



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute

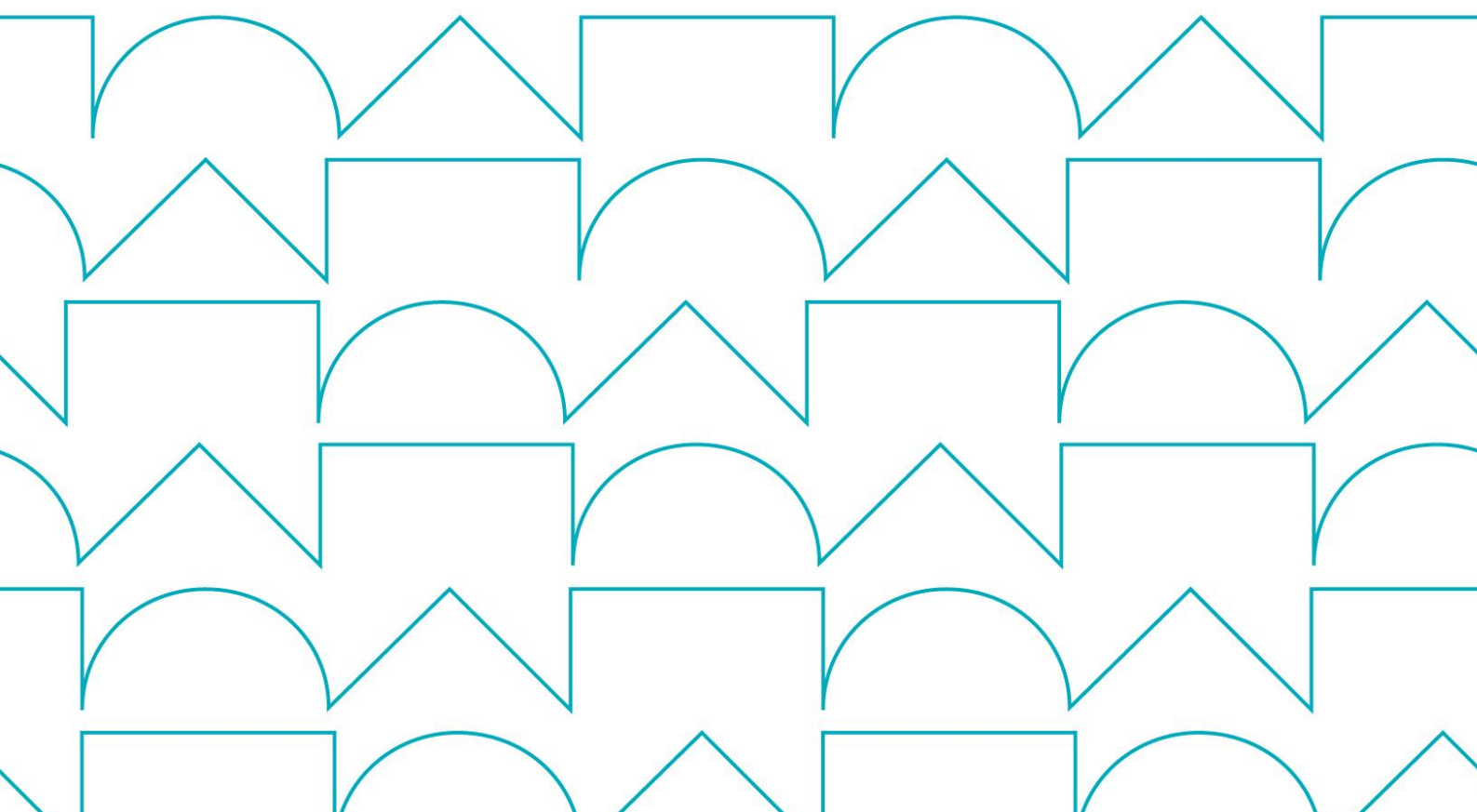


לקראת בינוי ירוק בעידן 5.0: אופטימיזציה תרמית של רכיבים

אדריכלים מודפסים בתלת ממד

אוהד מיוחס ארנון בנטור אהרון שפרכר

יצחק מאיר





מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון
הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



2033611

לקראת בינוי ירוק בעידן 5.0: אופטימיזציה תרמית של רכיבים אדריכלים מודפסים בתלת ממד

אדר' אוהד מיוחס פרופ' ארנון בנטור פרופ' אהרון שפרכר

פרופ' יצחק מאיר
אוניברסיטת בן-גוריון בנגב

מלווי מחקר :

מהנדס יונתן אופק מהנדסת תום ארן אדר' ניר חן מהנדס יוסי סיקולר

בהזמנת משרד הבינוי והשיכון

הזמנה מס' 4502243646

Copyright © 2025 by O. Meyuhas, A. Bentur and A. Sprecher

The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

דצמבר 2025

חיפה

כסלו תשפ"ו

המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003, Israel | **National Building Research Institute**, Technion City, Haifa 3200003, Israel
e-mail: nbri@tx.technion.ac.il | טל. 972-4-8292242/3 | פקס. 972-4-8324534
<http://nbri.net.technion.ac.il>

"למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר/ים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ והטכניון – מכון טכנולוגי לישראל, אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדו"ח ו/או לצד ג' כלשהו, עקב המחקר ו/או דו"ח זה או בהקשר אל מי מהם כמו גם בקשר ליישום האמור בו. מבלי לגרוע מן האמור לעיל, מובהר בזאת כי יישום תוצאות המחקר יהיה באחריותו הבלעדית של המיישם".

צוות המחקר

הטכניון

אוהד יעקב מיוחס^{1,2}, פבל לריאונבסקי^{2,3}, עופר פינקלשטיין^{1,2}, ארנון בנטור^{2,3}, אהרון שפרכר^{1,2}

¹ הפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

² המרכז לייצור מתקדם – המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

³ המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

אוניברסיטת בן גוריון בנגב

יצחק מאיר^{1,3}, דוד פרלמוטר^{2,3}, וולפגנג מוצפי-האלר^{3,4}

¹ המחלקה להנדסה אזרחית וסביבתית, הפקולטה למדעי ההנדסה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב (אב"ג)

² מדעי הסביבה, גיאואינפורמטיקה ותכנון ערים, הפקולטה למדעי הרוח והחברה, אב"ג

³ אדריכלות ובינוי ערים במדבר, המכונים לחקר המדבר, אב"ג

⁴ TerraVision Lab

תוכן העניינים

6.....	תקציר מנהלים
7.....	מבוא
8.....	בנייה מסורתית של קירות חוץ בישראל
8.....	פערים והזדמנויות
9.....	העקרון הטכנולוגי
9.....	מטרת המחקר
10.....	מתודולוגיה
13.....	פיתוח תערובת צמנטית לבנה - בחירה אסטרטגית לאקלים חם
14.....	תכנון ועיצוב - מהדפסת תאים פתוחים לתאים סגורים
17.....	אתגרים, פיתוח חלופות והכנה לניסוי שטח
22.....	ניתוח ההתנהגות התרמית של תאי בטון מודפסים
35.....	סיכום ומסקנות

רשימת איורים

- איור 1 ניסיונות עיצוב בגישה הרווחת 15
- איור 2 הדפסת העיצובים השונים בגישה הרווחת 15
- איור 3 ניסוי עיצובי מתקדם בגישה הרווחת 16
- איור 4 הגישה המוצעת – תאים סגורים 17
- איור 5 תצורת התאים שנבחרה לאחר ניסיונות הדפסה מרובים 19
- איור 6 התפתחות חתכי התאים בשלוש חלופות – Large ו Small, Medium 20
- איור 7 תהליך הדפסת האלמנטים 21
- איור 8 שינוע האלמנטים למבחן שטח 21
- איור 9. מימין: סקיצת מיקום התאים ומידות 23
- איור 10. סדר התאים ומספורם 24
- איור 11. מדידות חודש פברואר 25
- איור 12. מדידות חודש אפריל 27
- איור 13. מדידות חודש יוני 28
- איור 14. מדידות חודש יוני - מיקוד בתאריך 12.06 29
- איור 15. מדידות חודש יולי 30
- איור 16. מדידות חודש יולי - מיקוד בתאריך 12.07 31
- איור 17. הבדלים מורפולוגיים במבנה התאים וייחוסם להתנהגות התרמית שלהם 33
- איור 18. הבדלים מורפולוגיים במבנה התאים וייחוסם להתנהגות התרמית שלהם 33

תקציר מנהלים

מחקר זה מציג חידוש בתחום הבנייה התלת-ממדית, עם דגש על שיפור הביצועים התרמיים של קירות בטון מודפסים. המחקר בוצע בשיתוף בין המרכז לייצור מתקדם בבנייה בטכניון ולאוניברסיטת בן-גוריון ומציע חלופה מעשית לבניית הבלוקים המסורתית.

ממצאים מרכזיים:

במסגרת המחקר פותחה תערובת צמנטית לבנה המתאימה להדפסה תלת-ממדית, לצד מערכת פנימית של תאי אוויר כלואים וסגורים המיועדים לקירות. דגמים בקנה מידה אדריכלי ($100 \times 60 \times 100$ ס"מ, עובי דופן 20 ס"מ) הודפסו ושימשו לבדיקות תרמיות.

בוצעה השוואה למעטפת קיר מבוססת בלוקים (בנייה מסורתית), ונבחנו שלושה גדלים שונים של תאים פנימיים מודפסים (Small, Medium, Large), במסגרת ניסוי שדה שנמשך שנה מלאה בתנאי האקלים של הנגב.

הממצאים הצביעו על כך שתצורת התאים הקטנה (small) היא בעלת ביצועים תרמיים משופרים בהשוואה לבלוק בטון סטנדרטי ("בלוק 20").

משמעות למשק:

השיטה/הטכנולוגיה שפותחה היא בעלת פוטנציאל ליישום בענף הבנייה בישראל לצורך שיפור היעילות התרמית של מעטפות מבנה, הפחתת צריכת אנרגיה לחימום וקירור, האצת תהליכי ביצוע, צמצום שימוש בחומרי גלם והפחתת תלות בכוח אדם. נוסף על כך, השיטה מאפשרת חופש תכנוני רחב יותר ומשחררת את המעטפת האדריכלית מן הצורה הגנרית המוכתבת כיום על ידי חומרי גלם מסורתיים ושיטת הבלוקים המקובלת. יתרון נוסף הוא האפשרות לקבלת גימור איכותי ישירות מתהליך ההדפסה, ללא צורך בשכבת טיח נוספת, הודות לפיתוח תערובות הדפסה היוצרות פני שטח דחוסים ועמידים, בעלי גימור ויכולות ספיגה המזכירות חיפוי אבן.

מבוא

מעטפת הבניין משמשת כמחסום בין הסביבה הפנימית והחיצונית של המבנה. לאור כך, קיים מחקר ענף בעולם בנושא זה במטרה להביא לשיפור ולייעול את השימוש באנרגיה במבנים.

התכנון התרמי של מעטפת הבניין הוא קריטי להשגת נוחות תרמית וחיסכון באנרגיה בפרט בישראל, מקום בו ישנה שונות באקלים בין אזורים שונים (אקלים מדברי חם בדרום ואקלים ים תיכוני בחוף ואקלים הררי במרכז).

כיום, הפתרון הנפוץ בישראל הוא בניית קירות רב-שכבתיים ע"י שימוש באלמנטים בעלי כושר בידוד גבוה. כך למשל בלוק הבטון "20" (20×20×40 ס"מ) הוא האלמנט הסטנדרטי לבנייה, וכולל ארבעה חללים פנימיים "מלאים" באוויר ומשמשים לבידוד תרמי.

במחקר קודם שבוצע באוניברסיטת בן-גוריון¹ נמצא כי בלוקים אלו מפחיתים את צריכת האנרגיה הראשונית במעל-25% לעומת בטון יצוק, בעיקר בזכות שימוש מופחת במלט (10-12%) המאפשר מסה נמוכה יותר. עם זאת, שיטת בנייה זו מוגבלת בעיצוב, גמישות תכנונית, וזמן ביצוע.

בשנים האחרונות גובר העניין בטכנולוגיית הדפסת תלת-ממד בבנייה, במיוחד בשימוש בחומרים צמנטיים. המוטיבציה המרכזית היא שיפור הפריון וחיסכון בטפסנות, חומרים וכוח אדם. תחום זה נמצא כיום במוקד של מחקר פעיל, לצד יישומים בשטח, בעיקר בפרויקטי הדגמה בקנה מידה קטן, כפי שמתועד במספר סקירות עדכניות.^{2,3,4,5}

מחקר זה שם דגש על ההיבט התרמי של בנייה מודפסת, ובוחן כיצד ניתן לנצל את החופש הגאומטרי שמציעה טכנולוגיית ההדפסה כדי לייצר אלמנטים מורכבים בעלי ביצועים תרמיים משופרים. באמצעות השוואת קירות מודפסים לקירות סטנדרטיים, נבדקת יכולת ההתמודדות התרמית של מערכות מודפסות גדולות בקנה מידה אדריכלי.

¹ Huberman, N., & Pearlmutter, D. (2008). A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, 40(5), 837–848. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.06.002>

² Gibbons et al., 2010, Gibbons, G. J., Williams, R., Purnell, P., & Farahi, E. (2010). 3D Printing of cement composites. *Advances in Applied Ceramics Structural Functional and Bioceramics*, 109(5), 287–290. <https://doi.org/10.1179/174367509x12472364600878>

³ Gosselin et al., 2016, Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, 100, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>

⁴ Labonnote et al., 2016, Labonnote, N., Rönquist, A., Manum, B., & Rütger, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>

⁵ Ma et al. 2018, 2022, Ma, G., Buswell, R., Da Silva, W. R. L., Wang, L., Xu, J., & Jones, S. Z. (2022). Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. *Cement and Concrete Research*, 156, 106774. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106774>

בנייה מסורתית של קירות חוץ בישראל

בנייה מסורתית בישראל מבוססת על מערכות בלוקים ומהוות את הפתרון הסטנדרטי והרווח ביותר למעטפת מבנים בישראל. בלוקים אלו משמשים הן למילוי קירות בין עמודי בטון במבנים רבי קומות, הן כמערכת נושאת והן כמעטפת במבנים נמוכים ובבנייה חד-משפחתית (להלן: "בנייה מסורתית"). לאור כך, מחקר זה מתמקד בפיתוח אלמנט קיר מודפס ואפקטיביות שלו בהשוואה למערכות בלוקים אלו.

מערכות בלוקים נפוצות

בלוק בטון "20" ובלוק בטון "20 תרמי": הם בלוקי הבטון הסטנדרטיים בישראל הכוללים ארבעה חללים פנימיים היוצרים תעלות אוויר אורכיות רציפות. מבנה זה מספק בידוד תרמי בסיסי משופר ביחס לבטון מלא, אך מוגבל בגמישות עיצובית ובביצועים תרמיים.

בלוק איטונג (AAC): בלוק מבטון תאי מאושפר באוטוקלב, בעל מבנה נקבובי אחיד המכיל עד 80% אוויר כלוא. מקנה בידוד תרמי משמעותי, אך בעל חוזק מכני נמוך יחסית ורגיש ללחות.

מגבלות הבניה המסורתיות:

- גאומטריה קבועה ומוגבלת;
- תלות בתעשייה מרוכזת וייצור מקומי;
- זמני אספקה והתקנה ארוכים;
- הגבלת חופש עיצוב;
- אי התאמה לתנאים אקלימיים ספציפיים.

פערים והזדמנויות

טכנולוגיית ההדפסה בתלת-ממד מאפשרת ייצור של אלמנטים גיאומטריים מורכבים. עם זאת, הפוטנציאל לשימוש ומימוש פלטפורמה זו לפיתוח רכיבי בניין יעילים ורב-תפקודיים עדיין אינו מנוצל וממומש במלואו. ודוק, מרבית הפרויקטים לשימוש בפלטפורמה זו, מתמקדים בשחזור אלמנטים מסורתיים בשיטות חדשות, אך אינם מתמקדים ביישום האיכויות הייחודיות של הדפסת תלת-ממד על מנת להשיג חופש גאומטרי, שילוב חומרים בזמן אמת, ושיפור הביצועים התרמיים, האקוסטיים, והמבניים של האלמנט המודפס, תוך התאמה לדרישות תרמיות, אקוסטיות, קונסטרוקטיביות ותשתיות ספציפיות.

מאמרם של הייזוד וניקולס⁶ מדגיש את הפער בין היכולת הטכנולוגית לבין היישום המוגבל בפועל. מחקר זה מתמקד ביכולת של הדפסה תלת-ממדית לייצר מערכות קיר מורכבות הכוללות תאים פנימיים סגורים, במטרה לחקות ואף לשפר את הביצועים התרמיים של בלוקי הבטון הנפוצים. בשונה מבלוקים מסורתיים, שכוללים גאומטריה פשוטה של ארבעה חללים אשר בבניית קיר יוצרים חללים אורכיים רציפים, ההדפסה התלת-ממדית מאפשרת עיצוב צורני מותאם לביצועים. גישה זו מאפשרת עיצוב של חללים סגורים במטרה להגיע לאיזון אופטימלי בין בידוד תרמי למסה תרמית.

העקרון הטכנולוגי

העיצוב של תאים קטנים וסגורים מבוסס על כך שאוויר כלוא משמש כמבודד תרמי טבעי ויעיל, כל עוד נמנעת ממנו תנועה. אוויר בעל מוליכות תרמית נמוכה ($W/m \cdot K$, כ-0.025) מעביר חום בקצב איטי יחסית. כאשר הוא כלוא בחללים קטנים וסגורים, נמנעת תנועה קונבקציונית פנימית והולכת החום פוחתת באופן משמעותי.

ככל שהתאים אטומים וקטנים יותר, כך פוחתת היכולת של מולקולות האוויר לנוע בתוכם, תהליך התורם באופן ישיר להפחתת מעבר החום. על כן, חללים אלו מאפשרים שמירה על מסה תרמית מינימלית, המסייעת בהתאמת המבנה לאקלים חם ומשתנה.

גישה זו, המיושמת במחקר זה, שואבת השראה מגישות קודמות כמו זו המוצעת במחקר של דלימנס ושותפים⁷, ומנצלת את החופש הצורני שמציעה הדפסת תלת-ממד כדי לייצר מערך חללים מותאם לביצועים תרמיים ממוקדים.

מטרת המחקר

מטרת המחקר היא להציע אלטרנטיבה פרקטית לבנייה מסורתית (לקירות בלוקים מסורתיים). במחקר מוצגת הדגמה של גישה המשלבת יחדיו -עיצוב, חומר, ותהליך ייצור לשיפור הביצועים התרמיים – המתאימים לתנאים אקלימיים משתנים ובפרט לאקלים הארץ ישראלי, בדגש על הנגב. בהתאם, המחקר דרש פיתוח פתרונות הדפסה הניתנים ליישום בקנה מידה אדריכלי תוך בחינת השפעת גודל התאים הפנימיים (הממלאים את חלקם הפנימי של הקירות) על המוליכות התרמית של הקיר בהשוואה לקיר בלוקים מסורתי.

⁶ Heywood, K., & Nicholas, P. (2023). Sustainability and 3D concrete printing: Identifying a need for a more holistic approach to assessing environmental impacts. *Architectural Intelligence*, 2(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s44223-023-00030-3>

⁷ Dielemans, G., Briels, D., Jaugstetter, F., Henke, K., & Dörfler, K. (2021). Additive Manufacturing of Thermally Enhanced Lightweight Concrete Wall Elements with Closed Cellular Structures. *Journal of Facade Design and Engineering*, 9(1), 59–72. <https://doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5418>

מתודולוגיה

שלב 1: פיתוח עיצובי

התהליך החל בחיפוש צורני שיטתי לפיתוח מבנה גאומטרי של מילוי פנימי בתאים סגורים לקיר. התהליך כלל יישום והבנה של מגבלות ויתרונות תהליך הדפסת החומר הצמנטי, בדגש על המגבלות הטכנולוגיות של תהליך ההדפסה:

1. רציפות ההדפסה: תהליך זה מחייב הדפסה רציפה ללא עצירות;
2. מהירות אחידה: תנאי קריטי לעובי דופן יציב - מהווה אתגר בתכנון מסלול ההדפסה. נדרש לחלק את המסלול לסגמנטים שווי-אורך מבלי לפגוע בגאומטריה, כדי לאפשר תנועה רציפה וקצב זרימה אחיד של הרובוט;
3. קצב זרימה: שמירה על קצב זרימה אחיד של החומר המחייב התחשבות באורך הסגמנטים המודפסים;
4. אופטימיזציה מבנית: כדי להוריד את המסה הכוללת של המבנה המודפס ולצמצם את מעברי החום, העיצוב חייב תכנון מוקדם שיצמצם את עובי החיבורים והתפרים

שלב 2: פיתוח תערובת צמנט לבנה

פיתוח תערובת צמנט לבנה המותאמת לדרישות הבאות:

דרישות הדפסה: התערובת חייבת להיות ניתנת לזרימה חלקה דרך מערכת ההדפסה תוך שמירה על עקביות ואיכות השכבות המודפסות.

דרישות תרמיות: השימוש בצמנט לבן נובע מתכונותיו האופטיות המיוחדות - צבעו הבהיר מאפשר החזרה גבוהה יותר של קרינה סולארית (אלבדו גבוה) ובכך מפחית את בליעת החום בקיר. תכונה זו חיונית במיוחד באקלים ישראלי חם כמו זה של הנגב, שם הפחתת עומסי החימום הסולארי יכולה לשפר משמעותית את הביצועים התרמיים של המבנה.

דרישות אדריכליות: הצמנט הלבן מאפשר קבלת גימור נקי ואחיד ישירות מתהליך ההדפסה, ומייתר את הצורך ביישום גמרים נוספים או שכבות טיח. תערובת ההדפסה פותחה כך שתיצור פני שטח דחוסים ועמידים, בעלי גימור המזכיר חיפוי אבן. פני השטח הבהירים מאפשרים ביטוי עיצובי ואסתטי רחב, תוך שמירה על אטימות גבוהה של המעטפת.

שלב 3: בחינת הדפסה ותיקון עיצוב

שלב זה כלל הדפסות ניסיון לזיהוי כשלי הדפסה וחזרה איטרטיבית על העיצוב. התהליך כלל התמודדות עם בעיות טכניות כמו אורך סגמנטים המשפיע על עובי דופן ההדפסה, חסימות בזרימה, אי-יציבות מבנית במהלך ההדפסה, ותיקון פרמטרים גאומטריים להתאמה לתהליך הייצור לאמנטיים בקנה מידה אדריכלי.

שלב 4: בחינה דיגיטלית של העיצוב

ביצוע סימולציות דיגיטליות לבחינת הביצועים התרמיים של העיצובים השונים לפני מעבר לשלב הייצור הפיזי. כלי זה אפשר אופטימיזציה מוקדמת של הפרמטרים הגיאומטריים והערכה של היעילות התרמית הצפויה.

שלב 5: ייצור בקנה מידה אדריכלי

בשלב זה הודפסו ארבעה אלמנטים אדריכליים לצורך בחינה ניסויית בקנה מידה מלא. כל אלמנט עוצב כיחידת קיר בממדים של 100×100 ס"מ ובגובה 60 ס"מ, עם עובי דופן של 20 ס"מ וחלל פנימי בנפח של כ-60 סמ"ר. מידות אלה נבחרו כך שידמו לקיר בלוקים מסורתי ויאפשרו השוואה ישירה. האלמנטים הודפסו בגרסאות שונות, שכללו מערכות תאים פנימיים סגורים בתצורות שונות (Small, Medium, Large). מטרת השונות הייתה לבחון כיצד שינוי בגודל התאים משפיע על הביצועים התרמיים. נמצא כי הגדלת ממדי התאים הפנימיים הפחיתה את כמות חומר ההדפסה הנדרשת ואת משקל האלמנט הכולל. לצורך ייחוס, נבנה קיר נוסף מבלוקים תרמיים מסורתיים במידות $20 \times 20 \times 40$ ס"מ, אשר שימש כבסיס להשוואה בין השיטות.

שלב 6: מבחן שטח באקלים אמיתי

בשלב זה הוצבו האלמנטים המודפסים באזור הנגב (מדרשת שדה בוקר) למשך שנה שלמה, במטרה לבחון את התנהגותם התרמית לאורך כל עונות השנה. ההצבה נעשתה במסגרת מעקב ניסיוני בתנאים אקלימיים אמיתיים, בשיטה המוצעת במחקרם של חייק ושותפים⁸. שיטה המאפשרת בחינה ישירה של תגובת הקירות לעומסי חום בקיץ, לקרה בחורף ולמעברי עונות. שלב זה מספק בסיס נתונים מקיף להערכת יעילותם של העיצובים בתנאים חיצוניים משתנים.

סיכום שלבי הביצוע והתוצאות

התהליך כולו כלל מעבר הדרגתי מהגדרת צורניות ותערובות מותאמות, דרך ניסויי הדפסה וסימולציות דיגיטליות, ועד לייצור אלמנטים אדריכליים בקנה מידה מלא והצבתם לניסוי שטח מתמשך. במהלך ההשוואה בין שלושת עיצובי הקירות (Small, Medium, Large) נמצא קשר הפוך בין גודל התאים למסה הכוללת: תאים קטנים יותר העלו את מסת הקיר, בעוד שתאים גדולים יותר הקטינו את המסה אך אפשרו תנועת אוויר מוגברת - תופעה המובילה להגברת מעבר החום בהסעה (קונבקציה).

⁸ Haik, R., Peled, A., & Meir, I. A. (2020). The thermal performance of lime hemp concrete (LHC) with alternative binders. Energy and Buildings, 210, 109740. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109740>

האלמנטים הוצבו באזור הנגב למשך שנה, במסגרת מעקב ניסיוני בתנאים אקלימיים אמיתיים, במטרה לבחון את השפעת עונות השנה על התנהגותם התרמית ולאפשר הערכה כמותית ומבוססת של ביצועי העיצובים.

פיתוח תערובת צמנטית לבנה - בחירה אסטרטגית לאקלים חם

במסגרת המחקר פותחה תערובת הדפסה ייעודית המבוססת על צמנט לבן (CEM I White). בחירה זו אינה מונעת משיקולים אסתטיים בלבד, אלא מהווה החלטה אסטרטגית המבוססת על שיקולים תרמיים, סביבתיים ואדריכליים, המותאמים לאקלים הישראלי החם. מעבר לתכונותיו האופטיות-הפחתת בליעת החום ושיפור הביצועים התרמיים של המעטפת, הצמנט הלבן מאפשר קבלת גימור אחיד וישייר מתהליך ההדפסה, ללא צורך בשכבות טיח או יישום גמרים נוספים.

פיתוח התערובת במנת מים נמוכה מאפשר יצירת פני שטח דחוסים ועמידים, בעלי גימור המזכיר חיפוי אבן וערכי ספיגה נמוכים, ופותח אפשרויות רחבות לביטוי עיצובי ואסתטי תוך שמירה על איכות ואטימות גבוהה של המעטפת.

הצבע הבהיר של הצמנט הלבן מתורגם למקדם החזרה (אלבדו) גבוה משמעותית של קרינה סולארית. במחקרם של Levinson Akbari, נמצא כי בטון מצמנט אפור מאופיין באלבדו סולארי ממוצע של 0.35-0.40, בעוד שבטון מצמנט לבן מגיע לערכים של 0.70-0.80 כשהוא חדש. גם לאחר חשיפה ממושכת לתנאי סביבה, בטון לבן שומר על אלבדו של 0.40-0.60, עדיין גבוה משמעותית מבטון אפור⁹.

להבדל זה השלכה משמעותית במיוחד באקלים חם ושטוף שמש כמו זה של ישראל. משטח בהיר יותר בולע פחות אנרגיה תרמית מקרינת השמש, ובכך מפחית את עומסי החימום על מעטפת הבניין. תופעה זו קריטית במיוחד באזורים כמו הנגב, שם הקרינה הסולארית חזקה לאורך רוב חודשי השנה וטמפרטורות החוץ גבוהות.

שיקולים נוספים

מעבר לתרומה התרמית, לשימוש בצמנט לבן קיימים יתרונות נוספים הרלוונטיים להקשר הישראלי:

- **הפחתת אפקט אי-החום העירוני** – משטחים בהירים ברחבי העיר מחזירים יותר קרינה ומסייעים להפחתת טמפרטורת האוויר הכוללת בסביבה הבנויה;
- **עמידות אופטית לאורך זמן** – הצבע הבהיר של הצמנט הלבן שומר על יציבותו ואינו דוהה במהירות, ובכך שומר על תכונות ההחזר שלו לאורך שנים;
- **גמישות אסתטית** – הצבע הלבן מהווה בסיס נייטרלי המאפשר שילוב פיגמנטים בהירים שונים, מבלי לפגוע במקדמי ההחזר וביעילות התרמית של המעטפת.

⁹ Levinson, R., & Akbari, H. (2002). Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete. Cement and Concrete Research, 32(11), 1679–1698. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00835-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00835-9)

תכנון ועיצוב - מהדפסת תאים פתוחים לתאים סגורים

הגישה הרווחת

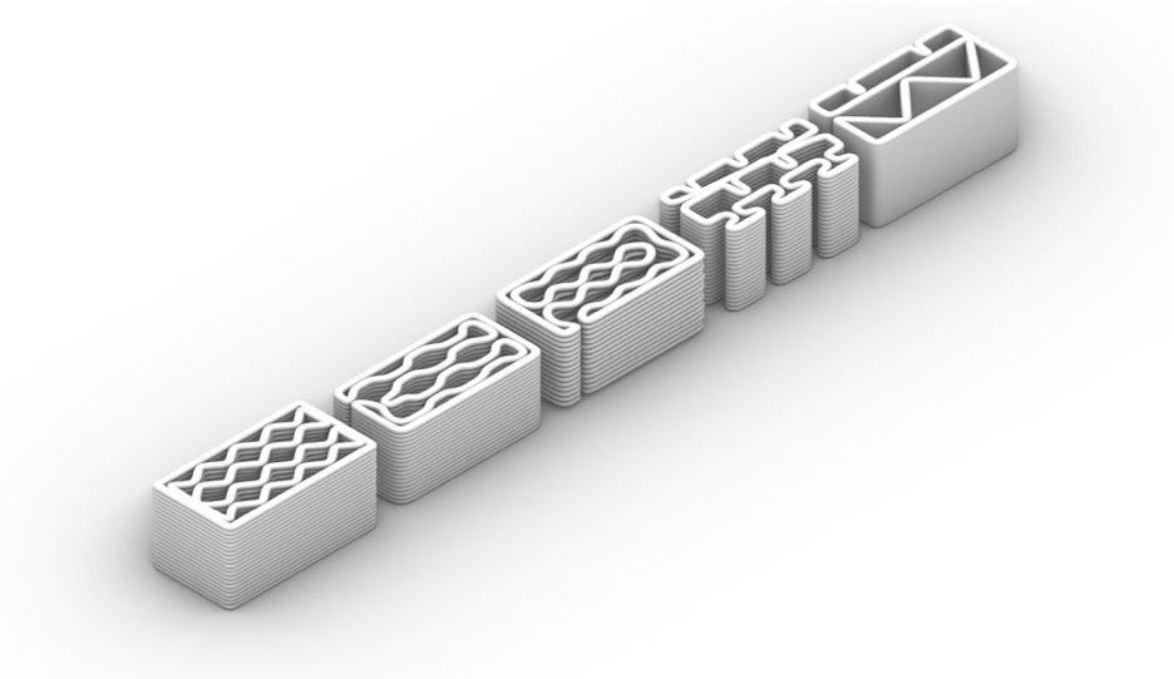
מרבית המחקרים והיישומים בהדפסת קירות צמנטים בתלת-ממד מאמצים גישה הדומה לעקרון של בלוקי הבטון המסורתיים – יצירת חללים אנכיים רציפים המשתרעים לכל גובה הקיר. בגישה זו מודפסים תאים פתוחים השומרים על חתך אופקי אחיד, כך שנוצרת צורה אקסטרודית (Extruded) לאורך כל האלמנט.

היתרון המרכזי של שיטה זו טמון בפשטות ההדפסה ויעילותה הטכנולוגית: היא מאפשרת שמירה על רציפות זרימה וקצב שיחול אחיד של החומר, מבלי להידרש לשינויי מהירות או להתמודדות עם אתגרים גיאומטריים כגון בליטות, זוויות חדות או שינויי חתך פתאומיים – אשר בדרך כלל מחייבים הוספת תמיכות, האטה בתנועת הרובוט או שינוי בפרמטרי ההדפסה. בכך נשמרים רוחב וגובה אחידים של השכבות, והייצור הופך יעיל יותר מבחינה טכנולוגית.

עם זאת, לשיטה זו קיימות מגבלות תרמיות מהותיות:

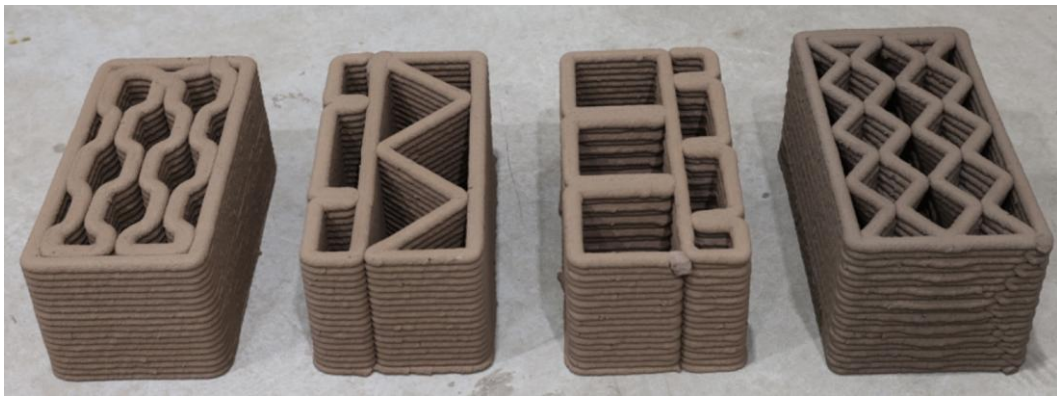
תנועת אוויר קונבקציונית פנימית - כאשר התאים פתוחים לאורך האנך, נוצרת זרימת אוויר טבעית: אוויר חם עולה מעלה, אוויר קר יורד מטה, ותנועה זו מייצרת לולאת הסעה רציפה המאיצה את מעבר החום דרך הדופן. בקיץ, לדוגמה, האוויר המתחמם בצד החיצוני של הקיר עולה מעלה ומוחלף באוויר קריר מלמטה, ובכך מתאפשר מעבר חום מוגבר.

חדירת אוויר חיצוני - פתחים או חוסר אטימות בראש ובתחתית הקיר מאפשרים חדירה של אוויר חיצוני, מה שמבטל למעשה את יתרון הבידוד של האוויר הכלוא.



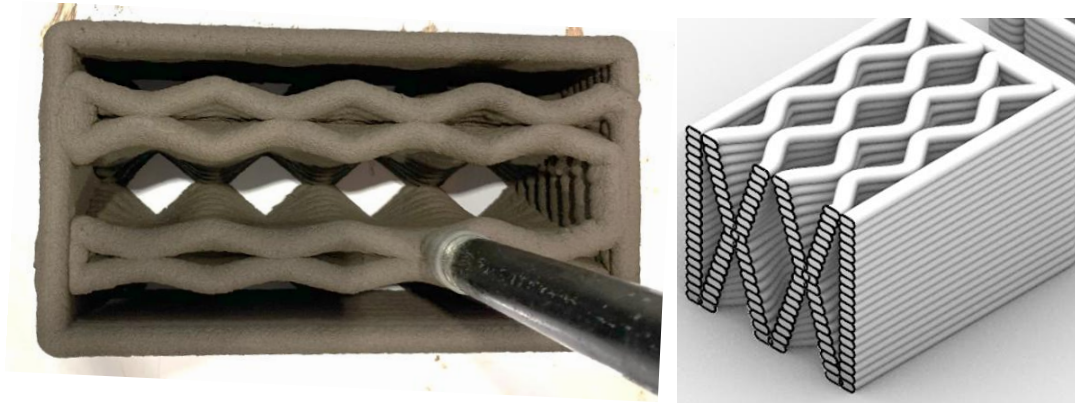
איור 1: ניסיונות עיצוב בגישה הרווחת – מסלולי הדפסה: תאים פתוחים אורכיים, בדומה למבנה הפנימי של בלוק 20 המסורתי.

הגישה עושה שימוש בחלוקה מרובה של תאים פנימיים ובאפקט של הצללה עצמית, תוך ניסיון לצמצם היווצרות גשרים תרמיים מצד לצד.



איור 2: הדפסת העיצובים השונים בגישה הרווחת: ניסוי ייצור לבחינת התנהגות תאים פתוחים אורכיים, בדומה לבלוק 20 המסורתי.

ההדפסות אפשרו לבחון הצללה עצמית, חלוקה פנימית מרובה ואופן היווצרות גשרים תרמיים מצד לצד.



איור 3: ניסוי עיצובי מתקדם בגישה הרווחת – הדפסת תצורה פנימית מורכבת שמרחיקה ומקרבת את הדפנות הפנימיות, במטרה לצמצם גשרים תרמיים בין המעטפת הפנימית לחיצונית. הצלחת הניסוי והבנת מגבלותיו הובילו לפיתוח הגישה החדשה של תאים סגורים במחקר הנוכחי.

גישת המחקר

מחקר זה מציע גישה שונה מהותית מהגישה הרווחת של תאים פתוחים אנכיים. במחקר זה פיתחנו שיטת הדפסה של מילוי פנים בתאים סגורים הכולאים את האוויר הפנימי ומבודדים אותו מהסביבה החיצונית. ההחלטה למעבר לתאים סגורים נשענת על עקרון פיזיקלי בסיסי: אוויר הוא מבודד תרמי יעיל כל עוד הוא נייח, אך ברגע שנוצרת תנועה פנימית הוא הופך למוביל חום יעיל באמצעות הסעה (convection). לכן, כליאת האוויר במערך תאים קטנים וסגורים היא מפתח לשיפור הבידוד התרמי. העיקרון דומה לזה של חלונות בזיגוג כפול או משולש: החלל בין שכבות הזכוכית מכיל אוויר או גז אציל כלא, שאינו יכול לנוע ולכן משמש כמבודד. במחקר זה מיושם רעיון דומה בקנה מידה אדריכלי - יצירת מערך של חללים כלואים קטנים בתוך מסת הקיר.

גישה זו קיבלה חיזוק ממחקר קודם של Dielemans ושות' (2021)¹⁰, שהציג הדפסה של מבנים תאיים סגורים מבטון קל משקל. במחקר זה הודגמה האפשרות לשפר ביצועים תרמיים באמצעות כליאת אוויר. עם זאת, המחקר בוצע בקנה מידה מצומצם, התמקד בכיוון תאים אנכי אחד, והסתמך בעיקר על סימולציות תרמיות ללא אימות בתנאי שטח אמיתיים.

המחקר הנוכחי יצא מנקודת מוצא זו אך מציע שינויים מהותיים כדלקמן:

שינוי גודל התאים – פיתוח מערך תאים בגדלים שונים המותאמים לדרישות תרמיות ומבניות, תוך שמירה על יכולת ייצור בקנה מידה אדריכלי תעשייתי;

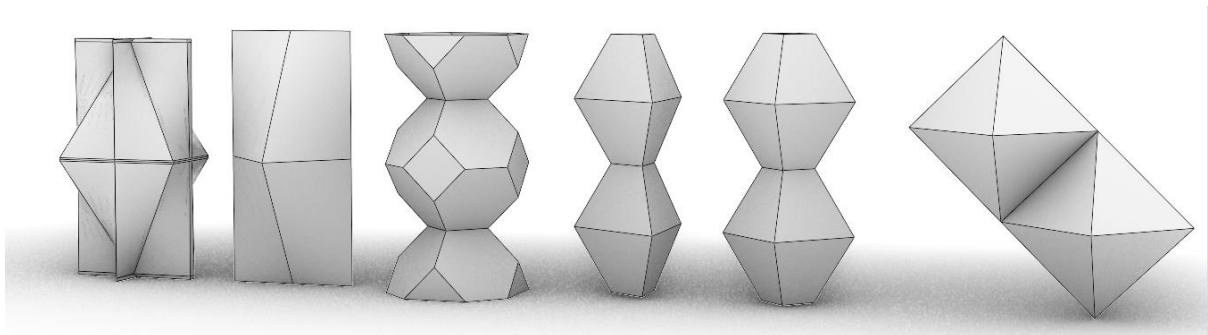
¹⁰ Dielemans, G., Briels, D., Jaugstetter, F., Henke, K., & Dörfler, K. (2021). Additive Manufacturing of Thermally Enhanced Lightweight Concrete Wall Elements with Closed Cellular Structures. Journal of Facade Design and Engineering, 9(1), 59–72. <https://doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5418>

התאמה לכיוון הפאה – בניגוד למבנה תאי אחיד, במחקר הנוכחי התאים מסודרים **במספר שכבות בכל כיוון** ומתמצבים לכיוונים שונים **בהתאם לכיוון הפאה של המעטפת**. כך נוצר מבנה תלת-ממדי מורכב שמתאים את עצמו לגאומטריה החיצונית ולכיוון זרימת החום;

שימוש בצמנט לבן (CEM I White) והתאמתו להדפסת תלת-ממד – צמנט לבן מציב אתגרים ייחודיים בהדפסה: תכונות ריאולוגיות שונות מצמנט אפור, התנהגות התקשות מיוחדת, והצורך לשלוט במדויק בפרמטרי ההדפסה כדי להשיג סגירה אטומה של תאים. נוסף על כך, יצירת תאים סגורים עם **זוויות מאתגרות** דרשה פיתוח פרמטרים ייעודיים ובקרה הדוקה על תהליך ההדפסה.

מעבר לקנה מידה אדריכלי מלא – ייצור אלמנטים בגודל $60 \times 100 \times 100$ ס"מ והצבתם לניסוי שטח אמפירי של שנה שלמה בנגב, המאפשר הערכה אמיתית של הביצועים התרמיים בתנאים אקלימיים קיצוניים.

באופן זה, המחקר הנוכחי אינו רק מאמץ את הרעיון התאי הסגור, אלא מרחיב אותו לכדי יישום תעשייתי מותאם-אקלים, המשלב שיקולים תרמיים, חומריים ותכנוניים בתנאי אמת.



איור 4: הגישה המוצעת – תאים סגורים: בחינה גאומטרית של מערכות צורניות המשלימות זו את זו ליצירת ריצופים תלת-ממדיים בשכבות משתנות. מעבר לאתגר הגאומטרי, תכנון זה מציב גם אתגר ייצור משמעותי – סגירה מלאה של תאים ושמירה על רציפות מסלול הדפסה ללא עצירות, המהווים תנאי קריטי להשגת מבנה אטום ויעיל תרמית בקנה מידה אדריכלי.

אתגרים, פיתוח חלופות והכנה לניסוי שטח

אתגרים ומניעים עיצוביים

המעבר מגישה של תאים פתוחים לתאים סגורים הציב אתגרים טכנולוגיים ועיצוביים. תאים סגורים מחייבים סגירה מלאה בכל שכבה ורציפות בהדפסה, ללא עצירות ושינויים חדים במהירות. כל עצירה יוצרת נקודות חולשה ומסכנת את האטימות של התא בסיטואציה שאורך מסלול ההדפסה אינו אחיד בין השכבות.

כדי להתמודד עם אתגרים אלה בוצע תהליך פיתוח שכלל:

- **כיול עובי שכבה** – מעבר לשכבות בעובי 12 מ"מ, לשם קיצור זמן ייצור, הפחתת מספר תפרים ושיפור יציבות מבנית;
- **מסלול ההדפסה רציף** – פיתוח אלגוריתם להבטחת סגירה מלאה של כל תא בכל שכבה ומעבר חלק בין תאים סמוכים;
- **רציפות ההדפסה** – תכנון מסלול ההדפסה כמסלול המשכי ללא עצירות;
- **שמירה על מהירות אחידה** – תכנון גיאומטרי המאפשר סגמנטים באורך דומה לשמירה על עובי אחיד והפחתת סיכונים של התקשות מוקדמת או נזילה, מחייב עיצוב סגמנטים באורכים אחידים;
- **קצב זרימה** – שמירה על קצב זרימה אחיד של החומר המחייב התחשבות באורך הסגמנטים המודפסים;
- **איזון זמן מחזור שכבה** – מציאת טווח אופטימלי למניעת קריסה פלסטית מצד אחד וחוסר הידבקות מצד שני;
- **אטימות התאים** – בקרת חפיפה בנקודות החיבור, שליטה בקצב ההתקשות ובדיקות אטימות לאחר ההדפסה;
- **מרווח בין מסלולי ההדפסה** – קביעת המרווח בין הקווים כך שיבטיח סגירה ואטימה מלאה של התאים מבלי ליצור עודף חומר בנקודות החיבור. מרווח מדויק מאפשר מניעת דליפות אוויר פנימי, שמירה על משקל האלמנט ברמה אופטימלית וצמצום היווצרות גשרים תרמיים בין הדפנות;
- **זווית הדפסה אופטימלית** – נמצא כי זווית של 37° אפשרית עם התערובת הצמנטית שפותחה ואיפשרה הדפסה יציבה של תאים סגורים תוך שמירה על אטימה ומניעת קריסה;
- **אופטימיזציה מבנית** – כדי להוריד את המסה הכוללת של המבנה המודפס ולצמצם את מעברי החום, פותח ותוכנן עיצוב שיצמצם את עובי החיבורים והתפרים.

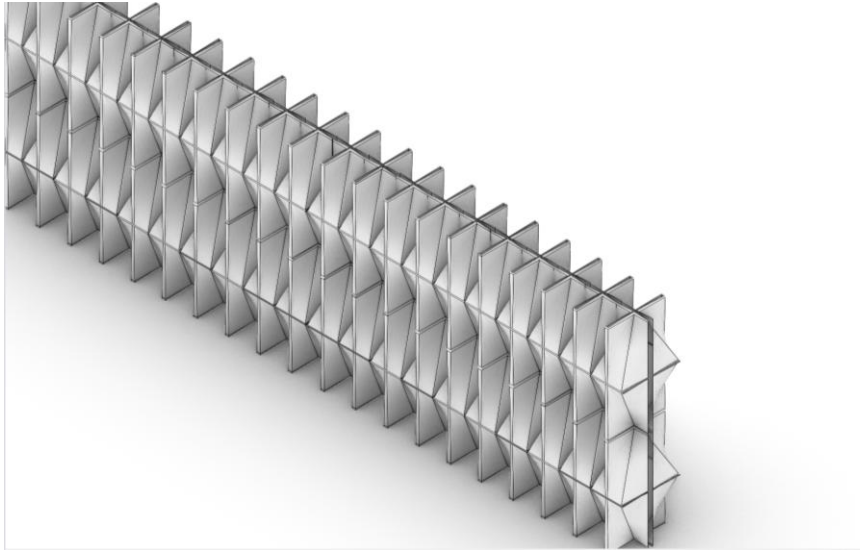
הבנת האתגרים ודרכי התמודדות איתם התבסס על ניסויי הדפסה חוזרים ובדיקות איטרטיביות, שאפשרו לוודא כי התאים אכן נסגרים באופן אמין ועקבי.

פיתוח חלופות עיצוביות

חלק מתהליך העיצוב כלל בחינת חלופות שונות שנבדקו בהדפסות ניסוי. על בסיס תהליך זה פותח עיצוב בגישה פרמטרית שאפשר יצירת וריאציות שונות של תאים, תוך התייחסות למשתנים כגון עובי דופן, גודל תא ורציפות מסלול ההדפסה. עיצוב זה אפשר לפתח צורות גיאומטריות מורכבות שבהן כל תא תומך בשכניו, ובכך למקסם את כמות התאים תוך שמירה על ישימות טכנולוגית.

מתוך תהליך זה נבחר עיצוב מערכת תאים פנימית שנתן פתרון מקסימלי ועל בסיסו גובשו שלוש חלופות לגודל התאים (Small, Medium, Large) שכל אחת מהן נבחנה על פי:

- **בנייתיות** – יציבות ההדפסה וזמני מחזור שכבה;
- **ביצועים תרמיים**;
- **משקל האלמנט**;



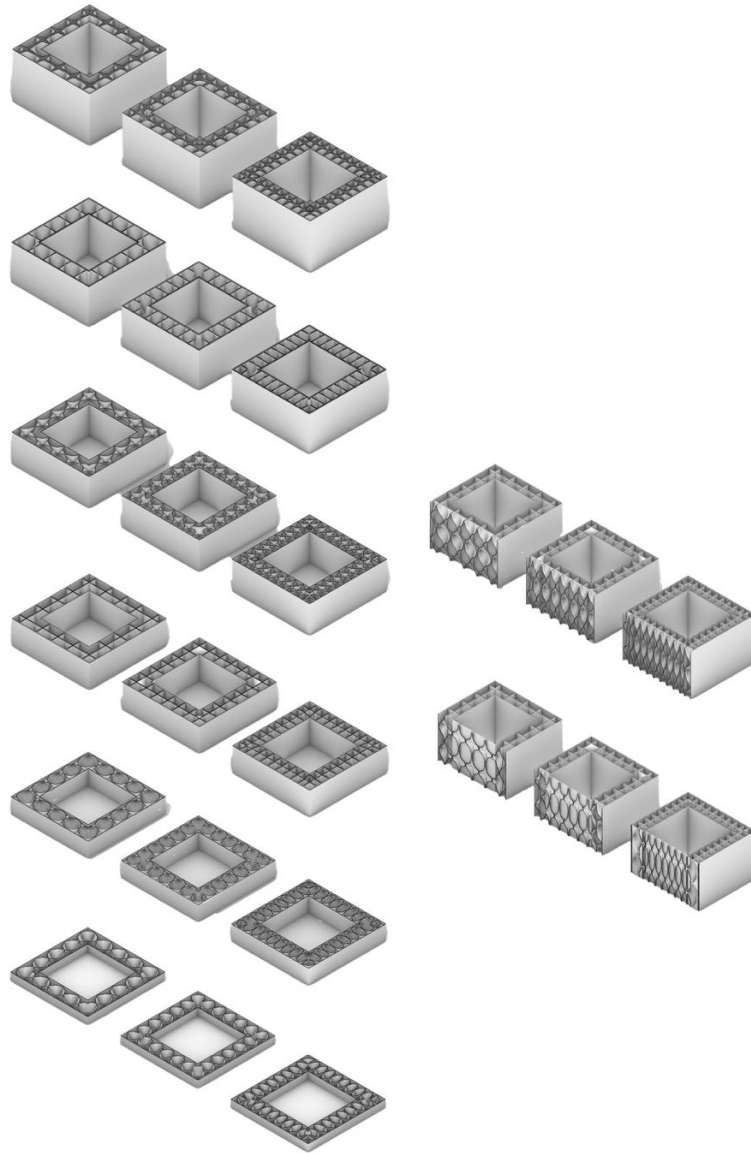
איור 5: תצורת התאים שנבחרה לאחר ניסיונות הדפסה מרובים. נמצא כי זווית הדפסה של 37° אפשרית עם תערובת הצמנט שפותחה. לאחר ניסויי בחינה גובש עיצוב המאפשר אטימה מלאה של התאים, תוך שימוש במרווח של 9 מ"מ בין מסלולי ההדפסה – מרווח שהבטיח סגירה ואטימה מלאה, מנע עודף חומר בחיבורים, צמצם גשרים תרמיים ושמר על יציבות מבנית.

השפעת גודל התאים:

Small – ככל שהתאים קטנים יותר נדרש יותר חומר ליצירת האלמנט, כך שמסתו גבוהה יותר. מספר הגשרים התרמיים גדול, אך כליאת האוויר בתאים קטנים מונעת ביעילות הסעה פנימית ומגבירה את המסה התרמית.

Medium – תאי ביניים יוצרים איזון בין בידוד תרמי למסה תרמית. כמות החומר הנדרשת מתונה יותר, מספר הגשרים התרמיים קטן ביחס לאלמנט קטן, ובמקביל התאים עדיין מספיק קטנים כדי לצמצם הסעה פנימית באופן יעיל.

Large – ככל שהתאים גדולים יותר נדרש פחות חומר, ולכן מסת האלמנט נמוכה יותר ומספר הגשרים התרמיים מצטמצם. עם זאת, תאים גדולים מעלים את הסיכון לזרימת אוויר פנימית (הסעה) שמחלישה את ביצועי הבידוד. היתרון המרכזי של חלופה זו הוא בפשטות ייצור גבוהה יותר.



איור 6: התפתחות חתכי התאים בשלוש חלופות – Large ו-Small, Medium. השוואת החתכים בשלוש החלופות העיקריות. ניתן לראות את השינוי בגודל ובצפיפות התאים, את השפעתם על סגירה מלאה של האוויר הכלוא, ועל מספר הגשרים התרמיים הנוצרים בכל חלופה.



איור 7: תהליך הדפסת האלמנטים.



איור 8: שינוע האלמנטים למבחן שטח.

ניתוח ההתנהגות התרמית של תאי בטון מודפסים

יצחק מאיר^{1,3}, דוד פרלמוטר^{2,3}, וולפגנג מוצפי-האלר^{3,4}

¹ המחלקה להנדסה אזרחית וסביבתית, הפקולטה למדעי ההנדסה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב (אב"ג)

² מדעי הסביבה, גיאואינפורמטיקה ותכנון ערים, הפקולטה למדעי הרוח והחברה, אב"ג

³ אדריכלות ובינוי ערים במדבר, המכונים לחקר המדבר, אב"ג

⁴ TerraVision Lab

פרק זה מתאר את האתר בו נערך ניטור התאים, התנאים האקלימיים בו, מערך המדידות, ותוצאותיהן. הוא מסכם את הנתונים על השלכותיהם ומציע שינויים אפשריים עתידיים במורפולוגית התאים המודפסים לשם שיפור תפקודם האקלימי.

1. האתר והאקלים בו

האתר בו נערך הניסוי הינה קריית שדה בוקר, המכונים לחקר המדבר, של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב. הוא נמצא ברום של כ-470 מ' מעל פני הים. האקלים בו מוגדר כיבשתי מדברי. סיווג האתר ע"פ ת"י 1045 חלק 10 (מת"י, 2002) הוא אזור אקלים ג', אזור ההר (BWh) אקלים צחיח חם על פי מיון Köppen). פירוש הדבר כי האקלים מאופיין בקיצים חמים ויבשים לרוב, עם משרעת טמפרטורה יומית רחבה (עד כדי 20 מ"צ ויותר) ובהשלכה גם משרעת לחות יחסית רחבה מאוד. החורפים קרים אך עם קרינת שמש אינטנסיבית ברוב הימים, טמפרטורות מזעריות המגיעות לכדי 0 מ"צ בשעות הלילה המאוחרות, ולפעמים אף מתחת לכך. הרוח השלטת הינה צפון מערבית, הבריזה הים תיכונית, אם כי בשעות שונות של היממה בעונות השונות של השנה היא חגה גם לכיוונים שונים. הממוצע הרב שנתי של המשקעים הוא כ-85 מ"מ, עם מקדם השתנות של 5 ויותר.

השינויים האקלימיים (יוסף וחובריו, 2024) מתבטאים בעלייה של הטמפרטורות המרביות והמזעריות בקיץ, ומלווים גם בעליה בלחות, הנשאת על ידי הרוח השלטת מהים התיכון אל פנים המדבר. שילוב זה של טמפרטורות גבוהות ולחות יחסית עולה מחריף את תנאי אי הנוחות התרמית, מכביד על פעילות בשטחי חוץ, ומגביר את צריכת האנרגיה למיזוג בניינים.

לכל אלה השלכות ישירות על התכנון והבנייה, לרבות חומרי הבנייה על תכונותיהם הפיסיקליות.

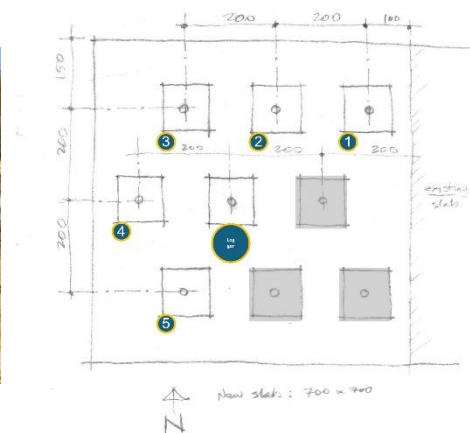
2. התאים והפעלתם

ארבעה תאי בטון מודפסים במידות 100/100/60 ס"מ ובעובי ממוצע 20 ס"מ הונחו על רצפת בטון יצוקה בשטח הניסויים של היחידה לאדריכלות ובינוי ערים במדבר, קריית שדה בוקר. התאים מוקמו במרווחים המבטיחים נגישות סולרית מסביב ביום השנה הקצר, 21 בדצמבר (איור 1). לכל תא נבנה קירוי משופע מלוחות פוליסטירן מותפח בעובי 5 ס"מ. אלה יוצרים תוספת בגובה 55 ס"מ לחזית

הדרומית של התאים לכל אורכה – 100 ס"מ. בשטחה של הגבהה זו ישנם שני פתחים במידות 37.5/40 ס"מ המאפשרים השגת חימום פסיבי בחורף, וקירור באוורור לילי בקיץ. (שטח הזיגוג הדרומי הנו כמעט כפול מהדרוש לחימום פסיבי באזור אקלימי זה, אך הוא נשמר לשם האחידות, מאחר שלאורך השנים נערכו מחקרים בתאים זהים הבנויים מחומרים שונים, קונבנציונאליים – בלוקי בטון חלולים, בלוקי בטון תאי מאושפר באוטוקלב, פוליסטירן – וחומרים ניסיוניים – המפקריט בהרכבים שונים בבלוקים או ביציקה, קש-חרסית ואחרים.) לטובת האוורור נפתחו גם שני פתחים בדופן המשופעת – הצפונית - של הקירוי ומידותיהם הן 20/25. בחורף הותקנו לפתחים הדרומיים לוחות PVC שקוף בעובי 2 מ"מ, מודבקים לדופן הפנימית של לוח הפוליסטירן הדרומי. הם נחשפו לקרינת שמש ישירה בין השעות 08:00-16:00. ביתר השעות נחסמו ובודדו הפתחים באמצעות לוחות פוליסטירן בעובי 5 ס"מ אשר הוכנסו אליהם מבחוץ כדי למזער הפסדי חום. בעונת המעבר נחשפה ביום רק מחצית משטח הזיגוג של החלונות הדרומיים. לעונה החמה יש שתי תקופות מדידה. במהלך חודש יוני הייתה חשיפה של 50% משטח הזיגוג הדרומי, ללא אוורור לילי. במהלך חודש יולי הפתחים הצפוניים והדרומיים נשארו חסומים בשעות היום והצפוניים נפתחו לאחר בשעות הלילה (מהשעה 22:00 ועד לשעה 08:00 בערך) לטובת האוורור המפולש.

בנוסף לארבעה התאים המודפסים נבנה תא מבלוקי בטון חלולים (20/20/40, ארבעה חורים). הוא נצבע בצבע אקרילי לבן והותקן לו קירוי זהה לזה של התאים. הפעלתו – פתיחה וסגירה של תריסים וחלונות – הייתה זהה לזו של התאים המודפסים.

כל התאים, לרבות זה מבלוקי בטון, נבנו על בסיסים אינדיבידואליים בעובי 15 ס"מ כל אחד. טרם יציקת הבסיס הגדול מבטון הונחו תחתיו צינורות שרשריים (קוטר 5 ס"מ) להשחלת חיווט. לבסיס כל תא נקדח חור בקוטר 10 ס"מ. כל תא הונח כך שצינור החיווט שבולט מרצפת הבטון הגדולה הועבר דרך הקדח בבסיס של כל תא, זאת כדי לאפשר התקנת השחלת חוטי חשמל לחיבור חיישנים בפנים התאים.



איור 9: מימין: סקיצת מיקום התאים ומידות. עמדת אוגר הנתונים באמצע. שלושת הריבועים האפורים אינם מיצגים תאים קיימים. משמאל: התקנת התאים על גבי רצפת הבטון. ניתן לזהות את הצינורות השרשריים

עליהם ממוקמים התאים כאשר הקדח שבבסיסם מתלבש על הצינור. המוטות הבולטים מהתאים הינם מובילים שמטרתם להקל על מיקום מדויק של התא בזמן ההורד.



איור 10: סדר הצבת התאים במתחם הניסוי. באיורים להלן מספור התאים בהתאמה לאיור זה. : תא מס' 1 הוא התא מבלוקי בטון חלולים. תא מס' 2 מודפס עם חללים פנימיים מלאים בחומר גרנולרי במשקל מרחבי נמוך. יתר התאים מכילים תאי אוויר כלוא בגדלים שונים בין הדופן החיצונית וזו הפנימית. התא ללא קירוי המסומן כ-Logger מכיל את אוגר הנתונים על אביזריו.

3. מערך הניטור

לכל תא הותקנו שלושה חיישנים (Type T Thermocouple sensors) כדלהלן:

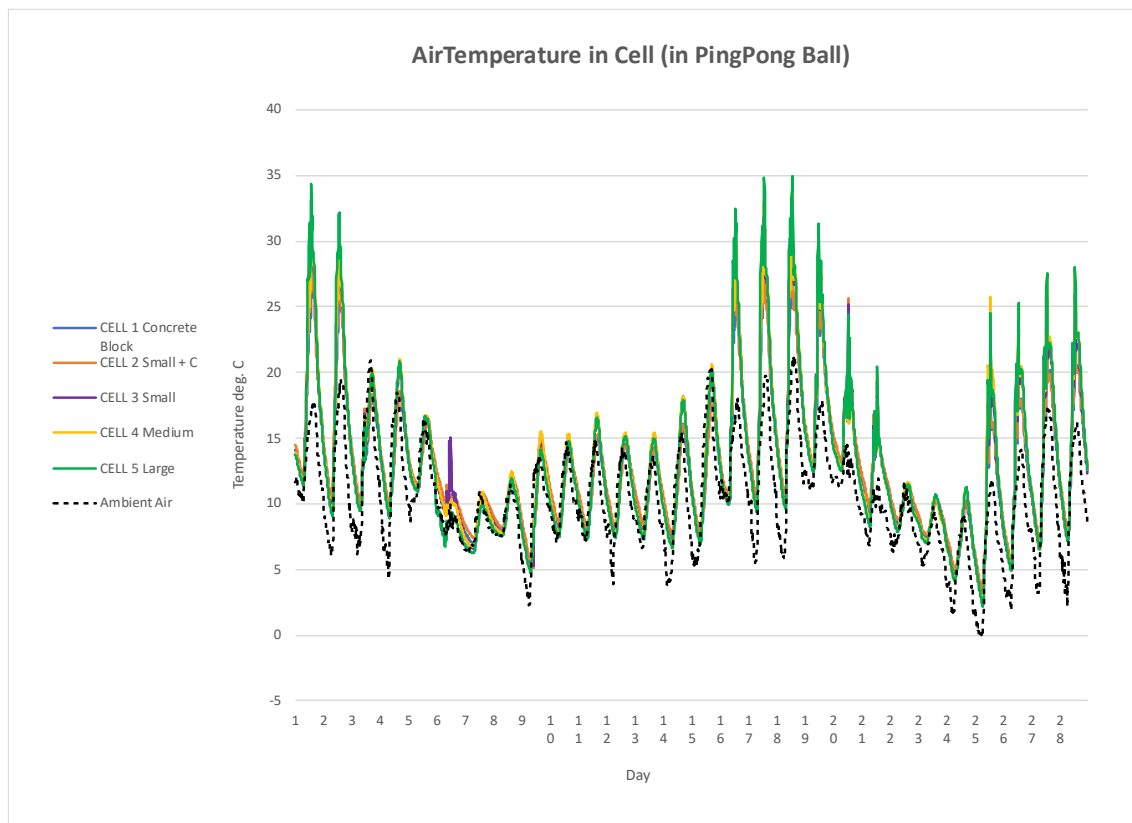
- טמפרטורת פני משטח חוץ - אמצע הקיר הדרומי;
- טמפרטורת פני משטח פנים – אמצע קיר דרומי;
- טמפרטורת פנים – מרכז חלל פנים התא, בתוך כדור אפור ניטרלי.

החיישנים חוברו לאוגר נתונים (Campbell Scientific Data Logger CR-1000) עם הגדלת מספר הערוצים באמצעות AM25T 25-Channel Solid State Multiplexer. מדידות נערכו כל 20 שניות. ממוצעים נלקחו עבור נתוני כל 15 דקות. נתונים מטאורולוגיים התקבלו מהשירות המטאורולוגי והתחנה המטאורולוגית של המכונים לחקר המדבר.

4. ניטור

4.1 ניטור בעונה הקרה

העונה הקרה מתייחסת לתוצאות מדידות חודש פברואר (פברואר נוטה להיות החודש הקר של השנה למרות שבחודש זה הימים כבר ארוכים יותר מאשר בדצמבר, בו מצוין היום הקצר של השנה). ניתן לזהות באיור 11 כי הטמפרטורות המזעריות יורדות לעתים מתחת ל-5 מ"צ ואף נוסקים ל-0 מ"צ, בעוד שהטמפרטורות המרביות מגיעות לכדי 20 מ"צ בשעות הצהריים. זוהי, כאמור, משרעת אופיינית לאזורים מדבריים יבשתיים (קונטיננטליים).



איור 11: מדידות חודש פברואר.

במדידות חודש פברואר ניתן לזהות התנהגות אקלימית כמעט זהה של כל התאים. הפעלת התאים כללה שבוע עם תריסים סגורים, ללא קליטת קרינה (08.02-15.02), מספר ימים עם חשיפה של 100% משטח החלונות (16.02-21.02), ומספר ימים עם חשיפה חלקית (50%) של החלונות (23.02-28.02).

• מצב סגור

08.02-15.02 – גם בימים ללא קליטת קרינה ישירה בפנים התאים, הם שומרים על טמפרטורות פנים גבוהות מן החוץ, עד כדי 2 מ"צ ויותר במרביות. הטמפרטורות המזעריות, לעומת זאת, נעות בין

עשירות מעלה בודדות גבוה מטמפרטורת החוץ, ועד כדי 1-2 מ"צ גבוהות יותר. בהיעדר קליטת קרינה או מקורות חום פנימיים, ההסבר היחיד הוא הולכת חום מהמעטפת החיצונית החשופה לשמש, דרך הגשרים התרמיים המחברים את שתי הדפנות, החיצונית והפנימית, ואגירה במסה התרמית הפנימית השומרת על טמפרטורה גבוהה יחסית מזו החיצונית בחלק מהלילות.

• חשיפת חלונות מלאה (100%)

16.02-21.02 – חשיפה של 100% משטח החלונות לקליטת קרינה ישירה, מעלה את הטמפרטורה בפנים התאים לכדי 15 מ"צ מעל טמפרטורת החוץ המרבית, ומביאה לטמפרטורת פנים מזערית עד כדי כ-5 מ"צ גבוהה מן המזערית בחוץ. כפי שצוין מעלה, שטח החלונות הדרומיים גדול מהדרוש לחימום פסיבי באזור אקלים זה, וזאת ניתן לראות בבירור בעליית טמפרטורת התאים החדה בשעות היום.

אירועים נקודתיים, כגון עליית קטנה מאוד של הטמפרטורה המזערית בפנים התאים לעומת עלייה משמעותית של טמפרטורת החוץ המזערית לא לגמרי ברורים ודורשים ניתוח מפורט יותר אשר יבדוק את ס"כ המסה התרמית בפנים התאים ויכולת האגירה הכוללת שלה, לעומת יעילות ההולכה של הגשרים התרמיים.

• חשיפת חלונות חלקית (50%)

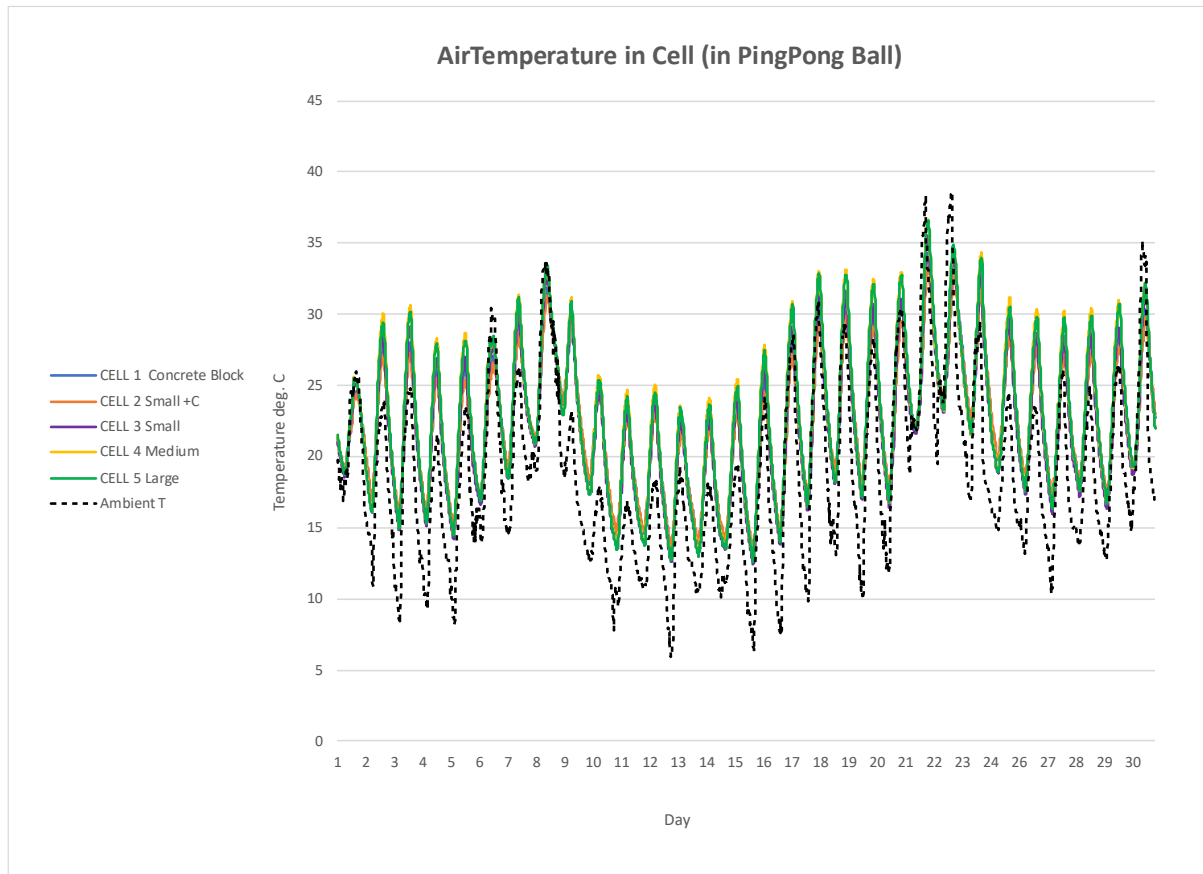
23.02-28.02 – חשיפה של 50% משטח הזיגוג הדרומי מעלה את טמפרטורת הפנים בין 10-15 מ"צ ביחס למירית בחוץ. הטמפרטורות המזעריות בפנים שורות על יתרון של 3-5 מ"צ ביחס למזעריות בחוץ.

תוצאות אלה מאששות את הקביעה כי לתנאי החורף של אזור ההר (אזור אקלים ג') מספיק שטח זיגוג דרומי סדרי גודל של כ-15% מס"כ שטח הרצפה נטו, שהרי במקרה הספציפי (של שטח כפול מכך (100% חשיפה של שטח הזיגוג) התקבלו טמפרטורות פנים גבוהות באופן חריג (פרלמוטר וחובריו, 2010).

4.2 ניטור בעונת מעבר

המצב זה אינו סביר כמצב הפעלה של בניין מאוכלס (כגון בניין מגורים), אך הוא מאפיין באופן ברור את תכונות התאים ומייצג מבנה שאינו מאוכלס. איור 12 מראה הן את השפעה של קליטה ישירה של קרינה והן את האינרציה המוקנית לתאים בשל המסה התרמית שלהם. את המשמעות של קליטת קרינת שמש ניתן לראות בבירור בימים 10.04-16.04, בהן טמפרטורת החלל הפנימי נשמרת גבוהה משמעותית ביחס לטמפרטורת החוץ, הן המרבית והן המזערית, הראשונות עד כדי 8 מ"צ ויותר בצהרי 09.04, האחרונות עד כדי 7 מ"צ ויותר בלילה בין 12.04-13.04. יש להניח כי אוורור לילי יכול היה למתן את טמפרטורות הפנים, לפחות בשעות הלילה, אך מהירויות הרוח הלילית בחודש אפריל היו

יחסית נמוכות. בכל מקרה, בהתחשב במשרעת הטמפרטורות היומית שהגיע לכדי 19 מ"צ (-22.04-23.04), בתנאים אידיאליים ולפי החישוב האמפירי המובא במסמך מאת המשרד להגנת הסביבה (שביב, פלמן, 2016: 22), ניתן היה להגיע להפחתה של כמעט 9 מ"צ על ידי הפעלת אוורור לא מפולש.

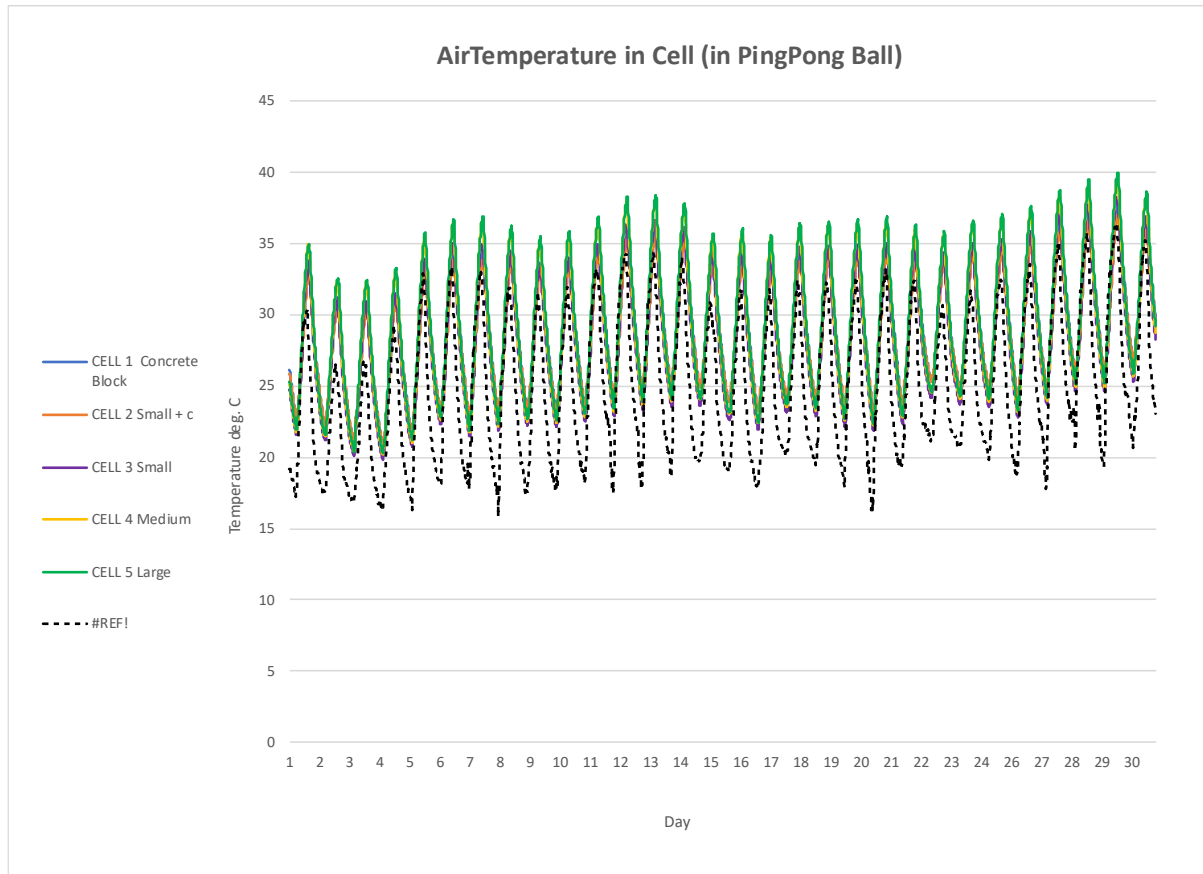


איור 12: מדידות חודש אפריל.

4.3 ניטור בעונה החמה

נבדק התפקוד התרמי של התאים במשך שני חודשים, ובשתי תקופות הפעלה כדלהלן: יוני ובו 50% מהזיגוג הדרומי חשוף, וללא אוורור לילי; ויולי ובו הזיגוג חסום באופן מוחלט, ואילו פתחי האוורור נפתחו רק לפרק הזמן שטמפרטורת האוויר ירדה משמעותית יחסית לשעות היום, בין השעות 22:00-08:00 בקירוב.

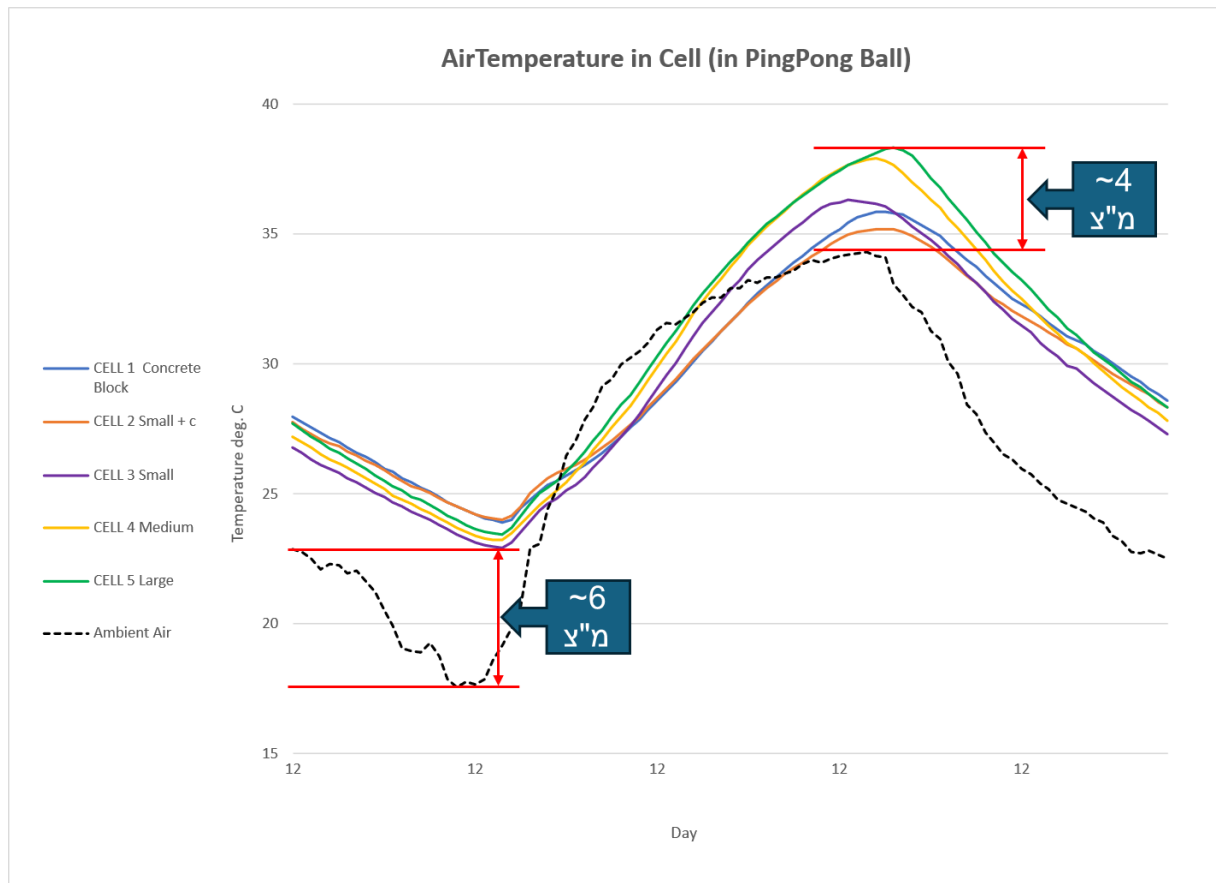
- במקרה של חודש יוני ניתן לזהות התנהגות גדומה לזו בעונת המעבר (אפריל) אך בהבדל מהותי אחד והוא כי כל טמפרטורות החוץ נעות בין 16-36 מ"צ במהלך כל החודש. טמפרטורת פנים התאים נעה בחודש זה בין 20 מ"צ (המזערית המוחלטת), לבין כ-39 מ"צ (המרבית המוחלטת) (איור 13).



איור 13: מדידות חודש יוני.

ובכל זאת, ישנם הבדלים בין התאים השונים. להבנה טובה יותר של הבדלים אלה נבחרה יממה אחת (12.06) ותוצאות הניטור במהלכה מובאות באיור 14. ניתן לזהות הבדלים של עד כדי 6 מ"צ בין הטמפרטורה המזערית בחוץ, לזו בתא הפחות חם מכולם (Cell 3 Small), וכ- 4 מ"צ בין הטמפרטורה המרבית בחוץ לזו בתא החם ביותר (Cell 5 Large). מן הדין לציין כי לפי מדידות אלה, התאים המתחממים פחות מהאחרים הנם זה בעל התאים הקטנים המלאים בחומר גרנולרי נקבובי בעל משקל מרחבי נמוך (Cell 2 Small + c), ואחריו התא מבלוקי בטון חלולים (ארבעה חורים). אלה חמים יותר – בשיא – בין 0.5 מ"צ ל-1 מ"צ בהתאמה מהטמפרטורה החיצונית. חמים יותר, לפי סדר עולה, הינם התא בעל חללי האוויר הקטנים (Cell 3 Small), התא בעל החללים הבינוניים (Cell 4 Medium), והחם ביותר הוא התא בעל חללי האוויר הגדולים (Cell 5 Large).

ההסבר האפשרי להבדלים בין התאים מובא בפרק המסקנות להלן.



איור 14: מדידות חודש יוני - מיקוד בתאריך 12.06.

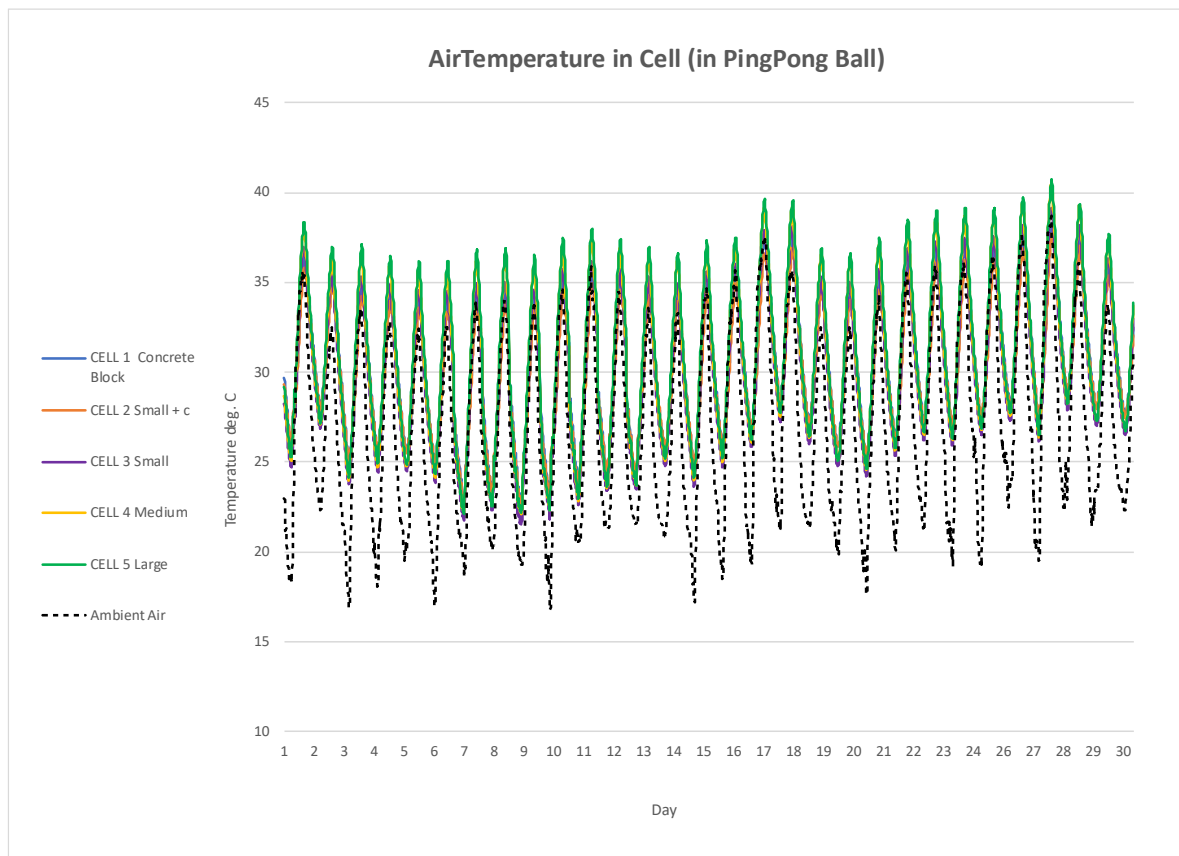
- חודש יולי השנה מאופיין בטמפרטורות גבוהות באופן רציף ועקבי, הן ביום והן בלילה. בחלק גדול מהלילות הטמפרטורה המזערית בחוץ נשארת גבוהה למדי, ובמקרים הקיצוניים היא נשארת סביב כ-24 מ"צ (איור 15).

מה שמאפיין את אופן התפעול כאן זוהי פתיחת החלונות בשעות הלילה. בחיים האמיתיים להפעלה זו יש שני תפקידים – אוורור להשגת נוחות תרמית מיידית, ואוורור לקירור מסת המבנה לשם השגת נוחות תרמית מאוחר יותר. ניתן לראות כי במשך כל החודש הטמפרטורה המזערית בפנים בכל זאת גבוהה מזו בחוץ, מה שמעיד על אוורור לא יעיל ומסה תרמית בעלת אגירה משמעותית. כאמור מעלה, בשל הטמפרטורות הגבוהות גם בשעות הלילה, בחלק מהלילות כלל לא נפתחו פתחי האוורור ובחלק אחר הם נפתחו מאוחר יחסית (סביב השעה 22:00).

להבנה טובה יותר של התופעה נבחר מחזור של 24 שעות, 12.07 (איור 16).

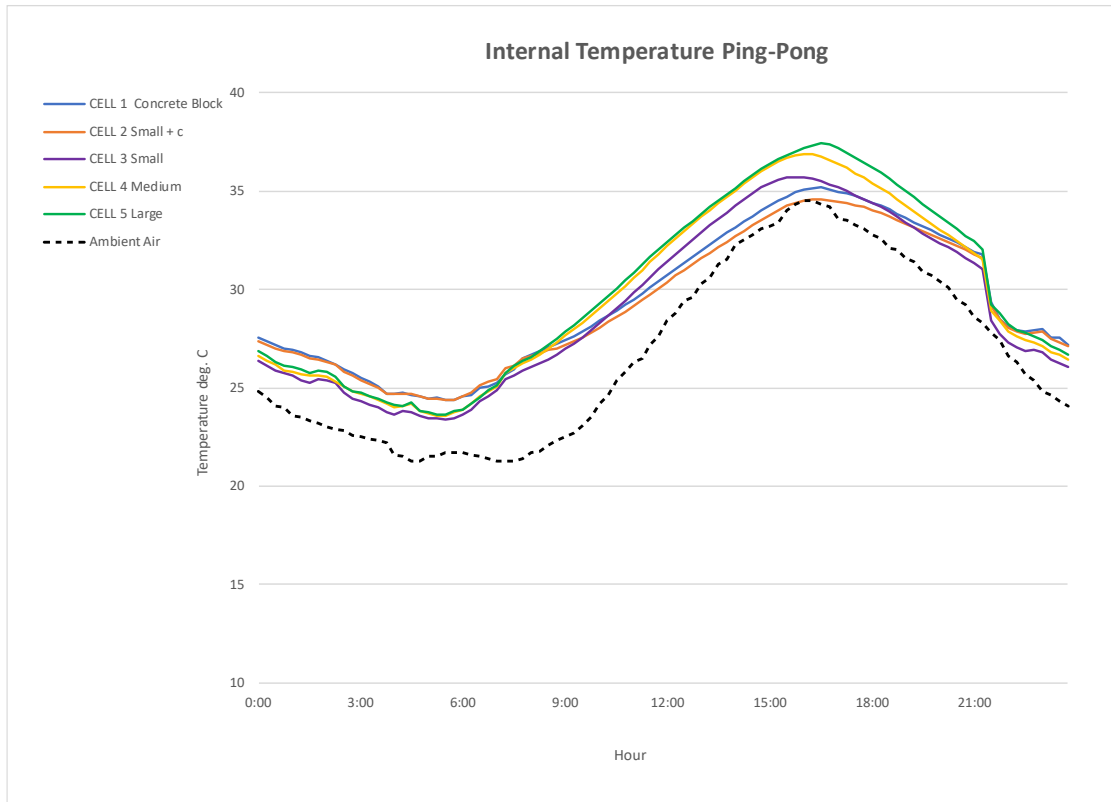
למרות ההבדל המהותי בהפעלת התאים בחודש יולי לעומת בחודש יוני, היינו אוורור לילי ביולי, או לפחות בחלקו, ניתן לזהות מגמות כמעט זהות בהתנהגות התאים. גם כאן תא 3 הוא בעל הטמפרטורה המזערית הנמוכה מבין כל התאים, אך עדיין גבוהה מזו בחוץ, בכ-2 מ"צ. התאים 1 ו-2 הנם גם כאן בעלי הטמפרטורות המרביות הנמוכות ביותר מבין כל התאים, אך עדיין אלה גבוהות יחסית – טמפרטורת תא 2 נשקת את המרבית בחוץ, ואילו זו בתא 1 גבוהה בכ-0.5 מ"צ.

תופעה ייחודית – אם כי לא מפתיעה – הינה צניחת טמפרטורות פנים כל התאים עם פתיחת פתחי האוורור, במקרה זה בשעה 21:00. צניחה זו מתרחשת כמעט בן רגע ומתבטאת ב-4-2.5 מ"צ. היא גורמת להיפוך התנאים הקודמים ומחזירה אותם ליחסים בין התאים שבילילה הקודם – תא 3 בעל הטמפרטורה הנמוכה מכל התאים, תאים 2 ו-1 בעלי טמפרטורת מזעריות



גבוהות משל יתר התאים.

איור 15: מדידות חודש יולי.



איור 16: מדידות חודש יולי - מיקוד בתאריך 12.07.

5. דיון ומסקנות

ניטור התאים במהלך תקופה קרה, תקופת מעבר, ותקופה חמה, בכמה דרכי הפעלה של התאים (חשיפה או חסימה של הזיגוג הדרומי, פתיחת פתחים צפוניים לאורור לילי, שילובים שונים ביניהם) מעלים כמה נקודות בולטות בנוגע לתכונות התרמיות של התאים המודפסים מבטון. בדיקת אטימות התאים אשר נערכה בטכניון ע"י הצפתם במים מאששת את ההנחה כי הם אטומים, ועל כן נפסלת האפשרות של הסתננות אוויר כאחד התהליכים המשפיעים על שינוי הטמפרטורה בפנים התאים, ועל ההבדלים ביניהם.

ראשית, המורפולוגיה שלהם יוצרת גשרים תרמיים בהיקף משמעותי, זאת לכל האורך והגובה של דפנות התאים. גשרים תרמיים אלה מאפשרים הולכה יעילה של החום מהפן החיצוני של הדופן החמה אל הפן החיצוני של הדופן הקרה (בתקופה הקרה מפנים התא החוצה, ובתקופה החמה מחוץ לתא פנימה). תהליך זה ניכר במיוחד בתקופות הפעלת התאים בהן על הפתחים סגורים במהלך כל היממה, היינו אין מעבר אנרגיה על ידי קליטת קרינה ישירה, או פליטת אנרגיה באמצעות אוורור לילי.

שנית, חללי האוויר הנוצרים בשל אופן ההדפסה הספציפי הינם גדולים ורחבים (עד כדי 7 ס"מ) ואורכם מגיע לכדי כ-15 ס"מ במקביל לדופן תא 5 (Cell 5 Large). לגודל חללי אוויר כזה יש השפעה מהותית במעבר חום בהסעה (כלומר, מעבר חום כתוצאה מזרימת אוויר) בין פני דפנות התאים, וגם בתוך חתך הקיר. אמנם בין שתי הדפנות של הקיר נוצרים חללי אוויר כלוא, וכך גם במקרה התא מבלוקי בטון,

אך כל חלל כזה גדול דיו כדי לאפשר תנועת אוויר הנוצרת בשל הבדלי טמפרטורות בין הפנים של התא.

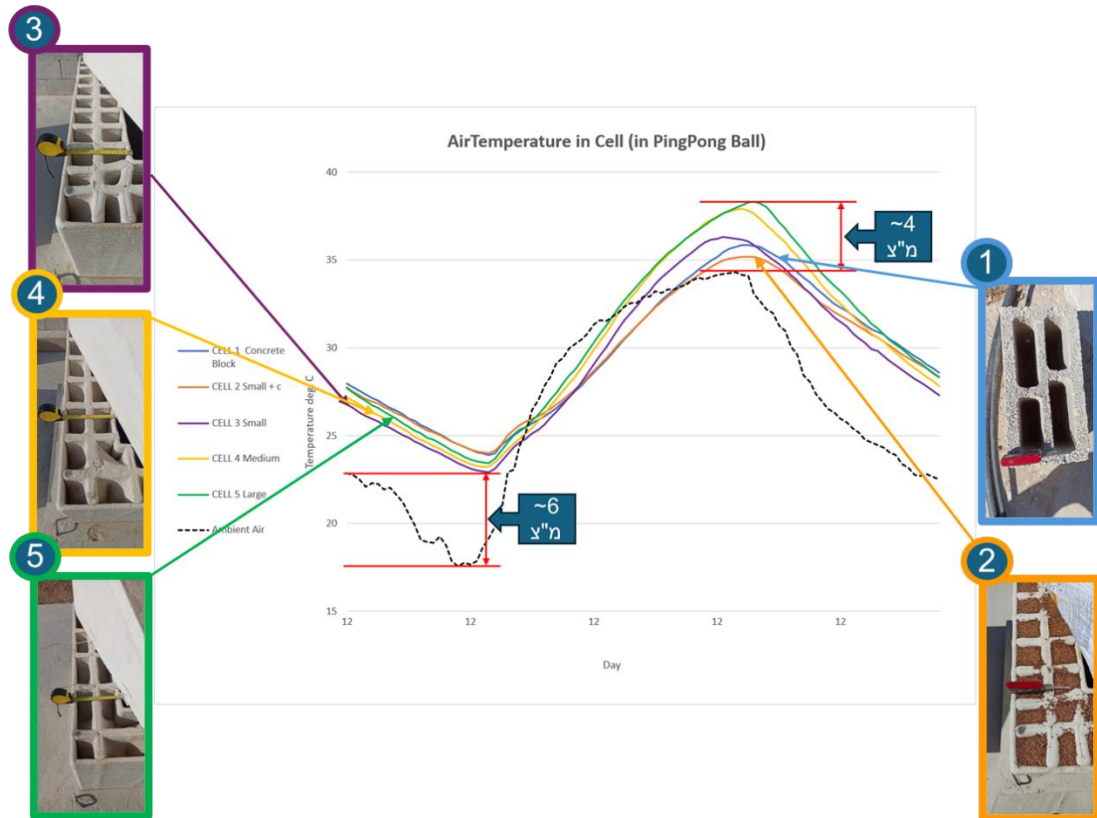
איור 17 מדגים באופן ברור את ההבדלים בהתנהגות התרמית של התאים השונים בהתייחס להבדלים המורפולוגיים ביניהם. תא 2, בעל חללים ממולאים הינו התא המגיע וטמפרטורה המרבית הנמוכה מבין כל התאים. יש לשים לב לעובדה שתא 3 בעל החללים הקטנים אף הוא מגיע לטמפרטורה מרבית נמוכה מהתאים המודפסים האחרים – 4 ו-5 – אך בכל זאת גבוהה מזו של תא 2 בכ- 1 מ"צ ויותר. קשה, אם כן, להמעיט בחשיבות המילוי היוצר נפח בעל תכונות בידוד ומצמצם ואף מבטל אולי את תנועת האוויר בחללים הגורמת למעבר חום באמצעות הסעה. מעניין כי התא מבולקי בטון הוא שני מבחינת טמפרטורה מרבית נמוכה מיתר התאים למעט תא 2. הדבר מעיד על מאזן טוב יותר בין גודל חללי האוויר בו, לגשרים התרמיים הנוצרים בשל החומר היוצר את החללים בפנים הבולק החלול, והמורפולוגיה הספציפית של הגשרים התרמיים.

תאים 4 ו-5, בעלי חללי האוויר הבינוניים והגדולים בהתאמה, מגיעים לטמפרטורות מרביות גבוהות יותר מהתאים האחרים, מה שמעיד על השפעת חללי האוויר על מעבר החום. נכון הדבר גם במדידות של חודש יולי במהלכו הפעלת התאים שונה וכוללת חסימה של החלונות הדרומיים ופתיחת הפתחים הצפוניים להשגת אוורור לילי. גם כאן המגמות הן כמעט זהות, גם אם הערכים המוחלטים משתנים במקצת (איור 18).
אם כן, ניתן לסכם כי:

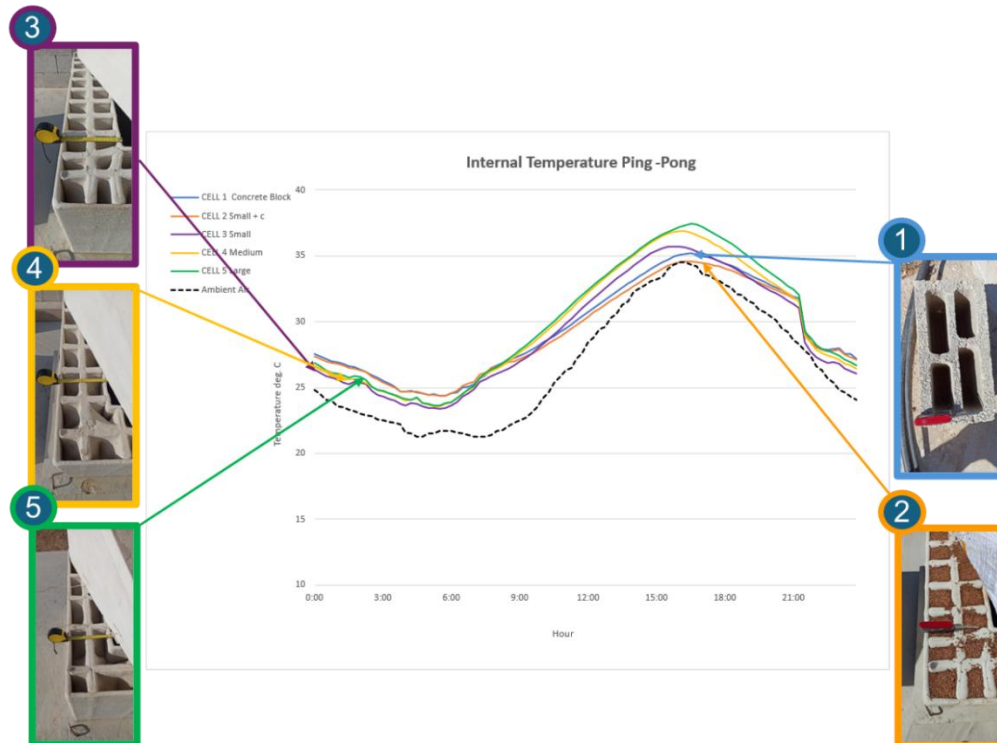
- רציפות הגשרים התרמיים משפיע לרעה על התפקוד התרמי של התאים המודפסים.
- גודל עולה של חללי האוויר משפיע לרעה על התפקוד התרמי של התאים המודפסים.
- מילוי חללי האוויר בחומר מבודד (בתא 2) משפר מהותית את התפקוד התרמי.

מכך ניתן להגיע לכמה מסקנות אשר יישומן עשוי לשפר את התפקוד התרמי של התאים המודפסים:

- צמצום הגשרים התרמיים על ידי שינוי אופן ההתחברות בין שתי דפנות התא המודפס. שימוש במחברים מחומר בעל מקדם הולכה נמוך (חומרים מבודדים) מהווה חלופה מועדפת.
- מילוי של חללי האוויר (בין שתי הדפנות של קיר התא, דופן פנימית ודופן חיצונית) בחומר בידוד. יתכן כי מבחינה פרקטית, יעילות וצרכי היישום מכוונים לשימוש בחומרים המוקצפים או המתנפחים בזמן יישומם, דוגמת פוליאוריתן מוקצף, תאית וכדומה, היינו חומרים אשר יתרמו גם לייצוב הקיר תוך כדי שיפור תכונותיו התרמיות.
- שיפורים אלה או דומיהם חיוניים להפיכת הטכנולוגיה ליישומית תוך התחשבות באילוצי האקלים המשתנה וצרכי האנרגיה אשר ילכו ויגדלו משנה לשנה.



איור 17: הבדלים מורפולוגיים במבנה התאים ויחסם להתנהגות התרמית שלהם. הגרף מתייחס למדידות



חודש יוני 2025.

איור 18: הבדלים מורפולוגיים במבנה התאים ויחסם להתנהגות התרמית שלהם. הגרף מתייחס למדידות
חודש יולי 2025.

רשימת מקורות

- יוסף י', צפורי א', אילוטוביץ א', כרמונה י', חלפון נ', אוזן ל', בהר"ד ע', פורשמן א', לוי י', גבעתי ע' (2024) ניתוח מגמות אקלימיות ואירועי קיצון בישראל לאורך המאה ה-21. מדינת ישראל, משרד התחבורה, השירות המטאורולוגי, בית דגן.
- מת"י (2002) תקן ישראלי ת"י 1045 חלק 10. בידוד תרמי של בניינים: סיווג יישובים לפי אזורי אקלים. מכון התקנים הישראלי, תל אביב.
- פרלמוטר ד', אראל א', מאיר י', עציון י', רופא י' (2010) המדריך לבניה ביו-אקלימית בישראל. היחידה לאדריכלות בינוי ערים במדבר, המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; ומדינת ישראל, משרד התשתיות הלאומיות, אגף מו"פ, ירושלים. MONI-RD-19-10
- שביב ע', פלמן ב' (2016) מערכות פסיביות לחימום ולקירור מבנים ומיקרו אקלים עירוני. הנחיות להערכת תפקוד. המשרד להגנת הסביבה, ירושלים.
- https://www.gov.il/BlobFolder/reports/instructions_to_operate_passive_heating_and_cooling_systems/he/green_building_passive_systems.pdf

סיכום ומסקנות

הישגי המחקר

במחקר זה פותחה גישה ייחודית לשיפור הביצועים התרמיים של קירות מודפסים, מותאמת לאקלים הישראלי החם. השיטה מבוססת על הדפסת תאים סגורים הלוכדים אוויר ושימוש בצמנט לבן בעל אלבדו גבוה.

תוצאות עיקריות

פיתוח טכנולוגי: ייצור אלמנטי קיר בקנה מידה מלא ($100 \times 100 \times 60$ ס"מ), עם שכבות בעובי 12 מ"מ, מסלולי הדפסה רציפים, אטימה מלאה של התאים וזווית הדפסה יציבה של 37° .

ביצועים תרמיים: תצורת Small הציגה שיפור בהשוואה לבלוק 20 מסורתי; נמצא קשר ברור בין גודל התא, מספר הגשרים התרמיים ויכולת מניעת הסעה; לצמנט הלבן תרומה בהפחתת בליעת חום.

פיתוח חומרי: התערובת שפותחה, בעלת מנת מים נמוכה, מאפשרת שמירה על אטימות גבוהה ועמידות מכנית. שילוב זה תרם לשיפור הבידוד התרמי של האלמנט, מבלי לפגוע ביציבותו המבנית.

אימות אמפירי: ניטור רציף בשטח במשך שנה (טווח טמפרטורות 2°C עד 40°C) הראה יתרון לגישה המוצעת על פני בלוקים סטנדרטיים, במיוחד בתנאי קיץ.

מסקנות מרכזיות

תאים קטנים – מונעים הסעה ביעילות למרות שיש להם יותר גשרים תרמיים ומסה גבוהה יותר.

תאים בינוניים – איזון בין בידוד למסה תרמית.

תאים גדולים – קלים לייצור אך חשופים יותר להסעה פנימית.

המלצות לפיתוח עתידי

צמצום גשרים תרמיים באמצעות שינויי עיצוב או שילוב חומרים מבודדים.

אופטימיזציה של גודל התאים ($40\text{--}60$ מ"מ כטווח מבטיח).

בדיקת שילוב של גדלים שונים באותו אלמנט לפי צורך תרמי ומבני.

בהמשך למחקרים נוספים שבוצעו בטכניון, מומלץ לבחון החלפת חלק מהאגרגטים בחומרים אחרים לשיפור ההתנגדות התרמית של התערובת, תוך שמירה על חוזק דומה או גבוה משל בלוקי בטון רגילים.

תרומה לענף הבנייה בישראל

הפחתת צריכת אנרגיה לקירור וחימום;

חיסכון בחומר ביצוע בזכות הדפסה ללא טפסנות;

חיסכון בכוח אדם ובזמן;

גמישות תכנונית ושחרור מתצורות בלוקים גנריות;
תרומה לקיימות – חיסכון בפליטות ויכולת התאמה לאקלים משתנה.

סיכום

המחקר הראה שניתן לייצר אלמנטים מודפסים סגור־תאים בקנה מידה אדריכלי, עם ביצועים תרמיים השווים ואף עולים על בלוקים מסורתיים. השיטה משלבת טכנולוגיה, עיצוב פרמטרי וחומרי גלם מותאמים לאקלים, ומהווה בסיס מבטיח להמשך פיתוח לקראת יישום מסחרי ובנייה בת־קיימא.

Summary

This study presents a novel approach in the domain of 3D printing in construction, with a specific focus on enhancing the thermal performance of printed concrete walls. The study was conducted through a collaborative effort between the Technion – Israel Institute of Technology’s Center for Advanced Manufacturing in Construction and Ben-Gurion University of the Negev. The research offers a viable alternative to conventional masonry-based building envelopes.

Research Overview

The investigation involved the development of a white cementitious mixture engineered for 3D printing, alongside the design of an internal array of sealed air cavities intended to improve the thermal behavior of printed wall elements. Full-scale architectural prototypes (100 × 60 × 100 cm, wall thickness 20 cm) were produced using additive manufacturing technologies and subsequently subjected to controlled thermal performance assessments.

A comparative analysis was performed against a standard concrete block (“Block 20”) wall system. Three geometric configurations of internal air cavities—Small, Medium, and Large—were evaluated over the course of a full-year field experiment conducted under the climatic conditions of the Negev Desert. This setup enabled continuous monitoring of heat transfer characteristics under representative environmental loads.

Findings

The results indicate that the small-cell configuration exhibited superior thermal performance relative to the conventional block-based wall assembly. The enhanced resistance to heat transfer is attributed to the specific geometry and distribution of enclosed air cavities, made possible by the geometric flexibility inherent to additive manufacturing.

Implications for the Construction Sector

The outcomes highlight the potential of 3D-printing technologies to substantially improve the thermal efficiency of building envelopes in Israel. Beyond the direct implications for energy consumption related to heating and cooling, the proposed approach may contribute to accelerated construction processes, reduced dependence on skilled labor, and lower material usage.

Moreover, the geometric flexibility enabled by additive manufacturing offers broader architectural possibilities, allowing designers to transcend the formal constraints imposed by traditional masonry systems. The ability to obtain high-quality surface finishes directly from the printing process—thereby reducing or eliminating the need for subsequent plastering—further underscores the technological and economic advantages of the method.



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



2033611

Green construction 5.0 : Thermal optimization of 3D printed architectural components

Ohad Meyuhas, Architect Prof. Arnon Bentur Prof. Aaron Sprecher

Prof. Isaac Meir

Ben-Gurion University of the Negev

Copyright © 2025 by O. Meyuhas, A. Bentur and A. Sprecher

The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

Haifa

December 2025

National Building Research Institute, Technion City, Haifa 3200003, Israel | המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003
Fax: 972-4-8324534. פקס. | Tel: 972-4-8292242/3. טל. | e-mail: nbri@tx.technion.ac.il
<http://nbri.net.technion.ac.il>

"למען הסר ספק מודגש בזאת כי החוקר/ים, מוסד הטכניון למחקר ופיתוח בע"מ והטכניון – מכון טכנולוגי לישראל, אינם ולא יהיו אחראים לכל פגיעה ו/או נזק ו/או הוצאות ו/או הפסד, מכל סוג ומין, שנגרם או עלול להיגרם לרכוש ו/או לגוף, כתוצאה ישירה או עקיפה, למקבל הדו"ח ו/או לצד ג' כלשהו, עקב המחקר ו/או דו"ח זה או בהקשר אל מי מהם כמו גם בקשר ליישום האמור בו. מבלי לגרוע מן האמור לעיל, מובהר בזאת כי יישום תוצאות המחקר יהיה באחריותו הבלעדית של המיישם".

צוות המחקר

הטכניון

אוהד יעקב מיוחס^{1,2}, פבל לריאונבסקי^{2,3}, עופר פינקלשטיין^{1,2}, ארנון בנטור^{2,3}, אהרון שפרכר^{1,2}

¹ הפקולטה לארכיטקטורה ובינוי ערים, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

² המרכז לייצור מתקדם – המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

³ המכון הלאומי לחקר הבנייה, הטכניון – מכון טכנולוגי לישראל

אוניברסיטת בן גוריון בנגב

יצחק מאיר^{1,3}, דוד פרלמוטר^{2,3}, וולפגנג מוצפי-האלר^{3,4}

¹ המחלקה להנדסה אזרחית וסביבתית, הפקולטה למדעי ההנדסה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב (אב"ג)

² מדעי הסביבה, גיאואינפורמטיקה ותכנון ערים, הפקולטה למדעי הרוח והחברה, אב"ג

³ אדריכלות ובינוי ערים במדבר, המכונים לחקר המדבר, אב"ג

⁴ TerraVision Lab

תוכן העניינים

6.....	תקציר מנהלים
7.....	מבוא
8.....	בנייה מסורתית של קירות חוץ בישראל
8.....	פערים והזדמנויות
9.....	העקרון הטכנולוגי
9.....	מטרת המחקר
10.....	מתודולוגיה
13.....	פיתוח תערובת צמנטית לבנה - בחירה אסטרטגית לאקלים חם
14.....	תכנון ועיצוב - מהדפסת תאים פתוחים לתאים סגורים
17.....	אתגרים, פיתוח חלופות והכנה לניסוי שטח
22.....	ניתוח ההתנהגות התרמית של תאי בטון מודפסים
35.....	סיכום ומסקנות

רשימת איורים

- איור 1 ניסיונות עיצוב בגישה הרווחת 15
- איור 2 הדפסת העיצובים השונים בגישה הרווחת 15
- איור 3 ניסוי עיצובי מתקדם בגישה הרווחת 16
- איור 4 הגישה המוצעת – תאים סגורים 17
- איור 5 תצורת התאים שנבחרה לאחר ניסיונות הדפסה מרובים 19
- איור 6 התפתחות חתכי התאים בשלוש חלופות – Large ו Small, Medium 20
- איור 7 תהליך הדפסת האלמנטים 21
- איור 8 שינוע האלמנטים למבחן שטח 21
- איור 9. מימין: סקיצת מיקום התאים ומידות 23
- איור 10. סדר התאים ומספורם 24
- איור 11. מדידות חודש פברואר 25
- איור 12. מדידות חודש אפריל 27
- איור 13. מדידות חודש יוני 28
- איור 14. מדידות חודש יוני - מיקוד בתאריך 12.06 29
- איור 15. מדידות חודש יולי 30
- איור 16. מדידות חודש יולי - מיקוד בתאריך 12.07 31
- איור 17. הבדלים מורפולוגיים במבנה התאים וייחוסם להתנהגות התרמית שלהם 33
- איור 18. הבדלים מורפולוגיים במבנה התאים וייחוסם להתנהגות התרמית שלהם 33

תקציר מנהלים

מחקר זה מציג חידוש בתחום הבנייה התלת-ממדית, עם דגש על שיפור הביצועים התרמיים של קירות בטון מודפסים. המחקר בוצע בשיתוף בין המרכז לייצור מתקדם בבנייה בטכניון ולאוניברסיטת בן-גוריון ומציע חלופה מעשית לבניית הבלוקים המסורתית.

ממצאים מרכזיים:

במסגרת המחקר פותחה תערובת צמנטית לבנה המתאימה להדפסה תלת-ממדית, לצד מערכת פנימית של תאי אוויר כלואים וסגורים המיועדים לקירות. דגמים בקנה מידה אדריכלי ($100 \times 60 \times 100$ ס"מ, עובי דופן 20 ס"מ) הודפסו ושימשו לבדיקות תרמיות.

בוצעה השוואה למעטפת קיר מבוססת בלוקים (בנייה מסורתית), ונבחנו שלושה גדלים שונים של תאים פנימיים מודפסים (Small, Medium, Large), במסגרת ניסוי שדה שנמשך שנה מלאה בתנאי האקלים של הנגב.

הממצאים הצביעו על כך שתצורת התאים הקטנה (small) היא בעלת ביצועים תרמיים משופרים בהשוואה לבלוק בטון סטנדרטי ("בלוק 20").

משמעות למשק:

השיטה/הטכנולוגיה שפותחה היא בעלת פוטנציאל ליישום בענף הבנייה בישראל לצורך שיפור היעילות התרמית של מעטפות מבנה, הפחתת צריכת אנרגיה לחימום וקירור, האצת תהליכי ביצוע, צמצום שימוש בחומרי גלם והפחתת תלות בכוח אדם. נוסף על כך, השיטה מאפשרת חופש תכנוני רחב יותר ומשחררת את המעטפת האדריכלית מן הצורה הגנרית המוכתבת כיום על ידי חומרי גלם מסורתיים ושיטת הבלוקים המקובלת. יתרון נוסף הוא האפשרות לקבלת גימור איכותי ישירות מתהליך ההדפסה, ללא צורך בשכבת טיח נוספת, הודות לפיתוח תערובות הדפסה היוצרות פני שטח דחוסים ועמידים, בעלי גימור ויכולות ספיגה המזכירות חיפוי אבן.

מבוא

מעטפת הבניין משמשת כמחסום בין הסביבה הפנימית והחיצונית של המבנה. לאור כך, קיים מחקר ענף בעולם בנושא זה במטרה להביא לשיפור ולייעול את השימוש באנרגיה במבנים.

התכנון התרמי של מעטפת הבניין הוא קריטי להשגת נוחות תרמית וחיסכון באנרגיה בפרט בישראל, מקום בו ישנה שונות באקלים בין אזורים שונים (אקלים מדברי חם בדרום ואקלים ים תיכוני בחוף ואקלים הררי במרכז).

כיום, הפתרון הנפוץ בישראל הוא בניית קירות רב-שכבתיים ע"י שימוש באלמנטים בעלי כושר בידוד גבוה. כך למשל בלוק הבטון "20" (20×20×40 ס"מ) הוא האלמנט הסטנדרטי לבנייה, וכולל ארבעה חללים פנימיים "מלאים" באוויר ומשמשים לבידוד תרמי.

במחקר קודם שבוצע באוניברסיטת בן-גוריון¹ נמצא כי בלוקים אלו מפחיתים את צריכת האנרגיה הראשונית במעל-25% לעומת בטון יצוק, בעיקר בזכות שימוש מופחת במלט (10-12%) המאפשר מסה נמוכה יותר. עם זאת, שיטת בנייה זו מוגבלת בעיצוב, גמישות תכנונית, וזמן ביצוע.

בשנים האחרונות גובר העניין בטכנולוגיית הדפסת תלת-ממד בבנייה, במיוחד בשימוש בחומרים צמנטיים. המוטיבציה המרכזית היא שיפור הפריון וחיסכון בטפסנות, חומרים וכוח אדם. תחום זה נמצא כיום במוקד של מחקר פעיל, לצד יישומים בשטח, בעיקר בפרויקטי הדגמה בקנה מידה קטן, כפי שמתועד במספר סקירות עדכניות.^{2,3,4,5}

מחקר זה שם דגש על ההיבט התרמי של בנייה מודפסת, ובוחן כיצד ניתן לנצל את החופש הגאומטרי שמציעה טכנולוגיית ההדפסה כדי לייצר אלמנטים מורכבים בעלי ביצועים תרמיים משופרים. באמצעות השוואת קירות מודפסים לקירות סטנדרטיים, נבדקת יכולת ההתמודדות התרמית של מערכות מודפסות גדולות בקנה מידה אדריכלי.

¹ Huberman, N., & Pearlmuter, D. (2008). A life-cycle energy analysis of building materials in the Negev desert. *Energy and Buildings*, 40(5), 837–848. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.06.002>

² Gibbons et al., 2010, Gibbons, G. J., Williams, R., Purnell, P., & Farahi, E. (2010). 3D Printing of cement composites. *Advances in Applied Ceramics Structural Functional and Bioceramics*, 109(5), 287–290. <https://doi.org/10.1179/174367509x12472364600878>

³ Gosselin et al., 2016, Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., & Morel, P. (2016). Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete – a new processing route for architects and builders. *Materials & Design*, 100, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.097>

⁴ Labonnote et al., 2016, Labonnote, N., Rönquist, A., Manum, B., & Rütger, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.026>

⁵ Ma et al. 2018, 2022, Ma, G., Buswell, R., Da Silva, W. R. L., Wang, L., Xu, J., & Jones, S. Z. (2022). Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development. *Cement and Concrete Research*, 156, 106774. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.106774>

בנייה מסורתית של קירות חוץ בישראל

בנייה מסורתית בישראל מבוססת על מערכות בלוקים ומהוות את הפתרון הסטנדרטי והרווח ביותר למעטפת מבנים בישראל. בלוקים אלו משמשים הן למילוי קירות בין עמודי בטון במבנים רבי קומות, הן כמערכת נושאת והן כמעטפת במבנים נמוכים ובבנייה חד-משפחתית (להלן: "בנייה מסורתית"). לאור כך, מחקר זה מתמקד בפיתוח אלמנט קיר מודפס ואפקטיביות שלו בהשוואה למערכות בלוקים אלו.

מערכות בלוקים נפוצות

בלוק בטון "20" ובלוק בטון "20 תרמי": הם בלוקי הבטון הסטנדרטיים בישראל הכוללים ארבעה חללים פנימיים היוצרים תעלות אוויר אורכיות רציפות. מבנה זה מספק בידוד תרמי בסיסי משופר ביחס לבטון מלא, אך מוגבל בגמישות עיצובית ובביצועים תרמיים.

בלוק איטונג (AAC): בלוק מבטון תאי מאושפר באוטוקלב, בעל מבנה נקבובי אחיד המכיל עד 80% אוויר כלוא. מקנה בידוד תרמי משמעותי, אך בעל חוזק מכני נמוך יחסית ורגיש ללחות.

מגבלות הבניה המסורתיות:

- גאומטריה קבועה ומוגבלת;
- תלות בתעשייה מרוכזת וייצור מקומי;
- זמני אספקה והתקנה ארוכים;
- הגבלת חופש עיצוב;
- אי התאמה לתנאים אקלימיים ספציפיים.

פערים והזדמנויות

טכנולוגיית ההדפסה בתלת-ממד מאפשרת ייצור של אלמנטים גיאומטריים מורכבים. עם זאת, הפוטנציאל לשימוש ומימוש פלטפורמה זו לפיתוח רכיבי בניין יעילים ורב-תפקודיים עדיין אינו מנוצל וממומש במלואו. ודוק, מרבית הפרויקטים לשימוש בפלטפורמה זו, מתמקדים בשחזור אלמנטים מסורתיים בשיטות חדשות, אך אינם מתמקדים ביישום האיכויות הייחודיות של הדפסת תלת-ממד על מנת להשיג חופש גאומטרי, שילוב חומרים בזמן אמת, ושיפור הביצועים התרמיים, האקוסטיים, והמבניים של האלמנט המודפס, תוך התאמה לדרישות תרמיות, אקוסטיות, קונסטרוקטיביות ותשתיות ספציפיות.

מאמרם של הייוד וניקולס⁶ מדגיש את הפער בין היכולת הטכנולוגית לבין היישום המוגבל בפועל. מחקר זה מתמקד ביכולת של הדפסה תלת-ממדית לייצר מערכות קיר מורכבות הכוללות תאים פנימיים סגורים, במטרה לחקות ואף לשפר את הביצועים התרמיים של בלוקי הבטון הנפוצים. בשונה מבלוקים מסורתיים, שכוללים גאומטריה פשוטה של ארבעה חללים אשר בבניית קיר יוצרים חללים אורכיים רציפים, ההדפסה התלת-ממדית מאפשרת עיצוב צורני מותאם לביצועים. גישה זו מאפשרת עיצוב של חללים סגורים במטרה להגיע לאיזון אופטימלי בין בידוד תרמי למסה תרמית.

העקרון הטכנולוגי

העיצוב של תאים קטנים וסגורים מבוסס על כך שאוויר כלוא משמש כמבודד תרמי טבעי ויעיל, כל עוד נמנעת ממנו תנועה. אוויר בעל מוליכות תרמית נמוכה ($W/m \cdot K$, כ-0.025) מעביר חום בקצב איטי יחסית. כאשר הוא כלוא בחללים קטנים וסגורים, נמנעת תנועה קונבקציונית פנימית והולכת החום פוחתת באופן משמעותי.

ככל שהתאים אטומים וקטנים יותר, כך פוחתת היכולת של מולקולות האוויר לנוע בתוכם, תהליך התורם באופן ישיר להפחתת מעבר החום. על כן, חללים אלו מאפשרים שמירה על מסה תרמית מינימלית, המסייעת בהתאמת המבנה לאקלים חם ומשתנה.

גישה זו, המיושמת במחקר זה, שואבת השראה מגישות קודמות כמו זו המוצעת במחקר של דלימנס ושותפים⁷, ומנצלת את החופש הצורני שמציעה הדפסת תלת-ממד כדי לייצר מערך חללים מותאם לביצועים תרמיים ממוקדים.

מטרת המחקר

מטרת המחקר היא להציע אלטרנטיבה פרקטית לבנייה מסורתית (לקירות בלוקים מסורתיים). במחקר מוצגת הדגמה של גישה המשלבת יחדיו -עיצוב, חומר, ותהליך ייצור לשיפור הביצועים התרמיים – המתאימים לתנאים אקלימיים משתנים ובפרט לאקלים הארץ ישראלי, בדגש על הנגב. בהתאם, המחקר דרש פיתוח פתרונות הדפסה הניתנים ליישום בקנה מידה אדריכלי תוך בחינת השפעת גודל התאים הפנימיים (הממלאים את חלקם הפנימי של הקירות) על המוליכות התרמית של הקיר בהשוואה לקיר בלוקים מסורתי.

⁶ Heywood, K., & Nicholas, P. (2023). Sustainability and 3D concrete printing: Identifying a need for a more holistic approach to assessing environmental impacts. *Architectural Intelligence*, 2(1), 12. <https://doi.org/10.1007/s44223-023-00030-3>

⁷ Dielemans, G., Briels, D., Jaugstetter, F., Henke, K., & Dörfler, K. (2021). Additive Manufacturing of Thermally Enhanced Lightweight Concrete Wall Elements with Closed Cellular Structures. *Journal of Facade Design and Engineering*, 9(1), 59–72. <https://doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5418>

מתודולוגיה

שלב 1: פיתוח עיצובי

התהליך החל בחיפוש צורני שיטתי לפיתוח מבנה גאומטרי של מילוי פנימי בתאים סגורים לקיר. התהליך כלל יישום והבנה של מגבלות ויתרונות תהליך הדפסת החומר הצמנטי, בדגש על המגבלות הטכנולוגיות של תהליך ההדפסה:

1. רציפות ההדפסה: תהליך זה מחייב הדפסה רציפה ללא עצירות;
2. מהירות אחידה: תנאי קריטי לעובי דופן יציב - מהווה אתגר בתכנון מסלול ההדפסה. נדרש לחלק את המסלול לסגמנטים שווי-אורך מבלי לפגוע בגאומטריה, כדי לאפשר תנועה רציפה וקצב זרימה אחיד של הרובוט;
3. קצב זרימה: שמירה על קצב זרימה אחיד של החומר המחייב התחשבות באורך הסגמנטים המודפסים;
4. אופטימיזציה מבנית: כדי להוריד את המסה הכוללת של המבנה המודפס ולצמצם את מעברי החום, העיצוב חייב תכנון מוקדם שיצמצם את עובי החיבורים והתפרים

שלב 2: פיתוח תערובת צמנט לבנה

פיתוח תערובת צמנט לבנה המותאמת לדרישות הבאות:

דרישות הדפסה: התערובת חייבת להיות ניתנת לזרימה חלקה דרך מערכת ההדפסה תוך שמירה על עקביות ואיכות השכבות המודפסות.

דרישות תרמיות: השימוש בצמנט לבן נובע מתכונותיו האופטיות המיוחדות - צבעו הבהיר מאפשר החזרה גבוהה יותר של קרינה סולארית (אלבדו גבוה) ובכך מפחית את בליעת החום בקיר. תכונה זו חיונית במיוחד באקלים ישראלי חם כמו זה של הנגב, שם הפחתת עומסי החימום הסולארי יכולה לשפר משמעותית את הביצועים התרמיים של המבנה.

דרישות אדריכליות: הצמנט הלבן מאפשר קבלת גימור נקי ואחיד ישירות מתהליך ההדפסה, ומייתר את הצורך ביישום גמרים נוספים או שכבות טיח. תערובת ההדפסה פותחה כך שתיצור פני שטח דחוסים ועמידים, בעלי גימור המזכיר חיפוי אבן. פני השטח הבהירים מאפשרים ביטוי עיצובי ואסתטי רחב, תוך שמירה על אטימות גבוהה של המעטפת.

שלב 3: בחינת הדפסה ותיקון עיצוב

שלב זה כלל הדפסות ניסיון לזיהוי כשלי הדפסה וחזרה איטרטיבית על העיצוב. התהליך כלל התמודדות עם בעיות טכניות כמו אורך סגמנטים המשפיע על עובי דופן ההדפסה, חסימות בזרימה, אי-יציבות מבנית במהלך ההדפסה, ותיקון פרמטרים גאומטריים להתאמה לתהליך הייצור לאמנטיים בקנה מידה אדריכלי.

שלב 4: בחינה דיגיטלית של העיצוב

ביצוע סימולציות דיגיטליות לבחינת הביצועים התרמיים של העיצובים השונים לפני מעבר לשלב הייצור הפיזי. כלי זה אפשר אופטימיזציה מוקדמת של הפרמטרים הגיאומטריים והערכה של היעילות התרמית הצפויה.

שלב 5: ייצור בקנה מידה אדריכלי

בשלב זה הודפסו ארבעה אלמנטים אדריכליים לצורך בחינה ניסויית בקנה מידה מלא. כל אלמנט עוצב כיחידת קיר בממדים של 100×100 ס"מ ובגובה 60 ס"מ, עם עובי דופן של 20 ס"מ וחלל פנימי בנפח של כ-60 סמ"ר. מידות אלה נבחרו כך שידמו לקיר בלוקים מסורתי ויאפשרו השוואה ישירה. האלמנטים הודפסו בגרסאות שונות, שכללו מערכות תאים פנימיים סגורים בתצורות שונות (Small, Medium, Large). מטרת השונות הייתה לבחון כיצד שינוי בגודל התאים משפיע על הביצועים התרמיים. נמצא כי הגדלת ממדי התאים הפנימיים הפחיתה את כמות חומר ההדפסה הנדרשת ואת משקל האלמנט הכולל. לצורך ייחוס, נבנה קיר נוסף מבלוקים תרמיים מסורתיים במידות $20 \times 20 \times 40$ ס"מ, אשר שימש כבסיס להשוואה בין השיטות.

שלב 6: מבחן שטח באקלים אמיתי

בשלב זה הוצבו האלמנטים המודפסים באזור הנגב (מדרשת שדה בוקר) למשך שנה שלמה, במטרה לבחון את התנהגותם התרמית לאורך כל עונות השנה. ההצבה נעשתה במסגרת מעקב ניסיוני בתנאים אקלימיים אמיתיים, בשיטה המוצעת במחקרם של חייק ושותפים⁸. שיטה המאפשרת בחינה ישירה של תגובת הקירות לעומסי חום בקיץ, לקרה בחורף ולמעברי עונות. שלב זה מספק בסיס נתונים מקיף להערכת יעילותם של העיצובים בתנאים חיצוניים משתנים.

סיכום שלבי הביצוע והתוצאות

התהליך כולו כלל מעבר הדרגתי מהגדרת צורניות ותערובות מותאמות, דרך ניסויי הדפסה וסימולציות דיגיטליות, ועד לייצור אלמנטים אדריכליים בקנה מידה מלא והצבתם לניסוי שטח מתמשך. במהלך ההשוואה בין שלושת עיצובי הקירות (Small, Medium, Large) נמצא קשר הפוך בין גודל התאים למסה הכוללת: תאים קטנים יותר העלו את מסת הקיר, בעוד שתאים גדולים יותר הקטינו את המסה אך אפשרו תנועת אוויר מוגברת - תופעה המובילה להגברת מעבר החום בהסעה (קונבקציה).

⁸ Haik, R., Peled, A., & Meir, I. A. (2020). The thermal performance of lime hemp concrete (LHC) with alternative binders. Energy and Buildings, 210, 109740. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109740>

האלמנטים הוצבו באזור הנגב למשך שנה, במסגרת מעקב ניסיוני בתנאים אקלימיים אמיתיים, במטרה לבחון את השפעת עונות השנה על התנהגותם התרמית ולאפשר הערכה כמותית ומבוססת של ביצועי העיצובים.

פיתוח תערובת צמנטית לבנה - בחירה אסטרטגית לאקלים חם

במסגרת המחקר פותחה תערובת הדפסה ייעודית המבוססת על צמנט לבן (CEM I White). בחירה זו אינה מונעת משיקולים אסתטיים בלבד, אלא מהווה החלטה אסטרטגית המבוססת על שיקולים תרמיים, סביבתיים ואדריכליים, המותאמים לאקלים הישראלי החם. מעבר לתכונותיו האופטיות-הפחתת בליעת החום ושיפור הביצועים התרמיים של המעטפת, הצמנט הלבן מאפשר קבלת גימור אחיד וישייר מתהליך ההדפסה, ללא צורך בשכבות טיח או יישום גמרים נוספים.

פיתוח התערובת במנת מים נמוכה מאפשר יצירת פני שטח דחוסים ועמידים, בעלי גימור המזכיר חיפוי אבן וערכי ספיגה נמוכים, ופותר אפשרויות רחבות לביטוי עיצובי ואסתטי תוך שמירה על איכות ואטימות גבוהה של המעטפת.

הצבע הבהיר של הצמנט הלבן מתורגם למקדם החזרה (אלבדו) גבוה משמעותית של קרינה סולארית. במחקרם של Levinson Akbari, נמצא כי בטון מצמנט אפור מאופיין באלבדו סולארי ממוצע של 0.35-0.40, בעוד שבטון מצמנט לבן מגיע לערכים של 0.70-0.80 כשהוא חדש. גם לאחר חשיפה ממושכת לתנאי סביבה, בטון לבן שומר על אלבדו של 0.40-0.60, עדיין גבוה משמעותית מבטון אפור⁹.

להבדל זה השלכה משמעותית במיוחד באקלים חם ושטוף שמש כמו זה של ישראל. משטח בהיר יותר בולע פחות אנרגיה תרמית מקרינת השמש, ובכך מפחית את עומסי החימום על מעטפת הבניין. תופעה זו קריטית במיוחד באזורים כמו הנגב, שם הקרינה הסולארית חזקה לאורך רוב חודשי השנה וטמפרטורות החוץ גבוהות.

שיקולים נוספים

מעבר לתרומה התרמית, לשימוש בצמנט לבן קיימים יתרונות נוספים הרלוונטיים להקשר הישראלי:

- **הפחתת אפקט אי-החום העירוני** – משטחים בהירים ברחבי העיר מחזירים יותר קרינה ומסייעים להפחתת טמפרטורת האוויר הכוללת בסביבה הבנויה;
- **עמידות אופטית לאורך זמן** – הצבע הבהיר של הצמנט הלבן שומר על יציבותו ואינו דוהה במהירות, ובכך שומר על תכונות ההחזר שלו לאורך שנים;
- **גמישות אסתטית** – הצבע הלבן מהווה בסיס נייטרלי המאפשר שילוב פיגמנטים בהירים שונים, מבלי לפגוע במקדמי ההחזר וביעילות התרמית של המעטפת.

⁹ Levinson, R., & Akbari, H. (2002). Effects of composition and exposure on the solar reflectance of portland cement concrete. Cement and Concrete Research, 32(11), 1679–1698. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00835-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00835-9)

תכנון ועיצוב - מהדפסת תאים פתוחים לתאים סגורים

הגישה הרווחת

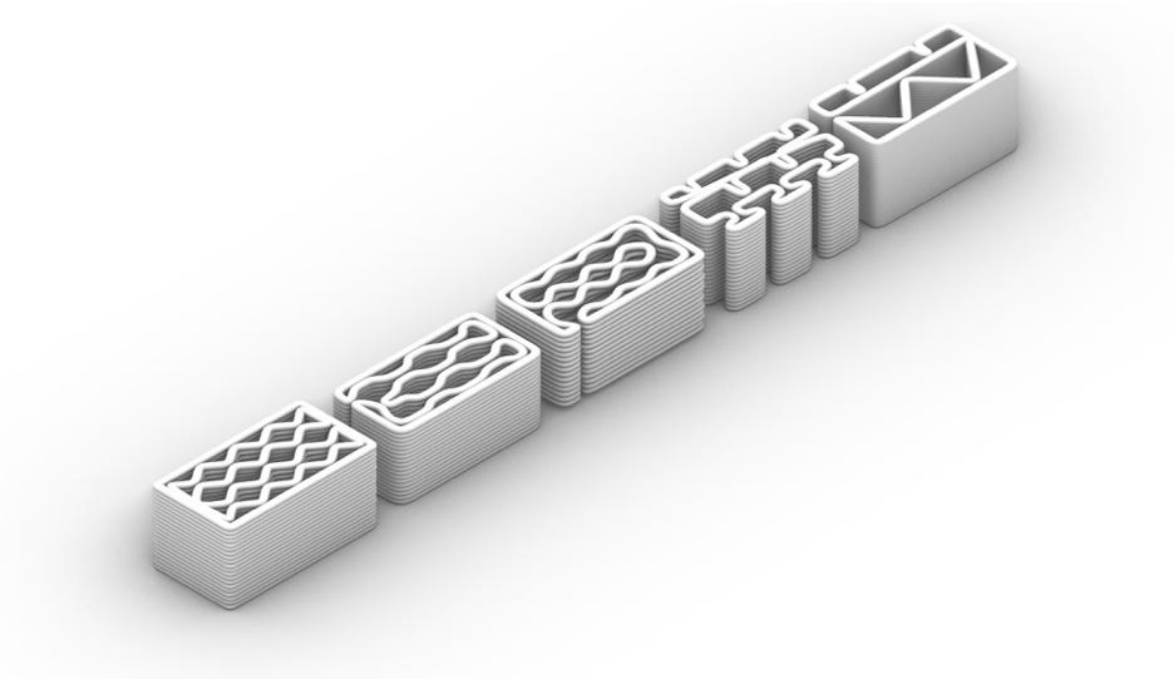
מרבית המחקרים והיישומים בהדפסת קירות צמנטים בתלת-ממד מאמצים גישה הדומה לעקרון של בלוקי הבטון המסורתיים – יצירת חללים אנכיים רציפים המשתרעים לכל גובה הקיר. בגישה זו מודפסים תאים פתוחים השומרים על חתך אופקי אחיד, כך שנוצרת צורה אקסטרודית (Extruded) לאורך כל האלמנט.

היתרון המרכזי של שיטה זו טמון בפשטות ההדפסה ויעילותה הטכנולוגית: היא מאפשרת שמירה על רציפות זרימה וקצב שיחול אחיד של החומר, מבלי להידרש לשינויי מהירות או להתמודדות עם אתגרים גיאומטריים כגון בליטות, זוויות חדות או שינויי חתך פתאומיים – אשר בדרך כלל מחייבים הוספת תמיכות, האטה בתנועת הרובוט או שינוי בפרמטרי ההדפסה. בכך נשמרים רוחב וגובה אחידים של השכבות, והייצור הופך יעיל יותר מבחינה טכנולוגית.

עם זאת, לשיטה זו קיימות מגבלות תרמיות מהותיות:

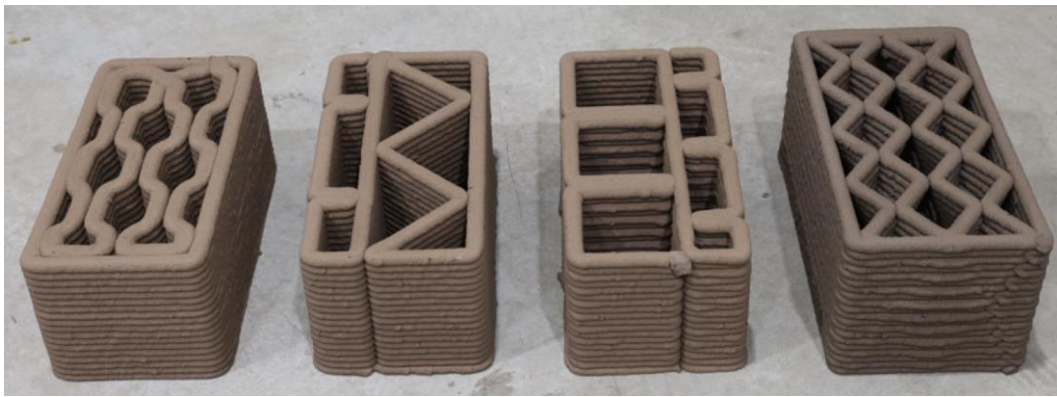
תנועת אוויר קונבקציונית פנימית - כאשר התאים פתוחים לאורך האנך, נוצרת זרימת אוויר טבעית: אוויר חם עולה מעלה, אוויר קר יורד מטה, ותנועה זו מייצרת לולאת הסעה רציפה המאיצה את מעבר החום דרך הדופן. בקיץ, לדוגמה, האוויר המתחמם בצד החיצוני של הקיר עולה מעלה ומוחלף באוויר קריר מלמטה, ובכך מתאפשר מעבר חום מוגבר.

חדירת אוויר חיצוני - פתחים או חוסר אטימות בראש ובתחתית הקיר מאפשרים חדירה של אוויר חיצוני, מה שמבטל למעשה את יתרון הבידוד של האוויר הכלוא.



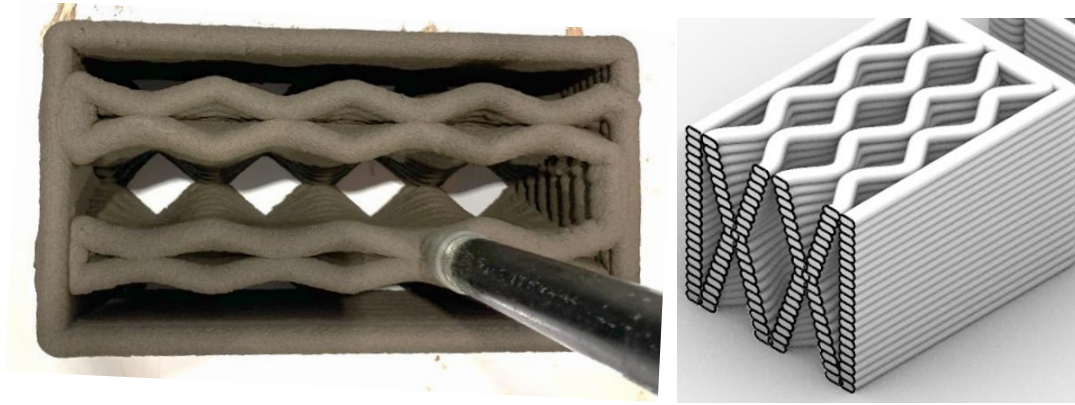
איור 1: ניסיונות עיצוב בגישה הרווחת – מסלולי הדפסה: תאים פתוחים אורכיים, בדומה למבנה הפנימי של בלוק 20 המסורתי.

הגישה עושה שימוש בחלוקה מרובה של תאים פנימיים ובאפקט של הצללה עצמית, תוך ניסיון לצמצם היווצרות גשרים תרמיים מצד לצד.



איור 2: הדפסת העיצובים השונים בגישה הרווחת: ניסוי ייצור לבחינת התנהגות תאים פתוחים אורכיים, בדומה לבלוק 20 המסורתי.

ההדפסות אפשרו לבחון הצללה עצמית, חלוקה פנימית מרובה ואופן היווצרות גשרים תרמיים מצד לצד.



איור 3: ניסוי עיצובי מתקדם בגישה הרווחת – הדפסת תצורה פנימית מורכבת שמרחיקה ומקרבת את הדפנות הפנימיות, במטרה לצמצם גשרים תרמיים בין המעטפת הפנימית לחיצונית. הצלחת הניסוי והבנת מגבלותיו הובילו לפיתוח הגישה החדשה של תאים סגורים במחקר הנוכחי.

גישת המחקר

מחקר זה מציע גישה שונה מהותית מהגישה הרווחת של תאים פתוחים אנכיים. במחקר זה פיתחנו שיטת הדפסה של מילוי פנים בתאים סגורים הכולאים את האוויר הפנימי ומבודדים אותו מהסביבה החיצונית. ההחלטה למעבר לתאים סגורים נשענת על עקרון פיזיקלי בסיסי: אוויר הוא מבודד תרמי יעיל כל עוד הוא נייח, אך ברגע שנוצרת תנועה פנימית הוא הופך למוביל חום יעיל באמצעות הסעה (convection). לכן, כליאת האוויר במערך תאים קטנים וסגורים היא מפתח לשיפור הבידוד התרמי. העיקרון דומה לזה של חלונות בזיגוג כפול או משולש: החלל בין שכבות הזכוכית מכיל אוויר או גז אציל כלא, שאינו יכול לנוע ולכן משמש כמבודד. במחקר זה מיושם רעיון דומה בקנה מידה אדריכלי - יצירת מערך של חללים כלואים קטנים בתוך מסת הקיר.

גישה זו קיבלה חיזוק ממחקר קודם של Dielemans ושות' (2021)¹⁰, שהציג הדפסה של מבנים תאיים סגורים מבטון קל משקל. במחקר זה הודגמה האפשרות לשפר ביצועים תרמיים באמצעות כליאת אוויר. עם זאת, המחקר בוצע בקנה מידה מצומצם, התמקד בכיוון תאים אנכי אחד, והסתמך בעיקר על סימולציות תרמיות ללא אימות בתנאי שטח אמיתיים.

המחקר הנוכחי יצא מנקודת מוצא זו אך מציע שינויים מהותיים כדלקמן:

שינוי גודל התאים – פיתוח מערך תאים בגדלים שונים המותאמים לדרישות תרמיות ומבניות, תוך שמירה על יכולת ייצור בקנה מידה אדריכלי תעשייתי;

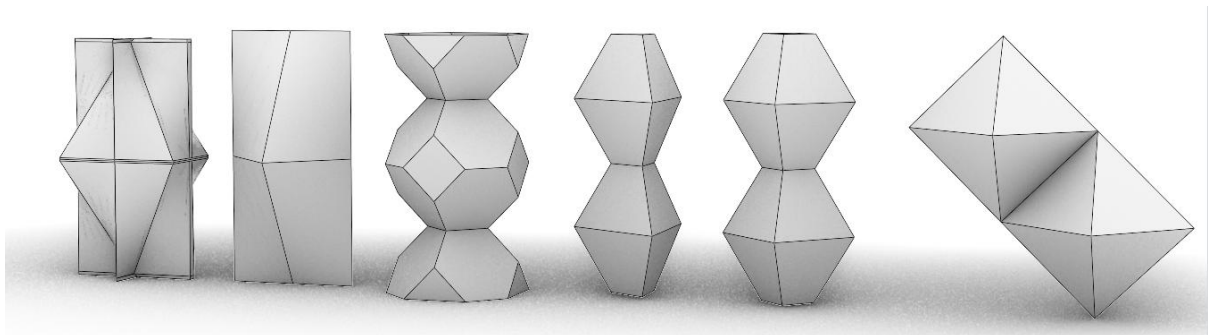
¹⁰ Dielemans, G., Briels, D., Jaugstetter, F., Henke, K., & Dörfler, K. (2021). Additive Manufacturing of Thermally Enhanced Lightweight Concrete Wall Elements with Closed Cellular Structures. Journal of Facade Design and Engineering, 9(1), 59–72. <https://doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5418>

התאמה לכיוון הפאה – בניגוד למבנה תאי אחיד, במחקר הנוכחי התאים מסודרים **במספר שכבות בכל כיוון** ומתמצבים לכיוונים שונים **בהתאם לכיוון הפאה של המעטפת**. כך נוצר מבנה תלת-ממדי מורכב שמתאים את עצמו לגאומטריה החיצונית ולכיוון זרימת החום;

שימוש בצמנט לבן (CEM I White) והתאמתו להדפסת תלת-ממד – צמנט לבן מציב אתגרים ייחודיים בהדפסה: תכונות ריאולוגיות שונות מצמנט אפור, התנהגות התקשות מיוחדת, והצורך לשלוט במדויק בפרמטרי ההדפסה כדי להשיג סגירה אטומה של תאים. נוסף על כך, יצירת תאים סגורים עם **זוויות מאתגרות** דרשה פיתוח פרמטרים ייעודיים ובקרה הדוקה על תהליך ההדפסה.

מעבר לקנה מידה אדריכלי מלא – ייצור אלמנטים בגודל $60 \times 100 \times 100$ ס"מ והצבתם לניסוי שטח אמפירי של שנה שלמה בנגב, המאפשר הערכה אמיתית של הביצועים התרמיים בתנאים אקלימיים קיצוניים.

באופן זה, המחקר הנוכחי אינו רק מאמץ את הרעיון התאי הסגור, אלא מרחיב אותו לכדי יישום תעשייתי מותאם-אקלים, המשלב שיקולים תרמיים, חומריים ותכנוניים בתנאי אמת.



איור 4: הגישה המוצעת – תאים סגורים: בחינה גאומטרית של מערכות צורניות המשלימות זו את זו ליצירת ריצופים תלת-ממדיים בשכבות משתנות. מעבר לאתגר הגאומטרי, תכנון זה מציב גם אתגר ייצור משמעותי – סגירה מלאה של תאים ושמירה על רציפות מסלול הדפסה ללא עצירות, המהווים תנאי קריטי להשגת מבנה אטום ויעיל תרמית בקנה מידה אדריכלי.

אתגרים, פיתוח חלופות והכנה לניסוי שטח

אתגרים ומניעים עיצוביים

המעבר מגישה של תאים פתוחים לתאים סגורים הציב אתגרים טכנולוגיים ועיצוביים. תאים סגורים מחייבים סגירה מלאה בכל שכבה ורציפות בהדפסה, ללא עצירות ושינויים חדים במהירות. כל עצירה יוצרת נקודות חולשה ומסכנת את האטימות של התא בסיטואציה שאורך מסלול ההדפסה אינו אחיד בין השכבות.

כדי להתמודד עם אתגרים אלה בוצע תהליך פיתוח שכלל:

- **כיול עובי שכבה** – מעבר לשכבות בעובי 12 מ"מ, לשם קיצור זמן ייצור, הפחתת מספר תפרים ושיפור יציבות מבנית;
- **מסלול ההדפסה רציף** – פיתוח אלגוריתם להבטחת סגירה מלאה של כל תא בכל שכבה ומעבר חלק בין תאים סמוכים;
- **רציפות ההדפסה** – תכנון מסלול ההדפסה כמסלול המשכי ללא עצירות;
- **שמירה על מהירות אחידה** – תכנון גיאומטרי המאפשר סגמנטים באורך דומה לשמירה על עובי אחיד והפחתת סיכונים של התקשות מוקדמת או נזילה, מחייב עיצוב סגמנטים באורכים אחידים;
- **קצב זרימה** – שמירה על קצב זרימה אחיד של החומר המחייב התחשבות באורך הסגמנטים המודפסים;
- **איזון זמן מחזור שכבה** – מציאת טווח אופטימלי למניעת קריסה פלסטית מצד אחד וחוסר הידבקות מצד שני;
- **אטימות התאים** – בקרת חפיפה בנקודות החיבור, שליטה בקצב ההתקשות ובדיקות אטימות לאחר ההדפסה;
- **מרווח בין מסלולי ההדפסה** – קביעת המרווח בין הקווים כך שיבטיח סגירה ואטימה מלאה של התאים מבלי ליצור עודף חומר בנקודות החיבור. מרווח מדויק מאפשר מניעת דליפות אוויר פנימי, שמירה על משקל האלמנט ברמה אופטימלית וצמצום היווצרות גשרים תרמיים בין הדפנות;
- **זווית הדפסה אופטימלית** – נמצא כי זווית של 37° אפשרית עם התערובת הצמנטית שפותחה ואיפשרה הדפסה יציבה של תאים סגורים תוך שמירה על אטימה ומניעת קריסה;
- **אופטימיזציה מבנית** – כדי להוריד את המסה הכוללת של המבנה המודפס ולצמצם את מעברי החום, פותח ותוכנן עיצוב שיצמצם את עובי החיבורים והתפרים.

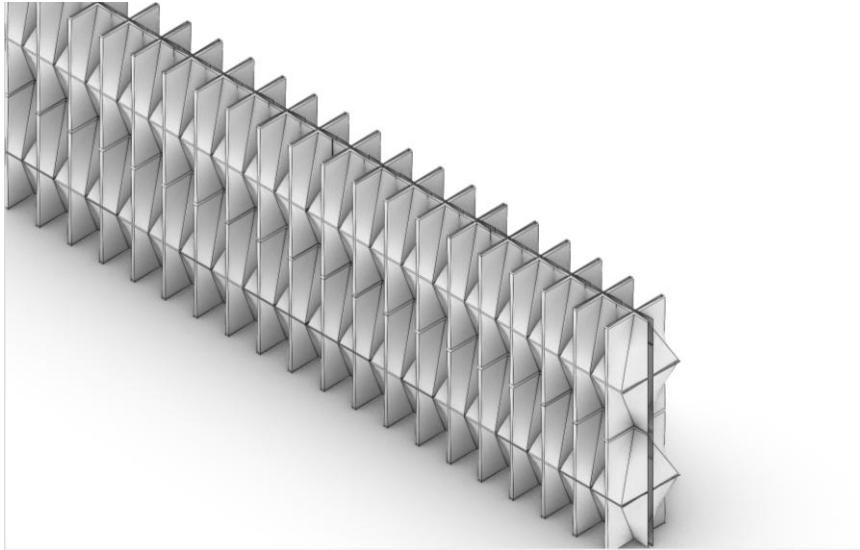
הבנת האתגרים ודרכי התמודדות איתם התבסס על ניסויי הדפסה חוזרים ובדיקות איטרטיביות, שאפשרו לוודא כי התאים אכן נסגרים באופן אמין ועקבי.

פיתוח חלופות עיצוביות

חלק מתהליך העיצוב כלל בחינת חלופות שונות שנבדקו בהדפסות ניסוי. על בסיס תהליך זה פותח עיצוב בגישה פרמטרית שאפשר יצירת וריאציות שונות של תאים, תוך התייחסות למשתנים כגון עובי דופן, גודל תא ורציפות מסלול ההדפסה. עיצוב זה אפשר לפתח צורות גיאומטריות מורכבות שבהן כל תא תומך בשכניו, ובכך למקסם את כמות התאים תוך שמירה על ישימות טכנולוגית.

מתוך תהליך זה נבחר עיצוב מערכת תאים פנימית שנתן פתרון מקסימלי ועל בסיסו גובשו שלוש חלופות לגודל התאים (Small, Medium, Large) שכל אחת מהן נבחנה על פי:

- **בנייתיות** – יציבות ההדפסה וזמני מחזור שכבה;
- **ביצועים תרמיים**;
- **משקל האלמנט**;



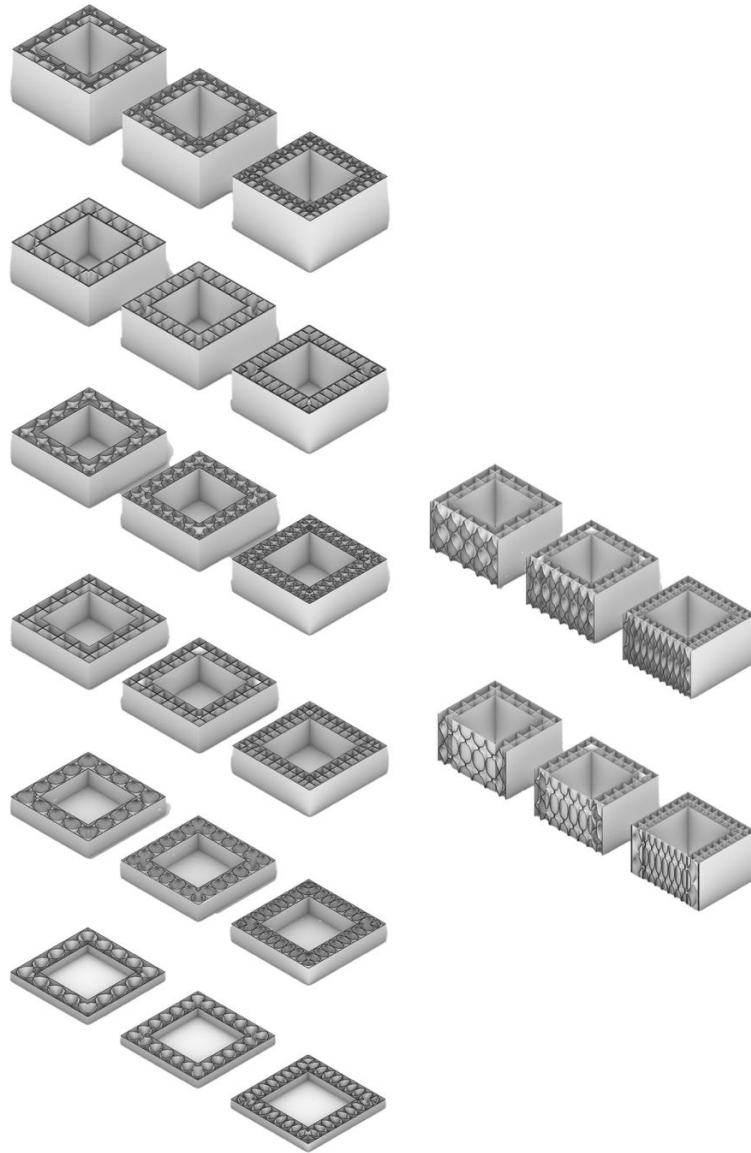
איור 5: תצורת התאים שנבחרה לאחר ניסיונות הדפסה מרובים. נמצא כי זווית הדפסה של 37° אפשרית עם תערובת הצמנט שפותחה. לאחר ניסויי בחינה גובש עיצוב המאפשר אטימה מלאה של התאים, תוך שימוש במרווח של 9 מ"מ בין מסלולי ההדפסה – מרווח שהבטיח סגירה ואטימה מלאה, מנע עודף חומר בחיבורים, צמצם גשרים תרמיים ושמר על יציבות מבנית.

השפעת גודל התאים:

Small – ככל שהתאים קטנים יותר נדרש יותר חומר ליצירת האלמנט, כך שמסתו גבוהה יותר. מספר הגשרים התרמיים גדול, אך כליאת האוויר בתאים קטנים מונעת ביעילות הסעה פנימית ומגבירה את המסה התרמית.

Medium – תאי ביניים יוצרים איזון בין בידוד תרמי למסה תרמית. כמות החומר הנדרשת מתונה יותר, מספר הגשרים התרמיים קטן ביחס לאלמנט קטן, ובמקביל התאים עדיין מספיק קטנים כדי לצמצם הסעה פנימית באופן יעיל.

Large – ככל שהתאים גדולים יותר נדרש פחות חומר, ולכן מסת האלמנט נמוכה יותר ומספר הגשרים התרמיים מצטמצם. עם זאת, תאים גדולים מעלים את הסיכון לזרימת אוויר פנימית (הסעה) שמחלישה את ביצועי הבידוד. היתרון המרכזי של חלופה זו הוא בפשטות ייצור גבוהה יותר.



איור 6: התפתחות חתכי התאים בשלוש חלופות – Large ו-Small, Medium. השוואת החתכים בשלוש החלופות העיקריות. ניתן לראות את השינוי בגודל ובצפיפות התאים, את השפעתם על סגירה מלאה של האוויר הכלוא, ועל מספר הגשרים התרמיים הנוצרים בכל חלופה.



איור 7: תהליך הדפסת האלמנטים.



איור 8: שינוע האלמנטים למבחן שטח.

ניתוח ההתנהגות התרמית של תאי בטון מודפסים

יצחק מאיר^{1,3}, דוד פרלמוטר^{2,3}, וולפגנג מוצפי-האלר^{3,4}

¹ המחלקה להנדסה אזרחית וסביבתית, הפקולטה למדעי ההנדסה, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב (אב"ג)

² מדעי הסביבה, גיאואינפורמטיקה ותכנון ערים, הפקולטה למדעי הרוח והחברה, אב"ג

³ אדריכלות ובינוי ערים במדבר, המכונים לחקר המדבר, אב"ג

⁴ TerraVision Lab

פרק זה מתאר את האתר בו נערך ניטור התאים, התנאים האקלימיים בו, מערך המדידות, ותוצאותיהן. הוא מסכם את הנתונים על השלכותיהם ומציע שינויים אפשריים עתידיים במורפולוגית התאים המודפסים לשם שיפור תפקודם האקלימי.

1. האתר והאקלים בו

האתר בו נערך הניסוי הינה קריית שדה בוקר, המכונים לחקר המדבר, של אוניברסיטת בן-גוריון בנגב. הוא נמצא ברום של כ-470 מ' מעל פני הים. האקלים בו מוגדר כיבשתי מדברי. סיווג האתר ע"פ ת"י 1045 חלק 10 (מת"י, 2002) הוא אזור אקלים ג', אזור ההר (BWh) אקלים צחיח חם על פי מיון Köppen). פירוש הדבר כי האקלים מאופיין בקיצים חמים ויבשים לרוב, עם משרעת טמפרטורה יומית רחבה (עד כדי 20 מ"צ ויותר) ובהשלכה גם משרעת לחות יחסית רחבה מאוד. החורפים קרים אך עם קרינת שמש אינטנסיבית ברוב הימים, טמפרטורות מזעריות המגיעות לכדי 0 מ"צ בשעות הלילה המאוחרות, ולפעמים אף מתחת לכך. הרוח השלטת הינה צפון מערבית, הבריזה הים תיכונית, אם כי בשעות שונות של היממה בעונות השונות של השנה היא חגה גם לכיוונים שונים. הממוצע הרב שנתי של המשקעים הוא כ-85 מ"מ, עם מקדם השתנות של 5 ויותר.

השינויים האקלימיים (יוסף וחובריו, 2024) מתבטאים בעלייה של הטמפרטורות המרביות והמזעריות בקיץ, ומלווים גם בעליה בלחות, הנשאת על ידי הרוח השלטת מהים התיכון אל פנים המדבר. שילוב זה של טמפרטורות גבוהות ולחות יחסית עולה מחריף את תנאי אי הנוחות התרמית, מכביד על פעילות בשטחי חוץ, ומגביר את צריכת האנרגיה למיזוג בניינים.

לכל אלה השלכות ישירות על התכנון והבנייה, לרבות חומרי הבנייה על תכונותיהם הפיסיקליות.

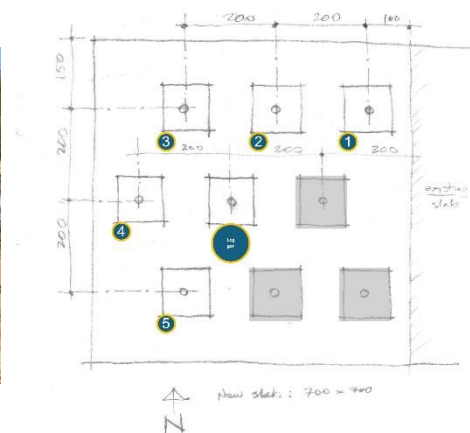
2. התאים והפעלתם

ארבעה תאי בטון מודפסים במידות 100/100/60 ס"מ ובעובי ממוצע 20 ס"מ הונחו על רצפת בטון יצוקה בשטח הניסויים של היחידה לאדריכלות ובינוי ערים במדבר, קריית שדה בוקר. התאים מוקמו במרווחים המבטיחים נגישות סולרית מסביב ביום השנה הקצר, 21 בדצמבר (איור 1). לכל תא נבנה קירוי משופע מלוחות פוליסטירן מותפח בעובי 5 ס"מ. אלה יוצרים תוספת בגובה 55 ס"מ לחזית

הדרומית של התאים לכל אורכה – 100 ס"מ. בשטחה של הגבהה זו ישנם שני פתחים במידות 37.5/40 ס"מ המאפשרים השגת חימום פסיבי בחורף, וקירור באוורור לילי בקיץ. (שטח הזיגוג הדרומי הנו כמעט כפול מהדרוש לחימום פסיבי באזור אקלימי זה, אך הוא נשמר לשם האחידות, מאחר שלאורך השנים נערכו מחקרים בתאים זהים הבנויים מחומרים שונים, קונבנציונאליים – בלוקי בטון חלולים, בלוקי בטון תאי מאושפר באוטוקלב, פוליסטירן – וחומרים ניסיוניים – המפקריט בהרכבים שונים בבלוקים או ביציקה, קש-חרסית ואחרים.) לטובת האוורור נפתחו גם שני פתחים בדופן המשופעת – הצפונית - של הקירוי ומידותיהם הן 20/25. בחורף הותקנו לפתחים הדרומיים לוחות PVC שקוף בעובי 2 מ"מ, מודבקים לדופן הפנימית של לוח הפוליסטירן הדרומי. הם נחשפו לקרינת שמש ישירה בין השעות 08:00-16:00. ביתר השעות נחסמו ובודדו הפתחים באמצעות לוחות פוליסטירן בעובי 5 ס"מ אשר הוכנסו אליהם מבחוץ כדי למזער הפסדי חום. בעונת המעבר נחשפה ביום רק מחצית משטח הזיגוג של החלונות הדרומיים. לעונה החמה יש שתי תקופות מדידה. במהלך חודש יוני הייתה חשיפה של 50% משטח הזיגוג הדרומי, ללא אוורור לילי. במהלך חודש יולי הפתחים הצפוניים והדרומיים נשארו חסומים בשעות היום והצפוניים נפתחו לאחר בשעות הלילה (מהשעה 22:00 ועד לשעה 08:00 בערך) לטובת האוורור המפולש.

בנוסף לארבעה התאים המודפסים נבנה תא מבלוקי בטון חלולים (20/20/40, ארבעה חורים). הוא נצבע בצבע אקרילי לבן והותקן לו קירוי זהה לזה של התאים. הפעלתו – פתיחה וסגירה של תריסים וחלונות – הייתה זהה לזו של התאים המודפסים.

כל התאים, לרבות זה מבלוקי בטון, נבנו על בסיסים אינדיבידואליים בעובי 15 ס"מ כל אחד. טרם יציקת הבסיס הגדול מבטון הונחו תחתיו צינורות שרשריים (קוטר 5 ס"מ) להשחלת חיווט. לבסיס כל תא נקדח חור בקוטר 10 ס"מ. כל תא הונח כך שצינור החיווט שבולט מרצפת הבטון הגדולה הועבר דרך הקדח בבסיס של תא, זאת כדי לאפשר התקנת השחלת חוטי חשמל לחיבור חיישנים בפנים התאים.



איור 9: מימין: סקיצת מיקום התאים ומידות. עמדת אוגר הנתונים באמצע. שלושת הריבועים האפורים אינם מיצגים תאים קיימים. משמאל: התקנת התאים על גבי רצפת הבטון. ניתן לזהות את הצינורות השרשריים

עליהם ממוקמים התאים כאשר הקדח שבבסיסם מתלבש על הצינור. המוטות הבולטים מהתאים הינם מובילים שמטרתם להקל על מיקום מדויק של התא בזמן ההורד.



איור 10: סדר הצבת התאים במתחם הניסוי. באיורים להלן מספור התאים בהתאמה לאיור זה. : תא מס' 1 הוא התא מבלוקי בטון חלולים. תא מס' 2 מודפס עם חללים פנימיים מלאים בחומר גרנולרי במשקל מרחבי נמוך. יתר התאים מכילים תאי אוויר כלוא בגדלים שונים בין הדופן החיצונית וזו הפנימית. התא ללא קירוי המסומן כ-Logger מכיל את אוגר הנתונים על אביזריו.

3. מערך הניטור

לכל תא הותקנו שלושה חיישנים (Type T Thermocouple sensors) כדלהלן:

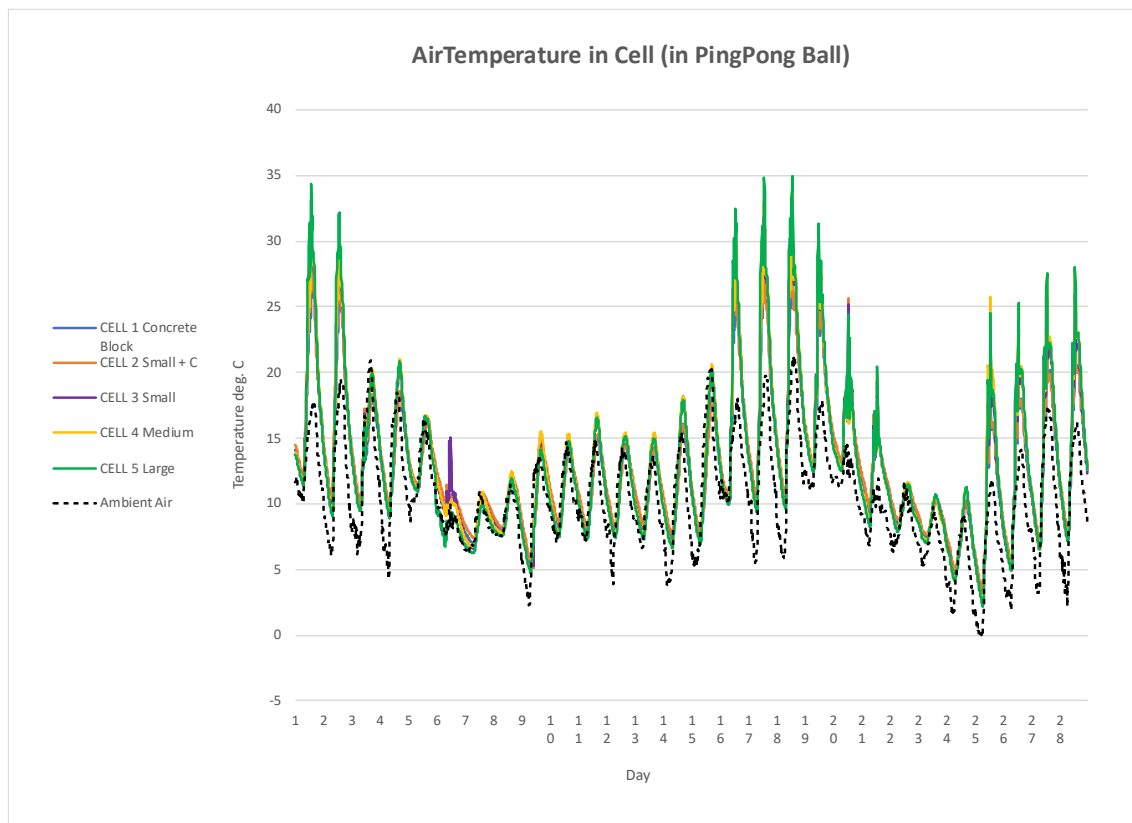
- טמפרטורת פני משטח חוץ - אמצע הקיר הדרומי;
- טמפרטורת פני משטח פנים – אמצע קיר דרומי;
- טמפרטורת פנים – מרכז חלל פנים התא, בתוך כדור אפור ניטרלי.

החיישנים חוברו לאוגר נתונים (Campbell Scientific Data Logger CR-1000) עם הגדלת מספר הערוצים באמצעות AM25T 25-Channel Solid State Multiplexer. מדידות נערכו כל 20 שניות. ממוצעים נלקחו עבור נתוני כל 15 דקות. נתונים מטאורולוגיים התקבלו מהשירות המטאורולוגי והתחנה המטאורולוגית של המכונים לחקר המדבר.

4. ניטור

4.1 ניטור בעונה הקרה

העונה הקרה מתייחסת לתוצאות מדידות חודש פברואר (פברואר נוטה להיות החודש הקר של השנה למרות שבחודש זה הימים כבר ארוכים יותר מאשר בדצמבר, בו מצוין היום הקצר של השנה). ניתן לזהות באיור 11 כי הטמפרטורות המזעריות יורדות לעתים מתחת ל-5 מ"צ ואף נוסקים ל-0 מ"צ, בעוד שהטמפרטורות המרביות מגיעות לכדי 20 מ"צ בשעות הצהריים. זוהי, כאמור, משרעת אופיינית לאזורים מדבריים יבשתיים (קונטיננטליים).



איור 11: מדידות חודש פברואר.

במדידות חודש פברואר ניתן לזהות התנהגות אקלימית כמעט זהה של כל התאים. הפעלת התאים כללה שבוע עם תריסים סגורים, ללא קליטת קרינה (08.02-15.02), מספר ימים עם חשיפה של 100% משטח החלונות (16.02-21.02), ומספר ימים עם חשיפה חלקית (50%) של החלונות (23.02-28.02).

• מצב סגור

08.02-15.02 – גם בימים ללא קליטת קרינה ישירה בפנים התאים, הם שומרים על טמפרטורות פנים גבוהות מן החוץ, עד כדי 2 מ"צ ויותר במרביות. הטמפרטורות המזעריות, לעומת זאת, נעות בין

עשירות מעלה בודדות גבוה מטמפרטורת החוץ, ועד כדי 1-2 מ"צ גבוהות יותר. בהיעדר קליטת קרינה או מקורות חום פנימיים, ההסבר היחיד הוא הולכת חום מהמעטפת החיצונית החשופה לשמש, דרך הגשרים התרמיים המחברים את שתי הדפנות, החיצונית והפנימית, ואגירה במסה התרמית הפנימית השומרת על טמפרטורה גבוהה יחסית מזו החיצונית בחלק מהלילות.

• חשיפת חלונות מלאה (100%)

16.02-21.02 – חשיפה של 100% משטח החלונות לקליטת קרינה ישירה, מעלה את הטמפרטורה בפנים התאים לכדי 15 מ"צ מעל טמפרטורת החוץ המרבית, ומביאה לטמפרטורת פנים מזערית עד כדי כ-5 מ"צ גבוהה מן המזערית בחוץ. כפי שצוין מעלה, שטח החלונות הדרומיים גדול מהדרוש לחימום פסיבי באזור אקלים זה, וזאת ניתן לראות בבירור בעליית טמפרטורת התאים החדה בשעות היום.

אירועים נקודתיים, כגון עליית קטנה מאוד של הטמפרטורה המזערית בפנים התאים לעומת עלייה משמעותית של טמפרטורת החוץ המזערית לא לגמרי ברורים ודורשים ניתוח מפורט יותר אשר יבדוק את ס"כ המסה התרמית בפנים התאים ויכולת האגירה הכוללת שלה, לעומת יעילות ההולכה של הגשרים התרמיים.

• חשיפת חלונות חלקית (50%)

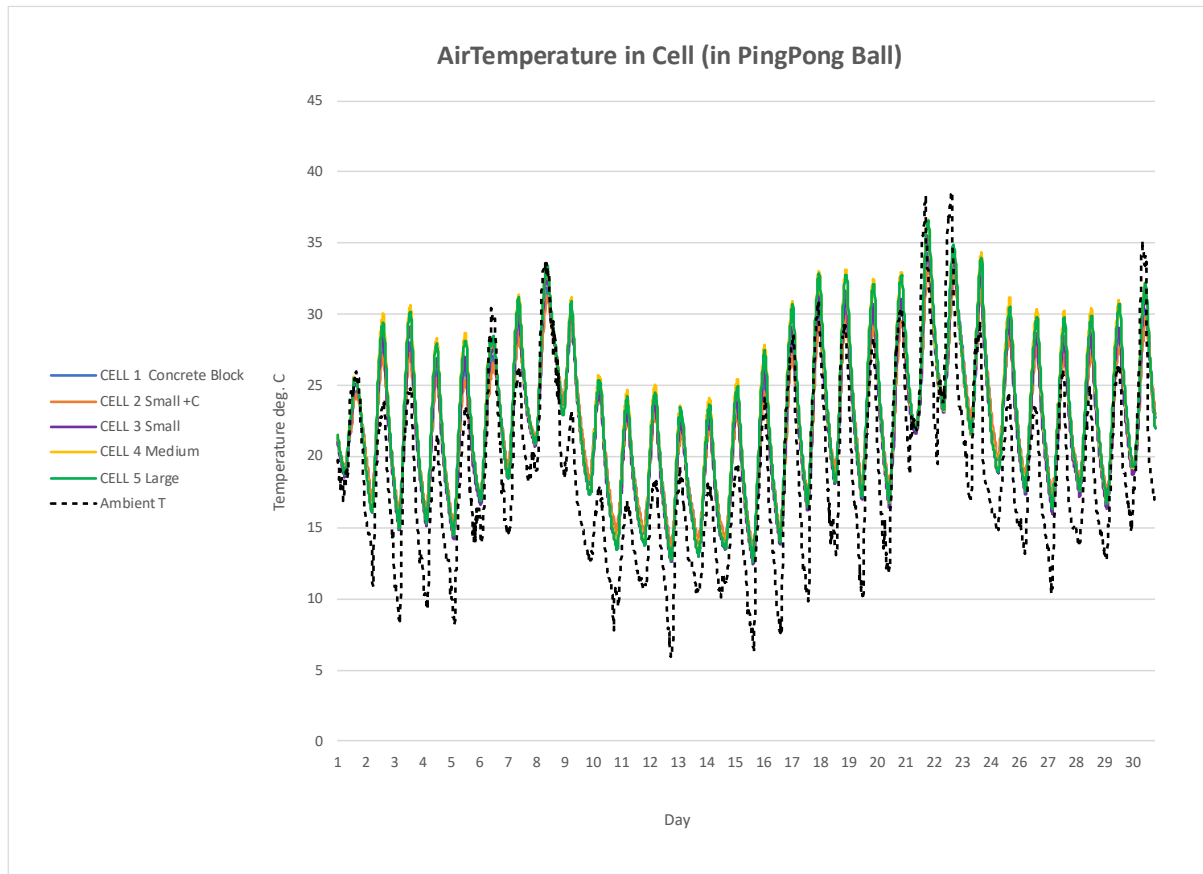
23.02-28.02 – חשיפה של 50% משטח הזיגוג הדרומי מעלה את טמפרטורת הפנים בין 10-15 מ"צ ביחס למירית בחוץ. הטמפרטורות המזעריות בפנים שורות על יתרון של 3-5 מ"צ ביחס למזעריות בחוץ.

תוצאות אלה מאששות את הקביעה כי לתנאי החורף של אזור ההר (אזור אקלים ג') מספיק שטח זיגוג דרומי סדרי גודל של כ-15% מס"כ שטח הרצפה נטו, שהרי במקרה הספציפי (של שטח כפול מכך (100% חשיפה של שטח הזיגוג) התקבלו טמפרטורות פנים גבוהות באופן חריג (פרלמוטר וחובריו, 2010).

4.2 ניטור בעונת מעבר

המצב זה אינו סביר כמצב הפעלה של בניין מאוכלס (כגון בניין מגורים), אך הוא מאפיין באופן ברור את תכונות התאים ומייצג מבנה שאינו מאוכלס. איור 12 מראה הן את השפעה של קליטה ישירה של קרינה והן את האינרציה המוקנית לתאים בשל המסה התרמית שלהם. את המשמעות של קליטת קרינת שמש ניתן לראות בבירור בימים 10.04-16.04, בהן טמפרטורת החלל הפנימי נשמרת גבוהה משמעותית ביחס לטמפרטורת החוץ, הן המרבית והן המזערית, הראשונות עד כדי 8 מ"צ ויותר בצהרי 09.04, האחרונות עד כדי 7 מ"צ ויותר בלילה בין 12.04-13.04. יש להניח כי אוורור לילי יכול היה למתן את טמפרטורות הפנים, לפחות בשעות הלילה, אך מהירויות הרוח הלילית בחודש אפריל היו

יחסית נמוכות. בכל מקרה, בהתחשב במשרעת הטמפרטורות היומית שהגיע לכדי 19 מ"צ (-22.04-23.04), בתנאים אידיאליים ולפי החישוב האמפירי המובא במסמך מאת המשרד להגנת הסביבה (שביב, פלמן, 2016: 22), ניתן היה להגיע להפחתה של כמעט 9 מ"צ על ידי הפעלת אוורור לא מפולש.

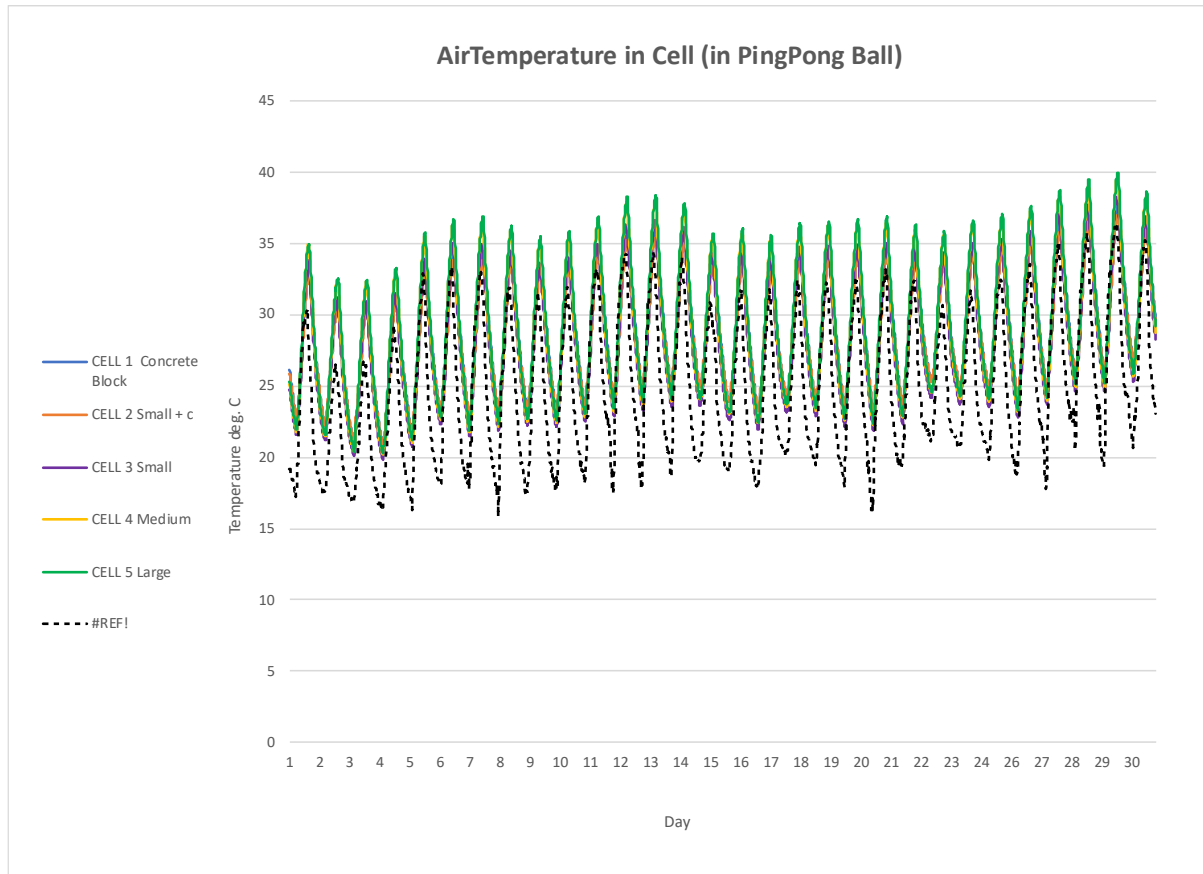


איור 12: מדידות חודש אפריל.

4.3 ניטור בעונה החמה

נבדק התפקוד התרמי של התאים במשך שני חודשים, ובשתי תקופות הפעלה כדלהלן: יוני ובו 50% מהזיגוג הדרומי חשוף, וללא אוורור לילי; ויולי ובו הזיגוג חסום באופן מוחלט, ואילו פתחי האוורור נפתחו רק לפרק הזמן שטמפרטורת האוויר ירדה משמעותית יחסית לשעות היום, בין השעות 22:00-08:00 בקירוב.

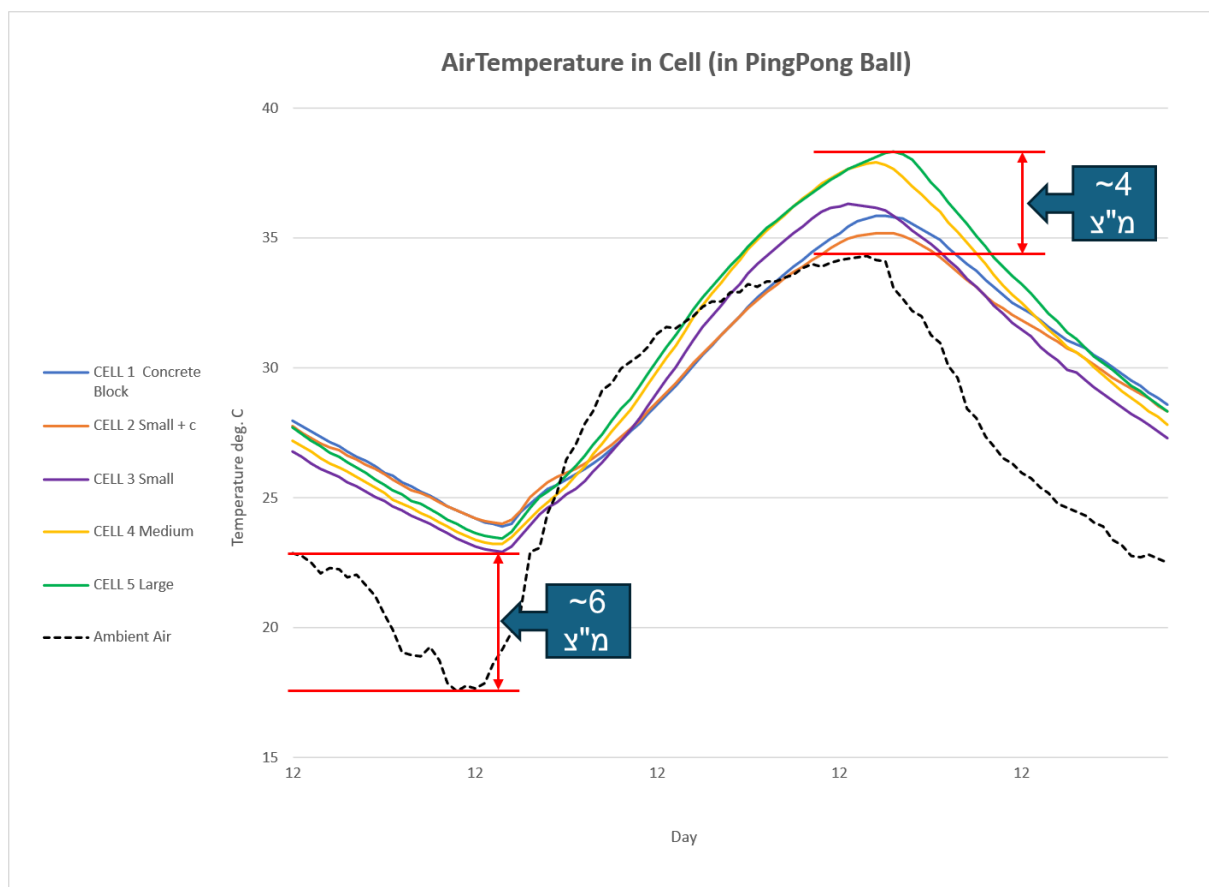
- במקרה של חודש יוני ניתן לזהות התנהגות גדומה לזו בעונת המעבר (אפריל) אך בהבדל מהותי אחד והוא כי כל טמפרטורות החוץ נעות בין 16-36 מ"צ במהלך כל החודש. טמפרטורת פנים התאים נעה בחודש זה בין 20 מ"צ (המזערית המוחלטת), לבין כ-39 מ"צ (המרבית המוחלטת) (איור 13).



איור 13: מדידות חודש יוני.

ובכל זאת, ישנם הבדלים בין התאים השונים. להבנה טובה יותר של הבדלים אלה נבחרה יממה אחת (12.06) ותוצאות הניטור במהלכה מובאות באיור 14. ניתן לזהות הבדלים של עד כדי 6 מ"צ בין הטמפרטורה המזערית בחוץ, לזו בתא הפחות חם מכולם (Cell 3 Small), וכ- 4 מ"צ בין הטמפרטורה המרבית בחוץ לזו בתא החם ביותר (Cell 5 Large). מן הדין לציין כי לפי מדידות אלה, התאים המתחממים פחות מהאחרים הנם זה בעל התאים הקטנים המלאים בחומר גרנולרי נקבובי בעל משקל מרחבי נמוך (Cell 2 Small + c), ואחריו התא מבלוקי בטון חלולים (ארבעה חורים). אלה חמים יותר – בשיא – בין 0.5 מ"צ ל-1 מ"צ בהתאמה מהטמפרטורה החיצונית. חמים יותר, לפי סדר עולה, הינם התא בעל חללי האוויר הקטנים (Cell 3 Small), התא בעל החללים הבינוניים (Cell 4 Medium), והחם ביותר הוא התא בעל חללי האוויר הגדולים (Cell 5 Large).

ההסבר האפשרי להבדלים בין התאים מובא בפרק המסקנות להלן.



איור 14: מדידות חודש יוני - מיקוד בתאריך 12.06.

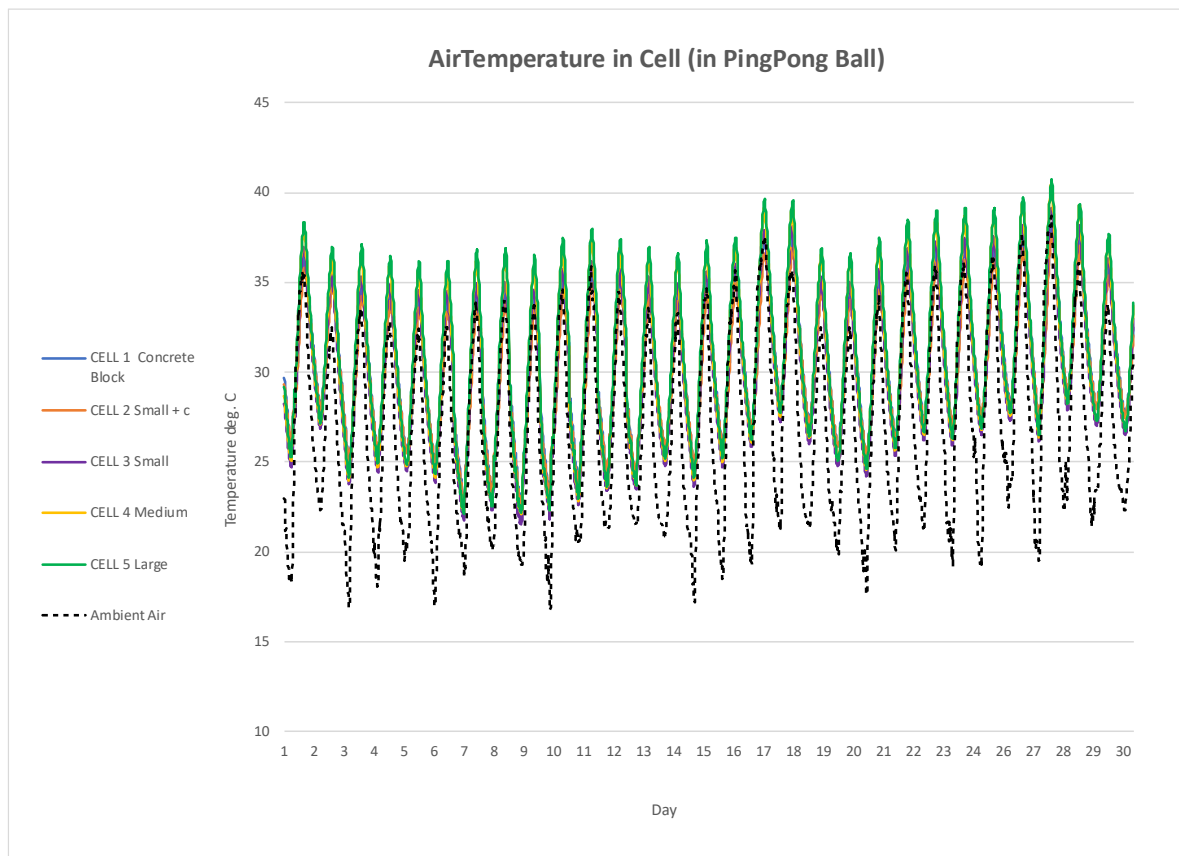
- חודש יולי השנה מאופיין בטמפרטורות גבוהות באופן רציף ועקבי, הן ביום והן בלילה. בחלק גדול מהלילות הטמפרטורה המזערית בחוץ נשארת גבוהה למדי, ובמקרים הקיצוניים היא נשארת סביב כ-24 מ"צ (איור 15).

מה שמאפיין את אופן התפעול כאן זוהי פתיחת החלונות בשעות הלילה. בחיים האמיתיים להפעלה זו יש שני תפקידים – אוורור להשגת נוחות תרמית מיידית, ואוורור לקירור מסת המבנה לשם השגת נוחות תרמית מאוחר יותר. ניתן לראות כי במשך כל החודש הטמפרטורה המזערית בפנים בכל זאת גבוהה מזו בחוץ, מה שמעיד על אוורור לא יעיל ומסה תרמית בעלת אגירה משמעותית. כאמור מעלה, בשל הטמפרטורות הגבוהות גם בשעות הלילה, בחלק מהלילות כלל לא נפתחו פתחי האוורור ובחלק אחר הם נפתחו מאוחר יחסית (סביב השעה 22:00).

להבנה טובה יותר של התופעה נבחר מחזור של 24 שעות, 12.07 (איור 16).

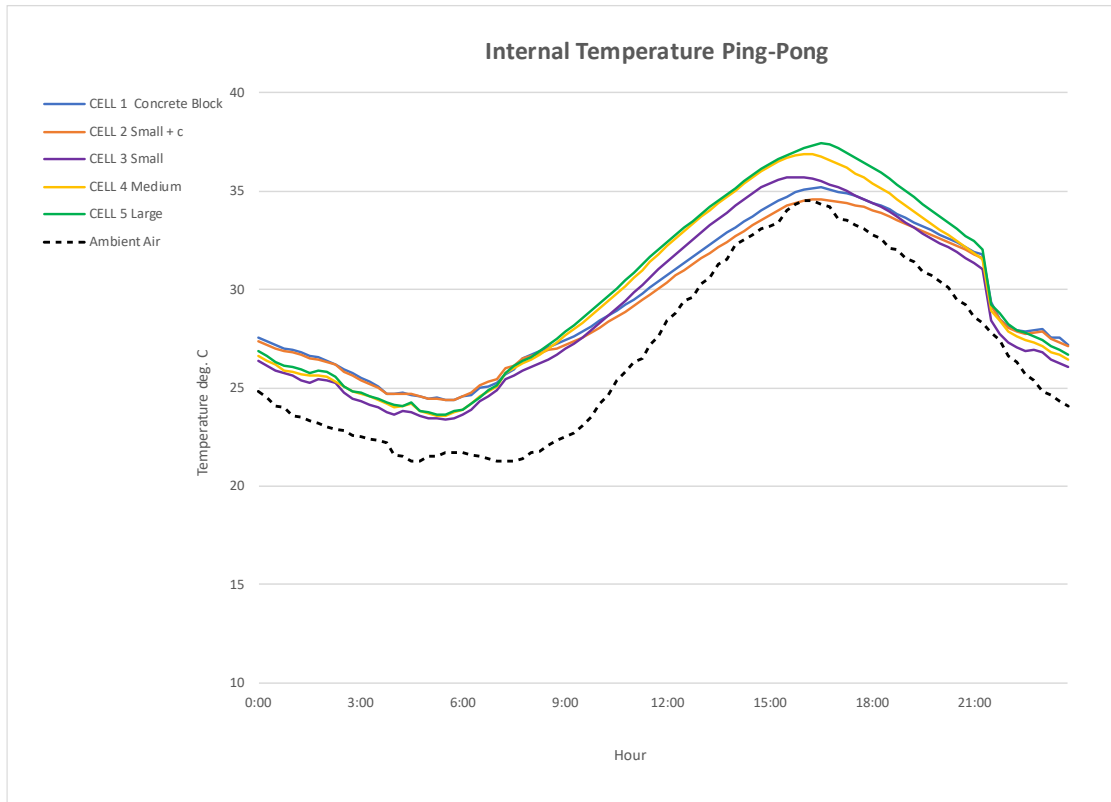
למרות ההבדל המהותי בהפעלת התאים בחודש יולי לעומת בחודש יוני, היינו אוורור לילי ביולי, או לפחות בחלקו, ניתן לזהות מגמות כמעט זהות בהתנהגות התאים. גם כאן תא 3 הוא בעל הטמפרטורה המזערית הנמוכה מבין כל התאים, אך עדיין גבוהה מזו בחוץ, בכ-2 מ"צ. התאים 1 ו-2 הנם גם כאן בעלי הטמפרטורות המרביות הנמוכות ביותר מבין כל התאים, אך עדיין אלה גבוהות יחסית – טמפרטורת תא 2 נשקת את המרבית בחוץ, ואילו זו בתא 1 גבוהה בכ-0.5 מ"צ.

תופעה ייחודית – אם כי לא מפתיעה – הינה צניחת טמפרטורות פנים כל התאים עם פתיחת פתחי האוורור, במקרה זה בשעה 21:00. צניחה זו מתרחשת כמעט בן רגע ומתבטאת ב-4-2.5 מ"צ. היא גורמת להיפוך התנאים הקודמים ומחזירה אותם ליחסים בין התאים שבילילה הקודם – תא 3 בעל הטמפרטורה הנמוכה מכל התאים, תאים 2 ו-1 בעלי טמפרטורת מזעריות



גבוהות משל יתר התאים.

איור 15: מדידות חודש יולי.



איור 16: מדידות חודש יולי - מיקוד בתאריך 12.07.

5. דיון ומסקנות

ניטור התאים במהלך תקופה קרה, תקופת מעבר, ותקופה חמה, בכמה דרכי הפעלה של התאים (חשיפה או חסימה של הזיגוג הדרומי, פתיחת פתחים צפוניים לאורור לילי, שילובים שונים ביניהם) מעלים כמה נקודות בולטות בנוגע לתכונות התרמיות של התאים המודפסים מבטון. בדיקת אטימות התאים אשר נערכה בטכניון ע"י הצפתם במים מאששת את ההנחה כי הם אטומים, ועל כן נפסלת האפשרות של הסתננות אוויר כאחד התהליכים המשפיעים על שינוי הטמפרטורה בפנים התאים, ועל ההבדלים ביניהם.

ראשית, המורפולוגיה שלהם יוצרת גשרים תרמיים בהיקף משמעותי, זאת לכל האורך והגובה של דפנות התאים. גשרים תרמיים אלה מאפשרים הולכה יעילה של החום מהפן החיצוני של הדופן החמה אל הפן החיצוני של הדופן הקרה (בתקופה הקרה מפנים התא החוצה, ובתקופה החמה מחוץ לתא פנימה). תהליך זה ניכר במיוחד בתקופות הפעלת התאים בהן על הפתחים סגורים במהלך כל היממה, היינו אין מעבר אנרגיה על ידי קליטת קרינה ישירה, או פליטת אנרגיה באמצעות אוורור לילי.

שנית, חללי האוויר הנוצרים בשל אופן ההדפסה הספציפי הינם גדולים ורחבים (עד כדי 7 ס"מ) ואורכם מגיע לכדי כ-15 ס"מ במקביל לדופן תא 5 (Cell 5 Large). לגודל חללי אוויר כזה יש השפעה מהותית במעבר חום בהסעה (כלומר, מעבר חום כתוצאה מזרימת אוויר) בין פני דפנות התאים, וגם בתוך חתך הקיר. אמנם בין שתי הדפנות של הקיר נוצרים חללי אוויר כלוא, וכך גם במקרה התא מבלוקי בטון,

אך כל חלל כזה גדול דיו כדי לאפשר תנועת אוויר הנוצרת בשל הבדלי טמפרטורות בין הפנים של התא.

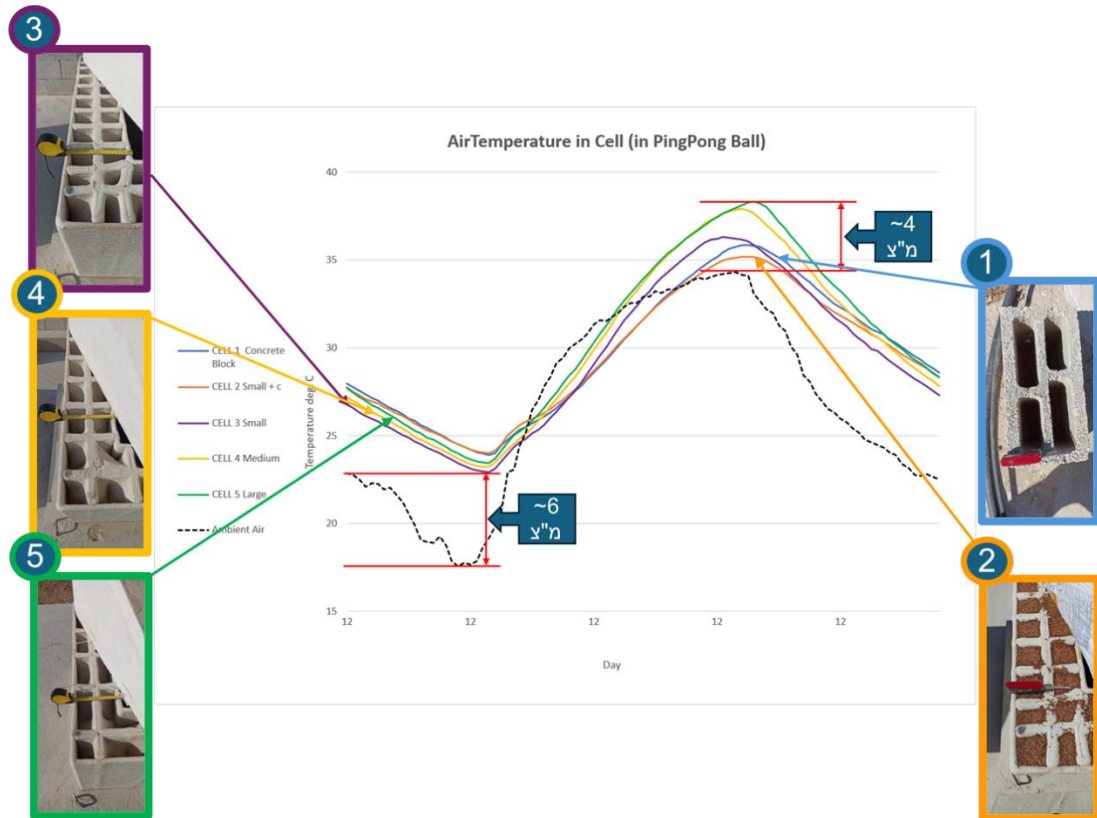
איור 17 מדגים באופן ברור את ההבדלים בהתנהגות התרמית של התאים השונים בהתייחס להבדלים המורפולוגיים ביניהם. תא 2, בעל חללים ממולאים הינו התא המגיע וטמפרטורה המרבית הנמוכה מבין כל התאים. יש לשים לב לעובדה שתא 3 בעל החללים הקטנים אף הוא מגיע לטמפרטורה מרבית נמוכה מהתאים המודפסים האחרים – 4 ו-5 – אך בכל זאת גבוהה מזו של תא 2 בכ- 1 מ"צ ויותר. קשה, אם כן, להמעיט בחשיבות המילוי היוצר נפח בעל תכונות בידוד ומצמצם ואף מבטל אולי את תנועת האוויר בחללים הגורמת למעבר חום באמצעות הסעה. מעניין כי התא מבולקי בטון הוא שני מבחינת טמפרטורה מרבית נמוכה מיתר התאים למעט תא 2. הדבר מעיד על מאזן טוב יותר בין גודל חללי האוויר בו, לגשרים התרמיים הנוצרים בשל החומר היוצר את החללים בפנים הבולק החלול, והמורפולוגיה הספציפית של הגשרים התרמיים.

תאים 4 ו-5, בעלי חללי האוויר הבינוניים והגדולים בהתאמה, מגיעים לטמפרטורות מרביות גבוהות יותר מהתאים האחרים, מה שמעיד על השפעת חללי האוויר על מעבר החום. נכון הדבר גם במדידות של חודש יולי במהלכו הפעלת התאים שונה וכוללת חסימה של החלונות הדרומיים ופתיחת הפתחים הצפוניים להשגת אוורור לילי. גם כאן המגמות הן כמעט זהות, גם אם הערכים המוחלטים משתנים במקצת (איור 18).
אם כן, ניתן לסכם כי:

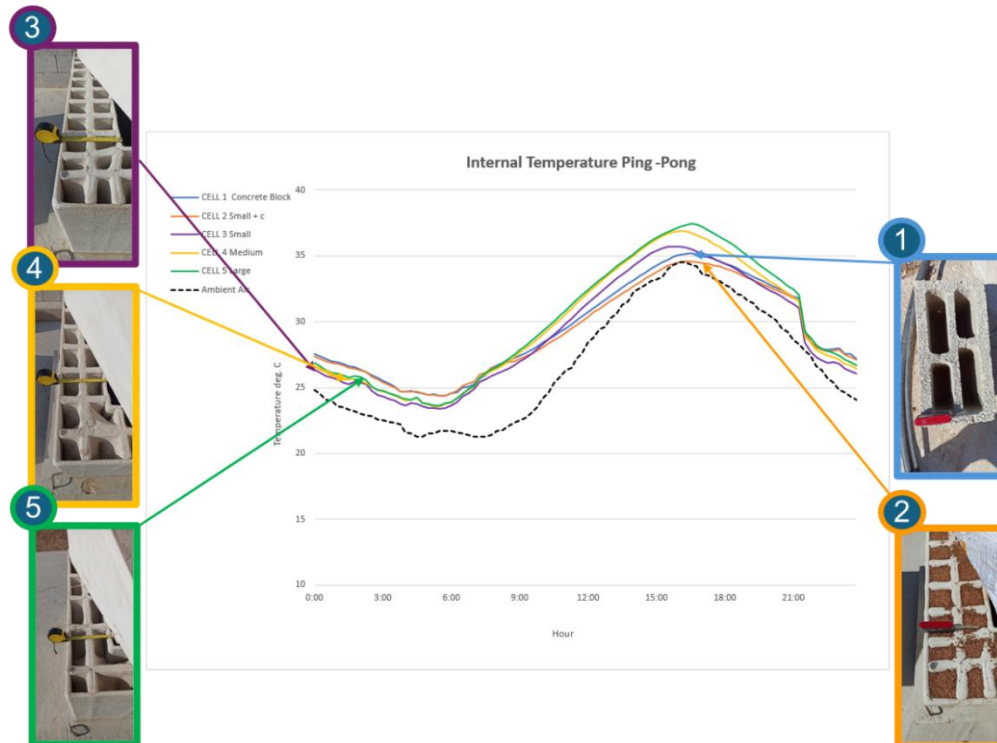
- רציפות הגשרים התרמיים משפיע לרעה על התפקוד התרמי של התאים המודפסים.
- גודל עולה של חללי האוויר משפיע לרעה על התפקוד התרמי של התאים המודפסים.
- מילוי חללי האוויר בחומר מבודד (בתא 2) משפר מהותית את התפקוד התרמי.

מכך ניתן להגיע לכמה מסקנות אשר יישומן עשוי לשפר את התפקוד התרמי של התאים המודפסים:

- צמצום הגשרים התרמיים על ידי שינוי אופן ההתחברות בין שתי דפנות התא המודפס. שימוש במחברים מחומר בעל מקדם הולכה נמוך (חומרים מבודדים) מהווה חלופה מועדפת.
- מילוי של חללי האוויר (בין שתי הדפנות של קיר התא, דופן פנימית ודופן חיצונית) בחומר בידוד. יתכן כי מבחינה פרקטית, יעילות וצרכי היישום מכוונים לשימוש בחומרים המוקצפים או המתנפחים בזמן יישומם, דוגמת פוליאוריתן מוקצף, תאית וכדומה, היינו חומרים אשר יתרמו גם לייצוב הקיר תוך כדי שיפור תכונותיו התרמיות.
- שיפורים אלה או דומיהם חיוניים להפיכת הטכנולוגיה ליישומית תוך התחשבות באילוצי האקלים המשתנה וצרכי האנרגיה אשר ילכו ויגדלו משנה לשנה.



איור 17: הבדלים מורפולוגיים במבנה התאים ויחסם להתנהגות התרמית שלהם. הגרף מתייחס למדידות



חודש יוני 2025.

איור 18: הבדלים מורפולוגיים במבנה התאים ויחסם להתנהגות התרמית שלהם. הגרף מתייחס למדידות
חודש יולי 2025.

רשימת מקורות

- יוסף י', צפורי א', אילוטוביץ א', כרמונה י', חלפון נ', אוזן ל', בהר"ד ע', פורשמן א', לוי י', גבעתי ע' (2024) ניתוח מגמות אקלימיות ואירועי קיצון בישראל לאורך המאה ה-21. מדינת ישראל, משרד התחבורה, השירות המטאורולוגי, בית דגן.
- מת"י (2002) תקן ישראלי ת"י 1045 חלק 10. בידוד תרמי של בניינים: סיווג יישובים לפי אזורי אקלים. מכון התקנים הישראלי, תל אביב.
- פרלמוטר ד', אראל א', מאיר י', עציון י', רופא י' (2010) המדריך לבניה ביו-אקלימית בישראל. היחידה לאדריכלות בינוי ערים במדבר, המכונים לחקר המדבר, אוניברסיטת בן-גוריון בנגב; ומדינת ישראל, משרד התשתיות הלאומיות, אגף מו"פ, ירושלים. MONI-RD-19-10
- שביב ע', פלמן ב' (2016) מערכות פסיביות לחימום ולקירור מבנים ומיקרו אקלים עירוני. הנחיות להערכת תפקוד. המשרד להגנת הסביבה, ירושלים.
- https://www.gov.il/BlobFolder/reports/instructions_to_operate_passive_heating_and_cooling_systems/he/green_building_passive_systems.pdf

סיכום ומסקנות

הישגי המחקר

במחקר זה פותחה גישה ייחודית לשיפור הביצועים התרמיים של קירות מודפסים, מותאמת לאקלים הישראלי החם. השיטה מבוססת על הדפסת תאים סגורים הלוכדים אוויר ושימוש בצמנט לבן בעל אלבדו גבוה.

תוצאות עיקריות

פיתוח טכנולוגי: ייצור אלמנטי קיר בקנה מידה מלא ($100 \times 100 \times 60$ ס"מ), עם שכבות בעובי 12 מ"מ, מסלולי הדפסה רציפים, אטימה מלאה של התאים וזווית הדפסה יציבה של 37° .

ביצועים תרמיים: תצורת Small הציגה שיפור בהשוואה לבלוק 20 מסורתי; נמצא קשר ברור בין גודל התא, מספר הגשרים התרמיים ויכולת מניעת הסעה; לצמנט הלבן תרומה בהפחתת בליעת חום.

פיתוח חומרי: התערובת שפותחה, בעלת מנת מים נמוכה, מאפשרת שמירה על אטימות גבוהה ועמידות מכנית. שילוב זה תרם לשיפור הבידוד התרמי של האלמנט, מבלי לפגוע ביציבותו המבנית.

אימות אמפירי: ניטור רציף בשטח במשך שנה (טווח טמפרטורות 2°C עד 40°C) הראה יתרון לגישה המוצעת על פני בלוקים סטנדרטיים, במיוחד בתנאי קיץ.

מסקנות מרכזיות

תאים קטנים – מונעים הסעה ביעילות למרות שיש להם יותר גשרים תרמיים ומסה גבוה יותר.
תאים בינוניים – איזון בין בידוד למסה תרמית.
תאים גדולים – קלים לייצור אך חשופים יותר להסעה פנימית.

המלצות לפיתוח עתידי

צמצום גשרים תרמיים באמצעות שינוי עיצוב או שילוב חומרים מבודדים.
אופטימיזציה של גודל התאים ($40\text{--}60$ מ"מ כטווח מבטיח).
בדיקת שילוב של גדלים שונים באותו אלמנט לפי צורך תרמי ומבני.
בהמשך למחקרים נוספים שבוצעו בטכניון, מומלץ לבחון החלפת חלק מהאגרגטים בחומרים אחרים לשיפור ההתנגדות התרמית של התערובת, תוך שמירה על חוזק דומה או גבוה משל בלוקי בטון רגילים.

תרומה לענף הבנייה בישראל

הפחתת צריכת אנרגיה לקירור וחימום;
חיסכון בחומר ביצוע בזכות הדפסה ללא טפסנות;
חיסכון בכוח אדם ובזמן;

גמישות תכנונית ושחרור מתצורות בלוקים גנריות;
תרומה לקיימות – חיסכון בפליטות ויכולת התאמה לאקלים משתנה.

סיכום

המחקר הראה שניתן לייצר אלמנטים מודפסים סגור־תאים בקנה מידה אדריכלי, עם ביצועים תרמיים השווים ואף עולים על בלוקים מסורתיים. השיטה משלבת טכנולוגיה, עיצוב פרמטרי וחומרי גלם מותאמים לאקלים, ומהווה בסיס מבטיח להמשך פיתוח לקראת יישום מסחרי ובנייה בת־קיימא.

Summary

This study presents a novel approach in the domain of 3D printing in construction, with a specific focus on enhancing the thermal performance of printed concrete walls. The study was conducted through a collaborative effort between the Technion – Israel Institute of Technology’s Center for Advanced Manufacturing in Construction and Ben-Gurion University of the Negev. The research offers a viable alternative to conventional masonry-based building envelopes.

Research Overview

The investigation involved the development of a white cementitious mixture engineered for 3D printing, alongside the design of an internal array of sealed air cavities intended to improve the thermal behavior of printed wall elements. Full-scale architectural prototypes (100 × 60 × 100 cm, wall thickness 20 cm) were produced using additive manufacturing technologies and subsequently subjected to controlled thermal performance assessments.

A comparative analysis was performed against a standard concrete block (“Block 20”) wall system. Three geometric configurations of internal air cavities—Small, Medium, and Large—were evaluated over the course of a full-year field experiment conducted under the climatic conditions of the Negev Desert. This setup enabled continuous monitoring of heat transfer characteristics under representative environmental loads.

Findings

The results indicate that the small-cell configuration exhibited superior thermal performance relative to the conventional block-based wall assembly. The enhanced resistance to heat transfer is attributed to the specific geometry and distribution of enclosed air cavities, made possible by the geometric flexibility inherent to additive manufacturing.

Implications for the Construction Sector

The outcomes highlight the potential of 3D-printing technologies to substantially improve the thermal efficiency of building envelopes in Israel. Beyond the direct implications for energy consumption related to heating and cooling, the proposed approach may contribute to accelerated construction processes, reduced dependence on skilled labor, and lower material usage.

Moreover, the geometric flexibility enabled by additive manufacturing offers broader architectural possibilities, allowing designers to transcend the formal constraints imposed by traditional masonry systems. The ability to obtain high-quality surface finishes directly from the printing process—thereby reducing or eliminating the need for subsequent plastering—further underscores the technological and economic advantages of the method.



מיסודם של
משרד הבינוי והשיכון

הטכניון - מכון טכנולוגי לישראל
הפקולטה להנדסה אזרחית וסביבתית

המכון הלאומי לחקר הבנייה
National Building Research Institute



2033611

Green construction 5.0 : Thermal optimization of 3D printed architectural components

Architect Ohad Meyuhas Prof. Arnon Bentur Prof. Aaron Sprecher

Prof. Isaac Meir

Ben-Gurion University of the Negev

Copyright © 2025 by O. Meyuhas, A. Bentur and A. Sprecher

The Israel Ministry of Construction and Housing and the Technion Research and
Development Foundation Limited, Haifa

Haifa

December 2025

National Building Research Institute, Technion City, Haifa 3200003, Israel | המכון הלאומי לחקר הבנייה, קריית הטכניון, חיפה 3200003
Fax: 972-4-8324534. פקס. | Tel: 972-4-8292242/3. טל. | e-mail: nbri@tx.technion.ac.il
<http://nbri.net.technion.ac.il>

