במיזמי התייעלות אנרגטית המנוהלים על ידי חברות ESCO (Energy Services Company). במיזמים אלה, חברת ה- ESCO ממנת את פעולות ההתייעלות והתקבולים מבעלי הבניין מחושבים על בסיס החיסכון באנרגיה של הבניין

ומערכותיו בהשוואה למצב הבסיס. התקן האירופי EN15232 אמור לשמש את כל מגזרי הבנייה – חדשה וקיימת – למגורים ושלא למגורים.

## 5. שיקולים כלכליים בבחירת מערכת "בית חכם"

ההחלטה על יישום מערכת אלקטרונית ביתית אינה מהווה מרכיב מרכזי בשיקולי הרכש ותכנון של נכס חדש וההחלטה על רכישת נכס יד שנייה הכולל מערכת כזו אף היא אינה מושפעת מעובדה זו. גם יעילותו האנרגטית של המבנה מהווה בדרך כלל שיקול משני בלבד. מודעות ציבור הצרכנים ודיירים, אכיפת תקנות ותקנים, העמדת תנאי סף למבקשי היתר בנייה, ומחירי האנרגיה עצמם – כל אלו עשויים לשנות בעתיד את סדרי עדיפות הצרכנים.

מצב זה מוצא את ביטויו גם ברמת ואפיון מערכת אלקטרונית ביתית. הבניה למגורים מאופיינת כצמודת קרקע או כבנייה רוויה ולכך השפעה על אפיון המערכות. בבנייה צמודת קרקע המגמה השולטת הינה זיווד הבית כחבילה (bundling) הכוללת מערכות AUDIO/VIDEO, אזעקות /גילוי אש ועשן, בקרת כניסה ובית חכם. תרומת המערכת לחיסכון מהווה אלמנט שיווקי, אך איננה מרכיב מרכזי. שונה המצב בבנייה רוויה. מרבית המערכות בבנייה רוויה הינן בסיסיות (אם כי ניתנת לצרכן/דייר האופציה להרחבה בעתיד): הן מאפשרות בקרה טובה יותר על התאורה, מערכות לחימום מים ולאקלום הדירה, ולכן יש בהן פוטנציאל לחיסכון באנרגיה – אך לרוב אין בהן בקרה משולבת על מערכות שמע ובידור. בדרך כלל מתקיים יחס הפוך בין רמת התחכום של המערכת האלקטרונית הביתית לבין ההיבט האנרגטי: ככל שהמערכת בסיסית יותר, הערך המוסף בתחום האנרגיה נוטה להיות גבוה יותר. מחירי המערכות (כחבילה) נעים בין אלפי שקלים בבנייה רוויה למאות אלפי שקלים (ובמקרים חריגים – גם מיליוני שקלים) בבנייה צמודת קרקע. ישנם יזמים הכוללים את מערכת הבית החכם כחלק ממפרט הדירה (כלומר, ללא תשלום נפרד). בתנאים אלו, ובהיעדר אכיפה חיצונית, נושא האנרגיה עדיין משני.

קרוב לוודאי ששוק הבנייה עדיין לא בשל לבחינת הכדאיות הכלכלית של מערכות אלקטרוניות ביתיות או להערכת השפעתן על צריכת האנרגיה. גם בהיבט הרחב יותר של בניינים ירוקים ישנם חילוקי דעות על מידת הכדאיות הכלכלית, ומחקרים שונים אשר נערכו בארץ ובעולם העלו ממצאים שונים, ביו היתר משום שהנחות המוצא שלהם היו שונות מאוד.

תעשיית הבנייה היא באופייה שמרנית מאוד. הטמעת תפיסות תכנון חדשניות ושיטות עבודה מהפכניות כרוכים בתהליך ארוך אשר יחייב שיתוף פעולה של כל בעלי העניין בכדי להביא להתייעלות אנרגטית רב-מערכתית.

## מקורות

[1] Allan, K. (2009). *Power to the People,* Engineering & Technology, IET, October 2009 (46-46)

[2] Butcher, K., Rowe, J. (2004). *Energy Efficiency in Buildings*(London: CIBSE) CIBSE Guide F

[3] Doman, U. (2000). *Integration- Why Integrate? What to Integrate? How* to Integrate, Fact Sheet # 2 An internal publication for the University of Reading

[4] Halonen L., Tetri E., Bhusal P. (2010). Annex 45: Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings , (Aalto: Aalto University)

[5] Kastner, W., Neugschwandtner, G.,Soucek, S., Newman, H., M. (2005). *Communication Systems for Building Automation and Control*, Proceedings of the IEEE Vol.93, No. 6 June 2005 (1178-1202)

[6] Nicholl, A., Perry, M. (2009). *Smart Home Systems and the Code for Sustainable Homes.* Issued by the BRE, ib excellence, Modern Environment

[7] Reinisch, C., Kofler, M., Iglesias, F., Kastner, W., (2011). *ThinkHome Energy Efficiency in Future Smart Homes,* EURASIP Journal on Embedded Systems, Vol. 2011, Article ID 104617, 18 pages

[8] Salvendy, G. (1997). Handbook of Human Factors and Ergonomics, (NY: Wiley)

[9] Sinopoli, J. (2010). *Smart* Building Systems for Architects, Owners and Builders, (Burlington: MA: Elsevier)

[10] Venables, M. (2009). *Smart Policy,* Engineering & Technology, IET, October 2009 (10-11)

[11] Wacks, K. (2011). *The US Government Approach to Smart Grid ,*Homes & Buildings, The Magazine of the Continental Automated Buildings Association (CABA), Summer 2011, Vol.8, No. 2 (18-20)

[12] דומן, א. (2003א). אינטגרציה – השער לאדריכלות דיגיטלית, פרספקטיבה, גיליון 17, יולי 2003, (18-22)

[13] דומן, א. (2003ב). האינטגרציה – הלכה למעשה, פרספקטיבה, גיליון 20, 2003,(8-12)

[14] דומן, א. (2005). בית חכם מגמות עתידיות עם מבט לגיל השלישי, בנין ואדריכלות, גיליון 93, 2005, (7-10).

[15] דומן, א. (2010). הגדרת וועדת מומחים של מכון התקנים במסגרת הכנת תקן ישראלי למערכת אלקטרונית ביתית (מא"ב)

[16] דומן, א. (2010). תקינת "בית חכם", חשמל , גיליון 30, יוני 2010, (4-11)

[17] סוסנובסקי, י. (2009) יסודות שימור באנרגיה, (נתניה, A.B.C )

[18] שפיגל, מערכות אלקטרוניות לבית ("בית חכם"), פאזה אחרת- מידעון מקצועי לחשמל, פברואר 2011, (2-7)

[19] ת"י 14543 חלק 2.1 טכנולוגיית המידע – ארכיטקטורה של מערכת אלקטרונית ביתית (מא"ב) – מבוא ומודולריות של התקנים, מכון התקנים הישראלי, נובמבר 2009 (מבוסס על ISO/IEC 14543-2-1- עם התאמות מקומיות) הערה: סה"כ פורסמו 11 תקנים ישראלים מסדרה זו.

[20] ת"י 18012 חלק 1 טכנולוגיית המידע –מערכת אלקטרונית ביתית – קווים מנחים לתפעוליות ביניית של מוצרים: מבוא, מכון התקנים הישראלי, נובמבר 2009 (מבוסס על ISO/IEC 18012-1- עם התאמות מקומיות).

## פרק יב:

# מערכות לחימום מים

# פרק יב: מערכות לחימום מים

כ-9% מצריכת האנרגיה בבנייני מגורים בישראל מוקדש לחימום מים[95], למרות התרומה המשמעותית של מערכות סולריות. לפיכך יש חשיבות רבה למצות את כל האפשרויות להביא לחיסכון בתחום זה, החל מתכנון יעיל של המערכות הסולריות, דרך מימוש טכנולוגיות אחרות לחימום המים וכלה בהפחתת ההפסדים הנובעים מצנרת חלוקה לא יעילה ומתחזוקה לקויה.

פרק זה יציג עקרונות לתכנון של מערכות לחימום מים, בקנה מידה של יחידת מגורים בודדת ושל מערכות משותפות למספר דירות.

## 1. מערכות סולריות

כאשר פורסמו לראשונה תקנות התכנון והבנייה בשנת 1970, הן כללו חובה להתקנת מערכת סולרית לאספקת מים חמים. בכך היתה ישראל לחלוצה בתחום זה בעולם כולו. באותה עת לא היתה טכנולוגיה שאפשרה התקנת דודי שמש בבניינים רבי-קומות, ומשמעות התקנתם של דודים בבניינים גבוהים היתה שדיירי הקומות התחתונות לא יזכו למים חמים[96]. נוסף על כך, בעת תיקון התקנה היו בישראל בנייני מגורים מעטים בלבד שבהם יותר מתשע קומות. כיום מותקנים דודי שמש ב- 85 אחוז לערך ממשקי הבית.

בשנים האחרונות חלה עלייה בשיעורן של הדירות בבניינים רבי קומות בכלל הדירות. עד שנת 2002 היה חלקן של דירות אלה 20 אחוז או פחות מכלל הדירות שנבנו בכל שנה, אולם שיעור זה הולך וגדל ובשנת 2013 הוא עמד על כ-41 אחוז[97].

בהתאם לכך, שונתה התקנה והחל משנת 2012 חלה חובה להתקין מערכת סולרית לחימום מים בכל בניין, לרבות בניינים רבי-קומות (בניינים אשר גובהם עולה על 29 מטר). בבניינים רבי-קומות החובה חלה רק על דירות ב-7 הקומות העליונות.

**צילום יב-1. הדמיה של מגדלי מגורים עם מערכות סולריות לחימום מים [98]**

[95] מקינזי, 2009
[96] רונן, 2012.
[97] משרד הבינוי והשיכון, 2014
[98] http://www.b-yair.co.il/projects/

**חובת התקנת מערכת סולרית תק' (מס' 2) תשס"ז-2007 תק' תשע"ג-2012**

1.09 (א) בבניין וכן בשבע הקומות העליונות בבניין רב-קומות תותקן מערכת סולרית לאספקת מים חמים.

(ב) במכלי אגירה ובקולטים, שיותקנו על גגו של בנין, יקוימו לשביעות רצונה של הוועדה המקומית, הוראות אלה:

(1) המכל והקולט לא יהוו מפגע חזותי;

(2) המכלים ירוכזו במבנה או במבנים שישתלבו מבחינה ארכיטקטונית בבניין כולו;

(3) הצבע של מכל האגירה יהא לבן, אלא אם כן קבעה הוועדה המקומית אחרת.

(ג) במערכת סולרית תותקן מערכת גיבוי כדי לספק אנרגיה לחימום מים למקרים שבהם מקור קרינת השמש אינו מספיק למטרה זו.

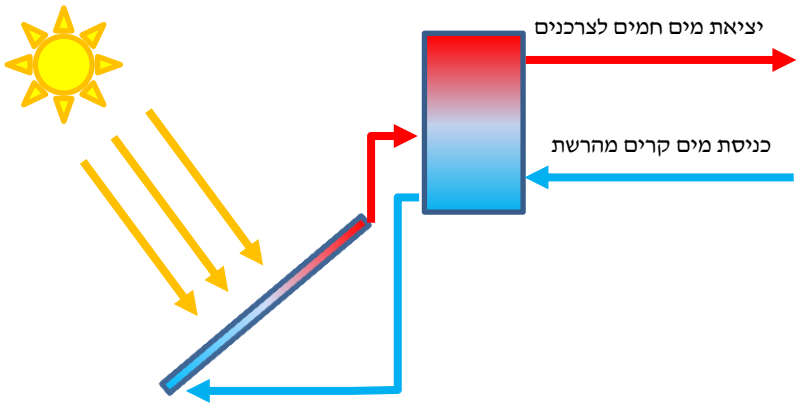
(ד) הוראות פרט זה לא יחולו על יתרת הקומות מעבר לשבע הקומות העליונות בבניין רב-קומות ועל בנין או חלק מבניין, המיועדים כולם או מקצתם לתעשייה, למלאכה או לבית חולים.

(ה) ראתה הוועדה המקומית כי מחמת הצללת הבניין שלהקמתו מבוקש היתר, אין אפשרות לנצל את אנרגיית השמש ניצול של ממש, או שהתקנת מערכת סולרית על הבניין תיצור מפגע ארכיטקטוני בלתי סביר, או שנקבעו לגבי בניין רב-קומות מגבלות גובה, בתכנית שהופקדה או אושרה ערב תחילתן של תקנות התכנון והבנייה (בקשה להיתר, תנאיו ואגרות) (תיקון), התשע"ג-2012, רשאית היא לפטור את מבקש ההיתר מהוראות פרט זה, לגבי הבניין כולו או לגבי חלק ממנו; ואולם לא תיתן הוועדה המקומית פטור לפי פרט זה, אלא לאחר שנתמלאו התנאים המפורטים בסעיף 149 לחוק.

## 1.1 עקרונות הפעולה של מערכות סולריות לחימום מים

במערכת סולרית לחימום מים ישנם בדרך כלל שני אלמנטים עיקריים: קולט ומיכל אגירה (אם כי עקרונית ניתן גם לשלב ביניהם). במיכל האגירה ניתן לשלב גוף חימום חשמלי כגיבוי לאספקת מים חמים כאשר האנרגיה המתקבלת מקולטי השמש אינה מספקת.

איור יב-1 מתאר באופן סכמתי את המבנה העקרוני של מערכת סולרית לחימום מים. מי הרשת (הקרים) מסופקים למיכל האגירה, וממנו יוצאים אל נקודות הצריכה בבניין. מעגל נפרד מוביל ממיכל האגירה אל הקולטים ובחזרה מהם.




**איור יב-1. המבנה העקרוני של מערכת סולרית לחימום מים**

### א. אופן סחרור המים

#### מערכת תרמו-סיפונית

במערכת תרמו-סיפונית, שהיא המערכת הנפוצה ביותר בארץ, סחרור המים בין הקולטים לבין מיכל האגירה מתבצע כתוצאה מהפרשי הצפיפות בין מים חמים (שהינם קלים יותר) למים הקרים (שהם כבדים יותר), ללא צורך במשאבה. בהתקנה המקובלת, הקולט מותקן בשיפוע כך שהמים הקרים נכנסים בצידו התחתון, מתחממים בהשפעת קרינת השמש, ויוצאים לעבר מיכל האגירה בצידו העליון של הקולט. בהתקנה כזאת, כניסת המים החמים מהקולט אל מיכל האגירה חייבת להיות גבוהה יותר מהחלק הגבוה ביותר של הקולט. קצב סחרור המים דרך הקולטים הוא איטי מאוד, ושווה בערך לנפח של מיכל האגירה 1-2 פעמים ביממה.

#### מערכת מאולצת

תנועת המים יכולה גם להתבצע בעזרת משאבה. מערכת מאולצת תותקן בדרך כלל במצבים הבאים:

- כאשר מיכל האגירה ממוקם נמוך מהקולט ולכן לא ניתן להבטיח את פעולת התרמו-סיפון.
- כשהצרכן מרוחק מקולט השמש, בעיקר בבתים משותפים גדולים.

מערכת מאולצת ביתית פתוחה מורכבת מאוגר מים, קולט שמש, משאבת סחרור ופיקוד תואם.

### ב. מערכות פתוחות ומערכות סגורות

במערכת פתוחה, המים הנלקחים מהאוגר לשימוש הצרכן מחוממים ישירות תוך כדי המעבר דרך הקולט. מערכת כזאת היא פשוטה וזולה, ולכן מרבית המערכות הסולריות בישראל הן מהטיפוס הזה. למערכת הפתוחה יש גם מספר חסרונות בולטים:

א. כאשר המים בקולט מגיעים לטמפרטורה גבוהה (בעיקר אך לא רק בקיץ), נוצרת אבנית אשר מצטברת בהדרגה על הדפנות הפנימיות של הצינורות בקולט. במשך הזמן, הקוטר הפעיל של הצינורות קטן וכושר החימום של המערכת מצטמצם מאוד.

ב. בלילות קרים אשר בהם יש קרה, המים בקולט עלולים לקפוא. מאחר ונפח הקרח גדול מנפח המים, קפיאה מוחלטת של הקולט עלולה לגרור בעקבותיה סדקים בצנרת או בריתוכים, אשר יביאו לנזילות לאחר הפשרת המים.

הפתרון לשתי הבעיות כאחד הוא בהתקנת מערכת סגורה. במערכת סגורה, המים אשר מסופקים לצרכן ממיכל האגירה אינם מתחממים בקולט, אלא באמצעות מחליף חום הנמצא במיכל. האנרגיה מסופקת למחליף החום מהקולטים באמצעות מים או נוזל כגון פרופילן גליקול. נוזל זה אינו רעיל, אינו קופא בטמפרטורות הנפוצות בארץ, ואינו גורם לשקיעת אבנית על הצנרת כאשר הטמפרטורה שלו עולה.

עם זאת, למערכת סגורה ישנם גם חסרונות: היא יקרה יותר, והיא מעט פחות יעילה מבחינה תרמית בהשוואה למערת פתוחה מתוחזקת היטב (בשל הפסדים במחליף החום).

### ג. השפעת זווית הקולטים

הקולטים במערכת סולרית מותקנים כך שיהיו חשופים לקרינת שמש ישירה רבה ככל האפשר. כאשר הקולטים פונים לכיוון דרום, כפי שמומלץ, החשיפה המיטבית לקרינת שמש בחישוב השנתי תהיה כאשר זווית הקולט שווה לקו הרוחב הגיאוגרפי, כלומר זווית של כ-30 מעלות ביחס לאופק. עם זאת, להתקנה בזווית זו יש חיסרון בולט: שטף הקרינה היומי על קולטים בזווית זו נמוך בחורף במידה ניכרת מהשטף המתקבל על קולטים בזווית גבוהה יותר. לכן הזווית המומלצת תהיה כ-45

מעלות ביחס לאופק. בקיץ תפוקת המערכת תהיה אמנם מעט נמוכה יותר, אך בעונה זו כושר החימום של המערכת בדרך כלל עונה על הדרישות בקלות גם כך:

- טמפרטורת האוויר גבוהה יותר, ולכן יש פחות הפסדים מהקולט אל הסביבה
- טמפרטורת המים בכניסה למיכל האגירה גבוהה יותר, ולכן דרושה פחות אנרגיה לחימום המים לטמפרטורת השימוש הרצויה
- קרינת השמש רבה יותר, ויש פחות ימים מעוננים
- טמפרטורת הקירות בבניין גבוהה יותר, ולכן יש פחות הפסדי אנרגיה דרך דפנות הצנרת המובילה ממיכל האגירה אל נקודות השימוש

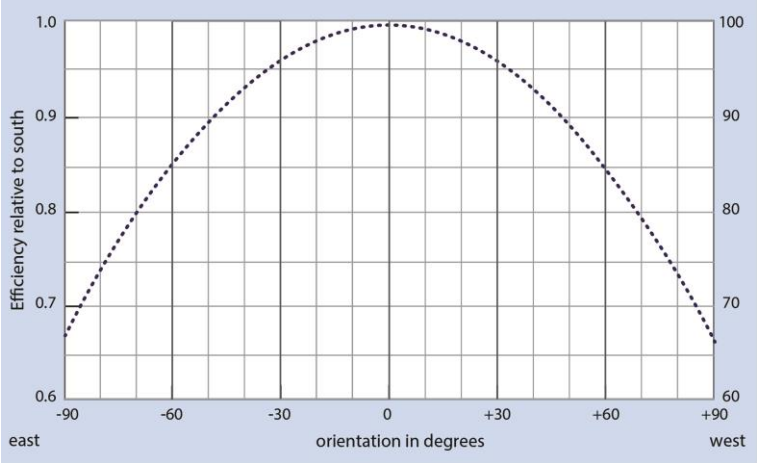
זווית ההתקנה של הקולט משפיעה גם מיקום מיכל האגירה במערכות תרמו-סיפוניות, משום שעל הכניסה למיכל להיות גבוהה מהמוצא של הקולט. מתקינים רבים מעדיפים אפוא להתקין את הקולט בזווית נמוכה יותר, ובכך לאפשר שימוש במסגרת נמוכה יותר למיכל. מומלץ להקפיד על זווית התקנה מיטבית, ולא להיכנע ללחץ של המתקין בנקודה הזו.

### ד. השפעת כיוון הקולטים

הכיוון המיטבי להתקנת הקולטים הוא דרום, משום שקולט משופע המותקן בזווית המיטבית יזכה לחשיפה רבה ביותר לקרינת שמש בחישוב שנתי. עם זאת, לעיתים קרובות הגיאומטריה של הגג אינה מאפשרת התקנה פשוטה בכיוון זה. מהו אפוא ההפסד הכרוך בהתקנה בשיש בה סטייה בכיוון ביחס לדרום?

תרשים יב-1 מדגים את ההפסד היחסי הנובע מהתקנה שאינה בכיוון דרום, עבור קולט הנמצא בשיפוע השווה לקו הרוחב הגיאוגרפי (שהוא בישראל כ-30 מעלות). כפי שהתרשים מראה, סטייה של עד 30 מעלות מזרחה או מערבה מהדרום תביא להפחתה בכושר החימום של פחות מ-5%, בחישוב השנתי הכולל, ואפילו סטייה של 45 מעלות תביא להפחתה קטנה מ-10%. בהתקנה על גגות אורתוגונליים שטוחים, אין סיבה שהסטייה מהדרום תהיה גדולה מ-45 מעלות, ללא תלות בהעמדה של הבניין. בגגות משופעים (גגות רעפים), תכנון לא מתאים של הגג עלול להביא להפסדים של עד שליש מתפוקת החימום השנתית. ככל שזווית הקולט ביחס לאופק גבוהה יותר יש חשיבות רבה יותר לכיוון הקולט.

יש להעיר כאן כי הפגיעה הגדולה ביותר בתפוקת החימום תהיה בחורף, משום שזמינות אנרגית השמש בעונה זו היא גם כך נמוכה יותר. התקנה לא מיטבית עלולה להביא לכך שיהיה שימוש מלא במערכת הגיבוי, כאשר ניתן היה להימנע ממנה לגמרי.




**תרשים יב-1.**

**השפעת ההפניה של קולט שמש על תפוקת החימום השנתית של מערכת לחימום מים (בהנחה שהקולט נמצא בשיפוע ביחס לאופק השווה לקו הרוחב הגיאוגרפי)**

### ה. מיכל אגירה אופקי או אנכי?

מיכל האגירה הוא בדרך כלל בצורת גליל מאורך. ישנם מיכלים להתקנה אנכית או אופקית. התקנה אופקית מועדפת כאשר מבקשים להפחית את הגובה הכולל של המערכת (בעיקר בגגות רעפים), או מטעמים אסתטיים. עם זאת, יש להביא בחשבון כי **ההתקנה האופקית נחותה מבחינה תרמית.** המים במיכל אינם בטמפרטורה אחידה: המים החמים נמצאים בחלקו העליון, שם יש להתקין את צינור היציאה אל הצרכנים, ואילו המים הקרים מסופקים בחלקו התחתון. ככל ששטח המגע בין המים הקרים והחמים קטן יותר – כך חזק יותר השיכוב התרמי (סטרטיפיקציה). במיכל אופקי, יציאה של מים חמים אל הצרכנים תביא לערבוב רב יותר בין המים החמים במיכל לבין המים הקרים הנכנסים, ותביא לירידה בטמפרטורה של המים ליד המוצא. כאשר המיכל אנכי, ניתן לנצל את המים החמים כמעט עד תומם.

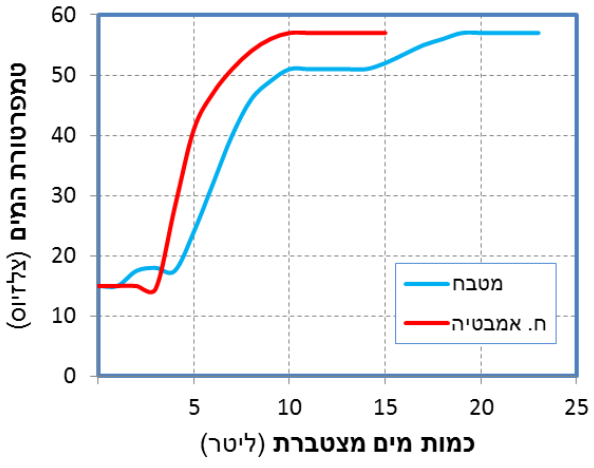
### ו. הפסדי צנרת

התפוקה השימושית של מערכת סולרית לחימום מים תהיה מושפעת במידה רבה מאוד מהפסדי החום הנגרמים במהלך הובלת המים בין הקולט למיכל האגירה ובין מיכל האגירה לנקודות הצריכה. הפסדים אלה אינם נמדדים בעת בחינת מאפייני המערכת במכון התקנים. הם תלויי בתכנון הבניין ובאיכות ההתקנה, ובעיקר באורך הצנרת ובאיכות הבידוד התרמי שלה.

#### אורך הצנרת

ככל שהמרחק בין מיכל האגירה ובין נקודת השימוש גדול יותר, כך גדל נפח המים העומד בצנרת בין שימוש אחד למשנהו. המים החמים העומדים בצינור מאבדים אנרגיה דרך דופן הצינור, במיוחד כאשר הצינור עשוי מתכת אך גם כאשר הצנרת עשויה פלסטיק. לכן, כאשר פותחים את ברז המים החמים מקבלים בדרך כלל מים קרים או פושרים תחילה, ורק אחרי שהמים זורמים מספר שניות מתקבלים מים בטמפרטורת המים במיכל האגירה. בכדי לצמצם את ההפסדים, רצוי למקם את המערכת הסולרית קרוב ככל האפשר לצרכנים העיקריים, ולתכנן את מהלך הצינורות כך שיהיה יעיל ככל האפשר.

כפי שמראה תרשים יב-2, אפילו בבתים חד קומתיים (בבנייה צמודת-קרקע) נפח המים המבוזבז בכל פעם שפותחים את הברז עלול להיות 5 ליטר או יותר, לפי משך הזמן שעבר מאז השימוש הקודם, אורך הצינור וסוג הצנרת. ההפסד הגלום במים הזורמים לריק הוא משולש: ראשית, אובדן המים עצמם. שנית – אובדן האנרגיה אשר הושקעה בחימום המים. ולבסוף – אובדן האנרגיה הגלומה במים עקב שאיבה והובלה במערכת האספקה. אם מקור המים במתקן התפלה, יש להוסיף לכך את תשומות האנרגיה בתהליך ההתפלה.




**תרשים יב-2.**

**טמפרטורת המים שהתקבלה ממערכת סולרית לחימום מים בבית פרטי במדרשת בן-גוריון, מרגע פתיחת הברז.**

### הבידוד התרמי של הצנרת

הצנרת של המערכות הסולריות כוללת שני מרכיבים עיקריים: הצינורות המקשרים בין מיכל האגירה והקולט, והצינורות ממיכל האגירה אל צרכני הקצה בחדרי הרחצה או במטבח.

הצינורות בין מיכל האגירה והקולט הם בדרך כלל קצרים יחסית. עם זאת, הם חשופים לסביבה החיצונית, ולכן קצב איבוד החום דרכם בחורף עלול להיות מהיר מאוד. חשוב במיוחד לבודד היטב את הצינור במוצא הקולט, המוביל מים חמים (משום שקצב איבוד האנרגיה נמצא ביחס ישר להפרש הטמפרטורה בין הצינור לסביבה). גם את הצינור המוביל ממיכל האגירה אל הקולט מומלץ לבודד, משום שהמים היוצאים ממיכל האגירה עשויים להיות חמים יותר מהסביבה, במיוחד בשעות הבוקר.

הצינורות בין מיכל האגירה לבין הצרכנים נמצאים בדרך כלל בקירות הבניין, ולכן הם חשופים להפרשי טמפרטורה קטנים יותר מאשר הצינורות המובילים אל הקולטים. למרות זאת, חשוב לבודד היטב גם את צנרת המים החמים בקירות, משום שהיא עלולה להיות ארוכה מאוד [99].

כאשר בוחרים את הבידוד התרמי לצנרת, יש להקפיד כי סוג הבידוד יתאים לסביבה בה הוא נמצא. ישנם מוצרים הכוללים בידוד תרמי, וישנם גם שרוולי בידוד לצנרת שחסרה מרכיב זה. יש לוודא כי הבידוד המותקן על צינורות החשופים לשמש יהיה בעל קיים ארוך ועמיד לנזקי קרינה, אבק, לחות וטמפרטורה. רצוי כי צידו החיצוני של שרוול הבידוד יהיה מצופה ברדיד מתכת: אף כי הרדיד מאבד במשך הזמן את הברק, הרדיד מגן על חומר הבידוד הפנימי.

## 1.2 סוגי קולטים

הקולטים במערכות סולריות מיועדים לקלוט אחוז גבוה ככל האפשר מקרינת השמש הפוגעת בהם ולהעביר אותו למים הזורמים בהם. את היעילות של הקולט נבטא ביחס בין שני ערכים: כמות האנרגיה הגלומה במים (ואשר מביאה לעליית הטמפרטורה שלהם), חלקי שטף הקרינה הפוגעת. ההבדל בין שני ערכים אלה נובע משני סוגים של הפסדים: החזרה של קרינת שמש מפני הקולט, ואובדן אנרגיה מפני הקולט לאחר שכבר נבלעה בו.

בכדי למזער את החזרת קרינת השמש, מקובל לצבוע את שטח הקליטה של הקולט בצבע שחור בעל מקדם החזרה נמוך במיוחד – כ-5-6%. חלק מקרינת השמש עלול להיות מוחזר ממערכת הקולטים עוד לפני שפגעה במשטח הקולט עצמו: היא מוחזרת מפני הזכוכית המותקנת בכדי להפחית את איבוד החום מפני המשטח הקולט עצמו. בקולטים איכותיים תותקן זכוכית בעלת מקדם בליעה נמוך במיוחד, המיוצרת בתהליך המבטיח כי תכולת הברזל בזכוכית תהיה נמוכה (low-iron glass).

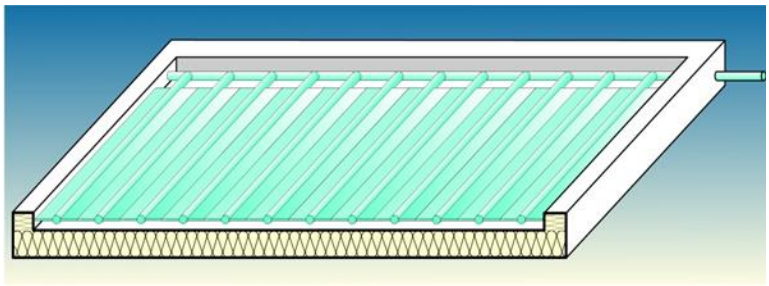
ישנם מספר טיפוסי קולטים, המיועדים לתנאי סביבה שונים. הטיפוסים הנפוצים ביותר בארץ הינם קולטים שטוחים, אולם לעיתים נעשה גם שימוש בקולטי צינורות ואקום (evacuated tube). ישנם גם קולטים המשלבים מראות מרכזות (לדוגמא, בבית החולים הלל יפה), אולם מערכות כאלה מיועדות לאספקת מים בטמפרטורה גבוהה במיוחד, ואינם מתאימים לבנייני מגורים רגילים. ישנם גם קולטים ללא זיגוג, המיועדים בעיקר לחימום מים בבריכות שחייה או לשימושים בחקלאות. גם קולטים אלו אינם מתאימים לבנייני מגורים, משום שהם מספקים מים בטמפרטורה נמוכה מדי.

[99] הערה: על-פי תקן ישראלי ת"י 1205 חלק 1 - 2.7 ,בידוד תרמי, 2.7.3. צנרת מפלסטיק גמיש אשר מותקנת בתוך צינור מתעל בהתקנה סמויה לא תבודד, אלא אם נדרש בידוד בהתאם לתוכנית המתכנן. אף על פי כן – מומלץ בכל זאת לבודד גם צינורות פלסטיק.

### א. קולט שטוח

הקולט הנפוץ ביותר בארץ הינו קולט שטוח, הבנוי בצורת קופסה מלבנית עם כיסוי זכוכית אשר בתוכה מותקן גוף הקולט. הקופסה מבודדת מכל צדדיה, בדרך כלל בפוליאוריתן מוקצף המכוסה רדיד אלומיניום, על מנת להפחית את איבוד החום מצידי הקולט ומהדופן האחורית. הצד הפונה כלפי השמש מבודד באמצעות לוח זכוכית הכולא שכבת אוויר בינו לבין המשטח הקולט.

המשטח הקולט כולל מספר צינורות דקים בקוטר של כ-7-8 מ״מ המותקנים במקביל לאורך הקולט במרחק של כ-10-12 ס״מ זה מזה, צינורות מאספים בעלי קוטר גדול יותר בצידו העליון והתחתון, ומשטח מתכת דק המרותך לצינורות הדקים לכל אורכם.



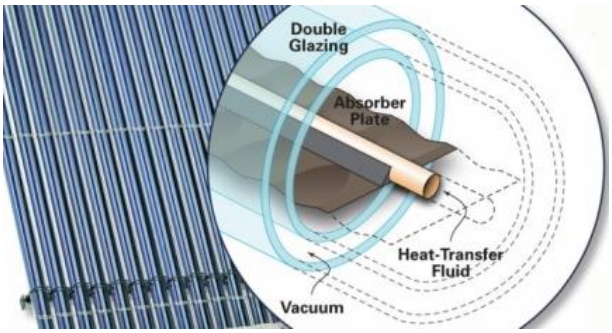
**איור יב-2: חתך סכמתי בקולט שטוח של מערכת סולרית לחימום מים**

היתרון העיקרי של קולט שטוח הוא פשטות הייצור, ובהתאם לכך מחירו הנמוך. הוא מתאים לשימוש בתנאים האופייניים לארץ: קרינת השמש מצויה בשפע, וטמפרטורת הסביבה איננה נמוכה במיוחד, כך שגם קולט בעל יעילות נמוכה עשוי להיות מספק במרבית הזמן.

בקולטים המותקנים בארץ מוצאים זכוכית יחידה. התקנה של זיגוג כפול כדאית רק כאשר האקלים הוא קר ואיבוד האנרגיה ממשטח הקולט החם גדול. זיגוג כפול אמנם מפחית את איבוד החום, אך גם מעביר פחות קרינת שמש מזכוכית בודדת: כ-80% בלבד, בהשוואה ל-90%.

### ב. קולט צינורות ואקום (evacuated tube)

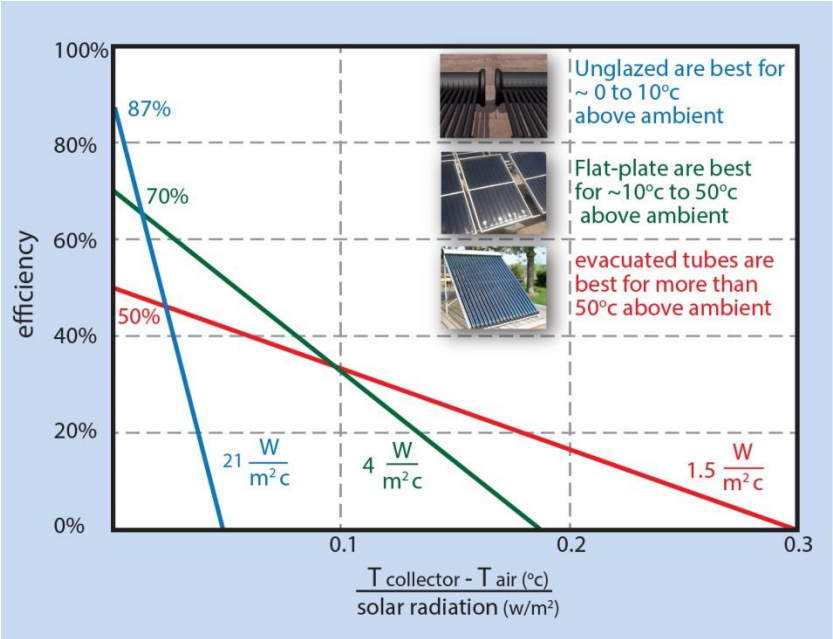
כאשר איבוד החום לסביבה גדול, מומלץ להתקין קולט מטיפוס צינורות ואקום. איור יב-3 מראה קולט מסוג זה. בקולט כזה, הצינור המוביל את הנוזל נמצא במרכז של שני צינורות קונצנטריים אשר ביניהם נמצא ואקום, בדומה לתרמוס. מאחר ואין מגע פיסי בין הצינור שבו נמצא הנוזל לבין שאר הקולט, לכל אורכו, אין איבוד חום בהולכה או בהסעה. חלקו האחורי של הצינור החיצוני משמש כרפלקטור הממקד את קרינת השמש הנכנסת אל הצינור המרכזי.




**איור יב-3. מבנה סכמתי של קולט צינורות ואקום**

**צילום יב-1. קולט צינורות ואקום מותקן על גג רעפים.**

תרשים יב-3 מדגים את הקשר בין תנאי הסביבה לבין היעילות התרמית של סוגי הקולטים השונים. הפרש הטמפרטורה בין הנוזל בקולט לבין הסביבה מודד את פוטנציאל איבוד החום, וקרינת השמש את רווח החום הסולרי. הציר האופקי בתרשים מציין את היחס ביניהם, והציר האנכי – את היעילות של הקולט. ככל שהסביבה קרה יותר, הפרש הטמפרטורה גדל והיעילות של כל הקולטים פוחתת. אולם השיפוע של הקו המייצג את צינורות הואקום הוא הרדוד ביותר – ולכן הוא מתאים לארצות קרות. לחלופין, אם טמפרטורת הסביבה איננה נמוכה או שאין דרישה למים בטמפרטורה גבוהה (למשל – בקולטים המיועדים לחימום מים לבריכות שחייה), ושטף קרינת השמש גבוה – התחום הנראה בצד השמאלי של הגרף – יש יתרון לקולטים הפשוטים, אפילו ללא זיגוג.

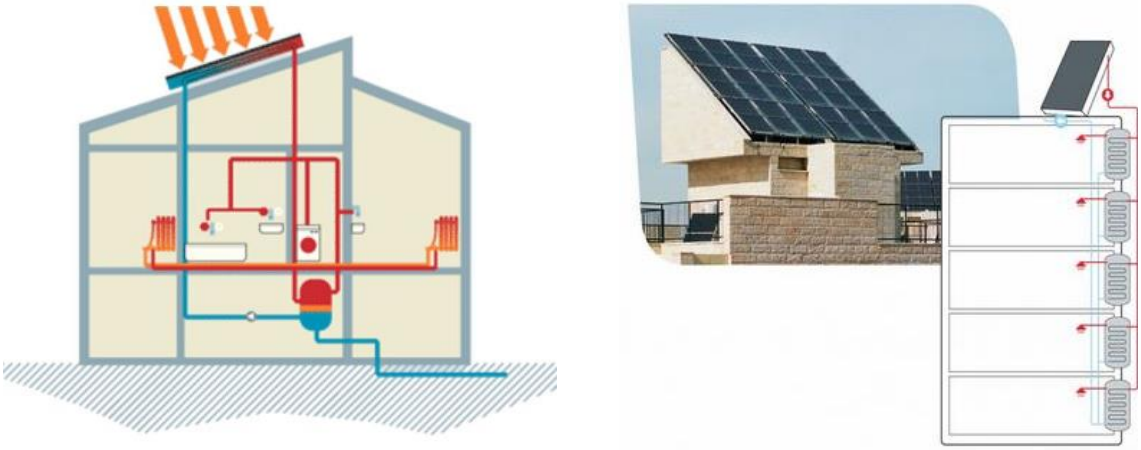



**תרשים יב-3. הקשר בין תנאי הסביבה לבין היעילות התרמית של סוגי הקולטים השונים**

## 1.3 מערכות סולריות משותפות בבניינים גבוהים

בבניין צמוד קרקע או בניין בן 3 עד 4 קומות לכל היותר, ניתן להתקין מערכת סולרית נפרדת לכל דירה, אך ככל שמספר הקומות בבניין עולה, למערכות נפרדות יש חסרונות המקשים או אף מונעים את התקנתן. ראשית, המרחק בין מיכל האגירה על הגג לבין נקודות הצריכה גדל, כך שהפסדי הצנרת נעשים משמעותיים יותר. שנית, נעשה יותר ויותר קשה להסדיר את מיקום הקולטים ומכלי האגירה על הגג כך שלא יטילו צל אחד על השני. הפתרון אשר מיושם בפועל בבתים משותפים גבוהים נותן מענה לשתי הבעיות גם יחד: התקנה של מערכת של קולטים משותפים. בכל אחת

מהדירות מותקן מיכל אגירה עם מחליף חום, אליו מוזרמים מים חמים מהקולטים באמצעות משאבת סחרור חשמלית. מערכת הגיבוי החשמלית מותקנת אף היא במיכל האגירה בכל דירה. איור יב-4 מראה מבנה סכמתי של מערכת כזו בבניין המשותף ואת אופן ביצוע החיבור בדירה אחת.



**איור יב-4. המבנה הסכמתי של מערכת סולרית בבית משותף (ימין); אופן חיבור הצנרת בדירה אופיינית בבית משותף (שמאל).**

מאחר והמרחק בין מיכל האגירה בדירה לבין נקודות הצריכה עשוי להיות קטן מאוד, המים החמים יתקבלו במערכת כזו כמעט מיד עם פתיחת הברז. חיסכון נוסף נובע מהעובדה שאגירת המים נעשית בתוך הדירה או במרפסת שירות, ולא על הגג, ולכן הפסדי החום ממיכל האגירה אל הסביבה קטנים יותר מאשר במיכל אשר עלול להיות חשוף על הגג לרוח ולטמפרטורות נמוכות.

בצד היתרונות של המערכת המשותפת, יש גם חסרונות. ראשית, מדובר במערכת אקטיבית הדורשת תחזוקה. פעולתה תלויה בתקינות לוח הפיקוד ומערכת רגשי הטמפרטורה, האחראית על הפעלת משאבת הסחרור רק כאשר טמפרטורת המים במוצא של הקולטים עולה על טמפרטורת המים במיכל האגירה. שנית, משאבת הסחרור עצמה צורכת אנרגיה, אם כי במידה קטנה בהשוואה לחיסכון המתקבל בחימום המים עצמם.

## 2. חימום מים בחשמל

חימום מים בחשמל הוא אמצעי החימום הנפוץ ביותר בארץ: הוא נעשה כמעט בכל הדירות במדינה, בין אם כגיבוי למערכת הסולרית ובין כאמצעי חימום בלעדי. חימום המים יכול להתבצע בתוך מיכל האגירה[100] או באופן ישיר, כאשר גוף החימום מחמם את המים המשמשים לצריכה באותו רגע. לכל אחת מהשיטות יתרונות בצד חסרונות.

> הערה: בפסקה זו הדיון יתמקד רק במערכות אשר בהן החימום נעשה באמצעות סליל התנגדות, אשר בו נגרמת עלייה בטמפרטורה עקב התנגדות החומר המוליך למעבר חשמל. דיון במשאבות חום, אשר גם הן פועלות בעזרת חשמל, ייעשה בפסקה נפרדת, בשל מורכבות הנושא וחשיבותו.

[100] לפי ת"י 69, מתקן לחימום מים הכולל מיכל וגוף חימום מכונה 'מחמם מים חשמלי'. בפרק זה, נעשית אבחנה בין המיכל לבין גוף החימום, ולכן המינוח אינו תואם את הרשום בתקן.

## 2.1 חימום בחשמל עם מיכל אגירה

חימום המים במיכל האגירה יכול להתבצע באמצעות גוף חימום בעל הספק של כ-2-3 קילוואט. משך החימום תלוי בקיבול של מיכל האגירה, בטמפרטורת המים בכניסה למיכל ובטמפרטורה אליה מחממים את המים. למיכל האגירה מספר יתרונות:

- המערכת פשוטה וזולה
- מערכת אחת יכולה לשמש את כל הצרכנים בדירה, לרבות מספר צרכנים במקביל
- ניתן לבקר את פעולת גוף החימום בעזרת שעון שבת, כך שהחימום ייעשה בשעות שבהן הביקוש במערכת ההולכה הארצית נמוך, ולא בהכרח בסמוך לזמן השימוש

בצד היתרונות, לחימום מים במיכל אגירה ישנם גם מספר חסרונות:

- חלק מהאנרגיה המושקעת במים אובדת בהולכה דרך מעטפת מיכל האגירה בין מועד החימום למועד הצריכה
- חלק מהאנרגיה המושקעת בחימום המים אובדת בהולכה דרך דפנות הצנרת בין המיכל לצרכנים
- מיכל האגירה תופס נפח ניכר בדירה אשר עשוי היה לשרת למטרות אחרות

כאשר משתמשים במערכת הגיבוי במיכל המשרת גם את המערכת הסולרית, כפי שמקובל במרבית הבנייה הנמוכה בישראל, ההפסדים דרך דופן המיכל ולאורך הצנרת עלולים להיות משמעותיים ביותר.

לשימוש במערכת הגיבוי החשמלית במערכת הסולרית ישנו חיסרון נוסף: כאשר מופעל גוף החימום בדוד וטמפרטורת המים במיכל עולה על טמפרטורת המים במוצא הקולט, נפסקת התנועה התרמו-סיפונית בין הקולט למיכל האגירה. לכן, הפעלה של מערכת הגיבוי בשעות הבוקר מונעת למעשה מימוש של פוטנציאל החימום הסולרי אשר עשוי היה להתקבל בהמשך היום (אלא אם נעשה שימוש מיידי במים החמים).

## 2.2 חימום במחמם מיידי ללא מיכל אגירה

מחממי המים המיידיים מיועדים לתת מענה על החסרונות העיקריים של המערכות עם מיכל האגירה. במחמם מיידי, הממוקם בדרך כלל סמוך לברז, מותקן גוף חימום בעל הספק חשמלי גבוה מאוד, וחימום המים נעשה רק במקביל צריכה. במערכת כזו, אין למעשה הפסדים, לא דרך מעטפת המחמם ולא דרך הצנרת, ומאחר ונפח גוף החימום קטן, ישנו חיסכון משמעותי במקום. עם זאת, למחממי המים המיידיים ישנם גם מספר חסרונות משמעותיים:

- צריכת החשמל נעשית ברגע השימוש, ולא ניתן לתכנת את המערכת כך שהוא ייעשה בשעות שפל.
- ספיקת המים החמים נמוכה יחסית, ואיננה מתאימה למספר צרכנים. לכן יש להתקין יחידת חימום סמוך לכל צרכן מים חמים.
- ההספק החשמלי של המערכת גבוה: מתקן המתאים לחימום מי רחצה בכיור הוא בעל הספק מזערי של כ-4 קילוואט, ומתקן המתאים למקלחת דורש כ-10-25 קילוואט! הספק חשמלי כזה דורש תשתית מתאימה בחיווט ובלוח החשמל בדירה, שחייב להיות תלת-פאזי.

השוואה בין שתי השיטות מובילה למסקנה כי המחמם המיידי מתאים לשימוש של צרכן בודד לפרקי זמן קצרים כגון רחצת ידיים), בעוד מערכת הכוללת מיכל אגירה עשויה לשרת מספר צרכנים, במיוחד כאשר משך השימוש ארוך יחסית ונפח המים הדרוש גדול (כגון מקלחת).

# 3. חימום מים במשאבת חום

השימוש הנפוץ בארץ למשאבות חום הוא במתקני מיזוג אוויר, בעיקר לצינון אך גם לחימום של האוויר בבניין (ראו פרק ט' במדריך). מתקן דומה עשוי לשמש גם לחימום מים: הנוזל הנמצא במשאבה סופח אנרגיה מהאוויר ומנצל אותה לחימום מים. המתקן מורכב ממדחס, מעבה, מאייד וצנרת. נוזל קירור עובר בצינור מאייד החשוף לאוויר. הנוזל קר מן האוויר ולכן סופח אליו את החום. זהו תהליך" שאיבת החום)". הנוזל מתחמם ומתאדה, כלומר הופך לגז, ואז עובד דרך מדחס. פעולת הדחיסה מחממת עוד את הגז בתוך מעבה. הגז הדחוס והחם מנוצל לחימום מים. תוך כדי חימום המים הגז מתקרר שוב והופך לנוזל. הנוזל המקורר עובר דרך שסתום הפחתת לחץ, וכתוצאה מכך מתאדה בתהליך הכרוך בירידת טמפרטורה ניכרת, כך שהתהליך יכול להתחיל מחדש.

במשאבת חום האנרגיה החשמלית משמשת רק להפעלת המדחס: היא אינה מושקעת ישירות בחימום המים. אנרגיית החום המתקבלת במים רבה מאנרגיית החשמל המושקעת בו, ולכן שיטת חימום זו יעילה הרבה יותר מחימום מים באמצעות גוף חימום המתחמם כתוצאה מהתנגדות חשמלית. מקדם הפעולה (COP - coefficient of performance) של משאבת חום הוא גדול מאחד, ועשוי להגיע לערכים של 3.0 או יותר, כתלות בטמפרטורת הסביבה. היעילות של משאבת החום פוחתת ככל שטמפרטורת האוויר יורדת, אך גם בתנאי האקלים השוררים בישראל בחורף, היא תהיה יעילה בהרבה בהשוואה למערכות חשמליות רגילות לחימום מים.

## 3.1 שילוב חימום מים במערכת למיזוג אוויר

חימום המים במשאבת חום אפשרי בחורף, אך יעיל במיוחד בקיץ, כאשר הוא נעשה במקביל לפעולת המזגן לצינון הדירה. במערכת מיזוג אוויר רגילה, המעבה מותקן על הגג או במרפסת השירות, ופולט את החום העודף מהדירה אל אוויר הסביבה בעזרת מפוח. במערכת מיזוג אוויר העושה שימוש בחום השיורי לחימום מים, מותקן על המעבה מחליף חום אשר בו עוברים מים אשר בולעים את האנרגיה הנפלטת מהדירה.

יעילות העבודה של משאבת החום במצב צינון פוחתת ככל שטמפרטורת הסביבה עולה, ולכן יש יתרון למערכת הפולטת את עודף החום אל תווך קריר יחסית. המים המסופקים מהרשת בקיץ הם בטמפרטורה של כ-25 מעלות, טמפרטורה נמוכה במידה ניכרת מטמפרטורת האוויר ברוב שעות היממה. פעולתה של משאבת חום עם מעבה מים עשויה להיות יעילה יותר, ולהביא לחיסכון בשיעור של עד 30% בהשוואה לצריכת החשמל של מזגן מפוצל 'רגיל' בהספק קירור דומה.

את המים החמים המתקבלים במעבה של יחידת המיזוג נעביר במחליף חום הנמצא במיכל המים בדירה, באותו אופן שבו מעבירים את האנרגיה במים החמים המתקבלים מהמערכת הסולרית. מאחר וחימום המים מתקבל כתוצר לוואי של המיזוג בתנאים האלה, מתקבל חיסכון כפול: לא רק הפחתה בעלויות המיזוג, אלא גם יתור הצורך בחשמל לחימום מים בדודים רגילים.

## 3.2 התקנת המערכות

משאבות חום עם מעבה מים אפשר למקם על גג הבניין או במרתף. אפשר גם למקם משאבת חום בכל דירה, בסמוך למנועי המזגנים, אם כי התקנה זו יקרה יותר. משאבות חום מצריכות שטח קטן ביותר יחסית לקולטי שמש. למשל: עבור מערכת חימום מים מרכזית לבניין של 60 דירות יש צורך בשטח של 20 מ"ר להצבת שתי משאבות חום תעשייתיות, מיכל אגירה, משאבות מים ומחליף חום. לעומת זאת, לאותו מספר של דירות נדרש שטח של כ-300 מ"ר לקולטי שמש.

**א. מגדלי מגורים**

במגדלי מגורים, חימום מים במשאבות חום יכול להעשות כגיבוי למערכת סולרית בקומות העליונות, וכתחליף למערכות מבוססות גז, סולר או חשמל בשאר הדירות. התצורה המתאימה

למגדלים היא מערכת מרכזית, שתחמם מים שיוזרמו למאגר אחד וממנו לדירות. לכל דירה יהיה מונה מים חמים, אשר יאפשר חיוב אנרגיה בהתאם לצריכה.

**ב. בתים פרטיים**

בבתים פרטיים, משאבת חום הכוללת מעבה מים תותקן כתחליף למערכת מיזוג אוויר מפוצלת ('מיני-מרכזית'), ותספק מיזוג אוויר בקיץ ומים חמים כל השנה. את המים החמים אפשר לייעד לשימוש ביתי רגיל, כגון רחצה, אך חלק מהתפוקה יכול להיות מיועד לחימום הדירה: את המים החמים אפשר לסחרר במערכת תת-רצפתית או ברדיאטורים, כתחליף למים חמים המתקבלים משריפת גז או סולר.

## 4. חימום מים בגז

חימום מים בגז אינו נפוץ מאוד בארץ, למעט בבניינים אשר בהם נעשה שימוש במערכת להסקה מרכזית או דירתית מבוססת גז. בדומה לשימוש בחשמל, ניתן לחמם מים לצריכה מיידית, או לאגירה במיכל המיועד לדירה או לבניין (במערכת מרכזית).

### 4.1 חימום מים מיידי

במחמם מים מיידי בגז, חיישן מזהה את פתיחת ברז המים החמים ומפעיל מצת חשמלי המדליק להבה במבערים. מעל למבערים אלה עובר צינור נחושת אשר מעביר מים חמים לברזים. הנחושת מתחממת במהירות ואספקת המים חמים היא כמעט מיידית, ותימשך כל עוד ברז המים פתוח. הגז מסופק בדרך כלל ממערכת מרכזית עם אוגר גדול, על מנת להבטיח את סדירות האספקה.

יתרונות המערכת:

- בדומה למחמם החשמל המיידי, קבלת המים החמים היא כמעט מיידית, ואין צורך לתכנן את זמן הרחצה.
- אין הגבלה על כמות המים החמים: כל עוד לא נפסקה אספקת הגז, ניתן לקבל מים חמים.
- התשלום עבור המים החמים נעשה לפי הצריכה בפועל – מבער הגז אינו פועל כאשר המים אינם זורמים.

חסרונות:

- בעירת הגז עלולה להיות מלווה בריח
- חשוב שהמבער יצויד בארובה או ימצא בחלל מאוורר (בדומה לתנורי חימום בגז), בכדי להימנע מעלייה בריכוז גז CO, שהוא רעיל.
- המערכת יקרה יותר ממחמם חשמלי ודורשת אחזקה שוטפת להבטחת תקינותה ומניעת דליפות.

### 4.2 חימום במחמם גז מרכזי עם מיכל לאגירת מים

חימום מים במערכת עם מיכל אגירה נעשה, כאמור, בעיקר בדירות אשר בהן נעשה החימום של הדירה בחורף באמצעות הסקה מבוססת גז. במערכות אלה, המבער מחמם את המים המשמשים להסקה, והמים החמים מסופקים גם למיכל אגירת מים עם מחליף חום (בדומה למערכת סולרית מרכזית).

## 5. שיקולים בבחירת המערכת המתאימה

ההחלטה בשאלה איזו מערכת לחימום מים כדאי להתקין תלויה במספר גורמים:

- ✓ עלות רכישה והתקנה
- ✓ עלות ההון
- ✓ עלות תחזוקה
- ✓ צריכת אנרגיה
- ✓ עלות האנרגיה
- ✓ פליטות גזי חממה

חלקם של הגורמים הוא כלכלי, אך התחשיב איננו פשוט משום שיש להביא בחשבון התפתחויות עתידיות, הן בשוק האנרגיה והן בשוק ההון. לכן, למרות שעלות הרכישה וההתקנה של המערכות ברגע נתון ידועה, קשה לאמוד את העלות הכוללת במחזור החיים. די בכך שהמחיר של אנרגיה ממקורות שונים ישתנה במהלך השנים, בתגובה לזעזועים כלכליים או פוליטיים בארץ או בעולם, בכדי לשנות את תוצאות הניתוח. הסברים על הכלים המיועדים לסייע בביצוע התחשיב ניתן למצוא בפרק ט"ו של המדריך.

יש להביא בחשבון גם כי לגורמים שונים עלולים להיות שיקולים שונים אשר ינחו אותם בקבלת ההחלטה: היזם, הקבלן, הדייר, חברות האנרגיה והממשלה – לכולם עלולים להיות שיקולים אחרים.

נציין כאן רק אחדים מהשיקולים שאינם כלכליים, כפי שהוצגו בנייר עמדה אשר הוגש לכנסת [101]:

- לקולטים סולריים יש יתרון על משאבות חום מבחינת חיסכון כולל בחשמל. עם זאת, משאבות חום הן חסכוניות מאוד בהשוואה לחימום באמצעות חשמל;
- מערכות משאבות חום עדיפות על קולטי שמש מבחינת ניצול השטח ומבחינת חיסכון בחשמל בעת שיאי הביקוש של עונת החורף;
- במערכות מרכזיות אפשר לשלב בין מערכת סולרית למשאבות חום, והן ישמשו כגיבוי;
- היעילות של שילוב בין מערכת סולרית למשאבות חום גדלה במערכות מרוכזות, כלומר מערכות שמזרימות את כל המים החמים למאגר אחד שממנו מחולקים המים לדירות. מערכות כאלה מחייבות הצבת מונה מים חמים בכל דירה. צורה זו של אספקת מים חמים מתאימה למגדלי מגורים, שבהם נהוג להשתמש בשירותיה של חברת ניהול, המטפלת במגוון ההיבטים של תפעול הבניין;
- התקנת מערכות יעילות לחימום מים כדאית לבעלי הדירות, אך אינה בהכרח כדאית ליזמים הבונים את הדירות. היזם ישתדל תמיד לצמצם את עלויות הבניה, בין השאר כדי להציג מחיר מושך ללקוח. יש להביא נתון זה בחשבון באסדרה של חובת התקנת מערכות חימום מים בבניינים;

[101] רונן, 2012

## 6. אנרגיה גלומה במים

פרק זה אמנם עסק במערכות לחימום מים במגזר הביתי, אולם מאחר ואחדות מהשיטות גורמות לבזבוז מים, כאשר עובר זמן מפתיחת ברז המים החמים ועד לקבלת מים בטמפרטורה הרצויה, ראוי לסקור בקצרה גם את האנרגיה הגלומה במים עצמם, עוד לפני השקעה אנרגיה בחימום.

טבלה יב-1 להלן מדגימה תשומות אנרגיה אופייניות לשלבים שונים במערכת אספקת המים, החל מהשאיבה, דרך טיפול באיכותם (לרבות התפלה), וכלה בטיפול בשפכים.

**טבלה יב-1. תשומות אנרגיה במערכות לטיפול במים**

| תהליך | **צריכת אנרגיה** (קוט"ש למ"ק) | |
|---|---|---|
| | מינימום | מקסימום |
| **הובלה למרכזים עירוניים** | | |
| הובלה מהמקור אל הצרכן | | 2.43 |
| שאיבה מבארות | 0.38 | 0.60 |
| התפלת מי ים | 3.57 | 3.89 |
| התפלת מים מליחים | | 1.38 |
| **טיפול במערכת העירונית** | | |
| טיפול במים | 0.03 | 0.06 |
| חלוקה עירונית | 0.14 | 0.76 |
| **מערכת שפכים** | | |
| מערכת פעילה | 0.28 | 0.61 |
| טיהור מתקדם עם ניטריפיקציה | 0.42 | 0.79 |

השאיבה והטיפול במים מהווים כמעט 6 אחוזים מצריכת האנרגיה הכוללת במדינת ישראל – וחשוב לחסוך בהם, גם ללא קשר לזמינות משאב המים!



## מקורות

[1] משרד הבינוי והשיכון (2014). מידע סטטיסטי.
http://www.moch.gov.il/meyda_statisti/heitsa_shuk_hadiyur/Pages/hathalot_beniyya.aspx#GovXParagraphTitle5

[2] רונן, י. (2012 א'). אפשרות התקנת דודי שמש בבניינים רבי קומות, וצריכת אנרגיה לחימום מים במגזר התעשייתי. מרכז המחקר והמידע, הכנסת.

[3] רונן, י. (2012 ב'). אפשרות התקנת משאבות חום לחימום מים בבתי מגורים. מרכז המחקר והמידע, הכנסת.

## פרק יג:

# מערכות פוטו-וולטאיות

מאת אורי דומן

# פרק יג: מערכות פוטו-וולטאיות

*ויאמר אלוהים יהי אור ויהי אור : וירא אלוהים את האור כי טוב ויבדל בין האור ובין החושך*
*(בראשית פרק א' פסוקים ג, ד')*

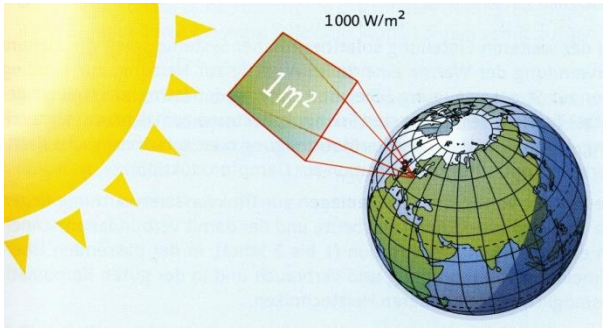
מכל מקורות האנרגיה הבלתי מתכלים, הפוטנציאל הגדול ביותר ליישום בקנה מידה של הבניין נמצא בהמרה של אנרגית שמש לאנרגיה חשמלית באמצעות מערכות פוטו-וולטאיות. אספקת חשמל מתאים פוטו-וולטאים אינה טכנולוגיה חדשה, ומערכות פוטו-וולטאיות הותקנו בהצלחה בלוויינים וחלליות כבר לפני עשרות שנים. השיפורים הטכנולוגיים אשר הביאו לעלייה בתפוקה של התאים מצד אחד, והירידה בעלויות כתוצאה ממעבר לייצור המוני, הפכו את המערכות הפוטו-וולטאיות למתקנים אשר ראוי לשקול את התקנתם בכל בניין. בישראל, שבה אקלים שטוף שמש, הפוטנציאל של מערכות כאלה גדול יותר מאשר במרבית ארצות העולם. פרק זה יעסוק במערכות פוטו-וולטאיות המיועדות למגזר הביתי.

## 1. השמש כמקור אנרגיה

צריכת האנרגיה המצרפית העולמית על פי נתוני 2010 הינה כ- 20,000 מיליארד קוט"ש[102]. בתהליך ההמרה התרמו-גרעיני שבו מומר המרכיב העיקרי של השמש – מימן להליום (על פי משוואת איינשטיין $E=MC^2$ ) מייצרת השמש אנרגיה בסדר גודל של פי 15,000 מצריכת האנרגיה המצרפית העולמית - $230 \times 10^{15}$ קוט"ש[103].

הטמפרטורה על פני השמש – תוצאה של הליך ההמרה התרמו-גרעיני הינה כ- 5,780 קלווין ובשעה אחת מקרינה השמש כמות אנרגיה המספקת את כל צורכי האנושות בשנה שלמה[104]. חלק מאנרגיית השמש המוקרנת לחלל, לכל הכיוונים, מגיע לכדור הארץ. אנרגיה זו חודרת לאטמוספירה ומתחלקת לשלושה רכיבים: רכיב הקרינה הישירה, רכיב הקרינה המפוזרת ורכיב הקרינה המוחזרת. כל שלושת המרכיבים יחד מהווים את הקרינה העולמית הכוללת (The global radiation).

במונחים של אנרגיה סגולית, בישראל, כמות האנרגיה המוקרנת על ידי השמש הינה בסדר גודל של 2,000 קוט"ש/מ"ר/שנה או הספק סגולי של 1,000 ואט/מ"ר.




**איור יג-1:**

**שטף קרינת השמש על פני הקרקע בישראל בצהרי יום בהיר בקיץ**

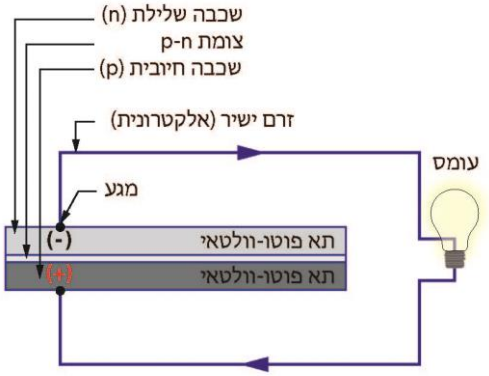
[102] Antony et al, 2009
[103] דומן, 2004
[104] Ngo, 2010

בניגוד למקורות האנרגיה המתכלים שחלקם (נוזליים – נפט) אמורים להיכלות תוך 30–40 שנה וחלק מוצקים (פחם) אמורים להיכלות תוך 200–300 שנה – אנרגיית השמש תישאר אתנו עוד מספר מיליארדי שנים. השמש בהיבט זמינות והספק הינה מקור אנרגיה אינסופי [105].

## 2. עקרונות הטכנולוגיה הפוטו-וולטאית

### 2.1 מבנה התא הבסיסי

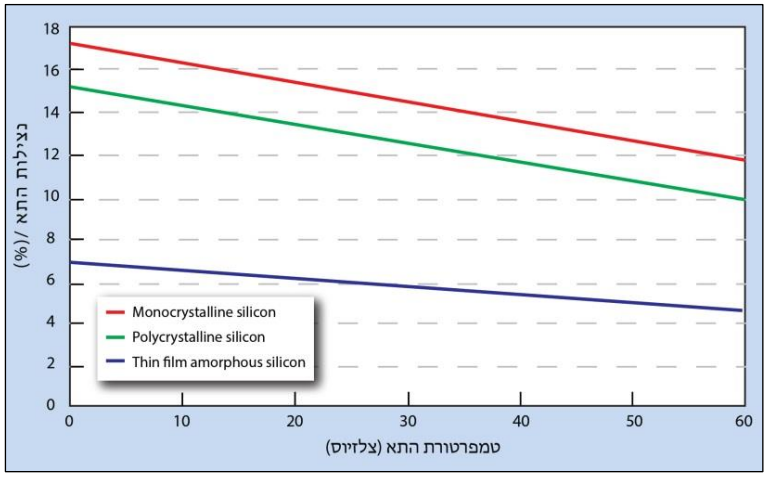
תאים פוטו-וולטאים בנויים משכבה אחת או שתיים של חומר חצי מוליך, בדרך כלל סיליקון, כצומת PN. בזמן הקרנת אור נוצר הפרש פוטנציאלים של < 1 וולט, בזרם ישר – DC עד 3 אמפר ובהספק 1-3 ואט. ליצירת אנרגיה חשמלית אין נדרשת קרינת שמש ישירה וקרינה מפוזרת תספיק ליצירת האנרגיה, אם כי קרינה בעוצמה גבוהה יותר תעלה את יעילות התא.




**איור יג-2:**

**מבנה בסיסי של תא פוטו-וולטאי**

סדר גודל הנצילות התיאורטית של תא פוטו-וולטאי (100 סמ״ר) היא 30%–35% ופה טמון גם אחד הגורמים המעכבים את יישום הטכנולוגיה בקנה מידה כלכלי (לא מסובסד!) כפי שיובהר בהמשך. יעילות/ניצולת התאים יורדת עם עליית הטמפרטורה התלויה בפיזור החום הנוצר בתהליך הפיכת האור לאנרגיה חשמלית וטמפרטורת הסביבה. טמפרטורת הייחוס למדידות הספק התא הפוטו-וולטאי היא $25^0C$, בתנאי קרינה של 1,000 ואט/מ״ר ומדד המאפיין את ההתפלגות הספקטרלית של אור השמש Air Mass Factor =1.5 (תנאי ייחוס אלו מכונים Standard Test Conditions - STC).




**תרשים יג-1:**

**יעילות התא הפוטו-וולטאי כתלות בטמפרטורה [106]**

ליצירת הספקים גבוהים יותר בהשוואה להספק התא הבסיסי, מחוברים התאים בטור, בדרך כלל 36 או 72 (אם כי ערכים אחרים גם מיושמים) לתת - מערכת בסיסי – המודול (Module).המודולים

[105] Messenger and Ventre, 2004

[106] Rawlings, 2009

מחוברים במקביל על פי ההספק הנדרש לתת - מערכת (Array) או תת מערכות (Arrays) המהווה את המערך הפוטו-וולטאי הכולל – הגנרטור הפוטו-וולטאי [107].

פרמטר חשוב לניצולת מרבית לתפוקת התא הינו ה- – Maximum Power Point (Tracking) MPP(T). המדד מבוטא בעקום הזרם–מתח ורמת הארת התא והביטוי המתמטי של ערך ה- MPP(T) הוא:

$$P_{max} = I_m V_m = FF\ I_{sc}\ V_{oc}$$

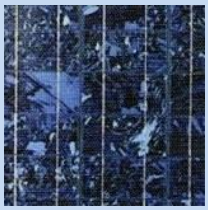
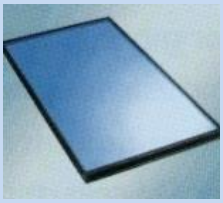
כאשר $P_{max}$ = ההספק המכסימלי, $I_m$ = הזרם במצב של הספק מרבי, $V_m$ = המתח במצב של הספק מרבי, FF =מקדם המילוי (ערך המבטא את איכות התא ונע בין 0.5 ל-0.83), $I_{sc}$ = זרם הקצר של התא, $V_{oc}$ = מתח הריקם של התא ([5] Messenger, Ventre,2004).

תפוקת התא הפוטו-וולטאי אינה יציבה ויורדת עם הזמן – תוצאה של הצטברות גורמים חשמליים ומכניים [108].

- **גורמים חשמליים**: קיימת לינאריות בין ירידת התפוקה ועוצמת הקרינה , כאשר מקסימום ירידת תפוקת התא (Cell degradation) נמצאה בתחום של 800 – 1100 ננומטר אורך גל.
- **גורמים מכניים**: אובדן התכונות הפיזיקליות של מעטפת הגנת התא (שקיפות, הטרחה טרמית וכיו"ב). הערכים הממוצעים המקובלים לירידת התפוקה הינם 0.7%-1% לשנה, אולם ערכים נמוכים או גבוהים יותר נמדדו כפועל יוצא של איכויות התאים, מקום ותנאי ההתקנה וכיו"ב. המשמעות היא שעל פני מחזור חיים של מיזם פוטו-וולטאי (כ- 20 שנה) תפוקת התא יורדת ב-20% בממוצע, נתון שיש להתחשב בו בחישוב התוצאה הכוללת.

טבלה יג-1 מציגה את תכונותיהם של מספר סוגי תאים פוטו-וולטאיים:

**טבלה יג-1: תכונות של תאים פוטו-וולטאים בשימוש נפוץ [109]**

| תכונה | סוג תא PV | | |
|---|---|---|---|
| | תאי סיליקון חד-גבישיים | תאי סיליקון רב גבישיים | תאי סיליקון דק שכבתיים |
| מראה | |  |  |
| נצילות תא בתנאים תקניים | 15-17% | 14-15% | 8-12% |
| נצילות מודול בתנאים תקניים | 13-15% | 12-14% | 5-7% |
| שטח נדרש לקוט"ש (שיא) | 7 $m^2$ | 8 $m^2$ | 16 $m^2$ |
| יתרונות וחסרונות | היעיל ביותר, אך בעלויות הגבוהות ביותר. | זול יותר מתאי סיליקון חד- גבישיים, אך מעט פחות יעיל. | זול בצורה משמעותית אך יעילותו חצי מיעילות תאי הסיליקון החד-גבישיים.<br>מתאים ביותר לשילוב באלמנטים של בנייה. |

[107] Rawlings and Roper, 2000
[108] Osterwald et al, 2002
[109] Rawlings, 2009

התאים הנפוצים ביותר הם תאי סיליקון חד-גבישיים, תאי סיליקון רב גבישיים ותאי סיליקון דק שכבתיים (amorphous silicon). התאים הפחות נפוצים הם תאי גליום ארסנייד (gallium arsenide) - תאים רב שכבתיים נסיוניים המאופיינים בנצילות התא הגבוהה ביותר 3-25%; תאי נחושת אינדיום (תאים דק-שכבתיים המאופיינים בנצילות תא של כ- 18% אך נצילות מודול נמוכה יחסית 10%-12%); ותאי קדמיום טלורייד (cadmium-telluride) - תאים דק-שכבתיים בעלי נצילות תא של כ- 17% ונצילות מודול נמוכה יחסית 10%-%.

## 2.2 פיתוחים עתידיים בתחום התא הבסיסי [110]

העלאה משמעותית בנצילות התאים במקביל לירידה בעלותם הינה תולדה של: פיתוחים ופריצות דרך במיוחד בתאים הדק-שכבתיים, הגדלת נפחי הייצור ובמקביל הקטנת העלויות (Economies of Scale), ופיתוחים נוספים בתחום התאים הדק-שכבתיים מבוססי סיליקון.

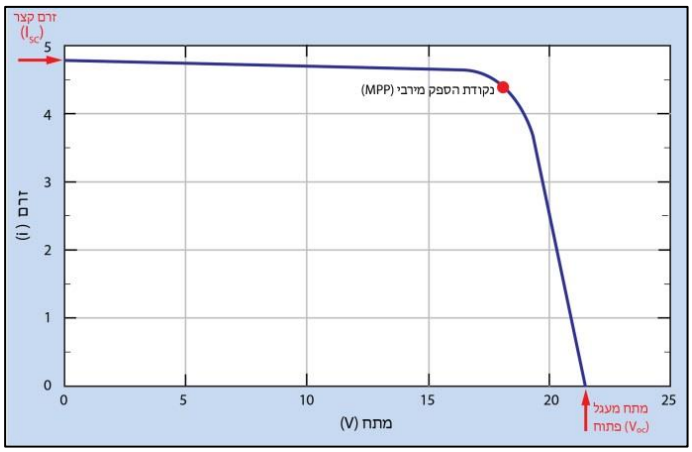
## 2.3 המודול (module) – תת המערכת הבסיסי, תת המערכת (array)

כאמור בסעיף 2.1 לעיל, במרבית היישומים, התאים מחוברים בטור – המודול, במכפלות של 12 וולט, דבר המאפשר קבלת מתחים גבוהים ושימושיים יותר. התאים הבודדים, מותקנים בתוך מסגרת מתכתית משותפת הכוללת מרכיבי הגנה ואטימה שונים המבטיחה (בתנאי ביצוע נאותים ותיקנים) אורך חיי מערכת של לפחות 25 שנה. ביצועי המודול נמדדים בתנאי STC (ראה סעיף 2.1 לעיל) על בסיס עקומות זרם-מתח ו- MPP(T) כשהמטרה – יצירת הספק חשמלי מרבי (איור יג-5).

המשוואה הבאה מתארת את הקשרים המחברים בין הזרמים בתא ( A ), לבין מתח התא ( V ) כתלות מרמת הקרינה המבוטאת ב- W/m2 ומציאת הערך האידיאלי לביצועי התא.

$$I = I_{\ell} - I_o\left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1\right)$$

כאשר $I$ הוא הזרם בתא, $I_l$ הוא הרכיב הפוטוני של הזרם בתא, $q = 1.6X10^{-19}$ [בקולון], $k = 1.38\ X10^{-23}$ j/K , T טמפרטורת התא [קלווין] (ראו גם תרשים יג-1).




**תרשים יג-2:**

**ערך ה- MPPT(T) כתלות מעקומת מתח ריקם וזרם קצר [111]**

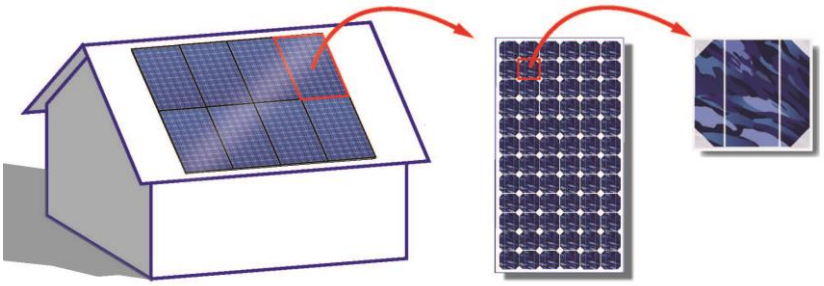
המודולים משווקים בתצורות חשמליות (בדרך כלל הספקים שבין 80 ואט – 300 ואט) ומכניות (מידות) גמישות המאפשרות יישומים בהתאם לתנאי המבנה – שטח זמין, אפשרויות ומגבלות התקנה, שיפועי הגגות וכיו"ב [112, 113].

---

[110] Antony et al, 2000

[111] Rawlings and Roper, 2000

תצורות גימור אופייניות כוללות מודולים ממוסגרים, מודולים פתוחים ואריחים (בעיקר לשילוב בחזיתות המבנה). בנוסף, ניתן לקבל את המודלים כשקופים, חצי שקופים או אטומים – על פי היישומים הנדרשים.



**איור יג-3: מהתא הבודד למערכת הפוטו-וולטאית המשולבת בגג [12].**

הספק המערכת ניתן להגדלה והרחבה בחיבור טורי או מקבילי. בחיבור מספר מודולים (טורי או מקבילי) מתקבלת תת המערכת – ה-Array, כאשר "הענף" הטורי מכונה String.

האנרגיה השנתית הכוללת (קוט"ש) המיוצרת על ידי מערכת פוטו-וולטאית היא:

$$Q_{pv} = I\ K_e\ (I - K_s)\ A$$

כאשר $Q_{pv}$ = האנרגיה השנתית הכוללת [קוט"ש], I = עוצמת הקרינה השנתית על פני המודול או תת המערכת Array (קוט"ש/מ"ר), Ke =נצילות המודול (ראו טבלה 1) ב-%, Ks = הפסדי המערכת ב-% , A שטח המערכת הפוטו-וולטאית [מ"ר, נטו].

אחת המטרות העיקריות ביישום טכנולוגיה פוטו-וולטאית הינה הקטנת כמות גזי החממה, בעיקר דו-תחמוצת הפחמן ($CO_2$) וגם ותחמוצת החנקן ($NO_X$).

כמות דו-תחמוצת הפחמן הנמנעת/מוקטנת – תוצאה של יישום טכנולוגיה פוטו-וולטאית מחושבת לפי הנוסחה הבאה [114]:

$$C_{pv} = Q_{pv}\ C_d$$

כאשר $C_{pv}$ היא הכמות הכוללת של דו תחמוצת הפחמן הנמנעת/מוקטנת [ק"ג], $Q_{pv}$ היא האנרגיה השנתית הכוללת המיוצרת על ידי המערכת [קוט"ש], ו- Cd [ק"ג / קוט"ש] או הכמות שוות הערך הנמנעת/מוקטנת בהשוואה לקוט"ש המיוצר על ידי חברת החשמל/הרשת הארצית.

0.3 טון $CO_2$ הינו ערך מקורב של כמות דו-תחמוצת הפחמן הנמנעת/מוקטנת על ידי מערכת פוטו-וולטאית המחושבת על בסיס 1 קילו-ואט הספק שיא [115].

## 2.4 הממיר ורכיבי ההגנה

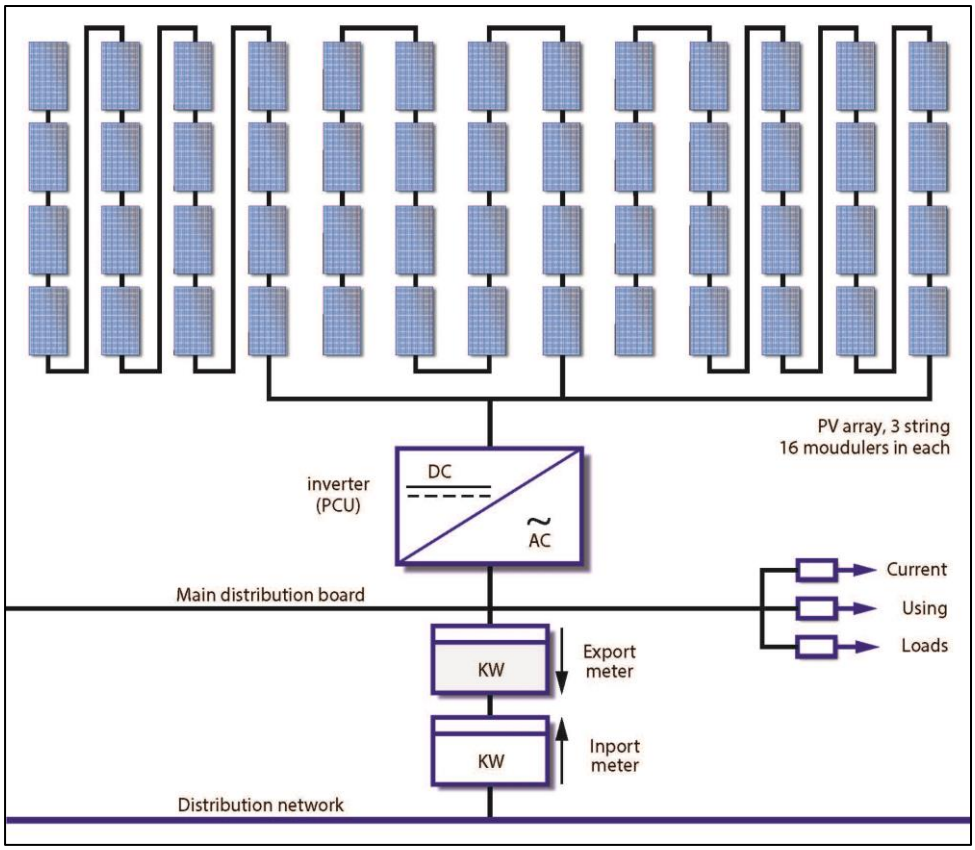
המערכת הפוטו-וולטאית מייצרת חשמל בזרם ישר שאינו מתאים עבור מרבית היישומים. רובם המכריע של צרכני החשמל הנפוצים (ביתיים/מסחריים וכיו"ב) מחייבים זרם חילופין חד-פזי או תלת-פזי (בישראל 400/231 וולט, 50 הרץ) בסיבולת הנקבעת על ידי חברת החשמל. המרת הזרם מזרם ישר לחילופין נעשית באמצעות הממיר - PCU (Power Conditioning Unit; Inverter). הממיר מהווה לא רק רכיב מרכזי במערכת הפוטו-וולטאית אלא גם אחת החוליות החלשות

[112] Antony et al, 2009
[113] Messenger and Ventre, 2004
[114] Rawlings and Roper, 2000
[115] Thorne, 2006

בשרשרת האספקה מהתא הבודד ועד לצרכן/רשת האספקה (במקרה של חיבור מקבילי בין הרשת למערכת הפוטו-וולטאית). תדירות הכשלים האופיינית בממיר – (Mean Time Between Failure (MTBF גבוהה משמעותית ביחס לרכיבים האחרים במערכת ומכאן חשיבות אפיון הממיר וההגנה הנדרשים לפעולתו האמינה. פעולת הממיר מאופיינת בעקיבה אחר נקודת ההספק השיאי ה- MPP(T) להבטחת ביצועים אופטימליים של המערכת (קריטית בתאי סיליקון ופחות קריטית בתאים דק-שכבתיים). הדרישות העיקריות לביצועים אמינים ואופטימליים של פעולת הממיר הינם:

הבטחת מתח חילופין סינוסוידאלי במוצא הממיר וסנכרון לרשת האספקה (חברת החשמל, רשת פרטית של הצרכן); הבטחה קרובה עד כמה שניתן לנקודת ה- MPP(T) כאמור לעיל; ניצולת גבוהה, גם בתנאי העמסה חלקית; פעולה אמינה גם בתנאי סביבה חריגים; והעברת נתונים המתייחסים לתפוקה/תקלה אפשרית.

טופולוגית המערכת: מיקום הממיר/ממירים אינו כלל קבוע ונתון לשיקול דעת המתכנן. כעיקרון ניתן להגדיר את המערכת כמרכזית או מבוזרת, בחיבור מודולים או תתי מערכות (Arrays) טורי, מקבילי או מעורב.




**איור יג-4: תיאור עקרוני של מערכת פוטו-וולטאית עם מיקום מרכזי של הממיר**[116]

(תיתכנה התאמות לדרישות חוק החשמל, חברת החשמל והתקנים)

מאפיינים נוספים של ממירים מתקדמים/איכותיים הינם:

- מצב "חיפוש" בו הממיר פועל במינימום צריכת אנרגיה בזמן עומס = 0 או קרוב לערך זה, או לחילופין עובר למצב אופטימיזציה כאשר העומס מתקרב לעומס הנומינלי
- ניתוק הממיר מרשת מקבילה (חברת החשמל), במצב בו הרשת המקבילה מנותקת.

[116] Rawlings, 2009

להבטחת פעולה אופטימלית והגנה על רכיבי המערכת, נכללים בה גם:

- דיודות מעקף (bypass diodes) למניעת חימום יתר של חלקי המודול בזמן הצללה
- דיודות "חסימה" (blocking diodes) למניעת מעבר זרם הפוך
- מגיני מתח יתר והגנות טרמיות ומגנטיות.

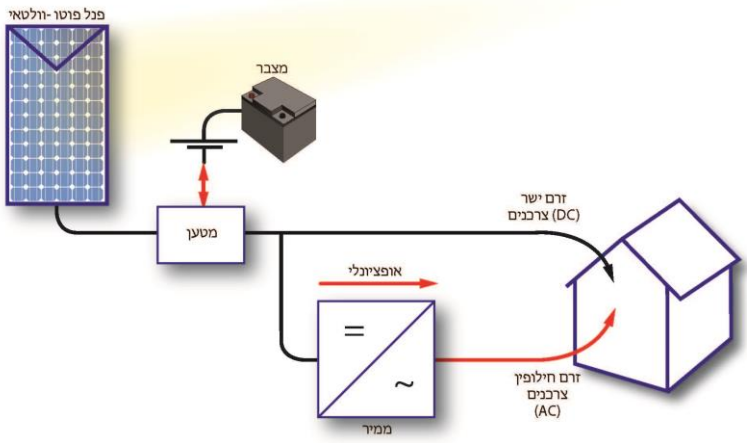
## 2.5 תצורת האספקות

מבדילים בין שתי תצורות חיבורים: אספקה עצמאית (stand-alone supply), וחיבור ואספקה במקביל לחברת החשמל (grid connected).

**א. אספקה עצמאית (stand-alone supply):**

אספקה עצמאית ממערכת פוטו-וולטאית מיועדת לצרכנים המרוחקים מרשת חברת החשמל או שחיבורם לרשת כרוך בקשיים טכניים ועלויות גבוהות. האספקה יכולה להתבצע ישירות בזרם ישר (DC) או באמצעות ממירים לזרם חילופין (AC) בטופולוגיות שונות- ממיר מרכזי לבית (ראו להלן) או ממירים עצמאיים לצרכנים סופיים. נכון להיום מספקות מערכות פוטו-וולטאיות אנרגיה למאות אלפי בתים (בעיקר במדינות העולם השלישי) שבהם העומס הכולל לבית אינו עולה על 200 ואט (בעיקר מתקני המאור או מכשירים אלקטרוניים בהספק נמוך), ברם ישנם כמובן יוצאים מהכלל[117].

להבטחת המתקנים הניזונים ממערכת פוטו-וולטאית עצמאית אשר בהם נדרשת אספקה בשעות בהם אין המערכת פעילה, כמו בחשיכה, יש צורך במצבר (או מערכת מצברים) ומטען לגיבוי (ראו איור יג-7).




**איור יג-5: מערכת פוטו-וולטאית עצמאית המגובה על ידי מצבר**

לקביעת גודלם של רכיבי המערכת, בעיקר הספק המערכת הפוטו-וולטאית וסוג וקיבולת המצבר/מצברים (המבוטא באמפר-שעה - Ah), ישנה חשיבות כאשר בוחנים את עלות המערכת במחזור החיים (life cycle cost – LCC). זאת משתי סיבות: (א) היות המערכת עצמאית – ללא גיבוי חיצוני, עובדה המחייבת אמינות גבוהה יותר; (ב) קשיחות המערכת בהיבט הרחבה עתידית.

המצברים מהווים חוליה חלשה במערכת. לכן יש צורך בהתייחסות קפדנית לבחירת סוג המצברים (בד"כ מצברים מבוססי עופרת או ניקל קדמיום, אם כי קיימים היום פיתוחים נוספים, אך עדיין

[117] Antony et al, 2000

יקרים) והתאמת המטען למשטר העבודה והצרכן/צרכנים המיועדים. לטמפרטורת הסביבה ותנאי ההתקנה השפעה על אופיין הפריקה ואורך חיי המערכת.

הערה: הפרקים הנוספים לא יעסקו בתצורה זו.

**ב. חיבור ואספקה במקביל לרשת חברת החשמל (grid connected):**

המגמה לביזור מקורות אנרגיה בכלל ואנרגיה בלתי מתכלה בפרט מהווה בשני העשורים האחרונים זרז להקמת מתקני אספקה פוטו-וולטאים בהספקים הנעים מקילוואט בודדים, בעיקר במבנים צמודי קרקע, ועד לעשרות מגה ואט בחוות פוטו-וולטאיות הפרוסות על פני שטחים פתוחים או משולבים בגגות מבנים בעל שטחי חשיפה נרחבים לאור השמש. מתקנים אלו פועלים במקביל לרשת חברת החשמל בשתי רמות חיבורים (א) עד 630 קוו"א במתח נמוך (מתח שלוב 400 וולט), (ב) מעל לכך (בשלב זה) במתח גבוה – בעיקר 22 ק"ו או 33 ק"ו.

האנרגיה המיוצרת על ידי מערכות אלו, נרכשת (ומסובסדת) על ידי מדינת ישראל באמצעות חברת החשמל, בתנאי רגולציה ותקינה המוסדרים על ידי הרשויות המתאימות ( רשות החשמל, מכון התקנים, חברת החשמל והמחוקק באמצעות תקנות).

חיבור ואספקה במקביל לרשת חברת החשמל, מתאפיינים בשתי תתי תצורות:

א. החלופה בה החשמל המיוצר על ידי המערכת הפוטו-וולטאית נמכר במלואו לחברת החשמל (התחשיבים נעשים על בסיס ההסדרות הרגולטוריות הקיימות – פרק 4 להלן ומונה הייצור והמונה הדו-כיווני),

ב. החלופה באמצעות "מונה נטו" בה הצרכן וחברת החשמל מתקזזים שלילית או חיובית בהיבט הכספי ובהתאם למניית מונה התעו"ז המותקן (מונה תעו"ז = מונה על פי עומס וזמן).

פיסקה 3 תעסוק בהיבטים המעשיים של יישום והתקנת מערכות פוטו-וולטאיות במגזר הביתי, ופיסקה 4 תעסוק בהיבטים התחיקתיים, התקנים והרגולציה של מתקנים אלו.

## 3. יישום והתקנת מערכות פוטו-וולטאיות במגזר הביתי



### 3.1 חלופות התקנה

הטכנולוגיה הנוכחית מאפשרת ארבעה חלופות התקנה: (א) התקנה על גבי הגג (כשהגג שטוח), (ב) התקנה משולבת בגג (כשהגג משופע), (ג) התקנה משולבת בחזית, (ד) התקנה על גבי הקרקע, סמוך למבנה. לכל אחת מהחלופות יתרונות וחסרונות, אך חלופות (א) ו-(ב) הן המעשיות והמקובלות כיום בישראל.

במבני מגורים צמודי קרקע, הקצאת השטח למערכות הפוטו-וטלאיות פשוטה יחסית ומהווה "פשרה" בין השטח המיועד לקולטי השמש (המשמשים לחימום מים), השטח המיועד למעבי מיזוג אוויר (לפי סוג המערכת) והשטח המיועד ללוחות הפוטו-וולטאים.

שונה המצב בבנייה רוויה (במיוחד מעל ל- 8-9 קומות). חובת התקנת מערכת חימום מים באמצעות קולטי שמש (חוק התכנון והבנייה), זכויות השטח הציבורי, הסכמות בין דיירים וניצול הגגות לבניית דירות גג, מצמצמות אם לא מבטלות את אפשרויות היישום של מערכת פוטו-וולטאית (מחוסר מקום אפקטיבי).

נכון למועד הכנת מדריך זה, כמות ההתקנות של מערכות פוטו-וולטאיות בבנייה רוויה למגורים – שולית.

יחד עם זאת, ראוי לציין שמספר מיזמי הזנק (Startup) עוסקים בפיתוח טכנולוגיות שיאפשרו בעתיד שילוב "חכם" של אלמנטי PV בחלונות, או באלמנטים מבניים אחרים, או לחילופין יתבססו

על מערכות ממוקדות/עוקבות שמש (כלכליות!) שתאפשרנה התקנת מערכות PV גם בבנייה רוויה למגורים.

הערה: על בסיס האמור לעיל, מרבית החשמל ממקורות פוטו-וולטאים המיוצר כיום בישראל וכנראה גם בעתיד הקרוב והבינוני – אינו מתחום המגורים.

**איור יג-6:**

**הדמיה של מתחם מגורים ביפן, המצויד במערכת אספקת חשמל עצמית (חלקית) מבוססת PV** (התמונה על ידי Hakushin Co.)

## 3.2 היבטים אדריכליים – עיצוביים

מערכת פוטו-וולטאית מהווה חלק מהמבנה ואמורה להשתלב בו ארכיטקטונית. בתכנון בו המערכת הפוטו-וולטאית מהווה מרכיב אינטגרלי כבר בשלב הפרוגרמטי, אלמנטים כמו כיווניות המבנה, הטל השטח, והצורה מהווים מרכיב בהליך קבלת ההחלטות המעצבות את המבנה. יחד עם זאת, המראה "המעט זר" של לוחות בגוון כחול (במספר גוונים ותצורות בהתאם לסוג התא) המכסים את הגג – במיוחד בבנייה צמודת קרקע בעלת גגות משופעים – מעורר לא מעט התנגדות בקרב הצרכנים העתידיים ובמקרים לא מעטים גם אצל האדריכלים מתכנני המבנה. כל זאת בנוסף לשיקולים טכנו-כלכליים המהווים מרכיב דומיננטי בתהליך קבלת ההחלטה באשר לרכישת מערכת פוטו-וולטאית. שילוב – אינטגרציה מתאימה של המערכת עם שאר חלקי המבנה, הקפדה על ביצוע נכון ומעל לכל הפנמה שאלו פני העתיד, אם רצוננו להפחית התלות במקורות אנרגיה מתכלים – הינם המפתח ליישום גורף של טכנולוגית PV במגזר הביתי.

כל שינוי, גם אם הוא לטובה, הינו קשה. ראוי לציין שגם בימייה הראשונים של תעשיית חימום המים באמצעות קולטי שמש, השוק על כל מגזריו וביניהם האדריכלים התקשה לעכל את המגמה החדשה. האילוץ באמצעות החקיקה (תקנות התכנון והבנייה - חובת התקנת מערכות סולריות לחימום מים) דרבן את הגורמים העוסקים בתחום לפתח גישות יצירתיות, הן בייצור והתקנת הקולטים והן בדודים עצמם. מגמות אלו, המשלבות חדשנות אדריכלית, חדשנות בעיצוב המוצר, טכנולוגיות מתקדמות, תמריצים כלכליים ורגולציה מתאימים – סביר שימתנו התנגדויות על רקע האמור לעיל ויקדמו את תחום מערכות ה- PV במגזר הביתי.

הערה: קיימים היום אמצעי סימולציה המאפשרים תכנון אינטגרטיבי ובו בזמן הצגת הפתרון האדריכלי למתכנן וללקוח באמצעות תוכנות Building Information Modeling - BIM.

## 3.3 הצללות: התמודדות ומניעה

ההצללות למיניהן מהוות את אחד הגורמים החיצוניים השליליים בהיבט ביצועי מערכת פוטו-וולטאית. ההצללות גורעות מהמאזן האנרגטי ותפוקת המערכת, בין אם ההצללות קבועות ובין אם ההצללות זמניות (כמו מעבר ענן). המשמעויות הכספיות הינן ברורות – הפחתה כזו או אחרת

בהכנסות הצפויות, וכשההכנסות מבוססות על תקופת התקשרות ארוכה (20 שנה), ההפסדים עלולים להיות משמעותיים גם בהיבט כדאיות המיזם.

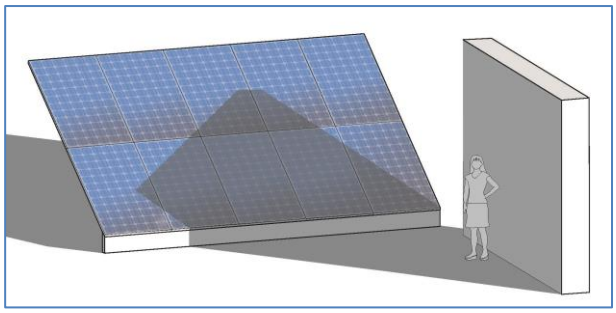
תאי סיליקון חד/רב- שכבתיים מושפעים מההצללות הרבה יותר מאשר תאים דק-שכבתיים, ועל כן הגישה להפחתה/מניעה – שונה בהתאם.

הצללות קבועות – הנובעות ממבנה או חלק ממנו המטיל צל על המערכת – ניתנות למניעה אם המתכנן מודע לכך, כבר בשלבים הראשוניים של התכנון. סקר ניהול סיכונים, הכולל התייחסות להצללות הינו לפיכך חובה -לא רק בהקשר להצללות אלא למגוון הסיכונים המכניים, החשמליים, הכלכליים והרגולטוריים - על ציר חיי המערכת.

בנוסף להצללות ממבנה/מבנים, קיימות הצללות הנובעות מלכלוך, אבק, לשלשת ציפורים וכיו"ב שניתנות להפחתה (אך לא למניעה מוחלטת).

להצללות גם משמעויות פנים מערכתיות הדורשות התייחסות נפרדת.

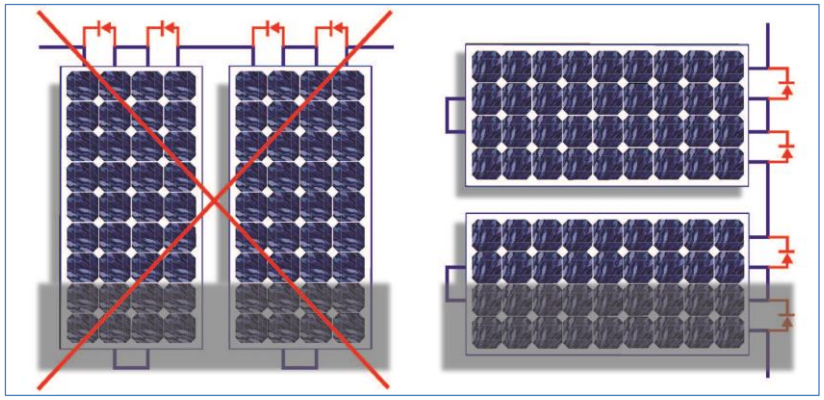
האתגר בפני המתכנן הינו לפיכך כפול: מצד אחד מניעת הצללות עד כמה שניתן, לא רק בהיבט ההתקנה הראשונית, אלא בעיקר לאורך כל חיי המתקן. מצד שני מזעור נזקי ההצללות גם בראייה הפסדי הכנסות ובראייה אמינות ושלמות המערכת הפוטו-וולטאית עצמה – ראו להלן.



**איור יג-7:**

**הצללה קבועה – תוצאה של מבנה המסתיר את חלקה התחתון (השמאלי) של המערכת [118]**

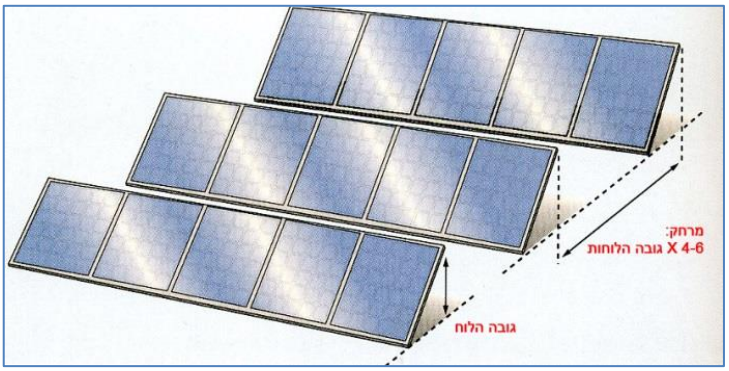
במערכת פוטו-וולטאית המוצלת (בחלקה) עלולים להתפתח זרמים שאינם מאוזנים ושאינם מתאימים בערכם הנומינלי למתוכנן אם לא ינקטו צעדים מתאימים. במצב זה, עלול להיגרם נזק לתאים שחלקם כאמור מוצל ('מכובה') וחלקם פעיל. בתכנון מתאים של חלוקת התאים, תתי המערכת הבסיסית (modules) ותתי המערכת (arrays), מותקנות דיודות גישור המאפשרות נטרול אותם חלקי המערכת הפוטו-וולטאית המוצלים. למיקום ואופן חיבור הדיודות חשיבות לאופטימיזציה של המערכת (איור יג-8).



**איור יג-8: מיקום דיודות הגישור למניעת אפקט שלילי על המערכת [119]**

[118] Antony et al, 2009

לאופן התקנת חלקי הלוחות השלכות משמעותיות שראוי להתחשב בהן למניעת הצללות. שמירה על כללים כמו יחס גובה-מרווח, בחירה אופטימלית של ממדי הלוחות, חלוקה אופטימלית על פני שטח הגג וזווית הנטייה של הלוחות תמזער את נזקי ההצללות ותבטיח במקביל גם תנאי אוורור נאותים (איור יג-9).




**איור יג-9:**

**שמירת מרחקים בין הלוחות ואופטימיזציה של פרמטרים נוספים, תבטיח מניעת הצללות הדדיות ואוורור מספק**

## 3.4 היבטים חשמליים של התקנות פוטו-וולטאיות

המתקן הפוטו-וולטאי הינו בראש ובראשונה מערכת חשמלית האמורה לספק חשמל ברמת אמינות ובטיחות שהמחוקק קבע (ראו פרק 4 להלן). על פי הנחיות מנהל ענייני החשמל במשרד האנרגיה והמים, ההתקנה החשמלית אמורה לעמוד בארבעה קריטריונים:

- עמידת המתקן בדרישות חוק החשמל ותקנותיו,
- עמידת המתקן בהוראות מנהל ענייני החשמל / הרשות לשירותים ציבוריים חשמל
- עמידה בתקנים הישראליים (ראו פרק 4 להלן)

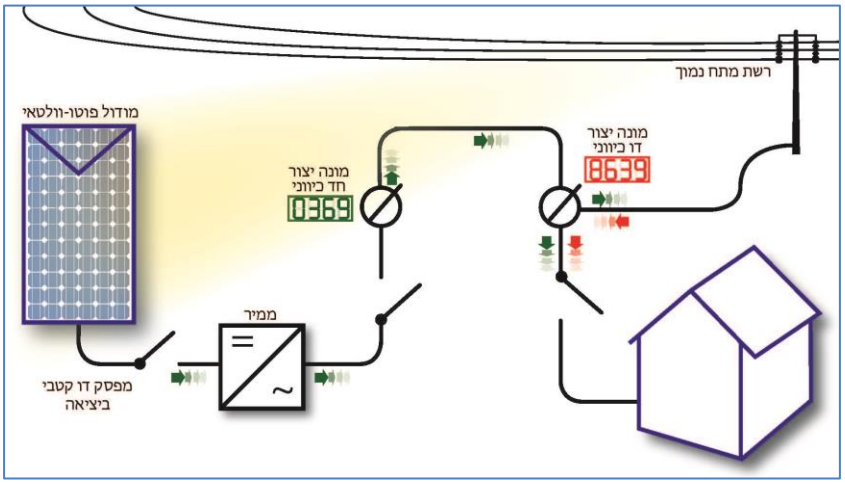
- עמידה בדרישות הפנימיות של חברת החשמל (הנגזרות מסעיפים הקודמים).

ההסדרה הרגולטורית משלימה את ההיבטים הכספיים.

בנוסף לאמור לעיל, קיימות הנחיות משלימות של משרדי ממשלה (כדוגמת המשרד להגנת/איכות הסביבה ואחרים) ורשויות מקומיות שיש לראותם כחלק ממערכת המסמכים המחייבים/מומלצים אשר מהווים את הבסיס הטכנו-כלכלי ליישום טכנולוגיות פוטו-וולטאיות.

עומסי המערכת הפוטו-וולטאית במערכות ביתיות קטנים יחסית – עד 15 קילו-ואט. לכן התצורה של המערכת היא יחסית פשוטה, ומבוססת במרבית המקרים על ממיר אחד מרכזי משותף לכל הלוחות הפוטו-וולטאים (איור יג-10).

[119] Antony et al, 2009




**איור יג-10: תרשים עקרוני לחיבור מתקן פוטו-וולטאי בהספק ≥ 4 קוו"ט**
(מעובד מהנחיות טכניות של חברת החשמל – נספח ג')

התכנון והחיבורים הפנימיים בתוך המערכת (חיבורי ה- Modules, ה- Arrays, סידור ה- Strings) אמורים להיות תוצאה של שקלול המרכיבים הבאים: (א) התפלגות הקרינה הסולרית לפי עונות השנה (ב) הצללות (ג) כיווניות המבנה (ד) סוג התאים (סיליקון חד/רב גבישי או דק שכבתי). אופטימיזציה של התכנון מתאפשרת באמצעות תוכנות מחשב שחלקן כאמור גם מאפשר הדמיות/סימולציות לבחינה ויזואלית של הפתרון או הפתרונות המתקבלים.

התצורה היחסית פשוטה של מתקנים פוטו-וולטאים ביתיים וההספקים הנמוכים (עד 15 קוו"ט) ממזערת השלכות שליליות של מערכות פוטו-וולטאיות בהספק בינוני > 51 קוו"ט או כאלו המזרימות לרשת הארצית הספקים במתח גבוה כגון: (א) תכולת הרמוניות מיוצרות על ידי הממיר/ממירים, (ב) הזרמת רכיב זרם ישר DC לרשת הארצית, (ג) תופעת "האי הבודד", (ד)עליית מתחים בלתי רצויה (ה) ותופעות מקדמי כופל הספק לא רצויים.

**דגשים טכניים נוספים:** (א) ציוד המיתוג וההגנות אמורים לעמוד במאפיינים של זרם ישר (DC) עד לממיר, (ב) ציוד המיתוג וההגנות מהממיר אמורים לעמוד במאפיינים של זרם חילופין (AC) לרבות סלקטיביות בין ההגנות, (ג) מתקני הייצור והחלוקה מחויבים לעמוד בדרישות תקנות ההארקות, הגנות ברקים (במידה ומחויב על פי הקריטריונים בת"י 1173) והשוואת פוטנציאלים (ד) תאימות אספקות - על פי הנחיות חברת החשמל [120] הלוחות הפוטו-וולטאים יותקנו רק על מבנה הניזון מאותו חיבור שאליו מחוברת המערכת הפוטו-וולטאית.

## 3.5 היבטים מכניים של התקנות פוטו-וולטאיות

הבטחת היציבות המכנית של מערכת ה- PV מעוגנת לא רק במסגרת (הכתובה והלא כתובה) של 'כללי המקצוע הטובים' (Good Engineering Practice) אלא בראש ובראשונה בתקינה (ראו פרק 4 תקינה ורגולציה – ת"י 62548, יולי 2102), משתי סיבות: (א) הבטחת חיי אדם - תוצאה של התנתקות לוח/לוחות, מעמדים, מחברים ואלמנטים מכניים או חשמליים אחרים ופגיעה בעוברים ושבים, משתמשים וכיו"ב, (ב) פגיעה בחלקי המבנה אליה מחוברת מערכת ה- PV (מכנית וחשמלית – ראו איור 16 להלן).

סעיף 5.2 בת"י 62548 מפרט הדרישות להבטחת ההתקנה בהיבטים המכניים, לרבות בטיחות בשלבי ההתקנה והתחזוקה. בנוסף לאמור בת"י 62548, יש להקפיד על הנקודות הבאות:

[120] מאור ורט, 2010

**א. גגות רעפים – משופעים**

יש לתת תשומת לב מרבית למעברים מחלקי הגג הגלויים לחללים הסמויים בהיבט האטימות ופגיעה אפשרית ברעפים, כאשר החלקים המוסתרים מתחת לרעפים אמורים לעמוד בדרישות פנים הקונסטרוקציה והחלקים החיצוניים אמורים לעמוד בדרישות החוץ - ראו גם צילום יג-1. בידי המתקינים קיימים פרטי ביצוע המתאימים לדרישות התקן/תקנים ועל כך יש להקפיד/לעמוד.

**צילום יג-1:**

**חדירת כבלי DC לחלל הגג באמצעות רעף מיוחד מותאם** [121]

**ב. גגות שטוחים (מבטון)**

ההתקנה בגגות שטוחים שונה מהותית מההתקנה בגגות רעפים או גגות משופעים אחרים, לא רק בהיבט צורת ההתקנה, אלא גם עקב הכוחות המכניים (כגון יניקה או שליפה) הפועלים על המערכת. אפקט "המפרש" הוא אולי המאפיין הבולט של התקנה בגגות שטוחים.

בגישה המערכתית (The system approach) של המתקן הפוטו-וולטאי, קיימות מספר תת-מערכות/מרכיבים שלכל אחד מהם תפקיד בהבטחת שלמות ואמינות המערכת השלמה – התושבות, העיגון, המשקולות, אמצעי החיבור האיטום, הניקוז וכיו"ב. הבטחת אמינות תתי המערכות – תבטיח את שלמות המערכת כולה.

## 3.6 כבילה חשמלית

מבחינים בין שתי קבוצות כבילה: כבילת הזרם הישר (DC) המחברת בין חלקי המערכת השונים עד לממיר; וכבילת זרם החילופין (AC) המחברת בין הממיר לבין שאר חלקי מתקן החשמל המיועד לחלוקה והגנות על קווי הצרכנים.

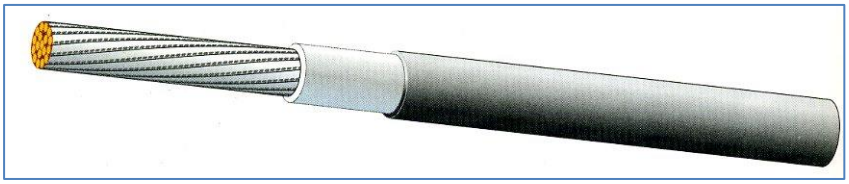
א. הכבילה לזרם הישר מיועדת בעיקרה להתקנה חיצונית ולעמידה בדרישות הבאות:

- עמידה בזרמי קצר
- עמידה בקרינת UV (קרינה אולטרה סגולית) ובתחום רחב מאד של טמפרטורות ותנאי חוץ (באירופה לדוגמה – 400C ועד +1200C)
- עמידה במתח פריצה (2 KV <)
- קלה במשקל וקלה להתקנה
- הפסדים נמוכים (לא גדולים מ- 1%)
- אורכים מינימליים (עד כמה שניתן).

[121] Antony et al, 2009

בנוסף, הכבילה חייבת להיות מוגנת כנגד פגיעות פיזיות ועד כמה שניתן (מוגנת) כנגד קרינת שמש ישירה. קביעת חתך הכבלים אמור לעמוד בשלושה קריטריונים: (א) הטמפרטורה האופפת, (ב) ערך הזרם המיועד לזרום בכבל, (ג) מפל מתח (שאינו יעלה על 2.5% עד לממיר).

ב. הכבילה לזרם החילופין אמורה לענות על דרישות חוק החשמל ותקנותיו ופרט למקרים חריגים, הכבילה המבוססת על בידוד פוליאתילן מוצלב – מספקת.



**איור יג-11: כבל לזרם ישר [122]**

## 3.7 סיכוני קרינה בלתי מייננת

הרכיב היחידי במערכת הפוטו-וולטאית המייצר שדה מגנטי הינו הממיר. על פי הגדרת WHO (ארגון הבריאות העולמי) השדה המגנטי הוגדר כמסרטן בדרגה שלישית [123]. לשם השוואה, ברמה זו מוגדרים גם מסרטנים כגון קפה, VOC, או פליטות ממנועי בנזין. על פי המלצות המשרד להגנת הסביבה, יש להימנע משהייה ממושכת בקרבת הממיר ולשמור על מרחק בטיחות של 4 מ' מאזור שהיית קבע של אנשים. טבלה יג-1 מפרטת את רמת השטף המגנטי בממיר בעוצמה של 40 אמפר:

**טבלה יג-1: מרחקים ושטף מגנטי מממיר 40 אמפר**

| מרחק אופקי מהממיר (מ') | שטף מגנטי לממיר בעוצמה של 40 אמפר (מיליגאוס) |
|---|---|
| 0.1 | 76 |
| 0.3 | 26 |
| 0.5 | 16 |
| 4 | 2 |
| 5 | 1.6 |

## 3.8 היבטים מינהליים ביישום והתקנת מערכת פוטו-וולטאית

כל צרכן ביתי (וגם אחר) המבקש ליישם מערכת פוטו-וולטאית בחצריו, חייב לעמוד בהליכים המנהליים הבאים [124]:

- ✓ קבלת היתר להקמת המתקן מהוועדה המקומית לתכנון ובנייה
- ✓ הגשת טופס בקשה להתחברות לחברת החשמל
- ✓ הגשת תכניות המתקן הפוטו-וולטאי לחברת החשמל באמצעות חשמלאי מורשה (בד"כ נציג החברה המתקינה) הכוללות: (א) פרטי ההתקנה ופרטים מזהים של החשמלאי, (ב) תרשים חד-קווי של כל המתקן, החל מהלוחות הפוטו-וולטאים ועד ללוח החלוקה, לרבות המעגלים הסופיים, (ג) תכניות מיקום המערכות השונות לרבות מיקום המונים (דו-כיווני וייצור).

[122] Antony et al, 2009
[123] ברנשטיין, 2010
[124] מאור ורט, 2010

- ✓ עם סיום העבודות (לרשות הצרכן עומדים 180 יום להשלמת ההתקנות), מגיש החשמלאי את המתקנים לאישור חברת החשמל בהליך "בדיקה/בקורת", כאשר עם סיום הבדיקה ואישור המערכת על ידי הבודק המוסמך, מותאמת מערכת המנייה (מונה ייצור ומונה דו-כיווני) והמערכת מוכנה להספקת חשמל לרשת.

הערה: מרבית החברות המספקות ומתקינות את המערכות הפוטו-וולטאיות מלוות את הצרכן בהליכים לעיל.

## 4. חוקים ותקנות, תקינה והסדרה

בסעיף 3.4 צוין שמערכת פוטו-וולטאית הינה בראש ובראשונה מערכת המייצרת חשמל שאמורה לפעול ברמת בטיחות נאותה, לכל בעלי העניין ולרכוש, ולעמוד בדרישות התאימות והאמינות בממשק שבין המערכת לרשת חברת החשמל. הצרכן והחברה המספקת ומתקינה את המערכת מחויבים לעמוד בדרישות התקנות, התקינה והרגולציה להבטחת אישור המתקן על ידי בודק חברת החשמל בשלב הראשוני ופעולה תקינה לאורך חיי המיזם (20 שנה) לאחר מכן.

### 4.1 חוקים ותקנות

החוקים והתקנות הקיימים והמחייבים לצורך מערכות אלו הינם חוק החשמל (1954) והתקנות הנלוות על פי חוק החשמל (בשלב עריכת מסמך זה, עדיין לא הותקנו תקנות פרטניות המתייחסות למערכות פוטו-וולטאיות). התקנות הקיימות והתקפות מתייחסות לחלקי המתקן השונים כגון: מובילים, כבילה, הגנות, הארקות, לוחות וכיו"ב ומספקות מעטפת טכנו-נוהלית למערכת. חוק התכנון והבניה על תקנותיו, מהווה נדבך בסיסי שכל מערכת מחויבת לעמידה בתנאיו.

### 4.2 תקינה

התקינה הקיימת מבוססת ברובה על תקינה זרה עם התאמות לחוק החשמל והתקנות הנלוות.

המידע בסעיף זה הינו באדיבות מכון התקנים הישראלי [125].

**א. מערכות המחוברות לרשת חברת החשמל - סדרה 4777**

סדרה זו מבוססת על מספור זהה של התקנים האוסטרליים משנת 2005. התקנים אומצו בחודש אוגוסט 2008 ומשמשים כבסיס להתקנות בהתאם להספקים הנקובים בו.

**ת"י 4777-1 דרישות התקנה**. הפרק מקיף את הנושאים הבאים: (א) חיבור ללוח/לוחות חשמל, (ב) חתכי כבלים, (ג) מנתקים, (ד) ממסרי פחת, (ה) הגנת הממיר, (ו) שילוט.

**ת"י 4777-2 דרישות לממיר**. הפרק מקיף את הנושאים הבאים: (א) בטיחות חשמלית, (ב) הרמוניות זרם, (ג) יציבות המתח, (ד) תופעות מעבר והגבלתן, (ה) הזרמת רכיב הזרם הישר לרשת.

**ת"י 4777-3 דרישות להגנת רשת החשמל**. הפרק מקיף את הנושאים הבאים: (א) ציוד להגנת הרשת,(ב) אמצעי ניתוק, (ג) גבולות – סיבולת מתח ותדירות,(ד) הגנת הרשת מחדירת זרמים מהמערכת הפוטו-וולטאית בזמן הפסקת חשמל, (ה) הליכי חיבור מחדש – לאחר הפסקת חשמל.

**ב. ת"י 62548**

מחודש יולי 2012 דרישות תכן עבור מערכות פוטו-וולטאיות. ייחודו של התקן (הדן בנוסף להתקנות חשמליות) הינה בהתייחסות המקיפה להיבטים המכניים של מכלול מרכיבי המערכת. תחום זה – הבטיחות המכנית (הלוחות הפוטו-וולטאים, המסבכים, המחברים למיניהם וכיו"ב), היה עד

[125] שיינגרט, 2011

לאימוץ התקן – תחום "פרוץ" ונתון לשיקול דעתו הבלעדית של המהנדס האזרחי שנשכר על ידי החברה המספקת ומתקינה (במידה וכזה אכן הועסק!).

התקן דורש כי חומרי החיפוי והאיטום למניעת חדירת מים, יתאימו לתקן האמריקאי ASTM D 7349 וכן מתבסס על מידע מעשי שהצטבר בישראל – תוצאה של התקנות וניסיון באתרים השונים * . הדגשים בחלק המכני של ת"י 62548 הינם: (א) סקר מקדים לבחינת מקום ההתקנה (הגג) וכל מרכיבי הסיכון הנלווים להתקנה, (ב) חומרים – הבטחת שימוש בחומרים העמידים לאורך זמן בתנאי חוץ ו/או תנאים ייחודיים לאתר, לרבות דליקות המרכיבים השונים, (ג) דרישות מבניות – שיקולי תכן, עומסים, כוחות רוח ויניקה, אמצעי חיבור ועיגון, (ד) התקנה – שילוב המערכת המתוכננת עם תשתיות הגג הקיים, נושאי איטום וניקוז ואוורור, (ה) בטיחות העובדים ונגישותם, (ו) תיעוד – דו"ח הנדסי מלא החל משלב הסקר המקדים, עבור לפירוט הכוחות, העומסים, העיגון וכלה בנתוני הציוד והנחיות הבטיחות.

**צילום יג-2:**

**האם מערכת הלוחות הפוטו-וולטאים – הותקנה לפי ת"י 62548?** [126]

הדגשים בחלק החשמלי הינם: (א) תצורות חשמליות (ארכיטקטורות) המערכות השונות,(ב) ביצועי המערכת בתנאי הצללה וטמפרטורות, (ב) בטיחות חשמלית – זרם ומתח יתר, ברקים, מתח תקלה ומגע, (ג) היבטי ממשק לרשת החשמל, (ד) כבילה, (ה) רכיבי עזר (דיודות, שקעים ותקעים וכיו"ב), (ו) והארקות והשוואת פוטנציאלים.

**ג. ת"י 61215 מחודש נובמבר 2002**

מודולים פוטו-וולטאיים העשויים מתאי צורן גבישי לשימוש על פני כדור הארץ – מתן כשירות לתכן ואישור הסוג. התקן מגדיר דרישות למתן כשירות לתכן ואישור מודולים פוטו-וולטאים, המיועדים לפעול בתנאים רגילים – לא חריגים. התקן מיועד למודולים עשויים סיליקון גבישי ואינו מיועד למודולים העשויים שכבה דקה (thin–film).

**ד. ת"י 61646 מחודש נובמבר 2002**

מודולים פוטו-וולטאיים העשויים שכבה דקה של חומר פעיל, לשימוש על פני כדור הארץ – מתן כשירות לתכן ואישור הסוג. התקן מגדיר דרישות למתן כשירות לתכן ואישור מודולים פוטו-וולטאים, המיועדים לפעול בתנאים רגילים – לא חריגים. התקן מיועד למודולים עשויים שכבה דקה של חומר פעיל, המתאים גם למודולים עשויים סיליקון אמורפי.

הדגשים העיקריים **בת"י 61215 ות"י 61646** הינם:

(א) ביצועים בתנאי Standard Test Conditions (STC) (ראו סעיף 2.1 לעיל)

(ב) מדידות – Measurement of Nominal Operating Cell Temperature – NOCT

[126] התמונה באדיבות מר צדוק לוי

(ג) ביצועים בתנאי NOCT

(ד) ביצועים בתנאי קרינה נמוכה

(ה) בדיקות בתנאי חוץ, קרינת UV, מאמצים בתנאים טרמיים, לחות, עמידות והעמסה מכנית

**ה. ת"י 61730-1 מחודש נובמבר 2011**

מתן כשירות לבטיחות של מודול פוטו-וולטאי: דרישות מבנה. התקן עוסק בדרישות בטיחות של מבנה המודול הפוטו-וולטאי. הדגשים העיקריים בת"י 61730-1: (א) דרישות מבנה, חומרי מתכת ופולימרים, (ב) חיווט פנימי, (ג)מחברים, (ד) השוואת פוטנציאלים והארקות, (ה) מרחקי "זחילה", (ו) חיוץ, הפרדה והגנות של החיווט הפנימי. (ז) שילוט, סימון ותיעוד, (ח) שינויים (במהלך חיי המתקן).

**ו. ת"י 61730-2 מחודש נובמבר 2011**

מתן כשירות לבטיחות של מודול פוטו-וולטאי: דרישות לבדיקות. הדגשים העיקריים בת"י 61730-2 בדיקות בתחומים: (א) בטיחות חשמלית, (ב) אש, (ג) מאמצים מכניים, (ד) רכיבים.

### 4.3 רגולציה – הסדרה

מדיניות הסדרת המכסות להתקנת מתקנים פוטו-וולטאים והתעריפים לרכישת החשמל המיוצר על ידי הצרכן ונרכש על ידי חברת החשמל - נמצאת בידי הרשות לשירותים ציבוריים חשמל.

החל משנת 2008 מפרסמת הרשות לשירותים ציבוריים חשמל מסמכים שיש בהם מידע כאמור בנושאי מכסות להתקנות ביתיות, בינוניות וגדולות. אתר הרשות (WWW.pua.gov.il) מתעדכן על פי מדיניות הממשלה וכולל בתוכו פרטי ההסדרות/המכסות, הפניות לתקנות, חוקים והנחיות (סיבולת בתחומי האספקה – מתח, הרמוניות ועוד) של גופים/ארגונים מקבילים הפועלים בתחום זה (חברת החשמל, המשרד להגנת/איכות הסביבה ואחרים).

נספח א' להחלטה מס 1 בישיבה מס' 216 מתאריך 2 יוני 2008 מהווה את הבסיס למדיניות הממשלה בעניין: ייצור חשמל מבוזר לצריכה עצמית והעברת עודפים לרשת בטכנולוגיה פוטו-וולטאית. הדגשים העיקריים במסמך זה: (א) תשלום (והתחשבנות) לצרכן עבור החשמל המיוצר במיתקן, (ב) תנאים טכניים להתקנת המתקן הפוטו-וולטאי, (ג) ההליכים המנהליים לבקשת חיבור המתקן לרשת החשמל.

כל צרכן המתעד להתקין מערכת פוטו-וולטאית, חייב להתעדכן בתנאי ההסדרה: המכסה המאושרת, התעריף, הדרישות הטכניות, הנחיות אחרות (סיבולת האספקה לדוגמה) ולוודא שהחברה המספקת ומתקינה את המערכת, בקיאה, בעלת ניסיון ומייצגת איתנות כלכלית.

## 5. שיקולים כלכליים בבחירת מערכת פוטו-וולטאית

נקודת המוצא בכל החלופות הכלכליות לבחירת מערכת פוטו-וולטאית הינה אורך חיי המיזם (בדרך כלל 20 שנה) והאנרגיה הממוצעת השנתית שמפיקה המערכת, המחושבת לפי 1700 קוט"ש למ"ר לשנה לכל קילוואט שיאי מיוצר.

ניהול סיכונים בסיסי יאתר כבר בשלבים הראשונים של בחינת החלופות אותם תחומים העלולים לשנות על ציר המערכת את צפי תזרים ההכנסות והתשואה הצפויה. רשימה חלקית ומצומצמת של סיכונים אפשריים מפורטת להלן:

- סיכוני מדיניות הממשלה: שינוי חד-צדדי של תנאי החוזה /התקשרות על ידי הגורמים הממשלתיים האחראים על מדיניות רכישת חשמל (בידי הממשלה – על זרועותיה השונות) המיוצר על ידי צרכנים.

- סיכונים מקרו-כלכליים: משבר כלכלי – אינפלציה גבוהה, סחרור (כלפי מעלה) ברמת הריביות, שינויים משמעותיים בהרכב סל ההצמדה של התעריף, אי יכולת עמידה בתנאי התשלום בגין רכישת החשמל, נזקים – תוצאה של אירוע בטחוני, חיי מיזם ארוכים מעבר לאופק כלכלי הניתן לחיזוי.
- סיכונים טכניים: אי עמידת המתקן בביצועים המובטחים על ידי ספק המערכת (ירידה משמעותית בתפוקת התאים, בעיות בהמרת האנרגיה מ- DC ל- AC), הצללה בלתי צפויה (הקמת מבנה המטיל צל על המערכת), תחזוקה לקויה (המפחיתה את תפוקת התאים – תוצאה של לכלכוך, שימוש במוצרים בעלי טיב ירוד - ממיר לדוגמה).
- סיכונים מנהליים: פשיטת רגל של ספק חלקי המערכת (הממיר, הלוחות), או של החברה המספקת ומתקינה את המערכת, הפסקה חד-צדדית של חוזה האחזקה (במידה וכזה נחתם), שינויים במדיניות הבינוי הממשלתית/עירונית(תמ"א 38, "פינוי בינוי") המחייב פירוק המערכת.

לחלק מהסיכונים לעיל, יש פתרון המאפשר מזעור/הפחתה (אך לא ביטול הסיכון) ועם חלק יש להשלים, להתמודד ולקחת בחשבון בתחשיב הסיכונים הכולל.

## 5.1 מרכיבים טכניים

- צד/כיוון התקנת הלוחות הפוטו-וולטאים
- השטח העומד לרשות הצרכן
- הצללות – חיצוניות והצללות בין הלוחות
- סוג התאים (ראו טבלה יג-1)
- אזור אקלימי (ימי עננות).

## 5.2 שיקולי מימון

- השקעה עצמית מלאה, מימון חלקי 20% צרכן – 80% מימון בנקאי/אחר או חלוקה אחרת
- גובה הריבית במשק
- התשואה המצופה
- האם המערכת נמצאת בקריטריון של תשלום מס על ההכנסה (עד 4 קוו"ט)

הליך בדיקת התשואה, יכול להיעשות בשתי שיטות:

א. בשיטת זמן החזר ההשקעה (Pay-back time), שיטה אינדיקטיבית המאפשרת בחינה מידית של הזמן הנדרש להחזר ההשקעה מבלי לקחת בחשבון גורמים נוספים כמו עלות ההון ומשך זמן העסקה – גורמים הנלקחים בחשבון בשיטה ב'.

ב. בשיטת "הערך הנקי הנוכחי" (Net Present Value) בו מחושבת עלות ההון על ציר הזמן, כאשר כל תזרים ההוצאות ותזרים ההכנסות מובאים לערך נוכחי ומשקפים את מרכיב הזמן (הארוך – 20 שנה) באופן ריאלי- אמיתי. למרות ששיטה ב' מסורבלת במידת מה בהשוואה לשיטה א' – היא מהימנה יותר ועדיפה בכל היבט אחר.

להסבר מפורט יותר על בחינת השיקולים הכלכליים ראו פרק ט"ו.

לבחינת החלופה המתאימה, יש לדרוש מהחברה המציעה תחשיב בשלוש חלופות (לפחות) ולבדוק במבחן רגישות את הפתרון האופטימלי על פי (1) סוג התאים, (2) שטח התאים, (3) חלופות המימון. כל האמור לעיל, בהתחשב בסיכונים הטכניים והמנהליים שהוזכרו לעיל וסעיף 5.1 לעיל.

## 5.3 מבט לעתיד - הפיכת הטכנולוגיה הפוטו-וולטאית לכלכלית[127]

לפי אמות מידה כלכליות המקובלות בשוק החופשי, מרבית היישומים הפוטו-וולטאים אינם כלכליים והם מסובסדים על ידי צרכני החשמל במסגרת תעריפי הצרכנות השונים.

בנוסף לאמור בסעיף 2.2, קידום הפיכת הטכנולוגיה לכלכלית יכולה להיעשות במספר דרכים:

א. הורדת העלויות ליחידת הספק (ואט שיאי)

ב. הגדלת נצילות התאים (תאי סיליקון) ל-18%-20%

ג. יישום טכנולוגיית העקיבה – בה המערכת עוקבת אחרי מהלך השמש, טכנולוגיה המאפשרת הגדלת יכולת הקליטה עד 26%

ד. הטמעה לרמה יישומית של מערכות מרכזות – טכנולוגיה הנמצאת עדיין בראשית חיתוליה, עקב הבעיות הנלוות לתהליך – חימום התא לרמה שבה הוא מאבד את יעילותו ומבטל למעשה את כל יתרון הריכוז

ה. קידום הפיתוח של התא הדו-צדדי – טכנולוגיה המנצלת את 2 צדדי התא לצורך הפיכת אנרגיית האור לאנרגיה חשמלית. בשיטה זו ניתן להגדיל את קליטת האנרגיה על ידי המערכת בין 10% - 30%

בכל הדרכים חייב כמובן להיעשות שקלול בין התוספת הכספית הצפויה לבין התשואה הכוללת המתקבלת בסופו של דבר.

## מקורות

[1] Smith, P. F. (1997) Concepts in Practice Energy, (London: B.T. Bastford)

[2] Antony, F.,Duerschner, C. and Remmers, K.H.(2009) Photovoltaik fuer Profis (Berlin: Solarpraxis)

[3] Ngo, C. (2010) Resources, Technologies and the Environment (London: IET)

[4] Messenger, R. A. and Ventre, J. (2004) Photovoltaic Systems Engineering (Boca Raton: CRC Press)

[5] Fordham, M. & Partners (1999) Photovoltaics in Buildings – A Design Guide (London: DTI ) Report No. ETSU S/P2/00282/REP

[6] Rawlings, R. and Roper, M. (2000) Understanding Building Integrated Photovoltaics (London: CIBSE) CIBSE TM25

[7] Rawlings, R. (2009) Capturing Solar Energy (London: CIBSE) CIBSE KS15

[8] Osterwald,C.,R.,Anderberg, S.,Rummel, Ottoson, L.(2002) Degradation Analysis of Weathered Crystalline-Silicon PV Modules. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA

[9] Thorne (2006) Renewable Energy Sources for Building (London: CIBSE) CIBSE TM38

[10] אייזנברג, נ. (2008) תא הסיליקון הסולרי הדו-צדדי ויתרונותיו בתחום האנרגיה המתחדשת, חשמל ואנשים יולי 2008, גיליון 19 (19-12).

[11] ברנשטיין, א. (2010) ייצור אנרגיה חשמלית בטכנולוגיה פוטו-וולטאית, פרסום המשרד לאיכות/הגנת הסביבה.

[12] דומן, א. (2000) תאים פוטו-וולטאים – מקור האנרגיה העתידי? הנדסת חשמל ואלקטרוניקה, אוקטובר 2000, גיליון 29 (9-6).

[127] אייזנברג, 2008

[13] מאור, א., רט, ג. (2010) היבטי יישום וחיבור של מערכות פוטו-וולטאיות לרשת חברת החשמל, פאזה אחרת-מידעון חברת החשמל, אוגוסט 2010, עמודים 14-12.

[14] שיינגרט, מ. (2011) תקינה ישראלית למערכות PV, מכון התקנים הישראלי (מהדורה 2).

* תודה מיוחדת למר צדוק לוי, מחברת מולק – לפידות שתרם מהידע והניסיון שצבר בתחום ההתקנות המכניות של מערכות PV.

# פרק יד :

# תאורה מלאכותית

מאת אינה ניסנבאום

# פרק יד : תאורה מלאכותית

תאורה חשמלית מבטלת את תלותנו באור יום חיצוני, ללא תלות בעונות השנה, יום או לילה. תאורה חשמלית תורמת רבות לפריון העבודה ולבטיחות. על פי נתוני חברת החשמל משנת 2008, צריכת האנרגיה המופנית לתאורה היתה כ-2.5 מיליון קוט"ש, שהם כ-25% מצריכת החשמל הכוללת: כ-40% בבנייה ציבורית ומוסדית, וכ-10-15% בבנייה למגורים. מתוך כלל האנרגיה המשמשת לתאורה, כ-10 אחוזים משמשים לתאורה של שטחי חוץ.

מתקן תאורה קיים בכל בית, מבנה או מגרש - בכל מקום. ניתן לחלק את נושא התאורה חלוקות שונות, כגון תאורה דקורטיבית או תאורה פונקציונלית, תאורת פנים או תאורת חוץ. תאורה פונקציונלית מספקת את צרכי האנשים השוהים (או עובדים) בתוך מבנים או מחוצה להם תוך התאמה לחלל, בעוד התאורה הדקורטיבית תלויה בסביבה ומיועדת בעיקר להשלמת האווירה ועיצוב החלל. מבחינה אנרגטית ההתייחסות לתאורה פונקציונלית ההכרחית תהיה שונה מאשר לתאורה דקורטיבית, למרות שתאורה פונקציונלית יכולה להיות מינימלית או אופטימלית מבחינת האיכויות. עם תאורה מינימלית הכרחית נבצע את הפעילויות בבטחה; עם התאורה היא אופטימלית נרגיש טוב ונעים, נתמצא היטב בחלל, יכולת הריכוז תשתפר ופריון העבודה יגדל. מטרת תקציר זה הינה להביא לתאורה חשמלית פונקציונלית ויעילה, בטיחותית ונכונה.

## 1. אור וראייה

אחד החושים החשובים ביותר של האדם הוא חוש הראיה. מרבית המידע מגיע אלינו באמצעות חוש זה, ובלעדיו יש לנו קושי גדול בביצוע פעולות פשוטות. לצורך הראיה, אפילו חלקית, נדרשת תאורה, כאשר עוצמתה נקבעת בהתאם לסוג הפעולה אותה אנחנו מעוניינים לבצע. אם נדרש להבחין בפרטים קטנים, נעדיף עוצמה גבוהה, וכאשר נרצה רק לחלוף במהירות באזור מסוים - נזדקק לתאורת התמצאות בלבד. במידה ועוצמת ההארה לא מספיקה - נתאמץ יותר ונתעייף יותר ובמהירות. תאורה חזקה מידי עלולה לגרום לסנוור.

עד לפני 80,000 שנה, אז למד האדם הניאנדרטלי להצית את האש ובכך לשלוט עליה, היה האדם תלוי במקורות אור טבעיים, בעיקר בשמש. מהמאה ה-19 אנחנו מכירים שימוש במנורות שמן או גז, שבזמנו היוו מהפכה של ממש. השימוש בנורות של אז היה לא נוח ומסוכן. רק לאחר 1879, עם פיתוח הנורה החשמלית ע"י תומס אדיסון בארצות הברית, הפכה התאורה לדבר מובן מאליו: יעיל, נפוץ, הכרחי ונעים. אומנם הזכות על ההמצאה שמורה לאדיסון, אך הממציא הראשון הידוע הוא שען גרמני בשם גיובל (Göbel). במקביל לאדיסון עבד גם ממציא נוסף, סוואן (Swan) הבריטי, שהתעכב ברישום הפטנט ולכן לא התפרסם.

### 1.1 השפעות שליליות מקרינה אורית ומתאורה לא נכונה

בני אדם נחשבים ליונקים יומיים - כאלה שהשעון הביולוגי שלהם כפוף לסיבוב היומי של כדור הארץ ושיכולותיהם מותאמות לתפקוד ביום ולמנוחה בלילה. על פי מחקרים רבים נמצא כי ייצור המלטונין, הורמון האחראי על השעון הביולוגי על פיו מתפקד האדם, מושפע מחשיפה לאור, במיוחד בעל אורכי גל קצרים (בתחום הכחול). אחד התפקידים של המלטונין, לו יש קשר ישיר לשעון הביולוגי של האדם- הוא לשמש כנוגד חמצון חזק, שהוא בעצם חומר נוגד סרטן.

במשך אלפי שנים השתמשו בני האדם באש כדי לאפשר להם להפוך את הלילה ליום ולעבוד, לבלות, ליצור ולהילחם. זה היה אמנם מרשים, אבל בה בעת מוגבל למדי. עם זאת, במאה השנים האחרונות שינה השימוש בנורות חשמל את המצב. בעידן שלנו בלילה יש כיום הרבה מאוד אור בניגוד לעבר: טלוויזיה, מחשב, נורות פלורסנט, אור שחודר מהרחוב- רובו בתחום הכחול של הספקטרום.

על פי דווחים רבים המצאות שעות ארוכות, במיוחד בשעות הלילה, בחללים בהם מתקן התאורה המבוסס על נורות בעלות ספקטרום אור עם עוצמות חזקות בתחום הכחול של הקרינה הנראית עלול להשפיע על קצב השעון הביולוגי, תהליך ייצור המלטונין, איכות השינה והשפעות בריאותיות נוספות. יחד עם זאת, טרם הוגדר סף החשיפה (משך החשיפה ועוצמתה) אשר לגביה קיים חשש להשפעה זו.

בשנים האחרונות, בהתבסס על המחקרים והניסיון המצטבר, גברה המודעות להשפעת התנאים השוררים בבניין על בריאות האדם, רמת הריכוז ויכולתם לבצע משימות לאורך זמן. התסמינים אשר דווחו, כגון כאבי ראש, עייפות, גירוי בעניים או עיניים יבשות, לעיתים גם תלונות "אין לי אוויר" או "אין פה מספיק חמצן" משקפים את תחושת אי הנעימות אותה מקובל לכנות 'תסמונת הבניין החולה' (SBS). לתחושה הזו תורם גם מתקן תאורה אשר מתוכנן בצורה לא מתאימה או לא מספיק טובה.

כאשר התאורה לקויה מבחינה ראייתית, היא מקשה על ביצוע המשימות, עלולה להביא לעייפות ראייתית ובתנאים מסוימים עלול אף להיגרם נזק בריאותי. לתאורה טובה, טבעית או חשמלית, תפקיד חשוב בבריאות ובטיחות האדם. היא עוזרת לנו לראות סכנות ומכשולים ומקטינה עייפות ראייתית ואי נוחות הקשורה בה.

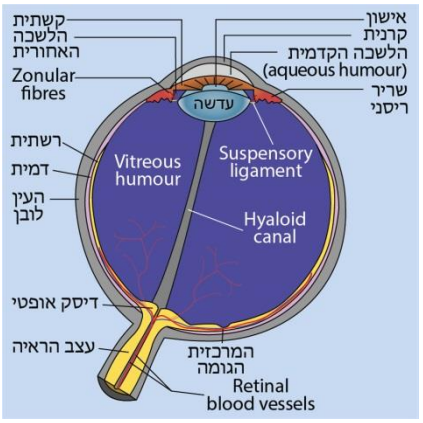
תאורה לקויה עלולה לבטא אחד או יותר מהמאפיינים הבאים:

- תאורה לא מספיקה: כאשר אין מספיק אור קשה להבחין בפרטים הנדרשים על-פי הצרכים. דבר זה העלול להביא לעומס יתר לשרירים האחראים על הסתגלות העין;
- עוצמת הארה גבוהה מידי: גם כאן עלול להיווצר עומס יתר על פעילות העין וכל מערכת הראיה
- סנוור או בוהק: זוהי תופעה המתרחשת כאשר חלק אחד של שדה הראיה מואר חזק יותר מחלקו האחר. ישנם סוגים שונים של סנוור, חלקם מפריעים יותר, חלקם פחות.

ישנם מקורות אור הפועלים בשיטות שונות, גופי תאורה המכוונים את האור בהתאם לצורך, תקנים המגדירים את איכות התכנון, שיטות תכנון והתקנה. עם התפתחות טכנולוגית ופתוח סוגים רבים של מקורות האור השונים, תכנון התאורה הפך למקצוע הנדסי בפני עצמו, הרבה מעבר "לכמה מנורות נשים פה?".

## 1.2 תהליך הראיה ומבנה העין

מערכת הראיה שלנו היא מערכת מורכבת, המחברת בין העין הקולטת את האור המוחזר מחפץ מסוים למוח המפרש את התמונה הנקלטת. קרני האור המוחזרים מהאובייקט, חודרים פנימה לתוך העין דרך הקרנית והעדשה ומגיעים לרשתית. באיור יד-1 אנו רואים את המבנה הסכמתי של העין. קרני אור הפוגעות ברשתית מעוררות תגובה כימית בקולטנים. המידע מועבר באמצעות אותות חשמליים למוח, שם מתקבלת תחושת הראייה.



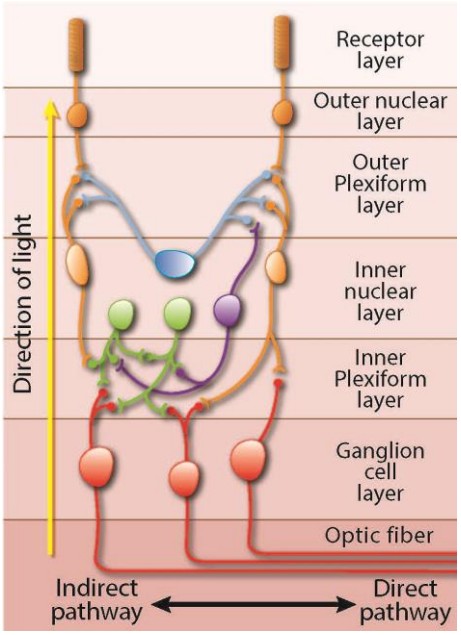

**איור יד-1.**

**מבנה עקרוני של העין**

העין מאתרת ומתמקדת על האובייקט, מופעלים שרירים ומותאם קוטר העדשה וגודל האישון. ככל שיש יותר אור - האישון קטן, וככל שהעצם שאותו רואים מרוחק יותר - קוטר העדשה קטן.

על רשתית העין ממוקמים מקלונים וחרוטים המהווים את החיישנים, להם רגישות שונה לעוצמה ולצבע של האור הנקלט (איור יד-2). בראיית לילה (ראיה סקוטופית) התפקיד העיקרי יהיה למקלונים הממוקמים בשטח גדול יחסית בפרפריה של העין ובזווית רחבה, ולהם סף רגישות נמוך יחסית. לעומתם, בראיית יום (הפוטופית) יהיה תפקיד עיקרי לחרוטים הממוקמים בזווית צרה (ממורכזים יותר) ולהם סף רגישות גבוה יחסית. אי לכך, קיים הבדל בין ראית יום לראיית לילה ובלילה אנו כמעט ולא מבדילים בגוונים.

בנוסף, ישנם תאי גנגליון המקבלים מידע חזותי מתאים קולטי אור ברשתית, ומעבירים אותו הלאה מוח דרך האקסונים שמרכיבים את עצב הראייה. חלק קטן מתאי הגנגליון הם תאי גנגליון קולטי אור המכילים פיגמנט-אור משלהם שנקרא מלאנאופסין, שהופך אותם לרגישים ישירות לאור. הם מקרינים לגרעין העל-תצלובתי דרך המסילה הרשתיתית-היפותלאמית ובכך מווסתים את השעון הביולוגי של הגוף.



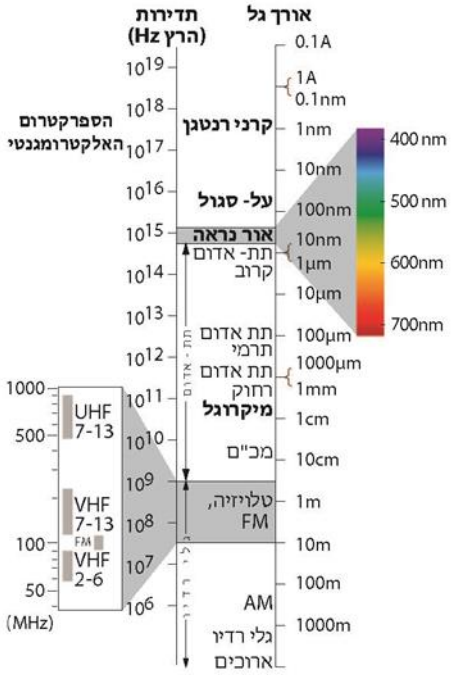

**איור יד-2:**

**מבנה עקרוני של רשתית העין**

יד

## 1.3 ספקטרום הקרינה ורגישות העין

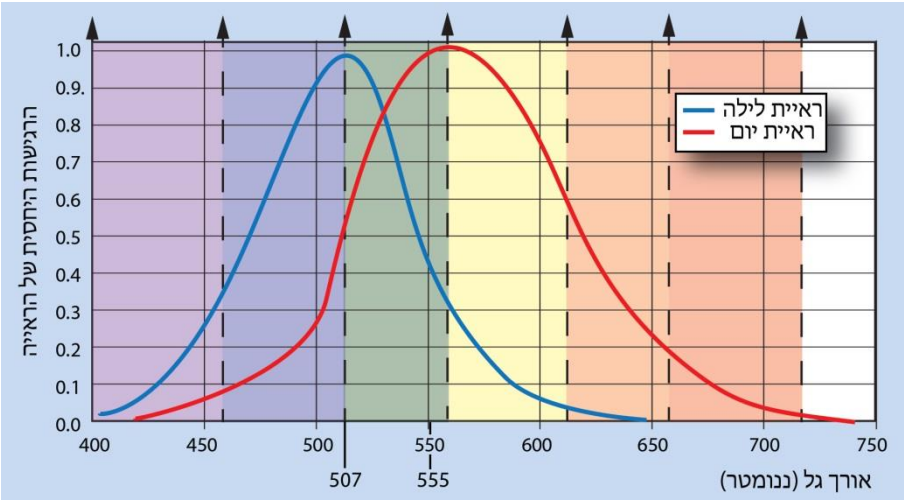
אור הוא למעשה קרינה אלקטרומגנטית בתחום אורכי גל מסוים אשר העין האנושית מסוגלת לחוש בו. גבולות התחום הנראה אינם מוגדרים היטב, כיוון שהם תלויים ברגישות העין, השונה מאדם לאדם, אך מוסכם כי הם בערך 380-780 ננומטר (איור יד-3). לכל אורך גל צבע אופייני משלו. למשל: קרינה בעלת אורך גל של 700 ננומטר יוצרת תחושה של צבע אדום.




**איור יד-3.**

**הספקטרום האלקטרומגנטי ואור נראה.**

כאשר דנים בתאורה ובתחושה שלנו, יש להתחשב גם ברגישות היחסית של העין לקרינה באורכי גל שונים. באיור יד-4, מובא עקום סטטיסטי לרגישות העין, המוגדרת כיחס בין עוצמת תחושת העין לאורך גל מסוים לבין עוצמת תחושת העין לגל ירוק. הרגישות יורדת לאפס בשני קצוות הספקטרום - האולטרא-סגול והאינפרא-אדום. כך, למשל, העין רגישה פי 7 (!) לאור ירוק מאשר לאור אדום. אולם, אם נשתמש באור ירוק בלבד, ייראו כל העצמים 'ירקרקים' ולא כפי שאנו רגילים לראות אותם. רגישות העין בראיית לילה (הנקראת ראיה סקוטופית) שונה מזו של ראיית יום (הנקראת פוטופית) ולכן העקום מוזז מעט.




**איור יד-4. עקומות רגישות יחסית של העין לאור ביום (אדום) ובראיית לילה (כחול).**

# 2. יסודות תורת המאור

בכדי להבחין בתכונות של מקורות אור שונים, אנו נדרשים למספר מדדים:

## 2.1 שטף האור, עוצמת הארה ובהיקות

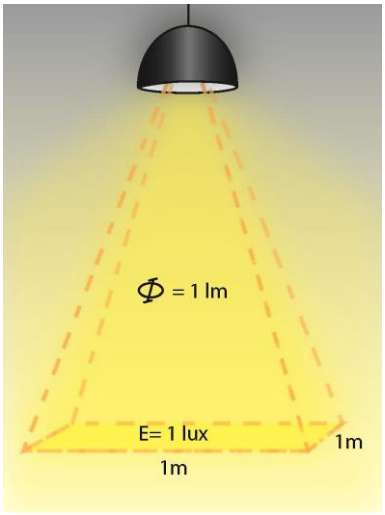
שטף האור של מקור אור מוגדר ככמות האור הנפלטת ממנו במשך שניה אחת. שטף האור תלוי רק במקור האור עצמו, ואינו מלמד אותנו דבר על כמות האור הנמדדת במרחק מסוים ממקור האור או על מאפייני האור. את עוצמת מקור האור מסמנים ביחידה "לומן" (lumen, lm).

עוצמת ההארה הנמדדת בנקודה מסוימת אינה תלויה בתכונות המשטח, אלא רק בשטף האור ליחידת שטח, הנמדד ביחידות של לומן למ"ר, המכונות גם לוקס (lux):

$$E = \frac{\Phi}{A}$$

מאחר ושטף האור אינו מתחלק באופן שווה על פני המשטח, ניתן גם להתייחס לרמת ההארה הממוצעת (איור יד-5):

$$E_{av} = \frac{\Phi}{A}$$




**איור יד-5.**

**עוצמת הארה ושטף אור**

את עוצמת ההארה בנקודה כלשהי ניתן למדוד ע"י מכשיר מדידה הנקרא מד אור או לוקסמטר (צילום יד-1), הבנוי מתא פוטואלקטרי המייצר מתח יחסי לעוצמת ההארה הנופלת על החיישן המחובר אליו.

**צילום יד-1.**

**דוגמא למד-אור**

הבהיקות הפוטומטרית (הלומיננס) היא היחס בין עוצמת האור המגיעה מגזרה מסוימת או ממשטח מסוים לבין השטח של האלמנט המאיר. הבהיקות נמדדת ביחידות של קנדלה למ"ר ($candela/m^2$). הבהיקות מושפעת הן מעוצמת ההארה והן מתכונות המשטח המחזיר, ותלויה במיקום המרחבי שבו היא נמדדת. היא אינה תלויה בהסתגלות העין לעוצמת ההארה הכללית בשדה הראיה.

## 2.2 טמפרטורת צבע ומסירת צבע

הצבע של מקור אור הוא ביטוי לאורך הגל של הקרינה, התלויה בטמפרטורה של הגוף הקורן עצמו. בפועל, מקורות אור פולטים קרינה בעוצמה שונה בטווח של אורכי גל. מטעמי נוחות מתארים את גוון האור באמצעות טמפרטורה מייצגת הנמדדת בקלווין (K) המכונה בדרך כלל 'טמפרטורת הצבע' 'correlated color temperature'. טמפרטורת צבע גבוהה מתאימה לגוונים תחום הלבן והכחול (התחום הקר), בעוד שטמפרטורת צבע נמוכה יחסית מתאימה לגווני האדום והכתום (התחום החם).

**טבלה יד-1: הטמפרטורה של מקורות אור שונים**

| מקור האור | טמפרטורה (K) |
|---|---|
| רקיע כחול | 15,000 |
| שמש (צהריים) | 5,000 |
| נורת פלואורסצנט | 2,700-5,500 |
| נורת ליבון | 2,500 |
| נר | 1,100 |

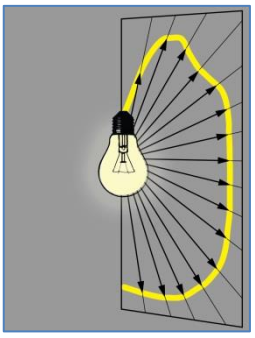
צבע החפצים שאנחנו רואים נקבע הן על ידי צבע האור המוקרן עליהם והן על ידי תכונות פני השטח שלהם עצמם. באור שמש אנו רואים אחרת מאשר באור של נורת פלואורסצנט. לדיוק בראיית הצבע יש חשיבות בתעשיות מסוימות, כגון תעשיית הדפוס או האלקטרוניקה, אך צבע האור הוא גם מושא להעדפות אישיות. מדד מסירת הצבע (color rendering index), המסומן CRI או Ra, משקף את הרכב צבע מקור האור הנמדד יחסית להרכב שהוגדר כסטנדרטי. ערכו של המקדם יכול לנוע בין 1 ל-100, וככל שערכו מתקרב ל- 100, כך צבע המקור קרוב יותר לצבע נורת ליבון שנקבעה כמקור תקני לצורך זה. טבלה יד-2 מציגה ערכים אופייניים של המדד עבור מספר סוגים של נורות חשמל:

**טבלה יד-2. מקדמי מסירת צבע אופייניים של סוגי נורות שונים**

| התאמת צבע | CRI | נורות אופייניות |
|---|---|---|
| מעולה (Very good) | 90-100 | נורות פלואורסנטיות משופרות, נורות הלוגן |
| מעולה (Very good) | 80-89 | נורות פלואורסנטיות נורות מטל |
| טובה (Good) | 60-79 | נורות פלואורסנטיות סטנדרטיות |
| בינונית (Satisfactory) | 40-59 | נורות כספית |
| ירודה (Poor) | 20-39 | נורות נתרן |

## 2.3 פיזור האור במרחב

גופי תאורה חשמליים אינם פולטים אור בעוצמה שווה בכל המרחב. את התפלגות עוצמת האור לפי הכיוון מתארים בדרך כלל בעזרת עקומה פוטומטרית בקואורדינטות פולריות. עוצמת האור איננה תלויה במקלט אלא במקור בלבד. נסמנה כווקטור היוצא מנקודה בה ממוקם מקור האור ומצביע לכיוון בו מכוון האור. כאשר נחבר את קצוות הווקטורים במישור מסוים נקבל עקומה פולרית, המייצגת פיזור אור ממקור העומד במרכז מערכת הקואורדינטות בה ממוקם המקור. זוהי עקומה פוטומטרית של מקור (איור יד-6).



איור יד-6.

דוגמא לעקום פוטומטרי של מקור אור

### 2.4 נצילות אורית

המרת אנרגיה מלווה תמיד בהפסדים. לכן, האור המופק בנורה יהיה שווה רק לחלק מהאנרגיה החשמלית המושקעת בה (היתרה הופכת לחום). למשל: בנורת ליבון רגילה רק כ- 10% מתוך האנרגיה החשמלית המושקעת הופכת לאור נראה!

היחס בין שטף האור של מקור אור (הנמדד בלומן, $\Phi$) לבין צריכת האנרגיה שלו (בואט, $P$) הוא הנצילות האורית.

$$n_E = \frac{\Phi}{P}$$

ככל שהנצילות גבוהה יותר, כך מקור האור יעיל יותר. לדוגמא, הנצילות האורית של נורות ליבון היא כ-13-15 לומן לואט, בעוד שנורות לד חדישות עשויות להגיע לנצילות גבוהה כמעט פי עשר: כ-100-120 לומן לואט או יותר.

## 3. מקורות אור

ישנן מספר שיטות להפקת האור הנראה (שהוא חלק קטן מתוך כל הקרינה האלקטרומגנטית), העיקריות שבהן:

א. נורות ליבון, אשר בהן מחומם תיל מתכתי דק בעל התנגדות חשמלית גבוהה עד לטמפרטורה שבה החומר פולט אנרגיה בתחום הנראה.

ב. נורות פריקה, אשר בהן הזרם החשמלי גורם לפריקת גז הנמצא בשפופרת זכוכית. במשפחת נורות הפריקה נכללות הנורות הפלואורסנטיות לסוגיהן (בהן הקרינה הראשונית היא באור בלתי נראה), נורות הכספית, נרות מטל-הלייד ונורות הנתרן.

ג. נורות לד, שהן התקנים אלקטרוניים מוליכים למחצה (עקרון הפעולה הבסיסי שלהן יוסבר בהמשך).

ההבדלים הבולטים בין הקבוצות הם באורך חיי הנורה, איכות וצבע האור והנצילות האורית.

אורך חיי נורה (משך חיים) מושפע מגורמים רבים: מתח הכניסה ויציבותו, טמפרטורת הסביבה או מספר הדלקות. הוא אינו מוגדר חד-משמעית ע"י היצרנים השונים. בארצות הברית מקובל להגדיר את משך החיים כממוצע סטטיסטי של משך פעולת הנורות (כלומר, משך הזמן אשר אחריו יפעלו פחות מ- 50% מהנורות).

חלק מהנורות, כגון נורות ליבון ונורות הלוגן, נדלקות בעזרת חיבורם הישיר לרשת החשמל. חלקן, כגון נורות הלוגן למתח נמוך, מתחברות דרך שנאי. רוב נורות הפריקה יידלקו רק בעזרת חיבורן לרשת החשמל דרך משנק (ballast) ולפעמים דורשות גם מצת. לכל סוג של נורה מתאים סוג מסוים של משנק, אשר לא ניתן להחליף ללא התאמה מדויקת המוגדרת ע"י יצרן הנורות (צילום יד-2).

**צילום יד-2.**
**דוגמא למשנק לנורה פלואורסצנטית.**

המשנקים הקיימים יכולים להיות גם הם מסוגים שונים: אלקטרוניים או אלקטרומגנטיים. למשנקים אלקטרוניים ישנם יתרונות רבים (חסכון אנרגטי, משך חיי הנורה ארוך יותר, משקל קטן יותר ועוד). בדרך כלל, המשנק האלקטרוני יהיה יקר ממשנק אלקטרומגנטי, אך ההשקעה בו תחזיר את עצמה תוך פרק זמן סביר.

רוב סוגי הנורות ניתנות היום לעמעום (dimming) - חלקן בצורה פשוטה וזולה, כגון נורות ליבון והלוגן, וחלקן, כדוגמת נורות פלואורוסצנטיות, רק בעזרת ציוד אלקטרוני ייעודי. בדרך כלל, עמעום מאריך את משך החיים של הנורה וחוסך בחשמל, אך עלול לשנות את צבע האור הנפלט.

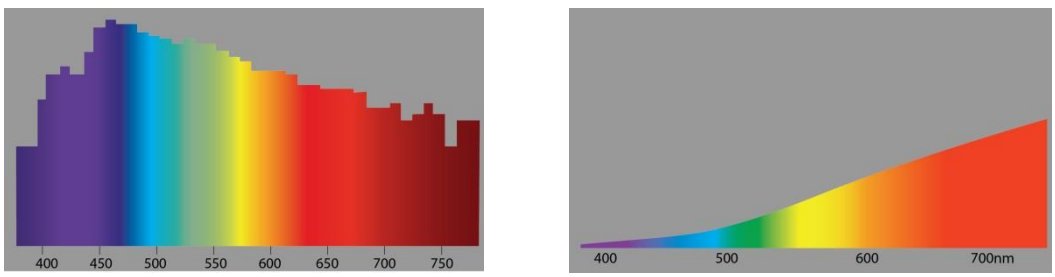
## 3.1 נורות ליבון

### א. נורות ליבון רגילות

נורות ליבון רגילות מקובלות היום כאמצעי מאור בבתי מגורים. אלה הם מקורות אור נפוצים וזולים, וישנם סוגים רבים מהם (צילום יד-3). ספקטרום האור הנפלט מנורות אלה רציף ודומה מאוד לספקטרום האור הטבעי (איור יד-7). צבע האור נעים, ומקדם העברת הצבע גבוה יותר מאשר מרבית סוגי הנורות (90-100). הנורות ניתנות לעמעום בעזרת עמם פשוט. החסרונות העיקריים של נורות הליבון הם משך חיים קצר יחסית (כ-1,000 עד 2,000שעות) ונצילות אורית נמוכה מאוד (כ-13-15 לומן לואט).

**צילום יד-3.**

**דוגמאות לנורות ליבון.**




**איור יד-7. ספקטרום נורת ליבון (ימין) לעומת ספקטרום אור יום (שמאל).**

### ב. נורות הלוגן

נורת הלוגן הינה נורת ליבון, אשר בתוך אגס הזכוכית שלה נוספה כמות קטנה של אדי יוד או גז הלוגן אחר לשיפור תכונותיה. זכוכית רגילה אינה עמידה בטמפרטורת העבודה הגבוהה של נורת הלוגן ולכן המעטה עשוי זכוכית קוורץ העמידה יותר בחום. גם נורות הלוגן מיוצרות במגוון גדלים וצורות (צילום יד-4).

**צילום יד-4. דוגמאות לנורות הלוגן**

יתרונותיהן של נורות ההלוגן על פני נורות ליבון רגילות רבים: אורך חיים גדול יחסית (כ-2000 שעות), נצילות אורית גבוהה בהשוואה לנורות הליבון (כ- 40-20 לומן לואט), אור לבן יותר וממדים קטנים יותר. לעומת זאת, לנורות הלוגן גם חסרונות: מעטה הזכוכית רגיש; הנורה מגיעה לטמפרטורה גבוהה יחסית בזמן העבודה; הספקים גבוהים. אף כי הנצילות האורית של נורות הלוגן גבוהה מזו של נורות ליבון, היא נמוכה משמעותית מזו של נורות פריקה.

מאחר ונורות הליבון ונורות ההלוגן הן בעלות נצילות אורית נמוכה יחסית, וצורכות אנרגיה רבה, נחקקה ב-2011 תקנה המגבילה יבוא ו/או שיווק נורות בהספק מעל 60 ואט, אלא אם יעילותן האנרגטית עונה על דרישות התקנה (טבלה יד-3).

**טבלה יד-3. דרישות ליעילות אנרגטית של נורה חשמלית - ליבון (תקנה 7024)**

**דרישות ליעילות אנרגטית של נורה**

| סוג נורה | קריטריון ליעילות אנרגטית |
|---|---|
| נורת ליבון ונורת הלוגן בהספק העולה על 60W | $[W/((0.88*\sqrt{f})+0.049*f)]<0.8$<br>או לפחות דרגת "C" לפי התקן |

הערה: בטבלה לעיל $f$ = שטף אור של הנורה (לומן)
W = הספק המבוא של הנורה (ואט)

### 3.2 נורות פריקה

נורות פריקה פועלות על עקרון הולכה בגז המלווה בקרינה בתחום הנראה. האור מופק ע"י מעבר זרם חשמלי דרך גז מסוים בשפופרת קטנה הממוקמת בתוך מיכל זכוכית גדול יותר. האור המתקבל הינו חד-גווני (בעל אורך גל אחיד) ותלוי בסוג הגז הנמצא בשפופרת הפנימית. בצילום יד-5 מופיעות נורות פריקה שונות. נורות פלואורסנטיות הן תת-קבוצה של נורות כספית, בהן ההתפרקות היא בתחום של האולטרה-סגול והחומר הפלואורסנטי המצפה את השפופרת מבפנים הוא זה שפולט את האור. כל נורות הפריקה מצטיינות בנצילות אורית גבוהה ובאורך חיים גבוה. השימוש בנורות פריקה נפוץ במתקני תאורה שונים: תאורת רחובות, כבישים, חניונים, תאורת מבני תעשייה, מגרשי ספורט ותאורת ביטחון. באחדות מנורות הפריקה ניתן להשתמש גם בתאורת פנים.

**צילום יד-5. דוגמאות של נורות פריקה.**

בהבדל מנורות ליבון ונורות הלוגן, נורות הפריקה מתחברות לרשת החשמל בעזרת ציוד הדלקה: משנק (צ'וק) ולפעמים גם מצת (סטרטר). שילוב והתאמה לא נכונים של ציוד הדלקה עלול להוביל לתופעות בלתי רצויות רבות הפוגעת באיכות התאורה ובאיכות מערכת החשמל ובבטיחותם של המשתמשים בהם, החל משינוי צבע האור של הנורה , קיצור אורך חייה, התחממות יתר או אף התנפצות, או תקלות של המשנקים.

למרבית נורות הפריקה חיסרון בולט בשימוש ביתי: לאחר כיבוי או נפילת מתח רגעית, ניתן להדליקן מחדש רק לאחר 3-20 דקות (לפי סוג הציוד).

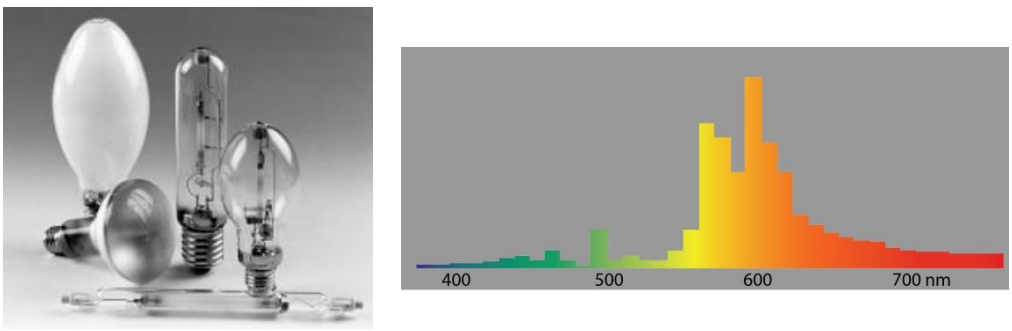
**א. נורות פריקה בלחץ גבוה**

### נורות נתרן

פעולת נורת נתרן בלחץ גבוה (נל"ג) High Pressure Sodium Lamps מבוססת על פריקת אדי נתרן בשפופרת הפנימית שבתוך המעטה החיצוני (איור יד-8). ישנן שתי צורות עיקריות של נורות נל"ג: נורות בצורת שפופרת ונורות בצורת אגס.

יתרונן העיקרי של נורות הנל"ג הוא בנצילותן הגבוהה יחסית. שטף האור של נורות אלה אינו תלוי בטמפרטורת הסביבה וניתן להצתה גם בטמפרטורות נמוכות בהרבה מנקודת הקיפאון (עד למינוס 20 מעלות). חסרונן הינו הצבע הצהוב (או הכתום, כ- 2100 מעלות קלווין) של האור ולכן אין משתמשים בהם במקומות בהם ישנה חשיבות לראיית צבעים נכונה.

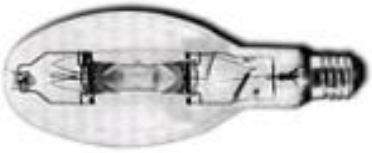
השימוש העיקרי של נורות אלה הוא בתאורת חוץ והארת כבישים.

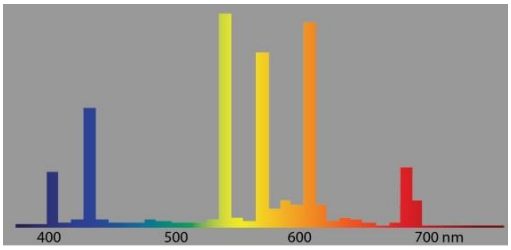



**איור יד-8. ספקטרום נורת נתרן טיפוסית (מימין), מבחר נורות טיפוסיות (שמאל).**

### נורות פריקה באדי כספית

פעולת נורת כספית (mercury lamps) מבוססת על פריקת אדי הכספית שבשפופרת הפנימית (איור יד-9). הנצילות האורית ומקדם מסירת הצבע של נורות כספית נמוכים יחסית לנורות פריקה אחרות. חסרונן הנוסף הוא גוון כחלחל ירקרק של האור.



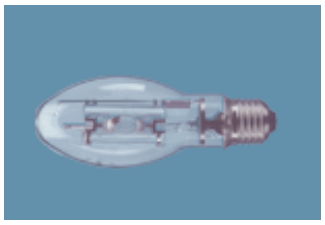


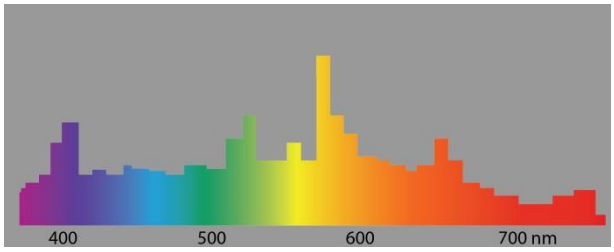

**איור יד-9. ספקטרום נורת כספית טיפוסית (ימין), נורה טיפוסית (שמאל)**

### נורות מטל-הלייד (metal halide)

נורות אלה שייכות לקבוצת נורות כספית (איור יד-10). לשם העלאת הנצילות ושיפור בצבע וביציבותו, מוסיפים תרכובת של מתכות עם הלוגנים לנורות כספית. חסרונן העיקרי (לעומת יתרונותיהן הרבים) הינו מחירם הגבוה יחסית.

חלק מנורות מטל-הלייד מושפעות בעיקר ממצב העבודה (אופקי או אנכי), פחות מטמפרטורת הסביבה או מהמתח.






**איור יד-10. ספקטרום נורת מטל-הלייד טיפוסית (ימין), נורה טיפוסית (שמאל)**

**ב. נורות פלואורסצנטיות**

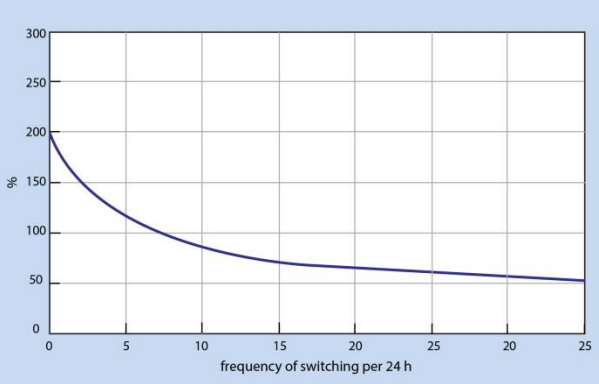
נורות פלואורסצנטיות הן נורות כספית (נורות פריקה) בלחץ נמוך. שפופרת הזכוכית מצופה בחומר פלואורסנטי הממיר קרינה בתחום אולטרה-סגול הנובע מהתפרקות של אדי כספית לקרינה אורית (צילום יד-6). גוון האור תלוי בסוג החומר הפלואורסנטי: צהוב יחסית (warm white), לבן יחסית (cool white) ואפור יחסית (daylight).

**צילום יד-6.**

**מגוון נורות פלואורסצנטיות**

כינוי הנורות מתייחס להיקף שלהן ביחידות של 1/8 אינץ'. ישנן נורות בקטרים שונים: 38 מילימטר (T12), 26 מילימטר (T8), ו- 16 מילימטר (T5). הנורות הנפוצות ביותר היום בארץ (2013) הן נורות T5, להן נצילות אורית גבוהה יחסית, משך חיים ארוך ומקדם העברת צבע (CRI) גבוה. הנורות האחרות יוצאות בהדרגה משימוש.

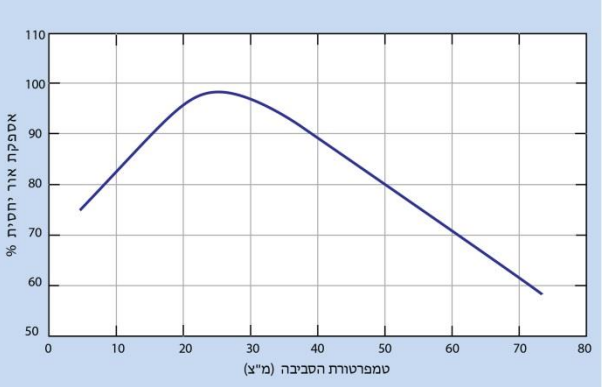
תדירות ההדלקות משפיעה על אורך חיי הנורות הפלואורסנטיות. אם נניח כי מספר ההדלקות הממוצע הוא כ-7 פעמים ביממה, הרי שהדלקה תכופה יותר עלולה להוריד את אורך החיים עד כדי חצי, בעוד שהפחתה למינימום עשויה אף להכפיל את מספר שעות הפעולה. ניתן לראות את הקשר בגרף המופיע בתרשים יד-1 המתייחס לנורות פלואורסנט סטנדרטיות:




**תרשים יד-1:**

**השפעת תדירות ההדלקה על אורך חיי נורת פלואורסצנט**

תפוקת האור של נורות פלואורסצנטיות מושפעת מטמפרטורת הסביבה, והיא מגיע לערך מרבי בטמפרטורה של כ-25 מעלות צלזיוס, ופוחתת כאשר הטמפרטורה גבוהה או נמוכה במידה ניכרת (תרשים יד-2).




**תרשים יד-2:**

**השפעת הטמפרטורה של הסביבה על תפוקת האור (היחסית) של נורת פלואורסצנט**

### ג. נורות פלואורוסצנטיות קומפקטיות

נורות פלואורוסצנטיות קומפקטיות, המוכרות יותר בכינוי נורות PL, הן נורות פלואורוסצנטיות 'מכופפות'. ישנם סוגים רבים של נורות אלה, הנבדלות באורכן, בקוטר השפופרת, במספר הכיפופים ובצורת הכיפוף (ישר או ספירלי) - ראו צילום יד-7. הנצילות האורית של נורות PL גבוהה יחסית לנורות ליבון, אך נמוכה במעט בהשוואה לנורות פלואורסנט ישרות ('רגילות'). רוב נורות הפלואורסנט ניתנות לעמעום בעזרת משנק מתאים.

**צילום יד-7. נורות פלואורסצנטיות קומפקטיות**

גם במקרה של נורות פלואורסצנטיות על סוגיהן מצא המחוקק לנכון להגביל את היבוא, היצוא והשימוש בנורות שיעילותן פחותה יחסית ובשנת 2012 נחקקה תקנה נוספת המסדירה את הנושא (טבלה יד-4):

**טבלה יד-4. דרישות ליעילות אנרגטית של נורה חשמלית - פלואורנית.**

**תוספת**

(תקנה 2)

**דרישות ליעילות אנרגטית של נורה**

| סוג נורה | קריטריון ליעילות אנרגטית |
|---|---|
| נורה פלואורנית בכל הספק חשמלי | $W \leq (0.24 * \sqrt{f}) + 0.0103 * f$ |

בטבלה לעיל –
$f$ - שטף אור של הנורה (לומן)
W = הספק המבוא של הנורה (ואט)

על פי תקנה זו לא ניתן היום בישראל לייבא ו/או למכור נורות את כל הסוגים של נורות T8 פרט לנורות המשופרות (בחלק מההספקים). נורות פלואורסצנטיות מסוג T5- מתאימות לשימוש.

### 3.3 דיודות פולטות אור (Light Emitting Diodes – LED)

נורת לד הקרויה גם Solid State Lighting היא למעשה מקור אור אלקטרוני בצורת התקן מוליך למחצה (semiconductor) אשר פולט אור במעבר של זרם חשמלי דרכו. בשונה מנורות אחרות, אין בנורת הלד גז או חוט להט והיא אינה בנויה משפופרת שבירה.

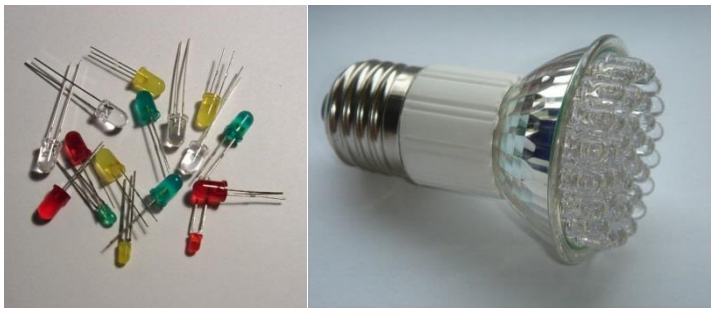
נורת הלד פותחה בשנות ה-60 של המאה ה-20. היישום הראשון שלה, על ידי חברת ג'נרל אלקטריק, היה כנורת סימון קטנה המיועדת להתקנים אלקטרוניים. תרכובת המוליך למחצה הראשונה אשר שימשה לייצור LED הייתה גליום ארסניד, אשר אפשרה להפיק אור אדום. כיום, ניתן לייצר נורות LED אשר יפלטו אור במגוון צבעים בתחום הנראה, בתחום התת-אדום ובתחום העל-סגול. הפיתוח של נורות בצבעי בסיס שונים – אדום, ירוק וכחול ( RGB) - מאפשר להפיק אור בכל צבע נדרש, כולל אור לבן. פיתוח דיודת אור בצבע כחול בבהירות גבוהה ביפן בתחילת שנות התשעים על ידי שוגי נאקאמורה (Nakamura) הביא בסוף המאה ה-20 לפיתוח של דיודות פולטות-אור לבנות (WLED) בעוצמה מספקת כדי לשמש לתאורה. כיום ניתן למצוא נורות LED בעלות תפוקת אור של מעל 140 לומן לכל ואט מושקע, ובתנאי מעבדה - אף יותר מכך.

היתרונות העיקריים של נורות אלה הם ניצולת האנרגיה הגבוהה ואורך החיים המשוער - עד 50,000 שעות פעולה בתנאי מעבדה. עם זאת, ראוי לציין כי שטף האור שנורות אלה פולט פוחת עם הזמן, ויש לבחון את נתוני היצרן לגבי קצב דעיכת שטף האור. כיוון שיש השפעה משמעותית לטמפרטורת הסביבה בה מופעלת נורת הלד- יש לבחון את נתוני טמפרטורת הסביבה אליה מתיחסים הנתונים. כמו כן, יש לבחון את אחוז שרידות המוצר בנתונים אלה.

התקני תאורת הלד רגישים מאוד לחום, המשפיע הן על שטף האור של הנורה והן על אורך החיים שלה. לכן התקני לד, לרבות גופי תאורה המבוססים על מקור אור לד, כוללים בדרך כלל רכיב לסילוק החום העודף בעזרת צלעות קירור (heat sink). האזור הרגיש ביותר בלד הינו אזור הצומת PN שבו מתבצעת המרת האנרגיה החשמלית לאור נראה לעין ולחום. כאשר טמפרטורת הצומת (Tj)

עולה, תפוקת האור ואורך החיים של ההתקן יורדים. שלושה פרמטרים משפיעים על טמפרטורת הצומת: עוצמת הזרם החשמלי, מערכת פיזור החום וטמפרטורת הסביבה.

החיסרון העיקרי של הנורות, מלבד מחירן (שהוא אמנם בירידה, אך עדיין גבוה ביחס לחלופות), הוא עוצמת הקרינה שלהן בתחום הכחול אשר דרוש על מנת לקבל אור לבן: ישנם מחקרים לא מעטים המזהירים אותנו בפני הקרינה בתחום זה, אשר עלולה לגרום לנזק ברשתית עקב חשיפה ממושכת. כמו כן, ממדיה הקטנים של הנורה מביאים לכך שהלומיננס שלה – 10,000 קנדלה/מ״ר ויותר - גבוה בהרבה מזה של נורת PL בעלת הספק אור דומה. בכדי למנוע סנוור, חשוב שגוף תאורה הנמצא בשדה הראייה יכלול גם מפזר מתאים.



**צילום יד-8. נורות לד שונות**

על אף שהטכנולוגיה הינה חדשה יחסית, נורות הלד הולכות ומבססות את מקומן ביישומי תאורה רבים, בשל יתרונותיהן הברורים: יעילות אורית גבוהה, אורך חיים גבוה, התאמת צבע גבוהה ומבנה שאינו נדרש לחומרים רעילים כגון כספית. יחד עם זאת יש לזכור כי לחלק הכחול של הספקטרום הנפלט מנורות הלד (כמו גם מנורות הפלואורסצנט) - השפעה על ייצור המלטונין בגוף האדם ועל פעילות הרשתית.

## 3.4 השוואה בין מקורות האור השונים

ההשוואה בין הנורות השונות תתמקד כאן בחמישה פרמטרים עיקריים: הספק, נצילות אורית, אורך חיים, טמפרטורת צבע ומקדם העברת הצבע. בטבלה יד-5 מובא פירוט לגבי מספר מצומצם אך מיצג של קבוצות עיקריות של מקורות אור. יש לזכור כי הנתונים המובאים כאן הם נתונים ממוצעים בלבד והם משתנים בהתאם לדגם מדויק של הנורות, בהתאם לסוג הציוד ובהתאם לחברה המייצרת אותן. כדי לדעת במדויק את הערכים הנדרשים יש לבדוק את הנתונים של היצרן.

העלויות של הנורות תלויות בסוג הנורה ובהספק שלה. ככלל, נורות ליבון הן הנורות הזולות ביותר, ואחריהן נורות הלוגן. קבוצת מחיר קצת גבוהה יותר כוללת את הנורות הפלואורסצנטיות, נורות מטל ונורות נתרן. נורות הלד, ככל שהן חדשות ומתקדמות יותר - עלותן גבוהה יותר.

לבחירה של נורה מתאימה יש לבחון את הפרטים הבאים:

- יעוד הנורה והתאמתה לגוף תאורה עם האופטיקה הנדרשת
- האם ישנה חשיבות למסירת צבע טובה
- השקעה ראשונית והוצאות אחזקה (האם יהיה תקציב להחלפות הנורות בעתיד?)
- שטף האור המופק
- הנצילות האורית
- ממדי הנורה
- חסרונות (הבהוב, חום, צבע וכו׳)
- התאמה לגופי תאורה שונים ולמקום ההתקנה

**טבלה יד-5. התכונות של נורות חשמל שונות**

| מקור אור | מקדם העברת צבע [CRI] | טמפ' צבע [K] | אורך חיים[128] ['000 hours] | נצילות אורית [lm/W] | מחיר | שימושים עיקריים |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ליבון | 100 | 2,750 | 1 | 10-20 | $ | מגורים |
| הלוגן | 100 | 2,850 | 2-3 | 20-35 | $ | מגורים, דקורציה |
| פלואורסנט לינארי (T8) | 50-75 | 2,700-6,000 | 9 | 80-100 | $ | כללי |
| פלואורסנט לינארי משופר (T5, סדרה 800, LUMILUX) | 80-95 | 2,700-6,000 | 12 | 90-110 | $$ | כללי |
| כספית | 50-60 | 4,000 | 15 | 40-50 | $$$ | גינות |
| פלואורסצנט קומפקטי | 85 | 2,700-6,000 | 12 | 80-90 | $$ | כללי |
| מטל הלייד | 65-95 | 3,000-6,000 | 15 | 70-100 | $$$ | כללי |
| נתרן בלחץ גבוה | 25-50 | 2,000 | 25 | 70-140 | $$ | חוץ |
| LED | עד 85 | 2,500-5,000 | עד 50 | 20-240 | $$ | כללי |

הערה: יש להתייחס אל הנתונים על נורות הלד בטבלה בזהירות, מכמה סיבות:

א. ההתפתחות בתחום הזה מהירה מאוד בשנים האחרונות, והשינויים במאפייני הנורות עשויים להיות מהותיים

ב. טרם הוכח כי שיטת המדידה הקיימת לצבע מבטאת נאמנה את תחושותינו במקרה של נורות לד

ג. אורך חיים תלוי בציוד ההפעלה, זרם ההפעלה וכו'

ד. נצילות אורית שונה לגמרי בעבודה בתנאי המעבדה מעבודה ב"שטח" ובגוף התאורה

## 4. גופי תאורה

נורה מפיצה אור לכל הכיוונים. אם מבקשים לכוון את האור לאזור מסוים או לגזרה מסוימת, או, לחלופין, למנוע הארה של גזרה אחרת - יש להיעזר בגוף תאורה. גוף תאורה הוא מתקן חשמלי-אופטי הבנוי ממרכיב מכני, ממרכיב חשמלי וממרכיב אופטי. לכל אחד מהמרכיבים השפעה על יעילות המתקן כולו. קיים היצע גדול ומגוון של גופי תאורה בעלי עיצובים שונים, הספקים חשמליים שונים, עקומות פיזור אור שונות ויעילות אורית שונה.

### 4.1 בקרה על האור, נצילות גוף תאורה ועקום פוטומטרי

תפקידו של גוף תאורה הוא לאפשר שימוש יעיל בשטף האור הנפלט מהמקור בהתאם לצרכים שלנו. כיוון האור נעשה באמצעות רפלקטורים בעלי צורות שונות. רכיבים נוספים בחלק האופטי, כגון רפפות או עדשות מיועדים להקטין את רמת הסנוור והבוהק של מקור האור.

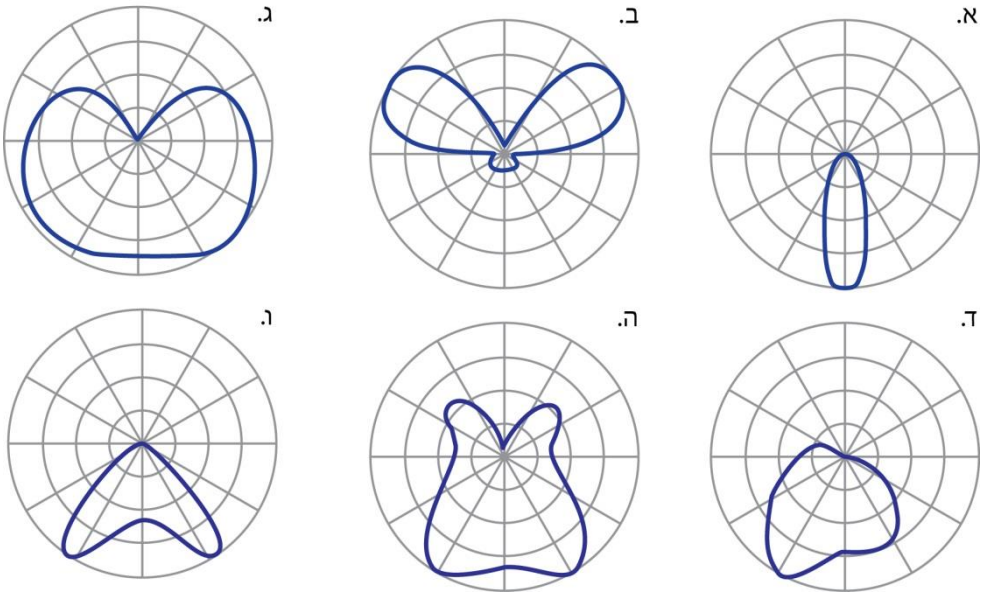
כדי לדעת כמה אור ייצא מתוך גוף התאורה (מסך כל הקרינה הנפלטת מהנורה המותקנת בו) נגדיר כאן נצילות גוף תאורה כיחס בין שטף האור המוקרן מגוף תאורה $\Phi_2$ לבין שטף האור המותקן בגוף $\Phi_1$ (סכום ערכי הלומן של הנורות המותקנות בו):

$$\eta_L = \Phi_2/\Phi_1$$

[128] אורך חיי הנורה תלוי מאוד בסוג ציוד ההפעלה/המשנק או הדרייבר. כך, למשל, בנורות פלואורסנט הוא יכול לנוע מ-8,000 שעות בלבד עד 24,000 שעות.

נצילות גבוהה יותר מבטיחה גוף יעיל יותר. יש לזכור כי ישנם מקרים שגוף בעל נצילות גבוה יותר יהיה גם מסנוור יותר.

בנוסף למידע "כמה אור יוצא מגוף התאורה" אנחנו זקוקים למידע על הכיוון אליו אור זה מופנה. העקום הפוטומטרי הוא עקום פולרי המתאר פיזור התפלגות אורית של גוף תאורה. הגוף ממוקם במרכז מערכת קואורדינטות והקו מתאר "כמה ולאן" מכוון האור. כאן ניתן לחלק למספר קבוצות שונות, אך החלוקה הברורה ביותר הינה לפי כיוון הקרינה - מעלה או מטה או שילובם (איור יד-11).




**איור יד-11. דוגמאות אופייניות לעקום פוטומטרי של גופי תאורה**

א) ספוט בעל פיזור צר; ב) ג"ת להארה בלתי ישירה (כלפי התקרה); ג) ג"ת ללא רפלקטור (כדוגמת נורה פלואורסנטית גלויה או מכוסה עם פרספקס); ד) ג"ת עם פיזור אור אסימטרי; ה) ג"ת להארה משולבת (ישירה ובלתי ישירה); ו) ג"ת לתאורת מחשבים ("פרבולי")

**א. גופים לתאורה ישירה**

בתאורה ישירה, כל שטף האור מוקרן כלפי מטה וכל המרחב אשר מעל לגוף התאורה נשאר חשוך (או מואר ע"י אור המוחזר מהקירות ומהרצפה). באיור יד-11 ו', מופיע עקום פוטומטרי של גוף מסוג זה. ניתן להתקין גופים אלה הן ישירות על התקרה (או שקועים בתוכה) או לתלותם על זרוע.

גופים אלה יעילים יחסית (הנצילות האורית 80-60 אחוז). הם מתאימים לכל מטרה. עם התפתחות השימוש במחשבים, פותחו רפלקטורים ורפפות מיוחדות (לוברים פרבוליים), המיועדים להפחית השתקפויות, סנוור ובהיקות. חסרונם העיקרי הוא בכך שכאשר רוב האור מכוון כלפי מטה, התקרה וחלקם העליון של הקירות נשארים פחות מוארים, כך שעלולה להיווצר תחושה לא נעימה של חלל חשוך יחסית.

**ב. גופים לתאורה בלתי ישירה (up-light)**

בגופים מסוג זה, כל שטף האור מוקרן כלפי מעלה ומוחזר מתקרת החדר (וחלקו העליון של הקיר). באיור יד-11 ב' מופיע עקום פוטומטרי של גוף מסוג זה.

תאורה זו מהווה, עקרונית, פתרון לכל בעיות הסנוור למיניהן, ולכן היא נעימה לעין. חסרונה בכך שפתרון זה מושג במחיר של יעילות אורית נמוכה: אם נניח כי התקרה לבנה (בעלת מקדם החזרה

גבוה של 70%), גוף התאורה עצמו יהיה בעל נצילות גבוהה של 60% וימוקם בגובה אופטימלי (כ-2/3 מגובה החדר) - הנצילות הכוללת של המתקן תהיה 40% בלבד! בדרך כלל הנצילות אף לא תעלה על 30%.

**ג. תאורה משולבת**

בחלק מהמקרים, מומלץ להשתמש בגופים לתאורה משולבת (כדוגמת איור יד-11 ה'), בתנאי שנתוני המקום מאפשרים זאת (גובה החדר וכו').

### 4.2 מיון גופי התאורה

גופי תאורה ניתן לחלק לקבוצות רבות. לכל קבוצה יהיו תכונות המאחדות אותה.

**א. גופים לתאורת פנים**

כחלוקה ראשונית ניתן לחלק את הגופים בהתאם ליעוד ולמטרה עבורה פותחו: פונקציונליים לעומת דקורטיביים. לקבוצה של גופי תאורה פונקציונליים ניתן לשייך גופי תאורה לתאורת מחשבים, גופי תאורה תעשייתיים, גופי תאורה להארת קירות וכו'. לקבוצה של גופים דקורטיביים יהיו גופים להדגשה, לצבע, לאווירה.

כמו כן, ניתן לחלק את הגופים בהתאם לצורת ההתקנה: שקועים בתקרה לעומת חיצוניים ותלויים, קבועים לעומת ניידים. בנוסף, ניתן לחלק בהתאם לצורת פיזור האור, מטרת ההארה וכו'.

**ב. גופים לתאורת חוץ**

בקבוצה זאת יהיו גופים בעלי מקדמי הגנה מתאימים (IP) לתנאי סביבה בה הם יותקנו בהתחשב בחשיפה שלהם לגשם, אבק וכו'.

## 5. תכנון תאורה

תכנון תאורה נכון משלב התייחסות לראייה האדריכלית של החלל ולמטרות הפונקציונליות של המקום. התכנון הוא שילוב של מדע ואומנות: בהיותו מדע - הוא דואג לכמות ואיכות של האור הנדרש. בהיותו אומנות - יוצר אווירה נעימה וחיובית. תכנון תאורה כמקצוע הנדסי משלב תחומים רבים: הנדסת חשמל, מתמטיקה, אופטיקה ועיצוב פנים. לא ניתן לתכנן מתקן תאורה טוב ללא התייחסות לחיסכון באנרגיה או לבטיחות. מתקן תאורה מתוכנן נכון ישלב בתוכו תאורת חירום ויהיה נוח לתחזוקה. תאורה משלבת ארגונומיה, תחום העוסק בארגון מקום העבודה או הפעילות של אנשים. ישנה חשיבות גדולה מאוד לנוחות ראייתית של האנשים, ליעילות ולבטיחות בה הם מבצעים את הפעילות.

בעת תכנון תאורה יש לזכור שעל התאורה להעניק תנאי ראות טובים ולמנוע מהעין עייפות יתר. בנוסף על 'הכמות' חשובה מאוד גם האיכות של התאורה המסופקת. לפיכך יש להתייחס לא רק לעוצמה, אשר אמורה להיות מתאימה לאופי הפעילות, אלא גם לכיוון האור, אחידותו וצבעו. בעת התכנון נלקחים בחשבון גורמים רבים, כגון כיוון הארה והצללות, הרכב ספקטראלי של מקורות האור ובהיקויות יחסיות. אזורים שונים בבניין יזכו לטיפול שונה, בהתאם לדרישות הפונקציונליות שלהם (כגון אזור עבודה, מטבח, חדר שינה, פרוזדורים, ספריה, משרד וכו'). אף כי יש התייחסות פרטנית לאזורים השונים, רצוי גם שיהיה קר ביניהם וקו מנחה כולל בתכנון.

לא ניתן להגדיר מתקן תאורה אידיאלי או 'נכון'. ככל פתרון הנדסי, מתקן התאורה יכול להיות מתוכנן ומבוצע בשיטות רבות: תאורה מקומית, תאורה כללית או שילוב ביניהן, תאורה ישירה או תאורה עקיפה, גופי תאורה שקועים בתקרה או תלויים במרחק מה ממנה. האילוצים המנחים אותנו בבחירה של פתרון יכולים להיות גם הם שונים: כלכליים, עיצוביים או קונסטרוקטיביים. תכנון מוצלח ייקח בחשבון שילוב של גורמים רבים: דרישות תפקודיות, דרשות ארגונומיה ופיזיולוגיה,

עיצוב המקום, מתקן חשמלי, מערכת תאורת חירום, עלות מתאימה, תחזוקה נוחה ועוד. השיקול הכלכלי יתייחס להשקעה הראשונית במתקן, למחיר הציוד הנלווה והנורות, למחיר האנרגיה החשמלית ולמחיר אחזקה והחלפה של אביזרים במערכת.

תהליך תכנון תאורה ייקח בחשבון את מבנה החלל עבורו מתוכנן המתקן, מערכי ריהוט ומבנה התקרה. לאחר התאמה ובחירת התקן הרלוונטי ייבחרו מקורות אור וגופים מתאימים למטרה שימוקמו בהתאם לחישובים פוטומטריים. תכנון נכון יתייחס לרכיבים המשפיעים על פיזור נכון של האור ועוצמתו, על אורך החיים, על בטיחות חשמלית ופוטוביולוגית ועל תחזוקה נוחה. יש להבטיח כי ניתן להגיע בקלות למתקן התאורה לצורך החלפת נורות וגופי תאורה, ניקוי שלהם או תיקונים. לבסוף, יש לוודא כי כל מערכות המבנה משולבות יחד ונבדקת התאמה ביניהן. כתבי כמויות ומפרטים מוגדרים נכון יהוו חלק חשוב בתכנון.

תכנון תאורה מקצועי מסתייע בחישובים ממוחשבים של תנאי התאורה, לרבות שימוש בתוכנות להדמיה מלאה של המתקן המתוכנן. הדבר הכרחי כאשר מדובר בתכנון תאורה פונקציונלית, אך פחות נדרש בתחום העיצובי. כאן מומלץ לערוך ניסויי תאורה, במיוחד בהארת חוץ.

## 5.1 פרמטרים לתאורה "נכונה"

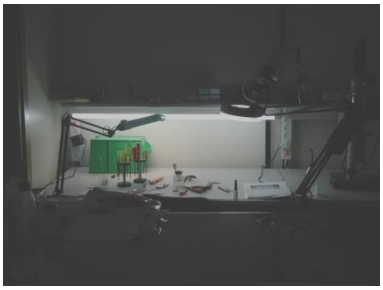
מה הם הפרמטרים הגורמים לתאורה להיות "תאורה נכונה"? בנוסף לעוצמות הארה מתאימות המשקפות את כמות האור הנדרשת, ניתן להבחין במספר גורמים נוספים, הקשורים לאיכויות של האור ושל מתקן התאורה:

- אחידות ההארה: ממוצע ערכים נכון, העומד בדרישות התקן, לא מבטיח פיזור אחיד (או מתאים) בחלל המואר. יכולים להיווצר "חורים" לא מוארים מספיק או מוארים מידי. לפעמים הדבר חיוני ונחוץ מבחינה דקורטיבית, לפעמים הוא פוגע ביכולת שלנו להתמצא בחלל. בכל מקרה, המעברים בין אור לחושך מאמצים את העיניים.
- כיוון ההארה: הצללות פוגעות ביכולתנו לראות בבירור. לעיתים משאיר המעצב אזורים מוצלים בכדי ליצור אפקט דרמתי, אך יש להימנע מהארה כיוונית הגורמת להצללה של אזור העבודה.
- העברת צבעים נכונה: ישנה חשיבות רבה ל"איך" שאנחנו מזהים את הצבע ואת הגוון.

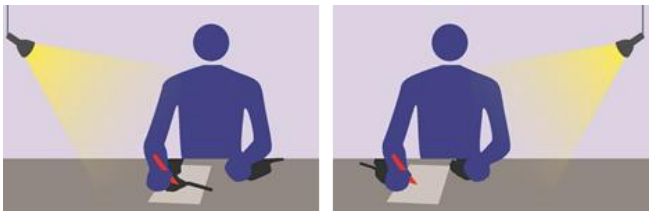
תאורה לקויה יכולה להוות סיכון בטיחותי, במיוחד באזור מדרגות. תאורה לקויה יכולה להוות גם סיכון בריאותי - אור רב מדי או מועט מדי גורמים למאמץ מיותר של העיניים העלול לגרום לאי-נוחות בעין (צריבה וכד') ולכאבי ראש.

תאורה לקויה יכולה להיגרם במספר מקרים, כגון:

- תאורה לא מספיקה: כאשר אין מספיק אור קשה להבחין בפרטים, דבר העלול להביא לעומס יתר לשרירים האחראים על הסתגלות העין
- עוצמת הארה גבוהה מידי: גם כאן עלול להיווצר עומס יתר על פעילות העין וכל מערכת הראיה
- סנוור או בוהק: זוהי תופעה המתרחשת כאשר חלק אחד של שדה הראיה מואר חזק יותר מחלקו האחר. ישנם סוגים שונים של סנוור, חלקם מפריעים יותר, חלקם פחות.
- ניגודיות (contrast) לא מתאימה: יהיה קושי להבחין בפרטים בתוך הרקע
- פיזור לקוי של האור או חוסר איזון בעוצמות הארה
- מעברים מאזורים מוארים לאזורים חשוכים יגרמו לעיוורון רגעי הנוצר כאשר העיניים צריכות להסתגל במהירות לסביבה חדשה - מוארת יותר או אפלה יותר.



**צילום יד-9. תאורה לא אחידה עשויה להיות דקורטיבית (ימין) אך גם מזיקה (שמאל).**



**צילום יד-10. תאורה כיוונית עשויה להיות דקורטיבית (ימין) או לגרום להצללה מפריעה (שמאל).**

**צילום יד-11.**

**תאורה לא מתאימה עלולה לגרום לסנוור וקושי בקריאה.**

**צילום יד-12.**

**אזור מוצל מקשה על התמצאות או קריאה**

יד

**צילום יד-13.**

**העברת צבע לא טובה עלולה לגרום לפגיעה באיכות הראייה.**

**צילום יד-14.**

**בוהק והשתקפויות מטרידים**

**צילום יד-15.**

**מעבר מאזור מואר לאזור חשוך, או להיפך – למשל בחניון לרכב – עלול להיות מסוכן.**

## 5.2 בחירה של גוף תאורה

שימוש בגוף תאורה בעל יעילות אורית גבוהה יגרום לצמצום משמעותי בכמות גופי התאורה ובכך לצמצום משמעותי בצריכת האנרגיה החשמלית. עם זאת, סוג גופי תאורה נקבע, על פי רוב, על ידי שיקולים פונקציונליים וארכיטקטוניים יחד. שיקולים ארכיטקטוניים לא ניתנים, כמובן, לחישוב מדויק.

הפרמטרים העיקריים בבחירת גוף תאורה הם:

- ייעוד גוף התאורה - פנים או חוץ, מחסן או משרד וכו',
- התכונות האופטיות - נצילות, עקום פוטומטרי וכו',
- סוג גוף התאורה - תאורה ישירה או עקיפה, אחידה או מקומית, שילובם,
- איכות הגוף - התאמתו לתנאי סביבה (לחות, חום, קורוזיה), יכולת פיזור חום (למקומות עם סכנת התפוצצות)
- אפשרויות תחזוקה
- עיצוב ומראה חיצוני

הסנוור מהווה את אחת הבעיות המרכזיות ברוב מתקני התאורה: לכן רצוי להימנע משימוש בנורות גלויות. ישנה חשיבות רבה להאיר גם את המשטחים האנכיים (קירות), ולא רק את המשטחים האופקיים. הארה זו מגדירה את האפקטיביות של ההארה מבחינת תחושת העין - עד כמה חדר נתון יהיה "רווי" באור.

איכות הרכיבים ותכנון נכון של הרכיבים חשובים ביותר. שימוש בחומרים ובנורות בעלי איכות ירודה יוביל לבזבוז מיותר של אנרגיה, החלפת נורות בתדירות גבוהה ואך עלול לגרום לבעיות בטיחותיות. כדי לקבל תוצאות שתואמות את התכנון יש להשתמש בגופי תאורה ובציוד שנבדק במעבדה מוסמכת. מומלץ כי הציוד המסופק עם הגופים יהיה ציוד מקורי של החברה המייצרת ובאישורה.

בעת התכנון יש לדאוג לנגישות להחלפת נורות וגופי תאורה, ניקוי שלהם או תיקונים.

לתוכנית תאורה יצורפו מפרטי גופים המתוכננים. בהתאם לנתונים המצורפים ניתן יהיה לבחון את ההצעות שוות ערך ואיכות בהתאם לפרמטרים הבאים:

- עקומות פוטומטריות (פיזור האור וגבלת סנוור)
- נצילות
- IP - מקדם הגנה בפני אבק ולחות
- שיטת התקנה
- מבנה מכני
- מבנה ארכיטקטוני ועיצובי

כמו כן מומלץ לצרף לתוכנית המלצות לתחזוקה נכונה והנחיות לבדיקות תקופתיות של הציוד.

## 6. חיסכון באנרגיה בתאורה

תכנון נכון ומקצועי יסייע להביא לחיסכון באנרגיה לתאורה במספר אופנים: הקטנת הביקוש לאור מלאכותי על ידי ניצול נכון של תאורה טבעית (אור השמש); הקטנת האנרגיה הדרושה בכדי לספק את כמות האור הנדרשת; ובקרה על משך הזמן שבו פועלים אמצעי התאורה כך שהאור יסופק כאשר הוא נדרש, אך לא בזמנים אחרים. אסטרטגיות אלו יידונו בהמשך פרק זה.

### 6.1 הקטנת הביקוש על ידי ניצול תאורה טבעית

כפי שתואר בפרקים קודמים, תכנון נכון של מעטפת הבניין ושל מערכות הזיגוג עשוי לסייע בהחדרת אור טבעי לחלקי בניין שונים, ובכך לייתר את הפעלת התאורה המלאכותית בהם. יחד עם זאת, בכדי לממש בצורה מרבית את החיסכון האפשרי, יש להקפיד על בחירה נכונה של גופי התאורה ולתכנן את מיקומם, ובמיוחד את הבקרה עליהם, כך שאפשר יהיה להפחית באופן מדורג את הביקוש לאור מלאכותי בהתאם לזמינות האור הטבעי. לבקרה כזאת שני מרכיבים:

א. יש לאפשר עמעום של נורות, כך שהתפוקה שלהם תגדל בהתאם לשטף האור הנדרש בנוסף לאור הטבעי: פעולה בהספק חלקי חוסכת חשמל בהשוואה לפעולה במלוא ההספק. יש לעשות זאת בהתחשב בסוג הנורה. לדוגמא: לנורות פלואורסנט מומלצת השהיה של 15- 20 דקות בין כיבוי להדלקה, על מנת לא לפגוע באורך חיי הנורה.

ב. יש לאפשר בקרה נפרדת על גופי תאורה במרחקים שונים מהחלון, אשר בהם ישנם הבדלים בעוצמת ההארה הטבעית.

אמנם שתי האסטרטגיות האלה מתאימות בעיקר לחללים גדולים, כגון אלה הנפוצים בבנייני משרדים או מרכזים מסחריים, אבל הן עשויות להביא תועלת גם בבנייני מגורים, בין בחדרי מגורים גדולים ובעיקר בחללים ציבוריים כגון חדרי מדרגות. בשילוב עם מערכת בקרה מתאימה, השימוש

בגלאים מאפשר לשמור על רמת הארה קבועה בכל זמן נתון ואף יעמעם קבוצות שונות של גופי תאורה באותו החדר ביחס למרחק שלהם ממקור האור הטבעי. כלומר, גוף תאורה הממוקם בסמוך לחלון יעומעם יותר מגוף תאורה הממוקם רחוק מאותו חלון.

## 6.2 הקטנת האנרגיה הדרושה לספק עצמת הארה נתונה

הקטנת ההספק החשמלי הנדרש להפיק עוצמת הארה מסוימת בחלל אפשרית באמצעות בחירה והתקנה של ציוד הארה מתאים. בחלקים הקודמים של פרק זה נדונו בהרחבה תכונותיהם של גופי התאורה ושל הנורות. בנוסף למאפיינים אלה של ציוד התאורה, ניתן לציין גם את היתרונות של אביזרים נוספים, ובעיקר מייצבי מתח ומשנקים.

יש לזכור, כי בעת בחירה של השיטה המועדפת לחסכון באנרגיה יש לבחון את העלויות הכרוכות בהקמה (במידה ומדובר במתקן חדש) או בהחלפה (במידה ומדובר בשדרוג מתקן קיים). בשני המקרים יש לבחון את ההשקעה הנדרשת הכוללת לעומת עלויות החשמל וגובה החסכון הצפוי- וזאת בהתחשב בתחזוקה הנדרשת ובאורך חיי המתקן הצפוי. יש לחשב זמן החזר השקעה (ROI) וערך נוכחי נקי (NPV).

**א. מייצבי מתח אינדיווידואליים**

מייצב המתח משמש לייצוב מתח האספקה מרשת החשמל אל גוף תאורה קיים, הכולל משנק אלקטרו מגנטי, מצת וקבל. מייצב המתח מאפשר:

- ✓ בלימת צריכת האנרגיה המוגברת כתלות בעלייה במתח הרשת (חיסכון פוטנציאלי, ללא עמעום, של עד 20%, לפי ה"עודפים" במתח הרשת).
- ✓ מיצוי מרבי של אורך חיי הנורה בהתייחס לאורך החיים המתוכנן.
- ✓ שמירה על מקדם הספק תקני.

קיימים מייצבי מתח המאפשרים עמעום התאורה תוך צמצום נוסף בצריכת האנרגיה החשמלית (חיסכון פוטנציאלי, בנוסף לחיסכון מבלימת ה"עודפים" במתח הרשת, של עד 35%, בהתאמה לסוג הנורה (נל"ג או מטל-הלייד) ולעוצמת התאורה הנדרשת).

**ב. משנקים אלקטרוניים לנורות פריקה (לתאורת חוץ)**

המשנק האלקטרוני משמש להפעלת הנורה באופן ישיר במקום ציוד ההפעלה הקיים (משנק אלקטרו מגנטי, מצת וקבל). בהתייחס לנושא החיסכון באנרגיה המשנק האלקטרוני מאפשר:

- ✓ יעילות חשמלית גבוהה בהשוואה למשנק האלקטרו מגנטי בשיעור של 9%-4%, בהתאם לדגם ולגודל החשמלי.
- ✓ בלימת צריכת האנרגיה המוגברת כתלות בעלייה במתח הרשת (חיסכון פוטנציאלי, בנוסף לחיסכון הנובע מהפסדים נמוכים יחסית וללא עמעום, של עד- 20% בהתאמה ל"עודפים" במתח הרשת).
- ✓ מיצוי מרבי של אורך חיי הנורה בהתייחס לאורך החיים המתוכנן.
- ✓ שמירה על מקדם הספק תקני.

קיימים משנקים אלקטרונים המאפשרים את עמעום התאורה תוך צמצום נוסף בצריכת האנרגיה החשמלית (חיסכון פוטנציאלי, בנוסף לחיסכון הנובע מהפסדים נמוכים יחסית ומבלימת ה"עודפים" במתח הרשת, של עד 50%, בהתאמה לסוג הנורה (נל"ג או מטל-הלייד, ולעוצמת התאורה הנדרשת).

## 6.3 בקרה על זמן הפעולה של הנורות

אחת הדרכים היעילות ביותר להשיג חסכון באנרגיה הינה כיבוי התאורה כאשר אין בה צורך. הכיבוי בבניין ייעשה כאשר אין נוכחות בחלל, ובשטחי חוץ – בשעות בהן קיים אור טבעי מספיק. לשם כך יש צורך בציוד מתאים העשוי לכלול גלאים, שעונים אסטרונומיים ומערכת פיקוד ובקרה.

### א. גלאי תאורה

גלאי תאורה מודדים את עוצמת ההארה המגיעה אליהם. כאשר הם מותקנים כחלק ממערכת בקרה על מערכת תאורה, רצוי למקם אותם כך שימדדו את האור סמוך ככל האפשר לאזור שבו נדרשת ההארה, כגון שולחן העבודה. בפועל, גלאי התאורה ממוקמים בדרך כלל בתקרה או על הקירות סמוך לתקרה, ולכן המדידה שלהם היא עקיפה, ואינה תמיד מבטאת בצורה נאותה את הצורך בתאורה בפועל.

**צילום יד-16. דוגמאות לגלאי נוכחות, גלאי תאורה ובקרים**

### ב. גלאי נוכחות

גלאי נוכחות משמשים בדרך כלל לכיבוי מערכות תאורה אשר מופעלות בצורה ידנית, כאשר החלל אינו מאוכלס לפרק זמן מסוים, או להפעלה של גופי תאורה המצוידים בשעון הקוצב את פעולתם לזמן מוגבל. השימוש בגלאים כאלה מתאים במיוחד לחדרי מדרגות, שם הם עשויים להחליף מפסקים ידניים עם קוצב זמן.

### ג. שעון אסטרונומי

**צילום יד-17.**
**דוגמא לשעון אסטרונומי**

גופי תאורה לשטחי חוץ – כבישים, מגרשי חנייה, כיכרות ומדרכות אמורים לפעול החל משעות הערב ועד לשעות הבוקר המוקדמות, בסמוך לשעת הזריחה. ההדלקה והכיבוי של גופי התאורה מתבצעת מלוח ההדלקה (מרכזיית התאורה) באמצעות מגען ראשי. בעבר היה מקובל למתג את המגען הראשי באמצעות שילוב של שעון שבת ותא פוטו-אלקטרי, כך שהובטחה ההפעלה והכיבוי של מתקן התאורה. בשיטה זו, ככל שהייתה מדויקת, לעיתים הופעל מתקן התאורה גם כתלות בתנאי מזג האוויר, עננות או אבק, וזמן ההארה בפועל היה כ- 4,800 שעות בשנה. ניתן לראות כי משך הזמן הנדרש לתאורת הכבישים במדינת ישראל בהתייחס לזמני השקיעה והזריחה עומד על כ- 4,200 שעות בשנה, וזאת בנטרול תנאי מזג האוויר שגרמו להפעלה נוספת של מתקן התאורה שלא לצורך. הפעלה וכיבוי מדויקים של מתקן התאורה ללא תלות בתנאי מזג האוויר מתאפשר בעזרת השעון האסטרונומי. מיתוג מתקן התאורה באמצעות השעון האסטרונומי עשוי להביא לחיסכון בצריכת החשמל לתאורה בשיעור של כ- 10% (רמת החיסכון עשויה להשתנות בהתאם לסך שעות העבודה בשנה כפי שנמדדו במתקן טרם התקנת השעון האסטרונומי).

יד

**ד. מערכות שליטה ובקרה (Telemanagement Systems)**

קיימות מערכות שונות לבקרה וחסכון באנרגיה - החל ממערכת המיועדת לרמת החדר וכלה במערכות המתאימות למבנים גדולים. מערכות אלה כוללות חיישני נוכחות (או גלאי תנועה) השולטים בכיבוי והדלקת תאורה בחלל לפי הנוכחות בו, או חיישנים המיועדים לגילוי הארה (גלאי תאורה) אשר מאפשרים שליטה בגופי התאורה ביחס לתאורה הטבעית הקיימת.

במערכות מתוחכמות יותר המבוססות על תוכנת ניהול ובקרה מרכזית הכוללת גלאי נוכחות, גלאי תאורה ואביזרי בקרה נוספים ניתן לפקח לא רק על מכלול תאורת המבנה, אלא גם על מיזוג האוויר ועל אמצעי הצללה כמו תריסים או וילונות בהפעלה חשמלית. השליטה נעשית מתוך המבנה או ממוקד מרוחק באמצעות פתרון אינטרנטי. ניתן לבצע ניהול מרכזי לצרכי תפעול ולקבל דו"חות ומידע על תקלות בזמן אמיתי. מערכות כאלה עשויות להיות מצוידות גם בשעון אסטרונומי באמצעותו ניתן להגדיר כיבוי או הנמכה אוטומטית בשעה מסוימת או ביחס לזמני זריחה ושקיעה.

## 7. תחזוקה וניקוי של גופי התאורה

פעולה תקינה של מתקן תאורה מחייבת אותנו לשמר ולתחזק את המערכת בהתאם לתכנון המקורי שלה. הצטברות אבק על מפזר האור ואו על הרפלקטור יגרמו להפחתה בתפוקת האור של גוף התאורה ולירידה בעוצמת התאורה תוך צריכת ההספק המרבי. הצטברות האבק עשויה לגרום לירידה משמעותית בתפוקת האור ולהתחממות יתר של רכיבי גוף התאורה ולבלאי מואץ. כלומר, אי ניקוי גוף התאורה יגרום לבזבוז אנרגיה, לירידה בנצילות האורית של גוף התאורה, התחממות יתר, בלאי מואץ ולהגדלה בהוצאות התחזוקה. לכן, בנוסף להחלפה של נורות בהתאם למשך חייהן הנומינלי, יש צורך לנקות את גוף התאורה - הן את הכיסוי החיצוני והן את רכיבים הפנימיים. תדירות ניקיון זה תלויה במקום בו מותקן הגוף. גופי תאורה המותקנים בחוץ חשופים יותר לתנאי מזג האוויר, אבק, לחות, מים, חרקים וכו'.

על מנת לשמור על יעילות מתקן התאורה מומלץ לבצע את פעולות התחזוקה בשיטת תחזוקה מונעת, משמע, ביצוע ניקוי יזום ושטיפת גופי התאורה, וכן החלפת נורות בלוח זמנים סדיר וקבוע מראש, בהתאם לאורך החיים הנומינלי של הנורות.

יש להדגיש כי תחזוקה נכונה מתחילה עוד בשלבי תכנון.

## 8. תקנות ותקינה בתחום התאורה

תאורה טובה יוצרת סביבה ראייתית המאפשרת לאנשים לראות, לנוע ולבצע משימות בצורה בטוחה, ביעילות, בבטיחות ובמדויק, בלי לגרום לעייפות לא סבירה של מערכת הראייה ולאי נוחות.

מטרת התקנות להבטיח רמת תפקוד ראייתית אופטימלית בהתאם לצורכי הפעילות; נוחות ראייתית מרבית; בטיחות מכסימלית; וחיסכון באנרגיה. התקנים מפרטים את הדרישות השונות של התאורה. הם נכתבים ע"י צוות מומחים מתחומים שונים המתייחסים למצב ממוצע של אותה מדינה עבורה הם נכתבו. התקנים מביאים בחשבון פרמטרים רבים המשפיעים על מתקן התאורה הנדרש: מהירות הפעולה הנדרשת, אורך הפעולה, בהיקות וגודל מטרת הראיה וכו'.

נכון להיום (2013) לא קיימות בישראל תקנות[129] העונות על הדרישות הנ"ל. ההתייחסות היחידה היא בפקודות הבטיחות בעבודה- פרק א', סימן ג', סעיף 28: "...אמצעים יעילים יינקטו כדי להשיג ולקיים תאורה מספיקה ונאותה, טבעית או מלאכותית, בכל חלק מפעל שבני אדם עובדים או עוברים בו...". ב-2009 פורסם פרק מילוט של תקנות הבניה המפרט את הדרישות להארה בחירום.

[129] על ההבדל בין תקנה לתקן ראו פרק י"ח במדריך

בתקופה זו (2013) נכתבות תקנות הבניה החדשות, אשר בהן תהיה התייחסות רצינית יותר לנושא התאורה. עד שיושלמו התקנות מומלץ להיעזר במפרט הכללי (הבין-משרדי) – פרק 08. מפרט זה אומנם נכתב עבור הקבלנים, אך בהעדר תקנות מחייבות הוא משמש את רוב המתכננים העובדים בתחום הציבורי.

התקנים בתחום התאורה מחולקים לשלושה תחומים: איכות ההארה, צריכת האנרגיה, ובטיחות.

## 8.1 תקינה בנושא איכות המאור

בארץ קיימים תקנים שונים המסדירים את נושא עוצמות ההארה, לרבות תקן 13201 העוסק בדרישות למאור בכבישים ובשטחים ציבוריים. בתחום הבנייה קיימים שני תקנים עיקריים: תקן ת"י 8995, העוסק בתאורה למקומות עבודה שבתוך מבנים, ות"י 5280 – חלק 2, אנרגיה בבניינים – מערכות תאורה.

### ת"י 8995 - "תאורה למקומות עבודה שבתוך מבנים"

תקן זה, המאמץ למעשה תקן בינלאומי וכתוב בשפה האנגלית, אומנם איננו מיועד לבניני מגורים, אך יש בו התייחסות לעוצמות ההארה באזורים הציבוריים של הבניין (טבלה יד-6). התקן מפרט:

- עוצמת ההארה הממוצעת המינימלית (הערכים נתונים בדרך כלל עבור מדידה על משטח עבודה בגובה 80 ס"מ מהרצפה, או על הקרקע, ונתונים בלוקס)
- דירוג אחיד של הסנוור המטריד (UGR – Unified Glare Rating)
- מקדם מסירת צבע (Ra – general color rendering index)

**טבלה יד-6. דרישות הארה לאזורים כלליים במבנה, לפי ת"י 8995**

| Type of interior, task or activity | $\overline{E_m}$ lux | $UGR_L$ | $R_a$ | Remarks |
|---|---|---|---|---|
| **1. General building areas** | | | | |
| Entrance halls | 100 | 22 | 60 | |
| Lounges | 200 | 22 | 80 | |
| Circulation areas and corridors | 100 | 28 | 40 | At exits and entrances provide a transition zone and avoid sudden changes. |
| Stairs, escalators, travelators | 150 | 25 | 40 | |
| Loading ramps/bays | 150 | 25 | 40 | |
| Canteens | 200 | 22 | 80 | |
| Rest rooms | 100 | 22 | 80 | |
| Rooms for physical exercise | 300 | 22 | 80 | |
| Cloakrooms, washrooms, bathrooms, toilets | 200 | 25 | 80 | |
| Sick bay | 500 | 19 | 80 | |
| Rooms for medical attention | 500 | 16 | 90 | $T_{cp}$ at least 4000 K |
| Plant rooms, switch gear rooms | 200 | 25 | 60 | |

## 8.2 תקינה בנושא אנרגיה

תקן ת"י 5280 חלק 2 (אנרגיה בבניינים: מערכות תאורה) הינו חלק מסדרת תקנים הדנים בנושאי האנרגיה בבניינים גם התייחסות למעטפת הבניין, מערכות חימום, אוורור ומיזוג אויר וציוד חשמלי אחר (ראו פירוט בפרק יח). תקן העוסק במערכות תאורה מפרט את מתודולוגיית החישוב להערכת כמות האנרגיה המנוצלת לתאורה פנימית בתוך בניינים, ומספק אינדיקטור מספרי לדרישות

האנרגיה לתאורה, למטרות התעדה. ניתן להשתמש בתקן זה בבניינים קיימים ובתכנון של בניינים חדשים או משופצים.

בתקן זה הבניינים מסווגים לפי קטגוריות שונות: בנייני משרדים, מוסדות חינוך, מוסדות בריאות, דיור מיוחד, מלונאות, מסעדות, מתקני ספורט, שטחים למסחר ובנייני תעשייה ומלאכה. התקן משלים את התקן לתאורה מקומות עבודה (ת"י 8995) ומנחה לתכנון תאורה לפיו. ראוי להדגיש כי תקן זה מבחין בין רמות שונות באיכות התאורה, ומציב דרישות שונות בהתאם לאיכות ההארה הנדרשת, מתוך הנחה כי תאורה טובה "עולה" אנרגיה.

### 8.3 תקינה בנושא בטיחות ואיכות של רכיבי מערכות מאור

תקן ת"י 20 מסדיר את הבטיחות החשמלית של גופי התאורה (תקן רשמי ומחייב) ות"י 62471 המפרט את הבטיחות הפוטו-ביולוגית (קרינה). יש לזכור שתקן זה אינו מתיחס לפגיעה אפשרית בשעון הביולוגי אלא לפגיעה ישירה (כדוגמת כביה) לרשתית העין או לעור. בתחום זה טרם גובשה תקינה כלשהי.

בנוסף, קיימים תקנים המתייחסים למרכיבים שונים של גופי התאורה, ביניהם לדים, כדוגמת התייחסות לאיכות ובטיחות של נורת הלד עצמה, של ציוד ההדלקה (הספק והדרייבר), יציבות העוצמה וצבע האור.

## 9. המלצות מעשיות

- ✓ אין להשאיר אורות כאשר אין אף אחד בחדר. מומלץ להשתמש בחיישנים או טיימרים. יש לציין כי בנורות פלואורסנטיות אין לכבות ולהדליק אות בתדירות גבוהה (למניעת בלאי מואץ)- יש לשנור על כ-20 דקות לפחות בין כיבוי להדלקה חוזרת.
- ✓ במידת האפשר- מומלץ להשתמש בנורות "חסכוניות" (יש לזכור כי ישנם מחקרים רבים המראים כי שהייה בשעות שלפני השינה ובשעות הלילה באור לו חלק ניכר מהספקטרום בתחום הכחול, כדוגמות נורות פלואורסצנטיות או לדים, משבש את השעון הביולוגי ומשפיע על ייצור המלטונין). לנורות אלה , בנוסף ליעילותן האורית הגבוהה יחסית- אורך חיים משמעותית ארוך.
- ✓ יש לבחור תמיד נורה בעלת סימון אנרגטי גבוה יותר. כך, למשל, נורת הלוגן יכולה להיות בעלת דירוג C– או G.
- ✓ יש להתאים את צבע הנורה לסביבה בה היא מותקנת. לפעמים הנורות "הקרות" גורמות לתחושת אי נוחות גבוהה.
- ✓ מומלץ לנצל את האור הטבעי מהחלונות. יש לשקול שימוש בווילונות אטומים חלקית, עדיף בגוונים בהירים.
- ✓ יש לשקול שימוש בגופי תאורה עם הארה בלתי ישירה (כלפי מעלה). אומנם התאורה המתקבל בשיטה זו היא הנעימה ביותר- אך גם בזבזנית ביותר!
- ✓ אין להשתמש בעמעמים רגילים (המיועדים לנורות ליבון) לנורות פלואורסצנטיות או נורות לד. יש להשתמש בציוד ייעודי לכך.
- ✓ אין להחליף את סוג הנורה בגוף תאורה ללא התייעצות עם בעל מקצוע ובלי לבצע בדיקת בטיחות חשמלית ומכנית ע"י גורם מוסמך.
- ✓ יש לשקול שימוש גופי תאורה שולחניים (או מקומיים) לתגבור התאורה במקומות הייעודיים בהם נדרשת עוצמת הארה גבוה יחסית (למשל, שולחן כתיבה)- וכל יתר החלל יוכל לקבל תאורה בעוצמה נמוכה יותר. אין לגרום להפרשם גבוהים (לדוגמא, לראות טלוויזיה בחדר חשוך)- הדבר גורם למאמץ ראיתי מיותר!

- ✓ מומלץ לתכנן מראש את המצבים בהם עוצמות ההארה יהיו שונות בחלל נתון (לדוגמא, בסלון: תאורה לצפייה בטלוויזיה, תאורה לשיחה משפחתית בערב, תאורה לקבלת אורחים ולחגיגה...) ולהתקין מערכות הארה שונות. כמו כן, ניתן להשתמש בעמעמים או לדאוג לחיבור גופי התאורה למעגלים חשמליים שונים ובכך להדליק רק חלק מהמערכת.
- ✓ מומלץ לנקות אבק מהנורות ומגופי התאורה. הצטברות האבק עלולה לצמצם משמעותית את היעילות!
- ✓ במידה ויש צורך להשאיר תאורת לילה, מומלץ לשקול שימוש בנורות בהספק נמוך (כדוגמת לדים) או כאלה המופעלות בעמעום (כדוגמת ליבון). בכל מקרה, אין להשאיר תאורת לילה בשדה הראיה של משתמשים בחלל. מומלץ להשתמש בנורות להן קרינה מועטה ככל האפשר בתחום הכחול.

## מקורות

[1] Abdou O., El Kholy g. and Abdou A. (2006). Correlation between indoor environmental quality and productivity in buildings. http://www.informedesign.org/_news/feb_v02-p.pdf 2012)

[2] Boyce P. R. (2003). Human factors in lighting

[3] CIBSE Code for interior lighting,

[4] CIBSE Commissioning Code L: Lighting 2003

[5] CIBSE Office Lighting (Society of Light and Lighting SLL LG7)2005

[6] CIBSE The visual environment for display screen use,

[7] CIE TECHNICAL REPORT (1981). An Analytic model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance.

[8] Cronly-Dillon J., Rosen E.S., J. Marshall. Hazards of Light,

[9] EN 12464-1 Light and lighting - Lighting of work places. Part 1: Indoor work places 2011

[10] Figueiro MG, Wood B, Plitnick B, Rea MS (2011). The impact of light from computer monitors on melatonin levels in college students. Neuro Endocrinol Lett. 2011;32(2):158-63.

[11] Ginthner D. (2006). Lighting: It's Effect on People and Spaces. Implications 2(2): 1-5.

[12] Govén T. (2009). Human aspects of lighting–new findings influence on light planning

[13] Govén T., Bångens C., Persson B. (2008). Preferred luminance distribution in working areas.

[14] Govén T., Laike T., Pendse B., Sjöberg K. (2007). The background luminance and color temperatures influence an alertness and mental health.

[15] Govén T., Laike T., Raynham P., Sansal E. (2009). Influence of ambient light on the performance, mood, endocrine systems and other factors of school children

[16] Henderson S.T., Marsden A.M., Lamps and Lighting.

[17] IESNA The Lighting Handbook, 10th Edition 2012

[18] Resnick L. Eye hazards in industry,

[19] Lighting at work, HSE books

[20] Lighting Research Center (LRC) http://www.lrc.rpi.edu/

[21] Maila R. (2012 ). Lighting as medium when designing wellbeing supporting environment

[22] Quartier K. and Van Cleempoel K. (2008). The influence of lighting in the build environment: a study to analyse human behaviour and perception as measured by mood and observation. Proceedings of Measuring Behavior 2008.

[23] Rea M, Bierman A, Figueiro M, Bullough J. A new approach to understanding the impact of circadian disruption on human health. Journal of Circadian Rhythms, 6:7 (5/2008)

[24] Veitch J., and Newsham G. (1996). Determinants of Lighting Quality II: Research and Recommendations. American Psychological Association.

[25] Veitch, J.A . (2001). Psychological processes influencing lighting Quality .

[26] www.erco.com

[27] www.lightolier.com

[28] www.osram.com

[29] www.sii.org.il

[30] טורצקי, א. תאורה ומקורות או מלאכותי

[31] ניסנבאום, א. 2006. תאורה במקומות העבודה, היבטי בטיחות וגהות.

[32] פרסומי המוסד לבטיחות ולגהות: www.osh.org.il

[33] רדלר, ד. תאורת במה

[34] תאורה חשמלית. האוניברסיטה הפתוחה

[35] תקן ישראלי 8995. תאורה במקומות עבודה שבתוך מבנים 2007

# פרק טו:

# שיקולים כלכליים

מאת דוד כץ

# פרק טו: שיקולים כלכליים

## 1. מבוא

לעתים קרובות חיסכון כספי בטווח הארוך מהווה מניע חשוב לנקיטת אמצעים לחיסכון בצריכת אנרגיה בבניינים. אך בהרבה מהמקרים ההוצאות הראשונית הכרוכות בביצוע אמצעי חיסכון הן גדולות ולכן מרתיעות. קיימת אי-ודאות רבה הן לגבי העלויות והן לגבי התועלות של חיסכון באנרגיה. כמו כן, ישנה גם אי-ודאות לגבי השיטות אשר בעזרתן מודדים את העלויות והתועלות האלו. סקרים של קבלנים מרחבי העולם, למשל, מצאו שקבלנים העריכו שדרישות של תקן לבנייה ירוקה היו מעלות את העלות של פרויקט טיפוסי בכ-17% בממוצע [130]. זאת, אף על פי שמרבית המחקרים בנושא מעידים על תוספת של כ-1-3% בלבד [131]. מחקר אשר בדק את תוספת העלות לבנייה ירוקה בארץ אישר את הממצאים מחו"ל, ומצא שעמידה בתקן לבנייה ירוקה (ברמה הבסיסית) מוסיפה אחוזים בודדים (2-4%) בלבד לעלות בניית הפרויקט [132].

חוסר ההסכמה לגבי העלויות והתועלות הכלכליות מחיסכון באנרגיה נובעת בין היתר מהמספר הרב של גורמים אשר משפיעים הן על צריכת אנרגיה והן על מחירי אנרגיה, כך שהחישובים הכלכליים דורשים מספר רב של הנחות אשר עלולות להיות שנויות במחלוקת. ראשית, כמות האנרגיה הנחסכת אינה תלויה רק בחומרים, ציוד, וטכנולוגיות, אלא במידה רבה גם בהתנהגות הצרכנים – דבר שקשה מאוד לנבא או למדל. גם אם האומדן לשיעור החיסכון הוא מדויק, עדיין קיימת אי ודאות לגבי מספר גורמים אחרים אשר משפיעים על תוצאות ניתוח כלכלי, כגון מחירי דלק עתידיים, שינויים פוטנציאליים ברגולציה או שערי ריבית. משתנים אלה הם דינמיים מאוד, ולכן כל ניתוח כלכלי תלוי במידה רבה באיכות וברמת הדיוק של ההנחות של המנתח.

חישוב התועלת הכלכלית מחיסכון באנרגיה תלוי גם בנקודת המבט של הגורם המבצע את החישוב: מהלך של חיסכון באנרגיה עשוי להבא תועלות שונות לגורמים שונים. כך למשל, קבלנים ירוויחו במידה והם יכולים לדרוש פרמיה (תוספת מחיר) עבור הנדל"ן שלהם; הדיירים ירוויחו מחשבונות חשמל נמוכים יותר; הציבור כולו ירוויח מירידה בזיהום אוויר. אולם יש להביא בחשבון שתועלת לצד אחד עלולה להיות גם חסרון לצד אחר. למשל, חברת החשמל והממשלה עלולים להפסיד הכנסות מירידה בצריכת חשמל. לכן, בכל ניתוח כלכלי יש קודם כל להגדיר את נקודת המוצא לחישוב, כלומר, "תועלת למי?".

פרק זה סוקר את המונחים, המושגים, והשיטות העיקריים הדרושים לכל חישוב של עלויות ותועלות של צעדים שמטרתם חיסכון באנרגיה. לא ניתנת סקירה על הספרות האמפירית הרבה הקיימת בנושא זה, היות וסקירות מסוג זה קיימות במקורות אחרים [133]. הפרק ממשיך לפי הסדר הבא: סעיף 2 מסביר יותר לעומק את החשיבות של נקודת המבט לחישוב ומתעד את סוגי העלויות והתועלות השונות לגורמים שונים. סעיף 3 מציג מושגים כלכליים בסיסיים כמו גמישות, היוון וערך נוכחי נקי (NPV). סעיף 4 מציג שיטות שונות לחישוב עלויות ותועלות מחיסכון באנרגיה, כולל תועלות כלכליות 'שוקיות' ו-'לא שוקיות'. סעיף זה סוקר את הגורמים השונים אשר נכנסים לניתוחים כלכליים, כגון מחירי אנרגיה ומדיניות ממשלתית, ואת ההנחות הנדרשות לחיזוי כלכלי.

---

[130] WBCSD, 2007

[131] Davis-Langdon 2004, 2007; Kats et al, 2003; Kats et al 2008; Miller et al 2008

[132] קוט וכץ, 2013

[133] ראו למשל, Gillingham et al., 2009 and Linares and Labandeira, 2010;

לבסוף, סעיף 5 מציג כמה דוגמאות פשוטות של חישובים כלכליים בכדי להראות יישום בפועל של המושגים אשר הוצגו בסעיפים הקודמים.

## 2. נקודת המוצא לחישוב

כפי שנכתב לעיל, גורמים שונים מושפעים מחיסכון באנרגיה בצורות שונות. סבסוד לחיסכון באנרגיה או למערכות לאנרגיה מתחדשת, למשל, מהווה תועלת מנקודת המבט של הצרכן הפרטי, אך מנקודות המבט של ממשלה ומשלמי מסים, הוא מהווה עלות. ירידה בזיהום אוויר היא תועלת לציבור הכללי, אך לאו דווקא לקבלן הפרטי שבונה את המבנה. לכן, המהלך הראשון בכל ניתוח כלכלי הוא להגדיר את נקודת המוצא לחישוב והיקף הניתוח כדי להבהיר איזה תועלות ועלויות ייכללו בניתוח.

אם הניתוח מיועד לאמוד את הכדאיות הכלכלית לבעל נכס או לדייר פרטי, אז ייתכן שהעלויות של אמצעי חיסכון יהיו רק עלות הציוד, ההתקנה, וההפעלה, בעוד שהתועלת תהיה הכסף שנחסך כתוצאה מחשבונות נמוכים יותר עקב צריכת אנרגיה פחותה [134]. ייתכן שיש תועלות או עלויות נוספות מחיסכון באנרגיה, בנוסף לאלו הישירות. למשל, מחקרים רבים מצאו שהמעבר לאור טבעי (במקום תאורה מלאכותית) מגדיל את פריון העבודה, מפחית תחלואה, ומעלה את ערך הנדל"ן. לכן, הניתוח הכלכלי המלא צריך לבטא גם את הערך המוסף של תועלות אלה, מעבר לערך הכספי של הפחתת חשבונות האנרגיה.

הדייר או בעל הנכס הוא אינו הצד היחיד אשר מושפע מחיסכון באנרגיה. בבניינים ציבוריים, למשל בתי ספר, ייתכן שיש תועלות לתלמידים. מוכרים של טכנולוגיות שונות ירוויחו (ויפסידו). ייתכן שהקבלנים ירוויחו מפרמיית מחיר או שינוי בביקוש לבניינים. בהסתכלות רחבה עוד יותר, הציבור הרחב נהנה מירידה בזיהום וירידה בעלויות הקשורות לזיהום, למשל, עלויות מתחלואה. לכן, בניגוד לניתוח מנקודת מבטו של פרט יחיד אשר יכסה רק את העלויות והתועלות הישירות לאותו פרט, ניתוח ברמה לאומית אמור להביא בחשבון מכלול רחב יותר של תועלות ועלויות, למגוון של גורמים רלוונטיים. ניתוח מקיף יכול לשקף את העלויות ותועלות במגוון נקודות מבט כדי להסביר מי מרוויח ומי מפסיד ממהלך מוצע לחיסכון באנרגיה, וכמה.

## 3. מושגים כלכליים בסיסיים

### 3.1 גמישות הביקוש

גמישות הביקוש הינה מדד לרגישות של רמת הצריכה לשינויים בגורמים אחרים. מדד הגמישות הנפוץ ביותר מודד את השינוי בכמות הנצרכת כתוצאה משינוי במחיר של מוצר או שירות. המדד הוא יחס, ולכן הוא מספר טהור (ללא יחידות). המדד משקף שינוי שולי בכמות הנצרכת ביחס לשינוי שולי במחיר. לרוב, מדובר בשינוי בצריכה באחוזים ביחס לשינוי במחיר באחוזים. הנוסחה לחישוב גמישות הביקוש ניתנת במשוואה 1:

$$\text{גמישות} = \frac{\%Q\Delta}{\%P\Delta} = \frac{\partial Q}{\partial P} \times \frac{P}{Q} \qquad (1)$$

שבה

P הוא המחיר של מוצר או שירות לפני השינוי

Q היא הכמות שנצרכת במחיר P

[134] לרוב, הערך הכספי של חיסכון באנרגיה הוא המכפלה של כמות האנרגיה הנחסכת ותעריף האנרגיה. החישוב מורכב יותר כאשר התעריף אינו קבוע, אלא משתנה לפי זמן (תעו"ז). במקרה זה, בכדי לשקף את העלויות האמיתיות אשר נחסכו יש לחשב את הצריכה לפי כל תעריף בנפרד.

$P\Delta\%$ הוא אחוז השינוי במחיר של המוצר או השירות

$Q\Delta\%$ הוא אחוז השינוי בכמות המוצר או השירות הנצרכת כתוצאה משינוי במחיר

$\frac{\partial Q}{\partial P}$ הוא קצב השינוי בכמות ביחס לקצב השינוי במחיר (הנגזרת של כמות ביחס למחיר)

גמישות הביקוש לאנרגיה (כמו לרוב המוצרים) היא בדרך כלל שלילית. כלומר, קיים יחס הפוך בין עלות המוצר והכמות של המוצר הנצרכת. גמישות ביקוש בעלת ערך של 1- , למשל, מעידה על כך שעלייה של 1% במחיר תביא לירידה של 1% בכמות הנצרכת. ככל שהערך המוחלט של גמישות הביקוש יותר גבוה, כך הביקוש יותר רגיש לשינויים במחיר. ביקוש עם גמישות בעלת ערך מוחלט פחות מ-1 (דהיינו , אחוז השינוי בכמות הנצרכת קטן מאחוז השינוי במחיר) נקרא 'קשיח', ואילו ערך מוחלט מעל 1 (דהיינו, אחוז השינוי בכמות הנצרכת גדול מאחוז השינוי במחיר) נקרא 'גמיש'. למשל, אם כתוצאה של עלייה של 5 אחוזים במחירי חשמל הצריכה יורדת ב- 3 אחוזים (גמישות = 0.6-), הביקוש נחשב קשיח. לעומת זאת, אם אותה עלייה במחיר מביאה לירידה של 7 אחוזים בצריכה (גמישות = 1.4-), הביקוש נחשב גמיש. לרוב, הביקוש לאנרגיה הוא קשיח יחסית, במיוחד במגזר הביתי. זה המצב גם בארץ [135] וגם ברוב המדינות המפותחות [136] . זאת אומרת שעלייה במחיר תביא לחסכון באנרגיה, אך שיעור השינוי בצריכה עלול להיות קטן יותר משיעור השינוי במחיר, ודרוש שינוי חד מאוד בכדי להביא לצמצום משמעותי בצריכה . לכן, מדיניות שמטרתה להביא לצמצום בצריכת האנרגיה חייבת לכלול מרכיבים נוספים, מלבד העלאת המחיר לצרכן.

עוד מדד לגמישות הוא גמישות הביקוש ביחס להכנסה. מדד זה מודד איך שינויים בהכנסה של הצרכן משפיעים על כמות הצריכה. הוא מחושב בצורה זהה לזו שתואר במשוואה לעיל, אך עם 'הכנסה' במקום 'מחיר'. בשונה מהשפעת שינויים במחיר על הביקוש, עלייה בהכנסה תביא בדרך כלל לגידול בביקוש, כלומר מדד הגמישות ביחס להכנסה יהיה חיובי. יחד עם זאת, ראוי לציין כי אף שמדד הגמישות להכנסה הוא חיובי בהתייחס לכלל המוצרים, הרי שכאשר מדובר במוצרים הנחשבים בעלי איכות ירודה יחסית תתכן גמישות להכנסה שלילית. כלומר, ככל שהצרכן מתעשר הוא צורך פחות מהמוצר הנחות, משום שהוא מעדיף מוצר חלופי איכותי יותר.

## 3.2 אפקט הריבאונד (Rebound Effect)

לעתים קרובות התייעלות טכנולוגית במוצר לא מביאה לחיסכון הצפוי משימוש בו. למשל, החלפת נורות בנורות אחרות הצורכות 20% פחות חשמל לאו דווקא מביאה לחסכון של 20% בצריכת אנרגיה. הסיבה לכך נקראת אפקט הריבאונד (rebound effect) או הפרדוקס של ג'בונס (Jevons' Paradox): בעקבות התייעלות טכנולוגית השימוש במוצר מסוים נהיה יותר זול, וכתוצאה מכך הצרכנים עלולים להגדיל את השימוש בו [137] . מחקרים מצאו כי במקרים מסוימים העלייה בשימוש היא עד כדי כך גדולה שהיא גוברת על ההתייעלות הטכנולוגית [138]. בכל מקרה, טווח ההערכות לגבי גודל האפקט הוא גדול, שקשה לנבא מה תהיה רמת החיסכון בפועל משיפור טכנולוגי במוצר מסוים.

## 3.3 עלויות קבועות ועלויות משתנות

עלויות קבועות הן עלויות אשר לא תלויות בהיקף השימוש במוצר. לעומת זאת, עלויות משתנות הן עלויות התלויות בהיקף השימוש. למשל: עלות הרכישה של גנראטור היא עלות קבועה, משום שהיא

[135] גמישות הביקוש לחשמל בטווח הקצר בארץ מוערכת בכ- 0.1- (Tishler et al, 2006).

[136] Gillingham et al., 2009

[137] לסקירה על אפקט הריבונד בהקשר של צריכת אנרגיה ראו Greening et al (2000) או Madlener and Alcott (2009).

[138] Madlener and Alcott (2009)

אינה תלויה במשך השימוש בו או בכמות החשמל שייצר. לעומת זאת, עלויות התפעול של אותו גנראטור הן עלויות משתנות. ישנם מוצרים עם עלויות קבועות גבוהות אך עם עלויות משתנות נמוכות, ולהיפך. כאשר מדובר בגנרטור להפקת חשמל, עלות הרכישה תהיה נמוכה ביחס לעלויות התפעול (עלויות משתנות). לעומת זאת, לפאנלים סולאריים יש עלויות קבועות גבוהות של קנייה והתקנה, אך העלויות המשתנות הן מזעריות. בכדי להשוות בין עלויות קבועות ועלויות משתנות יש להבין את המושגים של *עלות אלטרנטיבית* ו*הערך הכספי של זמן*.

## 3.4 עלות אלטרנטיבית / עלות ההזדמנות

*עלות אלטרנטיבית* היא העלות של ויתור על חלופה מסוימת. בכל בחירה בין חלופות, הבחירה בדרך פעולה מסוימת בהכרח כרוכה בוויתור על דרכי פעולה אחרות, חלופיות. העלות האלטרנטיבית היא הערך של הבחירה הטובה ביותר שלא נבחרה. היא לפעמים נקראת גם 'עלות ההזדמנות' (opportunity cost) כדי להדגיש את הוויתור על הזדמנות מסוימת. למשל, העלות האלטרנטיבית של בניית גג ירוק (גג אשר מכוסה בצמחייה) היא אולי הערך של שימוש באותו גג לפאנלים סולאריים. החישוב של העלויות והתועלות של כל פעולה ושל כל מדיניות צריך אפוא לקחת בחשבון לא רק את העלויות ותועלות הישירות, אלא גם את העלויות והתועלות האלטרנטיביות הכרוכות באותה החלטה.

## 3.5 השפעה חיצונית

*השפעה חיצונית* היא השפעה על גורם חוץ מהיצרן או הצרכן. למשל, השפעות הסביבתיות כמו זיהום אוויר משפיעות על כלל הציבור. במקרה הזה מדובר על עלות חיצונית. יש גם מקרים של תועלות חיצוניות, למשל, אם שיפוץ של בניין מביא לעלייה בערך הנדל"ן של בניינים אחרים באזור. ניתוח כלכלי מקיף יתחשב גם בערך הכלכלי של ההשפעות החיצוניות.

## 3.6 עלות ההון

עלות ההון מתייחסת לעלויות הנדרשות בכדי להשיג מוצר או נכס מסוים. במידה והנכס נקנה באשראי, עלות ההון כוללת גם את עלות ההלוואה, כולל עלויות ריבית.

## 3.7 ערך נומינלי וערך ריאלי

*ערך נומינלי* של מוצר הוא הערך הכספי (כלומר, הסכום שהמוצר עולה בפועל) במועד מסוים. מונח נרדף לערך נומינלי הוא 'ערך נקוב'. לעומת זאת, *הערך ריאלי* של מוצר מותאם לשינוים במחירים על פני פרק זמן מסוים (למשל, כתוצאה מאינפלציה). הקשר בין שני המונחים האלה ניתנת במשוואה הבאה:

$$P^R_{it} \times Q_{it} = (P^N_{it} \times Q_{it}) / (1+Index_t) \qquad (2)$$

אשר בה

| | |
|---|---|
| $P^R_{it}$ | הוא הערך הריאלי של מוצר או שירות (i) בתקופה (t) |
| $Q_{it}$ | היא כמות המוצר או שירות (i) אשר נרכשת בתקופה (t) |
| $P^N_{it}$ | הוא הערך הנומינלי של מוצר או שירות (i) בתקופה (t) |
| $Index_t$ | הוא שינוי במדד מחירים (רמת האינפלציה) בין תקופה (t) והתקופה המשמשת כתקופת הבסיס לניתוח. |

לדוגמא: אם סכום של 100 ₪ ישולם רק בעוד שנה, 100 ₪ הוא הערך הנומינלי. הוא משקף את הסכום שישולם בעתיד. אך אם במשך השנה יש אינפלציה של 5%, הערך הריאלי (הערך מבחינת כוח קנייה) של 100 ₪ שישולם רק בעוד שנה הוא 100/1.05, שהם 95.24 ₪ בלבד במושגים של היום. כלומר, הסכום של 100 ₪ בעוד שנה יספיק לקנות אותו סל מוצרים שאפשר לקנות היום ב- 95.24

₪. ההפרש בין הערך הריאלי לערך הנומינלי הוא תוצאה של ירידה בכוח הקנייה של הכסף עקב האינפלציה. בחוזים רבים סכומים נקובים במונחים נומינליים, אך בניתוחים כלכליים בדרך כלל מומרים הסכומים לערכים ריאליים כדי להתחשב בהשפעתה של אינפלציה.

## 3.8 היוון ושיעור ניכיון

היוון הוא תהליך של המרת עלויות או תועלות כספיות מתקופות שונות לסכום אחד, שווה ערך במושגים של שנת בסיס מסוימת. בדרך כלל, הערך העכשווי של תועלות ועלויות עתידיות הוא פחות מהערך הנומינלי. הפחתת הערך של סכומי כסף עתידיים נעשית לא רק לשקף את ירידת הערך כתוצאה מאינפלציה. כלומר, היוון הוא הפחתה של הערך הריאלי בנוסף לירידת כוח הקנייה של הכסף. היוון אמור לשקף את השווי של זמן. כסף שיתקבל או ישולם רק בעתיד נחשב כשווה פחות מאשר אותו סכום היום מסיבות רבות, לרבות ויתור על ריבית (כלומר, הכסף שהיה יכול להצטבר אילו הסכום היה מושקע היום), סיכון ואי וודאות. בנוסף, יש מה שכלכלנים קוראים "עדיפות זמן טהורה", המשקפת את העובדה שגם אחרי שמתחשבים בכל הגורמים הנזכרים לעיל, למרבית אנשים יש כנראה עדיפות לקבל תועלות כמה שיותר מוקדם, ולדחות תשלומים כמה שיותר לעתיד.

השער שבו מפחיתים את ערכן של תועלות ועלויות עתידיות נקרא "שיעור ניכיון". בחירתו של שיעור ניכיון מתאים היא עניין סובייקטיבי במידה מסוימת. לעתים קרובות, שיעור הריבית בשוק מהווה בסיס לקביעת שיעור ניכיון, היות והוא משקף את עלות ההזדמנות של ויתור על השקעת הכסף. בחירה זו נפוצה בעיקר כאשר הניתוח מתמקד בהשקעות פרטיות, מצב שבו שער הריבית בשוק אכן משקפת את עלות ההון או, לחלופין, הצפי להחזר יחסית בטוח על השקעה. במקרים שבהם הניתוח מתייחס לתועלות או לעלויות לכלל הציבור, כגון תועלת מירידה בזיהום אוויר, לא נהוג להשתמש בשער הריבית בשוק, אלא במה שמכונה "שיעור ניכיון חברתי". שיעור זה, לרוב, הוא שיעור יחסית נמוך (למשל, 3%). הוא שונה משיעור הניכיון השוקי בכך שהוא אמור לשקף את העלות האלטרנטיבית של כסף שמיועד לפרויקטים חברתיים אחרים. בנוסף, כאשר מדובר בפרויקטים בעלי השפעות בטווח הארוך, שיעור ניכיון נמוך אמור לשקף במידה מסוימת התחשבות בדורות הבאים.

## 3.9 ערך נוכחי נקי (Net Present Value (NPV

ערך נוכחי של סכום כסף משקף את ערכה של סדרת תשלומים אשר יתקבלו (או ישולמו) בתקופות שונות. ערך נוכחי נקי (ע.נ.נ.) משקף את הערך *במושגים של היום* של תזרים מזומנים אשר פרוסים לאורך זמן. כלומר, ע.נ.נ. של פרויקט משקף את ערכו המנוכה לאחר היוון. הנוסחה לחישוב ערך נוכחי נקי היא:

$$\frac{FV_t}{(1+r)^t} = \text{NPV} \qquad (3)$$

שבה:

NPV הוא ערך נוכחי נקי

$FV_t$ הוא הערך של תשלום (עלות או תועלת) עתידי בתקופה (t)

r הוא שיעור הניכיון

t הוא משך הזמן (בדרך כלל נקוב בשנים)

במידה ו-$FV_t$ הוא במושגים של ערך נומינלי (ערך נקוב), יש להמירו קודם לכן לערך ריאלי.

חישוב ערך נוכחי נקי מאפשר השוואה בין עלויות בתקופות שונות. ללא שימוש בכלי זה, אין אפשרות להשוות למשל, בין פרויקט שבו משקיעים מיליון שקל היום וחוסכים שני מיליון תוך שנה, ואחד שבו משקיעים מיליון שקל היום וחוסכים שני מיליון שקל רק תוך 20 שנה. ערך נוכחי נקי של פרויקט משקף את כל תזרימי מזומנים של פרויקט במושגים של הערך של כסף היום. לכן, ערך

נוכחי נקי של סכום כלשהו שיתקבל בעוד שנה יהיה גבוה יותר מאשר אותו סכום (נומינלי) שיתקבל רק בעוד 20 שנה.

## 3.10 תקופת פירעון (payback period)

פרויקטים לחיסכון באנרגיה דורשים השקעה ראשונית, וההחזר הכספי פרוס על פני זמן. *תקופת פירעון* היא פרק הזמן שנדרש להחזיר את השקעה. זאת אומרת, היא הזמן עד שהערך הנוכחי הנקי של פרויקט הוא חיובי.

## 3.11 ניתוח עלות-תועלת

ניתוח עלות-תועלת נועד להשוות בין עלויות ותועלות של פרויקט או מדיניות. ברוב המקרים מטרת ניתוח עלות-תועלת היא למדוד את השווי של תועלות נטו של פרויקטים כדי להחליט האם הם כדאיים כלכלית או כדי לבחור מבין כמה חלופות. לרוב, ניתוח עלות-תועלת דורש שימוש בערך נוכחי נקי. במקרים אלה, הערך הנוכחי הנקי של תועלת נטו של פרויקט מחושב לפי המשוואה:

$$\text{NPV} = \sum_0^t \frac{B_t - C_t}{(1+r)^t} \qquad (4)$$

שבה:

$B_t$ היא תועלת אשר תתקבל בתקופה (t)

$C_t$ היא עלות אשר תשולם בתקופה (t)

r הוא שיעור הניכיון

דוגמאות של ניתוח עלות-תועלת ניתנות בסעיף 5 של פרק זה.

*יחס תועלת-עלות* (benefit to cost ratio, BCR) הוא יחס חשבוני פשוט בין התועלות של פרויקט לעלויות שלו, כפי שמתארת הנוסחה הבאה:

$$\text{BCR} = \sum_0^t \frac{\frac{B_t}{(1+r)^t}}{\frac{C_t}{(1+r)^t}} \qquad (5)$$

שבה BCR הוא יחס תועלת-עלות וכל שאר המשתנים הם כמו במשוואה (4) לעיל.

יחס תועלת-עלות גדול מ-1 מעיד על פרויקט בעל תועלת נטו חיובית, ואילו יחס פחות מ-1 מעיד על תועלת נטו שלילית. היחס משקף את רמת הרווחיות של פרויקט ליחידת השקעה, אך הוא לא מתחשב בגודל הפרויקט. לכן הוא לרוב פחות שימושי מאשר חישוב פשוט של תועלת נטו כפי שתואר במשוואה (4) לעיל. לדוגמא: ניקח שני פרויקטים, אחד שעולה 10,000 ₪ ועשוי לחסוך כ-15,000 ₪ כתוצאה מחיסכון באנרגיה (במושגים של ע.נ.נ.), ושני שעולה 100,000 ₪ ועשוי לחסוך כ-130,000 ₪ מחיסכון באנרגיה. לפרויקט הראשון יש יחס תועלת-עלות יותר גבוה מאשר השני (1.5 לעומת 1.3), אך לשני יש תועלת נטו גבוהה יותר (30,000 ₪ לעומת רק 5,000 ₪).

## 3.12 ניתוח יעילות-עלויות

במקרים רבים ייתכן שקשה לכמת את התועלות של פרויקט מסוים, או שקיימת אי וודאות לגבי אותן תועלות, או שעניין התועלות בכלל לא רלוונטי לניתוח הנדרש. במקרים כאלה ניתוח עלות-תועלת עלול להיות מסובך, בלתי אפשרי או פשוט מיותר. למשל, אם רגולציה ממשלתית מחייבת אדריכל או קבלן לעמוד בתקן בנייה מסוים, אין סיבה לאותו אדריכל או קבלן לחשב את הערך הכספי של כל התועלות מעמידה בתנאי התקן. השאלה הרלבנטית תהיה במקרה זה כיצד למזער את העלות של עמידה בתקן.

ניתוח יעילות עלויות הוא שיטה להשוות בין העלויות של פרויקטים שונים, כדי א) לבחון את הדרך הזולה ביותר להשיג יעד מסוים, למשל, לעמוד בתקן כלשהו לחיסכון באנרגיה; או, לחלופין, ב) כדי לזהות איך אפשר להשיג את ההישג המקסימלי (למשל, כמות האנרגיה הגדולה ביותר שאפשר לחסוך כל חודש) בהינתן תקציב מוגבל.

היתרון של ניתוח יעילות עלויות על פני ניתוח עלות-תועלת הוא בכך שהראשון לא דורש כימות של תועלות במושגים כספיים. לפיכך הוא לרוב יותר קל לחישוב, ואפשר לבצעו יותר מהר ויותר בזול. החיסרון היחסי של ניתוח יעילות עלויות בהשוואה לניתוח עלות-תועלת הוא בכך שמאחר והוא אינו כולל גם את התועלות, הוא אינו מספק שום מידע בנוגע לרמת הכדאיות של פרויקט. לדוגמא: ניתוח יעילות עלויות יכול לזהות את האופציה הזולה ביותר להשיג ירידה של 20% בצריכת אנרגיה בבניין מסוים - אך אין בו שום אינדיקציה האם יעד של 20% חיסכון הוא היעד האופטימלי או אפילו אם הוא כדאי כלכלית.

## 3.13 ערך שוקי וערך לא-שוקי

לחומרי גלם, ציוד וכוח עבודה יש מחירים בשוק. את הערך הכספי של חיסכון באנרגיה כפי שמתבטא בחשבונות חשמל נמוכים יותר אפשר לחשב בקלות. אך ישנן תועלות ועלויות שאת ערכן הכספי קשה לכמת. למשל, ירידה בזיהום כתוצאה מחיסכון באנרגיה מפיקה תועלות רבות לציבור אך, מכיוון שאיכות אוויר אינה באה עם תג מחיר, קשה לכמת את הערך הכספי שלה. משום שתועלות ועלויות אלו אינן נסחרות בשוק ערכן נקרא "ערך לא-שוקי".

לעתים קרובות ערכים לא שוקיים הם מוצרים ציבוריים – כלומר, מפוזרים בין כלל הציבור, ולא רכוש פרטי של אף אחד. לכן, ניתוחים כלכליים רבים הנעשים מנקודת המבט של הפרט או של פרויקט בממדים קטנים לא מחשבים את הערכים הלא שוקיים. אך במקרה של פרויקט גדול או בעל היקף אזורי, לאומי או בינלאומי, ערכים לא שוקיים יכולים להיות משמעותיים. לכן, ניתוח כוללני חייב לאמוד את כל התועלות והעלויות הרלוונטיות, הן השוקיות והן הלא שוקיות.

ישנן שיטות רבות כדי לחשב את השווי הכספי של ערכים לא שוקיים [139]. למשל, אפשר להשתמש בשוקים משניים אשר מושפעים מאותו פרויקט או מדיניות. לדוגמא, במקרה של זיהום אוויר, אין שוק לאיכות אוויר, אך יש שווקים שמושפעים ממנה. למשל, כתוצאה מירידה בזיהום אוויר ייתכן שיש ירידה בעלויות של טיפולים בריאותיים, ירידה בימי מחלה במקומות עבודה או עלייה בערך הנדל"ן. את ערכם של התוצאות האלה אפשר לתרגם יותר בקלות למונחים כספיים, ולהשתמש בהם כאומדן כלשהו לערך הכלכלי של איכות האוויר. עבודות שנעשו בארץ מצאו כי הערך הסביבתי של הפחתת הביקוש לחשמל בבנייני מגורים הוא כ- 11-15 אגורות לקוט"ש (במחירי 2009) בהתחשב בהיבטים של איכות האוויר, של הפחתת עומסי השיא ושל חיסכון כספי בשל דחיית ההקמה של תחנות כוח חדשות [140]. באותו אופן, ניתן לאמוד ערך כלכלי של התועלת הסביבתית המתקבלת מיישום אמצעי מדיניות שונים לחיסכון באנרגיה, כגון החלפת ציוד חשמלי ישן בציוד חדיש ויעיל יותר [141].

במקרים מסוימים לא ניתן לכמת את הערכים הלא שוקיים של פרויקט או של מדיניות מסוימת. במקרים אלה, חשוב לציין את הגורמים האלה בניתוח גם אם אי אפשר להשוות אותם ישירות מול הערכיים השוקיים. ציון הערכים הלא שוקיים מעלה אותם על סדר היום כך שמקבל החלטה יכול לתת להם משקל סובייקטיבי בתהליך קבלת החלטה.

[139] לסקירה כללית של שיטות כאלה ראו Freeman (2003) או Champ et al (2003).
[140] אראל וחוב', 2013; פרידמן, 2014
[141] Becker et al, 2008.

# 4. מידול כלכלי של חיסכון באנרגיה

## 4.1 קביעת נקודת בסיס להשוואה

כאשר בוחרים חלופה לחיסכון באנרגיה, חיוני לבחור נקודת בסיס מתאימה להשוואה. למשל, אם מבקשים לדעת אם כדאי לשפץ את הדירה ולהתקין בה ציוד חסכוני, יש להחליט אם הבסיס המתאים ביותר להשוואה הוא דירה שעוברת שיפוץ בלי ציוד חסכוני או שמא דירה שלא עוברת שיפוץ (או אפילו דירה שתעבור שיפוץ בעוד כמה שנים).

כדי לחשב את הערך הכספי של חיסכון באנרגיה המתקבל מפעולה מסוימת חובה קודם לכן לחשב את כמות האנרגיה שתיחסך. לעתים קרובות הערכה זו מאתגרת. ראשית, יש להעריך מה היתה צריכת האנרגיה טרם ביצוע הפעולה או התקנת הציוד. אם יש קבוצת ביקורת – למשל, בניינים דומים, בהם אחד שעבר שיפוץ ואחד שלא, או אחד עם חלונות כפוליים ואחד בלי שניהם עם דיירים דומים – ייתכן שיהיה קל יותר לענות על השאלה הזו. אך במקרים רבים אין קבוצת ביקורת טובה, ויש להיעזר בשיטות מורכבות יותר:

1. *מידול*: מודלים, לרבות מודלים ממוחשבים, מאפשרים לנתח שינויים ספציפיים בפרויקט או בציוד כדי לחזות את השפעתם על צריכת אנרגיה. המכפלה של החיסכון באנרגיה בעלות האנרגיה - שאף היא אינה ידועה ויש להניח הנחות מסוימות לגביה ערכה בעתיד - תאפשר לחשב את החיסכון הכספי הצפוי. היתרון החשוב ביותר של שימוש במודלים הוא שהם מאפשרים לבודד את ההשפעה של משתנה ספציפי. החיסרון הגדול הוא שמודלים מבוססים על הנחות שאינן בהכרח מתאימות למקרה הנבדק.
2. *ניתוח רגרסיה*: במקרים שבהם יש מדגמים בעלי תצפיות רבות עם מגוון רחב של משתנים אשר משפיעים על רמת צריכת האנרגיה, שיטות סטטיסטיות כמו רגרסיה רבת משתנים מאפשרות לבודד את ההשפעות של פעולות ספציפיות, עם נתונים אמיתיים. היתרון הגדול של שיטה זו הוא שהיא מבוססת על נתונים אמפיריים ולא רק על הנחות מודלים. החיסרון הגדול הוא שנדרש מדגם גדול ונתונים מפורטים על מספר רב של משתנים רלוונטיים לצריכת אנרגיה.
3. *שיטות מעורבות*: במקרים שבהם העלויות של הפרויקט ושל האנרגיה ידועות, אפשר להשוות אותן לפרויקטים עם תנאים ותכונות דומים. שיטה זו מהווה מעין פשרה בין שתי השיטות הנזכרות לעיל, משום שהוא משלב גם נתונים אמפיריים וגם תחזיות. יתרונות השיטה הם שאפשר לבודד את הפעולה הספציפית, בעוד שלפחות חלק מהנתונים הם אמפיריים ומבוססים על צריכה ועלויות אמיתיות. החיסרון הגדול הוא שחלק מהנתונים מבוססים על תחזיות בלבד.

היתרונות וחסרונות של שלוש השיטות מתוארים באופן תמציתי בטבלה טו-1 להלן:

**טבלה טו-1. שיטות להערכת חיסכון באנרגיה**

| שיטה | יתרונות | חסרונות |
|---|---|---|
| מודלים | • מאפשרת בידוד של משתנים<br>• קלה לשימוש (במקרים מסוימים!) | • חסרה נתונים אמפיריים<br>• תלויה בהנחות המודל<br>• |
| רגרסיה | • מבוססת על נתונים אמפיריים | • דורשת מדגם גדול ונתונים אמפיריים מפורטים |
| שיטות מעורבות | • נשענת גם על נתונים אמפיריים<br>• מאפשרת בידוד של משתנים | • תלויה חלקית בהערכות או מודלים ובהנחות אשר שימשו בהכנתם |

## 4.2 הגדרת הנחות הניתוח

בכל ניתוח כלכלי חיוני להבהיר איזה הנחות עומדות בבסיס החישוב, קל וחומר כאשר מדובר על ניסיונות לחזות תועלות ועלויות עתידיות. בסופו של דבר, תועלות ועלויות אמיתיות יושפעו ממשתנים דינמיים רבים כמו מחירי אנרגיה ורגולציה ממשלתית. להלן רשימה של אחדים מהמשתנים החשובים ביותר בניתוחים כלכליים של חיסכון באנרגיה.

**א. מחירי אנרגיה**

פרויקטים בעלי אופק (זמן) קצר אפשר להסתמך על מחירי אנרגיה עכשוויים, אך בפרויקטים בעלי אופק ארוך יותר יש צורך לחזות את המחיר העתידי. אקסטרפולציה ממגמות היסטוריות במחירי מקורות אנרגיה אמנם מקובלת בניתוחים כלכליים, אך יש להיזהר בכך. ראשית, מחירי אנרגיה הם בעלי תנודתיות שקשה לחזות. הם מושפעים ממספר רב של גורמים כגון מדיניות לאומית ובינלאומית, מצב המשק הלאומי והבינלאומי, יציבות פוליטית אזורית, ואפילו מזג האוויר. שנית, בגלל התנודתיות הרבה במחירים של סוגים שונים של אנרגיה, אקסטרפולציות תלויות מאוד בטווח השנים שעליהן הן מבוססות. למשל, ייתכן שתחזית למחיר החשמל או מחיר הנפט בעוד 5 שנים אשר מבוססת על מגמות במחירים ב-10 השנים האחרונות תהיה שונה מאוד מתחזית המבוססת על מגמות ב-15 השנים האחרונות.

**ב. שער הריבית ושיעור הניכיון**

עלות ההון יכולה להשתנות מאדם לאדם וממוסד למוסד על פי דירוג האשראי שלהם. במקרים שבו מבצע הפרויקט ידוע, אפשר להשתמש בעלות המשקפת את עלות ההון בפועל לאותו שחקן, כגון הריבית שיידרש לשלם על הלוואה. אך ברוב המקרים, מסתמכים על שער ייצוגי המשקף את עלות ההון הממוצעת בשוק. כמו מחירי האנרגיה, גם שערי ריבית (וכך גם שיעורי הניכיון) עשויים להיות תנודתיים מאוד. שערים נוכחיים או מגמות בשנים האחרונות אינם בהכרח מנבאים היטב את השערים העתידיים.

שיעור הריבית הנבחר עשוי לנוע בטווח של 2-10 אחוזים בשנה, אך טווח זה הוא רחב מאוד. כאשר מדובר בפרויקטים בעלי טווח בינוני או ארוך, הבדל של אפילו אחוז אחד או שניים יכול לשנות את תוצאות הניתוח בצורה דרמטית.

**ג. עלויות של טכנולוגיה**

כפי שטכנולוגיות משתפרות לאורך זמן, כך גם היעילות הכלכלית שלהן. שינוים אלה יכולים להשפיע מאוד על העיתוי האופטימלי של השקעות. גם השקעות בעלות תשואות גבוהות יכולות להיות החלטות לא רצויות במקרה של שינויים בטכנולוגיות. למשל, ההשקעה בפאנלים פוטו-וולטאיים עשויה לחסוך חשמל רב ולהחזיר את ההשקעה תוך מספר שנים מצומצם, אך אם במהלך התקופה הזו יחול פיתוח טכנולוגי אשר יעלה במידה ניכרת את תפוקת החשמל של התאים ללא תוספת במחירם, יתכן והיה עדיף לחכות ולא להשקיע במערכת הקיימת. לכן, כאשר מחליטים על הבסיס להשוואה בניתוחים, יש חשיבות רבה לפרט את ההנחות לגבי סוג הטכנולוגיות (הן הקיימות והן הצפויות), ובהתאם לכך גם הנחות לגבי עלויותיהן ורמת היעילות שלהן.

**ד. רגולציה ומדיניות ממשלתית**

רגולציה ממשלתית יכולה להשפיע על היעילות הכלכלית של אמצעים שונים לחיסכון באנרגיה. למשל, סבסוד טכנולוגיות מסוימות, מיסים על דלק, או תקנות תכנון ובנייה ישפיעו בצורות שונות על הכדאיות הכלכלית של פרויקט. כפי שצוין לעיל, השפעתה של הרגולציה תלויה מאוד בנקודת המוצא של הניתוח. סבסוד של פאנלים סולאריים או טורבינות רוח, למשל, מהווה תועלות לאנשים אשר מתקינים את המתקנים, אך מהווה עלות לחברת החשמל אשר ממנת את הסבסוד (אם כי בעקיפין, הסבסוד מושת על כלל הצרכנים כגורם המשפיע על תעריף החשמל). מנקודת המבט של החברה כולה, יש להתחשב בכל התועלות והעלויות לכל הגורמים הרלוונטיים. בכל מקרה, בניתוח

חשוב לציין מהן ההנחות לגבי שינויים צפויים ברגולציה ומדיניות ממשלתית, משום ששינויים כאלה עשויים להשפיע הן על סך התועלות והן על חלוקת התועלות של פרויקט.

**ה. התנהגות צרכנים**

מדידת השיפור בצריכת אנרגיה כתוצאה משיטת בנייה או מטכנולוגיה מסוימת היא לרוב משימה הנדסית טכנית. נפוץ מאוד בניתוחים כאלה להסתמך על הנחות בנוגע לתכונות של 'צרכן ממוצע'. את חלקן קל יחסית לאמוד. למשל, גודל המשפחה והכנסה. אחרות קשה יותר להעריך. כמות האנרגיה הנחסכת בפועל מושפעת לא רק מהטכנולוגיה בשימוש, אלא גם מצורת השימוש בה על ידי הצרכן, אותה הרבה יותר קשה לנבא. התנהגות צרכנים מושפעת מהעדפות אישיות, הכנסה, הרגלים, ומספר רב של גורמים אחרים[142]. למשל, אנשים אשר עשויים להשקיע בציוד לחיסכון באנרגיה עשויים גם להיות צרכנים בעלי מודעות גבוהה וחסכניים יותר מלכתחילה. לכן, חישוב של חיסכון אשר מבוסס על תכונות של הצרכן הממוצע עלול להיות לוקה באומדן יתר מבחינת כמות האנרגיה הנחסכת וכתוצאה מכך גם לגבי ערכה הכלכלי.

מאחר וייתכנו הבדלים משמעותיים בצריכת החשמל בפועל שני בניינים בעלי תכונות זהות, כתוצאה מהבדלים בהתנהגות הדיירים, חשוב לציין מהן הנחות אלו כאשר מבצעים את החישוב מראש וכאשר מציגים את מסקנות הניתוח.

**ו. תקופת הניתוח**

הנחות לגבי תקופת הזמן הנבדקת בניתוח ישפיעו על הנחות אחרות רבות, כגון רמת הכדאיות של טכנולוגיות מסוימות, אורך החיים של סבסוד ממשלתי או שינויים בהכנסת הצרכנים. חשוב לציין ולהצדיק את התקופה הנבדקת בניתוח. למשל, האם מודדים את החיסכון הצפוי בבניין לאורך כל החיים של המבנה, או רק עד שהוא צפוי לעבור שיפוץ? היות השקעות רבות באמצעים לחיסכון באנרגיה מחזירות את עצמן רק בטווחים בינונים או ארוכים, הגדרת תקופת הזמן הנבדקת בניתוח עלולה להיות ההבדל בין רווחיות והפסד.

### 4.3 מבחני רגישות

מכיוון שתוצאותיו של כל ניתוח כלכלי תלוית במידה רבה במספר רב של הנחות המנתח, נהוג לערוך *מבחני רגישות*. מבחני רגישות בודקים עד כמה תוצאות הניתוח משתנות עקב שינויים בהנחות המוצא. למשל, מבחני רגישות יכולים לבחון אם פעולה מסוימת אשר כדאית כלכלית בשיעור ניכיון של 5% כדאית גם בשיעור של 7%; או אם צעד מסוים אשר כדאי עם סבסוד ממשלתי יהיה כדאית גם ללא הסבסוד. מבחני רגישות מאפשרים השוואה בין תרחישים שונים, ולכן הם כלי חיוני לקבלת החלטות מושכלת.

## 5. דוגמאות

בתת פרק זה מופיעות דוגמאות של שאלות טיפוסיות אשר עולות בניתוחים כלכליים של חיסכון באנרגיה, ומציגות דרכים אפשריות לענות לעליהן. חשוב לציין שיש תמיד יותר מאשר דרך אחת לנתח סוגיה מסוימת, ולכן הדוגמאות הבאות הן רק לצורך הדגמה ואינן מייצגות בהכרח את הדרך 'הנכונה' או אפילו המתאימה ביותר עבור כל מקרה.

### 5.1 דוגמא 1: חישוב החזר פירעון (נקודת המבט לניתוח - הפרט)

בעלי דירה שוקלים להתקין חלונות משופרים. עלות החלונות היא 7,000 ₪, אך הם צפויים לחסוך כ-200 קוט"ש לחודש, כלומר 2,400 קוט"ש בשנה. כדי לחשב את תקופת הפירעון עבור ההשקעה הזו, יש צורך להעריך גם את העלות של חשמל בעתיד – אשר אינה ידועה מראש. למשל, אם

[142] Steg 2008

המחירים הריאליים יהיו קבועים, תקופת הפירעון תהיה ארוכה יותר מאשר אם המחירים הריאליים יעלו לאורך זמן. בדוגמא זו נניח שעלות החשמל היא 0.50 ₪ לקוט״ש ושהמחיר הריאלי יישאר קבוע (כלומר, הוא יעלה בהתאם לעלייה במדד המחירים) לאורך תקופת הניתוח.

חישוב פשוט של תקופת פירעון (simple payback period) היה מחבר את התועלות כל שנה עד שערכן יעלה על העלות הראשונית של 7,000 ₪. מאחר וערך החיסכון השנתי הוא 1,200 ₪ (2,400 קוט״ש כפול 0.50 ₪ לקוט״ש), ההשקעה מחזירה את עצמה כעבור 6 שנים. חישוב פשוט כזה אינו מעריך את הערך הכספי של הזמן שחלף עד קבלת ההחזר. לשם כך יש להחליט על שיעור ניכיון מתאים ולחשב את הערך הנוכחי הנקי (ע.נ.נ.) של החיסכון העתידי. בחירת שיעור מתאים תלויה בעלות ההון, למשל, שיעור ריבית על הלוואה או השקעה בבנק.

אם ניקח, לדוגמא, שיעור ניכיון של 5%, במקום להעריך את החיסכון ב-1,200 ₪ לשנה, נחשב את הערך של החיסכון בשנה השנייה ב- 1,200/1.05 = 1,142.86 ₪, והערך של החיסכון בשנה השלישית ב- $1,200/(1.05)^2$ =1088.44 ₪, וכו׳. אם נחבר את הערכים המנוכים האלה (כלומר, הערכים לאחר היוון), נראה שההשקעה מחזירה את העצמה רק כעבור 7 שנים.

בדוגמא זאת, הדיירים הם אלה שמרוויחים מההשקעה. אם במקום דיירים, נקודת ההסתכלות היתה של יזם או קבלן, החישוב היה דומה, והיזם או קבלן היה יכול להשתמש בו בחישובים של פרמיית מחיר לדירה או בשיווק הדירה. אם הניתוח היה נעשה מנקודת המבט של כלל הציבור, היה כדאי להכניס את התועלות מירידה בזיהום עקב הפחתת הפליטות הכרוכות בהפקת חשמל, אך בפרויקט קטן כזה, לרוב אין מתחשבים בעלויות או תועלות חיצוניות.

### 5.2 דוגמא 2: ניתוח עלות-תועלת

ניתוח עלות-תועלת הוא השוואה פשוטה בין עלויות ותועלות של פרויקט. אפשר להשתמש בו כדי להבחין אם פרויקט מסוים כדאי כלכלית או כדי לראות איזה חלופה מבין כמה אפשרויות מניבה את התשואה הגדולה ביותר. מה שמבדיל בין ניתוח טוב וניתוח לא טוב הוא א) זיהוי כל העלויות והתועלות הרלוונטיות, ו-ב) רמת הדיוק בכימות שלהן. מן הסתם, מה שנחשב כתועלת ומה שנחשב כעלות הוא עניין של נקודת מבט. להלן שלוש דוגמאות. בראשונה ובשנייה (2א ו-2ב) הניתוח נעשה מנקודת המבט של הפרט הנדרש להחליט בין שתי חלופות שונות. בדוגמא השלישית (2ג) הניתוח נעשה מנקודת המבט של הממשלה, אשר שוקלת אם לשדרג תקן לחיסכון אנרגטי. בדוגמא הזו, נכללות תועלות כמו ירידה בזיהום אוויר, תועלות אשר לרוב לא נכללות בניתוחים מנקודת המבט של הפרט. כמו כן, בדוגמא השלישית נשתמש בשיעור ניכיון חברתי, במקום בשיעור השוק, כדי לשקף את העובדה שמדובר בפרויקט בעל השפעות חברתיות רחבות.

**א. דוגמא 2א: ניתוח עלות-תועלת (פרספקטיבת הניתוח - הפרט)**

יזם מעוניין לדעת מהי התועלת הכלכלית מהשגת הסמכה לפי תקן מתקדם לחיסכון אנרגטי עבור בניין חדש שהוא בונה. הוא מתלבט בין שני סוגי חומר בידוד כדי לעמוד בתקן. להלן פרטים של שתי החלופות, בהשוואה לבנייה עם בידוד סטנדרטי. שתי החלופות מתוארות בטבלה 2 להלן.

**טבלה טו-2. דוגמא 2א - הנחות**

| הנחה | חלופה 1 | חלופה 2 |
|---|---|---|
| עלות (₪) | 150,000 | 120,000 |
| חיסכון משוער בחשמל (קוט״ש לשנה) | 24,000 | 20,000 |
| העלות הריאלית של החשמל (₪ לקוט״ש), קבועה | 0.50 | |
| תקופת הניתוח | 50 שנה | |
| שיעור ניכיון | 6% | |

ניתוח עלות-תועלת מאפשר לבחון איזה משני הפרויקטים יהיה בעל תועלת הנטו הגדולה ביותר. נניח שאת העלות הראשונית משלמים (כולה) במהלך הבנייה, אך החיסכון יתחיל להצטבר רק כעבור שנה עם סיום שלב הבנייה ואכלוס הבניין. לכן, אין צורך להשתמש בשיעור ניכיון במקרה של העלויות הראשוניות, אך חובה לעשות כך במקרה של ערך החיסכון. התוצאות של הניתוח מוצגות בטבלה 3 בשורות המוגדות "תרחיש א' ". כפי שניתן לראות, בהינתן ההנחות שהונחו לעיל, לחלופה 1 יש תועלות גדולות במקצת מחלופה 2.

אפשר לבדוק בעזרת מבחני רגישות עד כמה התוצאות האלה ישתנו במידה ונשנה את ההנחות. למשל, אם שיעור ניכיון יהיה 7% במקום 6%, מסתבר שאופציה 2 תהיה בעלת התועלות הגדולות יותר, כפי שנראה בטבלה 3 ב-"תרחיש ב' ". השינוי הוא תוצאה של העובדה שלמרות שהאופציה הראשונה חוסכת יותר, התועלות פרושות על פני זמן רב ולכן ככל ששיעור הניכיון עולה, ה-ע.נ.נ. של התועלות העתידיות פוחת. באופן דומה אפשר לראות איך התוצאות משתנות אם במקום לשנות את שיעור הניכיון נקצר את תקופת ההחזר הנבדקת, ל- 30 שנה במקום 50 שנה. במקרה הזה, גם בשיעור הניכיון המקורי של 6%, לאופציה 2 יש התועלות הגדולות יותר, כפי שמוצג ב-"תרחיש ג' " בטבלה טו- 3.

הדוגמא הזאת מדגישה את החשיבות של הנחות היסוד לניתוח ואת הצורך במבחני רגישות. במקרה זה, הבחירה הטובה ביותר תלויה, בין היתר, בהנחות לגבי כמות האנרגיה שתיחסך, מחיר החשמל בעתיד, שיעור הניכיון המתאים, והצפי לגבי אורך החיים השימושי של הפרויקט.

**טבלה טו-3. דוגמא 2א' – מבחני רגישות לתוצאות**

| תרחיש | הנחות | חלופה | עלות (₪) | ערך נוכחי נקי (ע.נ.נ.) של חיסכון באנרגיה (₪) | ערך נוכחי נקי (ע.נ.נ.) של תועלות נטו (₪) |
|---|---|---|---|---|---|
| א | תקופה : 50 שנה | 1 | 150,000 | 189,142.3 | 39,142.3 |
| | שיעור ניכיון : 6% | 2 | 120,000 | 157,618.6 | 37,618.6 |
| ב | תקופה : 50 שנה | 1 | 150,000 | 165,609.0 | 15,609.0 |
| | שיעור ניכיון : 7% | 2 | 120,000 | 138,007.5 | 18,007.5 |
| ג | תקופה : 30 שנה | 1 | 150,000 | 165,178.0 | 15,178.0 |
| | שיעור ניכיון : 6% | 2 | 120,000 | 137,648.3 | 17,648.3 |

**ב. דוגמא 2ב – ניתוח עלות תועלת (פרספקטיבת הניתוח: הפרט)**

בדוגמא הקודמת העלויות והתועלות לא השתנו לאורך זמן. בדוגמא הזאת, נשווה בין שתי אופציות עם עלויות ראשוניות שונות ועלויות תפעול שונות. מערכת מיזוג אוויר בחנות צורכת כ-30,000 קוט"ש בשנה. בעלי החנות מתלבטים בין שתי מערכות חדשות. מערכת א' עולה 20,000 ₪ וצפויה לצרוך רק 24,000 קוט"ש בשנה. מערכת ב' זולה יותר, ועולה רק 10,000 ₪, אך צפויה לצרוך כ- 27,000 קוט"ש בשנה. הבעלים מניחים שמחירי החשמל הריאליים יישארו כפי שהם, 0.50 ₪ לקוט"ש. כך, עלות התפעול הצפויה למערכת א' היא 12,000 ₪ לשנה, לעומת 13,500 ₪ לשנה למערכת ב'. הבעלים מניחים שאורך החיים הצפוי לשתי המערכות הוא 10 שנים.

שיעור הניכיון של 5% מבוסס על דירוג האשראי של הבעלים. אין צורך לנכות את עלות הקנייה או את עלות התפעול בשנה הנוכחית, היות והן כבר מחושבות במושגים של המחירים בשוק היום. כל העלויות, ובפרט עלויות עתידיות, מוצגות בטבלה טו-4א להלן במושגים של ערך נוכחי נקי. הבחירה האופטימלית היא החלופה עם סך העלויות הנמוך יותר. במקרה הזה, אין צורך לרשום את התועלות בנפרד. אפשר להבין שהתועלות הן פשוט הערך של הירידה בעלויות. כפי שניתן לראות בטבלה

טו-4א, מערכת א' היא זולה יותר. אך מבחן רגישות מראה שאם מניחים אורך חיים יותר קצר למערכות, למשל, 6 שנים, מערכת ב' עדיפה (טבלה טו-4ב).

**טבלה טו-4א.**

| שנה | עלויות תפעול (₪) במושגים של ע.נ.נ. (NPV) מערכת א' | מערכת ב' |
|---|---|---|
| 1 | 12,000 | 13,500 |
| 2 | 11,429 | 12,857 |
| 3 | 10,884 | 12,245 |
| 4 | 10,366 | 11,662 |
| 5 | 9,872 | 11,106 |
| 6 | 9,402 | 10,578 |
| 7 | 8,955 | 10,074 |
| 8 | 8,528 | 9,594 |
| 9 | 8,122 | 9,137 |
| 10 | 7,735 | 8,702 |
| סה"כ עלויות תפעול | 97,294 | 109,456 |
| עלות קנייה | 20,000 | 10,000 |
| **סה"כ עלויות** | **117,294** | **119,456** |

**טבלה טו-4ב.**

| שנה | עלויות תפעול (₪) במושגים של ע.נ.נ. (NPV) מערכת א' | מערכת ב' |
|---|---|---|
| 1 | 12,000 | 13,500 |
| 2 | 11,429 | 12,857 |
| 3 | 10,884 | 12,245 |
| 4 | 10,366 | 11,662 |
| 5 | 9,872 | 11,106 |
| 6 | 9,402 | 10,578 |
| 7 | | |
| 8 | | |
| 9 | | |
| 10 | | |
| סה"כ עלויות תפעול | 63,954 | 71,948 |
| עלות קנייה | 20,000 | 10,000 |
| **סה"כ עלויות** | **83,954** | **81,948** |

**ג. דוגמא 2ג – ניתוח עלות תועלת (פרספקטיבת הניתוח: הממשלה)**

בדוגמאות הקודמות הניתוחים היו מבוססים על ההנחה שכל העלויות והתועלות הן של הצרכן, ושהתועלות מבטאות רק את החיסכון הכספי מחשבונות אנרגיה יותר נמוכים. גישה זו מתעלמת מתועלות אחרות מחיסכון באנרגיה כמו ירידה בזיהום אוויר עקב הקטנת הפליטות הכרוכות בהפקת החשמל. בניגוד לניתוח עלות-תועלת שנעשה מנקודת המבט של הפרט, ניתוח מנקודת המבט של הממשלה, של כלל המשק, או של החברה באופן כללי אמור לכלול כל העלויות והתועלות הקשורות לפרויקט - כולל אלו ה-"לא שוקיות."

בדוגמא הזו הממשלה שוקלת להעלות את התקן לבידוד תרמי במבנים. בהשוואה לתקן הקיים, התקן החדש צפוי לחסוך כ-5 מיליון קוט"ש בשנה הראשונה ועוד 2.5 מיליון קוט"ש נוספים כל שנה, עם בנייתם של בניינים חדשים. עלות שדרוג התקן מוערכת בכ- 15 מיליון ₪ כל שנה במונחים ריאליים. מחיר החשמל הוא 0.50 ₪ לקוט"ש ונניח שהמחיר הריאלי יישאר יציב.

כתוצאה מחיסכון האנרגיה, התקן החדש צפוי להביא לירידה בפליטות גזי חממה, וירידה ברמת החלקיקים והגופרית באוויר. שיפור איכות האוויר צפוי להביא לירידה בימי מחלה וירידה במקרי התקפי אסתמה ומחלות בדרכי הנשימה. רמת הירידה בזיהום היא פונקציה של סוגי הדלקים שבהם משתמשים לייצר חשמל. למשל, חשמל מפחם מזהם יותר מאשר חשמל מגז טבעי. אם, כמו שצפוי, המדינה תפחית את השימוש בפחם ותגדיל את השימוש בגז טבעי לאורך השנים, הערך של החיסכון יצטמצם בהתאם. בדוגמא הזאת, נניח שהשווי של התועלות הסביבתיות והבריאותיות מהפחתה בזיהום הוא 0.15 ₪ לקוט"ש במשך 10 שנים, ולאחר מכן יהיה 0.10 ₪ לקוט"ש כתוצאה מהמעבר לגז טבעי. ייתכן שיש עוד תועלות לחברה מחיסכון באנרגיה, כגון מניעת הצורך לבנות תחנות כוח

נוספות או תועלת גאו-פוליטית מירידה בתלות בייבוא מקורות אנרגיה, אך בדוגמא הזאת נניח שהתועלות החברתיות היחידות הן ההשפעות הסביבתיות ובריאותיות.

מכיוון שמדובר על תועלות לחברה כולה, השימוש בשיעור ניכיון חברתי מתאים בניתוח זה. לכן ניקח שיעור של 3%. נבדוק את כדאיות השינוי בתקן לאורך תקופה של 20 שנה. אפשר לטעון שהתקופה המתאימה לניתוח זה היא 50 שנה, משום שרוב הבניינים שייבנו לפי התקן יתפקדו לפחות 50 שנה. לעומת זאת, אפשר לטעון שבכל מקרה תוך 20 שנה יהיה שדרוג של תקני בנייה, ולכן עדיף להסתכל רק על 20 שנים הבאות. בכל מקרה, חשוב להצדיק את בחירת פרק הזמן הנכלל בניתוח. סיכום של הנחות הניתוח ניתן בטבלה 5.

**טבלה טו-5. דוגמא 2ג - הנחות**

| | |
|---|---|
| תועלת מחיסכון בצריכת חשמל | 5 מיליון קוט״ש בשנה הראשונה ו- 2.5 מיליון קוט״ש נוספים כל שנה לאחר מכן |
| העלות הריאלית לחשמל | 0.5 ₪ לקוט״ש (קבוע) |
| הערך של ירידה בזיהום אוויר | 0.15 ₪ לקוט״ש בעשר שנים הבאות, ו- 0.10 ₪ לקוט״ש לאחר מכן. |
| תוספת עלות לבנייה | 15 מיליון ₪ בשנה |
| שיעור הניכיון | 3% |
| תקופת הניתוח | 20 שנה |

חישוב של התועלות והעלויות הנגזרות מהנחות אלה מובא בטבלה טו-6 למטה. בצד ימין מופיעות התועלות והעלויות לפני ניכוי, ואילו בצד שמאל מופיע הערך הנוכחי הנקי של אותן התועלות והעלויות. התועלות מחיסכון בחשמל בלבד (ללא התועלת מירידה בזיהום האוויר) הן פחות מסה״כ העלויות (קצת פחות מ-202 מיליון ₪ מול קצת פחות מ-230 מיליון ₪ בהתאמה). אך כאשר מביאים בחשבון גם את התועלת מירידה בזיהום, החישוב מראה כי התועלות משדרוג התקן גדולות מסך העלויות בכמעט 19 מיליון ₪.

## 5.3 דוגמא 3 – ניתוח יעילות עלויות

ניתוח יעילות-עלויות יכול לזהות את הדרך הזולה ביותר להשיג יעד מסוים, או לחלופין, יכול לזהות את היעד המקסימלי שאפשר להשיג עם תקציב מוגבל. להלן דוגמאות לשתי החלופות. בראשונה (3א), הניתוח מראה את החלופות היעילות ביותר כדי לעמוד בתקן של חיסכון אנרגטי, ואילו בשנייה (3ב) הניתוח מזהה את כמות האנרגיה המקסימלית שאפשר לחסוך בתקציב נתון.

**א. דוגמא 3א – ניתוח יעילות עלויות עם יעד ספציפי**

מפעל בודק חמש אפשרויות כדי להשיג ירידה של 10,000 קוט״ש בצריכת חשמל השנתית שלו: א) תוספת בידוד תרמי, ב) החלפת חלונות, ג) התקנת פאנלים סולאריים, ד) מערכת מיזוג אוויר חדשה, ו-ה) החלפות תאורה.

| שנה | חיסכון בחשמל | ערך נומינלי ללא היוון | | | | ערך נוכחי נקי (NPV) לאחר היוון | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | תועלת מחיסכון בחשמל | תועלת מירידה בזיהום | סה"כ תועלות | עלויות | תועלת מחיסכון בחשמל | תועלת מירידה בזיהום | סה"כ תועלות | עלויות |
| | (קוט"ש לשנה) | (₪ לשנה) | (₪ לשנה) | (₪ לשנה) | (₪ לשנה) | (₪ לשנה) | (₪ לשנה) | (₪ לשנה) | (₪ לשנה) |
| 1 | 5,000,000 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 | 15,000,000 | 2,500,000 | 750,000 | 3,250,000 | 15,000,000 |
| 2 | 7,500,000 | 3,750,000 | 1,125,000 | 4,875,000 | 15,000,000 | 3,640,777 | 1,092,233 | 4,733,010 | 14,563,107 |
| 3 | 10,000,000 | 5,000,000 | 1,500,000 | 6,500,000 | 15,000,000 | 4,712,980 | 1,413,894 | 6,126,873 | 14,138,939 |
| 4 | 12,500,000 | 6,250,000 | 1,875,000 | 8,125,000 | 15,000,000 | 5,719,635 | 1,715,891 | 7,435,526 | 13,727,125 |
| 5 | 15,000,000 | 7,500,000 | 2,250,000 | 9,750,000 | 15,000,000 | 6,663,653 | 1,999,096 | 8,662,749 | 13,327,306 |
| 6 | 17,500,000 | 8,750,000 | 2,625,000 | 11,375,000 | 15,000,000 | 7,547,827 | 2,264,348 | 9,812,175 | 12,939,132 |
| 7 | 20,000,000 | 10,000,000 | 3,000,000 | 13,000,000 | 15,000,000 | 8,374,843 | 2,512,453 | 10,887,295 | 12,562,264 |
| 8 | 22,500,000 | 11,250,000 | 3,375,000 | 14,625,000 | 15,000,000 | 9,147,280 | 2,744,184 | 11,891,463 | 12,196,373 |
| 9 | 25,000,000 | 12,500,000 | 3,750,000 | 16,250,000 | 15,000,000 | 9,867,615 | 2,960,285 | 12,827,900 | 11,841,139 |
| 10 | 27,500,000 | 13,750,000 | 4,125,000 | 17,875,000 | 15,000,000 | 10,538,230 | 3,161,469 | 13,699,699 | 11,496,251 |
| 11 | 30,000,000 | 15,000,000 | 3,000,000 | 18,000,000 | 15,000,000 | 11,161,409 | 2,232,282 | 13,393,690 | 11,161,409 |
| 12 | 32,500,000 | 16,250,000 | 3,250,000 | 19,500,000 | 15,000,000 | 11,739,346 | 2,347,869 | 14,087,215 | 10,836,319 |
| 13 | 35,000,000 | 17,500,000 | 3,500,000 | 21,000,000 | 15,000,000 | 12,274,148 | 2,454,830 | 14,728,977 | 10,520,698 |
| 14 | 37,500,000 | 18,750,000 | 3,750,000 | 22,500,000 | 15,000,000 | 12,767,838 | 2,553,568 | 15,321,405 | 10,214,270 |
| 15 | 40,000,000 | 20,000,000 | 4,000,000 | 24,000,000 | 15,000,000 | 13,222,356 | 2,644,471 | 15,866,827 | 9,916,767 |
| 16 | 42,500,000 | 21,250,000 | 4,250,000 | 25,500,000 | 15,000,000 | 13,639,566 | 2,727,913 | 16,367,480 | 9,627,929 |
| 17 | 45,000,000 | 22,500,000 | 4,500,000 | 27,000,000 | 15,000,000 | 14,021,256 | 2,804,251 | 16,825,507 | 9,347,504 |
| 18 | 47,500,000 | 23,750,000 | 4,750,000 | 28,500,000 | 15,000,000 | 14,369,141 | 2,873,828 | 17,242,969 | 9,075,247 |
| 19 | 50,000,000 | 25,000,000 | 5,000,000 | 30,000,000 | 15,000,000 | 14,684,865 | 2,936,973 | 17,621,838 | 8,810,919 |
| 20 | 52,500,000 | 26,250,000 | 5,250,000 | 31,500,000 | 15,000,000 | 14,970,008 | 2,994,002 | 17,964,010 | 8,554,290 |
| **Total** | **575,000,000** | **287,500,000** | **65,625,000** | **353,125,000** | **300,000,000** | **201,562,772** | **47,183,838** | **248,746,610** | **229,856,987** |

טבלה טו-9. דוגמא 2ג - תוצאות

כל חלופה שונה, הן מבחינת כמות החשמל הנחסכת והן מבחינת עלות הביצוע. פרטים על הצפי לחיסכון ולגבי עלויות של כל אחת מהאופציות ניתנים בטבלה טו-7 להלן. העלויות רשומות במושגים של ערך נוכחי נקי, בהתייחס לתקופת חישוב של 20 שנים וערך היוון של 5 אחוז. כדי להבין באיזו מן החלופות כדאי להשקיע, כל אחת מהן נמדדת במושגים של עלות ליחידת אנרגיה נחסכת, כפי שרשום בעמודה בצד שמאל. האסטרטגיה היעילה (הזולה) ביותר היא להתחיל עם החלופה שבה העלות הנמוכה ביותר לקוט״ש שנחסך. במקרה הזה, מדובר על שינוי במערכת מיזוג האוויר. מאחר ופעולה זו לבד אינה מספיקה כדי להשיג את היעד של 10,000 קוט״ש חיסכון, יש לנקוט גם באמצעי נוסף. החלופה השנייה ביעילותה היא החלפת התאורה. יישום שתי החלופות האלה גם יחד עשוי לחסוך מעל 10,000 קוט״ש בשנה בעלות הנמוכה ביותר – פחות מ-6,500 ₪. עלות זו היא פחות מחצי מהעלות של האופציה היקרה ביותר: התקנת פאנלים סולאריים.

**טבלה טו-7. דוגמא 3 - תוצאות**

| חלופה | חיסכון צפוי באנרגיה (קוט״ש) | עלות (₪) | יעילות (עלות ליחידת חיסכון) (₪ לקוט״ש) |
|---|---|---|---|
| הוספת בידוד תרמי | 6,000 | 6,600 | 1.1 |
| החלפת חלונות | 5,000 | 6,000 | 1.2 |
| התקנת פאנלים סולאריים | 10,000 | 14,000 | 1.4 |
| החלפת מע׳ מיזוג אוויר | 8,000 | 5,000 | 0.625 |
| החלפת תאורה | 2,000 | 1,500 | 0.75 |

**ב. דוגמא 3ב – ניתוח יעילות עלויות עם תקציב מוגבל**

לפעמים, במקום להשיג יעד חיסכון מסוים, המטרה של הניתוח היא לבדוק איך אפשר להשיג את רמת החיסכון המרבית בהינתן תקציב מסוים. התהליך דומה מאוד לתהליך שהוסבר בדוגמא הקודמת. למשל, נבחן אותן חלופות לשיפוץ ונגדיר תקציב של 15,000. מה מקסימום החיסכון האפשרי? נתחיל שוב עם החלופה היעילה ביותר, מיזוג אוויר. לאחר מכן, החלופה השנייה, תאורה, וכן הלאה, עד שממצים את התקציב. במקרה הזה, החלופות הטובות ביותר הן מיזוג אוויר, תאורה, ובידוד תרמי. החיסכון הכולל שיתקבל הוא 16,000 קוט״ש בשנה, בעלות של 13,100 ₪. אין שילוב אחר של חלופות שיפוץ היכול להביא לחיסכון רב יותר באנרגיה במסגרת התקציב של 15,000.

## 6. העלות של רכיבים חוסכי-אנרגיה בבנייה למגורים בישראל

מחקרים רבים הצביעו על הערך הכלכלי העצום מחסכון באנרגיה במגורים [143], וממשלות רבות משקיעות מיליארדי דולרים בתוכניות להתייעלות אנרגטית [144]. מדיניות ממשלתית יכול שתהיה מונעת משיקולים רחבים, המבטאים תועלות לחברה, ויתכן גם שהפרט עשוי להעדיף בנייה יקרה יותר מהטעמים האלה. אולם ראוי להציג, ולו רק באופן כללי ביותר, את העלות הנוספת הכרוכה בבנייה משמרת אנרגיה, לפי התקינה הקיימת היום. בהמשך הפרק הזה יוצגו ממצאי ניתוח של העלות הנוספת של בנייה של בניינים חדשים לפי התקן לבנייה בת קיימה (ת״י 5281). בפרק הבא תובא התייחסות לשיקולים כלכליים בשיפוץ בניינים קיימים.

[143] ראו למשל, Gillingham et al., 2009 ;Linares and Labandeira, 2010

[144] Barbose et al, 2009.

העלות הישירה של יישום הדרישות המופיעות בתקן לבנייה בת-קיימה (ת"י 5281) נבחנה באמצעות ניתוח מפורט של שני מקרי בוחן [145], בהשוואה לעלויות של בנייה קונבנציונלית. המחקר בוצע בשלושה שלבים:

בשלב הראשון זוהו הרכיבים בבניין הנבדק אשר נחשבים 'ירוקים', וזאת על פי הסעיפים המפורטים בתקן . עבור כל הרכיבים הללו נאספו מהיזמים הנתונים אודות עלותם בפועל. נתוני עלות אלו נבדקו ע"י יועץ חיצוני, אנשי מקצוע שונים החברים במועצה הישראלית לבנייה ירוקה, ובמידת הצורך הושוו למחירי שוק של ספקים שונים מתחום הבניין. בשלב השני בוצעה השוואה בין העלות בפועל של הרכיבים הירוקים בבניינים הנבדקים, לבין הערכת עלות רכיבים דומים (במידה והיה צורך בכך) בבנייה קונבנציונלית. חישוב זה נותן את עלות ההשקעה הנוספת בגין בנייה ירוקה בהשוואה לבניין ייחוס שנבנה בצורה קונבנציונלית עבור כל אחד מהרכיבים.

מהמחקר עולה ששיעור ההשקעה הנוספת בגין רכיבים ירוקים בבניינים היה 2.1-4.1 אחוזים. שיעור זה תואם את משרע הממצאים ממחקרים דומים בחו"ל, הנע בין 0-3 אחוזים עבור תוספת עלות ממוצעת, ובין 1-11 אחוזים תוספת עלות בנייה עבור הסמכה לרמות הגבוהות ביותר. ההבדלים בממצאים בין שני מקרי הבוחן משקפים את הגמישות הקיימת בתקן, אשר מאפשר ליזם לבחור את הרכיבים הירוקים השונים אותם הוא מעוניין ויכול ליישם בבניין, בכדי לצבור מספיק נקודות המאפשרות לו לקבל את ההסמכה. עם זאת, בשני הבניינים נמצא כי ההשקעה בשיפור הבידוד התרמי של הקירות החיצוניים ובשיפור מערכות הזיגוג היתה מרכיב משמעותי ביותר.

חשוב להדגיש שעלות ההשקעה הנוספת בבנייה ירוק בשיעור מסוים אין משמעותה עלייה במחיר הדירה לצרכן באותו שיעור, אלא בשיעור נמוך בהרבה. זאת משום שעלות הבנייה הישירה של הבניין אינה כוללת עלות קרקע, רווחי יזם או מיסים - עלויות המגולמות במחיר הדירה לצרכן. עלות הקרקע ורכיבי המיסים השונים מוערכים בכ- 50 אחוזים ממחירי הדירות בישראל, (רכיב הקרקע המפותחת מגיע לכ- 30 אחוז ממחיר הדירה, אבל שונה מאוד מאזור לאזור ; ורכיב המיסים השונים - מע"מ, מס רכישה, מס שבח, היטל השבחה ודמי היתר על קרקעות רמ"י מגיע לכ- 20 אחוזים ממחיר הדירה). אם נניח שעלות הבנייה בבניינים אלו אכן מהווה 50 אחוזים מהמחיר הכולל של הבניין לצרכן, הרי שתוספת העלות לצרכן בגין ההשקעה בבנייה ירוקה הינה כ- 1-2 אחוז בלבד. כמו כן, בעבודה שבדקה את העלויות של בנייה ירוקה, נמצא שמבחינת תוספת עלות לפרויקט בניין, העלות המרכזית ברוב הפרויקטים הנדל"ניים היא עלות הקרקע והמסים – מרכיבים ששונים מאוד בין אזורים. לכן אין להכליל לגבי תוספת עלות או החזר צפוי, הן במושגים אבסולוטיים והן במושגים יחסיים, אלא רצוי לבדוק כל פרויקט לגופו.

## מקורות

[1] אראל א., בקר נ. ופרידמן ח. (2013). דו"ח סופי במחקר "שיפוץ בנייני מגורים בישראל לשם חיסכון באנרגיה". משרד האנרגיה והמים, 184 עמ'.

[2] משרד התשתיות הלאומיות (2010). התוכנית הלאומית להתייעלות אנרגטית: צמצום בצריכת חשמל -2010 2020. ירושלים.

[3] פרידמן, ח. (2014). שיפוץ בנייני מגורים בישראל לשם חיסכון באנרגיה. עבודה לשם קבלת תואר דוקטור, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב.

[4] קוט, ח. וכץ, ד. (2013). עלויות בנייה ירוקה בבנייני מגורים בישראל. המועצה לבנייה ירוקה. תל אביב.

[5] Abroms, L.C., and Maibach, E. W. (2008). "The effectiveness of mass communication to change public behavior." Annual Review of Public Health 29 219-234.

[6] Allcott, H. (2011). "Social norms and energy conservation." Journal of Public Economics 95(9-10) 1082-1095.

[145] קוט וכץ, 2013.

[7] Barbose, G. Goldman, C. and Schlegel, J. (2009). The Shifting Landscape of Ratepayer-Funded Energy Efficiency in the U.S., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratories. Berkeley, CA.

[8] Becker N., Lavee D. and Fishman Y., (2008). Economic evaluation of investment in electricity conservation. Energy Conversion and Management, 49 (12): 3517-3530.

[9] Champ, P. A., Boyle, K. J. and Brown, T.C. (eds.) (2003). A Primer on Nonmarket Valuation. The Economics of Non-Market Goods and Resources. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

[10] Davis Langdon (2004). Costing green: a comprehensive database and costing methodology. The Davis Langdon Research Group.

[11] Davis Langdon (2007). The costs and benefits of achieving green buildings. The Davis Langdon Research Group.

[12] Freeman, A. M. (2003). The measurement of environmental and resource values: theory and methods. Washington, DC, Resources for the Future.

[13] Gillingham, K., Newell, R. G. and Palmer, K. (2009). "Energy Efficiency Economics and Policy." Annual Review of Resource Economics 1 (1): 597–620.

[14] Greening, L. A., Greene, D. L. and Difiglio, C.. (2000). "Energy efficiency and consumption -- the rebound effect -- a survey." Energy Policy 28 (6-7): 389-401.

[15] Kats, G., Alevantis L, Berman A, Mills E, Perlman J. (2003). The costs and financial benefits of green buildings. Sacramento, CA: California Sustainable Building Task Force.

[16] Kats, G, James M, Apfelbaum S, Darden T, Farr D, Fox R. (2008). Greening buildings and communities: costs and benefits. Capital E.

[17] Katz, D. (2013). "Policies for water demand management in Israel". pp. 147-164, in Water Policy in Israel: Context, Issues and Options, N. Becker (Ed.). Springer Press. The Netherlands.

[18] Lavee, D., Daniel, Y., Beniad, G., Shvartzman, T. and Ash, T. (2013). "Examining the effectiveness of residential water demand-side management policies in Israel" Water Policy 15 (4): 585–597.

[19] Linares, P. and Labandeira, X. (2010). "Energy efficiency: economics and policy." Journal of Economic Surveys 24 (3): 573–592.

[20] Madlener, R. and Alcott, B. (2009). "Energy rebound and economic growth: A review of the main issues and research needs." Energy 34 (3): 370-376.

[21] McKinsey and Company (2009). פוטנציאל הפחתת פליטות גזי חממה בישראל – עקומת עלות הפחתת גזי חממה בישראל. נובמבר, 2009.

[22] Miller, N., Spivey, J. and Florance, A. (2008). "Does Green Pay Off?" Journal of Real Estate Portfolio Management 14(4): 385-400.

[23] Steg, L. (2008). "Promoting Household Energy Conservation." Energy Policy 36 (12): 4449–4453.

[24] Tishler, A., Newman, J., Spekteman, I., Woo, C. K. 2006. "Cost-benefit analysis of reforming Israel's electricity industry." Energy Policy 34: 2442-2454.

[25] WBCSD - World Business Council on Sustainable Development (2007). Energy efficiency in buildings: Business realities and opportunities. Geneva.

## פרק טז:

# שיפוץ לשם חסכון באנרגיה

# פרק טז: שיפוץ לשם חיסכון באנרגיה

אין כיום קושי לתכנן בנייני מגורים חדשים אשר יהיו יעילים באופן השימוש באנרגיה הדרושה לאקלום, בכל אזורי הארץ. ביטוי לפתרונות 'בית ספר' ניתן למצוא, בין היתר, בתקן הישראלי ת"י 5282 חלק 1 (דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה – דירות בבנייני מגורים). עם זאת, קיים פער ניכר בין המלצות התקן (שאיננו מחייב) לבין מאפייני הבנייה בפועל. יתרה מזאת, גם אם כל הבנייה החדשה בישראל תתבצע על פי התקן, הרי שבשל המרכיב הקטן של הבנייה החדשה מדי שנה בהשוואה למצאי הבניינים הקיימים, יעברו שנים רבות עד אשר השיפור בבנייה יתורגם לחיסכון ממשי בדרישת האנרגיה ברמה הלאומית.

**לשם כך יש צורך להביא לחיסכון משמעותי בצריכת אנרגיה גם בחלק ניכר מהבניינים הקיימים.**

פרק זה יסקור אחדות מהחלופות לשיפוץ בנייני מגורים קיימים ויבחן את הכדאיות שלהן, לפרט ולחברה. הפרק מתבסס על ממצאי מחקר אשר נערך בהזמנת משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים (אז: המשרד לתשתיות לאומיות) בין השנים 2010-2013 [146], ועל עבודת הדוקטורט של חנוך פרידמן [147].

## 1. מניעי הפרט והמדינה להשקיע בשיפוץ בניינים

לפרט ולמדינה עשויים להיות מניעים שונים להשקעה בנושאים סביבתיים, לרבות השקעה בשיפוץ בניינים אשר עשויה להביא לחיסכון באנרגיה.

### 1.1 מניעי הפרט

ישנן סיבות שונות ומגוונות המביאות אדם לשפץ את ביתו: תיקון ליקויים, חידוש, שינויים בתפקוד, הגדלת המבנה או חיזוקו. חיסכון באנרגיה יכול להשתלב בשיפוץ אשר נעשה מלכתחילה מאחת מהסיבות האלה, ועל ידי כך להפוך את ביצועו לכלכלי יותר – אך הסיבות לשיפוץ בדרך כלל אינן רק כלכליות [148].

החלטה על שיפוץ של בית מגורים לשם חיסכון באנרגיה נכנסת לקטגוריה של 'התנהגות קנייה מורכבת' (complex buying-behavior). התנהגות זאת אופיינית להחלטה על השקעה כספית יקרה ומורכבת המתבצעת לעתים נדירות, וכרוכה בסיכון. התנהגות קניה מורכבת היא תהליך תלת-שלבי שבו הקונה או המשקיע מפתח אמונות אודות ההשקעה; מפתח עמדות על ההשקעה; ומקבל החלטה מושכלת ומחושבת להשקיע [149].

### 1.2 המדינה

ממשלת ישראל בחנה את האפשרויות לצמצום הפליטות של גזי חממה בישראל והזמינה את חברת הייעוץ מקינזי (McKinsey & Company) לבצע מחקר אשר ימליץ על צעדים להפחית את פליטת גזי החממה בישראל. החברה מונה בדו"ח אשר פורסם בחודש נובמבר 2009 עשרה מנופים אותם היא

---

[146] אראל, בקר ופרידמן, 2013.
[147] פרידמן, 2014
[148] Risholta, 2013; Knight, 2006
[149] קוטלר וחוב', 2012.

ממליצה בפני ממשלת ישראל להפעיל על מנת להביא להפחתת פליטות גזי החממה, וביניהם שיפור היעילות האנרגטית בבתים חדשים ובבתים קיימים. בהתאם לכך, סעיף ד' בהחלטת הממשלה מספר 2508 מיום 28 לחודש נובמבר 2010, אשר עוסקת בהפחתת הפליטות בישראל ומקצה אמצעים כספיים ניכרים לשם כך (2.2 מיליארד ש"ח עד שנת 2020), מנחה את הוועדה שהוקמה לגיבוש המלצות מדיניות לבצע סקר מבנים קיימים "במטרה לאפיין את פוטנציאל ההפחתה של גזי חממה הנובע מהתייעלות אנרגטית במבנים באמצעות שיפורם ושיפוצם".

## 2. תועלות, עלויות וחסמים לביצוע שיפוץ לשם חיסכון באנרגיה

פרסומים רבים, הן בעיתונות המדעית והן בעיתונות הפופולרית, מציגים נתונים המראים כי באמצעות שיפוץ ניתן לחסוך חלק ניכר מהוצאות משקי הבית על אנרגיה (בכלל), והוצאות לאקלום הדירה (בפרט). חלקם של ה'ממצאים' כביכול הוא מופרך בעליל, אך לעיתים קשה להעריך אם החיסכון המובטח הוא אכן אפשרי, ועוד יותר מכך עד כמה הוא כדאי לפרט או לחברה.

מחקרים על הפוטנציאל לחסכון כתוצאה משיפוץ אנרגטי בבתים קיימים נעשו בארצות רבות. הגישה הכלכלית בודקת את העלויות והתועלות הישירות של השיפוץ, ומשתמשת לשם כך במדדים כמו ערך נוכחי נקי (Net Present Value). על מנת לחשב את ערכו של מדד זה, יש להעריך מהי תקופת חיי הפרויקט ומהי ריבית ההיוון הנכונה לתקופה.

החיסכון הכספי שיתקבל תלוי בשיעור ההפחתה בדרישת האנרגיה לאקלום, המושפעת הן ממאפייני הבניין הקיים והן ממרכיבי השיפוץ. מחקרים אשר נעשו בחו"ל הראו שניתן להביא לצמצום של עד 70-85% בצריכת האנרגיה לאקלום בבתי מגורים ישנים [150] - אולם ציינו כי צמצום זה אינו תמיד האופציה הנכונה משום שההשקעה הכספית הנדרשת להגיע לחיסכון בשיעור כזה היא גבוהה מאוד, ואינה מוצדקת מבחינה כלכלית בנתונים הקיימים [151]. מרבית המחקרים מראים כי בדרך כלל יש פוטנציאל כלכלי לשיפוץ רק כאשר הסכום המושקע קטן – גם אם החיסכון המושג באנרגיה הוא צנוע בהתאמה. כמו כן נמצא כי נדרשת תקופה ממושכת להחזר עלות ההשקעה בשיפוץ [152], העלולה להגיע ל- 30 שנה או יותר.

בנוסף לחיסכון הראשוני בצריכת אנרגיה, מביא השיפוץ גם לתועלות משניות כמו שיפור בתנאי החיים בדירת המגורים, אשר מביאים לחסכון לפרט ולחברה בהוצאות בריאות [153]. חסכון זה בולט במיוחד כאשר מדובר באוכלוסיות חלשות [154], אך קשה לכימות: חלק מההשפעות אינן סחירות (non-tradable) [155], ולכן קשה לתרגם אותן למונחים כלכליים והן בדרך כלל אינן מובאות בחשבון בעת קבלת החלטות, הן ברמת הפרט והן ברמה הלאומית. במחקרים שונים שנערכו בארה"ב [156] ובאנגליה [157] נמצא כי כשלושה רבעים מהתועלת משיפוץ לשם חיסכון באנרגיה של בית מגורים באה לידי ביטוי בהורדת צריכת האנרגיה, ואילו היתרה, כרבע, מיוחסת לתועלת בשיפור התנאים התרמיים בבית המגורים.

את עלות השיפוץ ניתן בדרך כלל להעריך בקרוב טוב לפני הביצוע, אך את התועלות קשה יותר לאמוד.



---

150 Harvey, 2009; Banfi et al, 2008
151 Galvin, 2010
152 Soratana & Marriott, 2010
153 Jakob, 2006
154 Clinch et al, 2001
155 Stanojevic et al, 2010
156 Clinch & Healy, 2003
157 Lloyd et al, 2008

## 2.1 תועלות משיפוץ

כאשר אדם שוקל להשקיע בחסכון באנרגיה בביתו, רצוי שיהיה מודע לכך שבצד הרווחים הגלויים משיפוץ לשם חיסכון באנרגיה, המשתקפים בעיקר בחשבון החשמל, קיימות גם תועלות אחרות. תועלות אלה מכונות תועלות לא-אנרגטיות (NEBs - Non-Energy Benefits). חלקן של התועלות הלא-אנרגטיות הנובעות מהשיפוץ מגיע ישירות לפרט, וחלקן מגיע לכלל החברה ולסביבה [158]. קשה לאמוד את התועלות הלא-אנרגטיות, אך אלו הוערכו במחקרים שונים ובגישות שונות המבוססות על נכונות לשלם (willingness to pay). גישות אלה מתחלקות לכאלה המתבססות על העדפות מוצהרות (stated preferences) ועל העדפות נגלות (revealed preferences). שוויין של התועלות הלא-אנרגטיות הוערך במחקרים שונים כשווה ערך לתוספת של 50-300% לרווח הכספי הישיר המתבטא בצמצום חשבון החשמל החודשי [159].

ניתן לסווג את התועלות הלא-אנרגטיות אשר עשויות להגיע ישירות לפרט למספר תחומים [160]:

- רווחים פיננסיים (שאינם משתקפים בחשבון החשמל): תועלות הנובעות מתוכניות עידוד – ריביות מועדפות, מענקים, סובסידיות; סקר אנרגיה של הבית במימון הרשויות; צמצום צריכת המים בדירה; צמצום עלויות אחזקת הציוד בבית; עלייה בערך הבית; שיפור עמידות הבית.
- שיפור הנוחות: שיפורים בתחלופת האוויר בבית; הקטנת חוסר היציבות בטמפרטורה בבית; שליטה משופרת בלחות בתוך הבית.
- תועלות אסטטיות: חלונות משופרים; פחות אבק; הפחתת עובש ונזקי לחות; הגנה על הציוד; תאורה משופרת.
- רווחי בריאות: הפחתת בעיות במערכת הנשימה; הפחתת בעיות אלרגיה; הפחתת הפסד בגין ימי מחלה והוצאות רפואיות.
- תועלות מהפחתת רעש בבית: ציוד מודרני מייצר פחות רעשים; פחות חדירת רעש חיצוני לבית.
- תועלות הקשורות לחינוך: מודעות גדולה להפעלת הבית, התמדה וחיסכון.
- רווחי שימוש: שליטה אוטומטית בטמפרטורה בבית; גישה קלה לניקוי מסננים בציוד; חימום מים מהיר; פחות צורך בניקוי אבק.
- תועלות נוספות: שליטה משופרת בצריכה ובחשבון החשמל; הקלה במכירת הבית; גאווה ממראה הבית; שיפור ההרגשה ביחס לסביבה וההרגשה שתורמים לעתיד העולם.

על מנת לחשב את מלוא התועלות מהשיפוץ יש לזהות תועלות אלה, להעריך את שווין לפרט ולסביבה ואחר כך לחשב את התועלת המלאה מההשקעה בשיפוץ בית המגורים. אם מתעלמים מתועלות אלה, מעריכים את התועלות משיפוץ הבית בהערכת חֶסר אשר עלולה לגרום לקבלת החלטות שגויות בנוגע לשיפוץ מתוכנן.

לבסוף, יתכן שפרט לא ישקיע בטכנולוגיה יעילה וחדשנית רק על מנת להרוויח סכום פעוט, ודווקא התועלות הלא אנרגטיות הן אלה המוסיפות למוטיבציה שלו ויגרמו לו להשקיע בנושאים סביבתיים שאינם בעלי כדאיות כלכלית ברורה [161].

---

158 חלק מהתועלות האלה אינן קשורות ישירות לשיפוץ לשם חיסכון באנרגיה, אך הן מתוארות כאן לשם הצגה מלאה ככל הניתן של מכלול ההיבטים הקשורים בשיפוץ.

159 Amann, 2006; Skumatz, 2001

160 Amann, 2006; Skumatz, 2001; Knight, 2006

161 Mills, 1996

### 2.2 חסמים

למרות הרווח הכלכלי הצפוי למשק הישראלי בטווח הארוך משיפוץ של בתי מגורים בהיקף רחב, קיימים חסמים משמעותיים למימוש הפוטנציאל הזה.

- ראשית, רבים מדיירי הבתים אינם מודעים כלל למרכיב צריכת האנרגיה לאקלום בבתים ולבזבוז הרב הקיים במצב הנוכחי [162] ולתועלות נוספת בגין השיפוץ לרבות עליה בערך ובסחירות הנכס [163].
- לפרט ולציבור קשה להפנים צורך בהשקעה בשיפוץ משום שהתרומה הכספית כדאית רק לטווח ארוך וההשקעה אינה נטולת סיכונים [164]. לכן רוב הצרכנים נמנעים מלבצע השקעות משמעותיות בעלות זמן החזר גבוה, אלא נוהגים לבחון השקעות בטווח הקצר בלבד [165].
- לפרט קשה להבין ולבצע השקעה שחלק מהרווח בגינה אינו ניתן לכימות כספי פשוט [166].
- הפרט איננו בהכרח קוצר באופן אישי את מלוא ההחזר מהשקעתו, משום שחלק מהתועלת מגיע לכלל הציבור, או שהיא מתקבלת רק כאשר היא מיושמת בקנה מידה נרחב [167].
- בחלק מבתי הדירות עלול להיות חוסר מתאם בין המשלמים בגין השיפוץ (בעלי הבתים או הרשויות) לבין הנהנים מחסכון בחשבון החשמל – הדיירים והשוכרים [168].
- הרווח מביצוע השיפוץ אינו אחיד ועתיד להתחלק בצורה לא שווה בין הדיירים בבית דירות – עובדה המקשה על חלוקה הוגנת של התשלום בגין ביצוע השיפוץ, ואף יוצרת התנגדות בקרב בעלי הדירות שלא ייהנו מפירות החיסכון אך יסבלו מהפרעה בזמן השיפוץ.
- שיפוץ של בתי דירות מורכב מבחינה משפטית בשל מעורבות דיירים רבים בהחלטות הנוגעות לביצועו. במקרים רבים לא ניתן לבצע שיפוץ ליחידת דיור בודדת בבית דירות בשל פגיעה באחידות מראה הבניין.
- שיפוץ של בית דירות עשוי להיות מורכב הנדסית, ויש צורך במודל מורכב לבחינת חלופת השיפוץ המיטבית אשר תביא בחשבון את ההשפעות ההדדיות של אמצעי החיסכון השונים [169].
- שיפוץ של בניין מאוכלס גורם להפרעה ניכרת למהלך החיים הסדיר במהלך העבודות.

לסיכום: נושאים סביבתיים חדשניים אינם תמיד ברורים דיים לפרט ויש צורך בפעולות הסברה ממושכות לסייע בהטמעתם [170]. החדירה של גישות חדשניות (innovation) היא לעיתים איטית, גם אם הן מראות כדאיות כלכלית [171]. יתרה מזאת, גם כאשר הציבור מבין ומפנים בעיות סביבתיות, הוא מתקשה לעיתים להבין את הפתרונות המוצאים להן על ידי קובעי המדיניות. לכן, למרות שקיימת נכונות עקרונית של הציבור לפעול להגנת הסביבה, ישנה נכונות מוגבלת להשקיע כספים לשם כך מבחינה מעשית, ולעיתים קרובות נדרשים תמריצים (כספיים או אחרים).



162 Baek & Park, 2012; Tommerup & Svensen, 2006
163 Clinch and Healy, 2003
164 Galvin, 2010
165 Amstalden et al, 2009; Nadel et al, 2004
166 Knight, 2006
167 Clarke et al, 2008
168 Jakob, 2007
169 זוהר, 1989
170 Collins et al, 2003
171 Charies, 2008

## 3. בחינת חלופות לשיפוץ

התועלת הישירה משיפוץ מעטפת הבניין, דהיינו החיסכון באנרגיה אשר יתקבל כתוצאה ממנו, תלויה בראש ובראשונה בשני גורמים שאינם בשליטתו של בעל הדירה השוקל שיפוץ: תנאי האקלים באזור, והתפקוד התרמי של הדירה במצבה הקיים. ככל שתנאי הסביבה קיצוניים יותר, כך גדל הפוטנציאל לחיסכון; וככל שמצבה הנוכחי של הדירה גרוע יותר – כך ניתן לשפר את התפקוד שלה יותר. לכן לא ניתן להעריך את הפוטנציאל לחיסכון בישראל על סמך מחקרים אשר נעשו בחו"ל, בתנאי אקלים שונים או בבניינים בעלי מאפיינים אחרים, ויש לבחון בזהירות את השפעות השיפוץ בתנאים הקיימים בארץ.

כאשר מדובר במעטפת הבניין (להבדיל ממערכותיו או ציוד הנמצא בו), ניתן להתייחס לשלושה רכיבים עיקריים: הגג, הקירות ומערכות הזיגוג. כל אחד מהרכיבים האלה תואר בהרחבה בפרקים קודמים של המדריך, ולכן הדיון כאן יעסוק רק בשיקולים הנוגעים לשינוי תכונות המעטפת במסגרת שיפוץ של בניין קיים, ובשאלה איזה רכיב כדאי לשפץ.

### 3.1 שיפוץ הגג

ישנן שתי שיטות עקרוניות לשיפור התפקוד התרמי של גג הבניין (גג שטוח): יישום שכבת צבע לבן, המקטינה את רווחי החום בקיץ אך איננה תורמת לתפקוד התרמי בחורף (או אפילו פוגעת בו מעט); והוספת בידוד תרמי על גבי הגג הקיים, בעיקר בשיטת הגג ההפוך.

עלות הצביעה של הגג היא נמוכה יחסית, אם כי בשל העובדה שיש צורך לחדש את הצביעה מדי מספר שנים (ההנחה היא כי תידרש צביעה אחת ל-5 שנים), העלות המצטברת של אסטרטגיה זו איננה זניחה. בהתחשב בכך שעומס הקירור בקיץ הוא קטן יחסית באזור ההר, לטיפול הזה בגג ישנה תועלת מעטה יחסית באזור זה בהשוואה לשאר אזורי הארץ. עם זאת, רצוי להוסיף כאן מספר הסתייגויות:

- ההשפעה של הלבנת הגג על דרישת האנרגיה לאקלום היא משמעותית אם הגג אינו מבודד. במקרה כזה, ההלבנה מפחיתה את הדרישה למיזוג בקיץ – אך גם מגדילה את הצורך בחימום בחורף. ככל שהגג מבודד יותר, כך קטנה השפעת הגוון שלו, הן בחורף והן בקיץ.
- צביעת הגג בלבן מפחיתה את מעבר האנרגיה דרך הגג בקיץ ומביאה להורדת הטמפרטורה בחלל הדירה, אך בנוסף לכך היא מביאה להורדת הטמפרטורה של התקרה ולהקטנת העומס התרמי על דיירי הקומה העליונה הנובע ממאזן הקרינה. השיפור הזה בנוחות התרמית איננו מקבל ביטוי באחדות מהתוכנות להדמיית התפקוד התרמי של בניינים – אך אינו זניח.
- לטיפול בגג, עוד יותר מאשר בקירות, עשויה להיות תועלת נוספת מלבד החיסכון באנרגיה. למשל: מרבית חומרי האיטום החדישים הם בעלי גוון בהיר, כך שאפשר לשלב את ההלבנה בחידוש האיטום למים. כמו כן, ההלבנה עשויה להגן על שכבת האיטום מפני קרינת השמש, ולהאריך את חייה.

לעובי שכבת הבידוד ישנה השפעה קטנה מאוד על עלות השדרוג: העלות (במחירי 2010) של הנחת לוח מחורץ לגג הפוך בעובי 3 ס"מ, בתוספת בד גיאוטכני ושכבת חצץ בעובי 5 ס"מ, הינה כ- 140 ש"ח/מ"ר. תוספת של 5 ס"מ פוליסטירן מוקצף (העובי הכולל של הבידוד יהיה במקרה הזה 8 ס"מ) מעלה את עלות השדרוג ב-35 ₪/מ"ר בלבד, למחיר כולל של 175 ₪/מ"ר.

הגדלת העובי של שכבת הבידוד איננה כרוכה במעבר לטכנולוגיה אחרת ואיננה משפיעה על התאמתו של הגג לשימושים שונים, בהשוואה לעצם ההתקנה של שכבת הבידוד המינימלית. לפיכך ההחלטה בדבר עובי שכבת הבידוד המומלצת תתקבל מטעמים כלכליים גרידא, בהתאם לאזורי האקלים השונים בארץ.

## 3.2 שיפוץ הקירות

ישנן שתי שיטות עקרוניות לשיפור הבידוד התרמי של קירות החוץ בבניין: תוספת בידוד בצידם החיצוני של הקירות, ותוספת בידוד בצידם הפנימי. מבחינת התועלת, דהיינו החיסכון באנרגיה, ישנה עדיפות להתקנת הבידוד התרמי בצידו החיצוני של הקיר. לבידוד התרמי החיצוני יש עדיפות גם בכל הנוגע למניעת גשרים תרמיים. עם זאת, מאחר ומרבית בנייני המגורים בישראל הם בעלי מסה תרמית פנימית רבה בנוסף למסה במעטפת (המסה נמצאת ברצפות, תקרות ומחיצות פנימיות) – הרי שאם הדירה אינה סובלת מתופעות של עיבוי או עובש על הקירות, ההבדל בין תוספת בידוד פנימי וחיצוני אינו גדול, וניתן לפצות עליו בהגדלה מסוימת של עובי שכבת הבידוד.

לפיכך, כאשר מדובר בשיפוץ בניינים קיימים, ההחלטה בדבר מיקום הבידוד יכולה להתקבל על סמך מכלול השיקולים האחרים, אשר יידונו להלן.

**א. היתכנות הנדסית**

הוספת בידוד תרמי בצידם הפנימי של הקירות הוא פעולה פשוטה יחסית. התקנת הבידוד, מחסום האדים ולוחות חיפוי מגבס (לרבות שלד מתכת) אינה דורשת אמצעים מיוחדים. ניתן להשלים בידוד של דירה שלמה תוך ימים אחדים, בהנחה שהקבלן המבצע ערוך גם לביצוע עבודות חשמל ומים, במקרה הצורך. חשוב להכין מראש פרטי ביצוע מתאימים עבור מסגרות החלונות וארגזי תריס, אם ישנם.

תוספת הבידוד בצידם החיצוני של הקירות אפשרית בבנייה צמודת קרקע או בבתי דירות נמוכים (עד 4 קומות), אך מסובכת מאוד כאשר מדובר בבניינים גבוהים יותר. יש לוודא כי שכבת הגימור הקיימת יציבה ומאפשרת את הצמדת הבידוד אליה (או דרכה אל שלד הבניין). כמו בבידוד הפנימי, יש להכין פרטי ביצוע מיוחדים עבור מסגרות החלונות. בכל מקרה, יש צורך בפיגום – מלאכה המייקרת מאוד את השיפוץ. לסוג שכבת החיפוי תהיה השפעה רבה על עלות השיפוץ, וגם על הקיים של החיפוי: יישום טיח על גבי הבידוד אמנם פשוט יחסית, וזול, אך הטיח הוא בעל קיים קצר בהשוואה לחיפוי מאבן או קרמיקה. חיפויים אלה אמנם יקרים יותר מטיח, אך יש להניח כי התמורה העקיפה שתתקבל עקב עליית ערך הנכס תתן פיצוי מסוים על העלות הנוספת.

בבניינים רבי קומות, תוספת בידוד תרמי חיצוני יקרה מאוד, אפילו היא ניתנת לביצוע.

**ב. שיקולים משפטיים**

כאשר מתקינים את הבידוד התרמי בצד הפנימי של הקיר, עלולה הקטנת שטח הרצפה בבניין קיים להביא לאי-עמידה בדרישות תקנות הבנייה בדבר מידות מינימליות של חדרים, כגון חדרי שירותים או חדרי שינה. מעבר לפגיעה בתפקוד החדרים האלה, יש אפוא להביא בחשבון את ההשלכות החוקיות של שיפוץ כזה.

התקנת הבידוד התרמי בצידם החיצוני של הקירות בבניין קיים כרוכה בקשיים גדולים אף יותר. ראשית, כאשר מדובר בבניין משותף, יש צורך בהסכמה של כלל הדיירים לכל פעולה אשר משפיעה על המראה החיצוני של הבניין, למשל עקב יישום שכבת גמר מחומר אחר. ושנית, תוספת הבידוד עלולה להביא לחריגה (אם כי קטנה) מקו הבניין. בכל מקרה, יש לבחון אם השיפוץ המתוכנן טעון היתר מהרשות המקומית.

**ג. עלות**

עלות חומרי הבידוד השונים דומה מאוד: העלות הכוללת של יישום שכבת בידוד של 5 ס״מ פוליסטירן מוקצף עולה 185 ₪/מ״ר (במחירי 2010), בעוד שכבה של צמר מינרלי בעובי 2״, הנותנת בידוד תרמי דומה, אף היא 185 ₪/מ״ר. הבחירה בין שני חומרי הבידוד תושפע אפוא משיקולים טכנולוגיים, כגון מידת ההתאמה של צמר מינרלי ליישום חיצוני (לא מתאים) או קיים (צמר מינרלי

עלול לספוח אדי מים ואבק במשך הזמן, או לשקוע בתוך מעטפת הפלסטיק, כך שתכונותיו התרמיות נפגעות).

עלות ההתקנה של הבידוד התרמי כמעט ואינה מושפעת מעובי שכבת הבידוד. למשל: יישום 2 ס״מ פוליסטירן מוקצף בצד הפנימי של הקיר עולה 170 ₪/מ״ר, בהשוואה ל-185 ₪/מ״ר עבור שכבת בידוד בעובי 5 ס״מ המותקנת באותה שיטה. כלומר, עיקר העלות איננה טמונה בחומר עצמו, אלא בתהליך העבודה.

מאחר והתועלת השולית הנובעת מהגדלת עובי שכבת הבידוד מעבר ל-4 ס״מ היא קטנה, ההחלטה בדבר עובי הבידוד תתקבל בעיקר בהיבט של הערך הכלכלי של השטח אותו תופסת שכבת הבידוד, בשני מובנים:

א. הקטנת שטח הרצפה השימושי של הדירה, כאשר הבידוד הוא פנימי.

ב. הגדלת השטח ברוטו של הבניין לצורכי ארנונה, כאשר הבידוד הינו חיצוני (אם כי גורם זה תלוי בעובי הקיר מלכתחילה, וניתן לשינוי בתיקון מתאים של חוק הארנונה).

**ד. הפרעה למהלך החיים בזמן השיפוץ**

כל עבודת שיפוץ גורמת להפרעה במהלך החיים התקין של דיירי הבניין. כאשר הבידוד התרמי מותקן בתוך הדירה, ההפרעה נגרמת לדיירי הדירה הזו בלבד – אך היא עלולה לחייב פינוי של הדירה לפרק זמן קצר. השיפוץ של הקירות החיצוניים של הבניין אינו מחייב פינוי הדירות, אך הוא עלול להמשך זמן רב יחסית ולגרום לפגיעה לא מבוטלת באיכות החיים של הדיירים במהלך העבודות.

## 3.3 שיפוץ מערכות הזיגוג

התפקוד התרמי של מערכות הזיגוג עשוי להיות בעל השפעה רבה על צריכת האנרגיה של דירה. אף כי הטיפול בחלונות (בנפרד משאר מעטפת הבניין) הוא פשוט יחסית מן הבחינה הטכנית, העלות של שדרוג מערכות הזיגוג היא גבוהה. הטיפול בחלונות עשוי לכלול אחדות מהפעולות הבאות, או שילוב שלהן:

א. החלפת חלונות ישנים (לרוב מעץ) בחלונות חדשים (בדרך כלל עם מסגרות מאלומיניום).

ב. החלפת זיגוג יחיד בזיגוג כפול

ג. החלפת התריס

ד. הוספה של הצללה חיצונית קבועה לחלון

לשיפוץ החלונות עשויים להיות שלושה יתרונות עיקריים:

ראשית, התקנת זיגוג כפול תפחית את מעבר החום בהולכה דרך מערכת הזיגוג, ולפיכך תקטין את עלויות מיזוג האוויר בקיץ והחימום בחורף. התועלת שבמהלך כזה תהיה משמעותית יותר באזורים בהם הפרשי הטמפרטורה בין פנים וחוץ הם משמעותיים, למשך שעות רבות: ירושלים בחורף ואילת בקיץ. במישור החוף, אף כי מערכת המיזוג נדרשת לפעול שעות ארוכות (בעיקר בכדי להתמודד עם עומס החום הכמוס הנובע מן הלחות הגבוהה), הבדלי הטמפרטורה הם קטנים יחסית ולכן הפחתת צריכת האנרגיה המתקבלת מהתקנת זיגוג כפול היא קטנה.

שנית, החלפת החלונות הישנים בחלונות חדשים עשויה להפחית את האינפילטרציה. למרות הפוטנציאל הגדול לשיפור בהיבט זה של תפקוד המעטפת, הרי שבפועל מרבית חלונות האלומיניום המיוצרים בארץ הם חלונות הזזה בעלי שתי כנפיים (״כנף על כנף״). חלונות אלה הם הזולים ביותר, פשוטים לייצור ולהרכבה ואינם מפריעים לחלל הפנימי של החדר כאשר הכנף פתוחה – אך לא ניתן לאטום אותם היטב, ולכן אין להם יתרון בהיבט הזה על מרבית חלונות העץ הישנים. חשוב לזכור

גם כי מסגרת מתכת מוליכה חום מצוין, בעוד שהעץ הינו חומר מבודד – כך שאפילו אם חלון המתכת אטום יותר טוב, השיפור הכולל בתפקוד התרמי שלו עשוי להיות קטן.

לבסוף, חיוני להבטיח כי מערכת הזיגוג תכלול מערכת הצללה אשר תאפשר לחסום לחלוטין את חדירת קרינת השמש בימי הקיץ. תריס תקין עשוי גם להפחית את איבוד החום בלילות החורף. החלפת התריס רצויה אפוא אם התריס הישן שבור או אינו ניתן להפעלה תקינה. כאשר מותקן תריס והוא מופעל בצורה מושכלת, התרומה של הצללה חיצונית קבועה קטנה מאוד. אם היא אינה מתוכננת באופן מיטבי, הצללה חיצונית קבועה עלולה אף להיות מזיקה, בכך שתפחית את הפוטנציאל לחימום פסיבי בחורף.

## 4. כדאיות השדרוג של רכיבי בניין שונים

במחקר שנעשה עבור המשרד לתשתיות לאומיות [172], נבחנה כדאיות היישום של אחדות מחלופות השדרוג על ידי השוואה בין עלות השיפוץ לבין החיסכון שהתקבל עקב הפחתת צריכת האנרגיה לאקלום, בשני טיפוסי בניינים – בנייה צמודת קרקע ובניין משותף בן 3 קומות. ממצאי המחקר מובאים כאן בתמציתיות.

### 4.1 תיאור המחקר

כדאיות השדרוג נלמדה באמצעות שני מקרי בוחן: האחד, בניין טורי בן 3 קומות, מהסוג שנבנה בשנים הראשונות לאחר קום המדינה; והשני - בית דו-משפחתי צמוד קרקע אשר נבנה באותם חומרים. נבחנו חלופות שונות לשיפוץ הגג, הקירות החיצוניים והחלונות. הבדיקה נעשתה עבור כל אחד מארבעה אזורי האקלים בארץ.

מאפייני הדירות מובאים בטבלה טז-1.

**טבלה טז-1: מאפייני הדירות לשיפוץ**

| רכיב בניין | חומרים ועובי | מוליכות תרמית (ערך U) $W/m^2K$ |
|---|---|---|
| קירות חיצוניים | בלוק בטון חלול 20 ס״מ, מטויח בשני צדדיו | 2.07 |
| קירות בין דירות | בלוק בטון חלול 20 ס״מ, מטויח בשני צדדיו | 1.75 |
| רצפה בקומת קרקע | 14 ס״מ בטון, ריצוף קרמיקה על חול | 3.47 |
| תקרות ביניים | 14 ס״מ בטון, ריצוף קרמיקה על חול | 3.25 |
| גג | 14 ס״מ בטון ועליו בטון שיפועים בעובי ממוצע 10 ס״מ | 2.64 |
| חלונות | מסגרת עץ עם שמשה שקופה בעובי 4 מ״מ | 4.90 |

**א. עלות השיפוץ**

עלות השיפוץ חושבה בהנחה שהשיפוץ מתבצע אך ורק לשם חיסכון באנרגיה, ולא אגב שיפוץ שנעשה ממניעים אחרים, כגון מצב כללי ירוד של הבניין או חיזוק המבנה כנגד רעידות אדמה. כלומר, במקרה הזה, העלות השולית של השיפור האנרגטי זהה לעלות הכוללת של השיפוץ כולו. אומדן המחירים התקבל באמצעות 'מאגר המחירים לענף הבנייה של דקל', והצעות מחיר שהוגשו על ידי מספר קבלנים (גדולים וקטנים) הפעילים בשוק.

**ב. תועלת ישירה מהשיפוץ**

התועלת הישירה מהשיפוץ חושבה על פי הערך הכספי של ההפחתה בדרישת החשמל לאקלום.

[172] אראל, בקר ופרידמן, 2013

ההפחתה היא ההפרש בין אומדן הצריכה בבניין הקיים, לבין הצריכה לאחר השיפוץ; שני הערכים חושבו באמצעות תוכנה להדמיה תרמית ENERGYui, תוכנה אשר מהווה את כלי החישוב המוסמך לצורך דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה בתקן 5282.

עבור כל חלופת שיפוץ, נרשמו הנתונים הבאים:

1. החיסכון הכולל באנרגיה לאקלום הבניין [קוט"ש לשנה].
2. התועלת הכספית, מחושבת על פי מחיר החשמל לצרכן בעת בצוע החישוב (47.93 אג' לקוט"ש) מוכפלת בחיסכון השנתי בצריכת חשמל לאקלום בעקבות השיפוץ (תצרוכת שנתית ללא שיפוץ פחות תצרוכת שנתית לאחר השיפוץ)[173].
3. התועלת השנתית בגין השיפוץ מהוונת לנקודת ההחלטה במונחי ערך נוכחי עבור תקופות של עשרים שנים בשער היוון של 5% ושלושים שנים בשערי היוון של 4, 5 ו- 6%.

הערה: בחישוב הזה לא הובאו בחשבון תועלות עקיפות אפשריות, כגון עליית ערך הבניין בעקבות השיפוץ.

## 4.2 השוואת האסטרטגיות המשולבות: בניין שלם

התועלת שביישום אסטרטגיית שיפוץ מסוימת נבדקה תוך התייחסות לחיסכון באנרגיה של הבניין הנבדק כולו (2 דירות בבית צמוד קרקע ו-12 דירות בבניין המשותף), למרות שחלק מפעולות השדרוג – כגון שיפור הבידוד התרמי של הגג - אינן משפיעות כלל על אחדות מן הדירות (מניחים שכאשר התנאים בדירות חורגים מטווח הנוחות שהוגדר מופעלת מערכת אקלום, כך שאין מעבר חום בין דירה אחת לדירה אחרת בבניין).

טבלה טז-2 מסכמת את החלופות שנבדקו ואת עלות יישומן בבית דו-משפחתי ובבית דירות.

**טבלה טז- 2: תיאור החלופות לשיפוץ ועלות יישומן בשני בנייני הייחוס.**

| | תיאור החלופות | עלות ביצוע (₪) | |
|---|---|---|---|
| | | בית דו משפחתי 310 מ"ר | בית משותף (3 קומות 12 דירות) 1065 מ"ר |
| 1 | גג: צביעת בסופרקריל לבן כל 5 שנים<br>קירות: | 30,070 | 34,500 |
| 2 | גג: גג הפוך 5 ס"מ פוליסטירן + חצץ 5 ס"מ<br>קירות: | 46,500 | 53,250 |
| 3 | גג: צביעת גג בסופרקריל לבן כל 5 שנים<br>קירות: בידוד פנימי 4 ס"מ פוליסטירן + לוח גבס | 80,470 | 234,300 |
| 4 | גג: צביעת גג בסופרקריל לבן כל 5 שנים<br>קירות: בידוד חיצוני 6 ס"מ פוליסטירן + טיח וצבע | 80,650 | 261,500 |
| 5 | גג: גג הפוך 5 ס"מ פוליסטירן + חצץ 5 ס"מ<br>קירות: בידוד פנימי 4 ס"מ פוליסטירן וקיר גבס | 96,900 | 253,050 |
| 6 | גג: גג הפוך 5 ס"מ פוליסטירן + חצץ 5 ס"מ<br>קירות: בידוד חיצוני 6 ס"מ פוליסטירן + טיח וצבע | 103,900 | 280,250 |

[173] בשלב שני בוצעה בדיקת רגישות של התוצאות גם עבור מחירי חשמל של 60 ו-70 אגורות לקוט"ש

הערות:

א. בשתי האסטרטגיות לשיפוץ הגג - הלבנה או התקנת בידוד בשיטת הגג ההפוך - לא נלקחה בחשבון עלות איטום מחדש של הגג. זאת למרות שבמקרים רבים, במיוחד לפני התקנת גג הפוך, יעדיפו הדיירים לוודא כי הגג אטום היטב לפני שמבצעים פעולה אשר עלולה להקשות על טיפול בנזילות בשלב מאוחר יותר. כמו כן לא הובאו בחשבון עלויות נוספות כגון פירוק והרכבה של מערכות הממוקמות על הגג: ההנחה היא שבבניין משותף בעל מספר קומות קטן (בשונה מבניין רב-קומות) כמות המתקנים על הגג קטנה וניתן לבצע את השדרוג ללא טיפול מיוחד. מאידך, לא נלקחה בחשבון התועלת אשר תתקבל מהלבנת הגג בחומר איטום לבן, בהבדל מהלבנה בלבד בחומר שאינו מיועד לאיטום.

ב. למרות שמרבית החלונות בבניינים ישנים אינם אטומים היטב, לא נבחנה החלפתם בחלונות אלומיניום מטיפוס של חלונות הזזה, משום שמידת האטימות שך חלונות אלה כה ירודה שניתן להניח שהשדרוג לא יביא כל תועלת בהיבט הזה. חלונות מטיפוסים אחרים יקרים במידה כזו שהופכת את השיפוץ לבלתי סביר לחלוטין מבחינה כלכלית.

בהתייחס להנחות האלה, נמצא כי שדרוג הגג הינו הכדאי ביותר מבחינה כלכלית, בין אם מדובר בהלבנת הגג בלבד ובין אם מדובר בתוספת בידוד תרמי בשיטת הגג ההפוך: החלופה שנותנת תוצאות מיטביות היא חלופה 2 (גג הפוך עם 5 ס"מ פוליסטירן). חלופה זאת כדאית בכל בתי הדירות ובבתים הפרטיים באילת, וקרובה לכדאיות בבתים פרטיים גם בבאר שבע, ירושלים ותל אביב. חלופה 1 (צביעת הגג בלבן כל 5 שנים) היא החלופה הזולה לביצוע והיא כדאית בבתי דירות באילת, וקרובה לכדאיות בבית פרטי באילת ובבית דירות בבאר שבע. חלופה זאת נותנת תועלת ממשית נמוכה ביותר בירושלים (שבה רוב האנרגיה לאקלום מושקעת בחימום ורק מקצתה במיזוג), ותועלת מסוימת בבתי דירות בתל אביב. חשוב לציין כי גג הייחוס הוא בגוון בינוני, והתועלת היתה עשויה להיות גדולה הרבה יותר אילו היה מדובר בגג כהה. כמו כן, משום שהמוליכות התרמית של גג הייחוס גבוהה, הלבנת הגג גורמת לעלייה בצריכת האנרגיה בחורף, משום שהיא מפחיתה את רווח החום בימים שטופי שמש.

נמצא כי בידוד הקירות עשוי להפחית במידה ניכרת את צריכת האנרגיה לאקלום של דירות חשופות (דירות הגמלון), בין אם הבידוד הותקן בצידו הפנימי של הקיר ובין אם הותקן בצידו החיצוני. עם זאת, בשל העלות הגבוהה של אמצעי זה, לא נמצאה הצדקה כלכלית ליישומו במחירי האנרגיה הקיימים בארץ (מחירי 2010) – אלא אם תוספת הבידוד מתבצעת כחלק משיפוץ נרחב יותר הנעשה מטעמים אחרים (ראו סעיף 5.2).

## 4.3 הבדלים בצריכת אנרגיה וביעילות השיפוץ בין דירות שונות בבניין

פוטנציאל החיסכון באנרגיה עקב שיפוץ מעטפת הדירה מושפע מאוד ממיקום הדירה בבניין. פוטנציאל זה גדול יותר בדירות גג מאשר בדירות הנמצאות בקומת הקרקע או בקומות ביניים, ממספר סיבות:

א. במרבית הדירות בקומה העליונה, שטח הגג גדול יותר מהשטח הכולל של המשטחים האנכיים (הקירות והחלונות).

ב. הגג חשוף לתנודות טמפרטורה גדולות יותר מאשר רכיבי מעטפת אחרים בתנאי הקיצון: הוא חם יותר בקיץ, בשל החשיפה הרבה לקרינת שמש, והוא קר יותר בחורף, משום שהוא מאבד חום בקירור קרינתי הרבה יותר מאשר הקירות.

ג. הגימור של הגג נפגע יותר לאורך זמן, במיוחד כאשר מדובר בגגות שטוחים: קרינת השמש פוגעת בשכבת האיטום אשר עלולה לאפשר חדירת מים אל התקרה, בעוד ששכבת ההלבנה מאבדת מתכונותיה תוך זמן קצר עקב הצטברות אבק ולכלוך.

גם בין דירות הממוקמות באותה קומה עלולים להיות הבדלים במידת החשיפה לסביבה, בהתאם לשטח רכיבי המעטפת החיצונית. שטח הקירות החיצוניים מושפע ממידת הקומפקטיות של הדירה, אך גם ממיקומה: דירות גמלון בבניין טורי חשופות יותר מדירות אמצעיות, למשל.

הבדלים אלה משפיעים גם על שיעור החיסכון שניתן להשיג באמצעות שיפוץ המעטפת, ובהתאם לכך גם על כדאיות המהלך כולו. תוצאות ההדמיה מובאות באופן מדגמי בטבלה 3, בהתייחס לבית דירות טורי בבאר שבע אשר בו החזיתות העיקריות פונות לצפון ולדרום:

**טבלה טז- 3: צריכת החשמל לאקלום הדירות לפי מיקומן ובהתאם לחלופה לשיפוץ**
(אומדן בעזרת ENERGYui).

| מאפייני הדירה | | צריכת חשמל לאקלום הדירה (קוט"ש/מ"ר/שנה), לפי החלופה לשיפוץ | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | הלבנת הגג | | | בידוד הגג | |
| קומה | מיקום | בסיס | ללא בידוד קירות | בידוד קירות פנימי | בידוד קירות חיצוני | ללא בידוד קירות | בידוד קירות פנימי | בידוד קירות חיצוני |
| 0 | חיצונית | 37.1 | 37.1 | 28.9 | 27.6 | 37.1 | 28.9 | 27.6 |
| | פנימית | 29.5 | 29.5 | 26.2 | 25.7 | 29.5 | 26.2 | 25.7 |
| 1 | חיצונית | 43.4 | 43.4 | 33.2 | 30.8 | 43.4 | 33.2 | 30.8 |
| | פנימית | 33.9 | 33.9 | 29.4 | 28.5 | 33.9 | 29.4 | 28.5 |
| 2 | חיצונית | 66.6 | 58.9 | 50.0 | 48.5 | 46.4 | 36.0 | 33.9 |
| | פנימית | 59.0 | 51.7 | 47.5 | 46.8 | 37.7 | 32.7 | 31.8 |

הערה: מניחים כי הטיפול בגג הבניין אינו משפיע על הדירות בקומות 0 ו-1.

מהטבלה ניתן לראות בברור כי:

- צריכת החשמל לאקלום בקומת הקרקע (0) נמוכה מאשר בקומה 1.
- צריכת החשמל לאקלום בקומה 2 גבוהה מקומה 1, והיא הגבוהה בבניין, בפער משמעותי.
- צריכת האנרגיה לאקלום הדירה הבזבזנית ביותר בבניין בבאר שבע גבוהה פי שניים ויותר מזו שבדירה החסכונית ביותר: כ-67 קוט"ש/מ"ר/שנה בדירה חיצונית בקומה העליונה, לעומת כ-30 קוט"ש/מ"ר/שנה בלבד לדירה פנימית בקומת ביניים.
- צריכת החשמל לאקלום הדירות הפנימיות בכל הקומות נמוכה מאשר בדירות החיצוניות (דירות הגמלון). בדירות פנימיות בקומת הקרקע או בקומות הביניים שטח המעטפת הוא קטן יחסית – ולכן הפוטנציאל לחיסכון בהן הוא קטן מאוד. דירות חיצוניות, ועוד יותר מכך דירות בקומה העליונה, הן בעלות שטח מעטפת גדול ולכן הפוטנציאל לשיפור הוא גדול.
- בעוד שטיפול בגג הבניין משפיעה על צריכת החשמל של הקומה העליונה בלבד, טיפול נכון בקירות משפיע על כל הדירות בבניין – אם כי הפוטנציאל לחיסכון הוא קטן יותר.
- תוספת בידוד תרמי לגג (שהיה ללא בידוד כלל) יעילה יותר מאשר הלבנה בלבד.

### א. השפעת הכיוון של החזית העיקרית של הבניין

בבנייה חדשה ישנה השפעה מכרעת לכיוון החזית העיקרית של הדירה, הן בכדי למזער את עומסי החום בקיץ והן בכדי להרוויח חום סולרי בחורף. תקן 5282 (חלק 1) נותן הנחיות מפורטות בנוגע

לשטחי הזיגוג המומלצים בחזיתות השונות, בהתאם לאזורי האקלים בארץ. עם זאת, כאשר מדובר בבניין קיים, אשר בו מלכתחילה לא ניתנה העדפה לחלונות בכיוונים מסוימים, ההבדל בצריכת האנרגיה המתקבל כאשר החזית העיקרית פונה לדרום בהשוואה למערב (למשל), עלול להיות קטן מאוד. האפשרות לשנות במידה ניכרת את גודל החלונות בהתייחס לחלוקה פנימית נתונה של הדירות, אף היא מצומצמת מאוד, ועלותה עלולה להיות ניכרת. לכן לא נבדקה האפשרות הזאת, והתוצאות המובאות כאן מבטאות את ההבדלים בצריכת האנרגיה בהתאם לכיוונים השנים, בהנחה שהשדרוג האפשרי הוא מצומצם (לפי הפרמטרים אשר הוצגו קודם).

בהתאם לכך נמצא כי אף כי ישנם הבדלים של עשרות אחוזים בצריכת האנרגיה של דירות שונות באותו בניין – כפי שיתואר בהמשך – הרי שההבדלים בצריכת האנרגיה הכוללת לאקלום של הבניינים – הן בית הדירות והן הבניין צמוד הקרקע – הם קטנים:

- בבית הדירות המייצג נמצא כי צריכת החשמל הכוללת לאקלום הבניין גבוהה ב-3 אחוזים (בתל אביב) וב-5 אחוזים (באילת, באר שבע וירושלים) כאשר החזית העיקרית שלו פונה למערב, בהשוואה לחזית עיקרית הפונה לצפון או לדרום.
- בבית הפרטי המייצג נמצא כי צריכת החשמל לאקלום גבוהה ב-2-3 אחוזים כאשר החזית העיקרית שלו פונה למערב, בהשוואה לחזית עיקרית הפונה לצפון או לדרום.

בדרך כלל, כאשר בוחנים את השפעת הכיוון של החזית העיקרית של בניין על צריכת האנרגיה, מניחים שהחלונות חשופים לקרינת השמש. בתנאים האלה, הרווח הפוטנציאלי מהפניה נכונה הוא מרבי, כמו גם ההפסד הכרוך בהפניה לא נכונה. כמו כן, מניחים שמידת החשיפה של הזיגוג לשמש היא מיטבית, בהתאם לעונות השנה. כלומר – החלונות מוצלים בשעות היום בקיץ וחשופים לשמש בחורף.

לעומת זאת, במחקר הנוכחי נקבע כי בתצורת הייחוס, מידת החשיפה של החלונות תהיה 40% בקיץ ו-50% בחורף. החלטה זו משקפת ניסיון לדמות את המצב האופייני: במרבית בנייני המגורים בישראל מותקנים אמצעי הצללה, לרוב תריסים חיצוניים – אך מרבית הדיירים אינם מקפידים לתפעל אותם באופן מיטבי. יתרה מזאת: בבניינים רבים, החלונות אינם חשופים לשמש הישירה במשך שעות רבות משום שהם נמצאים בצילם של בניינים שכנים או של צמחייה. כתוצאה מזאת, ההבדלים בדרישת האנרגיה בין דירות בהפניות שונות הם נמוכים מכפי שניתן היה לצפות.

**חשוב להדגיש: אין לראות בממצאים אלה מסקנה כי אין חשיבות להפניית החזית העיקרית של בניין, מההיבט האקלימי! אולם, כאשר התכנון מלכתחילה איננו נכון, או כאשר החלונות אינם מקבלים חשיפה מיטבית לשמש הישירה - הפוטנציאל לחיסכון באנרגיה כתוצאה מן ההפניה איננו בא לידי ביטוי.**

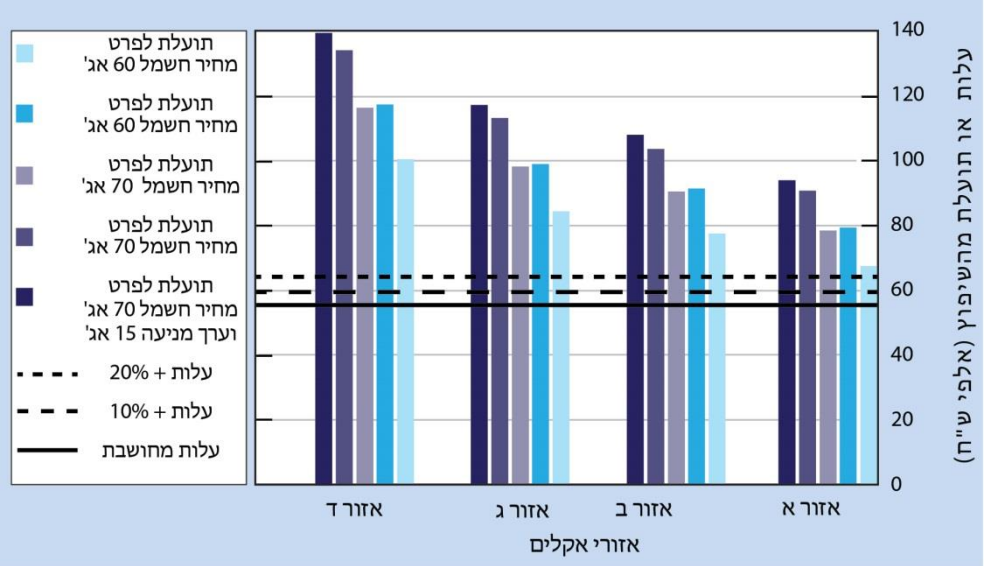
## 5. הכדאיות הכלכלית של שיפוץ

מומלץ לבחון את הכדאיות הכלכלית של שיפוץ בניין בהתייחס לנתונים המייחדים אותו מבניינים אחרים, ולא להסתפק בהמלצות כלליות. השונות בין בניינים היא כה גדולה שללא ניתוח כזה עלולה להתקבל החלטה לא מבוססת. מטרתו של הניתוח המובא כאן איננה אפוא לספק בסיס להנחיה גורפת, אלא להדגים את אופן ביצוע התחשיב, ואת רגישות הממצאים להנחות שונות בנוגע לעלות הביצוע מחד, ולעלות החשמל (המשפיעה על גודל התועלת שבחיסכון) מאידך.

### 5.1 הכדאיות הכלכלית של שיפוץ הנעשה רק לשם חיסכון באנרגיה

כפי שכבר נאמר, ייתכנו מניעים רבים לשיפוץ מעטפת הבניין. בסעיף זה יתמקד הדיון בכדאיות של שיפוץ אשר נעשה רק לשם חיסכון באנרגיה, ואשר לא היה מתבצע כלל אילולא מניע זה. בתנאים האלה, התחשיב הוא המחמיר ביותר, משום שמביאים בחשבון את כל מרכיבי העלות, ובוחנים את התועלת בפרספקטיבה הצרה ביותר האפשרית.

הדיון כאן מתמקד בתועלת המתקבלת משיפור הבידוד התרמי של הגג, אשר נמצא כי היא החלופה היעילה ביותר לשיפור המעטפת בבנייני מגורים אופייניים בישראל. תרשים טז-1 מציג הן את העלות והן את התועלת במונחים של ערך נוכחי נקי (ראו הסבר בפרק ט"ו), בחישוב לתקופה של 30 שנה ובשיעור היוון של 4%.




**תרשים טז-1: השפעת שינויים במחירי החשמל, בעלות השיפוץ ובערך הסביבתי של החיסכון ("ערך המניעה") על כדאיות בידוד גג של בית דירות בשיטת הגג ההפוך, בארבעה אזורי האקלים בארץ.**

כפי שניתן לראות מהתרשים, התועלת המתקבלת מהוספת בידוד תרמי לגג (המתוארת בעמודות הצבעוניות), גבוהה מעלות ההתקנה (המתוארת בקווים שחורים אופקיים), ולכן היא כדאית לפרט בכל אזורי הארץ – אם מביאים בחשבון תקופת החזר של 30 שנה. גם אם מחירי ההתקנה יעלו ב-20% - השיפוץ עדיין יהיה כלכלי. כמובן שהכדאיות עולה ככל שמחיר החשמל גבוה יותר, ואם מביאים בחשבון גם את התועלת לסביבה המתקבלת עקב הקטנת הפליטות בייצור חשמל (ערך המניעה) – הכדאיות גדלה אף יותר.

## 5.2 העלות השולית של רכיבי חיסכון באנרגיה במסגרת שיפוץ כללי

כאשר מבנה מגורים עובר שיפוץ חיצוני, כמו במקרה של חיזוק מבנה נגד רעידות אדמה (תמ"א 38) [174], או מסיבות אחרות, הוספת בידוד תרמי לקירות תהיה זולה ומשתלמת בהרבה. בעוד שעלות התקנת הבידוד בבית דירות היא 205 שקל למ"ר (כאשר הבידוד בעובי 5 ס"מ) ובבית פרטי 200 שקל למ"ר – עלות חומר הבידוד היא כ-50 שקל למ"ר בלבד, והסכום הנותר משקף את עלות הקמת הפיגומים, הטיח והצבע. העלות השולית של הוספת בידוד לקירות של בית הדירות הנחקר, ששטח המעטפת שלו הוא 1,080 מ"ר (ללא הגג) היא אפוא כ-54,000 ₪; בבית פרטי בשטח מעטפת 280 מ"ר

[174] תכנית המתאר הארצית לחיזוק מבנים קיימים בפני רעידות אדמה (תמ"א 38) נועדה לאפשר חיזוק מבנים שאינם עומדים בדרישות התקן לעמידות מבנים ברעידת אדמה. התכנית מאפשרת לקבל היתרי בנייה לחיזוק מבנים וגם לתוספות בנייה, תוך קבלת הקלות מס ופטורים משמעותיים, כדי ליצור תמריץ לחיזוק. התוכנית אושרה על ידי הממשלה בחודש אפריל 2005.

תהיה העלות כ-14,000 שקל. בטבלה 4 מודגמת התרומה בחסכון בשימוש בחשמל מהשקעה זאת עבור בית דירות ובית דו-משפחתי בירושלים.

**טבלה טז-4: העלות השולית של תוספת בידוד לקירות החיצוניים, החיסכון הכספי המתקבל, ושערוך ההשקעה לתקופה של 30 שנה בריבית היוון של 4%.**

(החישוב בוצע עבור בניין בירושלים אשר בו כבר מתבצע שיפוץ, לפי מחיר חשמל של 60 אגורות לקוט"ש, כולל מע"מ).

| | בית דירות | | בית דו-משפחתי | |
|---|---|---|---|---|
| | צפון-דרום | מז'-מע' | צפון-דרום | מז'-מע' |
| עלות הבידוד (₪) | 54,000 | 54,000 | 14,000 | 14,000 |
| חיסכון שנתי באנרגיה (קוט"ש) | 9,637 | 9,863 | 2,295 | 2,679 |
| חיסכון כספי שנתי (₪) | 5,782 | 5,918 | 1,377 | 1,607 |
| הערך הנוכחי של החיסכון הכספי על פני 30 שנה (₪) | 99,983 | 102,334 | 23,811 | 27,788 |
| הערך הנוכחי של ההשקעה | 45,983 | 48,334 | 9,811 | 13,788 |

הטבלה מראה בבירור כי בניגוד לממצאים המראים כי הכדאיות הכלכלית של תוספת בידוד לקירות החוץ היא גבולית (במקרה הטוב) בתנאים הקיימים כאשר מחשבים את מלוא עלות השיפוץ, הרי שכאשר נעשה שיפוץ בבניין ממניעים שאינם קשורים בחיסכון באנרגיה – **העלות השולית של השיפורים האנרגטיים הנוספים, כגון בידוד קירות המעטפת, קטנה בהרבה מהתועלת**. לכן הם כדאיים מאוד - אם כי יתכן שהשקעות אחרות יניבו תשואה גבוהה יותר.

### 5.3 סיכום

הניתוח שנעשה במחקר עבור משרד התשתיות, האנרגיה והמים מלמד שישנה כדאיות ברורה בשיפוץ גג אשר לא היה מבודד מלכתחילה, באמצעות הוספת בידוד תרמי בשיטת הגג ההפוך – גם אם השיפוץ נעשה רק לשם חיסכון באנרגיה ולא במסגרת שדרוג כולל של הבניין. מידת הכדאיות של מרבית האמצעים האחרים תלויה באפשרות לשלב אותם בשיפוץ של הבניין אשר יש לו גם יעדים אחרים: במקרה כזה, העלות השולית של שיפור התפקוד התרמי של המעטפת הוא קטן, ומומלץ מאוד לבצע אותו.

עד כה לא נעשו בישראל מחקרים הנוגעים לתועלות הלא-אנרגטיות משיפוץ, אף כי מחקרים אשר נעשו בחו"ל מצאו כי הן בעלות ערך לא מבוטל. אם התקן לדירוג בניינים לפי צריכת האנרגיה (ת"י 5282-1) יהיה מחייב, ניתן יהיה לאמוד את הערך הכספי הנוסף של שיפור המעטפת התרמית של הבניין, אשר כרגע אינו מקבל ביטוי במחירי הדירות.

## מקורות


[1] Amann J.T. (2006). Valuation of Non-Energy Benefits to Determine Cost-Effectiveness of Whole-House Retrofits Programs: A Literature Review. *Report Number A061, ACEEE*.

[2] Amstalden R. W., Kost M., Nathani C., & Imboden D. M., (2007). Economic potential of energy-efficient retrofitting in the Swiss residential building sector: The effects of policy instruments and energy price expectations. *Energy Policy, **35***(3), 1819-1829.

[3] Banfi S., Farsi M., Filippini M. and Jakob M. (2008). Willingness to pay for energy-saving measures in residential buildings. *Energy Economics,* **30**(2), 503-516.

[4] Baek C. and Park S., (2012). Policy measures to overcome barriers to energy renovation of existing buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **16**, 3939-3947

[5] Charies W., (2008). Understanding and Influencing Energy Efficient Renovation Decision. Ph.D. thesis, The University of British Columbia, (Vancouver). Retrieved from: https://circle.ubc.ca/handle/2429/2388

[6] Clarke J. A., Johnstone C.M., Kim J.M. and Tuohy P.G., (2007). Energy and carbon performance of housing: Upgrade analysis, Energy Labelling and National Policy Development. Proceedings of PALENC 2007, Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, Crete, Greece, Sept. 27-29 2007.

[7] Clinch P.J and Healy J.D., (2003). Valuing improvements in comfort from domestic energy-efficiency retrofits using a trade-off simulation model. *Energy Economics,* **25**(5), 565-583.

[8] Collins, J., Thomas, G. Willis, R. and Wilsdon, J. (2003). Carrots, sticks and sermons: influencing public behaviour for environmental goals. A Demos/Green Alliance report produced for the Department of Environment, Food and Rural Affairs (Defra), UK. http://www.demos.co.uk/files/CarrotsSticksSermons.pdf, accessed 1.8.2013.

[9] Galvin R., (2010). Thermal upgrades of existing homes in Germany: The building code, subsidies and economic efficiency. *Energy and Buildings,* **42**, 834–844.

[10] Harvey L., (2009). Reducing energy use in the buildings sector: Measures, costs, and examples. *Energy Efficiency*, **2**, 139–163.

[11] Jakob M., (2006). Marginal costs and co-benefits of energy efficiency investments - the case of the Swiss residential sector. *Energy Policy,* **34**(2), 172-187.

[12] Jakob M., (2007). The drivers of and barriers to energy efficiency in renovation decisions of single-family home owners. Centre for Energy Policy and Economics, Swiss Federal Institutes of Technology, Working Paper no. 56. Zurich, Switzerland.

[13] Knight R.L., Lutzenhiser L. and Lutzenhiser S. (2006). Why comprehensive residential energy efficiency retrofits are undervalued. American Council for an Energy Efficient Economy: *Proceedings of ACEEE 2006 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings*, Pacific Grove, Ca., Aug 13-18 2006.

[14] Mills, E. (1996). Consumer non-energy benefits as a motivation for making energy-efficiency improvements. *Energy, 21*(7-8), 707-720.

[15] Nadel S., Shipley A. and Elliott R. E., (2004). The technical, economic and achievable potential for energy-efficiency in the U.S. – a meta-analysis of recent studies. Retrieved from: http://www.dleg.state.mi.us/mpsc/electric/capacity/cnf/demand/ee_%20potentialjul_2004.pdf

[16] Risholta B., Timeb B., Hestnes A. G., (2013). Sustainability assessment of nearly zero energy renovation of dwellings based on energy, economy and home quality indicators. *Energy and Buildings,* 60 (2013), 217-224.

[17] Skumatz, L. (2001). Non-Energy Benefits (NEBs) - A Comprehensive Analysis and Modeling of NEBs for Commercial & Residential Programs, In AESP 12th National Energy Services Conference Proceedings. 459-471 Jupiter, Fla. Association of Energy Services Professionals International.

[18] Soratana K. & Marriott J. (2010). Increasing innovation in home energy efficiency: Monte Carlo simulation of potential improvements. *Energy and Buildings,* **42**, 828–833.

[19] Tommerup H. and Svendsen S., (2006). Energy savings in Danish residential building stock. *Energy and Buildings,* **38**(6), 618-626.

[21] אראל א., בקר נ. ופרידמן ח. (2013). שיפוץ בנייני מגורים בישראל לשם חיסכון באנרגיה. דו"ח סופי במחקר עבור משרד התשתיות הלאומיות, 129 עמ'.

[22] זוהר ר. (1989). מודל מתמטי לקבלת החלטות בשיפוץ אנרגטי של בנייני מגורים. חיבור לשם מילוי חלקי של הדרישות לתואר דוקטור, הטכניון – מכון טכנולוגי, חיפה.

[23] פרידמן ח. (2014). שיפוץ בנייני מגורים בישראל לשם חיסכון באנרגיה. חיבור לשם מילוי חלקי של הדרישות לתואר דוקטור, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב, 158 עמ'.

[24] קוטלר פ., קלר ק. והורניק י. (2012). ניהול השיווק. האוניברסיטה הפתוחה, תל אביב.

# פרק יז:

# התנהגות הדיירים

# פרק יז: התנהגות הדיירים

היוזמה להכנת מדריך זה מבטאת תפיסה שאותה ניתן לסכם במשפט הבא:

**אם הבניין ומערכותיו יתוכננו ברמה גבוהה ובהתאם לתקינה מתקדמת לחיסכון באנרגיה – צריכת האנרגיה בו תהיה נמוכה יותר מאשר בבניינים הנבנים ברמה בסיסית יותר.**

למרבה הצער, מחקרים רבים מרבים שהקשר בין צריכת האנרגיה החזויה לפי המודלים לבין צריכת האנרגיה בפועל הוא חלש מאוד [175], וכל השיטות לדירוג בניין לפי צריכת אנרגיה נמצאו לא יעילות [176]. אפילו מידת יעילותו של תקן LEED האמריקאי כאמצעי להביא לחיסכון באנרגיה הוטלה בספק, בעקבות ממצאי מחקר אשר מצא כי "לא נמצא קשר בין דירוג הבניין לפיLEED או מספר הנקודות שצבר הבניין בפרק האנרגיה בעת התכנון לבין צריכת האנרגיה שנמדדה בפועל" [177]. ברור אפוא שתכנון יעיל של הבניין ומערכותיו הוא תנאי הכרחי לחיסכון באנרגיה – אבל לא תנאי מספיק.

ההסבר נעוץ כמובן בהתנהגותם של דיירי הבניינים. בניינים, ובניני מגורים בפרט, אינם מכונות אוטונומיות המתנהלות באופן בלתי תלוי בשוכניהם. צריכת האנרגיה בבניינים מושפעות מדפוסי ההתנהגות של הדיירים ומהחלטות רבות שלהם, לעיתים על בסיס יום-יומי ולא מודע, החל מבחירת הציוד חשמלי, דרך אופן ההפעלה של הציוד ומידת המודעות לתפקוד המתאים של חלונות ומערכות הצללה.

מטרתו של פרק זה היא אפוא לשפוך אור על הקשר בין מאפייני ההתנהגות של דיירי הבניין על צריכת האנרגיה, ולהציג אמצעים להגדיל את המודעות לחיסכון, לרבות הצגת מידע על האיכות התרמית של הבניין; הצגת מידע השוואתי על צריכת האנרגיה של יחידת המגורים בהווה ובעבר; הצגת מידע השוואתי על צריכת האנרגיה של יחידת המגורים בהשוואה ליחידות שכנות דומות; והצגת מידע מפורט על צריכת אנרגיה של מערכות וציוד חשמלי בדירה, בהתאם לצריכת אנרגיה מדודה (בפועל) ובעזרת מערכות חכמות לניהול אנרגיה.

## 1. התפיסה המסורתית של חיסכון באנרגיה בבניינים

התפיסה המסורתית בנוגע להשפעתם של תקנים לחיסכון באנרגיה בבניינים מבוססת על ההנחות הבאות [178]:

א. קיים קשר סיבתי ברור בין מאפייני מעטפת הבניין ומערכותיו לבין צריכת האנרגיה (ופליטות של גזי חממה), במיוחד בכל הנוגע לאקלום הבניין (חימום ומיזוג אוויר).

ב. קשר זה ניתן לתאר ברמה נאותה באמצעות תיאור המאפיינים הפיסיים של הבניין והנחות לגבי התנהגות הדיירים, כפי שכבר מיושם במספר תוכנות מחשב.

יז

175 Williamson, 2001

176 Stein, 1997

177 Newsham et al, 2009

178 Williamson, 2004

ג. ניתן למצוא דפוסי התנהגות אופייניים של הדיירים ולבטא אותם בכלים סטטיסטיים באופן שאפשר יהיה לייחס את ההבדלים בצריכת האנרגיה להבדלים בבניינים עצמם.

ד. ניתן לבצע ניתוח עלות-תועלת לגבי רכיבי בניין ומערכות באופן שיאפשר לקבל החלטות מושכלות בנוגע ליישום אמצעי חיסכון.

כפי שתואר בהקדמה, התפיסה ה'טכנו-כלכלית' הזאת לגבי חיסכון באנרגיה אינה זוכה לתמיכה חד-משמעית במחקרי שדה, ובפרט:

- תקנים ומדדים המבוססים על הדמיות מחשב, לפחות כפי שהן מיושמות עד כה, מוגבלות באופן מובנה בכל הנוגע להנחות בעניין נוחות תרמית ודפוסי ההפעלה של מערכות האקלום.
- העלות והתועלת של יוזמות שונות לחיסכון לא נבדקה עדיין באופן מספיק מקיף וממצה, במיוחד ברמת הבית הבודד.
- דגש רב מדי על תכנון יעיל של הבניין עלול להביא לתחושה שאין עוד צורך בהתנהגות מודעת, ובכך לבטל את תחושת האחריות של הדיירים עצמם בנוגע לחיסכון באנרגיה.

## 2. מקומן של החלטות המשפיעות על צריכת אנרגיה בבנייני מגורים

רוב האוכלוסייה בישראל, כמו בשאר העולם, אינה חשה באופן ישיר את השפעתן של פעולות יום-יומיות על הסביבה. כך גם בהתייחס לצריכת האנרגיה בבניין, שהיא למעשה סך האנרגיה הנצרכת במכלול פעילויות שהן תוצאה של החלטות רבות מאוד – אשר כל אחת ואחת מהן עשויה להיות פעוטת ערך. השונות הרבה, אפילו כאשר מדובר באוכלוסייה הומוגנית (במונחים של הכנסה, מעמד חברתי, השכלה או מאפיינים דמוגרפיים אחרים), מעידה על כך שהתנהגות אישית היא בעלת השפעה רבה על צריכת האנרגיה. כפועל יוצא מכך, המודעות להתנהגות חוסכת אנרגיה ויישום הרגלים נכונים הם בעלי פוטנציאל גדול מאוד לחיסכון.

ניתן להשפיע על התנהגות דיירים במגוון אמצעים, אשר ניתן לסווגם באופן כללי בכינויים 'מקל', 'גזר' ו'דרשה' (carrot, stick and sermon). 'מקל' הוא אמצעי המכוון לאכוף התנהגות רצויה תחת האיום של קנס או עונש; 'גזר' הוא תמריץ, לרוב (אך לא תמיד) כספי; ו'דרשה' היא אמצעי המיועד להשפיע על התנהגות הפרט על ידי מתן מידע או בפנייה למניעים לא-כספיים.

ניתן גם לסווג את האסטרטגיות המכוונות להשפעה על התנהגות לפי נקודות מוצא אחרות, כפי שיתואר להלן.

### 2.1 סוג ההחלטה

צריכת האנרגיה בבניין מושפעת משני סוגי החלטות [179]: החלטות בדבר רכישה או השקעה והחלטות המשפיעות על הרגלים ודפוסי התנהגות.

*החלטות בדבר רכישה או השקעה* הן נדירות למדי, ומתרחשות רק כאשר יש צורך להחליף מכשיר חשמלי שהתקלקל, או כאשר ישנם שיפורים טכנולוגיים המעודדים שדרוג של מכשיר קיים או רכישה של מכשיר חדש. צריכת האנרגיה של המכשיר עשויה להיות שיקול חשוב בזמן הרכישה, אך לעתים קרובות ליעילות של המכשיר יש משקל שולי במכלול השיקולים המשפיעים על ההחלטה – אפילו יש לכל השפעה ארוכת טווח.

דפוסי התנהגות מושפעים מהחלטות שגרתיות המתקבלות כמעט בהיסח הדעות, פעמים רבות ביום וללא מחשבה של ממש על ההשלכות, כגון 'החלטה' אם לכבות את האור ביציאה מהחדר. להחלטות מסוג זה לא קודם בדרך כלל תהליך שקול או רציונלי הבוחן את החלופות האפשריות (בדוגמא שלנו

[179] Gynther et al, 2012

– לכבות או לא לכבות את האור), והן בדרך כלל תוצאה של הרגל או חשיבה 'אוטומטית' ולא מודעת [180]. הרגלים הם תהליכים אוטומטיים מונחי מטרה אשר יש נטייה לחזור עליהם בתרחישים מסוימים אם התוצאה המתקבלת מניחה את הדעת במרבית הזמן. הרגלים לעיתים קרובים מוזנים על ידי דעות קדומות או מידע חלקי אשר נוטה לחזק את דפוס ההתנהגות הקיים. הרגלים תמיד מבטאים בחירה בין אפשרויות ("לכבות את האור" או "לא לכבות את האור"), אך ההחלטות נתפשות כחסרות משמעות ולא ראויות למחשבה נוספת, אף שעלולה להיות להן השפעה מצטברת רבה על צריכת האנרגיה.

## 2.2 מודלים לקבלות החלטות מתחומים אחרים

תהליכי קבלת החלטות נלמדים במסגרת תחומי מחקר שונים, והתובנות הנרכשות הן תוצאה של ההקשר ושל הכלים בהם נעשה שימוש לנתח אותם. אשפר למנות ארבע גישות תיאורטיות ללימוד קבלת החלטות: מודלים תועלתיים וכלכלה התנהגותית, השמים דגש על התנהגות רציונלית המיועדת להביא למירוב התועלת, בכפוף להנחות קבועות ועקביות ביחס להעדפות הפרט המקבל את ההחלטות; מודלים לתיאור אימוץ של טכנולוגיה חדשה, השואפים להסביר כיצד ומדוע נוצרים חידושים טכנולוגיים, באילו תנאים הם נקלטים בחברה והופכים נפוצים; מודלים מתחום הפסיכולוגיה הסביבתית והחברתית, הבאים להסביר את המגבלות הנובעות מניתוח המושתת אך ורק על עיבוד מידע לשם מירוב התועלת הכספית; והבנת ההקשר החברתי שבו מתקבלות החלטות, על בסיס גישה הקובעת שאין משמעות רבה ללימוד ההחלטות של פרט במנותק מגורמים חברתיים רחבים יותר. ארבע הגישות יתוארו בצרה להלן:

**א. מודלים תועלתיים וכלכלה התנהגותית**

התיאוריה הכלכלית הקלאסית מושתתת על ההנחה ש'השחקנים' (כלומר, הצרכנים) מונעים על ידי תועלת אישית, מתנהגים באופן רציונלי ושואפים למירוב הרווח או התועלת הכספית. בהתאם לכך, לצרכנים ישנם סדרי עדיפויות שהן ידועות, יציבות בזמן ועקביות (לפחות בפרק זמן סביר). כלומר, הצרכן אינו מתנהג באופן שרירותי. הפרט פועל במסגרת אילוצים תקציביים, ומעדיף תוצאה בעלת תועלת רבה על פני תוצאה שהיא בעלת תועלת פחותה.

מודלים אקונומטריים מיועדים להתגבר על השונות הטבעית הקיימת בכל אוכלוסייה. הם מתארים התנהגות ברמה כוללנית, משום שאף כי יש שונות רבה ברמת הפרט, התפלגות ההעדפות של אוכלוסייה גדולה היא לרוב יציבה. מודלים אלה אף מניחים שאף כי יתכן שפרט מסוים ינהג באופן לא הגיוני ובלתי ניתן לחיזוי, הרי שההתנהגות של האוכלוסייה כולה מאופיינת בתבניות וכללים שאותם ניתן לזהות ולנתח.

למרות האמור לעיל, קיימים ממצאים ניסיוניים רבים המלמדים שבני אדם רבים אינם נוהגים, למעשה, לקבל החלטות הגיוניות באופן עקבי. למשל, ידוע כי מרבית האנשים מעדיפים רווח קצר-טווח על פני רווח גדול יותר המתקבל לאורך זמן ארוך או במועד מאוחר יותר. – התנהגות הסותרת את ההנחה בדבר היציבות בזמן. עוד נמצא כי מרבית האנשים פועלים בצורה שמרנית ובמטרה למזער נזקים או הפסדים, גם אם משמעות ההחלטה היא לוותר על אפשרות ליהנות מרווחים ניכרים. בני אדם בדרך כלל מתקשים בהערכת תועלת מופשטת, כך שהתוצאה של החלטה מסוימת נמדדת בהשוואה למצב מוכר – לרוב הסטטוס קוו. לתכונות האלה של בני האדם ישנן שתי משמעויות חשובות אותן יש לבטא בכל מודל מיקרו-כלכלי: א) כל תועלת הינה יחסית; ב) התועלת נמדדת בהשוואה לנקודת ייחוס ידועה, ולא לתוצאה סופית חד-משמעית ומוחלטת. מאחר והתוצאה נבחנת בהשוואה לנקודת ייחוס סובייקטיבית, לציפיות של כל פרט ופרט יש השפעה רבה על ההחלטה.

[180] Lopes et al, 2012

בכדי להגיע למירוב התועלת במגבלות תקציב נתון, על השחקן הרציונלי להשיג מידע רלבנטי ולנתח אותו, בהתייחס לכל ההשלכות האפשריות של החלטה העומדת על הפרק. מאחר והמידע הדרוש זמין במלואו רק לעיתים רחוקות, או שנדרש מאמץ רב להשיג אותו, מרבית ההחלטות מתקבלות בפועל בעזרת מגוון רב של חוקים או כללי אצבע אשר מיועדים לפשט את המאמץ המחשבתי הנדרש על מנת לקבל החלטה מושכלת. השאלה כיצד מתקבעים כללי אצבע מסוימים בתרחישים השונים מעסיקה חוקרים רבים.

### ב. מודלים לאימוץ טכנולוגיה

כפי שהוסבר בראשית הפרק, שימור אנרגיה מושפע לא רק מדפוסי התנהגות אלא מהחלטות בדבר רכישה של ציוד או אף שיפוץ הנעשה בבניין עצמו. מחקרים מראים כי אימוץ של טכנולוגיה חדשה (בכל תחום) מושפע מחמישה מאפיינים:

- יתרון מובהק בהשוואה לטכנולוגיה הקיימת, כגון מחיר נמוך יותר או איכות גבוהה יותר
- תאימות לצרכים קיימים ודפוסים חברתיים מקובלים
- פשטות התקנה ותפעול
- ניתנת לבחינה ובדיקה טרם הרכישה
- חשיפה ופרסום בפני רוכשים אפשריים

ראוי, עם זאת, לציין כי גם טכנולוגיה אשר עומדת בכל חמשת התנאים האלה לא תזכה בהכרח לאימוץ מיידי בהיקף רחב. הנכונות לאמץ טכנולוגיה חדשה תלויה גם במאפייני אישיות של מקבל ההחלטה. מקובל לסווג את בני לחמש קבוצות בהתאם לנכונותם לאמץ טכנולוגיה חדשה [181]: ממציאים (innovators); מאמצים חלוצים (adopters early); מקדימים מבין הרוב (early majority); מאחרים מבין הרוב (late majority); ומפגרים (laggards). בני אדם המשתייכים לקבוצות השונות מגיבים בצורה שונה למידע חדש, ותהליך קבלת ההחלטות שלהם יהיה בהכרח שונה אף הוא.

עם זאת, התהליך עצמו כולל תמיד אותם שלבים: הוא מתחיל ב'ידיעה' (knowledge), הדורשת מודעות והבנה; נמשך דרך 'שכנוע' (persuasion), לפי מידת האטרקטיביות של החידוש; קבלת ההחלטה (decision); יישום (implementation), הכרוך בדרך כלל בשינוי הרגלים; ומסתיים באישור (confirmation), שלב הכולל המשך שימוש והיזון חוזר או המלצה בפני אחרים.

### ג. מודלים בפסיכולוגיה חברתית וסביבתית

כפי שנטען קודם, מחקרים רבים הראו כי יש חסרונות רבים למודל קבלת החלטות המבוסס על 'שחקן רציונלי' המקבל החלטות על בסיס מידע בכדי להביא למירוב התועלת הכלכלית. נמצא גם כי גישה למידע המיועד לעודד מודעות לנושא, לבסס אמונות או להשפיע על התנהגות אינה, כשלעצמה, יעילה בכל המקרים. ישנה חשיבות רבה מאוד לא רק לתוכן אלא גם לאופן שבו המידי מוגש ומוצג: בכדי להיות מועיל המידע צריך להיות פשוט, בולט, רלבנטי וברור השוואה. דווקא מידע טכני, מפורט, עובדתי ומקיף נמצא במקרים רבים כיעיל פחות.

### ד. ההבניה החברתית של קבלת ההחלטות

שלוש הגישות הקודמות מתמקדות בפרט, אשר אמנם יכול להיות חשוף להשפעות חיצוניות אך מקבל את ההחלטות באופן עצמאי. לפיכך, המודלים מטפלים בפרט – באדם בודד. עם זאת, יש חוקרים הגורסים כי החלטות אישיות מתקבלות בדרך כלל בהקשר מובנה שהוא תוצאה של מערכות חברתיות או טכנולוגיות. צרכים, עמדות וציפיות אינן אישיות במהותן, אלא נובעות

[181] Rogers, 1962

מיחסים הדדיים מורכבים בין נורמות חברתיות, מוסדות, טכנולוגיה ותשתית. לשיוך החברתי ולנורמות המקובלות יש לפיכך השפעה רבה על סגנון החיים, וכפועל יוצא מכך על צריכת האנרגיה.

כמובן שבני אדם אינם מקבלים החלטה מודעת לצרוך אנרגיה או משאבים הדרושים להפקת חשמל. אנו עסוקים בפעילות רגילה המקובלת על החברה והמהווה למעשה את השגרה היומית – והעובדה שפעילות זו דורשת בדרך כלל אנרגיה מתקבלת כמובן מאליו ואינה דורשת החלטה מודעת. הביקוש לאנרגיה הוא אפוא עקיף, והוא תוצאה של דרישה לשירותים כגון ניקיון או נוחות – שירותים המקבלים מענה בעזרת מכשירים (כגון נורות חשמל או מקרר) ותשתיות (רשת החשמל) אשר צורכים אנרגיה באופן ישיר. לפי גישה זו, הביקוש לאנרגיה אינו תוצאה ישירה של החלטות המתקבלות על ידי הפרט, ואינה מושפעת מהחלטות או אמונות בטווח הקצר, אלא תוצאה בלתי נמנעת של התהליך שבו "המערכת" מקבלת צורה, תהליך ממושך ובעל אינרציה רבה. לפיכך, חסמים לחיסכון באנרגיה עשויים להיות תוצאה של צרכים חברתיים ונורמטיביים שלא ניתנים לשינוי ברמת הפרט. כלומר – חיסכון משמעותי בצריכת אנרגיה בבנייני מגורים יתאפשר רק על ידי פיתוח משטר חברתי-טכני חדש אשר ידרוש פחות אנרגיה לקיום השירותים אשר נתפסים על ידי מרבית החברה כטבעיים או אף חיוניים.

### 2.3 גורמים מרחביים

פעילות בני האדם מתרחשת במגוון מקומות, אותם ניתן לסווג כמרחבים 'אישיים' – המשרתים אדם אחד בלבד; מרחבים 'פרטיים' – המשרתים מספר מצומצם של אנשים בעלי קשרים יציבים לאורך זמן, כגון משפחה; מרחבים 'פרטיים למחצה' – המשמשים מספר אנשים השוהים או עוברים באותו מרחב דרך קבע, מבלי שיהיו ביניהם קשרים אמיצים, כגון חדרי מדרגות בבניינים משותפים; מרחבים 'ציבוריים למחצה' – הנמצאים בבעלות פרטי אך משרתים את הציבור, כגון קניונים; ומרחבים 'ציבוריים' – הנמצאים בבעלות ציבורית ומנוהלים על ידי הרשויות לטובת הכלל, כגון כיכרות עירוניות.

מרבית המחקרים על צריכת אנרגיה בבנייני מגורים מתייחסים אל 'משק הבית' כיחידה הבסיסית הצורכת אנרגיה, אשר מאופיינת בדרך כלל גם במונה אנרגיה נפרד. יתכן בהחלט שהחברים במשק הבית צורכים אנרגיה במידה שונה זה מזה, אך מניחים שחלק מההחלטות המשפיעות על צריכת האנרגיה משפיעות על הצריכה הכוללת של משק הבית (נניח – רכישת מקרר), ודפוסי הצריכה מושפעים מהיחסים ההדדיים בין כל בני הבית [182].

המקום שבו בוחרים לקיים פעילות מסוימת עשוי להיות בעל השפעה רבה על דפוסי צריכת האנרגיה הנובעים ממנה. בחברה הקיבוצית, למשל (לפחות עד לשנים האחרונות), צריכת האנרגיה הביתית היתה נמוכה יחסית לזו שבמשקי בית עירוניים משום שאחדות מהפעילויות הנפוצות התקיימו במרחבים ציבורים או ציבוריים למחצה במקום במרחב הפרטי.

תחושת הבעלות משפיעה על צריכת משאבים בכלל וצריכת אנרגיה בפרט. מרבית בני האדם נוטים לחסוך כאשר הם נושאים בעלות המלאה של הפעילות או המשאב, בהשוואה להיקף הצריכה של אותו משאב כאשר עלותו חלה על צד שלישי או מהווה חלק מהוצאות כוללות של תאגיד אשר אין בו מנייה פרטית והתרומה של הפרט לחיסכון אינה מקבלת הכרה. תופעה זו נצפתה אפילו בקהילות בעלות לכידות חברתית גבוהה ומחויבות לכלל כמו החברה הקיבוצית [183].

סיכום:

[182] Cohen et al, 2010; Lopes et al, 2012

[183] Cohen et al, 2010

יישום מודלים מתאימים של קבלת החלטות עשוי לסייע בבניית מדיניות יעילה לחיסכון באנרגיה בכך שיביאו לזיהוי והבנה של הגורמים המשפיעים על קבלת ההחלטות. לכל אחת מהאסכולות אשר תוארו כאן עשויה להיות תרומה וחשוב להפיק לקחים מכולן.

## 3. כלי מדיניות

כפי שניתן להבין מהסקירה התמציתית בחלק הקודם, ניתן להיעזר בכלים ממספר אסכולות ותחומי מחקר בבואנו לנתח את הגורמים המשפיעים על צריכת אנרגיה, בין אם מדובר בדפוסי התנהגות שגרתיים ובין אם מדובר ברכישה או השקעה חד-פעמית בעלת השפעה לאורך זמן. ההצלה בדבר אמצעי המדיניות תלויה אפוא הן בהגדרת היעד להתערבות והן בסוג הניצוח והמסקנות הנובעות ממנו.

### 3.1 מועד הפעלת המדיניות

בפסיכולוגיה התנהגותית נהוג לסווג את האמצעים להשפעה על ההתנהגות לשתי קטגוריות עיקריות, בהתאם למועד הפעלתן: כאמצעי למנוע התנהגות (לא רצויה) מסוימת, או כתגובה המותנית בתוצאות ההתנהגות [184].

התערבות מקדימה (antecedent intervention) מיושמת במטרה להשפיע על מאפיין אחד או יותר של התנהגות אשר עלולה להיות בעלות השלכות סביבתיות בלתי רצויות. למשל: אם נצייד את משקי הבית במידע על אמצעים חוסכי-אנרגיה, נביא לחיסכון משום שמשקי הבית יישמו בפועל מידע אשר לא היה ברשותם קודם לכן. בקבוצה זו של אמצעים ניתן למנות בין היתר 'מחויבות' (הבטחה לשנות דפוסי התנהגות, בדרך כלל על מנת להשיג יעד כמותי מוגדר מראש); הצבת יעדים; הפצת ידע והגדלת המודעות (באמצעות כלי התקשורת, סדנאות ממוקדות או מידע מדוור); וסימולציה פרטנית (המאפשרת מתן המלצות אישיות על בסיס דפוסי התנהגות מוכרים).

אסטרטגית תוצאה (consequence strategy) מיועדת להשפיע על דפוסי התנהגות באמצעים אשר הפעלתם תלויה בתוצאות ההתערבות המיועדת לשנות את ההתנהגות. למשל: מתן היזון חוזק למשקי בית על מידת החיסכון שהושג עשויה להוות תמריץ לחיסכון נוסף, משום שהמודעות שלהם בנוגע ליעילות הפעולות השונות שבהן נקטו על מנת להביא לחיסכון רבה יותר.

### 3.2 התערבות חברתית

אחד מהאמצעים היעילים ביותר להשפיע על התנהגות האדם הוא לחץ חברתי. השפעתן של נורמות חברתיות עשויה להיות יעילה הרבה יותר בעידוד התנהגות חוסכת אנרגיה מאשר מתן דגש ליתרונות הכלכליים או הסביבתיים של החיסכון. ישנה קורלציה חיובית בין עוצמת הקשר החברתי לבין היכולת להביא לשינוי התנהגות: ככל שהקשר קרוב יותר, כך גדל הפוטנציאל לחיסכון. במילים אחרות, השתייכות ל"רשת חברתית" מתאימה עשויה להיות אמצעי יעיל יותר להביא לשימור אנרגיה מאשר נורמות התנהגות כלליות אשר אינן נשענות על מערכות יחסים אישיות. רשתות חברתיות אינן חייבות בהכרח להיות רשמיות: מחקרים הראו שכאשר דיירים בבניין משותף קיבלו מידע על צריכת האנרגיה שלהם ושל שכניהם, היתה מגמה של התכנסות ברמת הצריכה. השינוי נצפה בדרך כלל אצל הדיירים אשר צרכו אנרגיה מעל הממוצע, ואשר ניסו לחסוך על מנת להתאים את עצמם לנורמה החברתית, בעוד שדיירים שצריכתם היתה ממוצעת לא אובחנו שינויים.

כאשר לחץ חברתי הנובע מערכים משותפים מופעל לאורך זמן, יש סיכוי טוב להשפעה על סדרי עדיפויות ועל ההתנהגות של פרטים החורגים מהנורמה. אולם תקפותה של קביעה זו עלולה להיחלש בשנים הקרבות, משום שסגנון החיים בישראל נותן יותר חופש לפרט מאשר בעבר, והדרישה

184 Abrahamse et al, 2005

להתאים לנורמות הכלליות מאבדת מעוצמתה. ככל שהערכים המשותפים משפיעים פחות, כך קטנה יעילות הלחץ החברתי כאמצעי לשנות התנהגות.

## 3.3 הקניית מידע

### א. קבלת החלטות מתוך מודעות

החשש מפני התחממות כדור הארץ, במקביל לעלייה במחירי האנרגיה, הגדילו את המודעות של מרבית הציבור להשלכות של צריכת אנרגיה. המודעות גדלה בין היתר בשל הדיון באמצעי התקשורת על ההשפעה השלילית של הגידול הנמשך בפליטת גזי חממה [185]. עצם המודעות עשויה להביא לשינוי בדפוסי צריכת האנרגיה, אולם ההשפעה של פעילויות יום-יומיות על הסביבה היא לרוב בלתי מוחשית. ממשלות וארגונים לא-ממשלתיים בכל רחבי העולם פיתחו מגוון כלים לשכלל את העברת המידע לציבור, כגון תווים "ירוקים" [186] או תצהירים סביבתיים של חברות [187]. כל האסטרטגיות האלה מבוססות על ההנחה שככל שיהיה בידי הציבור יותר מידע על ההשלכות של התנהגותו על הסביבה, כך תגדל הנכונות לנקוט באמצעים של ממש לחיסכון. הניסיון המעשי מלמד, עם זאת, שאף כי אמצעים כאלה עשויים להיות יעילים, מידת הצלחתם תלויה בגורמים רבים, במיוחד ההקשר שבו המידע נמסר ואופן הצגתו [188].

### ב. השפעת היזון חוזר על קבלת החלטות

מחקרים רבים מראים שמתן היזון חוזר לצרכנים על צריכת האנרגיה שלהם עשוי להביא לחיסכון, לפחות בטווח הקצר. יש חשיבות לכך שהמידע יהיה אישי ופרטני, ויתייחס לפעולות ספציפיות שנעשו על ידי הצרכן או משק הבית. כן חשוב שהמידע יתקבל בתדירות גבוהה מספיק. שיעור החיסכון עשוי לנוע בין 5% ועד 25% בתנאים מיטביים [189] – אולם יש לסייג ממצאים אלה בכך שיתכן ולאורך זמן יתרחש 'ריבאונד' (ראו פיסקה 4 בהמשך פרק זה), והצריכה תשוב ותעלה.

### ג. החלטות על בסיס צרכים ומאוויים

כפי שהוסבר לעיל, צריכת אנרגיה נעשית במהלך מרבית הפעולות הנעשות כדרך שגרה – אולם מרבית הציבור אינו מודע להשפעה של כל פעולה ופעולה. לכן מיפוי של אישי של כל פעולה ופעולה הכרוכה בצריכת אנרגיה, ומתן המלצות פרטניות לפי הפרופיל שנוצר עשוי להביא לחיסכון ניכר [190]. הצלחת המהלך תלויה, עם זאת, בכך שהשינוי אינו כרוך בוויתור על צרכים הנתפסים בעיני הפרט כבעלי חשיבות, וכי לכל שימוש מוצעת חלופה המאפשרת חיסכון מבלי שיש פגיעה משמעותית באיכות החיים או בנוחות.

### ד. קביעת יעדים

גורם מפתח בשינוי התנהגות הוא מוטיבציה חזקה [191], ומספר חוקרים מצאו כי קביעת יעדים היא אמצעי יעיל להגברת הרצון לנקוט בצעדים המבוקשים [192]. קביעת יעד כמותי מוגדר ובר-מדידה הוכיחה את עצמה כשיטה יעילה בהקשרים אחרים, כגון הרזיה (ירידה במשקל). עם זאת, קיים קושי בהגדרת יעד מתאים ולבקר את ההתקדמות לקראת השגתו, גם כאשר הנכונות קיימת. ישנה

185 Ciochetti and McGowan, 2010; Deuble and De Dear, 2012
186 Crespi and Marette, 2005; Leire and Thidell, 2005
187 Khanna, 2001; Delmas et al, 2010
188 Delmas and Grant, 2010
189 Lopes et al, 2012; Peschiera and Taylor, 2012
190 Lopes et al, 2012
191 Thogeresen and Gronhoj, 2010
192 Wilson and Dowlatabadi, 2007

נטייה לקבוע יעדים לא ריאליים, ואף לשוב ולקבוע יעדים שאפתניים יותר ויותר, למרות שהיעדים המקוריים לא הושגו [193].

### 3.4 אמצעים המכוונים אל 'מתנהגים' במקום כלפי 'התנהגויות'

כפי שתעשיית הפרסום למדה, למסע פרסום המיועד להשפיע על התנהגות הצרכנים ישנו סיכוי רב יותר להצלחה אם המסר הוא ממוקד ופונה לקבוצה מוגדרת, או אפילו לאדם מסוים, בהתבסס על ההרגלים וההעדפות שלהם. למרות זאת, מרבית המאמצים לחיסכון באנרגיה מנוסחים בצורה כללית ואינם נותנים מענה לגורמים המביאים לכך שישנם פרטים או מגזרים בחברה שצריכת האנרגיה שלהם גבוהה בהרבה מהממוצע. גישה חלופית טוענת שמאחר וקשה מאוד לשנות הרגלים ודפוסי התנהגות הטבועים עמוק, יש למקד את המשאבים והמאמצים בשינוי ההתנהגות של צרכני האנרגיה הכבדים ביותר [194]. שינוי בדפוסי הצריכה שלהם עשוי להביא לחיסכון משמעותי יותר, במיוחד במונחים מוחלטים, מאשר מאמץ דומה אשר יופנה אל צרכנים שהם חסכנים יותר מלכתחילה. הצלחתה של מדיניות כזאת תלויה בשלושה גורמים:

א. ניתן לזהות את הצרכנים הכבדים, באמצעות סקרים, דו"חות של חברת החשמל וכו'.

ב. ניתוח של מאפייני הצריכה של הצרכנים האלה יביא לזיהוי דפוסים אופייניים לקבוצה כולה, בהנחה שיש לה מכנה משותף. דפוסים אלה עשויים להיות חברתיים, טכניים או אחרים.

ג. ניתן לפתח אסטרטגיה אשר תתייחס באופן ממוקד לדפוסי הצריכה האופייניים האלה.

## 4. תופעות הריבאונד והפריבאונד

### 4.1 אפקט הריבאונד (rebound effect)

התפתחות טכנולוגית עשויה לשפר את היעילות האנרגטית של רבים ממכשירי החשמל המשרתים אותנו. במלים אחרות – דרושה פחות אנרגיה לקבלת השירות המבוקש. לפיכך, בהנחה שמחיר האנרגיה עצמו נותר ללא שינוי, העלות ליחידה של השירות פוחתת. לפי חוקי הכלכלה הקלאסית, כאשר העלות של מוצר או שירות כלשהם נופלת, צפוי שהביקוש יגדל. לדוגמא: אם מיזוג האוויר יהיה יותר יעיל, יתכן ויותקנו מזגנים ביותר חדרים, המזגנים יפעלו למשך זמן ארוך יותר, או אף שניהם גם יחד. בנוסף לכך, סביר כי חלק מהחיסכון שיתקבל משיפור היעילות של המזגן תופנה לרכישה של מוצרים או שירותים אחרים – שחלקם עלולים גם כן לצרוך אנרגיה.

בסופו של דבר, יתכן כי ההפחתה הכוללת בצריכת האנרגיה כתוצאה משימוש במוצרי חשמל יעילים יותר תהיה קטנה מהצפוי, או אפילו תיעלם לחלוטין. באותו אופן, יתכן כי החיסכון שיתקבל בפועל משיפוצים במעטפת הבניין, כגון תוספת בידוד תרמי או התקנת זיגוג כפול בחלונות, יהיה אף הוא קטן מהחזוי.

בשני המקרים, מייחסים את אובדן החיסכון הצפוי באנרגיה לתופעה המכונה תופעת ה'ריבאונד' (rebound effect) [195]. את תופעת הריבאונד ניתן לאמוד באמצעות הביטוי הבא:

$$rebound\ effect = \frac{potential\ savings - actual\ savings}{potential\ savings}$$

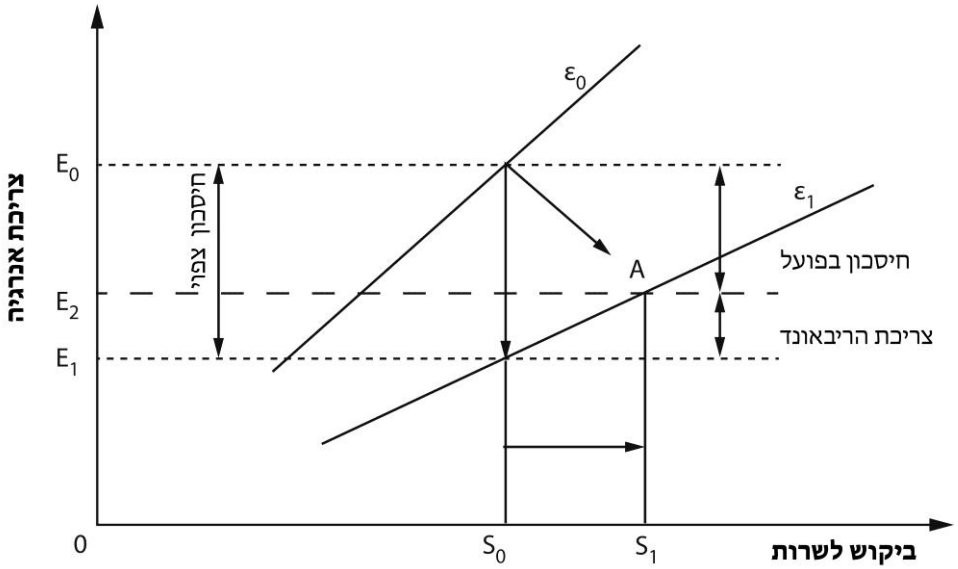
[193] Bonino et al., 2012

[194] Galvin, 2013

[195] Khazzoom, 1980; Berkhout et al, 2000

לתופעת הריבאונד שני מרכיבים עיקריים: מרכיב ישיר, שהוא תוצאה של שינוי בהתנהגות הפרט (ברמת המיקרו); ומרכיב משני, ברמת המקרו, שהוא תוצאה של גידול בצריכה של מוצרים או שירותים הנרכשים בכסף שהתפנה כתוצאה מהחיסכון המקורי, ואשר דרושה אנרגיה (נוספת) על מנת לספק אותם.

את המנגנון המביא לתופעת הריבאונד הישיר ניתן לראות בתרשים הבא, שבו S הוא הביקוש לשירות אשר דורש תשומות אנרגיה בשיעור E, ו-ε, היעילות האנרגטית של אספקת השירות, היא היחס S חלקי E. אם היעילות האנרגטית גדלה מ-$\varepsilon_0$ ל-$\varepsilon_1$ , גידול בביקוש לשירות מ-$S_0$ ל- $S_1$ יביא לכך שהחיסכון שיתקבל בפועל יהיה קטן מהחיסכון החזוי.




**תרשים יז-1. אפקט הריבאונד.**

גודלו של אפקט הריבאונד תלוי במידת אלסטיות המחיר של הביקוש – המשתנה בין מוצרים ושירותים שונים. מחקר בהולנד [196] מצא שכאשר מדובר בצריכת אנרגיה בבנייני מגורים, ערכו של מקדם זה נע בין 0.2- ל- 0.3-. כלומר, שיפור היעלות האנרגטית ב-1 אחוז יביא להפחתה בצריכת האנרגיה של 0.7-0.8 אחוזים בלבד. אלסטיות המחיר של מקורות אנרגיה שונים (כגון חשמל או גז) שונה, ויתרה מכך – מידת האלסטיות משתנה לאורך זמן: מידת האלסטיות קטנה בטווח הקצר, וגדלה לאורך זמן, משום שההתאוששות של ביקוש דורשת תקופת הסתגלות עד שהצרכנים משנים את דפוסי הצריכה שלהם בהתאם למסר המתקבל ממערכת המחירים המעודכנת.

גודלו של אפקט הריבאונד משתנה בטווח רחב למדי, בין מדינות, סקטורים ושימושים [197]. הריבאונד בעקבות שיפור ביעילות חימום הדירה עשוי להיות 50% או יותר, ומושפע בין היתר מהמצב הראשוני של הבניין. זאת משום שדיירים נוטים להעלות את הטמפרטורה בדירה בעקבות ההוזלה בעלות החימום, והשינוי הזה מורגש בעצמה רבה יותר ככל שהדירה היתה במצב נחות יותר והטמפרטורה בה היתה לפיכך נמוכה יותר. מחקר בסין [198] העלה שתופעת הריבאונד היתה זניחה בעקבות שיפור במקררים, מכשירי טלוויזיה ומחשבים, אך היה למעלה מ-60% עבור שיפורים במזגנים ו-106% עבור שיפור במכונות כביסה! המשמעות של אפקט ריבאונד העולה על 100 אחוז

[196] Berkhout et al, 2000

[197] Greening et al, 2000; Sorrell et al., 2011

[198] Wang et al, 2014

היא שצריכת האנרגיה הכוללת גדלה עקב השיפור ביעילות, כלומר התוצאה היא הפוכה לצפוי (backfire).

עצם המודעות לעוצמתו הצפויה של אפקט הריבאונד אינה מספיקה בכדי למנוע אותו: יש למצוא דרכים מעשיות להתמודד עם התופעה [199]. לשם כך יש לעודד שינוי מקיף בדפוסי הצריכה באמצעות מסע פרסום או היטל פחמן, או לעודד שימוש בסכומי הכסף שיתקבלו עקב החיסכון להשקעות נוספות בחיסכון באנרגיה.

### 4.2 אפקט הפריבאונד (prebound effect)

אומדנים של הפוטנציאל לחיסכון בעקבות יישום מדיניות מתאימה כגון שיפוץ בניינים או קידום התנהגות חוסכת אנרגיה נעשים בדרך כלל בהסתמך על הערכות של צריכת האנרגיה הקיימת, בעזרת חישובים או הדמיות. רק לעיתים רחוקות יש מידע מקיף על צריכת האנרגיה בפועל – אך יתכן כי ההבדל בינו לבין האומדנים הוא גדול מאוד, במיוחד בבניינים ישנים באיכות נמוכה. מחקרים בגרמניה [200] הראו כי צריכת האנרגיה בבניינים כאלה נמוכה ב-30% בהשוואה לתוצאות של הדמיות מחשב, כנראה משום שהדיירים נאלצים להסתפק בפחות חימום מכפי שנדרש להבטיח נוחות תרמית נאותה. כפי שצוין קודם, אפקט הריבאונד מתרחש **לאחר** יישום אמצעי החיסכון, ומביא לכך שחלק מהחיסכון שמתקבל מופנה בסופו של דבר לצריכה נוספת. בניגוד לכך, אפקט הפריבאונד מתייחס לתקופה **הקודמת** ליישום אמצעי החיסכון, ומודד את ההבדל בין הצריכה בפועל לצריכה החזויה. אין מדובר בתופעה של ממש, כמו תופעת הריבאונד - אך מאחר ולא ניתן לחסוך אנרגיה שאיננה נצרכת מלכתחילה, יש למידע הזה ערך כאשר מבצעים אומדנים של התועלת שתתקבל מיישום אמצעי מדיניות כמו שיפוץ בניינים.

## 5. המלצות להתנהגות חוסכת אנרגיה

פרק זה עסק עד כה בהיבטים תיאורטיים של קידום התנהגות חוסכת אנרגיה, באופן כללי. מטרת הפסקאות הבאות לתת מעט המלצות מעשיות לדיירים.

### 5.1 מערכות אקלום

**א. טמפרטורה מומלצת**

הטמפרטורה המומלצת בחלל הממוזג היא כ- 24-26 מעלות בקיץ, אך היא תלויה במספר גורמים:

- לחות – כאשר הלחות גבוהה יעילות מנגנון הזיעה פוחתת, ולכן בתנאי לחות גבוהה יהיה צורך לצנן את החלל יותר מאשר באוויר יבש.
- כאשר ישנה תנועה של אוויר סמוך לעור, קצב סילוק האנרגיה גבוה יותר, ולכן יש לכוון את רפפות המזגן אל האזור המאוכלס בחדר. אם תנועת האוויר אינה מורגשת, ניתן אף להיעזר במאוורר בעוצמה נמוכה (במקביל למזגן).
- חשיפה לקרינת שמש ישירה, למשל בסמוך לחלון, מגדילה את עומס החום, ולכן יש להבטיח כי התריסים ו/או אמצעי ההצללה הפנימיים מונעים חדירת קרינת שמש ישירה לאזור המאוכלס.

שינוי של הטמפרטורה במעלה אחת ביחס לערכים הנקובים למעלה משפיעה על צריכת החשמל למיזוג אוויר בשיעור של 5% בערך, ולכן יש לנקוט בכל צעדי החיסכון האפשריים לפני שינוי מצב התרמוסטט.

[199] Druckman et al, 2011

[200] Sunikka-Blank and Galvin, 2012

הטמפרטורה המומלצת בחורף, בשונה מהקיץ, היא רק 18-20 מעלות, אולם גם בעונה זו יש לגורמים אחרים השפעה על הנוחות. מאחר וכמו בקיץ, כל שינוי של מעלה עלול להביא לשינוי של כ-5% בצריכת החשמל, רצוי לשים לב גם לגורמים הבאים:

- ניתן ורצוי לחסוך בצריכת החשמל על ידי בחירת לבוש מתאים.
- כשם שהנוחות בקיץ מושפעת מקרינת השמש בסמוך לחלונות, היא תושפע ממנה גם בחורף. בשעות היום החשיפה לשמש עשויה להיות רצויה, ויכולה להביא לתחושה של נוחות גם כאשר טמפרטורת האוויר נמוכה יחסית. מאידך, הסמיכות לחלונות בשעות הלילה כרוכה בחוסר נוחות משני טעמים: האפשרות שהחלון אינו אטום, וחודרת בעדו רוח פרצים; ואיבוד החום בקרינה אל הזיגוג הקר – גם אם החלון אטום לגמרי ואין כל אינפילטרציה. ניתן להפחית את תחושת הצינה על ידי סגירת וילונות, אשר יהוו חיץ בינינו לבין הזכוכית הקרה, ויתרמו לתחושת הנוחות גם אם לא יהיה שום שינוי בטמפרטורת האוויר.

כדאי לזכור כי הטמפרטורה המופיעה על צג המזגן איננה בהכרח הטמפרטורה בחלל החדר, הן משום שמד הטמפרטורה במרבית המזגנים אינו מדויק, והן משום שישנם הבדלים בטמפרטורה בתוך החלל, והטמפרטורה סמוך למזגן עשויה להיות גבוהה או נמוכה במידה ניכרת מהטמפרטורה של האוויר סמוך אל השוהים בחדר. מומלץ לבקר את פעולת המזגן באמצעות מד טמפרטורה הקיים בשלט עצמו במרבית דגמי המזגנים, ולמקם את השלט סמוך לאזור שבו מתקיימת הפעילות בחדר. מומלץ גם להתקין בחדרים הממוזגים מדחום בעזרתו תוכלו לבדוק מה טמפרטורת החדר בפועל, באופן עצמאי, גם כאשר המזגן אינו פועל.

באמצעי חימום אחרים אין חווי טמפרטורה, אך ניתן לכוונן את מידת החימום הרצויה באמצעות התרמוסטט (אשר מאפשר לקבוע מראש את הטמפרטורה הרצויה בחדר שבו מותקן מכשיר החימום). התרמוסטט יפסיק את פעולת המכשיר כאשר הטמפרטורה תגיע לערך שנקבע מראש, והוא יופעל מחדש כאשר היא תרד מתחת לערך זה). באמצעות מתג בורר דרגות החימום (המותקן בתנורים בעלי מספר גופי חימום) אפשר להפעיל גוף חימום אחד או להפעיל בו-זמנית כמה גופי חימום, אך בחירה זו אינה משפיעה על הטמפרטורה אשר בה תיפסק פעולת החימום (אלא אם הספק החימום של גוף אחד אינו מספיק בכדי להביא את החלל לטמפרטורה הרצויה, ואז התנור יעבוד ללא הפסקה).

**ב. הפעלת אקלום רק בחלל מאוכלס**

כדאי להימנע מאקלום חדרים שאין שוהים בהם זמן ממושך, ולסגור את דלתות החדרים שאינם בשימוש. כאשר הדלתות בין חדרים פתוחות, הפרשי טמפרטורה עשויים להביא לזרימת אוויר מוגברת ביניהם, כך שגם אם נראה כאילו האקלום מתבצע בחלל קטן יחסית, בפועל יהיה מעבר אנרגיה גם לחללים אחרים. אם המזגן או התנור יידרשו לאקלם חלל קטן יותר, ניתן להגיע לחיסכון משמעותי באנרגיה.

יש להפסיק את פעולת המזגן כאשר אתם עוזבים את החדר לזמן ארוך.

**ג. שימוש במאוורר**

המאוורר אינו גורם לשינוי בטמפרטורת האוויר (אם מתעלמים ממעט החום שפולט המנוע שלו). תרומת המאוורר לנוחות התרמית מתוארת ביתר פירוט בפסקה העוסקת באוורור נוחות, אך ראוי להזכיר כאן כי מחקרים רבים מראים שמהירות אוויר של 1 מטר בשנייה יוצרת תחושת הקלה השקולה בהפחתה של 2-5 מעלות בטמפרטורה [201]. מהירות כזו מושגת בקלות באמצעות מאוורר

[201] Szokolay, 2006

תקרה, ואין צורך במהירות גבוהה יותר: הגברת המהירות עוד אינה תורמת כמעט לנוחות התרמית, אך גורמת למטרדים כגון העפת ניירות בחדר. חשוב גם לציין כי למאוורר תקרה יש יתרון ברור על פני מאוורר העומד על הרצפה או מונח על שולחן, משום שפיזור האוויר שלו במרחב טוב יותר והוא אינו מושפע כמעט מנוכחות רהיטים. ככל שקוטר הכנף של המאוורר גדול יותר, ספיקת האוויר שלו גדולה יותר עבור מהירות סיבוב נתונה. מאוורר גדול יותר יכול אפוא לפעול במהירות סיבוב נמוכה יותר, ולפיכך יהיה בדרך כלל יותר שקט ויותר חסכוני באנרגיה.

## 5.2 בקרת מצב החלונות

פתיחה או סגירה של החלונות ישנה השפעה רבה מאוד על צריכת האנרגיה בבניין – לטוב או לרע.

**א. מניעת אינפילטרציה**

תנועת אוויר מוגברת דרך החריצים בין כנף החלון או הדלת למשקוף, או בין הכנפיים עצמן, גורמת לאיבוד אנרגיה ולהגדלה של צריכת החשמל. בבנייני מגורים אין בדרך כלל צורך לספק אוויר צח בצורה מכוונת, משום שרמת האטימות של החלונות בישראל אינה גבוהה ותחלופת האוויר עקב אינפילטרציה מספיקה בהחלט לשמור על רמות תקינות של פחמן דו-חמצני ולסלק ריחות (כגון זיעה) ואדי מים. יש צורך בפתיחת החלונות בחדרי שירותים (אם אין בהם מפוח חשמלי), בחדרי רחצה (לדקות אחדות אחרי הרחצה, בכדי לסלק אדי מים מיותרים) או במטבח, כאשר ישנם ריחות בישול עזים.

**ככלל, יש לוודא שכאשר מערכת האקלום פועלת, הן לחימום והן לקירור, החלונות יהיו סגורים לגמרי.**

הערה: יש להבטיח תחלופת אוויר גבוהה גם כאשר נעשה שימוש בתנור גז לחימום החלל, משום ששריפת הגז פולטת פחמן חד-חמצני (CO), שהוא רעיל בריכוזים גבוהים ועלול אף להביא למוות. כתוצאה מזאת, שיטת חימום זו היא מאוד לא יעילה מבחינה אנרגטית!

**ב. אוורור נוחות**

ניתן להפחית מאוד את צריכת האנרגיה למיזוג אוויר בקיץ על ידי פתיחה מבוקרת של החלונות, ביחוד כאשר נושבת רוח. תנועת האוויר כנגד העור החשוף מסייעת לנידוף הזיעה, ואם טמפרטורת האוויר נמוכה מטמפרטורת העור (בערך 35 מעלות) היא מסייעת גם בצינון הגוף באמצעות סילוק עודפי חום בהסעה. עם זאת, חשוב לזכור שאם טמפרטורת האוויר בחוץ גבוהה מטמפרטורת האוויר בבניין, פתיחת החלון עלולה להביא בסופו של דבר לעלייה בטמפרטורת האוויר בבית ובהרעה בתנאים, למרות השיפור הרגעי בתחושה ברגעים שלאחר פתיחתם. לכן מומלץ לפתוח את החלונות רק כאשר ידוע כי טמפרטורת האוויר בחוץ אכן נמוכה מספיק, ואם היא אינה כזאת – להביא להיווצרות תנועת אוויר באמצעות מאוורר.

**ג. צינון מסת הבניין**

מאחר והבנייה בישראל הינה בעלת מסה תרמית גבוהה ובעלת יכולת אגירת חום טובה, ניתן להפחית את צריכת האנרגיה לצינון בקיץ על ידי פתיחת החלונות בלילה, כאשר הטמפרטורות בחוץ נמוכות. המטרה של פתיחת החלונות במקרה זה אינה לצנן את בני האדם השוהים בחדר, אלא לסלק עודפי חום אשר נאגרו במשך שעות היום. לכן מומלץ לפתוח את החלונות בשעות הלילה בכל החדרים – גם כאלה שאינם מאוכלסים, ולסגור אותם מחדש בשעות הבוקר.

הערה: אוורור לשם צינון המסה יעיל רק כאשר טמפרטורת האוויר בחוץ נמוכה מהטמפרטורה בבניין ב-2-3 מעלות לפחות. לכן יתכן כי באילת ובערבה, וכן בלילות חמים במיוחד באזור החוף, לא ניתן יהיה כמעט לצנן את מסת הבניין בקיץ. עם זאת, גם באזורים אלה ישנם חודשים ארוכים שבהם הטמפרטורות אינן כה גבוהות, והפוטנציאל לחיסכון הוא רב מאוד.

## 5.3 בקרת מצב התריסים

אחד מהמאפיינים הבולטים של הבנייה למגורים בישראל היא התקנת תריסים חיצוניים על מרבית החלונות. תרומתם של התריסים עשויה להיות חשובה ביותר, מאחר ועוצמת קרינת השמש בישראל גבוהה מאוד.

### א. חורף

בחורף, מומלץ לנצל עד כמה שאפשר את קרינת השמש לחימום הדירה. לשם כך יש לוודא כי התריסים פתוחים בכל שעות היום, ובמיוחד בין השעות 9-15 לערך, אז מתקבלים כ-90% מסך הקרינה היומית. כאשר מדובר בתריסי רפפה, מומלץ להסיט אותם לתוך כיס (אם קיים) או לפתוח אותם על צִיריהם (אם ישנם), ולא להסתפק רק בכיוון זווית הרפפות כך שתתאפשר חדירת אור פנימה, משום שגם במצב פתוח לגמרי נוצרת הפחתה של כחצי מקרינת השמש או יותר (לפי כיוון החלון). בלילה, לעומת זאת, מומלץ לסגור את התריסים לגמרי. כאשר הם במצב סגור, הם מפחיתים את מהירות הרוח סמוך לזיגוג גם אם חלל האוויר שבין החלון לתריס אינו אטום, ומפחיתים את בריחת החום מהבניין.

לעיתים קורה שקרינת השמש הישירה החודרת לבניין גורמת לסנוור או לעומס חום סמוך לחלון. על מנת ליהנות מתרומת השמש לחימום, מומלץ לתת מענה לנוחות התרמית או הוויזואלית באמצעות תריסים ונציאנים או וילונות, המסננים את קרינת השמש אחרי שכבר חדרה לפנים הבניין.

### ב. קיץ

בקרת מערכת התריסים בקיץ הוא הפוך לתפעול בחורף. כלומר: על התריסים להיות סגורים בשעות היום בכדי למנוע את התחממות הדירה עקב חדירת קרינת שמש מבעד לזיגוג, ופתוחים בלילה, בכדי לאפשר אוורור וסילוק עודפי החום שנצברו ביום. בכדי להימנע בהדלקת תאורה חשמלית בשעות היום, די בהשארת חריץ צר פתוח – כמות האור שתתקבל היא בדרך כלל מספיקה. החשיבות של סגירת התריסים גדולה במיוחד בשעות שבהן ישנה פגיעה של קרינת שמש ישירה בחזית – במזרח בבוקר ובמערב אחר הצהריים, אם כי גם קרינת שמש מפוזרת עלולה לגרום לעומס חום משמעותי אם שטח החלונות גדול.

## 5.4 מכשירי חשמל עיקריים

כל מכשירי השמל העיקריים הנמכרים היום בארץ חייבים לשאת תווית אנרגיה, ומומלץ לבדוק את הסימון כאשר מחליטים איזה דגם לרכוש. יחד עם זאת, חשוב לזכור שצריכת האנרגיה המוצגת על התווית היא צריכה אשר נמדדת בתנאים סטנדרטיים במעבדות מכון התקנים, והצריכה בפועל עלולה להיות גבוהה יותר כתוצאה משימוש לא מושכל.

### א. מקרר

המקרר הוא אחד מצרכני האנרגיה הגדולים בדירת המגורים. צריכת החשמל של מקררים ומקפיאים משתנה מאוד מסוג אחד של מכשיר למשנהו, והיא מושפעת במידה רבה משני מאפיינים – הנפח שלהם ופעולה ללא הצטברות קרח (no frost). יחד עם זאת, צריכת החשמל של המקרר מושפעת גם מרמת הבידוד התרמי בדפנות ומשכלולים במדחס, כך שמרבית המקררים החדישים יעילים יותר מאשר מקררים ישנים בנפח דומה.

גורמים נוספים המשפיעים על צריכת האנרגיה הם הטמפרטורה אליה מכוון התרמוסטט, תדירות פתיחת הדלתות ומשך הזמן שהיא פתוחה, כמות המזון המאוכסנת במקרר וכן הטמפרטורה והלחות במקום שבו הוא עומד.

**ב. מכונת הכביסה**

שלא כמו המקרר, אופן הפעלת מכונת הכביסה הוא בעל השפעה רבה מאוד על צריכת האנרגיה שלה. צריכה זו מושפעת בעיקר מטמפרטורת המים, אך גם מגורמים נוספים:

טמפרטורת המים

כביסה ב-60 מעלות במקום ב-90 מעלות חוסכת כ-25% מצריכת החשמל. לכן כשמדובר בכביסה שאינה מלוכלכת במיוחד כדאי לכבס בטמפרטורות נמוכות. את מרבית הכביסה ניתן לבצע במים פושרים, בטמפרטורה של 40 מעלות בלבד – דבר שיתבטא בחיסכון גדול אף יותר.

כמות הכביסה וקיבולת המכונה

הקיבולת של מכונה ממוצעת היא 4-6 ק״ג. כדאי להפעיל את המכונה רק בקיבולת מלאה, אך מצד שני לא לדחוס יותר מדי כדי שלא לפגוע באיכות הכביסה .

בחירת התוכנית המתאימה

חשוב לדעת שבתוכניות הכביסה המיועדות לחצי הכמות או לכמות הנשקלת אוטומטית לא משתמשים בחצי מכמות החשמל המים וחומרי הניקוי אלא ביותר מכך .לכן כדאי להשתמש בתוכניות אלה לעיתים רחוקות בלבד . חשוב לזכור - חסכוני יותר להפעיל מכונה בקיבולת מלאה מאשר להפעיל אותה פעמיים בחצי כמות הכביסה.

שטיפה מוקדמת

מומלץ להפעיל תכנית כביסה עם שטיפה מוקדמת רק לכביסה מלוכלכת במיוחד. הפעלה ללא תכנית שטיפה מוקדמת חוסכת כ-20% מצריכת החשמל.

### 5.5 צריכת חשמל של מכשירים במצב המתנה

כל מכשיר חשמלי אשר ניתן להפעילו באמצעות שלט רחוק נמצא למעשה במצב המתנה (standby), ואינו כבוי לגמרי. צריכה זו מכונה vampire power או phantom power, משום שהיא מתרחשת בלי שמודעים לה. במכשירי החשמל הישנים, היתה צריכת החשמל הזו משמעותית למדי, משום שאף שההספק לא היה גבוה מאוד, ולעיתים רחוקות עלה על 10 וואט, המכשירים צרכו חשמל ללא הפסקה כל השנה, כך שצריכת האנרגיה המצטברת היתה משמעותית. שינוי תקינה בעולם הביא להורדת צריכת האנרגיה במצב המתנה ל-1 ואט בלבד, ולמכשירים אשר יוצרו החל משנת 2013 – פחות מ-0.5 ואט. ניתן להפסיק את הפעולה של מכשירי אלקטרוניקה כגון טלוויזיה או מחשב באמצעות מתג על המכשיר, ובכך להביא לחיסכון, ומומלץ למקד את תשומת הלב דווקא במכשירים ישנים.

ראוי לשים לב גם לצריכת החשמל של מכשירים מסוימים אשר אנו מעוניינים כי יהיו בפעולה רצופה, כגון ממיר מקליט לטלוויזיה, אשר צורך כ-22-25 ואט ובחשבון שנתי צורך אנרגיה השווה כמעט לחצי מהצריכה של מקרר ביתי ממוצע.

## 6. סיכום

מרבית החוקרים מסכימים כי לעיתים קרובות שילוב של מספר אמצעים יעיל יותר מהפעלת אמצעי יחיד. ההצלחה של אחדות ממדינות העולם בבלימת העלייה בצריכת האנרגיה במגזר המגורים, ובמקרים אחדים אף להביא להפחתה, מעידים על הצורך בהפניית משאבים מתאימים להביא לשינוי בדפוסי התנהגות של צרכנים ומשקי בית.

## מקורות

[1] Abrahamse, W., Steg, L., Vlek, C. and Rothengatter, T. (2005). A review of intervention studies aimed at household energy conservation. *Journal of Environmental Psychology,* 25, 273-291.

[2] Berkhout, P., Muskens, J. and Velthuijsen, J. (2000). Defining the rebound effect. *Energy Policy*, 28, 425-432.

[3] Bowman, C. (2008). SMUD Rates Customers on Energy Consumption. The Sacramento Bee, pp. 3B.

[4] Bonino, D., Corno, F., & De Russis, L. (2012). Home energy consumption feedback: A user survey. *Energy & Buildings, 47*, 383-393. doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.017

[5] Chen, S., Li, N., Yoshino, H., Guan, J., & Levine, M. D. (2011). Statistical analyses on winter energy consumption characteristics of residential buildings in some cities of china. *Energy and Buildings, 43*(5), 1063-1070. doi:10.1016/j.enbuild.2010.09.022

[6] Ciochetti, B. and McGowan, M. (2010). Energy Efficiency improvements: do they pay? *Journal of Sustainable Real Estate*, 2(1), 305-333.

[7] Cohen, J., Pearlmutter, D., & Schwartz, M. (2010). Lifestyle and energy consumption: A comparison of four collective communities in transition. *Energy Efficiency, 3*(1), 19-31.

[8] Collins, J., Thomas, G. Willis, R. and Wilsdon, J. (2003). Carrots, sticks and sermons: influencing public behaviour for environmental goals. A Demos/Green Alliance report produced for the Department of Environment, Food and Rural Affairs (DEFRA), UK. http://www.demos.co.uk/files/CarrotsSticksSermons.pdf, accessed 1.8.2013.

[9] Crespi, J. M. and Marette, S. (2005). Eco-labelling economics: Is public involvement necessary? In: Krarup S. and Russell C. (Eds.), *Environment, information and consumer behavior* (pp. 93-110). Northampton, MA: Edward Elgar

[10] Delmas, M. and Grant L. (2010). Eco-labeling Strategies and Price Premium: The Wine Industry Puzzle, *Business and Society*. Published online March 11, 2010. DOI: 10.1177/0007650310362254

[11] Delmas, M., Montes-Sancho, M. and Shimshack, J. (2010). Information disclosure policies: Evidence from the electricity industry. *Economic Inquiry*, *48*, 483–498. doi: 10.1111/j.1465-7295.2009.00227.x

[12] de Meester, T., Marique, A., De Herde, A., & Reiter, S. (2013). Impacts of occupant behaviours on residential heating consumption for detached houses in a temperate climate in the northern part of Europe. *Energy and Buildings, 57,* 313-323. doi:10.1016/j.enbuild.2012.11.005

[13] Deuble, M. P., & de Dear, R. J. (2012). Green occupants for green buildings: The missing link? *Building and Environment, 56,* 21-27.

doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.029

[14] Druckman A., Chitnis M., Sorrell S. and Jackson T. (2011). Missing carbon reductions? Exploring rebound and backfire effects in UK households. *Energy Policy* 39, 3572–3581

[15] Faiers, A., Cook, M. and Neame, C. (2007). Towards a contemporary approach for understanding consumer behaviour in the context of domestic energy use. *Energy Policy, 35*, 4381-4390.

[16] Faruqui, A., Sergici, S., & Sharif, A. (2010). The impact of informational feedback on energy consumption—A survey of the experimental evidence. *Energy, 35*(4), 1598-1608.

[17] Galvin R. (2013). Targeting 'behavers' rather than behaviours: A 'subject-oriented' approach for reducing space heating rebound effects in low energy dwellings. *Energy and Buildings,* 67, 596–607.

[18] Greening L., Greene D. and Difiglio C. (2000). Energy efficiency and consumption - the rebound effect - a survey. *Energy Policy*, 28, 389-401.

[19] Gynther, L., Mikkonen, I. and Smits, A. (2012). Evaluation of European energy behavioural change programmes. *Energy Efficiency, 5*, 67-82.

[20] IEC (2012). *Statistical Report for 2011*, Israel Electric Corporation Ltd. (in Hebrew).

[21] Loper J., Ungar L., Weitz D. and Misuriello H. (2005). Building on Success: Policies to Reduce Energy Waste in Buildings. Alliance to Save Energy, July 2005Report. www.cee1.org/eval/db_pdf/964.pdf.

[22] Khanna, M. (2001). Non-mandatory approaches to environmental protection. *Journal of Economic Surveys*, 15(3), 291-324.

[23] Khazzoom, J.D. (1980). Economic implications of mandated efficiency in standards for household appliances. *Energy Journal*, 1(4), 21-40.

[24] Leire, C. and Thidell, A. (2005). Product-related environmental information to guide consumer purchases - A review and analysis of research on perceptions, understanding and use among Nordic consumers, *Journal of Cleaner Production*, *13*, 1061-1070.

[25] Lopes, M., Antunes, C., & Martins, N. (2012). Energy behaviours as promoters of energy efficiency: A 21st century review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16*(6), 4095-4104.

[26] Meier A., C. Aragon, T. Peffer, D. Perry and M. Pritoni (2011). Usability of residential thermostats: Preliminary investigations Building and Environment 46 (2011) 1891-1898

[27] Miller, N., Pogue, D. Saville, J. and Tu, C. (2010). The operations and management of green buildings in the United States. *Journal of Sustainable Real Estate*, 2 (1), 51-66.

[28] Newsham G., Mancini S. and Birt B. (2009), "Do LEED-certified buildings save energy? Yes, but. . .", *Energy and Buildings* 41:897-905.

[29] Nolan, J.M., Schultz, P. W., Cialdini, R.B., Goldstein, N.J. and Griskevicius, V. (2008). Normative social influence is underdetected. *Personality and Social Psychology Bulletin*, *34,* 913-923.

[30] Ouyang J. and K. Hokao (2009). Energy-saving potential by improving occupants' behaviour in urban residential sector in Hangzhou City, China, Energy and Buildings, 41(7): 711–720.

[31] Peschiera, G., & Taylor, J. E. (2012). The impact of peer network position on electricity consumption in building occupant networks utilizing energy feedback systems. *Energy and* Buildings, 49, 584–590.

[32] Rogers, E.M. (1962). Diffusion of Innovations. Free Press, New York, N.Y. 367p.

[33] Sorrell, S. Dimitropoulos J. and Sommerville M. (2011). Empirical estimates of the direct rebound effect: A review. *Energy Policy* 37, 1356-1371.

[34] Schultz P. W., Nolan J. M., Cialdini R. B., Goldstein N. J., Griskevicius V. (2007). The Constructive, Destructive, and Reconstructive Power of Social Norms. *Psychological Science*, 18(5), 429-434.

[35] Stein, J. R. (1997), Accuracy of Home Energy Rating Schemes (Report No. 40394). Berkeley, US: Lawrence Berkeley National Laboratory.

[36] Sunikka-Blank, M., & Galvin, R. (2012). Introducing the prebound effect: The gap between performance and actual energy consumption. *Building Research & Information, 40*(3), 260-273.

[37] Szokolay, S. (2006). "Energy saving by ceiling fans", Challenges for Architectural Science in Changing Climates, Proceedings of 40th Annual Conference, ANZAScA Architectural Science Association, Adelaide, Australia, Nov. 22-25 2006.

[38] Wang Z., Lu M. and Wang J. (2014). Direct rebound effect on urban residential electricity use: An empirical study in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 124–132.

[39] Williamson, T., O'Shea, S. and Menadue, V. (2001). "NATHERS: Science and non-science", Proc. Of 35th ANZAScA Conference. Osterhaus W. and McIntosh J. (Eds.) School of Architecture, Victoria University of Wellington, NZ: Australia and New Zealand Architectural Science Association.

[40] Williamson, T. (2004). Energy Efficiency Standards in Residential Buildings: A Plea for Evidence Based Policy Making. Submission to Productivity Commission Public Enquiry into Energy Efficiency, Australia.

[41] Wilson C. and H. Dowlatabadi (2007). Models of Decision Making and Residential Energy Use, *Annual Review of Environmental Resources*, 32:169–203.

[42] Yu B., Zhang J. and Fujiwara A. (2013). Evaluating the direct and indirect rebound effects in household energy consumption behavior: A case study of Beijing. *Energy Policy* 57, 441–453.

# פרק יח:

# תקינה ישראלית

מאת עדה רויטגור

# פרק יח: תקינה ישראלית

הגדרה:

*תקן הוא מסמך שבו מפורטות הדרישות המינימאליות החלות על מוצר, מלאכה או על שירות, על מנת שיתאימו לייעודם. בנוסף התקן מגדיר מונחים, שיטות בדיקה, סימון, מידות ודרישות אחרות רלוונטיות לתוכן התקן.*

## 1. כללי

### 1.1 הצורך בתקנים

התקנים משמשים כלי עזר חשוב לשמירת איכות המוצר, לביצוע מלאכות שונות החשובים לבטיחות הציבור ולבריאותו. נעזרים בהם כל הגורמים הפועלים במשק, לרבות המגזר התעשייתי, ענף הבנייה, ציבור הצרכנים, משרדי הממשלה וארגוני מסחר שונים.

תקן מיושם כאשר הגורמים הנדרשים לעמוד בדרישות אינם פועלים ללא אילוץ חיצוני, בין משום שאינם מודעים לצרכים המקבלים ביטוי בדרישות ובין שהעמידה בהן גורמת להם הוצאות נוספות או מקשה על מתן השירות או אספקת המוצר. בהקשר הזה, תקן נותן מענה לכשל שוק, אשר כתוצאה ממנו ציבור הצרכנים אינו נהנה משירות או מוצר ברמה נאותה – והתחרות בשוק החופשי אינה מתקנת מצב זה. לרוב מטרת התקן הינה להוציא מהשוק את המוצרים הנחותים ביותר.

מאחר ותקן מציב במקרים רבים דרישות אשר היצרן או נותן השירות אינו מעוניין לעמוד בהן, יש צורך במערכת בדיקה ואכיפה. בהיעדר תחרות מצד יצרנים אחרים בתחום, הצלחת תקן תלויה בהקצאת אמצעים מתאימים לאכיפה, כאשר מוטלים עונשים על אי-עמידה בתקן, וכאשר עונשים אלה הם חמורים מספיק ומרתיעים.

לתקינה יש תפקיד נוסף, חשוב לא פחות: היא מספקת מסגרת של מידע אשר מנחה את היצרן או נותן השירות ומגדירה קריטריונים אשר מאפשרים ללקוח הפוטנציאלי להשוות בין מוצרים. בהיעדר מסגרת המידע, הלקוח חסר את הכלים להשוות בין מוצרים ועלול להיות חשוף למידע מטעה. מאידך, עמידה בתקן, במיוחד כאשר מדובר בתקן לא-מחייב כגון התקן לבנייה בת-קיימה (תקן 5281), עשויה לשמש ככלי יעיל בידי קבלן או רשות מקומית המבקשים לשווק בניינים ברמה גבוהה ולמשוך קהל לקוחות הנחשב משכיל ובעל מודעות גבוהה לאיכות חיים.

### 1.2 תחומי תקינה

התקינה הישראלית מלווה את כל תחומי הפעילות במשק. התחומים העיקריים של התקינה הישראלית הם: בניין, חשמל, כימיה, מכונאות, מזון, טקסטיל ונייר, פולימרים, אלקטרוניקה, הנדסת מים, איכות הסביבה, רכב, ציוד רפואי, אריזה ושינוע, טכנולוגיית המידע ותקשורת, ניהול איכות, אנרגיה, בטיחות.

### 1.3 היחס בין תקינה ישראלית לתקינה בינלאומית

הגלובליזציה והסחר העולמי, שינו את הסביבה העסקית הבין-לאומית גם של ישראל ומשפיעים על התקינה הישראלית. ההשתלבות במסחר העולמי דורשת השתתפות של ישראל בפעילות התקינה הבין-לאומית והתאמתם של התקנים למגמות בין-לאומיות. על מנת ליישר קו עם התקינה העולמית, במקום חלק מהתקנים הישראליים המקורים אומצו תקנים של ארגוני התקנים הבין-בינלאומיים כגון ISO, IEC או תקנים אזוריים כגון BS, DIN וכו'. לעיתים התקנים מאומצים כלשונם

ולעיתים הם כוללים שינויים ותוספות ייחודיים לישראל הנובעים מתנאים סביבתיים שונים, שפה שונה, אילוצי חקיקה וכו'.

## 2. מעמדם של התקנים הישראלים

### 2.1 תקן וולונטרי

תקן ישראלי שנקבע על ידי מכון התקנים הישראלי ופורסם ברשומות הוא תקן וולונטרי לשימוש כללי במשק הישראלי.

### 2.2 תקן מחייב

תקן וולונטרי הופך למחייב על ידי אזכור בתקנות שמפרסמים משרדי ממשלה (כגון, אזכור תקנים בתקנות התכנון והבנייה של משרד הפנים), במסמכי הרשות המוסמכת (כגון רשות הכבאות וכו'), על ידי אזכורו בחוזים שבין יזמים וקבלנים, או במפרטי ביצוע של עבודות ציבוריות (לדוגמא: מפרט הבין משרדי של משרד הביטחון).

אי עמידה בדרישות התקן המחייב היא עבירה, כלומר כל תכנון, ביצוע או שימוש במערכות ובמוצרים שחלים עליהם תקנים מחייבים חייב להתאים לדרישות התקן המאוזכר.

### 2.3 תקן רשמי

משרד הכלכלה (בעבר: משרד התמ"ת) אחראי מכוח חוק התקנים על קביעת תקנים רשמיים. האחראי על אכיפת תקן רשמי הוא הממונה על התקינה במשרד הכלכלה. מוצר שחל עליו תקן שהוכרז כרשמי, אסור לייצר, לייבא, או להשתמש בו בעבודה כלשהי, אלא אם הוא מתאים לדרישות התקן הרשמי. אי התאמה לדרישות התקן מהווה עבירה.

התקנים הרשמיים מקיפים מגוון רחב של מוצרים ומגדירים היבטים חיוניים בבטיחות, באיכות, ובאמינות המוצר. הסיבות העיקריות להפיכת תקן לתקן רשמי הם:

א. שמירה על בריאות הציבור ובטיחותו

ב. הגנה על איכות הסביבה

ג. הבטחת תאימות או חליפיות של מוצרים

ד. מניעת נזק כלכלי העלול לגרום לצרכן כתוצאה משימוש במערכות, בחומרים, או במוצרים המשמשים בבניה

## 3. תהליך הכנת תקן

כפי שמוגדר בסעיף 6א' בחוק התקנים משנת תשי"ג 1953:

"המכון, והוא בלבד, רשאי לקבוע מפרט או כללים טכניים של תהליך עבודה, לרבות הגדרות טכניות כתקן ישראלי (להלן – תקן); המכון יפרסם כל תקן בדרך הנראית לו. הודעה על קביעת תקן תפורסם ברשומות."

שלבי הכנת תקנים חדשים או רביזיות לתקנים קיימים מעוגנים במסמך 'כללי התקנים'. את הכנת התקנים מרכז אגף התקינה של מכון התקנים הישראלי. לשם כך הוא מפעיל מאות ועדות ציבוריות, בהן חברים אלפי נציגים ממגזרים שונים של המשק.

כל אזרח, ארגון או מוסד בישראל רשאי ליזום הכנת תקן ישראלי חדש או שינוי תקן קיים. הפנייה למכון התקנים מתבצעת על ידי הגשת בקשה בצירוף נימוקים רלוונטיים. הבקשה מועברת לאגף

התקינה של מכון התקנים לבדיקה וקבלת אישורים. במידה והכנת התקן או הרביזיה מאושרים הנושא מועבר לטיפול בוועדות התקינה.

לוועדות התקינה יש היראַרכיה מוגדרת:

- הוועדות המרכזיות דנות באישורה (או דחייתה) של הבקשה ליזום תקן או רביזיה, ובקביעת הרכב הוועדות הטכניות השונות, בהתחשב בתחומי הפעילות של כל וועדה (תחום הנושאים וסוגי התקנים).
- הוועדות הטכניות אחראיות על תהליך הכנת התקן או רביזיה ואישורם. ברוב המקרים הוועדה הטכנית מקימה ועדות מומחים לצורך טיפול בתקן. בוועדות הטכניות ישנה נציגות למגזרי משק שונים, כגון יצרנים, צרכנים, רשויות המדינה, קבלנים, מוסדות מדע ומחקר ומעבדות בדיקה.
- ועדות המומחים אחראיות על הניסוח המפורט של התקנים. מספר החברים בוועדת מומחים מוגבל לחמישה, והוועדות כוללות בעלי מקצוע ומומחים בנושא שדנים בו. תהליך ניסוח תקן בוועדת מומחים כולל הכנת טיוטה של התקן, פרסומה להערות הציבור, דיון בהערות שמתקבלות והכנת מסמך סופי שמועבר לאישור הוועדה הטכנית.

הצעות התקן או הרביזיה מתפרסמות להערות ומתן הצעות שינוי (הערות הציבור) באתר מכון התקנים, ומופצות לאנשי מקצוע ולכל חברי הוועדות הרלוונטיות לנושא התקן. תקופת ההערות היא בין 21 עד 60 יום, ותלויה במורכבות התקן. ועדות המומחים דנות בכל ההערות שמתקבלות, אך אינן חייבות לקבל אותן ואינן חייבות לנמק את החלטותיהן.

מקצת התקנים מציגים דרישות אשר אינן משתנות לאורך זמן, אולם מרביתם טעונים עדכון תקופתי בכדי להיות רלבנטיים לנוכח הדרישות המשתנות של החברה, מצד אחד, והתפתחויות טכנולוגיות מאידך. לפיכך, כל תקן נבדק על ידי ועדת מומחים אחת לחמש שנים, גם אם במהלך התקופה שחלפה מאז אישור הגרסה הקודמת לא הגיעה למכון התקנים שום בקשה לרביזיה או הצעה לשינוי.

## 4. מבנה תקן

המבנה של תקנים בישראל מוגדר על ידי תקן ת"י 0 – 'תקן התקנים', וכולל התייחסות לנושאים הבאים:

א. פרקים קבועים:

- חלות או תחום התקן;
- ועדות תקינה שהכינו ואישרו את התקן;
- אזכורים של תקנים ומסמכים אחרים שאליהם יש הפניה בתקן;
- הגדרות למונחים שמאוזכרים בתקן.

ב. פרקים אחרים הקובעים הנחיות ברורות וחד-משמעיות לנושאים של תוכן התקן כגון: דרישות או שיטות בדיקה.

ג. ישנם נספחים נורמטיביים (כלומר נספחים מחייבים) ונספחים למידע בלבד (אשר אינם מחייבים). הנספחים עשויים לכלול טבלאות מידע, תרשימים, או כל חומר עזר אחר אשר רלוונטי לנושא התקן ודרוש על מנת להבטיח את אחידות השימוש בו.

## 5. תקינה ישראלית בתחום האנרגיה בבניינים

התקנים הראשונים שהתפרסמו בישראל לחיסכון אנרגיה בבנייני מגורים התייחסו לניצול אנרגית השמש לחימום מים לצריכה ביתית. ת"י 579 חלק 1 - מערכות סולאריות לחימום מים - התפרסם בשנת 1965 ות"י 579 חלק 4 למערכות סולאריות דירתיות ("דודי שמש") התפרסם בשנת 1982. תקנים אלה היו בסיס לתיקון תקנות התכנון והבנייה ומחייבים התקנת מערכות סולאריות לחימום מים בבנייני מגורים.

ההתייחסות הראשונה בתקינה ישראלית לנושא בידוד תרמי של בבנייני מגורים הייתה בשנת 1979 עם פרסום תקן ת"י 1045 ובו דרישות עבור רמת בידוד מינימלית של המעטפת בבנייני מגורים. מאז התקן עבר שינויים רבים. נוסף על כך נוסחו חלקים עם דרישות בידוד עבור בנייני משרדים בתי חולים, מוסדות חינוך ובתי מלון. סדרת התקנים ת"י 1045 (למעט התקן לבתי מלון) מאוזכרת בחוק התכנון והבניה, מה שהופך את התקנים ל- 'תקנים מחייבים'.

בשנים האחרונות חלה במדינות רבות עלייה משמעותית במודעות לצורך בהתמודדות עם שינויי האקלים הגלובליים, אשר בעקבותיה הוכנו תקנים רבים להתייעלות ולחיסכון אנרגיה, עם דגש מיוחד לבנייני מגורים. גם בישראל הייתה בעשור האחרון פעילות רבה בהכנת תקנים בתחומים שונים לחסכון אנרגיה, ניצול משאבי טבע ושמירה על הסביבה. חלק מהתקנים מאמצים תקינה זרה עם התאמות לאזור האקלימי, חוקי בנייה ושיטות בנייה בישראל, וחלקם הם תקנים מקוריים.

### 5.1 ת"י 1045 חלק 1 - בידוד תרמי של בניינים: בתי מגורים

**מטרת התקן**

תקן ת"י 1045 חלק 1 קובע דרישות מינימליות לבידוד תרמי של המעטפת החיצונית בבנייני מגורים, כגון: קירות, גגות, רצפות ומערכות זיגוג.

**מעמד התקן**

התקן מחייב על ידי אזכור בתקנות התכנון והבנייה, היתר 2 / 5.39.

**תאור התקן**

התקן ת"י 1045 חלק 1 הוא חלק מסדרת התקנים ת"י 1045 שחל על בידוד תרמי של בניינים (כגון: בנייני מגורים, משרדים, מוסדות חנוך, בתי מלון ובתי חולים) וסיווג יישובי ישראל לפי אזורי אקלים.

בתקן ת"י 1045 חלק 0 של הסדרה מפורטות ההגדרות של כל הפרמטרים אשר עבורם נקבעות דרישות, מוצגים נושאים כלליים הקשורים לדרישות וניתן מידע כללי על חומרי בנייה ושיטות חישוב.

בתקן ת"י 1045 חלק 10 של הסדרה מוצגת רשימת יישובי הארץ המסווגים לאזורי - האקלים השונים לפי ניתוח נתונים אקלימיים רב שנתיים של תחנות מטאורולוגיות ולפי הניסיון והידע האקלימי שהצטברו בשירות המטאורולוגי בישראל

דרישות התקן ת"י 1045 חלק 1 חלים, נוסף על בנייני מגורים, גם על בבניינים אחרים שייעודם דומה, המשמשים לשהות ממושכת הכוללת לינת לילה, כגון: בתי אבות ,בתי הארחה, מלונות דירות, דיור מוגן, מעונות פנימיות, ומוסדות לאסירים.

התקן קובע דרישות עבור בניינים הבנויים בבנייה קלה ובבנייה שאינה קלה.

הדרישות המפורטות בתקן בהתאם לאזור אקלימי בו יבנה הבניין והן עבור הפרמטרים כלהלן:

- ההתנגדות התרמית האופיינית המינימלית של אלמנטי המעטפת החיצונית של הבניין, כגון: קירות חוץ, גגות ורצפות;

- ההעברות התרמית הנפחית המקסימלית של דירה;
- מקדם רווח החום הסולארי המקסימלי של מערכת זיגוג של הבניין.

## 5.2 ת"י 5068 - מערכות זיגוג בבניינים-סימון בתווית אנרגיה

**מטרת התקן**

התקן קובע תווית אנרגיה לצורך סימון של תכונות תרמיות ואופטיות של מערכת זיגוג, כגון חלונות, דלתות זכוכית, קירות מסך ופתחי תאורה אחרים, המיועדת להתקנות בבניינים.

**מעמד התקן**

תקן 5068 הוא תקן וולונטרי.

הערה: אין אמנם דרישה לסימון מערכות זיגוג המותקנות בבניינים, כפי שמפרט התקן, אך חישוב תכונותיהם נדרש בתקנים אחרים כגון 5280, 5281 ו-5282. כאשר יישום אחד התקנים האלה נדרש, על פי תקנות הבנייה או מתוקף סמכותה של רשות מקומית – הופכים גם החישובים לפי תקן זה למחייבים.

**תיאור התקן**

התווית כוללת סימון של ערכי תכונות תרמיות ואופטיות כלהלן:

- העברות תרמית כוללת
- מקדם רווח חום סולארי
- העברות אור נראה
- חדירת אוויר

בתקן מתוארות שיטות לקביעת הערכים וסימון שלהם על גבי תווית אחידה המאפשרת לבחון את המבחר הגדול של מערכות זיגוג ולבחור את המתאימה להתקנה בבניין.

הערכים נקבעים עבור מערכת זיגוג כמכלול על כל רכיביה, כגון יחידת זיגוג, מסגרת וסוג הצללה.

התקן ת"י 5068 מאוזכר בתקנים ת"י 1045, ת"י 5281 ות"י 5282 הקובעים דרישות של ערכי תכונות תרמיות של מערכת זיגוג במעטפת החיצונית של בניינים.

## 5.3 ת"י 5280 חלק 1.1 – אנרגיה בבניינים: מעטפת הבניין – בנייני מגורים

**מטרת התקן**

התקן הוא חלק מסדרת התקנים הדנים תפקוד אנרגטי של בניינים לפי אזור האקלים שהבניין נמצא בו. החלקים האחרים ידונו במערכות בניין צורכות אנרגיה, כגון מערכות תאורה, אקלום או חשמל.

התקן קובע דרישות תכנון לרמה המחייבת של תפקוד האנרגטי של בנייני מגורים בישראל.

**מעמד התקן**

התקן מיועד להיות תקן מחייב במסגרת קוד הבנייה.

**תיאור התקן**

בתקן מפורטות דרישות תכנון למטרות חיסכון באנרגיה ושיטות חישוב עבור נושאים כלהלן:

- מעטפת הבניין ואטימותה
- תכונות, הצללת ואטימות מערכות הזיגוג
- הבטחת אוורור טבעי

בתקן קיימת בחירה בין שתי שיטות תכנון אנרגטי של הבניין המגורים: המסלול המרשמי והמסלול התפקודי.

לצורך תכנון התפקוד האנרגטי של הבניין במסלול המרשמי נקבעים דרישות עבור המאפיינים של אלמנטי המעטפת שלו כלהלן:

- גורם הקומפקטיות
- הפסדים ליחידת שטח
- שטח מרבי של מערכת הזיגוג
- הגנת מערכת הזיגוג מפני קרינת השמש

במסלול התפקודי התכנון מבוסס על השוועה בין צריכת האנרגיה השנתית המחושבת של יחידת התכנון לבין צריכת האנרגיה השנתית המחושבת של יחידת ייחוס.

השיטה מאפשרת גמישות רבה יותר בבחירת פתרונות תכנון עבור בנייני מגורים.

## 5.4 ת"י 5281 חלק 2 - בנייה בת-קיימה (בנייה ירוקה): דרישות לבנייני מגורים

**מטרת התקן**

התקן הוא חלק מסדרת התקנים ת"י 5281 - בנייה בת-קיימה (בנייה ירוקה) שחל על קביעת אחת מ-5 דירוגים והתעדה של בנייני מגורים כבניין בני- קיימה, לצורך מתן "תו ירוק".

**מעמד התקן**

תקן 5281 הוא תקן וולונטרי – אך רשויות מקומיות מסוימות דורשות כי כל הבנייה החדשה בתחומן תעמוד בדרישות תקן זה, לפחות ברמה הבסיסית.

**תיאור התקן**

תקן ת"י 5281 חלק 1 הוא חלק כללי של הסדרה המפרט את שני שלבי הערכה של בניינים בני-קיימה:

שלב א - הערכה של תכנון הבניין וסביבתו בתחום הנכס על ידי בדיקת תכניות עבודה ומפרטים טכניים של הבנייה. בשלב זה (שנערך לפני התחלת הבנייה באתר) נקבע דירוג זמני של הבניין.

שלב ב - הערכה של הבניין הגמור, שמטרתה לאשר את הדירוג שנקבע בשלב א, ז.א. לאשר שעבודות הבנייה והפיתוח בוצעו לפי התכנון וקביעת הדירוג הסופי של הבניין.

פרויקטים הניתנים להערכה הם פרויקטי לבנייה חדשה וגם פרויקטים של שיפוץ בנייה קיימת.

הדירוג לפי התקן יעשה אך ורק לבניינים העומדים בכל דרישות הנקובות בחוק התכנון והבנייה, על תקנותיו, ובתקנות אחרות שבתוקף.

תקן ת"י 5281 חלק 2 קובע את פירוט המאפיינים שלפיהם נקבע דירוג של בנייני מגורים בני- קיימה ובניינים אחרים עם יעוד דומה כמפורט בתקן.

התקן דן אך ורק בבניינים ו/או דירות ששטחם השימושי גדול מ-60 מ"ר.

המאפיינים העיקריים עבורם נקבע הניקוד לצורך דירוג הבניינים הם: אנרגיה, קרקע, מים, חומרים, בראות ורווחה, פסולת, תחבורה, ניהול אתר בנייה וחדשנות.

הדירוג של הבניינים נקבע על ידי צבירת ניקוד עבור המאפיינים הרבים המתוכננים בבניין.

## 5.5 ת"י 5282 חלק 1 - דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה: בנייני מגורים

**מטרת התקן**

התקן דן בשיטות לדירוג יחידות דיור בבנייני מגורים ולדירוג בניין מגורים כולו לפי צריכת האנרגיה הנדרשת לאקלום יחידת דיור בהתאם לאזורי אקלים בארץ בו נבנה הבניין (על פי המפורט בת"י 1045 חלק 10 - בידוד תרמי של בניינים: סיווג יישובים לפי אזורי אקלים).

**מעמד התקן**

תקן 5282 על כל חלקיו הוא תקן וולונטרי.

הערה:

הדרוג על פי תקן זה מהווה חלק מהדרישות לעמידה בתקן 5281 (התקן לבנייה בת קיימה), אשר אמנם נוסח כתקן וולונטרי אך נדרש על ידי רשויות מקומיות מסוימות בארץ. לכן, בפועל עשויה להתקיים דרישה לדירוג על פי תקן זה.

**תאור התקן**

ככל שצריכת האנרגיה המחושבת הנדרשת לאקלום יחידת דיור קטנה יותר, הדירוג האנרגטי של יחידת דיור ושל הבניין גבוה יותר.

לפי תקן זה ניתן לדרג לפי צריכת אנרגיה גם דירות ובניינים קיימים.

מדרגים את הדירות ואת הבניינים לפי 6 דרגות, כאשר הנמוכה היא "דרגה בסיסית".

מדרגים את יחידת הדיור ואת בניין המגורים לפי אחת משתי שיטות המפורטות בתקן: השיטה המרשמית או השיטה התפקודית.

### השיטה המרשמית

דירוג אנרגטי של יחידת דיור לפי השיטה המרשמית נקבע בהתאם להתאמת הדירה או הבניין למאפיינים המשפיעים על צריכת האנרגיה לאקלום ולתאורה כלהלן:

- אלמנטי מעטפת החיצונית של הדירה (כגון: מוליכות תרמית כוללת של קיר חוץ, גג, רצפה, גון המעטפת ומסה תרמית של קיר חוץ);
- מערכת זיגוג של הדירה (כגון: שטח הזיגוג באחוזים משטח רצפת, סוג הזיגוג, סוג הצללה, חדירת אוויר);
- מערכת לבקרת תאורה;
- אוורור לילה.

### השיטה התפקודית

דירוג יחידת דיור לפי השיטה התפקודית ייקבע בהתאם לשיפור באחוזים בצריכת האנרגיה שהושג ביחידת דיור הנבדקת ביחס לדירת הייחוס .

החישובים של צריכת האנרגיה השנתית הצפויה לבניין המתוכנן ולבניין הייחוס יהיו עבור שנה אקלימית שהיא טיפוסית למקום שהבניין נמצא בו וחושבו באמצעות מודל הדמיה (סימולציה) דינמי שעתי המאושרת בתקן.

יח

## 5.6 תקנים החלים על ציוד ומערכות

באתר מכון התקנים www.sii.org.il מתפרסם קטלוג תקנים ישראליים בתחום "אנרגיה והתייעלות אנרגטית". להלן תקנים אחדים הנוגעים לבנייני מגורים:

א. תקנים המתייחסים למערכות לייצור חשמל ממקורות אנרגיה מתחדשים כגון:
- ת"י 62548 - עבור תכן מערכות פוטו-וולטאיות (PV)
- ת"י 61400 חלק 2 - החל על טורבינות רוח קטנות
- סדרת התקנים ת"י 4777 - החלים על דרישות בנוגע לחיבור מערכות אנרגיה לרשת החשמל.

ב. תקנים של מכשירי חשמל לשימוש ביתי עם דרישות לתווית דירוג אנרגטי (מידע על צריכת האנרגיה) עבור מכשירים כלהלן:
- ת"י 721 למקררים ומקפאים
- ת"י 900 חלק 2.5 למדיחי כלים
- ת"י 900 חלק 2.6 לכיריים, תנורי אפייה וכו'
- ת"י 900 חלק 2.7 למכונות כביסה
- ת"י 900 חלק 2.11 למייבשי כביסה
- ת"י 907 למכשירי גז לאפייה ולבישול
- ת"י 994 חלק 1 למזגני אוויר

## פרק יט:

# סימולציה תרמית של בניינים

מאת ערן קפטן

# פרק יט: סימולציה תרמית של בניינים

*"And yet I have constructed in my mind a model city from which all cities can be deduced," Kublai said. "It contains everything corresponding to the norm. Since the cities that exist diverge in varying degree from the norm, I need only foresee the exceptions to the norm and calculate the most probable combinations."*

*Italo Calvino, "Invisible Cities"*

## 1. עקרונות ההדמיה התרמית הממוחשבת של בניינים

### 1.1 מהי הדמיה תרמית

הדמיה אדריכלית ממוחשבת מאפשרת לבחון את מאפייני הבניין בהתאם לתוכניות האדריכל טרם בנייתו. הדמיה שכיחה מאפשרת להדגים כיצד יראה הבניין בתהליך המכונה Render. מפעיל התוכנה נדרש להזין מגוון נתונים הקשורים למראה הבניין, כגון מידות, חומרי בניה, וצבעים, וכן נתונים הקשורים למקור האור (מלאכותי או/ו טבעי). נתונים אלו מכונים קלט (Input). התוכנה מפעילה נוסחאות מתמטיות בכדי לחזות את מראה הבניין, ומספקת נתונים המאפשרים להציג תמונה ממוחשבת מלאכותית. נתונים אלו מכונים פלט (Output). באופן דומה, ישנן תוכנות אשר השימוש בהן פחות שכיח ואשר מאפשרות לחזות גם את תפקוד הבניין במגוון תחומים שונים, כגון עמידות שלד הבניין בעומסים, אקוסטיקה, מאור מלאכותי וטבעי, והיבטים תרמיים/אנרגטיים.

הדמיה תרמית ממוחשבת (המכונה לעיתים הדמיה אנרגטית) מאפשרת להעריך את התפקוד התרמי/אנרגטי של בניינים עוד בשלב התכנון, ובכך לספק כלים לשכלול התכנון להשגת תפקוד משופר. מפעיל התוכנה נדרש להזין מגוון נתונים הקשורים לתפקוד התרמי, כגון גיאומטריית הבניין ופתחיו, כיוון החזיתות והפתחים, חומרי הבניין, נתונים אקלימים, מאפייני מערכות המיזוג, ומאפייני הפעילות בבניין. ההדמיה הממוחשבת מפעילה מספר נוסחאות מורכבות להערכת התפקוד התרמי/אנרגטי בשעה ספציפית או לאורך תקופה (כגון שנה).

אף כי היה רצוי כי ניתן יהיה להשתמש בתוכנה אחת לבחון את תפקוד הבניין במספר תחומים, בהסתמך על בסיס נתונים אחד, תוכנה כזאת עדיין לא קיימת. בשנים האחרונות מושקע מאמץ רב בפיתוח מערכת ממוחשבת המכונה BIM (Building Information Modeling). מערכת זאת אמורה לאפשר שימוש במודל ממוחשב אחד הכולל את כל נתוני הבניין הרלוונטיים לתכנון האדריכלי ולביצוע מגוון ההדמיות. בכך היא אמורה לצמצם את הכפילות הנוצרת בעת בניית מודלים לצרכים שונים, להנגיש את המידע לכל צוות התכנון, ולאפשר בדיקת התאמה בין התוכניות השונות. בפועל, תוכנות BIM, כגון Autodesk ® Revit ® (Autodesk), מבצעות רק חלק מההדמיות, ומאפשרות יצוא נתונים למספר תוכנות ייעודיות (לשם ביצוע הדמיות אחרות). כיום, רוב ההדמיות התרמיות/אנרגטיות עדיין אינן מתבצעות בתוכנות BIM, אלא בתוכנות ייעודיות, כגון תוכנתEnergyPlus (EERE, 2013).

למעשה, תכנון תרמי/אנרגטי בסיסי ניתן לערוך באמצעות חישובים תרמיים פשוטים למדי, כגון אלה המפורטים בתקן הישראלי לבידוד תרמי של בניינים – ת"י 1045. אולם השימוש בהדמיה תרמית/אנרגטית ממוחשבת מאפשר מענה מיטבי לבעיות תכנוניות מורכבות ולתנאים סביבתיים מגוונים: מכיוון שפתחי בניין הפונים לכיווני שמיים שונים חשופים באופן שונה לקרינת השמש,

תכנון אופטימאלי של פתחי בניין דורש בדרך כלל פתרון ייחודי, אותו ניתן לשכלל באמצעות הדמיות. בנוסף, הדמיות תרמיות/אנרגטיות ממוחשבות נדרשות לשם הוכחת עמידה בתקני בנייה וקיימות, כגון התקן הישראלי לדירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה – ת"י 5282 (במסלול התפקודי) או פרק האנרגיה בתקן הבנייה הירוקה האמריקאי – LEED (USGBC, 2013).

באמצעות הדמיות תרמיות/אנרגטיות ניתן להשיג מספר מטרות חשובות, כגון צמצום העומס על מערכות המיזוג. צמצום העומס מביא לא רק להפחתת צריכת האנרגיה של הבניין ותמיכה בקיימות הגלובלית, אלא גם חיסכון כלכלי. שימוש מושכל בהדמיות יכול גם לתמוך בתכנון אסטרטגיות פסיביות לקירור וחימום חלל המבנה, המאפשרים צמצום נוסף בצריכת האנרגיה של הבניין. ההדמיות מאפשרות גם תכנון המביא לנוחות תרמית משופרת, ולהשגת סביבת עבודה ומחייה פרודוקטיבית, נעימה, ובריאה.

## 1.2 מידע הניתן לחישוב באמצעות הדמיה תרמית (פלט - Output)

הדמיה תרמית/אנרגטית מאפשרת לחשב מגוון רב של מידע. המידע משמש בעיקר (אך לא רק) להערכת נוחות אקלימית, רווח והפסד חום, צריכת אנרגיה, גודל מערכות מיזוג, וזמן החזר השקעה.

**א. הערכת נוחות תרמית**

מרבית תוכנות ההדמיה התרמית/אנרגטית מספקות חיזוי של תנאי אקלים הפנים באזורים השונים בבניין בשעות שונות ולאורך השנה. תנאי האקלים הבסיסיים הנדרשים לשם חישוב מידת הנוחות התרמית הינם טמפרטורת האוויר, לחות יחסית, מהירות זרימת האוויר, וקרינת חום (מהשמש, ממכשירים חמים, ומהבניין עצמו, לרבות קירות, חלונות רצפה, תקרה וריהוט). קרינת החום מבוטאת בדרך כלל באמצעות הטמפרטורה הקורנת הממוצעת (Mean Radiant Temperature - MRT). בנוסף לאלו, לאופי הלבוש ולרמת הפעילות הגופנית השפעה ניכרת על מידת הנוחות התרמית. תנאי האקלים באזורים השונים בבניין מגוונים, במיוחד עקב אי-אחידות בחדירת קרינת שמש לחלקי הבניין השונים. לפיכך, הנוחות התרמית תלויה במיקום בבניין, ולעיתים נדרשת הערכה נפרדת עבור כמה אזורים אופייניים, כגון בעומק החלל או בקרבת החלון, תוך התחשבות בהפנייתם של החלונות לכיווני השמים השונים. הערכת הנוחות האקלימית מתבצעת על סמך תוצאות ההדמיה של תנאי האקלים בבניין באמצעות מודלים שונים של נוחות תרמית. מידת הנוחות התרמית משתנה לאורך שעות היום ולאורך השנה, ולפיכך מדד זה מספק הערכה לרגע נתון. בכדי להעריך את מידת הנוחות במשך תקופה (כגון במהלך כל השנה) ניתן לארגן טבלת נוחות אקלימית, הכוללת ממוצעים לכל שעה בכל חודשי השנה; או לחלופין לחשב את אחוז שעות התקופה הרלוונטיות (כגון שעות היום או שעות העבודה) בהן מתקיימת נוחות תרמית. מכיוון שתפקיד מערכות המיזוג (קירור וחימום) לספק נוחות תרמית, הערכת תנאי הנוחות בבניין מתבצעת לרוב ללא שימוש במערכות מיזוג, ומהווה מדד ליעילות מעטפת הבניין לספק נוחות תרמית ללא עזרה מכנית. כאשר נמצא כי בשעות רבות צפויה נוחות תרמית, או שאי-הנוחות הצפויה היא מזערית, ניתן להסיק כי מעטפת הבניין מתפקדת היטב, ולפיכך העומס הצפוי על מערכות המיזוג יהיה מצומצם.

**ב. הערכת רווח חום והפסד חום**

רווח חום והפסד חום דרך מעטפת הבניין הם ביטוי לסך כל האנרגיה העוברת דרך קירות, חלונות, גג, ורצפה - ולפיכך מהווים מדדים לתפקוד התרמי/אנרגטי של מעטפת הבניין. מעבר האנרגיה מתבצע כלפי חוץ כאשר חלל הבניין חם מהסביבה החיצונית (לרוב במשך היום בעונת החורף, ובלילות במרבית ימי השנה), וכלפי פנים כאשר הסביבה החיצונית חמה מחלל הבניין (לרוב במשך היום בעונה החמה ובחלק מימי עונות המעבר). כפי שתואר בפרק ג', מעבר האנרגיה דרך מעטפת הבניין מתבצע באמצעות הולכה (conduction), הסעה (convection) וקרינה (radiation). לעיתים קורה שמעבר האנרגיה מתבצע בו זמנית בשני הכיוונים בחלקי מעטפת שונים. למשל: בימי החורף, כאשר הסביבה החיצונית קרה מחלל הבניין, הוא מאבד אנרגיה בהולכה דרך הקירות ובהסתננות

אוויר, בעוד קרני השמש חודרות דרך הזיגוג לחלל הבניין ותורמות לחימומו. כאשר האנרגיה הנכנסת רבה מהאנרגיה היוצאת, מתקיים 'רווח חום', וכאשר מתקיים המצב ההפוך ישנו 'הפסד חום'. ערכו של מדד זה עשוי להשתנות בכל אחת משעות היום בימות השנה, ולפיכך יש צורך בטבלת ממוצעים שעתיים לכל חודש אשר תספק מידע חיוני לגבי תפקוד מעטפת הבניין במהלך השנה. בנוסף, ניתן לחשב את רווח החום הכולל לאורך התקופה החמה (להערכת עומס החום), ואת הפסד החום הכולל במהלך התקופה הקרה (להערכת הפסדי החום בעונה הקרה). רצוי לחשב רווח והפסד חום באמצעות הדמיית סביבה פנימית מאוקלמת (על ידי מערכות מיזוג) בכדי לתת ביטוי נאמן להפרש הטמפרטורות בפועל בין חלל הבניין והסביבה החיצונית, אם כי ניתן גם לקבל אומדן מדויק פחות לרווח והפסד חום גם כאשר עורכים הדמיה ללא התחשבות במערכות מיזוג. חשוב לשים לב כי בתוכנות הדמיה אחדות (כגון תוכנת EnergyPlus) רווח והפסד חום מחושב בנפרד לאלמנטים בבניין (כגון קירות, חלונות, וכד'), וכי רווח והפסד חום מהסתננות אוויר ואוורור טבעי או מאולץ מקבלים ביטוי נפרד.

**ג. הערכת צריכת אנרגיה**

הערכת צריכת האנרגיה של הבניין באופן כללי מבוססת על רווח והפסד חום של מעטפת הבניין, רווח והפסד חום כתוצאה מהסתננות אוויר ואוורור (טבעי או מאולץ), חום הנפלט ממקורות פנימיים בבניין (כגון תאורה, מכשירים אלקטרוניים, ואנשים), אגירת חום (במסה תרמית), ויעילות מערכות הבניין (כגון מערכות קירור, חימום, אוורור מאולץ, ותאורה מלאכותית). צריכת האנרגיה של הבניין הכוללת צריכת אנרגיה לחימום וקירור מהווה מדד משולב לתפקוד התרמי/אנרגטי של הבניין וליעילות המערכות. במידה ומעוניינים לבחון את היעילות התרמית/אנרגטית של הבניין בלבד (ללא השפעת יעילות המערכות) ניתן להגדיר בחלק מכלי ההדמיה מערכת תיאורטית הנקראת "מערכת אוויר אידיאלית" (Ideal Air System). מערכת זו מחשבת עומסים אנרגטיים לקירור וחימום, ללא התחשבות במאפייני מערכות המיזוג.

לעומת זאת, תקנים מסוימים, כגון תקן הבניה הירוקה האמריקאי LEED, דורשים הגדרה מדויקת של מערכות הבניין, לרבות מערכות המיזוג. באופן זה ניתן לקבל הערכה מדויקת יותר לצריכת האנרגיה הכוללת של הבניין, אולם דגש רב מדי על דרישת האנרגיה הכוללת עלול להקשות על אבחנה בין בניין עם מעטפת אשר אינה מתפקדת היטב אך בעל מערכות יעילות במיוחד, לבין בניין עם מעטפת יעילה אך מערכות בינוניות. הדירוג בשני המקרים עשוי להיות דומה, אך בעוד שאורך החיים של המערכות קצר בדרך כלל מחיי מעטפת הבניין, וקל יותר לשדרג אותן, שגיאות בתכנון המעטפת ילוו את הבניין לכל אורך חייו.

צריכת האנרגיה של מערכות האוורור המאולץ נובעת לעיתים תכופות מדרישות תחלופת אוויר צח, ובמקרים אחרים לשם סילוק עודפי חום (כחלק מאסטרטגיה חצי-פסיבית לקירור). בארץ, צריכת האנרגיה לאוורור מאולץ בדרך כלל קטנה באופן משמעותי מזאת הנדרשת לקירור.

את נתוני צריכת האנרגיה של בניין אפשר להציג במספר מדדים: אם מחלקים את צריכת האנרגיה השנתית הכוללת לשטח הרצפה, מקבלים מדד נוח להשוואה עם בניין יחוס או בין חלופות תכנוניות שונות; פילוג הצריכה הכללית לצריכת אנרגיה לקירור, חימום, אוורור, ותאורה מאפשר ללמוד יותר על אופן תפקוד הבניין; פילוג הצריכה בהתאם למקור האנרגיה (כגון חשמל, גז, וכד') מאפשר לחשב את עלות האנרגיה ומדד פליטת חמצן דו-פחמני לאוויר; ובדיקה של הספקי השיא הנדרשים לחימום ולקירור תשמש לאפיון ציוד המיזוג.

**ד. הערכת גודל מערכות מיזוג**

בעוד שמדד צריכת האנרגיה השנתית מאפשר בחינת התפקוד התרמי/אנרגטי של מעטפת הבניין, הוא אינו מהווה בסיס לקביעת גודל מערכות הקירור והחימום. לשם כך מתכנן המיזוג לוקח בחשבון תנאי אקלים קיצוניים ומרווחי ביטחון. אף על פי שלגודל מערכות המיזוג השפעה על עלות הבניין ולעיתים גם על היעילות האנרגטית, ומכיוון שמתכנן המיזוג מכיר היטב את תכנון מערכות

המיזוג ונושא באחריות המקצועית על מיזוג מספק של הבניין, רצוי כי מתכנן המיזוג יהיה זה שיקבע את גודל מערכות המיזוג, ולא עורך ההדמיה התרמית/אנרגטית (אם עורך ההדמיה אינו מתכנן המיזוג בעצמו). מצב הפוך, שבו עורך ההדמיה התרמית הינו גם מתכנן המיזוג אף הוא אינו אידיאלי, משום שההדמיה התרמית/אנרגטית עוסקת גם במאפיינים שונים של מעטפת הבניין (לרבות קירות, זכוכית, ועוד..) - תחומים אשר לרוב אינם שייכים לתחום התמחותו של מתכנן המיזוג. יתכן והפתרון לבעיה הוא הדמיה משותפת. לדוגמא, תוכנת EnergyPlus כוללת קטגוריות נפרדות עבור מערכות המיזוג, ובכך מקלה על עריכת הדמיה משותפת לכמה אנשי מקצוע. יתרה מכך, השימוש המוגבר בתוכנות ה-BIM, הצפוי בעתיד הקרוב, מרמז על שיתופי פעולה מקצועיים, מכיוון שאלו מתוכננות לאפשר למתכננים שונים עבודה על מודל משותף.

**מגבלות הדמיה והיתרון בבדיקה השוואתית**

באופן תיאורטי, ככל שנפרט את המודל, ונקפיד להכניס נתונים מדויקים ונאמנים למציאות, אנו אמורים לקבל באמצעות ההדמיה תוצאות נכונות יותר. אולם, ההדמיה מורכבת מנוסחאות מתמטיות אשר נועדו לדמות מציאות פיזיקאלית מורכבת. נוסחאות אלו נכתבו בהסתמך על הידע העדכני בתחומים שונים, ובעזרת הפשטה (בכדי להפחית בסרבול הקוד, לצמצם את זמן הכתיבה, ולצמצם את הזמן הנדרש להרצת הדמיה). לכן, כאשר אנו משווים תוצאות הדמיה של אותו בניין במספר תוכנות הדמיה שונות, התוצאות אינן בהכרח אחידות, וסטייה של כ- 5%-10% (Neymark & Judkoff, 2008) היא אפשרית בהחלט, גם כאשר מדובר בתוכנות הנחשבות מדויקות ומהימנות. הסטייה משתנה בהתאם לאופי הבניין, ובמקרים חריגים אף עלולה להיות גבוהה בהרבה. משמעות הדיוק המוגבל של ההדמיה היא כי רצוי להיזהר בקביעת גודל המערכות בהסתמך על תוצאות ההדמיה בלבד, ויש לקחת מרווחי ביטחון סבירים.

חשוב לזכור גם שהניסיון מלמד שצריכת האנרגיה של בניינים בפועל גבוהה במקרים רבים באופן ניכר מתוצאות ההדמיה. תופעה זאת, הזוכה כעת להתייחסות רבה, מכונה Performance Gap. יתכן מאד כי תופעה זאת אינה פועל יוצא של יכולת דיוק מוגבלת של ההדמיות, אלא בעיקר עקב של דפוסי הפעלה שונים של הבניין ביחס להנחות אשר שימשו בהדמיה.

כך או אחרת, הדיוק המוגבל של ההדמיות אינו סיבה להפחית בערכן. ההדמיות מאפשרות בדרך כלל בחינה השוואתית טובה בין חלופות תכנוניות שונות ובחירת החלופה המיטבית (הן בשלבי התכנון הראשוניים והן בשלבי התכנון המפורטים). כאשר מבצעים בדיקה השוואתית דיוק ההדמיה מאבד מעט מחשיבותו, מכיוון שהבדיקה בוחנת בדרך כלל משתנים בודדים, בעוד ששאר מאפייני הבניין המתוכנן זהים (למשל: השפעת גודל החלונות בכיוונים שונים וסוגי הזיגוג המותקנים בהם).

## 1.3 מידע הנחוץ להדמיה תרמית (קלט – Input)

על מנת לבצע הדמיה תרמית, יש צורך בתיאור הבניין עצמו, לרבות המעטפת שלו, מערכותיו ודפוסי האכלוס שלו; בתיאור הסביבה, לרבות השפעתם של בניינים שכנים; ובתיאור המיקום הגיאוגרפי והאקלים. בנוסף לכך, מאפשרות חלק מהתוכנות למתכנן גמישות מסוימת בנוגע לאופן החישוב ולסוג הפלט הנדרש.

**א. נתוני אקלים**

בכדי לבצע הדמיה תרמית, הגדרות ההדמיה כוללות הפניה לקובץ אקלימי בפורמט מתאים. לדוגמא, בתוכנת EnergyPlus נדרש קובץ בפורמט ייחודי לתוכנה (EnergyPlus weather - EPW file). קובץ אקלימי זה מבוסס על נתוני שנה מטאורולוגית אופיינית ( Typical Meteorological

Year - TMY). הקובץ כולל נתונים אקלימים במגוון תחומים לכל שעות השנה, ומבוסס בד"כ על מדידות רשמיות. בשלב זה, בישראל קיימים קבצים (רשמיים) עבור ארבעה ישובים בלבד: בית דגן, באר שבע, ירושלים, ואילת.

אחדות מהתוכנות מאפשרות גם לערוך הדמיה על בסיס נתוני יום-תכנון (Design-Day), על מנת לאפשר הערכה של הספק מערכות האקלום במצבי קיצון.

**ב. מבנה הבניין**

נתוני מבנה הבניין מוגדרים באמצעות מספר קטגוריות: תכונות תרמיות של חומרי הבנייה השונים, הרכב האלמנטים בבניין (סדר ועובי החומרים), גיאומטריית האלמנטים בבניין ומיקומם (הנקבע באמצעות ממשק גרפי או באמצעות קואורדינאטות נקודות הקצה של כל אלמנט), וחלוקת הבניין לאזורים תרמיים (ולאופי הקשרים התרמיים ביניהם). פתחי הבניין כוללים גם הגדרות של הפעלת אמצעי הצללה, וניתן לשייך להם הגדרות אוורור טבעי. בתוכנת EnergyPlus, למשל, הקשר בין הקטגוריות השונות נערך בהגדרת האלמנטים בבניין: כל אלמנט בבניין משויך לאזור תרמי מסוים, כולל הגדרת הגיאומטריה והמיקום, ומפנה להרכב מסוים של חומרי הבניה (מתוך רשימת הגדרות ההרכבים, כאשר כל חומר ברשימת ההרכבים מאופיין באמצעות רשימת הגדרות חומרי הבניין).

**ג. הסתננות אוויר ואוורור טבעי ומאולץ**

הסתננות אוויר הינה מעבר בלתי מבוקר של אוויר דרך סדקים בחלונות ובדלתות, וכן דרך הדלתות בעת פתיחתן. אף על פי שלעין בלתי מקצועית הבניין (כאשר הוא סגור) נראה אטום, בפועל ישנה הסתננות אוויר משמעותית (מבחינה תרמית). נהוג להעריך את ההסתננות במספר חילופי אוויר לשעה (Air Changes per Hour - ACH). קצב ההסתננות תלוי בדרגת האטימות של הבניין, בארגון הפנימי שלו, במהירות הרוח וכיוונה, ובהפרשי הטמפרטורה בין הבניין לסביבה. להסתננות האוויר השפעה ניכרת על תוצאות ההדמיה, ואף על פי כן מרבית התוכנות אינן מבצעות הדמיה של תהליך זה, מטעמים של חוסר מידע מספיק או בשל מורכבות החישוב. במקרים כאלה, נקבע שיעור ההסתננות באמצעות ערכי ברירת מחדל בתוכנה, או, לעיתים, על ידי המתכנן עצמו באומדן מקורב.

הדרישה לאוויר צח נקבעת לפי תקן ת"י 6210 – "אוורור לשמירת איכות אוויר נאותה בתוך בניינים", תוך התייחסות לשטח החלל ולמספר האנשים השוהים בו. הדרישה מנוסחת במונחים של ספיקה נדרשת (ביחידות של ליטר לשנייה, לאדם או ליחידת שטח רצפה). עם זאת, במרבית התוכנות מתוארת פעולתה של מערכת האוורור במונחים של חילופי באוויר – בדומה לאוורור טבעי. תיאור הגורמים המשפיעים על האוורור הטבעי מורכב יותר, וכולל הנחות בנוגע לפתיחת חלונות ומעבר אוויר בין אזורים תרמיים שונים. תוכנות תרמיות אחדות (כגון EnergyPlus) יכולות לבצע חישוב בסיסי של אוורור טבעי, בהתחשב במהירות הרוח וכיוונה (בהתבסס על נתונים בקובץ האקלים), בצורה הסכמתית של המבנה, ובמיקום הפתחים. תוכנות תרמיות אחרות (כגון, IES-VE ו-DesignBuilder) כוללות מודל המאפשר הדמיה מורכבת יותר של אוורור טבעי באמצעות נוסחאות CFD (Computational Fluid Dynamics).

**ד. מקורות חום פנימיים**

מקורות חום פנימיים, כגון חום הנפלט מאנשים, מתאורה מלאכותית, מציוד אלקטרוני, ומציוד חשמלי אחר, משפיעים על התפקוד התרמי של הבניין, ולפיכך חשוב להגדירם בהדמיה. באופן כללי, החום הנפלט ממקורות אלו לחלל הבניין בעונה החמה גורם לעומס חום אשר מערכת האקלום נדרשת להתמודד איתו (בנוסף לזה המגיע מהסביבה החיצונית דרך מעטפת הבניין). בעונה הקרה, לעומת זאת, תורמים המקורות הפנימיים לסך האנרגיה בבניין ובכך מפחיתים את העומס על מערכת החימום. בניגוד לבניין משרדים בו עומס החום הפנימי הוא משמעותי מאד, בבניין מגורים מקובל להניח כי מקור חום פנימי חשוב נמצא בעיקר במטבח.

### ה. שעות האכלוס ואופי השימוש

אופן הפעלת הבניין נקבע באמצעות לוחות זמנים המגדירים את מועד החגים, את מהלך הפעילות האופייני לפי ימי השבוע ושעות היממה, את כמות האנשים השוהים בבניין בשעות השונות ואת שעות הפעלת המערכות השונות בבניין (כגון תאורה, מכשירי חשמל, קירור, חימום, אוורור, ועוד..). אזורים תרמיים שונים יכולים להיות מאופיינים בדפוסי פעילות ואכלוס שונים.

עומסי חום פנימיים שכיחים בהתאם לתקן 5282 חלק 1 (2011):

- מאנשים: בפעילות קלה 125 ואט לאדם (מ- 16:00 עד 24:00), ובשינה 80 ואט לאדם (מ- 24:00 עד 8:00).
- ציוד חשמלי קבוע: כ- 0.75-1 ואט למ"ר (24 שעות)
- ציוד חשמלי לא קבוע: כ- 6-8 ואט למ"ר (מ- 16:00 עד 24:00)
- תאורה: 5 ואט למ"ר (לרוב משקיעה ועד חצות)

### ו. מערכות מיזוג (קירור וחימום)

מערכות הקירור והחימום הינן מרכיב חיוני לחישוב צריכת האנרגיה של הבניין, אך אינן דרושות לצורך הערכת התפקוד התרמי של הבניין כאשר לא מופעלות מערכות מכניות. באופן כללי, לצורך הדמיית מערכת המיזוג יש לקבוע יעדי טמפרטורה לקירור וחימום (עבור הגדרות התרמוסטט) ולהגדיר את סוג המערכת ומרכיביה השונים. הגדרת המערכות הינה מורכבת, ודורשת הכרת פרטי תכנון מערכת המיזוג בבניין. לפיכך, רצוי כי מתכנן המיזוג יהיה אחראי או מעורב בביצוע הגדרות אלו. תוכנות מסוימות מאפשרות גם להגדיר "תבנית-בסיס למערכת מיזוג גנרית" ובכך מקטינות מעט את הצורך בפירוט רב של מרכיבי המערכת (אולם גם תבניות אלו דורשת ידע מקצועי וספציפי, אשר מצוי בידי מתכנן המיזוג). אחדות מהתוכנות, כגון EnergyPlus, מאפשרות גם ביצוע הדמיה באמצעות "מערכת אוויר אידיאלית" (Ideal Air System). בהדמיה כזאת התוכנה מחשבת את העומסים הנוצרים בהשפעתם של כל הגורמים התרמיים, כגון האקלים במקום ותכונות מעטפת הבניין, ללא תלות ביעילות מערכת המיזוג. שיטה זו אינה דורשת הגדרות מלבד הגדרות התרמוסטט, ולפיכך הינה פשוטה מאד להדמיה ומתאימה להשוואה בין חלופות אדריכליות.

### ז. הגדרת הפלט הנדרש

כמות הפלט שתוכנת הדמיה תרמית/אנרגטית, כגון EnergyPlus יכולה להפיק היא עצומה. ולפיכך נדרשת הגדרה ספציפית של המשתנים אותם התוכנה תחשב, וכן את אופן סיכומם (כגון נתונים שעתיים, חודשיים, שנתיים ; ממוצעים, או סה"כ). הגדרת הפלט הנדרש ואופן ניתוחו הינה מיומנות חיונית לשם הפקת מידע משמעותי מההדמיה. אחדות מתוכנות הממשק ל- EnergyPlus וכן תוכנות תרמיות/אנרגטיות אחרות מספקות פלט קבוע, מצומצם יותר, המבוסס על אמצעים גרפיים.

## 1.4 שיטות חישוב תרמי

הבסיס החישובי למרבית תוכנות ההדמיה התרמית הן נוסחאות מאזן אנרגיה הלוקחות בחשבון רווח והפסד אנרגיה ליחידת נפח אוויר גדולה. אולם, בתוכנות אחדות (כגון DesignBuilder ו- IES-VE) שיטת החישוב CFD (Computational Fluid Dynamics) התווספה לאחרונה באמצעות מודל חישובי נפרד. שיטה זאת מחלקת את חלל הבניין (נפח האוויר וגבולותיו הבנויים כגון רצפה, קירות, ותקרה) למספר רב של יחידות (תיאורטיות) באמצעות 'גריד', ומחשבת את מעבר האנרגיה מיחידה ליחידה באמצעות נוסחאות המדמות דינמיקת זרימת נוזלים וגז (במקרה זה אוויר). באמצעותן ניתן לחזות את מהירות זרימת האוויר וכיוונה, לחץ האוויר, והטמפרטורה, בנקודות רבות בבניין. חיזוי הטמפרטורה בנקודות רבות מעניק למשתמש מידע תרמי מפורט יותר מאשר זה המתאפשר באמצעות חישוב מאזן האנרגיה (אשר יכול לספק מידע על טמפרטורת מסת האוויר

במספר חלקים עיקריים בחלל, אך לא בכל נקודה ונקודה). מבחינה תרמית היתרון קטן יחסית, מכיוון שחיזוי הטמפרטורות בכל נקודה ונקודה בחלל תורמת רק במקרים מאד מיוחדים לתכנון האדריכלי. מבחינות אחרות - כגון תכנון זרימת אוויר טבעית או מאולצת, סילוק ריחות ופינוי עשן - מידע זה יכול לתרום באופן משמעותי לתכנון. אולם, חשוב לקחת בחשבון כי הדמיית CFD דורשת זמן חישוב רב ואינה מבטיחה תוצאות מדויקות יותר משיטת החישוב הקונבנציונאלית המתבססת על מאזן האנרגיה. הסיבות לכך הן שנדרש ידע ספציפי לעריכת הדמיה מדויקת, האופי הדינמי של הזרימה, וכן העובדה ששיטת חישוב זאת מבוססת על חישוב זרימה בין יחידות תיאורטיות רבות מאד, ובכך מאפשרת ל"גרור" טעויות.

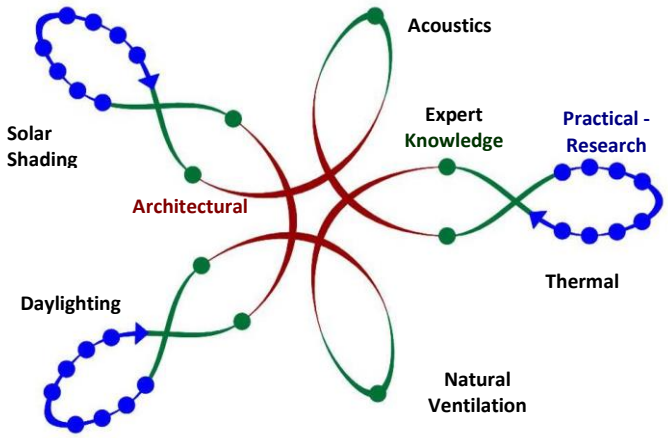
## 2. שילוב הדמיה ממוחשבת בתהליך התכנון האדריכלי

להדמיות ממוחשבות פוטנציאל לתמוך באופן משמעותי בתכנון האדריכלי. אולם, לאופן שילוב ההדמיות בתהליך התכנון השפעה מכרעת על מימוש המידע הנרכש באמצעותן. לדוגמא, להדמיות הנערכות לאחר סיום התכנון הראשוני יש בדרך כלל רק השפעה מעטה על תפקוד הבניין, מכיוון שהאלמנטים המרכזיים בתכנון כבר נקבעו. לעומת זאת, להדמיות ממוחשבות הנערכות במהלך התכנון הראשוני (לדוגמא לבחינת חלופות אדריכליות) פוטנציאל להשפעה משמעותית על התוכניות הסופיות. בכדי להשיג השפעה משמעותית יש גם צורך בגיבוש חלופות אדריכליות טובות, בחירת מדדי השוואה נכונים, והעברת המידע (הנרכש באמצעות ההדמיות) באופן ברור למתכנן. למרות חשיבות ביצוע הדמיות בשלבי התכנון הראשונים, יש צורך לבצע הדמיה גם לאחר סיום התכנון המפורט, בכדי לשקף את מאפייני הבניין בפועל ולצורך הוכחת עמידה בסטנדרטים (כגון דירוג אנרגטי ותקני בניה ירוקה). לתהליך השימוש בהדמיה ממוחשבת מאפיינים של מחקר: נדרשת הגדרה של מטרת הבדיקות, הפרמטרים לבדיקה, ושיטת הבדיקה. לאחר ביצוע הבדיקות, בדרך כלל יש צורך בעיבוד הנתונים לפני שניתן לגשת להסקת מסקנות, ויש להשקיע מאמץ בארגון הממצאים לשם הצגתם בפני שאר השותפים לתכנון. בהשוואה למחקר אקדמי, הדמיה ממוחשבת היא לרוב מצומצמת בהיקפה וממוקדת באחד משלבי התכנון האדריכלי (אם כי יתכן ותידרש חזרה על התהליך, וביצוע הדמיות נוספות גם בשלבי תכנון אחרים). מכיוון שלתהליך ביצוע הדמיה ממוחשבת בתכנון האדריכלי ישנם מאפיינים של מחקר, אולם היקף ומטרות התהליך שונים באופן ניכר מאלו של מחקר אקדמי (בין תיאורטי ובין יישומי), ניתן להשתמש במונח "מחקר-מעשי" עבור תהליך חקירתי מעין זה [202]. השימוש במונח מחקר-מעשי מדגיש כי ביצוע הדמיות ממוחשבות אינו רק פעולה חישובית גרידא, אלא תהליך מובנה בעל מאפייני מחקר. ללא תהליך חקירתי מובנה, ישנה סבירות גבוהה כי השימוש בהדמיות ממוחשבות ייצר מידע לא שימושי אשר בפועל לא יתמוך בתכנון האדריכלי.

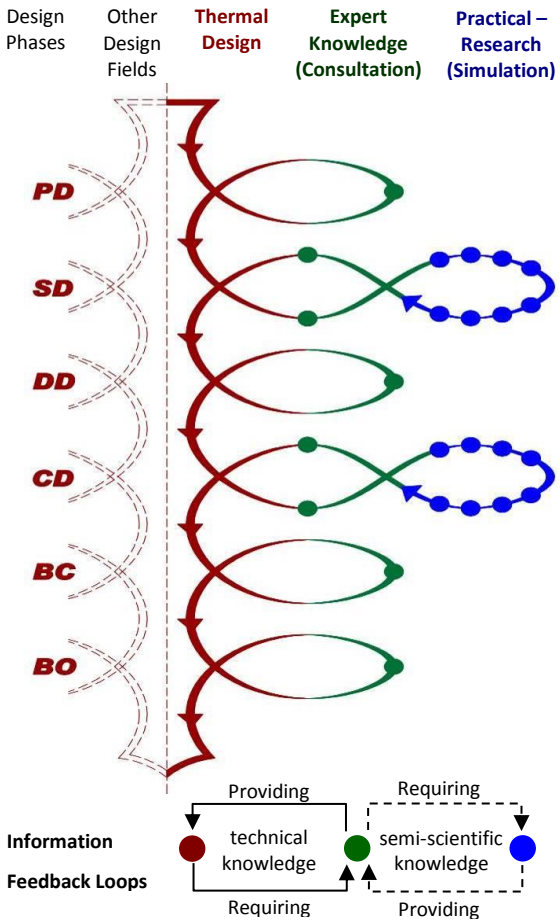
בכדי שהמידע המופק באמצעות הדמיות ממוחשבות ישפיע על התכנון האדריכלי ותפקוד הבניין, לא די בביצוע נכון של ההדמיות: יש לדאוג כי המסקנות מההדמיות ייושמו באופן נכון בתכנון וביצוע הבניין. מבצע ההדמיות (במידה ואינו משמש גם כיועץ לפרויקט) לרוב מעורב בפרויקט רק בשלב מצומצם (בעת ביצוע ההדמיות), ולפיכך אינו יכול להיות אחראי על כך, במסגרת תפקידו. ללא גורם אחראי מוגדר, סביר להניח, כי במהלך התכנון (אשר לרוב אורך זמן רב) המידע יישכח. מכיוון שבדרך כלל למנהל הפרויקט ולאדריכל ידע בסיסי בלבד בתחום התרמי, ומכיוון שאנשי מקצוע אלו נדרשים לטפל בנושאים רבים, מומלץ כי יתווסף לצוות התכנון יועץ האחראי על התכנון התרמי/אנרגטי אשר ילווה את הפרויקט לאורך כל תהליך התכנון והבנייה, ויהיה ממונה על שילוב נכון של ההדמיות ויישום נכון של המסקנות. במידה ויש ברשותו הכלים והידע המתאימים, יועץ זה יכול לבצע את ההדמיות (או לחלופין להזמין את ההדמיות מאיש מקצוע אחר). הצעה לשילוב הדמיות ממוחשבות במסגרת מחקר-מעשי מוצגת במודל הבא, אשר הותאם לתחום התרמי [203].

[202] Kaftan, 2012
[203] Kaftan, 2012

*Model of Design Process, Expert Knowledge, & Practical-Research (through Simulations)*




**איור יט-3. מודל סכמתי של תהליך התכנון האדריכלי, הקושר עיצוב, ידע מומחה ומחקר מעשי: חלק ראשון – מבט רוחבי**

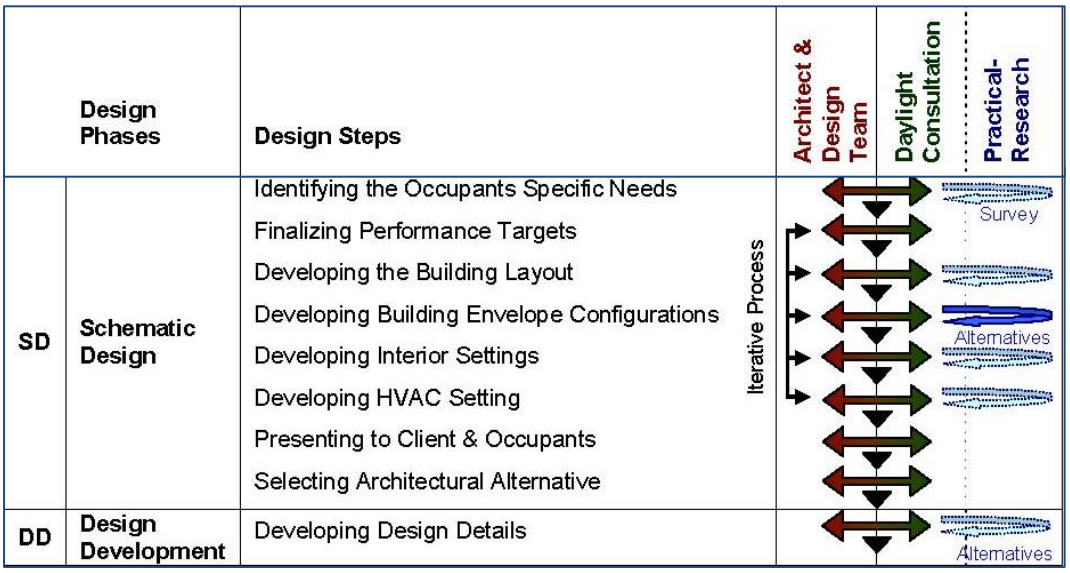



**איור יט-4. מודל סכמתי של תהליך התכנון האדריכלי, הקושר עיצוב, ידע מומחה ומחקר מעשי: חלק שני – מבט אנכי**

מהלך-העבודה המוצג במודל מאפשר שילוב מחקר-מעשי בתהליך התכנון האדריכלי, באמצעות ארגון המטלות הרלוונטיות הנדרשות לתכנון תרמי/אנרגטי, בהתאם לאופי המומחיות הנדרשת (תכנון אדריכלי, ייעוץ, ומחקר-מעשי), וכן בהתאם לשלבי התכנון האדריכליים. מהלך-העבודה מציג זרימת מידע כללית בכל שלבי התכנון האדריכלי, וזרימת מידע חוזרת ונשנית בשלבי התכנון הראשוניים. בהתאם למודל זה, מחקר-מעשי יכול להתבצע במספר שלבים בתכנון האדריכלי, באמצעות מספר מחקרים-מעשיים עצמאיים וקצרי מועד.

## 2.1 ביצוע הדמיות בשלבי התכנון השונים

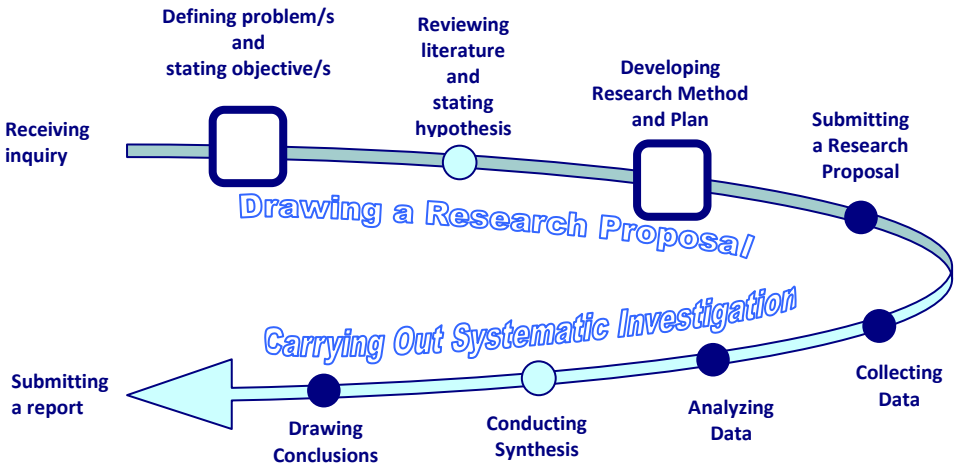
שלבי התכנון האדריכלי העיקריים כוללים תכנון ראשוני-עקרוני (Schematic Design), תכנון מפורט (Design Development), והכנת תכניות לביצוע (Construction Documents). ניתן לחלק שלבים אלו לשלבי משנה (איור יט-3). ניתן להיעזר בהדמיות ממוחשבות בכל אחד משלבים אלו, אולם במידה והתקציב לעריכת ההדמיות מצומצם, ביצוע הדמיות ממוחשבות חיוני ביותר בשני שלבים במיוחד: האחד בעת פיתוח מעטפת הבניין במסגרת התכנון הראשוני, מכיוון שבשלב זה לשינויים בתכנון השפעה ניכרת על התפקוד התרמי של הבניין. והשני, במידה ונדרשת הסמכת הבניין לתקן דירוג אנרגטי או תקן בניה ירוקה, ההדמיה הסופית חייבת להתבצע לאחר סיכום התכנון המפורט, ובהתאם לתוכניות הביצוע (בכדי להיות נאמן לתכנון הסופי). רצוי כי ההדמיה בשלב התכנון הראשוני תהייה סכמתית (עם פירוט מוגבל של מרכיבי המודל) בכדי לאפשר בדיקה השוואתית של חלופות רבות ככל האפשר. עם זאת, אך חשוב להקפיד כי כל המרכיבים החיוניים של ההדמיה ייכללו בהדמיה (כגון, הסתננות אוויר, עומסי פנים, או לוחות זמנים). כן חשוב להקפיד כי כל המאפיינים של המודל יהיו זהים בחלופות השונות - מלבד הפרמטרים המיועדים לבדיקה השוואתית. לעומת זאת, כאשר נדרשת הערכה מדויקת של צריכת האנרגיה לצורך תכנון סופי או הוכחת עמידה בתקן, יש צורך בהדמיה מפורטת ככל האפשר. מכיוון שבשלב זה נדרש רק מודל אחד (של התכנון הסופי), ניתן לרכז את המאמץ בפירוט המודל.




**איור יט-5. זרימת המידע בשלבים נבחרים של תהליך התכנון האדריכלי**

## 2.2 תהליך ביצוע הדמיות במסגרת מחקר-מעשי

שלבי המחקר-המעשי וסדרם מאורגנים בסכמה הבאה [204]:



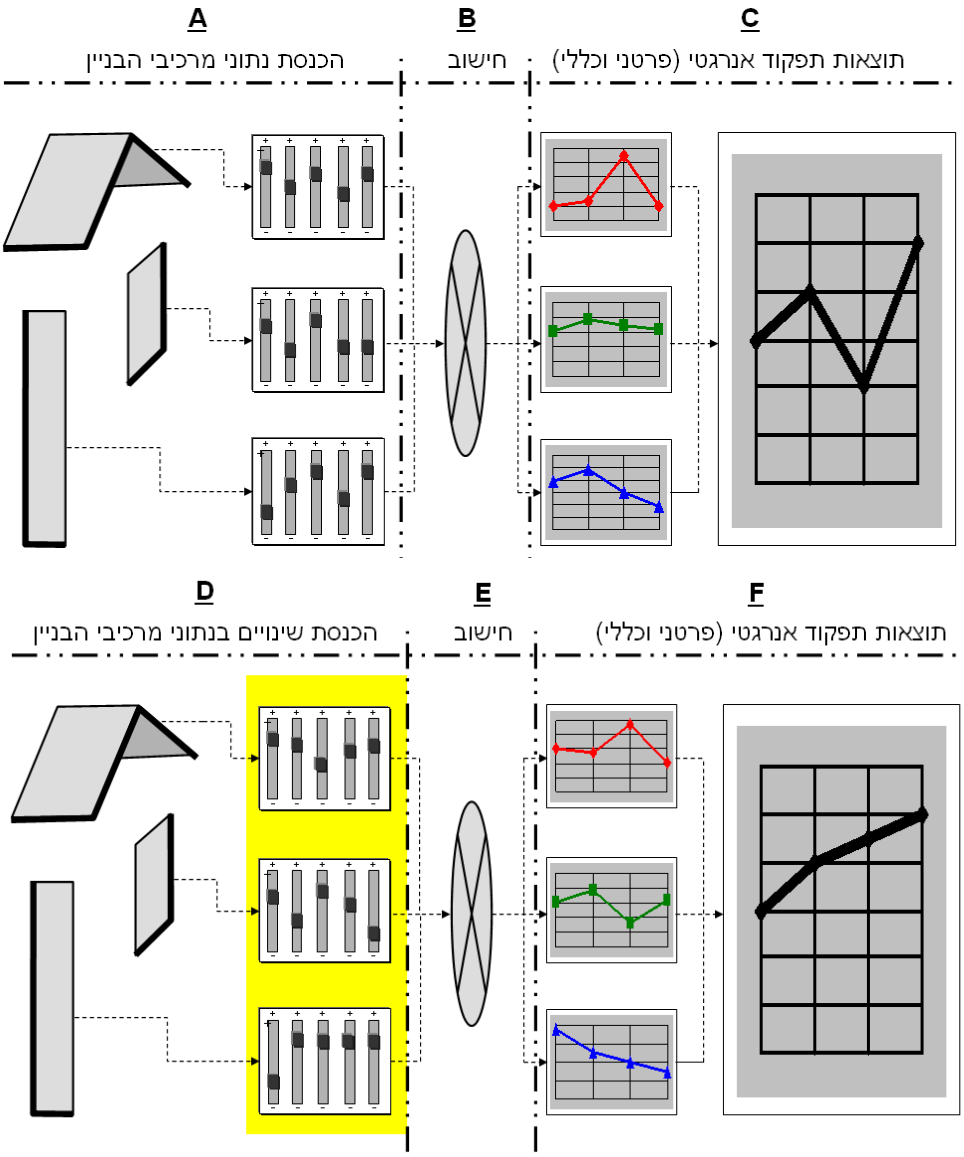

**איור יט-6. תהליך של מחקר מעשי בתכנון אדריכלי, המשלב הדמיה**

המחקר-המעשי יכול להתבסס על מספר שיטות. שיטת הבדיקות הממוחשבות השכיחה ביותר היא שיטת ניסוי וטעייה (Trial-and-Error). השיטה מבוססת על תכנון חלופות אדריכליות על סמך ידע מקצועי (כגון הנחיות תכנון או ידע נרכש מתקדימים), הערכת תפקודם באמצעות הדמיות תרמיות/אנרגטיות, בחירת חלופה מועדפת או שכלול התכנון הקיים (על סמך תוצאות ההדמיה), ובמידת הצורך חזרה על התהליך, עד לקבלת תוצאות מספקות. מצד אחד, השיטה פשוטה ואינטואיטיבית; מאידך, חסרונותיה הם שלעיתים נדרשת בדיקה של מספר חלופות רב, ונדרש ידע מקצועי-אישי לבחירת החלופות או שכלולן (מעבר לזה המתקבל באמצעות ההדמיה). בנוסף, שיטת ניסוי וטעייה אינה מבטיחה כי החלופה שנמצאה כמתפקדת טוב יותר מהאחרות, היא אכן החלופה הטובה ביותר אשר ניתן לתכנן.

מלבד שיטת הניסוי והטעייה, קיימות מספר שיטות נוספות לבדיקות ממוחשבות המאפשרות ביטחון רב יותר בזיהוי הפתרון התכנוני בעל התפקוד הטוב ביותר, או זיהוי הפתרון התכנוני האופטימאלי מבחינת זמן החזר השקעה. שיטות אלו לרוב מבוססות על נוסחאות מורכבות, כגון נוסחאות אבולוציוניות (Genetic Algorithm) ונוסחאות פארטו (Pareto optimization) המאפשרות "אופטימיזציה אוטומטית" על ידי בחירה מושכלת של חלופות לבדיקה באמצעות התוכנה עצמה. לשיטות אלו יתרון בכך שאינן דורשות ידע מקצועי לבחירת החלופות לבדיקה, ומצד שני חיסרון בכך שהתוכנה מספקת פתרון 'אוטומטי', ללא אפשרות של המשתמש לבחון את נכונותה. בשלב זה, שיטות אלו מיושמות בעיקר לצורך מחקר אקדמי, או בפרויקטי דגל בפרקטיקה באמצעות תוכנות אשר אינן זמינות למרבית היועצים והמתכנים.

יט

[204] (Kaftan, 2012)




בשלב ראשון (A), נדרש הכנסת נתוני הבניין השונים. לכול אלמנט נדרשים מספר הגדרות למאפייניו השונים (כגון עובי, התנגדות תרמית, כיוון, צבע, וכד'). בשלב השני (B), ההדמיה מבצעת חישוב אוטומטי. בשלב השלישי (C), מקבלים תוצאות פרטניות וכלליות לתפקוד התרמי של הבניין. מתוך תוצאות אלו נדרשים לזהות (במידה וקיימת) בעיה תפקודית. בשלב הרביעי (D), נדרשים לשנות את המאפיינים (בהסתמך על תוצאות ההדמיה, ידע מקצועי, וניחוש). בשלב החמישי (E), ההדמיה מבצעת שוב חישוב. ובשלב השישי (F), בודקים את השינוי בתפקוד הבניין. במידה והתפקוד מספק ניתן לגבש המלצות, ובמידה ולא, יש לחזור על השלבים D עד F עד קבלת תוצאות מספקות.

**איור יט-7. סכמת תהליך השימוש בהדמיה ממוחשבת (בשיטת הניסוי והטעייה) לתמיכה בתכנון אדריכלי**

**בדיקות לאחר אכלוס (Post Occupancy Evaluation - POE)**

לרוב המידע המתקבל מן ההדמיות מהווה משוב בלעדי עבור המתכננים לגבי תפקוד הפרויקט. אולם, קיימת חשיבות רבה גם לביצוע בדיקות הערכה לאחר אכלוס (POE -- Post Occupancy Evaluation) באמצעות מדידות. המדידות מהוות מדד אמיתי לתפקוד הפרויקט בפועל, ובנוסף הן יכולות לשמש גם אימות מסוים עבור איכות ההדמיות. באמצעות מדידות ניתן לבחון האם תוצאות ההדמיות אכן משקפות את התפקוד בפעל, ובהתאם מאפשרות ביטחון רב יותר בשימוש בהדמיות עבור פרויקטים עתידיים.

## 3. יישום הדמיה תרמית בישראל

הדמיה תרמית מיושמת בישראל בכדי לתת מענה למגוון יעדים, ובעיקר לשם תמיכה בתכנון בניינים בעלי תפקוד תרמי/אנרגטי משופר, וכן עמידה בדרישות תקנים מקומיים ובינלאומיים (אשר כיום – בשנת 2013 – אינם בעלי מעמד מחייב). התקנים הישראלים בהם ניתן להיעזר בהדמיה תרמית הינן ת"י 5281 (בנייה בת-קיימה: בניה ירוקה) המפנה בסעיף האנרגיה לת"י 5282 (דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה: בניני מגורים), ות"י - 5280 חלק 1 (אנרגיה בבניינים) אשר אמור לקבל בקרוב מעמד של תקן מחייב מתוקף תקנות התכנון.

### 3.1 השיטה תפקודית בתקן הישראלי 5282

התקן הישראלי ת"י 5282 מגדיר דירוג בניינים לפי צריכת אנרגיה לאקלום. התקן מאפשר להעריך את דירוג האנרגיה של בניינים בהתאם למאפייני התכנון (עוד לפני הבנייה), בהסתמך על שיטה מרשמית או על שיטה תפקודית. השיטה המרשמית מאפשרת לדרג את הבניין בהתאם למאפייני הבניין בלבד, מתוך הנחה (המבוססת על מחקר אשר נערך בטכניון) שמאפייני בניין מסוימים צפויים לאפשר חיסכון באנרגיה. השיטה המרשמית הינה כלי פשוט המיועד לציבור המתכננים הרחב, ומתאימה לבניינים שמרבית מאפייני התכנון שלהם אינם חורגים מהמקובל. כאשר מדובר בתכנון חדשני או ייחודי השיטה המרשמית אינה מתאימה, ואז ניתן להעריך את הדירוג באמצעות השיטה התפקודית, המבוססת על הדמיה אנרגטית. השיטה התפקודית מאפשרת גמישות רבה יותר בבחירת מאפיינים מסוימים של מעטפת הבניין, בתנאי שהתפקוד האנרגטי הכולל של הבניין יהיה מספק, ובתנאי שדרישות מזעריות מסוימות מקבלות מענה.

השיטה התפקודית מדרגת את התפקוד האנרגטי של יחידות דיור (או בניין מגורים) באמצעות תוכנת מחשב, בהתאם לשיפור היעילות האנרגטית ביחס לזאת של דירת ייחוס תיאורטית (בעלת מאפיינים המוגדרים בתקן). במידה והיעילות האנרגטית של יחידת הדיור קטנה מזאת של דירת הייחוס, אזי דירוג יחידת הדיור הינו הנמוך ביותר, ומסומן באות F. אך במידה והיעילות האנרגטית של יחידת הדיור גדולה מזאת של דירת הייחוס, אזי דירוג יחידת הדיור יהיה בטווח בין E ל- A+ (כאשר A+ הינו הדירוג הגבוה ביותר). הדירוג נקבע באמצעות טבלה, בהתאם לאחוז השיפור ובהתאם לאזור האקלימי.

חשוב להבין כי מאפייני דירת הייחוס נקבעו בתקן אך ורק על מנת לאפשר שימוש בתוכנות חלופיות לתוכנה ENERGYui (אשר פותחה במיוחד בכדי לשמש כלי לבדיקת הדירוג לפי התקן). אין בהם משום הכוונה לפתרון מסוים, והם אינם אמורים להגביל את חופש התכנון של האדריכל. חישוב צריכת האנרגיה של דירת הייחוס נעשה לפי הממוצע של צריכת האנרגיה בדירות זהות הפונות לכל אחד מארבעת כיווני השמיים העיקריים. כלומר, לשם דירוג יחידת דיור נדרשות חמש הדמיות:

אחת של יחידת הדיור עצמה וארבע עבור יחידת הייחוס בהפניות השונות. תנאי הפנים הנדרשים (כגון טמפרטורה בקיץ ובחורף), עומסים הנובעים מתאורה ומציוד המותקן בדירה ודפוסי האכלוס שלה מוגדרים בתקן.

חישוב הדירוג האנרגטי לבניין מגורים נערך על ידי חישוב ממוצע דירוג הדירות השונות, בשקלול שטחן היחסי (כאשר בבניין חדש כל הדירות נדרשות לעמוד בדרגת הבסיס). ההדמיה נדרשת להיערך באמצעות תוכנת הדמיה תרמית/אנרגטית (המאפשרת ניתוח שעתי), מתוך רשימת תוכנות המצוינות בתקן או באמצעות ממשק ENERGYui, המאפשר חישוב אוטומטי של דירת יחוס ודירוג הדירות.

## 3.2 ממשק ENERGYui

ENERGYui [205] הינו ממשק לתוכנת EnergyPlus [206], המאפשר דירוג אנרגטי של בניינים בהתאם לשיטה התפקודית בת"י 5282. הממשק פותח במעבדת אקלים ואנרגיה בארכיטקטורה, במרכז למחקר ופיתוח בפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים, בטכניון. פיתוח הממשק נערך בסיוע ובמימון של משרד האנרגיה והמים בישראל, והשימוש בו מאושר על ידי מכון התקנים הישראלי לצורך קבלת דירוג אנרגטי.

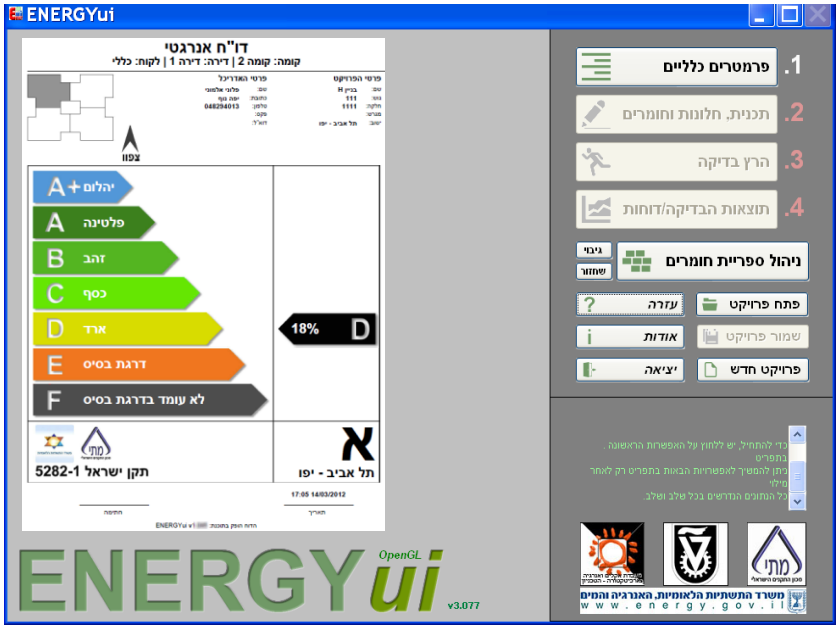
השימוש בממשק כולל ארבעה שלבי עבודה עיקריים. בשלב הראשון, נדרש המתכנן להזין פרמטרים כלליים, כגון מיקום הפרויקט, פרטי המתכנן והיזם, סוג המבנה (מגורים או משרדים), וסוג הבנייה (חדשה או שיפוץ מבנה קיים). בשלב השני, יש לתאר תיאור מלא של הבניין, לרבות התכנית, מיקום וגודל החלונות וחומרי הבנייה. הגדרת הגיאומטריה של הבניין נעשית בתוכנה עצמה באמצעות ממשק גרפי, או בקובץ מיובא בפורמט DXF. הגדרת אזורי האקלום נערכת על ידי שיוך חללי הבניין השונים לדירות השונות, גרעין הבניין, והמרפסות (המפורטים ברשימה בתוכנה). הגדרת פתחי הבניין נערכת על ידי פתיחת ממשק שרטוט עבור כל קיר (לחוד) הכוללת שרטוט חזית הקיר ומאפשרת הגדרת אמצעי הצללה קבועים או ניידים ודפוסי תפעול. הגדרת מרכיבי המעטפת (חתכי הקירות, הרצפות, הגגות, והחלונות) נערכת על ידי שיוך (לאלמנטי הבניין השונים) של הרכב החומרים מרשימה המוגדרת בספריית אלמנטים. הגדרת הרכב החומרים לקירות כוללת את סוג החומרים וסדר התקנתם. מאפייני החומרים השונים מוגדרים בספריה אחרת – ספריית החומרים. הממשק מאפשר לערוך ולהוסיף הרכבים לספריית האלמנטים, וחומרי בניה לספריית החומרים, ומאפשר לבצע שינויים בתכנית בכל עת.

בשלב השלישי, נערכת הדמיה (אוטומטית) של צריכת האנרגיה של הבניין באמצעות תוכנת EnergyPlus, ובהתאם לתוצאות הממשק מחשב את הדירוג האנרגטי של כל הדירות והבניין כולו. לאחרונה שולבה גם אפשרות לערוך בדיקה נוספת המחשבת האם הבניין עומד בדרישות בניין פסיבי משופר לפי ת"י 5281, סעיף 1.1.3.

בשלב הרביעי, ניתן לבחור את אופי הדוחות המופקים, באמצעות בחירת הקומות הרלוונטיות, רשימת הלקוחות הרלוונטיים (כגון בעלי הבית השונים), וסוג הדו"ח. סוגי הדו"ח הניתנים להפקה הינם: דו"ח מדבקה (דו"ח כללי לגבי הדירוג האנרגטי של כל דירה, מ- F עד A+); דו"ח מפורט לדירה (הכולל פרטים כלליים שהוזנו, דירוג אנרגטי, ופירוט קירות, רצפות, תקרות, וחלונות); דו"ח מסכם ללקוח; ודו"ח כללי לכל המבנה (המפרט את פרטי הפרויקט והדירוג האנרגטי הכולל של כל הבניין כתוצאה משקלול הדירוג של כל הדירות).

יט

[205] CELA, 2013
[206] EERE, 2013




**איור יט-8. תוכנת ENERGYui**

## 3.3 תוכנות הדמיה תרמית אחרות

ניתן לבצע הדמיה תרמית/אנרגטית במספר רב של תוכנות. לאלו מגוון מאפיינים, כגון ידידותיות לשימוש, שיטת החישוב, רמת הדיוק ואופן אימות הביצועים.

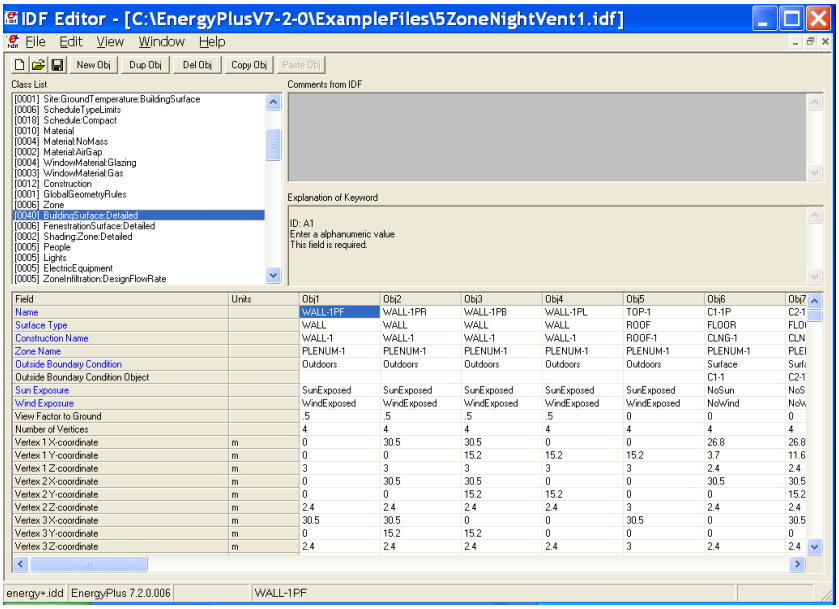
להלן סקירה קצרה של מספר תוכנות פופולאריות -- EnergyPlus (לרבות מספר תוכנות ממשק) ו-IES-VE. הסקירה ממפה את התכונות העיקריות של כלים אלו, נכון למועד כתיבת הדברים (אוקטובר 2013). סקירות מקיפות יותר ניתן למצוא במאמרים של Attia et al [207] ו- Crawley et al [208]. מכיוון שתחום ההדמיה התרמית מתפתח בימים אלו בקצב מהיר, לתוכנות הקיימות נוספות יכולות חדשות (ותוכנות חדשות מפותחות ומוצעות לשימוש הציבור). לפיכך, מומלץ מאד כי הקורא יתעדכן באמצעות הקישורים לאתרי התוכנות, ובשינויים שנערכו בהן מעת עריכת הסקירה.

### א. EnergyPlus

EnergyPlus (EERE, 2013) הינה תוכנה להדמיה תרמית/אנרגטית של בניינים הניתנת ללא תשלום, הלוקחת בחשבון את מרכבי הבניין השונים, לרבות מערכות מיזוג, תאורה, וכו'. התוכנה פותחה על ידי מספר גופים המשתייכים למשרד האנרגיה האמריקאית, וביניהם קבוצת המחקר ב-LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory).

התוכנה פותחה לפני כ- 15 שנים (2001) על בסיס שתי תוכנות קודמות: BLAST ו- DOE–2 אשר פותחו כבר בשנות ה-70 בעקבות משבר האנרגיה העולמי. פיתוח התוכנה התמקד ביכולות ודיוק התוכנה, ולא בבניית ממשק ידידותי למשתמש, במטרה לספק (לגופים בעלי עניין) בסיס מהימן וקוד פתוח לפיתוח ממשקים גרפיים לתוכנה. לפיכך לתוכנה דפי הסבר מפורטים ביותר, והיא עוברת עדכונים ובדיקות אימות לעיתים תכופות. בדיקות האימות שנערכו לתוכנה, כוללות את "ANSI/ASHRAE Standard 140-2011" בדיקה סטנדרטית לתוכנות מסוג זה, ו-"IEA SHC BESTest" המשווה מספר תוכנות להדמיה תרמית / אנרגטית [209].

[207] Attia et al, 2011
[208] Crawley et al, 2008
[209] U.S. D.O.E., 2013a




**איור יט-9. תוכנת EnergyPlus**

קלט התוכנה מתבצע באמצעות קובץ טקסט או באמצעות ממשק ייעודי הכלול בתוכנה (IDF Editor) המאפשר הכנסה פשוטה יחסית של טקסט באמצעות טבלאות; ובאמצעות קובץ המפרט את נתוני האקלים המקומי. המידע מאורגן לפי מודלים שונים (כגון, מאפייני ההדמיה, מיקום ואקלים, לוחות זמנים, מאפייני חומרי מעטפת הבניין, גיאומטריית הבניין והאזורים התרמיים, מערכות מיזוג, ועוד). הקושי העיקרי בתוכנה הוא הזנת גיאומטריית הבניין, משום שאין לה ממשק גרפי ולכן הוא מבוסס על ציון המיקום המרחבי (X,Y,Z) של כל נקודות הקצה של אלמנטי הבניין השונים. מלבד זאת, עורך ההדמיה נדרש להבין כללים בסיסיים בהדמיה תרמית, כגון חלוקה נכונה לאזורים תרמיים; וכן נדרש להבין מונחים מקצועיים רבים הקשורים למאפיינים התרמיים של הבניין. בכדי לערוך הדמיה בסיסית נדרש המשתמש להזין מידע עבור מספר מודלים מצומצם. מידע עבור מודלים נוספים מאפשר לערוך הדמיה מורכבת יותר המדמה מאפייני בניין נוספים. פלט התוכנה הבסיסי הינו קבצי טקסט, הכוללים נתונים מספריים (תוצאות ההדמיה), ומידע לגבי אופן ביצוע ההדמיה. הנתונים אשר ניתן להפיק מהתוכנה רבים ומפורטים ביותר, ובכדי להבינם נדרש ניתוח באמצעות גרפים באמצעות תוכנה חיצונית כגון Microsoft Excel. בנוסף לחישובים תרמיים/אנרגטיים התוכנה מבצעת גם חישובי תאורה טבעית.

### ב. ממשקים ל- EnergyPlus

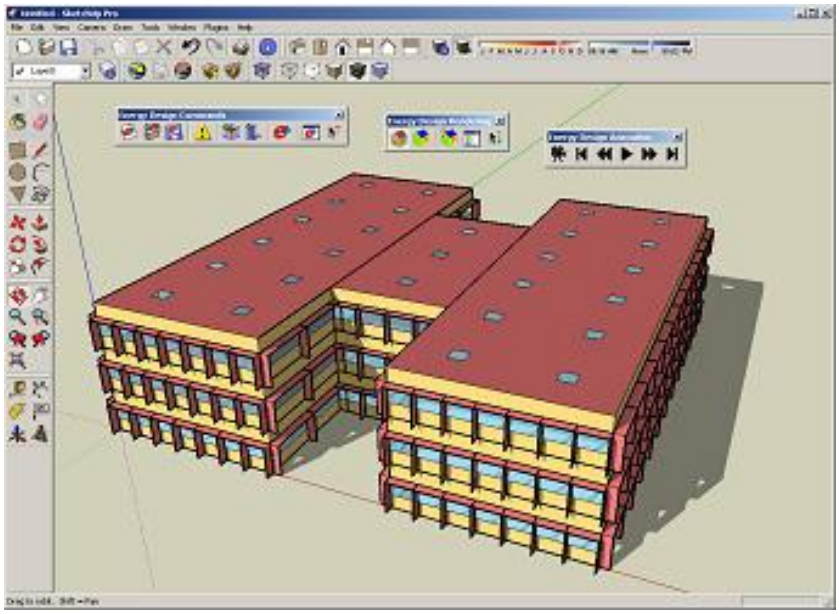
מכיוון שתוכנת EnergyPlus אינה פשוטה להפעלה, פותחו עבורה מספר ממשקים המאפשרים הפעלה נוחה יותר, ביניהם Legacy OpenStudio, OpenStudio, ו- Simergy, אשר ניתן לערוך בהם שימוש ללא עלות; וכן הממשק המסחרי DesignBuilder. ממשקי EnergyPlus הינם כלים ממוחשבים המאפשרים עריכת הדמיות תרמיות המבוססות על חישובי EnergyPlus באופן פשוט יותר.

#### Legacy OpenStudio (Plug-in for SketchUp)

ממשק Legacy OpenStudio[210] פותח על ידי NREL (National Renewable Energy Laboratory) עבור משרד האנרגיה האמריקאי. שמו המקורי של הממשק היה Open Studio (לפני שפותח ממשק חדש עבור Open Studio).

[210] U.S. D.O.E., 2013b

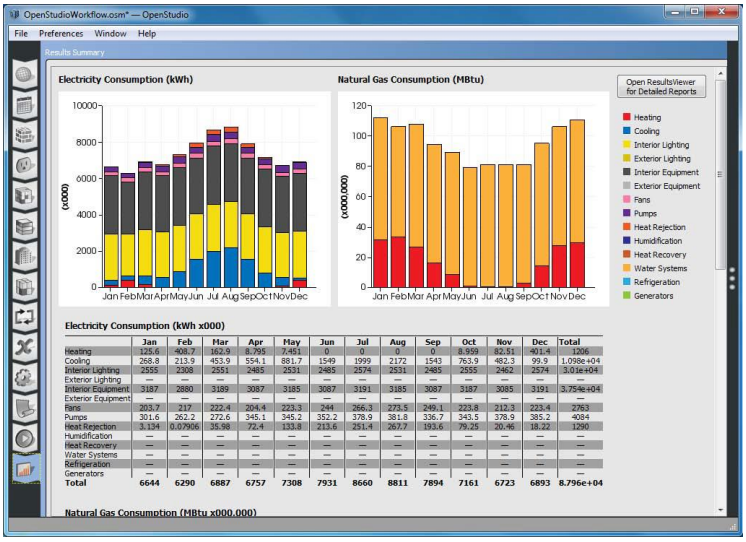
ממשק חינמי זה מאפשר יצירת גיאומטריה דרך תוכנת השרטוט התלת ממדית הפופולארית Google SketchUp הן בגרסה החינמית והן בגרסה המקצועית. בכדי שניתן יהיה לערוך הדמיות באמצעות תוכנת EnergyPlus, יש להזין את הגיאומטריה באמצעות הקישור (plug-in) של הממשק בתוכנת SketchUp, ולא ניתן להשתמש בגיאומטריה אשר נבנתה ישירות ב-SketchUp ללא הקישור. משמע, לא ניתן להשתמש במודלים אשר נערכו על ידי האדריכל (ללא הפלג-אין). לאלו המעדיפים לעבוד עם תוכנת EnergyPlus, השימוש בממשק זה לצורך בניית הגיאומטריה בלבד, והמרת המודל למודל בפורמט תוכנת EnergyPlus, הינה אופציה נוחה מאד. בנוסף, הממשק מאפשר הכנסת נתונים תרמיים ועריכת הדמיות בסיסיות ישירות ב-SketchUp, באמצעות חישובי תוכנת EnergyPlus ברקע (ללא צורך בהפעלה של EnergyPlus על ידי המשתמש). אולם, סוגי הפלט והקלט דרך ממשק זה מוגבלים ביחס לאלו של EnergyPlus. ממשק זה גם מאפשר צפייה נוחה, ובדיקת הגיאומטריה של מודלים אשר נבנו ישירות בתוכנת EnergyPlus (או יובאו אליה מתוכנות אחרות). פיתוח ממשק זה הופסק, מלבד תיקון בעיות והתאמה לעבודה עם גרסאות חדשות של תוכנת EnergyPlus.



**איור יט-10. ממשק Legacy OpenStudio**

## Open Studio

Open Studio (NREL, 2013) הינו ממשק חינמי שפותח על ידי NREL, והחליף את הממשק הישן (אשר כעת מכונה Legacy OpenStudio). הממשק מיועד לתמוך בביצוע הדמיה תרמית באמצעות EnergyPlus והדמיית תאורה טבעית באמצעות תוכנת Radiance. הממשק מאפשר בניית מודל גיאומטרי ב-SketchUp והקניית מאפיינים תרמיים, בדומה לממשק הישן. בנוסף, הוא מספק ממשק גרפי לרבים ממאפייני הקלט (הכולל תבניות בסיס המוגדרות מראש), כלי ליצירת אלטרנטיבות תכנוניות לבחינה, וממשק לצפייה בתוצאות ההדמיה. חיסרון הממשק שאינו מאפשר לייצא מודל לתוכנת EnergyPlus, ללא אובדן של אלמנטים מסוימים אשר נוצרו בממשק ואינם נתמכים בתוכנת EnergyPlus .

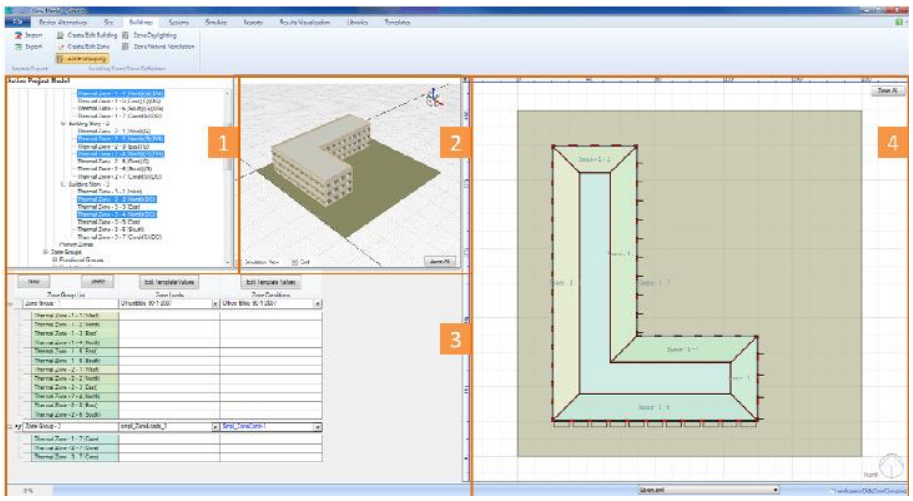



**איור יט-11. ממשק Open Studio**

## Simergy

ממשק Simergy [211] הינו ממשק חינמי נוסף לתוכנת EnergyPlus, אשר פותח לאחרונה עבור הציבור. התוכנה פותחה באמצעות שיתוף פעולה בין מספר גופים ציבוריים ופרטיים. הממשק תוכנן במטרה לפשט את בניית המודל ותהליכי-העבודה הקשורים בעריכת ההדמיה התרמית, במיוחד בתחום הגיאומטריה ושילוב מערכות מיזוג האוויר. התוכנה מאפשרת בניית מודל באמצעות תבניות בסיס שונות, הניתנות לשינוי על ידי המשתמש. וכן, מאפשרת כלים משוכללים להצגת התוצאות.

יתרון נוסף של התוכנה הוא שהיא מאפשרת המרה יחסית נוחה של מודלים מתוכנות BIM. ההמרה מתוכננת כך שברובה תבוצע באופן אוטומטי, והמשתמש רק יידרש לשייך למודל אזורים תרמיים ותבניות שונות (הנדרשות לצורך ההדמיה התרמית). אולם, תוכנות BIM רבות עדיין אינן מספקות גיאומטריה המתאימה למודל תרמי, ולפיכך צוות Simergy ממליץ להשתמש בתוכנה (חינמית) להמרה SBT (Space Boundary Tool). Simergy יכולה לייצא קבצי EnergyPlus, אך יבוא קבצי EnergyPlus באמצעותה הינו חלקי בלבד.



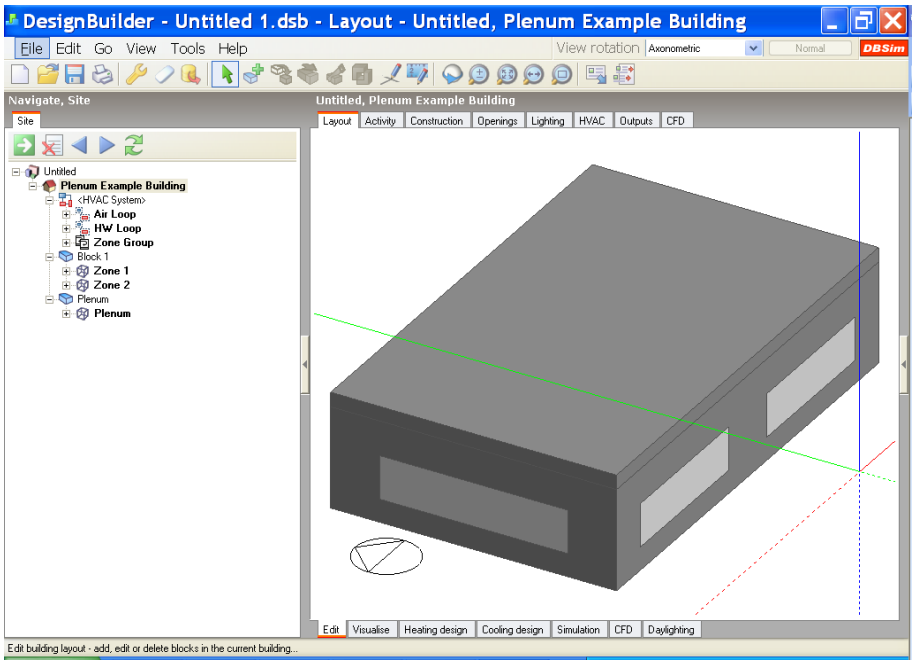

**איור יט-12. ממשק Simergy**

[211] L.B.L., 2013

## DesignBuilder

מאפשר הצגה נוחה של תוצאות לשנה, חודש, יום, שעות, וחלקי שעות; הגדרת מערכות מכניות לחימום וקירור באופן פשוט יחסית; הרצת הדמיות רבות באמצעות שליטה פרמטרית; ויצור קבצי EnergyPlus, המאפשרים הדמיה (באמצעות EnergyPlus) של מאפיינים נוספים (אותם לא ניתן לבחון באמצעות DesignBuilder).

DesignBuilder[212] הינו ממשק מסחרי לתוכנת EnergyPlus. היתרון העיקרי של ממשק זה הינו יכולת השרטוט של אלמנטי הבניין בתלת מימד ותצוגה תלת ממדית של המבנה (באמצעות תמונות וסרטים). באופן זה ניתן לערוך בקלות יחסית הדמיה לגיאומטריות מורכבות. בנוסף, הממשק מאפשר תצוגה של אפקט ההצללה (כולל תצוגת מסלול השמש) וקבלת משוב לגבי עובי אלמנטי הבנייה. יתרון משמעותי נוסף הוא ש-DesignBuilder מספק ערכי ברירת מחדל וכן מאפשר בחירה של תבניות בסיס (Data Templates), ובכך מאפשר עריכת הדמיות בפשטות יחסית ובמהירות. מצד שני הוא גם מאפשר הכנסת נתונים ספציפיים ומפורטים. בנוסף, הממשק מאפשר הצגה נוחה של תוצאות לשנה, חודש, יום, שעות, וחלקי שעות; הגדרת מערכות מכניות לחימום וקירור באופן פשוט יחסית; הרצת הדמיות רבות באמצעות שליטה פרמטרית; ויצור קבצי EnergyPlus, המאפשרים הדמיה (באמצעות EnergyPlus) של מאפיינים נוספים (אותם לא ניתן לבחון באמצעות DesignBuilder).




**איור יט-13. ממשק DesignBuilder**

מלבד השימוש בתוכנת EnergyPlus, DesignBuilder מאפשר הדמיית CFD פשוטה יחסית להפעלה, כולל הגדרת גבולות (boundary conditions) בהתאם לתוצאות הדמיה תרמית באמצעות EnergyPlus. וכן מאפשר הדמיית תאורה טבעית באמצעות תוכנת Radiance.

ממשק DesignBuilder מאפשר ייבוא מודלים תלת-ממדים ממספר תוכנות (כגון ArchiCAD, Revit, Microstation) באמצעות פורמט gbXML. תהליך ההמרה אינו מלא לגמרי, ודורש בדיקה והגדרה ידנית של פרמטרים שונים. המרה חלקית מתוכנות אדריכליות (CAD) לממשק הדמיה תרמית (כגון DesignBuilder) מהווה פתח לטעויות, בשל הצורך בזיהוי הכשלים ותיקונם. ללא

[212] DesignBuilder Software Ltd, 2013

אבחון נכון של הכשלים תוצאות ההדמיה לא תהיינה אמינות. לפיכך רצוי לשקול בנייה של המודל באמצעות יבוא שרטוט דו-ממדי, במקום להיעזר בהמרה חלקית של קובץ תלת-ממד. בנוסף, בכדי לאפשר תהליך יעיל של תכנון הכולל בדיקה מתמשכת של חלופות, רצוי כי שינויים גיאומטריים שנערכו בתוכנה התרמית, יוכלו להיות מיוצאים בחזרה לתוכנות האדריכליות - אולם גם המרה זאת אינה עובדת באופן מושלם עדיין, ודורשת עדכונים. פתרון לבעיות אלו מסופק באמצעות, תוכנת עזר (plug-in) אשר פותחה לאחרונה לתוכנה האדריכלית Revit המאפשר הרצת ההדמיה ע"י ממשק DesignBuilder, ללא צורך המרת קבצים בין התוכנות. מפתחי ממשק DesignBuilder ערכו אימות לתוצאות הממשק באמצעות השוואה לתוצאות של תוכנת EnergyPlus [213] וכן אימות למודל ה-CFD שבממשק מול תוכנת CFD בשם PHOENICS [214].

**ג. IES-VE**

IES-VE (Integrated Environmental Solutions -- Virtual Environment) [215] הינה תוכנת הדמיה תרמית בעלת מאפיינים דומים לאלו של ממשק DesignBuilder. אולם בניגוד ל-DesignBuilder היא אינה ממשק בלבד, אלא כוללת "מנוע" חישוב פנימי (המכונה ApacheSim), אשר מהימנותו נבחנה באמצעות התקן ANSI/ASHRAE Standard 140-2007. התוכנה מאפשרת יכולת שרטוט של אלמנטי הבניין בתלת-ממד, וכן יכולת לייבא מודלים תלת-ממדיים ממספר תוכנות (כגון Sketchup Revit). גם כאן, תהליך ההמרה באמצעות פורמט gbXML אינו שלם, ודורש בדיקה והגדרה ידנית של פרמטרים שונים.

התוכנה כוללת מספר מודלים נוספים המאפשרים הדמיית CFD, כולל הגדרת גבולות (boundary conditions) בהתאם לתוצאות ההדמיה התרמית, הדמיית תאורה טבעית באמצעות חישובי תוכנת Radiance, תצוגה של אפקט ההצללה ומסלול השמש, הגדרת מערכות מכאניות לחימום וקירור, חישוב עלות לאורך כל חיי הבניין (Life Cycle Costing), ותמיכה בחישוב מספר סעיפים לפי תקני בניה ירוקה כגון LEED, ASHRAE 90.1 Appendix G , ו- BREEAM.

## 4. הערות מסכמות

לעיתים קרובות נעשה השימוש בתוכנות הדמיה בידי טכנאים או מתכננים החסרים את המומחיות הנדרשת להבטיח כי תוצאות ההדמיה אכן תהיינה מהימנות. הפיתוי לעשות כן הוא גדול, משום שעצם השימוש בתוכנה יוצר רושם של אמינות ומקצועיות. בפועל, תוצאות ההדמיה תלויות לא מעט במשתמש. ראשית, משום שהתוצאות תלויות בקלט, הכולל, בנוסף לתיאור של הבניין ומערכותיו, גם הנחות בנוגע לדפוסי האכלוס והתנהגות הדיירים. אם הנחות אלו אינן מתקיימות, יתכן כי הבניין יתנהג בצורה שונה מהותית מכפי שנחזה. שנית, משום שתוכנות רבות מאפשרות הדמיות ברמות פירוט שונות, בעיקר בכל האמור לחלוקת הבניין לאזורי משנה. ההגדרות השונות, אף שאינן שגויות במובן הפורמלי, עלולות להיות בעלות השפעה לא זניחה על דיוק התוצאות. לבסוף - כל תוכנה, גם כזו אשר נבדקה על ידי טובי המומחים ונמצאת בשימוש נפוץ, עלולה לסבול מטעויות ('באגים').

אם לאחר אכלוס הבניין מתברר כי ישנם ליקויים מהותיים הנובעים מטעויות בהדמיה, עלול עורך ההדמיה למצוא את עצמו חשוף לתביעה – מצד הדיירים, היזם או הקבלן המבצע. הניסיון בארצות אחרות מראה כי הטענה כי המקור לכשל הוא טעות בתוכנה אינו פותר את המתכנן מאחריות משפטית: יצרן התוכנה חסין מאחריות מתוקף תנאי ההרשאה לשימוש בתוכנה.

[213] DesignBuilder Software Ltd, 2011
[214] Northumbria University
[215] IES Ltd, 2013

## מקורות


[1] Attia, S., Beltrán, L., De Herde, A., & Hensen, J. (2009). "Architect friendly": A comparison of ten different building performance simulation tools. Proceedings of the Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, pp. 204-211.

http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2009/BS09_0204_211.pdf

[2] Autodesk. Autodesk REVIT. Retrieved December, 2013, from http://www.autodesk.com/products/autodesk-revit-family/overview

[3] CELA. (2013). ENERGYui: V3.077. Retrieved December 10, 2013, from http://energyui.com

[4] Crawley D., Hand J., Kummert M. and Griffith B. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. Building and Environment 43:661-673.

[1] DesignBuilder Software Ltd. (2011). ANSI/ASHRAE standard 140-2007 building thermal envelope and fabric load tests: DesignBuilder version 3.0 (incorporating EnergyPlus version 7.0.0) – 15 Dec 2011.

Retrieved December 12, 2013, from

http://www.designbuilder.co.il/files/Documents/ASHRAE_140_v3.0.pdf

[2] DesignBuilder Software Ltd. (2013). DesignBuilder: V3.4. Retrieved December 12, 2013, from http://www.designbuilder.co.uk

[3] EERE. (2013). EnergyPlus energy simulation software. Retrieved December 10, 2013, from http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus

[4] IES Ltd. (2011). Building envelope and fabric load tests performed on ApacheSim in accordance with ANSI/ASHRAE standard 140-2007: ApacheSim version 6.3, January 2011. Retrieved December 12, 2013, from http://www.iesve.com/downloads/help/ve2012/Thermal/Reference/ASHRAE140ApacheSim_Sec5_2_Envelope.pdf

[5] IES Ltd. (2013). Introducing the <Virtual environment>.

Retrieved December 12, 2013, from http://www.iesve.com/software

[6] Kaftan, E. (2012). Daylighting for visual comfort and energy conservation in offices and the Development of methodologies for research in architectural practice. Ph.D. Dissertation, Ben-Gurion University of the Negev, Israel .

[7] L.B.L. (2013). Simergy: V1.0.

Retrieved December 12, 2013, from http://simergy.lbl.gov

[8] L.B.N.L. (Unknown). IFC space boundary tool (SBT).

Retrieved December 12, 2013, from https://gaia.lbl.gov/interoperability/SBT

[9] Neymark, J., & Judkoff, R. (2008). International energy agency building energy simulation test and diagnostic method (IEA BESTEST): multi-zone non-airflow in-depth diagnostic cases: MZ320 – MZ360 No. NREL/TP-550-43827). Colorado: National Renewable Energy Laboratory .

[10] Northumbria University. (Unknown). An inter-program analysis of computational fluid dynamics based on PHOENICS and DesignBuilder software.

Retrieved December 12, 2013, from http://www.designbuilder.co.il/

files/Documents/DesignBuilderCFDValidationVsPhoenics.pdf

[11] NREL. (2013). OpenStudio: 1.1.0.

Retrieved December 12, 2013, from http://openstudio.nrel.gov/

[12] U.S. D.O.E. (2013a). EnergyPlus energy simulation software: Testing and validation.

Retrieved December 10, 2013, from

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/energyplus_testing.cfm

[13] U.S. D.O.E. (2013b). Legacy OpenStudio plug-in for SketchUp: Version 1.0.11. Retrieved December 12, 2013, from

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/openstudio.cfm

[14] USGBC. (2013). LEED: Leadership in energy & environmental design.

Retrieved December 12, 2013, from http://www.usgbc.org/LEED/

# מילון מונחים

# מילון מונחים

**אדבקציה** (advection): (הסעה) של חומר או תכונה בזורם עקב תנועה של מסת הזורם בכיוון מסוים. המונח מבחין בין הסעה אופקית בזורם לבין הסעה אנכית, המכונה 'קונבקציה'.

**אי החום העירוני** (urban heat island): תופעה אשר מתבטאת בעליית הטמפרטורות במרחב העירוני בהשוואה לטמפרטורה של הסביבה הלא-בנויה המקיפה את השטח הבנוי. עוצמת אי החום העירוני משתנה בזמן ובמרחב בהשפעת מזג האוויר ושעות היממה, והא מורגש בעיקר בלילות בהירים ללא רוח.

**אידוי** (evaporation): תהליך שבו נוזל עובר ממצב צבירה של נוזל למצב של גז.

**אידוי-דיות** (evapotranspiration): התהליך שבו צמחייה מאבדת אדי מים אל האטמוספירה, ומהווה סכום של אידוי מים מעל פני השטח ודיות מפיוניות העלים.

**אינפילטרציה** (infiltration): חדירת אוויר לא-מבוקרת לבניין אשר המעטפת שלו אינה אטומה לסביבה.

**אלבדו** (albedo): שיעור קרינת השמש המוחזר מפני השטח. האלבדו נתון בדרך כלל כשבר עשרוני, עם ערכים בין '0' ל-'1'.

**אנרגיה גלומה** (embodied energy): סך כל האנרגיה אשר הושקעה בתהליך הייצור, ההובלה וההתקנה של רכיב בבניין.

**אנתלפיה** (enthalpy): ביטוי לכמות האנרגיה המצויה בחומר. האנתלפיה של אוויר היא הסכום של החום המוחש (sensible heat) והחום הכמוס (latent heat) שלו. בטבלה הפסיכרומטרית מוצגים קווים של אנתלפיה סגולית, שהיא כמות האנרגיה ליחידת מסה של אוויר. יחידות: kJ/kg.

**אפוסיביות תרמית** (thermal effusivity): השורש הריבועי של המכפלה של המוליכות התרמית וקיבול החום [$J/m^2 K s^{0.5}$].

**אפקט הארובה** (chimney effect): אוורור הבניין בהשפעה של הבדל טמפרטורות, כאשר קיים הפרש גובה גדול בין פתח הכניסה (הנמוך) של אוויר חיצוני קריר ופתח היציאה (הגבוה) של אוויר פנימי חם.

**אפקט הריבאונד** (rebound effect): תגובה התנהגותית או מערכתית לאימוץ טכנולוגיה חדשה אשר מביאה לכך שהורדת המחיר מביאה לתועלת קטנה יותר מהצפוי בעקבות הגידול בצריכת המוצר או השירות.

**אקונומייזר** (economizer): התקן במערכת מיזוג אוויר המאפשר לצנן את הבניין באמצעות אוויר חיצוני הנמצא בטמפרטורה נמוכה מהטמפרטורה הפנימית הרצויה.

**בדיקות לאחר אכלוס** (post occupancy evaluation – POE): בדיקת התפקוד של בניין ומערכותיו לאחר שהוא מאוכלס, באמצעות מדידות או סקרים.

**בהיקות פוטומטרית** (luminance): צפיפות שטף האור הנפלט ממקור אור או מוחזר ממשטח בוהק, ליחידת שטח. נמדדת ביחידות של קנדלה/מ$^2$ (candela/$m^2$).

**גג הפוך**: גג אשר בו שכבת הבידוד התרמי נמצאת מעל שכבת האיטום למים.

**גג ירוק**: גג אשר עליו הותקנו תשתית ומצע גידול ונשתלו צמחים המכסים את רוב השטח.

**גגות 'קרירים'** (cool roofs): גגות הצבועים בצבע בעל מקדם החזרה גבוה של קרינת השמש בתחום האינפרה אדום הקרוב.

**גוף אפור** (grey body): גוף בעל פליטות שווה בכל אורכי הגל ובכל הטמפרטורות, שהיא בעלת ערך הנמוך מ-'1'. (גוף בעל פליטות של '1' בכל אורכי הגל והטמפרטורה מכונה 'גוף שחור').

**גוף שחור** (black body): גוף (תיאורטי) הבולע את כל הקרינה הפוגעת בו. גוף שחור הוא בעל מקדם בליעה של '1', וגם בעל פליטות מושלמת.

**גורם אור יום** (daylight factor – DF): היחס בין עוצמת ההארה הטבעית הנמדדת בנקודה נתונה בתוך בניין לבין עוצמת ההארה המתקבלת על משטח אופקי חשוף לשמים מחוצה לו.

**גורם הנחתה** (attenuation factor): שיעור הירידה במהירות הרוח בנקודה נתונה בחופה העירונית, כגון במרכז הקניון, ביחס למהירות הרוח בגובה נתון מעל הגג.

**גמישות הביקוש**: מדד לרגישות של רמת הצריכה לשינויים בגורמים אחרים. מדד הגמישות הנפוץ ביותר מודד את השינוי בכמות הנצרכת כתוצאה משינוי במחיר של מוצר או שירות.

**גפ"מ – גז פחמימני מעובה**: גז המשמש לבעירה במערכות חימום או בישול, בדרך כלל פרופאן או בוטאן.

**דיפוסיביות תרמית** (thermal diffusivity): היחס בין המוליכות התרמית לבין קיבול החום הנפחי. (מ$^2$/שנייה).

**הולכה** (conduction): מעבר חום בין פרודות שכנות במוצק כתוצאה ממפל טמפרטורה בחומר. הולכה אינה דורשת תנועה של חומר במרחב.

**היוון** (capitalization of profits): תהליך של המרת עלויות או תועלות כספיות מתקופות שונות לסכום אחד, שווה ערך במושגים של שנת בסיס מסוימת.

**הסעה** (convection): תנועה של פרודות החומר בזורם המביאה למעבר של אנרגיה ומסה. הסעה היא סכום של דיפוזיה ואדבקציה בזורם.

**התנגדות תרמית** (thermal resistance): התנגדות למעבר חום דרך יחידת שטח של גוף בהשפעת הפרש טמפרטורה של 1 קלווין בין צידו האחד לצידו השני. יחידות: מ"ר קלווין לואט ($m^2K/W$).

**התנגדות תרמית פנית**: ההתנגדות למעבר חום בין גוף מוצק לבין זורם (אוויר או גז) הנמצא במגע איתו. ההופכי של ההעברות התרמית הפנית. יחידות: מ"ר קלווין לואט ($m^2K/W$).

**העברות אור** (visible transmittance): החלק היחסי מקרינת השמש בתחום הנראה לבני אדם העובר דרך הזיגוג. הסימון יכול להופיע באחוזים או כשבר עשרוני.

**העברות תרמית** (thermal transmittance): קצב מעבר חום ליחידת שטח של אלמנט בניין לכל מעלת קלווין של ההפרש בין טמפרטורת האוויר בצידו האחד לטמפרטורת האוויר בצידו השני. יחידות: ואט למ"ר קלווין ($W/m^2K$).

**העברות תרמית פנית**: קצב מעבר החום ליחידת שטח בין אלמנט בניין לבין האוויר הגובל בו, לכל קלווין של ההפרש בין טמפרטורת פני האלמנט לטמפרטורת האוויר. יחידות: ואט למ"ר קלווין ($W/m^2K$).

**חברת שירותי אנרגיה** (Energy Services Company – ESCO): חברה המממנת פעולות התייעלות ושיפוץ של בניין, ונהנית מהתקבולים מהבעלים המחושבים על בסיס החיסכון באנרגיה של הבניין ומערכותיו בהשוואה למצב הבסיס.

**חום אנתרופוגני** (anthropogenic heat): חום הנפלט כתוצאה מפעילות בני האדם, לרבות חום הנפלט מבניינים, כלי רכב ואף החום המטבולי של בני האדם עצמם.

**חום האידוי** (latent heat of vapourization): כמות האנרגיה הדרושה על מנת לאדות יחידת נפח של נוזל הנמצא בטמפרטורת הרתיחה.

**חום כמוס** (latent heat): כמות האנרגיה הדרושה (או מתקבלת) כאשר חומר משנה את מצב הצבירה מנוזל לגז (או מגז לנוזל).

**חום מוחש** (sensible heat): אנרגיה המתבטאת בעליית הטמפרטורה של חומר.

**חום סגולי** (specific heat): כמות האנרגיה הדרושה להעלאת הטמפרטורה של יחידת מסה של חומר ב-1 קלווין. יחידות: ג׳אול לק״ג קלווין (J/kg K).

**חומרי זיגוג** (glazing materials): זכוכית, פלסטיק או כל חומר אחר המאפשר העברת אור.

**חימום בקליטה ישירה** (direct gain): חימום באמצעות קרינת שמש אשר חודרת לחלל הבניין דרך פתחים מזוגגים הפונים אל השמש.

**חימום פסיבי**: חימום הבניין באנרגיה מהסביבה (בדרך כלל קרינת השמש) ללא שימוש במערכות מכניות או השקעת אנרגיה ממקורות מתכלים.

**חלון העונות**: מערכת זיגוג ניסיונית אשר מאפשרת להמיר קרינת שמש בחום לפי צרכי המשתמש בהתאם לעונות השנה, באופן שתורם לחימום הבניין בחורף ומפחית את קליטת החום בקיץ.

**טמפרטורה אופרטיבית** (operative temperature): טמפרטורת הגולה היבשה של כדור ׳שחור׳ דמיוני המקיף אותה ואשר בו חילופי האנרגיה של אדם עם סביבתו בקרינה והסעה יהיה שווים לאלו המתקיימים בסביבה האמיתית.

**טמפרטורת גולה יבשה** (dry bulb temperature): טמפרטורת אוויר הנמדדת במדחום בסביבה שבה מאזן הקרינה הוא ניטרלי, המדחום יבש ואין אידוי או עיבוי של מים. יחידות: $^{o}C$ או K.

**טמפרטורת גולה לחה** (wet bulb temperature): טמפרטורת האוויר המתקבלת כאשר לתוך נפח נתון של אוויר מאדים מים בתהליך אדיאבטי עד שהתערובת מגיעה לרוויה.

**טמפרטורת צבע** (correlated colour temperature): הטמפרטורה של גוף שחור אידיאלי אשר היה פולט קרינה בעלת גוון זהה לגוון של האור הנראה בפועל. נמדדת בקלווין.

**טמפרטורה קורנת ממוצעת** (mean radiant temperature – MRT): הטמפרטורה הקורנת הממוצעת בנקודה היא הטמפרטורה (האחידה) של כדור ׳שחור׳ דמיוני המקיף אותה ויוצר מאזן קרינה שווה לזה של הסביבה האמיתית.

**טמפרטורת כדור שחור** (globe temperature): הטמפרטורה הנמדדת במרכזו של כדור שחור, ומושפעת מהמאזן בין הקרינה הפוגעת בכדור לבין איבוד האנרגיה בהסעה. הכדור עשוי נחושת, בקוטר של 100 או 150 מ״מ, או לעיתים כדור פינג פונג בקוטר 40 מ״מ.

**ימי מעלה להסקה** (heating degree days): מדד להשפעת האקלים על הדרישה לחימום בניינים במקום מסוים בהתבסס על טמפרטורת האוויר בלבד. המדד מחושב כסכום השנתי של ההפרשים בין טמפרטורת ייחוס קבועה (בדרך כלל – 18.3 מעלות) לבין הטמפרטורה היומית הממוצעת של האוויר בכל אחד מימות השנה אשר בהם הטמפרטורה נמוכה מטמפרטורת הייחוס.

**ימי מעלה לקירור** (cooling degree days): מדד להשפעת האקלים על הדרישה למיזוג בניינים במקום מסוים. המדד מחושב כסכום השנתי של ההפרשים בין הטמפרטורה היומית הממוצעת של האוויר בכל אחד מימות השנה לבין טמפרטורת ייחוס קבועה בכל אחד מימות השנה אשר בהם טמפרטורה זו גבוהה מטמפרטורת היחוס.

**יום לתכנון** (design day): קובץ נתונים מטאורולוגיים המייצגים את מכלול התנאים שלפיהם יש לתכנן את המעטפת והמערכות בבניין, עבור תנאי קיצון חמים או קרים.

**יעילות אורית** (luminous efficacy): עוצמת האור (הנראה) עליו מגיבה עין האדם ביחס לאנרגיה הכוללת של מקור האור. נמדדת ביחידות לומן/ואט (lumen/watt).

**לחות יחסית** (relative humidity): היחס בין תכולת אדי המים באוויר לבין תכולת אדי המים שהיו מביאים את האוויר לרוויה, באותה טמפרטורה ובאותו לחץ אטמוספירי. יחידות: %.

**לחות מוחלטת** (absolute humidity): המסה של אדי מים באוויר ליחידת נפח של אוויר יבש. יחידות: $g/m^3$ או $kg/m^3$.

**לחץ אדים חלקי** (partial vapour pressure): אותו חלק מהלחץ האטמוספירי הנמדד כתוצאה מנוכחותם של אדי מים באוויר. יחידות: mb או kPa.

**מאזן אנרגיה** (energy balance): ההבדל בין סך האנרגיה הנכנסת וסך האנרגיה היוצאת ממערכת פיסית. אם המאזן חיובי, המערכת מתחממת; כאשר הוא שלילי היא מתקררת.

**מדד מסירת הצבע** (colour rendering index - CRI): היכולת של מקור אור להאיר עצמים באופן שיאפשר לראותם בגוון הטבעי, כפי שמתקבל באור של מנורת ליבון תקנית. למדד ערכים בין 0 ל-100 (מסירת צבע מושלמת).

**מדד שטח העלים** (leaf area index – LAI): היחס בין השטח הכולל של העלים של צמח (מתחשבים בצד אחד של כל עלה או בהיטל השטח עבור צמחים מחטניים) להיטל של השטח הכולל של הצמחייה על הקרקע.

**מדד SRI** (solar reflectance index): מדד מורכב המבטא את ההשפעה של האלבדו של משטח והפליטות שלו על מאזן האנרגיה שלו. הוא מחושב כך שערכו עבור משטח שחור סטנדרטי יהיה ׳0׳, ומשטח לבן סטנדרטי יהיה בעל ערך של ׳100׳.

**מדף אור** (light shelf): אלמנט המותקן מעט מתחת לחלקו העליון של החלון, בצידו החיצוני, הפנימי או בשניהם גם יחד, המיועד לכוון את אור השמש לעבר תקרת החדר ולאפשר פיזור אחיד יותר של ההארה הטבעית בחלל.

**מוליכות תרמית** (thermal conductivity): ראו העברות תרמית.

**מזגן אינוורטר** (inverter – variable refrigerant flow – VRF): מזגן שבו ניתן לשנות את ספיקת נוזל הקירור על ידי שינוי מהירות הסיבוב של המדחס.

**מחסום אדים** (vapour barrier): שכבה רציפה בקיר אשר מיועדת להפחית מעבר של אדי מים.

**מחסום אוויר** (air barrier): שכבה רציפה בקיר אשר מיועדת להפחית מעבר אוויר לא רצוי (אינפילטרציה).

**מיקרו-אקלים** (microclimate): מכלול התנאים השוררים במרחב מצומצם אשר שונים מהתנאים בסביבה. מאפייני מיקרו-אקלים כגון טמפרטורה, מהירות רוח ומאזן קרינה עשויים להשתנות בטווח של מספר סנטימטרים ועד כמה קילומטרים, ומושפעים מהתכונות הפיסיות של הסביבה המיידית וכן מהאקלים באזור כולו.

**מנת ממדים** (של רחוב) (aspect ratio): היחס H/W בין הגובה הממוצע של אלמנטים אנכיים כגון חזיתות הבניינים המגדירות חלל (H) לבין רוחב החלל (W), הנתון על ידי המרחק בין הקירות בשני צידי החלל.

**מערכת סולרית תרמו-סיפונית לחימום מים**: מערכת סולרית שבה סחרור המים בין הקולטים לבין מיכל האגירה מתבצע כתוצאה מהפרשי הצפיפות בין מים חמים (שהינם קלים יותר) למים הקרים (שהם כבדים יותר), ללא צורך במשאבה.

**מערכת זיגוג** (glazing system): מערכת במעטפת החיצונית של בניין הכוללת יחידת זיגוג אחת או יותר ויכולה לכלול גם מסגרת, פרופילים המחלקים את השמשה ואמצעי הצללה אינטגרליים.

**מערכת מידע גיאוגרפי** – ממ"ג (GIS): מערכת אשר באמצעותה ניתן לאגור, לעבד, לערוך לנתח ולהציג מידע גיאוגרפי בצורה המתאימה לשימוש ביישומים שונים כגון חישה מרחוק או מדידת קרקע.

**מצנן מדברי** (desert cooler): מתקן המספק אוויר חיצוני לבניין אשר קורר במגע עם מים הנמצאים על פני מזרונים לחים. המתקן כולל בנוסף למזרונים הלחים מפוח חשמלי, משאבת סחרור למים ומערכת צינורות להרטבת המזרונים.

**מקדם הבליעה** (absorptivity): הנטייה של חומר לבלוע קרינה הפוגעת בפני השטח. הבליעה תלויה בזווית הפגיעה של הקרניים הפוגעות ובאורך הגל של הקרינה. הבליעה נתונה בדרך כלל כשבר עשרוני, עם ערכים בין ′0 ל-′1. הבליעה של גוף כלשהו והפליטות שלו זהים עבור כל זווית, אורך גל וטמפרטורה.

**מקדם הצללה** (shading coefficient – SC): היחס בין רווח החום הסולרי ליחידת שטח של הזיגוג כתוצאה מפגיעת קרינת השמש בה לבין רווח החום המתקבל בשמשת ייחוס בעובי 3 מ"מ. ניתן להמיר את מקדם ההצללה למקדם רווח חום סולרי של שמשה על ידי מכפלה בערך 0.87.

**מקדם פעולה** (coefficient of performance – COP): היחס בין תפוקת הקירור לבין האנרגיה המושקעת בהפעלת המתקן.

**מקדם רווח חום סולרי** (solar heat gain coefficient – SHGC): היחס בין רווח החום הסולרי ליחידת שטח של הזיגוג כתוצאה מפגיעת קרינת השמש בה, לבין שטף הקרינה הפוגעת.

**מקדם הבליעה** (absorptivity): החלק היחסי מתוך כלל הקרינה אשר פוגעת במשטח אשר נבלעת בו. המקדם יקבל ערך בתחום בין ′0 ל-′1.

**מקדם ההחזרה** (reflectivity): החלק היחסי מתוך כלל הקרינה אשר פוגעת במשטח אשר מוחזרת ממנו. המקדם יקבל ערך בתחום בין ′0 ל-′1.

**מקדם ההעברה** (transmissivity): החלק היחסי מתוך כלל הקרינה אשר פוגעת במשטח אשר עוברת בו מבלי שהיא מוחזרת ממנו או נבלעת בחומר. המקדם יקבל ערך בתחום בין ′0 ל-′1.

**משאבת חום** (heat pump): מתקן תרמי המיועד להעביר אנרגיה בכיוון הפוך למפל הטבעי של הטמפרטורות. משאבת חום עשויה לפעול כמזגן בקיץ, ולסלק עודפי חום מהבניין אל סביבה חיצונית חמה יותר, וכמתקן חימום בחורף השואב אנרגיה מהסביבה אל תוך הבניין.

**נוחות תרמית** (thermal comfort zone): שילוב של גורמים סביבתיים שבהם מרבית האנשים צפויים להרגיש בנוח, בהתחשב בפעילות המטבולית שלהם ובלבוש. את תחום הנוחות אפשר לתאר על גבי גרף שבו שני הצירים מציגים ערכי טמפרטורת הגולה היבשה של האוויר והלחות יחסית שלו, אך ישנן גם שיטות אחרות.

**נורות ליבון** (incandescent light): נורות אשר בהן האור מופק על ידי חימום תיל מתכתי דק בעל התנגדות חשמלית גבוהה עד לטמפרטורה שבה החומר פולט אנרגיה בתחום הנראה.

**נורות פריקה**: נורות אשר בהן האור מופק כאשר הזרם החשמלי גורם לפריקת גז הנמצא בשפופרת זכוכית.

**ננומטר** (nanometer): יחידת אורך השווה לחלק הביליון של מטר ($10^{-9}$).

**נקודת טל** (dew point): טמפרטורת אוויר המתקבלת כאשר מקררים אוויר עד לרוויה, ללא תוספת או גריעה של אדי מים. יחידות: $^{o}C$ או K.

**סנוור ליקוי** (disability glare): סנוור המביא להפחתה ביכולת להבחין בפרטים, אם כי לא בהכרח כרוך באי-נוחות.

**סנוור טורד** (discomfort glare): הימצאותם של מוקדי אור בוהקים מאוד בשדה הראייה גורמים לאי-נוחות, גם ללא (בהכרח) הפחתה ניכרת ביכולת להבחין בפרטים.

**עלות אלטרנטיבית, עלות ההזדמנות** (opportunity cost): העלות של ויתור על חלופה מסוימת.

**עצמת הארה** (illuminance): כמות האור הפוגעת ביחידת שטח. נמדדת ביחידות של לוקס (lux).

**עקומה פוטומטרית**: עקומה פולרית המייצגת את עוצמת האור המתקבלת ממקור הנמצא במרכז מערכת הצירים.

**ערך נוכחי נקי** (net present value – NPV): ערכה הנוכחי של סדרת תשלומים אשר יתקבלו (או ישולמו) בתקופות שונות.

**פוטו-וולטאי** (photovoltaic – PV): שיטה להמרת אנרגית שמש חשמל בזרם ישר באמצעות תאים סולריים עשויים מוליכים למחצה אשר בהם פוטונים של אור הנבלעים בחומר גורמים לעירור של אלקטרונים לרמת אנרגיה גבוהה.

**פליטות** (emissivity): הנטייה של גוף לפלוט אנרגיה בקרינה, בהשוואה לגוף שחור באותה טמפרטורה. את הפליטות נהוג לציין כשבר עשרוני, עם ערכים בין ׳0׳ ל-׳1׳.

**פנות** (orientation): האזימוט אליו פונה קרן הניצבת למישור האלמנט בבניין, כגון חלון או קולט שמש.

**ציפוי בעל פליטות נמוכה** (low-e coating): ציפוי שקוף המיושם על זכוכית אשר הפליטות שלו עבור קרינה בתחום האינפרה אדום קטנה מ-0.1.

**קוט״ש שיא** (kilowatt-peak – kWp): יחידת המידה התקנית להספק של מערכת פוטו-וולטאית להפקת חשמל, המבטאת את ההספק המתקבל כאשר התאים חשופים לשטף קרינת שמש של 1 קילוואט למ״ר.

**קיבול חום נפחי** (volumetric heat capacity): כמות האנרגיה הנדרשת להעלות את הטמפרטורה של יחידת נפח של חומר נתון במעלה אחת. קיבול החום שווה למכפלה של החום הסגולי והצפיפות של החומר.

**קירור מבני** (structural cooling): צינון של מסת הבניין, בדרך כלל באמצעות אוורור לילה. קירור מבני, אשר עשוי להתקיים גם כאשר הבניין אינו מאוכלס, מאפשר להקטין את דרישת האנרגיה למיזוג בשעות השיא.

**קירור באידוי** (evaporative cooling): צינון האוויר הבא במגע עם מים. במהלך האידוי חום מוחש באוויר הופך לחום כמוס, בתהליך אשר מביא לירידה בטמפרטורה אך עלייה בלחות.

**קירור פסיבי** (passive cooling): קירור הבניין או השוהים בו באמצעות פליטה של עודף חום אל הסביבה הטבעית ללא שימוש במערכות מכניות וללא צריכה של אנרגיה ממקורות מתכלים.

**קירור בקרינה** (radiative cooling): פליטה של עודף חום אל הסביבה באמצעות קרינה בגלים ארוכים. קירור בקרינה מתקיים כאשר קצב פליטת החום בקרינה גבוה מקצב הבליעה של קרינה מהסביבה, בדרך כלל בלילה.

**קולט שמש שטוח** (flat-plate solar collector): קולט לחימום מים הכולל לוח מתכת שטוח אשר קולט את קרינת השמש ומעביר את האנרגיה למים הזורמים בצינורות דקים הצמודים אליו.

**קולט צינורות ואקום** (evacuated tube solar collector): קולט לחימום מים אשר בו הצינור המוביל את המים נמצא במרכזו של צינור בקוטר גדול יותר אשר ממנו נשאב האוויר ומשמש לבידוד תרמי מהסביבה.

**קרינה בגלים ארוכים** (long wave radiation): קרינה אלקטרו-מגנטית באורך גל של 3-100 מיקרון.

**קרינה בגלים קצרים** (short wave radiation): קרינה אלקטרו-מגנטית באורך גל של 0.15-3 מיקרון.

**קרינה ישירה** (direct beam radiation): קרינת שמש המגיעה ישירות מהשמש, ואשר נמדדת במישור ניצב לכיוון הקרניים.

**קרינה מוחזרת** (reflected radiation): קרינה (בדרך כלל קרינת שמש) אשר מוחזרת מהקרקע, צמחייה או בניינים.

**קרינה מפוזרת** (diffuse radiation): קרינת שמש מפוזרת על ידי האטמוספירה, לרבות עננים, ואשר לפיכך מגיעה מכל כיפת הרקיע.

**ראייה סקוטופית** (scotopic vision): ראיית לילה, המתאפשרת באמצעות תאי המקלונים על רשתית העין.

**ראייה פוטופית** (photopic vision): ראיית יום, המתאפשרת באמצעות תאי החרוטים על רשתית העין.

**שכבת גבול** (boundary layer): החלק של הזורם הנמצא סמוך לגוף מוצק ומושפע מהקרבה אליו.

**שנה מטאורולוגית אופיינית** (typical meteorological year – TMY): קובץ נתוני אקלים הכולל נתונים שעתיים בו-זמניים של מספר משתנים מטאורולוגיים, המייצג את השונות האופיינית במהלך השנה במקביל לשימור ערכים ממוצעים התואמים את הממוצע הרב-שנתי למקום.

**תהליך אדיאבטי** (adiabatic process): תהליך תרמו-דינמי שבו כמות האנתלפיה במערכת אינה משתנה.

**תחושה תרמית** (thermal sensation): האופן שבו בני האדם חשים את הסביבה התרמית, בהשפעת מכלול הגורמים התורמים למאזן התרמי של גוף האדם לרבות טמפרטורת האוויר, הלחות, מאזן הקרינה, תנועת האוויר, סוג הביגוד ורמת הפעילות המטבולית.

**תסמונת הבניין החולה** (sick building syndrome): אוסף של תסמינים כגון עייפות, גירוי בריריות יובש בעיניים או כאבי ראש אשר חווים אנשים כתוצאה מהשהות בבניין ואשר אין להם גורם מחולל מוגדר אחר.

**תעו"ז – תעריף לפי עומס וזמן**: שיטה לחישוב מחיר החשמל אשר בה נקבע תעריף גבוה יותר לצריכה בשעות השיא ותעריף נמוך יותר בשעות השפל.

**תקופת פירעון** (payback period): פרק הזמן הנדרש להחזיר את ההשקעה.

**תקן**: מסמך שבו מפורטות הדרישות המינימאליות החלות על מוצר, מלאכה או על שירות, על מנת שיתאימו לייעודם.

**תקן וולונטרי**: תקן ישראלי שנקבע על ידי מכון התקנים הישראלי ופורסם ברשומות, אך אינו מאוזכר בתקנות התכנון והבנייה או במסמך מחייב אחר.

**תקן מחייב**: תקן ישראלי שנקבע על ידי מכון התקנים הישראלי ופורסם ברשומות, ומאוזכר בתקנות התכנון והבנייה או במסמך מחייב אחר.

**תקן רשמי**: תקן אשר הוכרז על ידי משרד הכלכלה.

# המחברים

**(לפי האלפבית)**

## פרופ' אביתר אראל

## (פרקים א, ב, ג, ד, ה, ו, ז, ח, י, יב, טז, יז)

אביתר אראל הוא בוגר הפקולטה לאדריכלות ובינוי ערים בטכניון, מוסמך אוניברסיטת בן גוריון במחלקה לגיאוגרפיה ותכנון סביבתי ובעל תואר דוקטור מן הפקולטה לארכיטקטורה של אוניברסיטת אדלייד, אוסטרליה. הוא חבר סגל במכונים לחקר המדבר בקמפוס שדה בוקר של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב משנת 1986. תחום עיסוקו האקדמי העיקרי הינו אנרגיה בסביבה הבנויה, ומחקריו בוחנים סוגיות שונות הקשורות לחימום וקירור פסיבי של בניינים, תאורה טבעית בבניין ומיקרו-אקלים עירוני. הוא פעיל בתחום התקינה והיה שותף בשנים האחרונות לניסוח ועדכון רבים מהתקנים הישראלים העוסקים באנרגיה בבניינים.

## מהנדס יצחק ברבי

## (פרק ט)

מהנדס יצחק ברבי הוא בוגר הטכניון בהנדסת מכונות במגמת אנרגיה וחום, וקודם לכן בוגר בית ספר בוסמ״ת של הטכניון במגמת טכנאי מיזוג אויר. הוא עבר את כל שלבי המקצוע המעשיים החל מטכנאי מיזוג אויר וכלה כמהנדס ביצוע. ב-1990 פתח חברת עצמאית - ״יצחק ברבי מהנדסים ויועצים בע״מ״ - העוסקת בתכנון מערכות מיזוג אויר, חיסכון באנרגיה, מערכות שחרור אש ועשן, איוורור תעשייתי, מתקני תברואה והסקה מרכזית, מערכות כבוי אש וספרינקלרים, גזים רפואיים ותיאום מערכות. יצחק משמש כיום (2015) כיו״ר איגוד מהנדסי התברואה והמתקנים התרמיים העצמאים בישראל.

## ד"ר אורי דומן

## (פרקים יא, יג)

ד״ר אינג׳ אורי דומן, מהנדס חשמל ואלקטרוניקה, תואר ראשון, הנדסת חשמל ואלקטרוניקה,(I.E.R.E, UK), תואר שני, M.Sc. Intelligent Buildings, (University of Reading, UK). תואר שלישי, Ph.D, חקר ביצועים, (Pecs University, Hungary). בעל משרד מהנדסים משנת 1973, עסק ועוסק במגוון נושאים התייעלות אנרגטית, מקורות אנרגיה חלופיים, תאורה על כל היבטיה ״ובתים חכמים״. פעיל בארץ ובחו״ל. מכהן כיו״ר וועדת מומחים ״לבתים חכמים״, חבר וועדת מומחים בתחום מערכות פוטוולטאיות במכון התקנים וכחבר בוועדה טכנית 206 (תאורה). חבר ועמית במספר אירגוני מהנדסים מובילים בעולם : CIBSE/SLL. ILP, IET, IEEE. בשנים האחרונות, עוסק בטיפוח והכשרת דור ההמשך בתחום החשמל בכלל והאנרגיה והתאורה בפרט.

## ד"ר דוד כץ

## (פרק טו)

ד״ר דוד כץ הוא מרצה מן המניין בחוג לגאוגרפיה ולימודי סביבה באוניברסיטת חיפה, שם הוא מלמד גם בביה״ס לניהול. תחומי המחקר העיקריים שלו הם מדיניות וכלכלה סביבתית. המחקרים האחרונים שלו עסקו, בין היתר, בתמריצים לחסכון בצריכת משאבים ובהערכות של תועלות כלכליות משירותי מערכת אקולוגיים. דוד הוא בעל דוקטורט במדיניות משאבי טבע וסביבה מאוניברסיטת מישיגן. לפני הצטרפותו כחבר סגל באוניברסיטת חיפה הוא לימד בביה״ס לניהול ובביה״ס ללימודי סביבה באוניברסיטת תל אביב, שם היה מנהל של המכון לעסקים וסביבה.

## ד"ר אינה ניסנבאום

## (פרק יד)

אינה ניסנבאום היא מהנדסת חשמל ואלקטרוניקה בוגרת אוניברסיטת תל אביב בפקולטה להנדסת חשמל ואלקטרוניקה, שם סיימה גם את לימודי הדוקטורט. היא בעלת משרד לתכנון תאורה ומעבדה למדידות תאורה מוסמכת מטעם הרשות הלאומית להסמכת מעבדות. היא מלמדת ומרצה במסגרות שונות כגון אוניברסיטת תל אביב והמוסד לבטיחות וגהות. היא מתמחה בתכנון תאורה, תכנון תאורת חרום, חיסכון באנרגיה והשפעת התאורה על בריאות האדם. אינה מייסדת ויו"ר האגודה הישראלית לתאורה ומובילה ייזום התקינה והתקנות בארץ בתחום המאור.

## ד"ר ערן קפטן

## (פרק יט)

ערן קפטן בעל תואר שלישי מאוניברסיטת בן גוריון, המחלקה לאדריכלות מדברית, ותואר ראשון ושני באדריכלות מאוניברסיטת אריזונה, מגמת תכנון אדריכלי לחיסכון באנרגיה. הוא מייסד מחקר ואקו-אדריכלות (Research & EcoDesign), משרד תכנון וייעוץ לשימור אנרגיה וקיימות במבנים, השגת נוחות אקלימית, ויישום הדמיות אקלימיות ממוחשבות. ערן מפתח מודל לחישוב הצללה אופטימאלית, אשר שולב בתוכנות Ecotect-Autodesk ו- Shaderade (של אוניברסיטת הרווארד), ומרצה במגוון קורסי בנייה ירוקה.

## אינג' עדה רויטגור

## (פרק יח)

עדה רויטגור היא בוגרת הפקולטה להנדסת בניין של המכון הפוליטכני במינסק, ברה"מ, עם התמחות במערכות בניין. בארץ השתתפה בתכנון מבני ציבור רבים, שמשה רפרנטים של מתקני הדגמה ויועצת בלשכת יעוץ לחיסכון אנרגיה של משרד התשתיות, האגף לשימור אנרגיה. היא ריכזה ועדות להכנת תקנים בנושאים של בנייה ירוקה, אנרגיה בבניינים ומערכות אחרות, במכון התקנים ישראלי.

# מפתח נושאים

אדבקציה ..... 375
אי החום העירוני ..... 30, 31, 32, 33, 375
אידוי 54, 55, 57, 63, 131, 175, 176, 177, 178, 180, 181, 375, 377
אינפילטרציה 45, 73, 89, 117, 175, 331, 332, 375, 378
אלבדו ..... 128, 375
אנרגיה גלומה ..... 127, 133, 228, 375
אנתלפיה ..... 55, 56, 180, 375
אפוסיביות תרמית ..... 53, 375
אפקט הארובה ..... 91, 375
אפקט הריבאונד ..... 285, 328, 329, 330, 375
אקונומייזר ..... 182, 375
בדיקות לאחר אכלוס ..... 375
בהיקות ..... 276, 375
גג הפוך ..... 121, 123, 311, 312, 375
גג ירוק 125, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 286, 375
גגות 'קרירים' ..... 127, 375
גוף אפור ..... 376
גוף שחור ..... 376, 377
גורם אור יום ..... 376
גורם הנחתה ..... 376
גמישות הביקוש ..... 284, 285, 376
גפ"מ ..... 186, 376
דיפוסיביות תרמית ..... 52, 376
הולכה 10, 41, 47, 81, 148, 150, 261, 352, 376
היוון 283, 287, 293, 298, 311, 315, 316, 376
הסעה ..... 41, 45, 62, 192, 352, 375, 376
העברות אור ..... 144, 153, 345, 376
העברות תרמית ..... 153, 345, 376, 378
התנגדות תרמית .. 47, 49, 50, 103, 104, 107, 110, 111, 116, 118, 125, 136, 361, 376
חברת שירותי אנרגיה ..... 376
חום אנתרופוגני ..... 376
חום האידוי ..... 57, 180, 376
חום כמוס ..... 56, 175, 179, 377
חום מוחש ..... 46, 56, 175, 377, 380
חום סגולי ..... 51, 52, 57, 106, 180, 377
חומרי זיגוג ..... 43, 148, 377
חימום בקליטה ישירה ..... 377
חימום פסיבי ..... 141, 155, 377
חלון העונות ..... 377
טמפרטורה אופרטיבית ..... 71, 377
טמפרטורה קורנת ממוצעת ..... 70, 71, 377
טמפרטורת גולה יבשה ..... 55, 71, 377
טמפרטורת גולה לחה ..... 56, 377
טמפרטורת כדור שחור ..... 70, 377
טמפרטורת צבע ..... 258, 266, 377
יום לתכנון ..... 19, 34, 377
ימי מעלה להסקה ..... 27, 377
ימי מעלה לקירור ..... 377
יעילות אורית ..... 266, 268, 272, 378
לחות יחסית ..... 27, 55, 56, 180, 352, 378
לחות מוחלטת ..... 55, 378
לחץ אדים חלקי ..... 55, 378
מאזן אנרגיה ..... 66, 69, 356, 378
מדד SRI ..... 128, 378
מדד מסירת הצבע ..... 258, 378
מדד שטח העלים ..... 378
מדף אור ..... 166, 167, 378
מוליכות תרמית 46, 47, 48, 49, 50, 52, 53, 104, 106, 107, 121, 124, 127, 136, 145, 146, 310, 347, 378
מזגן אינוורטר ..... 378
מחסום אדים ..... 117, 118, 378
מחסום אוויר ..... 117, 126, 378
מיקרו-אקלים ..... 27, 28, 29, 30, 32, 36, 378
מנת ממדים ..... 378
מערכת זיגוג .... 81, 141, 145, 146, 149, 165, 345, 347, 377, 379
מערכת מידע גיאוגרפי ..... 379
מצנן מדברי ..... 177, 379
מקדם הבליעה ..... 43, 87, 145, 379
מקדם ההחזרה ..... 32, 43, 122, 145, 379
מקדם ההעברה ..... 43, 379
מקדם הצללה ..... 379
מקדם פעולה ..... 173, 188, 379
מקדם רווח חום סולרי ..... 144, 147, 153, 379

משאבת חום 188, 189, 192, 193, 194, 225, 226, 379
נוחות תרמית 61, 62, 64, 66, 93, 100, 162, 171, 179, 206, 322, 330, 352, 379
נורות ליבון 259, 260, 261, 266, 379
נורות פריקה 259, 261, 262, 263, 379
ננומטר 233, 256, 379
סנוור טורד 163, 380
סנוור ליקוי 163, 380
עלות אלטרנטיבית 286, 380
עצמת הארה 163, 274, 380
עקומה פוטומטרית 258, 380
ערך נוכחי נקי 287, 294, 298, 304, 315, 380
פוטו-וולטאי 100, 232, 233, 242, 247, 380
פליטות 5, 6, 11, 128, 145, 146, 153, 227, 244, 300, 304, 376, 380
פנות 161, 380
קוט"ש שיא 380
קולט צינורות ואקום 221, 222, 381
קולט שמש שטוח 380
קיבול חום נפחי 52, 53, 380
קירור באידוי 32, 56, 175, 176, 180, 181, 380
קירור בקרינה 380
קירור מבני 90, 95, 380
קירור פסיבי 380
קרינה בגלים ארוכים 42, 45, 62, 380, 381
קרינה בגלים קצרים 42, 44, 62, 381
קרינה ישירה 381
קרינה מוחזרת 62, 381
קרינה מפוזרת 62, 158, 164, 381
ראייה סקוטופית 381
ראייה פוטופית 381
שכבת גבול 28, 45, 50, 381
שנה מטאורולוגית אופיינית 35, 36, 354, 381
תהליך אדיאבטי 56, 381
תחושה תרמית 381
תסמונת הבניין החולה 191, 254, 381
תעו"ז 8, 204, 238, 284, 381
תקופת פירעון 288, 293, 381
תקן 25, 26, 36, 93, 100, 103, 104, 117, 118, 152, 159, 211, 220, 277, 278, 280, 283, 293, 313, 321, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 353, 355, 359, 362, 381
תקן וולונטרי 342, 345, 346, 347, 381
תקן מחייב 381
תקן רשמי 278, 381
תרמו-סיפונית 217, 378