משרד האנרגיה והתשתיות

www.energy.gov.il



מתווה לאיפוס פליטות גזי חממה ממשק האנרגיה בישראל עד לשנת 2050

אסטרטגיה ומדיניות

פברואר 2025

עבודה זו נכתבה על ידי הצוותים המקצועיים במשרד האנרגיה והתשתיות

עורכים ראשיים

דר' שחר דולב, טל אבישי, יותם בן שטרית, שרון חצור – אגף תכנון מדיניות ואסטרטגיה.

צוות מקצועי

ג'נט שלום, משי לקס, יואב זילברמן, בת-ציון בן-דוד גרסטמן, דינה לבנט, אליאור יוסף – אגף בכיר תכנון מדיניות ואסטרטגיה,

דר' תמיר רייסין, דר' מיכאל דנון, דר' יעל הרמן, אלעד כלפון – יחידת המדען הראשי,

רון אייפר, נחום יהושע, אלירז שיפמן ברמן, איציק יוניסי, אוריאל בבצ'יק – חטיבת אנרגיה מקיימת,

יוסי סוקולר, כנרת דהן גרנית, אלעד גולדברג, חיים מלמד – רשות הגז הטבעי,

נעמה בא-גד, ולרי טוצ'ילקין – מנהל הדלק והגז,

דורית הובנר, אריאל פרינץ – אגף בכיר תכנון פיזי,

אילן ניסים, שגיא גרנות – מינהל אוצרות טבע.

תוכן עניינים

תקציר 5
המשק הישראלי ומודל הביקוש והשימוש באנרגיה 6
טכנולוגיות מרכזיות להפחתת פליטות 9
מסקנות המודל והתרחישים המשולבים 11
סיכום התרחישים 14
ניתוח כלכלי – עלויות הפקה משוערות 17
תובנות עיקריות 18
צעדי מדיניות 22
1. הקדמה 25
2. סקירה בין-לאומית 26
2.1. השקעות במו"פ וחדשנות לאיפוס פליטות 34
2.2. מפת הדרכים למשק דל פליטות בשנת 2050 38
3. ישראל - מצב קיים ומדיניות נוכחית 41
3.1. משק האנרגיה בישראל – תמונת מצב 41
3.1.1. מאפיינים ייחודיים למדינת ישראל 42
3.2. עקרונות ואילוצים לקביעת תמהיל האנרגיה בישראל 47
3.2.1. עקרונות בסיס להשגת היעדים 47
3.2.2. תנאים הכרחיים להשגת היעדים 49
3.2.3. סוגיות מתודולוגיות 50
3.3. מדיניות נוכחית 51
4. מודל אנרגיה לבחינת תרחישים להפחתת הפליטות 53
4.1. מתודולוגיה 53
4.1.1. מודל הביקושים לשירותי אנרגיה 53
4.1.2. תמהילי הדלקים 55
4.1.3. תרחישי הפקת אנרגיה 55
4.1.4. ניתוח כלכלי – עלויות הפקה ותפעול 57
4.2. הנחות המודל 59
4.2.1. התייעלות באנרגיה 59
4.3. הביקושים לאנרגיה במגזרים השונים 61
4.3.1. מגזר המבנים - ביתי, מסחרי וציבורי 61
4.3.2. מגזר התעשייה 61
4.3.3. תחבורה יבשתית ונסועה 62
4.3.4. ספנות 67

4.3.5. תעופה 67
4.4. הביקוש המצרפי למקורות אנרגיה 69
5. הדרך לאיפוס פליטות 70
5.1. מהפחתת 85% פליטות לאיפוס פליטות נטו 70
5.2. טכנולוגיות מרכזיות לאיפוס פליטות 71
5.2.1. אנרגיות מתחדשות ומימן "ירוק" 72
5.2.2. גז טבעי בצירוף טכנולוגיות לתפיסת פחמן 77
5.2.3. מימן "כחול" 79
5.2.4. אנרגיה גרעינית ומימן "אדום" 81
5.2.5. יבוא אנרגיה וחיבוריות אזורית ובינלאומית 83
5.2.6. טכנולוגיות נוספות 86
5.3. טכנולוגיות נוספות 87
6. תרחישים משולבים 92
6.1. התרחיש המשולב הצהוב 92
6.2. חלופת המשך – שימוש במימן ירוק 96
6.3. התרחיש המשולב הכחול 97
6.3.1. חלופת המשך – שימוש בגז טבעי עם תפיסת פד"ח 101
6.4. התרחיש המשולב ה"אדום" 101
7. סיכום 107
8. בטחון באנרגיה וניהול סיכונים 112
8.1. בטחון באנרגיה כתנאי הכרחי 113
8.2. עקרונות לעמידה ביעדים 115
8.3. מעבר הוגן ("Just Transition") למשק מאופס פליטות 115
9. תובנות עיקריות 116
10. צעדי מדיניות 119
10.1. צעדי מדיניות רוחביים 119
10.2. צעדי מדיניות נושאיים 125
10.3. נקודות החלטה להשקעה בתשתיות 128
11. סיכום 131
12. נספחים 132
נספח א': סקירת טכנולוגיות 132
נספח ב': טכנולוגיות פורצות דרך 145
נספח ג': הנחות היסוד של מודל הביקוש 148

תקציר

בעבודה שלפניכם יוצג מתווה איפוס פחמני למשק האנרגיה לשנת 2050 אשר יבטח משק אנרגיה מגוון, אמין, זול ונקי. בבסיס המתווה שלוש חלופות עיקריות להשגת יעד האיפוס וכן מספר צעדי מדיניות משמעותיים הנדרשים לעמידה ביעדים. העבודה נשענת על מודל שפותח על בסיס סקירת עבודות מדיניות קודמות ובחינה בינלאומית של המגמות העולמיות, בדגש על טכנולוגיות לייצור מבוזר ומקומי של אנרגיה, בשילוב העמקה במאפייניה הייחודיים של ישראל.

בבסיס הדרישה לאיפוס פליטות עומד המאבק במשבר האקלים, אשר מדגיש את הצורך בחוסן ועצמאות באנרגיה, גיוון המקורות, מימוש הזדמנויות גאו-פוליטיות וכן פוטנציאל לצמיחה כלכלית משמעותית. עקרונות אלה עומדים גם בבסיס תכנון המשק להתמודדות עם משברים ביטחוניים כדוגמת מלחמת חרבות ברזל.

נוסף לצורך בחוסן באנרגיה במדינת ישראל על רקע בטחוני וכלכלי, עבודה זו נעשתה על רקע מגמות עולמיות, העיקרית שבהן כאמור היא המאבק העולמי במשבר האקלים. על פי מסקנות הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים של האו"ם (IPCC), בכדי למנוע את הידרדרות האקלים הגלובלי למצב שלא יאפשר תנאי מחייה נאותים וכלכלות יציבות, יש להפחית את פליטות גזי החממה ב-45% עד לשנת 2030 ביחס לשנת 2010, ולהגיע לאיפוס נטו של הפליטות עד לשנת 2050. בהתאם לכך, מדינות רבות התחייבו להשגת איפוס נטו של הפליטות עד לשנת 2050, אולם רק מעטות הציגו תכניות מפורטות להגעה ליעד.

מגמה עולמית נוספת היא אירועים הולכים וגוברים בעולם בהם נפגעה אספקת האנרגיה, או שמחיריה עלו בחדות באופן שפגע קשות בכלכלה. מניתוח המגמות העולמיות, ביניהן תנאי מזג אוויר קיצוניים ומלחמת רוסיה-אוקראינה, עולה כי כדי לשמור על אספקת אנרגיה רציפה ומחירים יציבים, גם בזמן חירום, יש לגוון את מקורות האנרגיה ולאפשר גיבוי הדדי בטכנולוגיות שונות, בין היתר אנרגיה גרעינית ומימן, בכדי לאפשר להיחלץ מאירועי קיצון שישפיעו על מקורות האנרגיה. צורך זה מדגיש את ההכרח בגיוון מקורות אנרגיה כחלק מהאסטרטגיה הכללית של ישראל.

בנוסף, מהמגמות העולמיות ניתן להסיק על הערך בפיתוח טכנולוגיות ישראליות שיאפשרו מעבר למשק אנרגיה נקי. שילוב מאפייניה של ישראל באומת החדשנות, עם פוטנציאל המינוף לכלכלה הישראלית, מייצר ערך משמעותי וצפוי להניב פירות שיסייעו להשגת יעד איפוס הפליטות בישראל. השקעה במו"פ וחדשנות ישראליים בתחום האנרגיה נדרשת על מנת שמשק האנרגיה המקומי יוכל לקלוט ולהטמיע טכנולוגיות ושיטות מובילות בהצלחה, מהארץ ומהעולם, ולהתאימן למאפייניו הייחודיים – החל מהיבטים טכנולוגיים, דרך היבטי מבנה הכלכלה והאקו-סיסטם, ועד להטמעת הטכנולוגיות ושימוש נרחב בהן. זאת, במקביל לערך גלובלי משמעותי בסיוע להפחתת הפליטות ולשיפור משק האנרגיה העולמי ומיצובה של ישראל כמובילה עולמית בתחום. יכולותיה המחקריים והיזמיים המוכחים של האקו-סיסטם בישראל מהווים יתרון משמעותי בהובלה עולמית בסקטורים מסוימים של תחום עתיר ידע זה. משכך, השקעה ותמרוץ של פיתוח טכנולוגיות ישראליות כחלק מהאסטרטגיה הלאומית, יסייעו לישראל לעמוד בשורה אחת עם מדינות מתקדמות נוספות, הן בהיבטי גיבוש תכניות לאומיות שאפתניות ויישומן, והן ביכולת ההשפעה הבינלאומית.

כמו כן, הגלובליזציה במשק האנרגיה, בשילוב מיקומה הגאוגרפי של ישראל, מאפשר לה להיות גשר אנרגטי בין מדינות אירופה למדינות המזרח-התיכון, אסיה ואפריקה. לחיבור אנרגטי זה בין היבשות דרך ישראל קיימת משמעות גיאופוליטית עצומה, וערך רב בהיבטים כלכליים, סביבתיים, בטחוניים ועוד.

אסטרטגיה לאיפוס פליטות בישראל, התואמת ומשתלבת עם המגמות העולמיות, תכלול אחוז גבוה של אנרגיות מתחדשות, לצד שמירה על מקורות אספקה מקומיים שיבטיחו את רציפות אספקת האנרגיה באמצעות גיוון המקורות, כדוגמת גרעין ומימן, ביזוריות, חיבוריות אזורית ושילוב חדשנות הן כפתרון לאתגרי המשק המקומי והן כמנוע צמיחה והובלה בינלאומית.

המשק הישראלי ומודל הביקוש והשימוש באנרגיה

בחינת ערוצי ההפחתה נעשתה בהתייחס למאפיינים הבאים: היותה של האנרגיה הסולארית המקור הכמעט יחיד לאנרגיה מתחדשת בישראל, מצבה הנוכחי של ישראל כאי אנרגטי שכמעט אינו מחובר לרשתות אנרגיה במדינות שכנות, הגידול המהיר בביקוש לאנרגיה ביחס למדינות אחרות, הצפיפות הגבוהה בישראל והקושי בהקצאת שטחים נרחבים למערכות סולאריות, וכן קיום מאגרי גז טבעי מקומיים אל מול חופי ישראל.

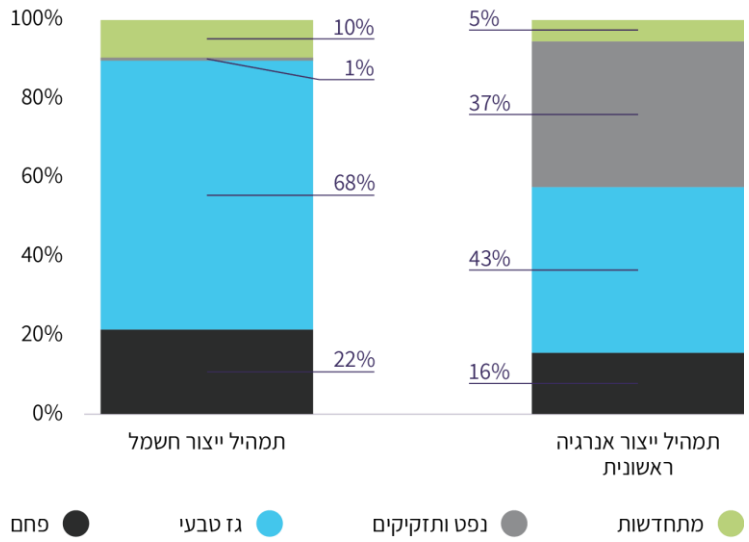
בשנת 2022 כמחצית מהאנרגיה בישראל נצרכה כחשמל, וכשליש כדלקים ותזקיקים במגזרי התחבורה והתעשייה והשאר מגז טבעי לתעשייה. משק החשמל התבסס על גז טבעי (כמעט 70% מהייצור), בעוד שכ-20% מהחשמל יוצר מפחם וכ-10% מאנרגיות מתחדשות, בעיקר אנרגיה סולארית. כפי שיפורט בעבודה זו, בשנים האחרונות קיימת מגמה למעבר לאנרגיות נקיות יותר- במשק האנרגיה בכלל, ובמגזר החשמל בפרט.

המחויבות הבינלאומית של ישראל כוללת יעד הפחתה של 85% מפליטות גזי החממה עד לשנת 2050. לצד מחויבות זו, חוק האקלים, הנמצא בתהליכי חקיקה, קובע יעד לאומי של איפוס פליטות (נטו) עד לשנת 2050. עבודה זו מתווה שלושה כיוונים עיקריים לעמידה ביעד זה, אשר ביחס למימושם נדרשות פעולות אקטיביות, הן מצד הממשלה והן מצד המשק, כבר היום.

על מנת לקבל החלטות מושכלות ומבוססות נתונים לפיתוח משק האנרגיה לאיפוס פחמני, פותח במשרד האנרגיה והתשתיות מודל לחיזוי הצרכים וההשלכות של ערוצי האיפוס השונים. המודל מעריך את הביקושים הצפויים עד לשנת 2050, ואף מעבר לה, על בסיס מגמות העבר ותוך התייחסות למדיניות שפורסמה עד כה. המודל מתייחס לביקושים במגזרי התעשייה, התחבורה והמבנים.

משק האנרגיה כיום מבוסס על כ-40% דלקים לתחבורה ולתעשייה (תרשים 1) ו-60% חשמל. מרבית החשמל (68%) מיוצר מגז טבעי, כ-22% מפחם, וכ-10% מאנרגיה מתחדשת (מרביתה סולארית). ראוי לציין כי מעל למחצית ממקורות האנרגיה הראשוניים (37% דלקים ו-16% פחם) מיובאים כיום.

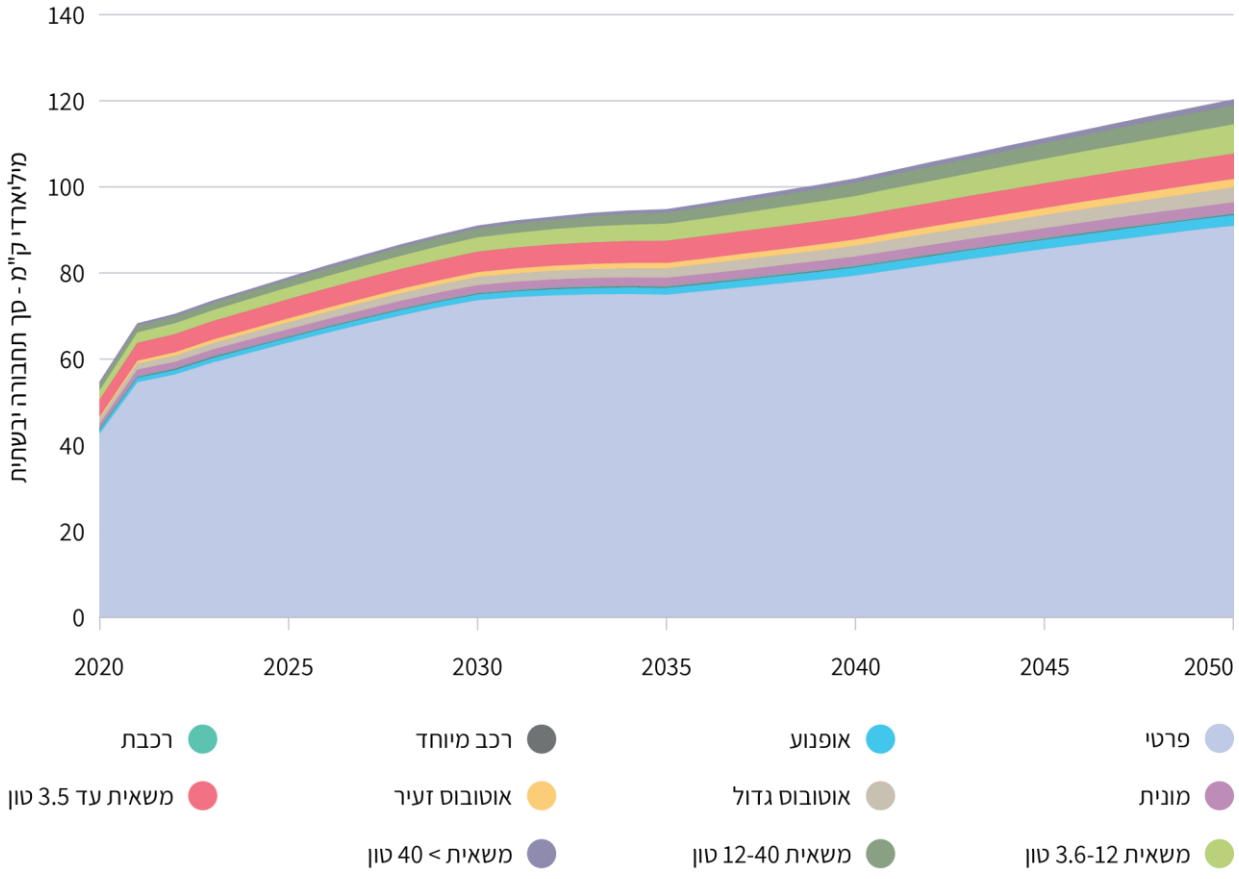
תרשים 1: תמהיל מקורות האנרגיה וייצור החשמל בישראל בשנת 2022



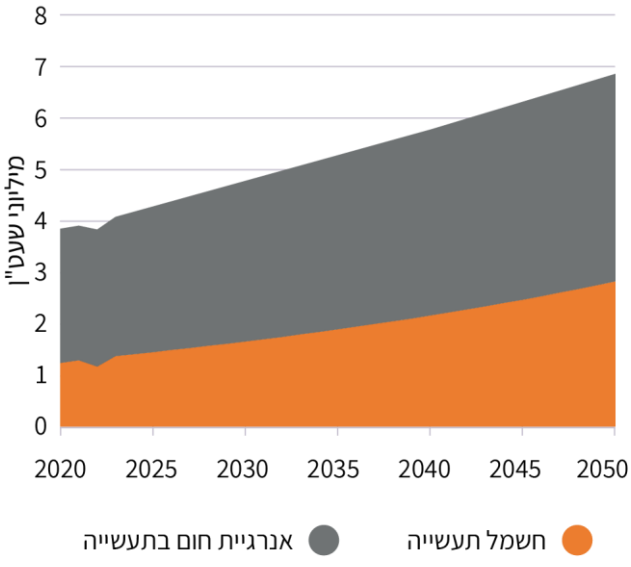
המודל יוצא מתמונת המצב הנוכחית ומעריך את ההתפתחות העתידית. המודל מתייחס ראשית לעלייה בביקושים לאנרגיה עקב גידול האוכלוסייה והצמיחה הכלכלית עד לשנת 2050, ובוחן את המגזרים השונים במשק באופן שיאפשר את החלפת תמהיל הדלקים מדלקים פוסיליים לחלופות נקיות. עקב אי הוודאות ביחס למגמות העתידיות, ניתוח הביקושים נעשה בשלושה תרחישים – גבוה, מרכזי ונמוך.

להלן סיכום תחזית המודל לכלל הביקושים למקורות האנרגיה השונים עד לשנת 2050 בתרחיש המרכזי:

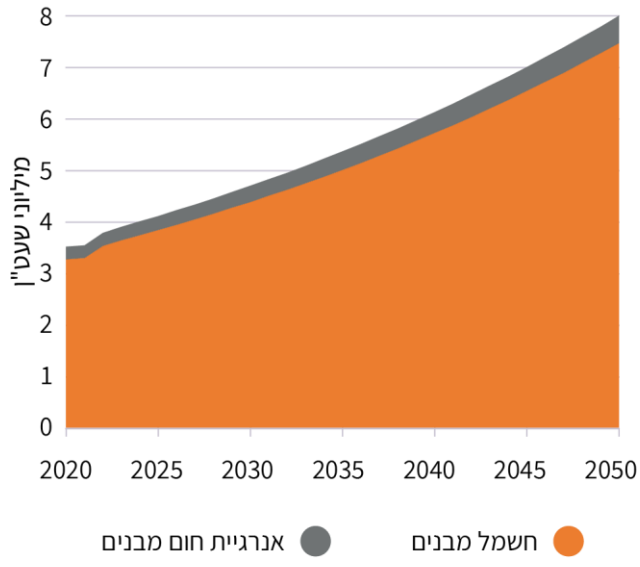
תרשים 2: מגמות צריכת האנרגיה במשק 2020-2050 במגזרים שונים[1]



ביקוש אנרגיה לתעשייה



ביקוש אנרגיה מבנים

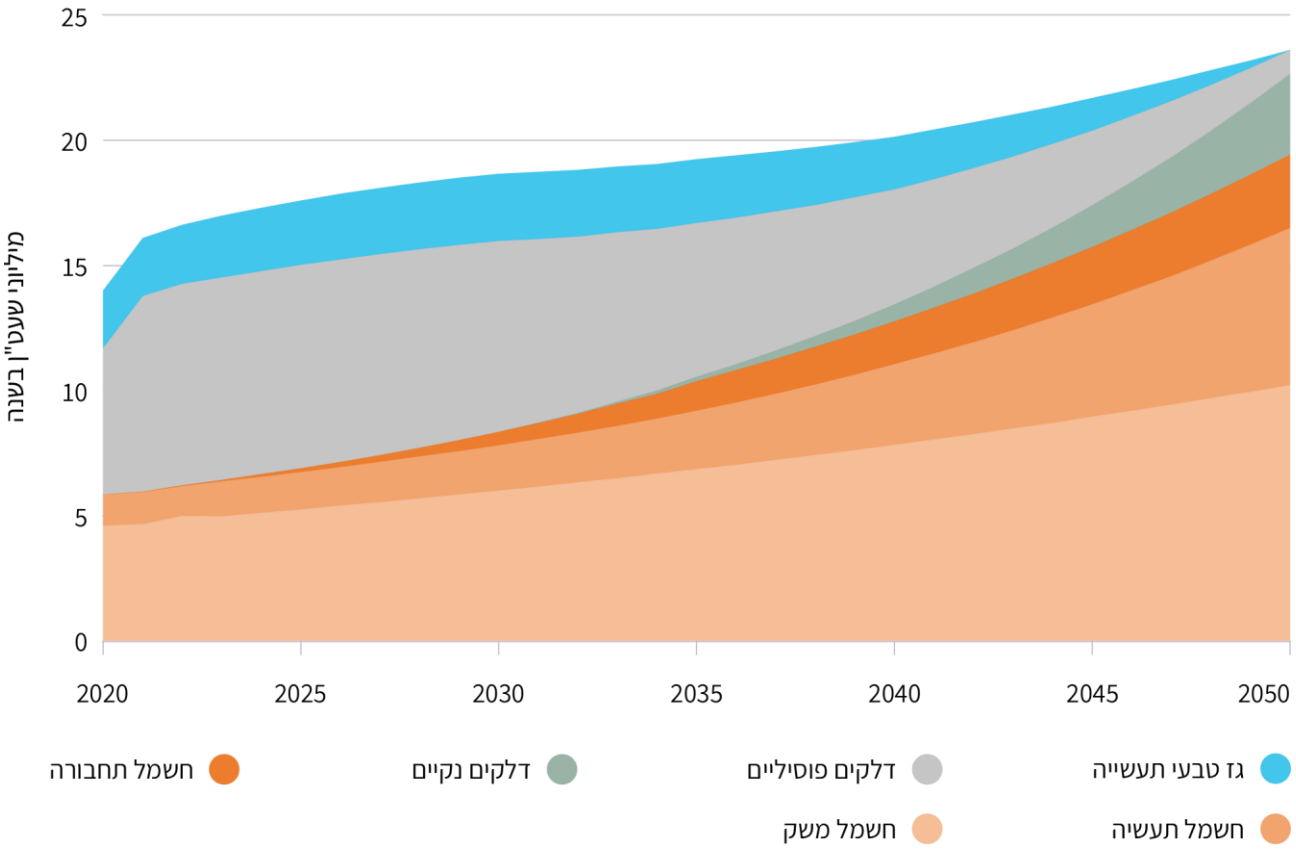


[1] תחזית משרד האנרגיה והתשתיות.

בגרף העליון ניתן לראות את הביקושים הצפויים לנסועה במגזרי התחבורה היבשתית השונים. באופן כללי תחום זה מובל על-ידי הביקוש בתחום הנסועה הפרטית, אך משנת 2030, עם חשמול מרבית קווי הרכבת הכבדה, כניסת המטרו לפעולה והפעלת רשת הרכבות הקלות, יעלה משמעותית חלקן של הרכבות בביקוש לחשמל. בגרפים התחתונים ניתן לראות את העלייה המתמדת בביקוש לאנרגיה במגזרי התעשייה והמבנים, מפורטת בחלוקה לחשמל ולחום. בהמשך תהליך המעבר למשק נטול פליטות, רכיב החום יעבור ברובו לשימוש בחשמל, כשחלק קטן צפוי לעבור למימן.

לאחר תחשיב הביקושים, נבחנו הדרכים שיאפשרו לענות על ביקושים אלו בתרחישי איפוס פליטות. המודל בחן את משקי החשמל, הדלקים, הגז הטבעי וכן רכיבים עתידיים כדוגמת מימן, דלקים סינתטיים וביולוגיים, כמו גם את פליטות הפד"ח שידרשו טיפול. תרחישי האיפוס בחנו שילוב של טכנולוגיות שונות שיאפשרו להגיע ליעד איפוס הפליטות: התייעלות בביקוש לאנרגיה; מעבר התעשייה משימוש בדלקים פוסיליים מזהמים לחלופות נקיות כגון חשמל ומימן; חשמול התחבורה היבשתית; דלקים נקיים לתעופה ולספנות (ביניהם מימן, דלקים ביולוגיים ודלקים סינתטיים); החלפת השימוש בדלקים וגפ"מ במגזר המבנים בחשמל; והחלפת הדלקים הפוסיליים המשמשים לתעופה וספנות בדלקים נקיים.

תרשים 3: מגמות עיקריות במקורות האנרגיה במשק 2020-2050[2]



בתרשים לעיל ניתן לראות את המגמות העיקריות המסתמנות בביקושים למקורות האנרגיה השונים: הביקוש לדלקים ולגז טבעי יפחת עקב המעבר למקורות נקיים בתחבורה, בתעשייה ובמשק החשמל. אולם, ביקוש זה לא ירד לאפס עד לשנת 2050. קצב הגידול בביקוש לחשמל יואץ ויכלול חלקים מהביקוש שהוסב מדלקים פוסיליים בתעשייה ובתחבורה. כמו כן יתפתחו מגזרי המימן והדלקים הנקיים – ביולוגיים וסינתטיים – כחלופה לדלקים הפוסיליים. בהתאם למודל, עד לשנת 2050, הביקוש לחשמל צפוי לגדול עד לכ-19.2 מיליון שעט"ן בשנה (כ-220 TWh) – למעלה מפי 3 מהביקוש לחשמל היום.

[2] תחזית משרד האנרגיה והתשתיות.

טכנולוגיות מרכזיות להפחתת פליטות

בכדי להגיע לאיפוס פליטות גזי החממה בישראל, נערכה סקירה של הטכנולוגיות המרכזיות הקיימות היום בשלבי בשלות שונים. מתוכן נבחרו 5 טכנולוגיות עיקריות שיובלו לאפשר איפוס פחמני במשק, ונבחנו המשמעויות וההשלכות של שימוש בכל אחת מהן להשגת איפוס פחמני מלא, לדוגמא: כמה שטח יידרש למערכות סולאריות, כמה גז טבעי יידרש, כמה פחמן דו חמצני ייאסף וידרוש טיפול והטמנה, כמה מים ידרשו לתפעול המתקנים השונים, ועוד.

חמש הטכנולוגיות שנבחנו הן:

1. **אנרגיות מתחדשות ומימן "ירוק":** בישראל המקור העיקרי וכמעט בלעדי של אנרגיות מתחדשות הוא השמש. שילוב אחוזים גבוהים של אנרגיה סולארית ברשת החשמל הוא מאתגר. כך למשל, קיים צורך באגירה עונתית על מנת לאגור עודפי חשמל מהאביב לחורף שאחריו. אחד הפתרונות לכך הוא מימן ירוק (מימן המופק ממים באמצעות חשמל), שעדיין אינו ישים בקנה מידה גדול, אך קיימת לו חשיבות בראי ייצור מקומי על גבי תשתיות סמובות לצרכני הקצה. מעבר לאתגר האגירה העונתית, ישנו צורך בשטחים עצומים להתקנת פאנלים סולאריים ובעיבוי מאסיבי של רשת הולכת החשמל, באופן שיפגע בשטחים הפתוחים ובנופי הארץ. לאספקת מלוא צורכי האנרגיה של ישראל מאנרגיה סולארית יידרש חשמול מכסימלי של צרכני האנרגיה, שימוש במימן ירוק לתחבורה הכבדה ולצרכני החום בתעשייה שאי אפשר יהיה לחשמל עקב מורכבויות טכניות, ואגירה עונתית.

2. **גז טבעי בצירוף טכנולוגיות לתפיסת פחמן:** שימוש מאסיבי בגז טבעי עם תפיסת פחמן (בעיקר לצורך השלמת ייצור החשמל מאנרגיה סולארית בחורף ובלילה, וכן לצרכני החום בתעשייה הכבדה), יחייב פיתוח משמעותי של טכנולוגיות יעילות וזולות לתפיסת פחמן, וכן הקמת תשתיות ארציות להולכת הפחמן ואתרים להטמנתו באמצעות דחיסה אל תת-הקרקע, או שימוש בו באופן שלא יפלט לאטמוספרה. כל אלו מבוססים על טכנולוגיות שעדין לא נוסו בקנה מידה רחב, מחירן עדין גבוה, הן דורשות שטח ופיתוח תשתיות ארציות, וידרשו הליכי תכנון מורכבים ליישומן. מעבר לכך, שימוש בטכנולוגיות מסוג זה ידרוש עתודות מספיקות או יבוא של גז טבעי למשק המקומי, גם מעבר לאופק של שנת 2050.

3. **מימן "כחול":** מימן המופק מגז טבעי, תוך תפיסה ואחסון או שימוש בפחמן, שאיננו משוחרר לאטמוספרה. שימוש במימן כחול מחייב הקמת מערכות להפקת מימן בקנה מידה גדול, כולל מערכות לתפיסת הפחמן, הובלתו והטמנתו, וכן פריסת תשתית להולכת המימן או התאמת רשת הגז הטבעי הקיימת להולכת מימן, והסבת מערכות ייצור החשמל והמערכות התעשייתיות לשימוש במימן. יש לציין כי עדין אין בעולם מתקני הדגמה לייצור מימן כחול בקנה מידה גדול שניתן להישען עליהם, וכי גם במקרה זה ידרשו עתודות גז טבעי מעבר לשנת 2050.

4. **אנרגיה גרעינית ומימן "אדום":** בעולם מפתחים כיום טכנולוגיות חדשות לכורי חשמל – כורים מודולריים (SMR) וכורי דור 4. כורים אלו נמצאים כיום בשלבי פיתוח ופיילוטים והם צפויים להיות יעילים, זולים ובטוחים יותר מהכורים הקיימים. בכדי להקים כור חשמל בישראל יהיה צורך למצוא מענה לסוגיות הטכנולוגיות, הרגולטוריות והמדיניות. לאחר קבלת החלטה בעניין, יבחנו היבטים רחבים של הסוגיות, ובין השאר יערך דיון ציבורי. עקב מגבלות שטח ומרחקי בטיחות מהאוכלוסייה ניתן יהיה להקים הספק גרעיני מוגבל בישראל שיספק כ-15-20% מהביקוש בלבד, ולכן יהיה צורך בתוספת ייצור סולארי, מימן או גז טבעי עם תפיסת פחמן. קיים קושי לשלב אנרגיה סולארית שהיא תנודתית במהותה עם אנרגיה גרעינית שמייצרת הספק קבוע, ובכדי לגשר על הפערים יהיה צורך בשימוש באגירת אנרגיה.

בנוסף, ניתן לעשות שימוש **בטכנולוגיית היתוך גרעיני,** המתבססת על עקרונות אחרים מכורי החשמל ולא על ביקוע גרעיני. טכנולוגיה זו לא מאפשרת לייצר חומר בקיע, ולכן עשויה לעקוף את המגבלות המדיניות. יחד עם

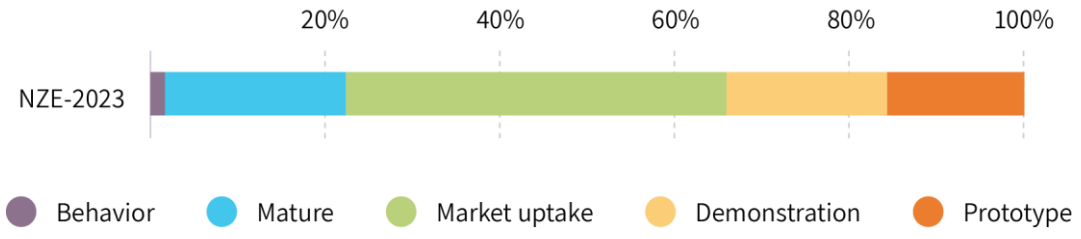
זאת, למרות שטכנולוגיה זו בטוחה ונקייה יותר, היא עדין בשלבי פיתוח מוקדמים ולכן לא ברור האם ניתן יהיה ליישמה בישראל עד לשנת 2050.

5. **יבוא אנרגיה וחיבוריות אזורית ובינלאומית:** עם ההתקדמות הגלובלית למעבר לשימוש באנרגיות מתחדשות ובטכנולוגיות חדשות בתחום האנרגיה, עולה החשיבות של בניית חיבורים אנרגטיים אזוריים. הקמת תשתיות לייבוא חשמל ומימן והעברת אנרגיה בין אזורים שונים יכולה להביא לשיתוף פעולה כלכלי, מדיני וטכנולוגי שיתרום לכלל המדינות המעורבות. ישראל ממוקמת במיקום גאוגרפי ייחודי, המחבר בין יבשות, ואשר היווה לאורך ההיסטוריה צומת דרכים מרכזי למעבר סחורות ותרבויות. מקסום של היתרונות של מיקומה הייחודי יאפשר למצב את ישראל כגשר בין המזרח התיכון ואירופה. הקמת חיבורים אנרגטיים עם מדינות המזרח התיכון ואירופה תוכל לסייע בפיתוח וחיזוק הקשרים המדיניים והכלכליים בין מדינות אלו לבין ישראל. מגמה זו, בשילוב מיקומה הייחודי של ישראל, פותחת חלון הזדמנויות לישראל לקידום חיבוריות אזורית ובינלאומית אשר תסייע מהותית גם בהבטחת תשתיות ומקורות לייבוא אנרגיה. יבוא אנרגיה יכול לכלול חשמל, מימן או דלקים נקיים אחרים. כבר היום ישראל פועלת לחיבוריות, למשל עם חיבור רשת החשמל הישראלית לרשת האירופאית ורכישת חשמל ממקורות מתחדשים, או בחיבור ישיר למתקני אנרגיה מתחדשת במדינות שכנות. במקביל יש לבחון את מקומה ותפקידה של ישראל בשוק הגלובלי העתידי שצפוי להתפתח להובלת מימן ודלקים נקיים אחרים כאמוניה, מתנול ודלקים ממקורות מתחדשים לתעופה וספנות. עצם הצורך בייבוא אנרגיה מחייב לבחון את מגוון ההזדמנויות לחיבוריות אזורית ובינלאומית תוך יצירת אסטרטגיה וחזון ברורים לחיבוריות, במקביל לזיהוי האתגרים הכרוכים בכך והבטחת מתן מענה לאתגרים אלו.

בנוסף לטכנולוגיות הפחתת הפליטות שתוארו לעיל ישנן מספר טכנולוגיות משלימות להשגת האיפוס הכולל של הפליטות. עבור תשתיות שלא ניתן יהיה להסב למקורות נקיים עד לשנת 2050, כמשאיות כבדות או מטוסים, ניתן יהיה לעשות שימוש **בדלקים סינתטיים וביולוגיים** – דלקים שייצורם מחייב קליטה מהאטמוספרה של גזי חממה באותה הכמות שנפלטת בעת השימוש בדלק ולכן נחשבים בעלי אפס פליטות נטו. עבור רכיבים של משק האנרגיה שעדין יפלטו גזי חממה, כגון תחנות כוח עם תפיסת פחמן שלא יגיעו לתפיסה של 100% מהפליטות, יהיה צורך בכלים **להסרת פחמן** מהאטמוספרה. כלים אלו עושים שימוש בטכנולוגיות כימיות או ביולוגיות בכדי לתפוס את הפחמן הדו-חמצני מהאטמוספרה, ומטמינים אותו בקרקע או במעמקי האוקיינוס.

בניתוח השקעות שנערך על ידי ה-IEA,[3] נמצא כי מרכיב משמעותי מהטכנולוגיות שיובילו לאיפוס פליטות בשנת 2050 טרם פותחו ואף אינן ידועות (ראו תרשים 4 להלן). לאור המגמה העולמית לאיפוס פליטות, ההשקעות העולמיות בתחומי האנרגיה הנקייה עולות בקצב מהיר, ובכדי לעמוד ביעדים הגלובליים לשנת 2030 יהיה להכפיל ואף יותר את קצב ההשקעות. זהו שוק פוטנציאלי ענק שלישראל יש מספר מאפיינים המציבים אותה במקום מצוין לפיתוח פתרונות עבורו, ככל שהיא תגדיל את ההשקעות, הן הממשלתיות והן הפרטיות, במו"פ בתחומי האנרגיה הנקייה.

תרשים 4: הטכנולוגיות שידרשו לאיפוס פליטות עד לשנת 2050 לפי רמת מוכנות[4]



[3] *World Energy Investment 2023*, IEA.

[4] *Net Zero Roadmap, 2023 Update*, IEA 2023.

להלן טבלה המסכמת את הסוגיות המרכזיות ומשווה בין הטכנולוגיות המרכזיות שנבחנו להשגת איפוס הפליטות:

טבלה 1: השוואת הטכנולוגיות העיקריות להפחתת פליטות

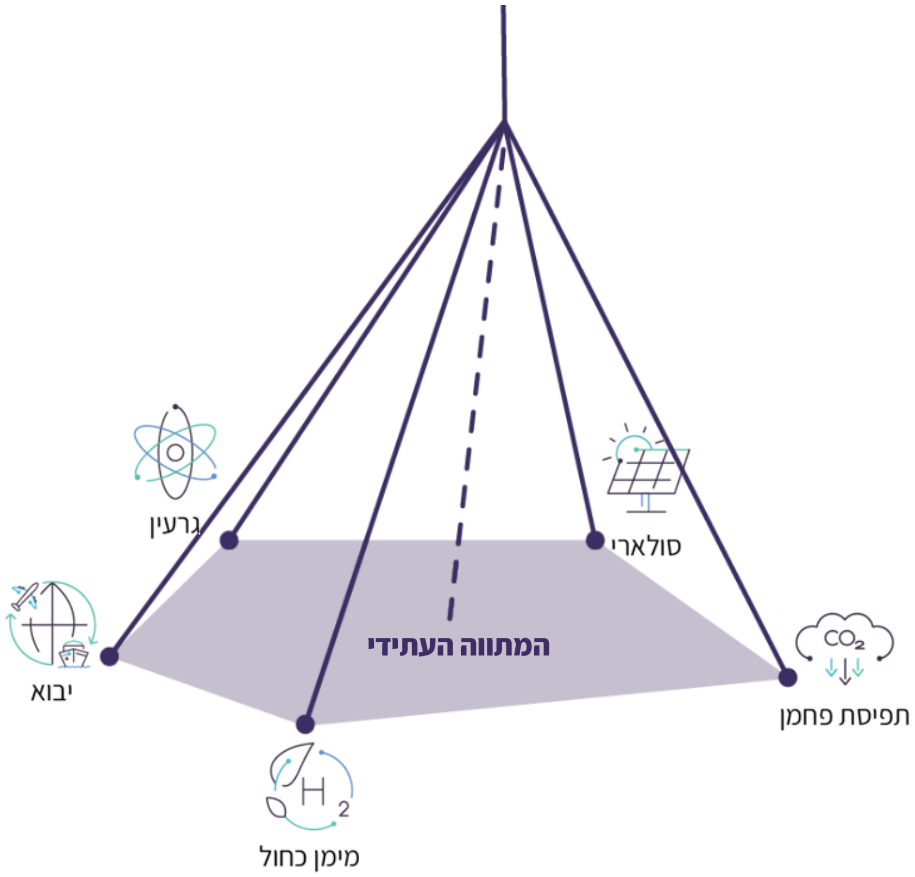
	אנרגיה מתחדשת ומימן "ירוק"	גז טבעי עם תפיסת פחמן	מימן "כחול"	אנרגיה גרעינית ומימן "אדום"	יבוא אנרגיה והפיכת ישראל לגשר אנרגטי
בשלות הטכנולוגיה	קיימת, למעט אגירה עונתית. נצילות נמוכה	בפיתוח	בפיתוח	קיימת, בתהליכי שיפור ושדרוג	ישנם פרויקטים בפיתוח. נדרשים פרויקטים נוספים
סוגיות שטח ותכנון	דרישת שטח גבוהה מאד, עד 1.5 מיליון דונם	נדרש איתור שטחי הטמנה וסלילת רשת הולכת פד"ח	נדרשים שטחי ייצור ותשתיות הולכה	איתור שטחים והקמת רשת לאתרים	אתרי קליטה לדלקים ואחסון
דרישת גז טבעי	אין	גבוהה	גבוהה	אין	אין
תשתיות נוספות	פרישה של רשת חשמל ואגירה נרחבת	רשת ארצית להולכת פד"ח ואתרי הטמנה	אתרי הפקת מימן, רשתות ארציות להולכת מימן ופד"ח ואתרי הטמנה לפד"ח	פרישת רשת לתחנות הכוח, מיגון	תשתיות קליטה, מכלי אחסון ותשתיות להפצה
סוגיות נוספות	אגירה עונתית	צריכת הגז הטבעי ביחס לעתודות	צריכת הגז הטבעי ביחס לעתודות	סוגיות טכנולוגיות, רגולטוריות ומדיניות	ביטחון אנרגיה, פיתוח שווקי הדלקים הנקיים

מסקנות המודל והתרחישים המשולבים

בסיכום ניתוח תוצאות המודל עבור חמש הטכנולוגיות המרכזיות להפחתת פליטות, נמצא כי לכל טכנולוגיה קיימים אתגרים משמעותיים ליישום מלא – בשימוש באנרגיות מתחדשות קיים קושי טכני להתקרב לשימוש ב-100% אנרגיה סולארית במשק ודרישה מאתגרת למציאת שטחים מתאימים; בכל הנוגע לשימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן או מימן כחול, יהיה צורך בכמויות גז טבעי משמעותיות עד לשנת 2050 וגם לאחריה, ואין וודאות ביחס ליכולת תפיסת והטמנת הפד"ח בעולם בכלל ובישראל בפרט; לגבי אנרגיה גרעינית, בשלב זה נראה כי יש להתגבר על סוגיות טכנולוגיות, רגולטוריות ומדיניות; ביחס ליבוא, על מנת לשמר את הביטחון והעצמאות באנרגיה של ישראל, לא נוכל להתבסס על ייבוא אנרגיה באחוזים גבוהים. מכאן, **שלא ניתן יהיה להסתמך על טכנולוגיה אחת בלבד להשגת איפוס פחמני.** כל פתרון שלם עתידי יהיה חייב להתבסס על **שילוב של מספר טכנולוגיות** בכדי לתת מענה לכל צרכי המשק בכל עת.

בנוסף, שיקולי ביטחון באספקת האנרגיה מחייבים אף הם גיוון מקורות אנרגיה. אירועי קיצון עלולים לפגוע ביכולת האספקה של אחת הטכנולוגיות, ולכן יש לשלב מספר טכנולוגיות באופן שיאפשר גיבוי הדדי בשעת חירום. יחד עם זאת, רוב הטכנולוגיות דורשות תשתיות ארציות ייעודיות, מורכבות ויקרות. אי לכך, לשילוב טכנולוגיות יש מחיר משמעותי בהקמה של תשתיות מרובות, ולכן יש לבצע איזון בין התועלת בשילוב טכנולוגיות חדשות ומגוונות מול עלות הקמה או התאמה של התשתיות הקיימות או המתוכננות לטכנולוגיות אלו.

תרשים 5: מרחב הפעולה העתידי לאיפוס הפליטות



בתרשים 5 מוצג המרחב המוגבל בין הטכנולוגיות שתוארו. המתווה העתידי יתקיים בתוך מרחב זה וישלב מספר טכנולוגיות למיצוי היתרונות הגלומים בכל אחת מהן. מכאן, שהשאלה המרכזית שתעמוד בפנינו בשנים הבאות היא **מהו התמהיל הנכון של הטכנולוגיות העתידיות שייצר את האיזון האופטימלי** בין הדרישות השונות במשק האנרגיה.

לאור זאת, **נבחנו שלושה תרחישים משולבים** שניסו למקסם את התועלות בשילוב טכנולוגיות חדשות ללא השקעה מאסיבית בתשתיות תומכות. התרחישים נבנו על בסיס שלוש טכנולוגיות מרכזיות – **אנרגיה סולארית, תפיסת פחמן, וגרעין** – בשילוב יבוא וטכנולוגיות משלימות בכל התרחישים, תוך התייחסות לאילוצים הייחודיים של ישראל. התרחישים השונים תלויים במספר הנחות על פיתוחים טכנולוגיים עתידיים. ככל שפיתוחים אלו יושגו, עולה הסיכוי של התרחיש להתממש. אם פיתוחים אלו יתעכבו, או לא יושגו כלל, הישימות של התרחיש תרד, והסבירות שנבחר בו תפחת בהתאם. בחירת התמהיל הטכנולוגי בכל תרחיש נעשתה על פי סבירות המימוש בהתאם לפוטנציאל הטכנולוגי כפי שהוא ניראה כיום, לצד המלצה לבחינה תקופתית.

להלן תיאור תמציתי של התרחישים שנבחנו:

התרחיש "הצהוב": תרחיש זה משלב אחוז גבוה יחסית של אנרגיה סולארית עם שימוש משלים מטורבינות גז עם תפיסת פחמן ובאמצעות יבוא אנרגיה. בתרחיש זה, כ-64% מהאנרגיה במשק (77% מייצור החשמל) יגיעו ממערכות סולאריות, כ-14% מטורבינות גז שיפעלו עם תפיסת פחמן בשעות בהן יש מחסור באנרגיה סולארית, וכ-22% מייבוא. הייבוא יכלול חשמל נקי שיתמוך בייצור הסולארי בשעות מחסור, וכן מימן שישמש לתעשייה ולתחבורה הכבדה. תרחיש זה עושה שימוש באנרגיה סולארית באחוז גבוה מאד מתוך הנחה כי תחומי האנרגיה הסולארית וסוללות האגירה יעברו שיפורים טכנולוגיים שיורידו את המחיר ויגדילו את הנצילות באופן שיאפשר להפיק את אותה כמות החשמל משטח קטן יותר. כמו כן, מונח כי ימצאו פתרונות טכניים לשילוב אחוז כה גבוה של אנרגיה סולארית ברשת, ויקודמו פתרונות נוספים למימוש פוטנציאל האנרגיות המתחדשות, בין היתר באמצעות הקמת אנרגיות מתחדשות בשילוב חקלאות (מתקנים אגרו-וולטאים) ובמרחב הימי. למרות ההספקים הגבוהים של אנרגיה מתחדשת, תרחיש

זה נמנע מהצורך באגירה עונתית של חשמל, ומאפשר גיבוי למערכות הסולאריות באמצעות חשמל מיובא וטורבינות גז טבעי עם תפיסת פחמן. בתרחיש הונח גם כי דלקים נקיים (סינתטיים וביולוגיים) ייובאו ויספקו את צרכי מגזרי התעופה, הספנות והתובלה הכבדה.

נגזרת של התרחיש הצהוב כוללת הסטה של חלק מהחשמל המיוצר באנרגיה סולארית לטובת ייצור מימן ירוק לשימוש מקומי, וזאת עבור פרויקטי מימן בכלל, ועמק מימן בפרט, לשימושי תעשייה ותחבורה. בהתאם לטכנולוגיות הקיימות היום, יצור מימן ירוק דורש המרה של החשמל המיוצר מאנרגיה מתחדשת למימן, ולעיתים המרה נוספת לשימוש חוזר בו כחשמל. המרות אלה גוררות איבודי אנרגיה, ומשכך ידרשו תוספת משמעותית של שטח להקמת מערכות סולאריות נוספת. התרחיש הנוכחי עושה שימוש בעודפי הייצור הסולארי כמימן ירוק. ככל שתהיה התקדמות טכנולוגית משמעותית ושיפור ביעילות ייצור המימן הירוק, שילוב נרחב יותר של מימן ירוק יהיה כדאי מבחינה אסטרטגית.

התרחיש "הכחול": התרחיש הכחול מתבסס אף הוא על אנרגיה סולארית אך בהיקפים קטנים יותר, כ-45% מהביקוש הכולל לאנרגיה (56% מייצור החשמל), בצרוף כ-30% של גז טבעי לייצור מימן כחול בשילוב מערכות לתפיסת הפד"ח הנפלט בתהליך ולאחר מכן הטמנתו או שימוש בו כחומר גלם תעשייתי. בכדי לגוון את מקורות האנרגיה ולהגדיל את ביטחון האספקה, בתרחיש זה יהיה גם רכיב של כ-25% יבוא מוצרי אנרגיה כגון חשמל ודלקים סינתטיים. בתרחיש זה ידרשו השקעות תשתיתיות משמעותיות, שיהיו כדאיות רק אם תהיינה התפתחויות טכנולוגיות שישפרו את היעילות והכלכליות של תהליכי הפקת המימן וניצולו, כמו גם את תפיסת הפד"ח ואחסונו. טכנולוגיות המימן הכחול נמצאות בתחילת דרכן, וקיים קושי להסיק מסקנות על היכולת והמשמעויות של פרישה רחבה שלהן ושימוש בהן במקור אנרגיה מרכזי. כמו כן, מתקני הפקת המימן, תפיסת הפד"ח ותשתית ההולכה הארצית ידרשו שטחים מרובים, ומשכך צריך יהיה לאתר מיקומים רלוונטים, לבצע הסדרות תכנוניות, ולשאת בעלויות הקרקע. סוגיה נוספת הינה מקור הגז הטבעי – כל עוד לישראל יהיו מאגרי גז טבעי מקומיים, ניתן יהיה להפיק מימן בעלות נמוכה יחסית. ככל שיהיה צורך ביבוא גז טבעי, בין אם בצינור ממדינות שכנות או כ-LNG בשוק העולמי, המחיר ככל הנראה יעלה והסיכונים יגדלו.

נגזרת של התרחיש הכחול מבוססת על שימוש ישיר בגז טבעי עם תפיסת פחמן. לנגזרת זו יש יתרונות וחסרונות. מחד, שימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן מפחית את נצילות הטורבינות ולכן מחייב את הגדלת ההספק המותקן הנדרש לייצור אותה כמות אנרגיה. מאידך, עלות המימן הכחול כיום גבוהה מעלות הגז הטבעי ותפיסתו. בנוסף, על אף שטכנולוגיית תפיסת הפד"ח נמצאת בפיתוח שנים רבות, טרם הוכחה בשלותה המסחרית. בראייה מערכתית, למימן הכחול יתרון בכך שמקורות הפד"ח יהיו ספורים ותדרש תשתית מצומצמת להולכת הפד"ח ביחס לתפיסת פחמן מתחנות כוח ומפעלים הפזורים ברחבי הארץ. כמו כן, לא ברורות ההיתכנות והמשמעויות הכרוכות באפשרות להקים מתקני תפיסת פחמן בכל מפעל ותחנת כוח בארץ. לכן, התרחיש הכחול מבוסס על מימן כחול, אף כי בחישוב הבסיסי שימוש בגז טבעי נראה בשלב זה זול יותר.

התרחיש "האדום": התרחיש האדום משלב ייצור חשמל מאנרגיה גרעינית. שימוש באנרגיה גרעינית בישראל ישולב עם חשמול משמעותי של משקי התחבורה והתעשייה ושימוש באנרגיות מתחדשות בהיקף של כ-55% מהביקוש לאנרגיה. משנת 2030 יוחל ביישום אמצעי תפיסת פחמן אצל צרכני הגז טבעי שיוותרו במשקי החשמל והתעשייה, או מעבר למימן כחול. במקביל, יש לפתח את תחום ייבוא האנרגיה בערוצים השונים – חיבור רשת החשמל הישראלית לאירופית ולמדינות שכנות, ייבוא דלקים נקיים בספינות, וייבוא מימן נקי ממדינות שכנות בצינורות להשלמת התמהיל והגיוון האנרגטי.

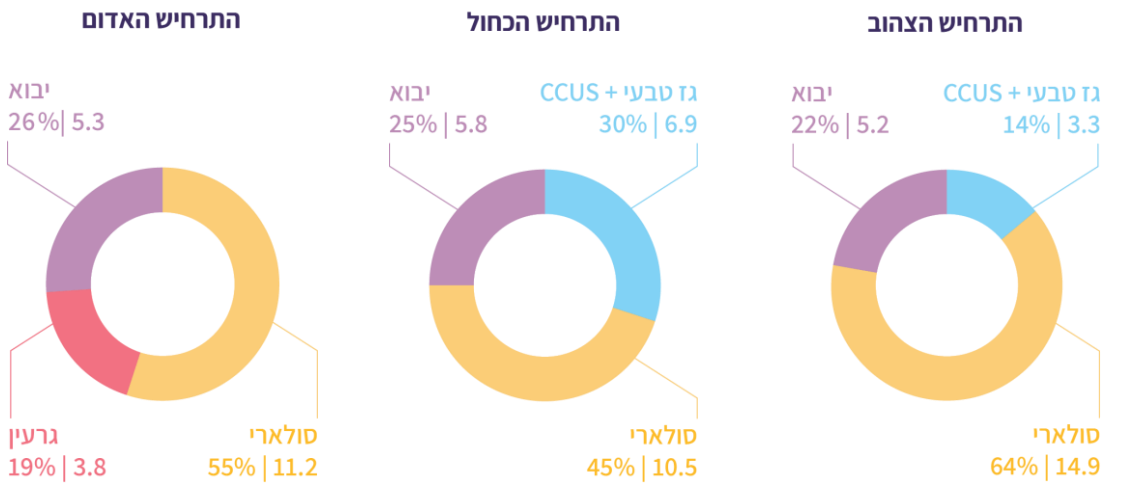
הונח כי בשנת 2050 יופעלו מספר תחנות כוח גרעיניות (תג"ר) – שתיים גדולות או מספר תחנות קטנות. כך, בשנת 2050 תמהיל האנרגיה של ישראל יהיה מאופס פליטות ויעמוד על כ-55% מקורות מתחדשים, כ-20% אנרגיה גרעינית ומימן אדום, וכ-26% יבוא מוצרי אנרגיה. תרחיש זה תלוי במספר רב של תהליכים כגון: התפתחויות טכניות בבורים המודולריים שיהפכו לזמינים, זולים ואמינים יותר; מענה לסוגיות מדיניות; סיום בחינת עלות/תועלת טכנו-כלכלית שתמצא כי הקמת תג"ר בישראל הינה כדאית; ודיון ציבורי עמוק שיבחן את כל ההיבטים של שימוש בטכנולוגיה זו בישראל ויתמוך בהקמתה. יצוין כי ככל שיפותחו טכנולוגיות היתוך גרעיני, שהן בטוחות ונקיות יותר, ניתן יהיה לעשות שימוש דומה גם בהן.

סיכום התרחישים

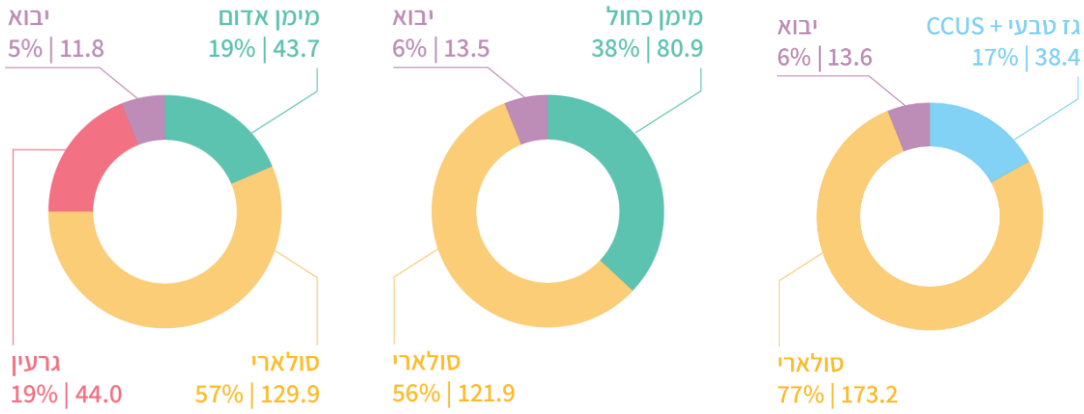
להלן תרשים וטבלה המסכמים את התרחישים שנבחנו. יש להבחין בין כמויות האנרגיה המיוצרת להספקים המותקנים. כך למשל, בתרחיש האדום הגרעין מהווה כ-5% מסך ההספק המותקן, אך מייצר כמעט 20% מהחשמל, וזאת עקב מקדם הקיבולת (Capacity Factor) הגבוה שלו.[5]

תרשים 6: סיכום שלושת התרחישים

מקורות האנרגיה על פי שלושת התרחישים



מקורות ייצור חשמל על פי שלושת התרחישים



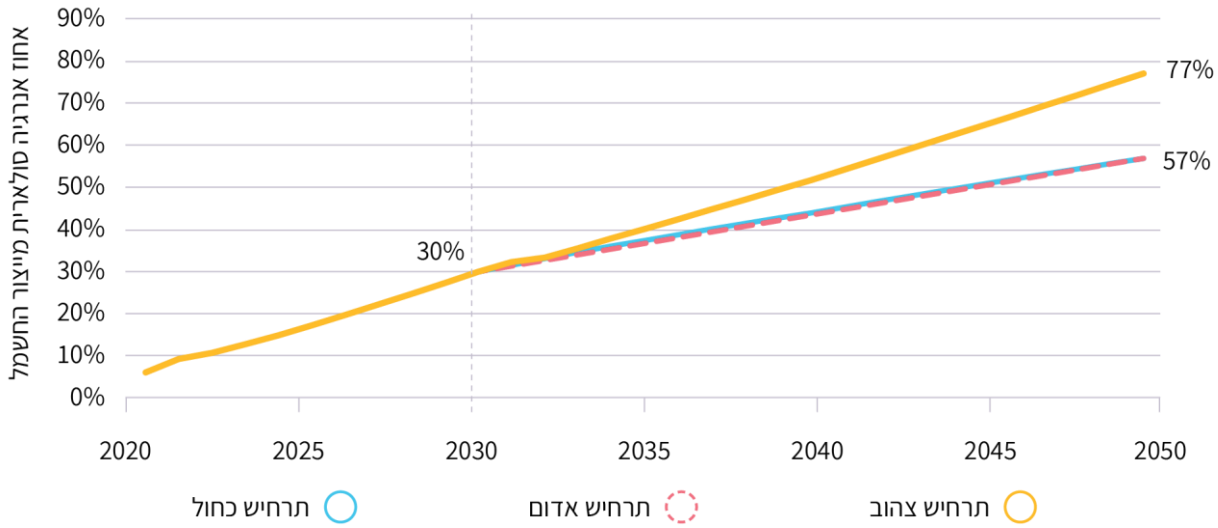
[5] מקדם הקיבולת מתאר כמה אחוז מהזמן יחידת הייצור פועלת בממוצע שנתי. כך, לאנרגיה סולארית, הפועלת כ-5 שעות אפקטיביות ביממה, מקדם קיבולת של 20%, לתג"ר, מאידך, מקדם קיבולת של 95%.

טבלה 2: סיכום תמהיל האנרגיה וההספקים המותקנים בתרחישים המשולבים

תחום	התרחיש הצהוב	התרחיש הכחול	התרחיש האדום
אנרגיה סולארית	כ-108GW, שהם כ-800-900 אלף דונם (מרביתם בדו-שמוש).	כ-75GW, שהם כ-550-650 אלף דונם (מרביתם בדו-שמוש).	כ-80GW, שהם כ-600-700 אלף דונם (מרביתם בדו-שמוש).
אגירה	כ-70GW ל-4 שעות	כ-34GW ל-4 שעות	כ-50GW ל-4 שעות
תחנות כוח	22GW גז טבעי עם תפיסת פחמן	29GW טורבינות מוסקות במימן	22GW טורבינות מוסקות במימן
הערכת עלות מערכות ייצור החשמל LCOE	91.5 $/MWh	105.6 $/MWh	96.5 $/MWh
שימוש בגז טבעי	כ-7.6 BCM גז טבעי בשנת 2050 בטורבינות גז עם תפיסת פחמן.	כ-18.9 BCM גז טבעי בשנת 2050 להפקת מימן כחול.	אין.
שימוש במימן	כ-600 אלף טון מימן בשנה עבור מגזרי התחבורה והתעשייה ולהפקת דלקים נקיים.	כ-5.5 מיליון טון מימן בשנה. מתוכם כ-790 אלף טון לתעשייה ולתחבורה ולהפקת דלקים נקיים.	כ-3.4 מיליון טון מימן בשנה. מתוכם כ-850 אלף טון לתעשייה, לתחבורה ולהפקת דלקים נקיים.
ייצור מימן מקומי	ייצור מקומי של מימן ירוק בהיקפים קטנים.	כ-4.7 מיליון טון בשנה מימן כחול.	כ-2.7 מיליון טון בשנה מימן אדום.
תפיסת פד"ח	כ-16 מיליון טון בשנה.	כ-34 מיליון טון בשנה.	אין
הסרת פד"ח	כ-3.2 מיליון טון בשנה בשנת 2050, בעלות של כ-1.2 מיליארד ש"ח בשנה.	כ-3.8 מיליון טון בשנה בשנת 2050, בעלות של כ-1.4 מיליארד ש"ח בשנה.	כ-2.8 מיליון טון בשנה בשנת 2050, בעלות של כ-1.0 מיליארד ש"ח בשנה.
יבוא מימן או דלקים אחרים	כ-600 אלף טון מימן, כ-1.7 מיליון טון של דלקים נקיים וכ-1.1 מיליון טון של דלקים פוסיליים.	כ-810 אלף טון מימן, כ-1.7 מיליון טון של דלקים נקיים וכ-1.1 מיליון טון של דלקים פוסיליים.	כ-700 אלף טון מימן, כ-1.3 מיליון טון של דלקים נקיים וכ-1.1 מיליון טון של דלקים פוסיליים.
תשתיות כלל ארציות	עיבוי רשת הולכת החשמל הארצית, רשת הולכת מימן ארצית, תשתיות קבלה של דלקים נקיים בנמלי הים, וחלוקת הדלקים לתחנות הכוח והצרכנים ברחבי הארץ.	עיבוי רשת ההולכה הארצית, תשתיות הפקת מימן כחול, רשת הולכת מימן ארצית ורשת ארצית להולכת הפד"ח והטמנתו. תשתיות קבלה של דלקים נקיים בנמלי הים וחלוקת הדלקים לתחנות הכוח והצרכנים ברחבי הארץ.	עיבוי מקטע הולכת החשמל מאתרי הכורים, תשתיות ייצור המימן האדום באזור הכורים, תשתיות הולכה גם למימן אל הרשת הארצית, תשתיות קבלה של דלקים נקיים בנמלי הים וחלוקת הדלקים לתחנות הכוח והצרכנים ברחבי הארץ.

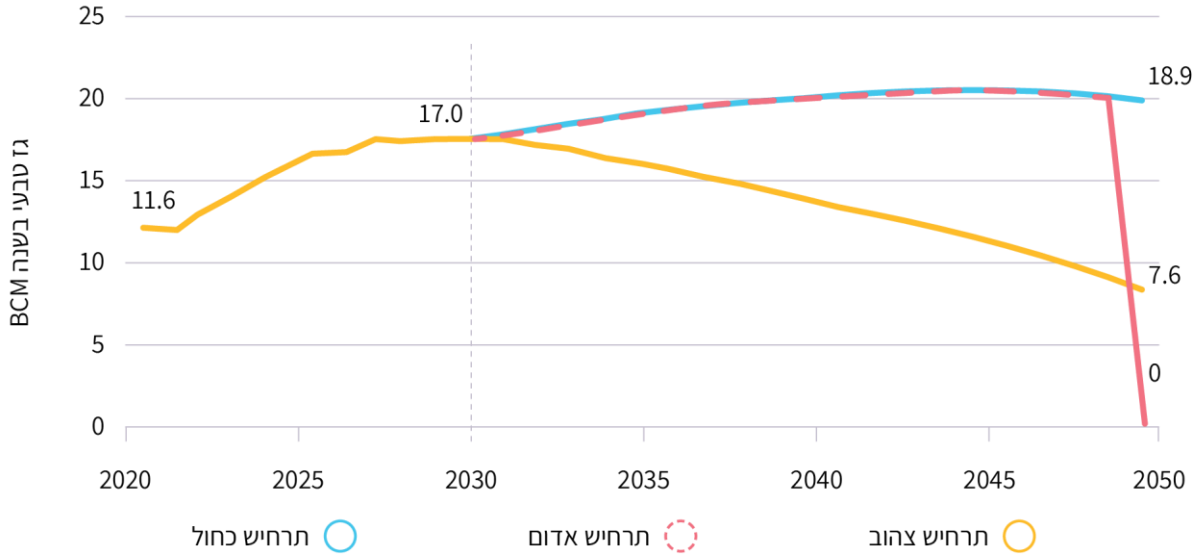
מחוון לאיפוס פליטות גזי חממה ממגזר האנרגיה בישראל עד לשנת 2050

תרשים 7: אחוז האנרגיה הסולארית מסך ייצור החשמל בתרחישים השונים



בתרשים 7 ניתן לראות את אחוז האנרגיה המתחדשת מתוך כלל ייצור החשמל בתרחישים השונים. אחוז האנרגיות המתחדשות יהיה גבוה יותר בשנת 2050 וינוע בין 57% בתרחישים הכחול והאדום, ל-77% בתרחיש הצהוב.

תרשים 8: צריכת הגז הטבעי לייצור החשמל בתרחישים השונים



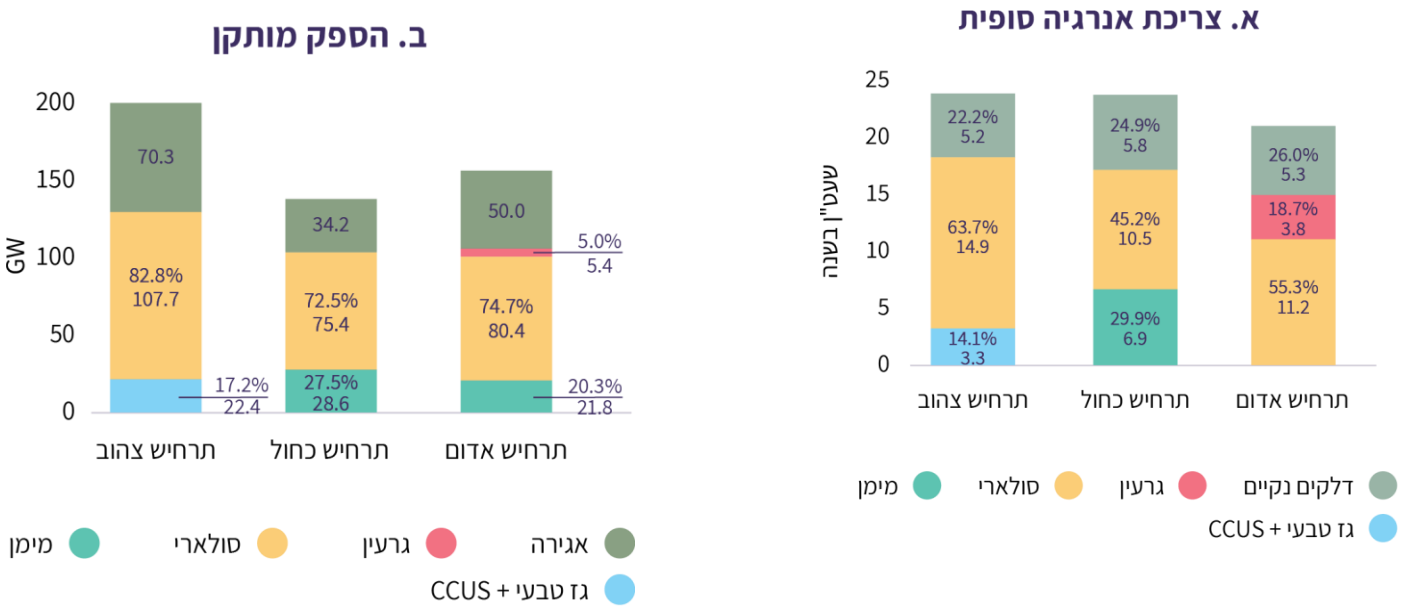
בתרשים 8 מחושבת צריכת הגז הטבעי השנתית המשמשת לייצור חשמל בתרחישים השונים. בתרחיש הכחול, המתבסס על המשך השימוש בגז טבעי תוך המרתו למימן כחול, צריכת הגז הטבעי היא הגבוהה ביותר ומתייצבת בסביבות רמת צריכה של כ-19 BCM בשנה (בשנת 2023 צריכת הגז הטבעי השנתית עמדה על כ-13 BCM). בתרחיש הצהוב תהיה התקנה משמעותית של מערכות סולאריות, אך עדיין ימשיך שימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן, ולכן צריכת הגז הטבעי תגיע לכ-7.6 BCM בשנה בשנת 2050. בתרחיש האדום הביקוש לגז טבעי ילך ויצטמצם עקב התקנת מערכות אנרגיה מתחדשת, ובשנת 2050, עם חיבור הכורים הגרעיניים לרשת, צריכת הגז הטבעי תרד לאפס.

ניתוח כלכלי – עלויות הפקה משוערות

עקב אי הוודאות הטכנולוגית והשינויים המהירים בתחום האנרגיה, קשה להעריך כיום את העלויות הכלכליות של כל אחד מהתרחישים עד לשנת 2050. למרות זאת, ערכנו חישוב להערכת העלויות של **הפקת החשמל** בתרחישים העתידיים בבסיס להשוואה. לשם כך השתמשנו במדד **LCOE** – Levelized Cost of Electricity שהוא מדד מקובל המהווה את עלות מערכות ההפקה לאורך חייהן ומחשב את העלות האפקטיבית לקוט"ש. באמצעות מדד ה-LCOE ניתן לחשב את העלות לקוט"ש בטכנולוגיות ובתרחישים עתידיים שונים, ובכך להשוות את הכדאיות הכלכלית של תרחישים אלו. יחד עם זאת, **העלות המוערכת מתייחסת רק להקמה ותפעול ישיר של מגזר ייצור החשמל, ללא שקלול עלויות נוספות** בגון: הוספה והקמה של קווי הולכה, תשתיות תפיסה והטמנה של פחמן, עלויות ביטחוניות ועוד.

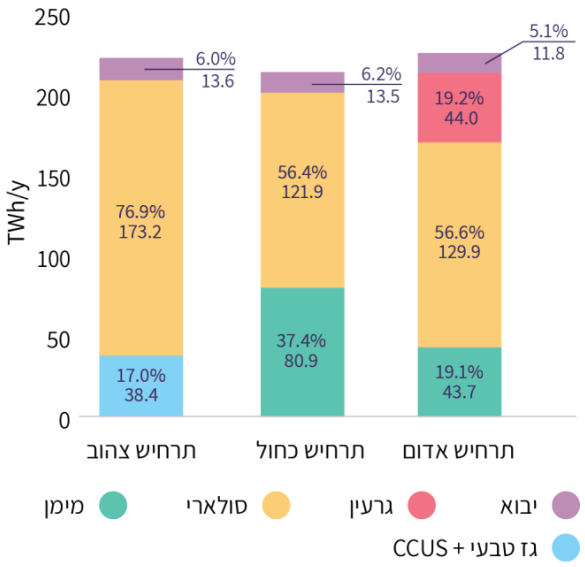
בחישוב העלויות הסתמכנו על הערכות המעבדה הלאומית האמריקאית לאנרגיות מתחדשות, NREL (National Renewable Energy Laboratory), ועל הדוח השנתי המפורסם על ידה, אשר מעריך עלויות הטכנולוגיות בטווח הארוך – NREL Annual Technology Baseline[6]. תחומים נוספים כדוגמת המימן, שלא מופיעים בניתוח של NREL, נלקחו ממקורות משלימים.

תרשים 9: השוואת ממצאי המודל בשלושת התרחישים העיקריים שנבחנו

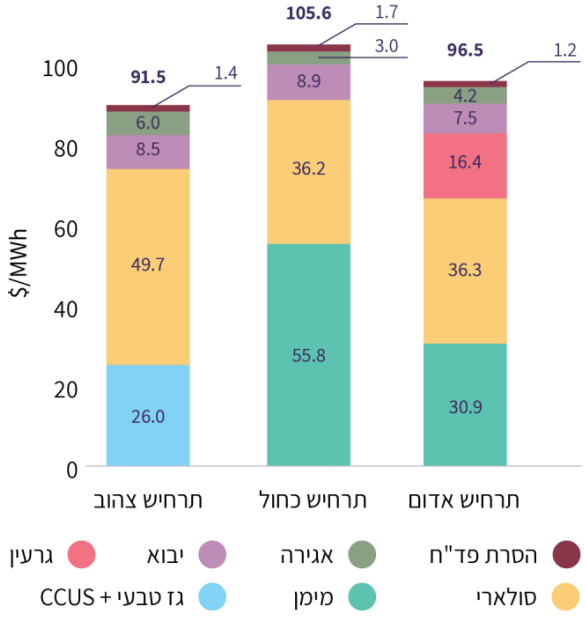


[6] https://atb.nrel.gov/

ג. ייצור חשמל



ד. LCOE - עלות משוקללת לקוט"ש



בתרשים 9 מוצגים גרפים המשווים את שלוש החלופות העיקריות להשגת איפוס פליטות בשנת 2050.

בגרף א' מתוארת השוואה של מקורות האנרגיה לצריכה סופית בשלושת התרחישים. ניתן לראות כי התרחישים הצהוב והכחול דומים, אך התרחיש האדום נמוך משמעותית כתוצאה מהפקת המימן האדום, העושה שימוש בחום מהכורים הגרעיניים ולכן דורש יחסית מעט חשמל. **בגרף ב'** מתואר ההספק המותקן בטכנולוגיות השונות. ניתן לראות כי בתרחישים האדום והכחול ההספק הסולארי דומה וזאת עקב ההסתמכות על טכנולוגיות אחרות – מימן כחול וגרעין בהתאמה – אך בתרחיש הצהוב נדרש הספק גבוה משמעותית, וכן הספק אגירה מוגדל, עקב ההתבססות על הטכנולוגיה הסולארית בתרחיש זה. **בגרף ג'** מתוארים מקורות האנרגיה לייצור חשמל, המסתכמים לסך דומה בתרחישים השונים למרות ההבדל בתמהילים. **בגרף ד'** מתוארת העלות המשוקללת לקוט"ש, על פי ההערכה הכלכלית, המבוססת על מדד ה-LCOE, כאשר העלות הכוללת עבור התרחיש הצהוב נראית הכדאית ביותר. כאמור, עלויות אלה אינן כוללות חלק מרכיבי התשתית שידרשו כגון עלויות רשת, תשתיות הולכת והטמנת פד"ח, בטחון ומיגון, ועוד. עלויות אלו עשויות להשפיע באופן מהותי בבחירת התרחיש המועדף, אך נכון להיום לא קיים בסיס מידע מספק להערכת עלויות אלו ולכן המדד לא מביא אותן בחשבון בשלב זה. ככל שיתבהר האופק הטכנולוגי ויתבררו עלויות התשתיות, תידרש עבודה מקצועית נוספת לחידוד כלל העלויות בתרחישים השונים.

תובנות עיקריות

כפי שניתן להבין, השגת איפוס הפליטות בשנת 2050 יכולה להיעשות במספר דרכים, אולם אף אחת מדרכים אלו אינה מהווה "פתרון קסם". כל דרך אל יעד האיפוס מורכבת מתמהיל הכולל מספר פתרונות וטכנולוגיות, ודורשת היערכות מראש במספר מישורים, אשר תיבחן באופן תקופתי:

בטחון באנרגיה: הבטחת אספקת אנרגיה רציפה ואמינה מהווה תנאי בסיסי והכרחי לכל תרחיש שייבחר. בין היתר יש לבחון את רמת ואופן גיוון מקורות הייצור, ביזור אמצעי הייצור ואת היכולת לנהל באופן מקומי את צריכת החשמל.

הפחתה וניהול ביקושים: אחד האתגרים המשמעותיים ביותר להצלחת המעבר למשק נטול פליטות הוא סך הביקוש לאנרגיה, וכן ההתאמה בין ייצור החשמל לביקוש. ישנה חשיבות עצומה לתהליכי התייעלות, כמו גם לשינויים טכנולוגיים והתנהגותיים שיפחיתו את הביקושים לאנרגיה ובכך יצמצמו את ההשקעות והיקף התשתיות שידרשו למעבר למשק אנרגיה נקי. באופן דומה, ככל שניתן יהיה לנהל חלק גדול יותר מהביקוש ולהתאימו להיצע, כך יקטן הצורך באגירה וביחידות יצור לגיבוי המשק הסולארי.

אין טכנולוגיה אחת: בחינת הטכנולוגיות העומדות לרשותנו להפחתה ואיפוס הפליטות ממגזר האנרגיה, הראתה כי אין טכנולוגיה אחת שיכולה לספק פתרון מלא לצרכי העתיד של ישראל תחת המגבלות הייחודיות לישראל. מכאן שיהיה צורך בשילוב מספר טכנולוגיות שישלימו זו את זו.

גיוון טכנולוגיות: הצורך בגיוון ושילוב טכנולוגיות בתרחישים השונים נובע ראשית משיקולי בטחון באנרגיה מחייבים גיוון מקורות באופן שיאפשר גיבוי וימנע תלות משקית במקור אנרגיה בודד. מאחר שכבל שאחוז השילוב של טכנולוגיה מסוימת גדל, כך השילוב הופך קשה ויקר יותר, נשאף לשלב מספר טכנולוגיות, באופן שיספק את התועלת המקסימלית, תוך איזון עם היקף ההשקעות הנדרשות לתשתיות השונות.

הסרת פחמן: נראה כי לא ניתן יהיה לבטל את כלל הפליטות בכל המגזרים וכ-5% מהפליטות יוותרו וישוחררו לאטמוספרה. בכדי להשיג איפוס מלא של הפליטות יהיה צורך להשתמש בטכנולוגיות של "הסרת פחמן", דהיינו הסרה של הפד"ח מהאטמוספרה בכמות של 3-4 מיליוני טון בשנה.

יש להתחיל כבר כעת: על מנת להגיע לאיפוס פליטות בשנת 2050 יש לבצע שינויים דרמטיים במשק האנרגיה, הן בצד מערכות ייצור האנרגיה, והן בתשתיות תומכות כעיבוי רשת החשמל הארצית או הקמת מתקנים להטמנת פד"ח. היות ומדובר בטכנולוגיות חדשניות ותשתיות משמעותיות, ישנם צעדים רבים שיש להתחיל בביצועם כבר בימים אלו, אף ששנת היעד היא בעוד שניים וחצי עשורים.

השקעות ללא חרטה: ישנם מספר פתרונות שידרשו כנראה בכל תרחיש עתידי – מיקסום הפוטנציאל לייצור אנרגיה סולארית ואגירה, יבוא מוצרי אנרגיה, השקעות מאסיביות בפיתוח רשת החשמל ועוד. בהיבטים אלו יש לפעול כבר כעת באופן משמעותי מאחר שהם מהווים צעדים **ללא חרטה,** דהיינו השקעות שידרשו בכל תרחיש עתידי ולא נתחרט על ביצוען. כאמור, כלל הפתרונות דורשים השקעות משמעותיות בתשתיות אנרגיה, ולכן נדרש לבצע איזון בין התועלת בשילוב מספר רב של טכנולוגיות לבין עלויות ההתאמה והגיוון שלהן.

אתגר השטח: בכל תרחיש עתידי ידרשו שטחים נרחבים. השטחים הגדולים ביותר ידרשו עבור המערכות הסולאריות (שבשאיפה יהיו, ככל האפשר, בדו-שימוש בקרקע), אך גם בתרחיש הכחול ידרשו, בנוסף לתשתיות הפד"ח, גם שטחים עבור מתקני המרת הגז הטבעי למימן. בתרחיש האדום ידרשו מרחקי בטיחות סביב תחנות הכוח. בנוסף, יבוא האנרגיה ידרוש אף הוא שטחים למתקני קבלה, המרה, ניפוק והולכה של אנרגיה.

רגולציה מאפשרת: התרחישים השונים בעבודה זו מסתמכים על טכנולוגיות חדשות, הנמצאות כיום בפיתוח ויכנסו לשימוש מסחרי רחב במהלך השנים הקרובות. בכדי לעמוד ביעד האיפוס עד לשנת 2050, ובהתחשב בזמן שייקח לגיבוש הרגולציה, התכנון הסטטוטורי, ההנדסי ושלבי ההקמה, יש להתחיל להתנסות כבר כעת בטכנולוגיות השונות. יש לגבש רגולציה גמישה,המאפשרת התנסות בטכנולוגיות חדשות, אשר תאפשר את יישומן, ובחינת השפעתן על הסביבה והחברה בישראל עוד טרם הטמעת הרגולציה הסופית. רגולציה זו תהיה מכוונת יעדים ולא טכנולוגיה, ובכך תאפשר גמישות לשימוש בטכנולוגיות ובשיטות שונות.

אנרגיות מתחדשות הן הזולות והכדאיות ביותר: אנרגיה סולארית מייצרת חשמל באופן ישיר ובמחיר הנמוך ביותר, אך היא מוגבלת הן בשטחים שניתן להקצות למערכות הסולאריות והן ביכולת לשלב אחוזים גבוהים מאד ברשת (נדרשת יכולת אגירה עצומה). אנרגיה סולארית מהווה נדבך מרכזי בכל תרחיש, אך יש להשלים אותה בטכנולוגיות תומכות כייבוא, גרעין או טורבינות גז עם תפיסת פחמן.

ניהול מקומי של רשת החשמל (מיקרוגריד): ביזור מקורות ייצור האנרגיה הקרובים למוקדי הצריכה, לצד העלייה בדיגיטציה של רכיבי הרשת, מאפשרים ניהול משק חשמל באופן מקומי (יישובי או אזורי). בניגוד למשק חשמל המסורתי, בו הייצור מותאם לביקוש, במשק חשמל מבוזר, יכולות להיות תועלות ויתרונות מניהול מקומי של החשמל תוך התאמת הביקוש לייצור, ניהול הביקוש, ניהול מקומי של הסחר בחשמל. וניהול מקומי של רשת החשמל (מיקרוגריד). הניהול המקומי יאפשר לבצע זאת לא רק ברמה הארצית, אלא גם ברמה המקומית. כך למשל, ניתן יהיה להשיל צרכנים לא חיוניים בשעות העומס או לאותת לרכבים חשמליים המחוברים לעמדות טעינה להחזיר זמנית אנרגיה לרשת, ולחלופין לנהל את רשת החשמל באופן אסטרטגי בשעת חירום.

יבוא אנרגיה וחיבוריות אזורית ובינלאומית: בכל תרחיש עתידי יהיה צורך לשלב יבוא אנרגיה. מתוך הצורך לגוון את מקורות האנרגיה, יהיה צורך בגיוון הן במקורות הייבוא, כלומר ספקים מרובים, והן בטכנולוגיות השונות המיובאות – לדוגמא יבוא חשמל בכבלים ממדינות שכנות, יבוא דלקים נקיים בספינות, ויבוא מימן ודלקים נוספים בצינורות. צורך זה מחזק את החשיבות והדחיפות ביצירת חיבוריות אזורית ובינלאומית.

שמירה על משק הגז הטבעי המקומי: כמעט בכל התרחישים שנבחנו ייוצר חשמל באמצעות שימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן או במימן שיופק מגז טבעי עם תפיסת פחמן. לכן, יש לשמור על משק הגז הטבעי המקומי, שישמש את מדינת ישראל עוד שנים רבות, ובמקביל לוודא כי תשתיות ההולכה יתאימו לביקוש העתידי, וכי תחנות הכוח המוקמות כיום יהיו מוכנות לשילוב אמצעים עתידיים להפחתה ואף איפוס של פליטות גזי החממה.

הבטחת אספקת מינרלים קריטיים: מעבר מאסיבי למשק אנרגיה נקי, כדוגמת שימוש באנרגיות מתחדשות, אגירה ורכב חשמלי, דורש שימוש גובר במתכות ומינרלים נדירים (בין היתר ליתיום, נחושת וקובלט). מאחר שמדובר במגמה עולמית, הביקוש העולמי למתכות ומינרלים אלו צפוי לגדול משמעותית ועלול להגיע עד כדי מחסור, יש להבטיח כי אספקת המינרלים הקריטים לישראל לא תיפגע. ביקוש זה צפוי להיות מושפע משמעותית מהקשרים גיאופוליטיים ולייצר תחרות לצד שותפויות אסטרטגיות חדשות. משרד האנרגיה והתשתיות מקדם בימים אלו עבודה למיפוי האתגרים וההזדמנויות הצפויים, וכדי להיערך בהתאם.

תחנות כוח גרעיניות: בין הטכנולוגיות שצוינו ניתן למנות את הגרעין, שהיא אמנם טכנולוגיה ותיקה ומסחרית, אך העבודה מתייחסת לטכנולוגיית הכורים המודולריים (SMR) אשר נמצאת כעת בשלבי פיתוח. במדינת ישראל הנושא נמצא בשלבי בחינה ראשוניים, אולם נראה כי מדובר בפתרון משמעותי וחשוב לשנת 2050 ואחריה.

אדפטציה לצד מיטיגציה: השפעות משבר האקלים ניכרות כבר היום. לכן, לצד נקיטת פעולות להפחתת פליטות ואיפוסן, יש לפעול כבר היום להתמודדות עם שינויי האקלים הנוכחיים והצפויים. בין היתר, יש לוודא כי תשתיות האנרגיה ערוכות לעליה בטמפרטורה, ירידה ניכרת בכמות המשקעים ולעלייה בשכיחות אירועי קיצון של מזג האוויר, כולל גלי חום וסופות חול לצד סופות גשם ושטפונות. הכנת המשק לאירועי מזג-אויר קיצוניים תשפר את החוסן גם כלפי משברים ביטחוניים ואחרים.

המשך סריקת האופק: לצד הטכנולוגיות שייסקרו בעבודה, הפיתוחים והשדרוגים שלהן, סביר להניח כי עם השנים יופיעו טכנולוגיות נוספות שיוכלו להשלים או להחליף חלק מהטכנולוגיות המוכרות כיום. יש להמשיך לסרוק את האופק הטכנולוגי באופן מתמשך בכדי לאתר טכנולוגיות עתידיות אלו, לתמוך בהתנסות ובהתאמה שלהן למשק האנרגיה המקומי, ואף לקדם מחקר ופיתוח של פתרונות מדעיים וטכנולוגיים לאתגרי סקטור האנרגיה המקומיים והגלובליים. ככל שישראל תפתח ותקדם טכנולוגיות מהפכניות להפחתת פליטות במשק האנרגיה, בין היתר באמצעות גיבוש ומימוש אסטרטגית מו"פ לאנרגיה ואקלים, יש בכוחה להוות שחקן גלובלי ומוביל בתחום, ובכך להוביל שינוי רחב אף יותר.

מעבר הוגן (Just Transition): הבטחת אספקת אנרגיה רציפה מחייבת שמירה גם על האוכלוסיות החלשות ביותר בחברה, העלולות להיפגע מתהליך המעבר של משק האנרגיה לעתיד מאופס פליטות. תחום ה"מעבר ההוגן" ("Just Transition"), בוחן את הסכנות הפוטנציאליות הכרוכות במעבר זה, ומציע מספר כלי מדיניות להתמודדות עם אתגרים אלו. בין היתר יש לוודא שמחירי האנרגיה נשארים ברי השגה, כי נשמר בטחון תעסוקתי בתעשיות שייעלמו, ומוצע לבחון כלי מימון למעבר לאנרגיה נקיה גם לאוכלוסיות חלשות.

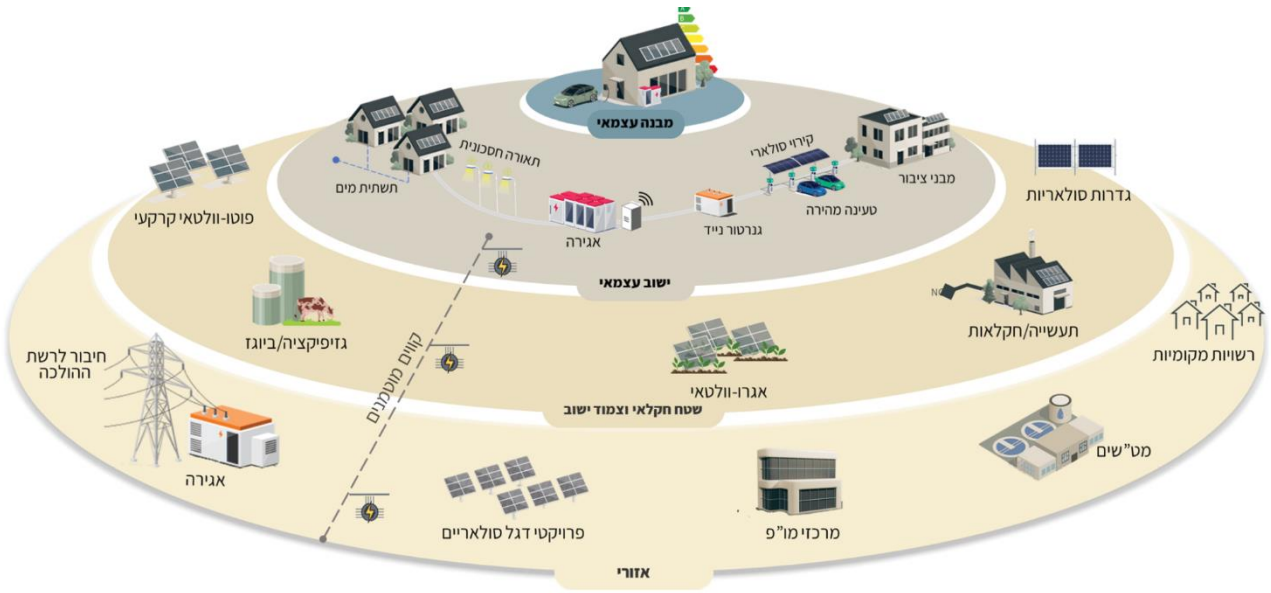
חלק משמעותי מתובנות אלה בא לידי ביטוי בתכנית משרד האנרגיה והתשתיות לשיקום ולפיתוח חבל תקומה (עוטף עזה).[7] התכנית מציגה מודל לעצמאות ויתירות באנרגיה באמצעות קידום אנרגיה מקיימת, מבוזרת ומאופסת פליטות, ותוך האצת חדשנות אקלימית ופיתוח כלכלי. במסגרת התכנית, המבנים בחבל תקומה (פרטיים וציבוריים) ייבנו בהתאם לדירוג האנרגטי הגבוה ביותר, הם יקורו באנרגיה מתחדשת לצד התקנת מערכות אגירה, ויוקמו לצידם תשתיות לטעינת רכבים חשמליים ונקיים. בהמשך לכך, עבור כל יישוב בחבל, יוטמנו תשתיות החשמל, יוקמו מערכות אנרגיה יעילות (לדוגמה מערכת תאורה יישובית חכמה), ויותקנו מערכות לניהול האנרגיה ברמה היישובית

[7] *תכנית אב רב-שנתית לשיקום תשתיות האנרגיה והמים בחבל תקומה*, משרד האנרגיה והתשתיות 2024.

("מיקרוגריד"). כמו כן, גם בשטחים החקלאיים וצמודי יישוב יוקמו מערכות לייצור אנרגיה מתחדשת ואגירה, בין היתר בדו-שימוש אגרו-וולטאי, יקודם טיפול אזורי בפסולת חקלאית לאנרגיה (גזיפיקציה), ישודרגו תשתיות המים האזוריות ויוקם מרכז מו"פ לקידום חדשנות באנרגיה.

מימוש החזון והתכנית, יהפכו את חבל תקומה למרכז אנרגטי, כלכלי ואקלימי שיוכל להיות מנוהל באופן עצמאי בשעת חירום ובשגרה, ובכך יהווה מודל למשק האנרגיה העתידי.

תרשים 10: המתווה הכללי לשיקום חבל תקומה על בסיס חוסן ועצמאות באנרגיה[8]



[8] משרד האנרגיה והתשתיות.

צעדי מדיניות

כדי שניתן יהיה לעמוד בתכנית השאפתנית לאיפוס הפליטות, בהתאם לכל תרחיש שייבחר, **יש להתחיל כבר כיום** במספר תהליכים שיאפשרו את מימושה בעתיד, גם אם יחולו עדכונים ושינויים בהתאם להתפתחויות העתידיות. ישנם צעדים רבים שיהיו רלוונטיים לכל תרחיש שייבחר, ושניתן, ואף רצוי, לבצע כבר כעת. בין היתר:



1. **קביעת יעדי אנרגיות מתחדשות:** בשל הצורך בהשגת אחוזי אנרגיות מתחדשות גבוהים בשנת 2050 לעמידה ביעד איפוס פליטות, יש להציב יעדים לאחוזי אנרגיה מתחדשת מעבר ליעד הקיים בשנת 2030 – יעד קונקרטי לשנת 2035, וטווח יעדים לשנים 2040 ו-2050. קביעות אלה יציבו רף מינימום אליו הסקטור הפרטי יוכל לכוון, ורף מקסימום אליו תוכל הממשלה לשאוף, וכל זאת בתוך מסגרת, שבצרוף טכנולוגיות משלימות, תאפשר את השגת יעד האיפוס.



2. **קביעת יעדי התייעלות באנרגיה לשנת 2050 ועדכון ותקצוב התוכנית הלאומית להתייעלות באנרגיה:** התייעלות באנרגיה תסייע בכל נתיב עתידי והיא משמעותית להשגת איפוס הפליטות. ככל שהביקוש לאנרגיה יקטן, כך יקטנו ההשקעות שידרשו בכל תרחיש איפוס שיבחר. בנוסף, התייעלות באנרגיה בדרך כלל מחזירה את ההשקעה בתוך שנים ספורות, ולכן היא כדאית לצרכנים. יש להמשיך ולעודד התייעלות באנרגיה, באמצעות יישום התכנית הלאומית להתייעלות באנרגיה, במקביל לפרסום תכנית המשך עד לשנת 2050 ותקצובה.



3. **תכנית רב-שנתית מתוקצבת למו"פ וחדשנות במשק האנרגיה, ובפרט במשק החשמל:** מדינת ישראל היא מובילה עולמית במו"פ וטכנולוגיות, ויכולותיה בתחום זה הן מהמתקדמות בעולם.[9] ההשקעות שבוצעו בטכנולוגיות במשק האנרגיה הניבו השקעות רבות נוספות ואף הובילו לפריצות דרך טכנולוגיות בעלות ערך עולמי.[10] פיתוח טכנולוגיות אנרגיה מתקדמות בישראל יאפשר התקדמות מהירה להשגת יעד איפוס הפליטות תוך שמירה על הביטחון האנרגטי, ובו בזמן יפתח בפני הכלכלה הישראלית שוק גלובלי צומח הצמא ארוכת טווח, תקדם את היכולת של ישראל להטמיע פתרונות טכנולוגיים חדשניים ומותאמים במשק האנרגיה המקומי, ואף תאפשר להרחיב את האקו-סיסטם הקיים ולהפוך את ישראל למובילה עולמית לצד פיתוח תעשיית האנרגיה העתידית כך שתהווה קטר משמעותי לכלכלת ישראל ולהפחתת פליטות בקנה מידה עולמי.



4. **השקעות נרחבות ברשת ובתשתיות חשמל:** כבר היום רשת החשמל בישראל עמוסה עד גבול היכולת. בשל מאפייניה הייחודיים של מדינת ישראל, הגידול בביקוש לחשמל בישראל ממשיך לעלות בהתמדה במקביל לצמיחה מהירה ביכולת הייצור הסולארית בפריפריה. מגמות אלו גורמות לעומסים הולכים וגדלים במשק וחישמול מקביל של התחבורה והתעשייה. לכן, יש להשקיע ולהיערך כבר היום להמשך הגידול בביקושים.



5. **ניהול מתקדם של רשת החשמל:** פיתוח הרשת הוא קריטי לפיתוח משק החשמל העתידי וחשיבות הרשת תעלה ככל שכמות המקורות המתחדשים והמבוזרים במשק תגדל. הליכי תכנון והקמה של רכיבי רשת אורכים שנים רבות ולעיתים מעכבים חיבור והפעלה של מתקני ייצור חדשים. בכדי לאפשר הולכה של כמויות אנרגיה גדולות, סירוגיות, ורב-כיווניות על הרשת הקיימת, יש להשתמש בכלים מתקדמים לניצול הרשת בגון

[9] מתוך דו"ח רשות החדשנות לשנת 2022.

[10] ראו למשל כתבה בנושא פיתוחים טכנולוגיים ישראליים, ואת נתוני משרד המדע על תגליות ופיתוחים ישראליים שהשפיעו על העולם.

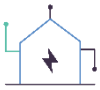
ניטור ובקרה של רכיבי הרשת לשימוש אופטימלי. לצורך כך יש להשקיע גם במחקר, פיתוח והטמעה של טכנולוגיות חדשניות שייתנו מענה לאתגר לאומי זה.



6. **תכנון אינטגרטיבי למשק האנרגיה:** הניתוח שנעשה בעבודה זו מציג את מורכבות הקשרים בין המגזרים השונים של משק האנרגיה ואת מרכזיותן של השפעות הגומלין ההדדיות ביניהם. מכאן, שיש לתכנן את כלל משק האנרגיה באופן המשלב התייחסות למערך ייצור החשמל, ההולכה והחלוקה, כמו גם לתהליכי ההתייעלות באנרגיה במשק. בנוסף, הפחתת פליטות במשקים אחרים, כדוגמת המעבר לרכב חשמלי, עלולה להשפיע על משק האנרגיה, כך שיש להכליל בתכנון גם מוקדים עתידיים של ביקוש.



7. **גמישות וודאות רגולטוריות:** כלל תרחישי איפוס הפליטות כוללים שילוב טכנולוגיות חדשות נוספות ושונות, בין אם תפיסת פחמן, הפקה ושימוש במימן, אנרגיה גרעינית, ועוד. על מנת לייצר ודאות למשק, ולאפשר את ההשקעות וההיערכות של השוק הפרטי באופן מיטבי, יש להכין את המשק לאימוץ טכנולוגיות חדשות במהירות וללא ביורוקרטיה מכבידה.



8. **שכלול צד הביקוש:** עם העלייה בדיגיטציה של רכיבי הרשת והתרחבות אפשרויות הבקרה והשליטה מרחוק על צרכנים, מתאפשרות דרכים חדשות לשלוט בצרכני האנרגיה באופן שתואם את צרכי הרשת. כך, ניתן יהיה להשבית צרכנים לא חיוניים בשעות עומס או לאותת לרכבים חשמליים המחוברים לעמדות טעינה להחזיר זמנית אנרגיה לרשת או להגדיל את הצריכה שלהם בשעות של עודף ייצור. ניתן להשלים מהלכים אלו עם תמרוץ שינויים התנהגותיים שיעודדו הסטת צריכת האנרגיה לשעות בהן יש עודף בייצור, בנוסף להשקעה משמעותית במחקר ופיתוח של פתרונות לקידום מענים לאתגרים אלו. אמצעים אלו, לניהול צד הביקוש, זולים יותר מתוספת אמצעי ייצור או אגירה, ומשפרים את הניצולת של רכיבי הרשת.



9. **קידום אנרגיות מתחדשות בשילוב אגירה:** בכל תרחיש אפשרי יהיה שימוש מאסיבי באנרגיות מתחדשות, ובעיקר באנרגיה סולארית. משכך, על מדינת ישראל לשאוף להיות מובילה עולמית בהקמת אנרגיה סולארית בכלל, ובדו-שימוש בפרט. לשם כך יש לבחון **הקמת תשתיות אנרגיה מתחדשת גם במרחב הימי**, ואת הפוטנציאל וההזדמנויות הכרוכים בכך. בנוסף, יש להמשיך ואף להאיץ את התמיכה בהקמת מערכות סולאריות על גגות מבנים, לתמרץ הקמת מתקני אגירה בטכנולוגיות שונות, ועוד. כמו כן, יש לבחון את התאמת מאגרי הגז הטבעי ואת הרגולציה הנדרשת לשימוש במאגרים לכשיאזלו לאחסון מימן לצורך אגירה עונתית.



10. **חשמול התחבורה הפרטית, הציבורית והמסחרית:** תחבורה חשמלית הינה היעילה ביותר בשימוש באנרגיה ומהווה מרכיב משמעותי בהפחתת הפליטות במשק. התועלות מחשמול התחבורה רלוונטיות במיוחד לישראל, בה טווחי הנסיעה קצרים יחסית, והרגלי הנסיעה תואמים את יתרונות הרכב החשמלי. למרות שחלק מהתחבורה היבשתית, ובפרט משאיות כבדות, לא יוכל לעבור להנעה חשמלית, יש לפעול לחשמול התחבורה ככל הניתן.



11. **קביעת מדיניות להפעלת המשק לאורך זמן במהלך פגיעה ביכולת אספקת האנרגיה (גז טבעי, דלקים, חשמל):** כחלק מהיערכות משק האנרגיה לשעת חירום, יש לקבוע מדיניות כוללת להתמודדות עם פגיעה ארוכת טווח באחת או יותר מתשתיות האנרגיה המשמעותיות למשק.

12. **חיבוריות אזורית ובינלאומית של אנרגיה:** נראה כי בבל תרחיש עתידי נזדקק לייבוא של אנרגיה. מאחר שחתימת הסכמים וחוזי רכש בינלאומיים, כמו גם הקמת תשתיות ייבוא, אורכות שנים רבות, יש להתחיל ולפעול כבר כעת לקידום פרויקטים לייבוא אנרגיה לישראל במגוון דרכים (חשמל, מימן ירוק ודלקים נקיים). חיבור לרשתות שכנות יאפשר להגדיל את מקורות האנרגיה של ישראל, להשיא ערך גם בתחום האנרגיה וגם ואפריקה. לשם כך יש לגבש אסטרטגיה ותכנית פעולה, להמשיך ולקדם פרויקטי קישוריות בינלאומיים שכבר החלו, לבחון פרויקטים נוספים ולעקוב אחר ההתפתחויות והמגמות הגלובליות של שווקי האנרגיה.

13. **קידום מימן כמקור אנרגיה נקי:** מימוש ויישום מפת הדרכים לאסטרטגית המימן לישראל,[11] ובכלל זה השלמת הליכי התקינה הנדרשת וגיבוש רגולציה להקמת פיילוטים לשימוש במימן. בנוסף, יש לקדם עמקי חדשנות למימן על מנת שניתן יהיה לקבל החלטה על היקף השימוש במימן בארץ ועדכון הרגולציה בהתאם. כמו כן, ניתן לבחון כבר כעת את ההתאמות הנדרשות להסבת רשתות ההולכה והחלוקה של הגז הטבעי למימן, תוך מיפוי המשמעויות הנגזרות מכך.

14. **תפיסת והטמנת פד"ח:** על מנת לעמוד בשנת היעד, יש להשלים את סקר אפיון תת הקרקע בישראל לאיתור שטחים המתאימים להטמנת פד"ח והיקפם, הערכת הכמויות שניתן להטמין וקצב ההטמנה. כמו כן, יש לבצע בחינה של כלל ההיבטים הנדרשים להטמנת פד"ח, קידום טכנולוגיות לתפיסה והטמנה, ופיתוח תשתית רגולטורית מינימלית נדרשת.

15. על מנת שניתן יהיה לבחון שילוב **אנרגיה גרעינית** בתמהיל האנרגיה בישראל, יש צורך לפעול בהקדם האפשרי למתן מענה לסוגיות טכנולוגיות, רגולטוריות ומדיניות, וכפועל יוצא מכך בביצוע עבודת מטה בין-משרדית שתהווה קדם בחינת היתכנות להקמת תחנת כוח גרעינית בישראל.

[11] *אסטרטגיית מימן לישראל*, משרד האנרגיה והתשתיות 2023.

1. הקדמה

תפקיד משרד האנרגיה והתשתיות הוא להבטיח את אספקת האנרגיה לכל צורכי המדינה, לבצע זאת במחיר השווה לכל נפש ובאמצעים הנקיים ביותר – כל זאת, הן בשגרה, והן בעתות חירום. במטרה להשיג חזון זה, מוביל המשרד בשנים האחרונות אסטרטגיה לחיזוק וביסוס משק האנרגיה כאמין, זול ונקי.

בשנים האחרונות התרחשו מספר אירועים בעולם בהם נפגעה אספקת האנרגיה, או שמחיריה עלו בחדות באופן שפגע קשות בכלכלה. בין אירועים אלו ניתן למנות את משבר שרשראות האספקה לאחר מגפת הקורונה בשנים 2021-2022;[12] שילוב של תנאי מזג-אויר קיצוניים שכללו בצורת שפגעה ביכולת הפקת חשמל הידרו-אלקטרי בנורבגיה,[13] ארה"ב וסין,[14] טמפרטורות גבוהות שפגעו בתפוקת התחנות הגרעיניות בצרפת,[15] רוח נמוכה שפגעה בתפוקת טורבינות הרוח באנגליה[16] ובים הצפוני,[17] שריפות שפגעו בקווי הולכת החשמל,[18] גל קור בטקסס שפגע במערכת הפקת הגז הטבעי,[19] ולבסוף, המלחמה באוקראינה שבעקבותיה צומצמה אספקת הגז הטבעי לאירופה והשפיעה על אספקת האנרגיה ומחיריה בעולם כולו.[20] בעתיד בו משבר האקלים יחריף ניתן יהיה לראות מגמות מנוגדות, כאשר מחד מתגבר שיתוף הפעולה בין המדינות להתמודדות עם פגעי הטבע ולהפחתת הפליטות, ומאידך מחריף הקיטוב הבינלאומי בין הגוש המערבי לגוש המתהווה בציר רוסיה-סין.

נוסף על המשברים העולמיים, מלחמת חרבות ברזל ואירועי ה-7 באוקטובר המחישו את החשיבות של משק אנרגיה יציב, הן ברציפות האספקה והן במחיריו. על אף שהמלחמה הובילה לטלטלות בתחומים רבים, ולמרות האתגרים הרבים והאיומים המתמשכים על מדינת ישראל ועל משק האנרגיה, אספקת מוצרי האנרגיה המשיכה כמעט ללא הפרעות לאורך ימי המלחמה. זאת, בעיקר בשל היערכות מוקדמת ומוכנות למצב חירום. יש לוודא כי מוכנות זו נשמרת ומותאמת גם לאיומים עתידיים וגם להתפתחויות השונות במשק האנרגיה. יכולת מדינת ישראל להבטיח משק אנרגיה אמין, הן בשגרה והן בחירום, היא ליבת תפקידו של המשרד, והשימוש באנרגיות נקיות ומגוון טכנולוגיות יכול להוות חלק משמעותי מהפתרון לאספקת אנרגיה רציפה במדינת ישראל.

השפעותיו של משבר האקלים הולכות ומתעצמות ומחייבות נקיטת פעולות משמעותיות כדי להפחית את הנזקים הצפויים. על פי דוחות הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים (IPCC), התחממות כדור הארץ ביותר מ-1.5 מעלות תוביל להתגברות אירועי מזג אוויר קיצוניים; לעליית מפלס פני הים ולהצפות; לאירועי בצורת ארוכים; להכחדה של צמחים ובעלי חיים ולפגיעה חסרת תקדים במערכות האקולוגיות בכדור הארץ.[21] יש לציין כי ישראל, בשל מיקומה במזרח התיכון, צפויה להיות מושפעת מאירועים אלו יותר מהממוצע העולמי.

במטרה להתמודד עם משבר האקלים מדינות רבות התחייבו בעשור האחרון להפחתת פליטות גזי החממה עד כדי איפוס פחמני (Net-zero). בין מדינות אלו ניתן למנות את גרמניה, שוודיה ופורטוגל שהתחייבו להגיע לאיפוס בשנת 2045 ומדינות רבות נוספות כדוגמת צרפת, אוסטריה, בריטניה, קנדה, אירלנד אשר עיגנו בחוק את התחייבויותיהם לאיפוס בשנת 2050.[22] ישראל, בדומה למדינות אלו, שואפת לאיפוס פחמני עד לשנת 2050. שאיפה זו נובעת

[12] *Energy price developments in and out of the COVID-19 pandemic*, European Central Bank Economic Bulletin, 4/2022.

[13] *Water shortage threatens critical hydroelectric power supplies in Northern Europe*, Independent 4/10/2021.

[14] *Hydropower: How droughts are affecting the world's biggest renewable energy source*, World Economic Forum, 28/11/2023.

[15] *EDF cuts output at nuclear power plants as French rivers get too warm*, The Guardian, 3/8/2022.

[16] *UK power prices hit record high amid cold snap and lack of wind power*, The Guardian 11/12/2022.

[17] *Energy Prices in Europe Hit Records After Wind Stops Blowing*, The Wall Street Journal 13/9/2021.

[18] *Bushfire and Climate Change Risks to Electricity Transmission Networks*, Engineering for Extremes, 17/12/2021.

[19] Texas natural gas production dropped during recent cold front, reviving concerns about electric grid, The Texas Tribune, 5/1/2022.

[20] *The impact of the war in Ukraine on euro area energy markets*, European Central Bank, 4/2022.

[21] *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*, the Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report, Summary for Policymakers. Retrieved: July 10, 2022.

[22] https://eciu.net/netzerotracker

מהמגמות העולמיות, והואצה בין היתר על רקע מלחמת "חרבות ברזל" ואירועי ה-7.10, אשר המחישו את הצורך והיתרונות במשק אנרגיה מבוזר ומגוון. כמו כן, יכולותיה הגבוהות של ישראל בתחומי המו"פ והחדשנות מחזקות מגמות אלה ומשפרות את הסיכויים של ישראל לעמוד ביעדים אלה. יש לציין כי אמצעים להפחתת פליטות של גזי חממה ברוב המקרים גם מפחיתים פליטות של מזהמים אחרים, ובכך יש תועלת נוספת לבריאות ולסביבה.

כבר בשנת 2021 פרסם המשרד מפת דרכים להפחתת 85% מהפליטות במשק האנרגיה עד 2050, ויעד זה אף עוגן בהחלטת ממשלה.[23] לאחר פרסום עבודה זו, הוחלט לקדם לאיפוס פחמני בשנת 2050. יעד האיפוס הפחמני מופיע בנוסח חוק האקלים שעבר בקריאה ראשונה בכנסת ביוני 2021.[24] עבודה זו מגבשת מתווה שיאפשר את העמקת יעדי הפחתת הפליטות כך שמשק האנרגיה יגיע לאיפוס פחמני עד לשנת 2050, וזאת תוך זיהוי המשמעויות וההשלכות.[25]

המגמות העולמיות, בשילוב הרגישויות הביטחוניות והמאפיינים הייחודיים של ישראל, מובילים למסקנה כי בבדי לשמור על אספקת אנרגיה מובטחת ומחירים יציבים יש לגוון את מקורות האנרגיה ולאפשר גיבוי הדדי בטכנולוגיות שונות בבדי לאפשר להיחלץ מאירועי קיצון שישפיעו על מקור אנרגיה כלשהו או על שרשראות האספקה. גיוון זה יסייע לישראל בהתמודדות הן עם משברים בטחונים והן עם איומים אקלימיים.

בעבודה זו יבחנו הטכנולוגיות שיאפשרו הפחתה משמעותית של פליטות גזי החממה ממגזר האנרגיה בישראל עד כדי איפוס הפליטות נטו בשנת 2050, תוך גיוון מקורות האנרגיה במטרה להבטיח אספקה רציפה ובמחירים שווים לכל נפש.

בפרקים הבאים נבחן את המגמות העולמיות בנושא ואת האפשרויות העומדות בפני ישראל על רקע עבודת "מפת הדרכים למשק דל פליטות בשנת 2050", שפרסם משרד האנרגיה והתשתיות בשנת 2021, ואשר שימשה נקודת המוצא לעבודה זו, ובהתחשב במאפייניה הייחודיים של ישראל.

2. סקירה בין-לאומית

בפרק זה נסקור את המגמות העולמיות להפחתת פליטות, היעדים שמדינות שונות הציבו לעצמן ופעולות של ארגונים בינלאומיים לעמידה ביעדים אלה.

על פי מסקנות הפאנל הבין-ממשלתי לשינויי אקלים של האו"ם (IPCC), בבדי למנוע את הידרדרות האקלים הגלובלי למצב שלא יאפשר תנאי מחייה נאותים וכלכלות יציבות, יש להפחית את פליטות גזי החממה ב-45% עד לשנת 2030 ביחס לשנת 2010, ולהגיע לאיפוס נטו[26] של הפליטות עד לשנת 2050.[27] בהתאם לכך מדינות רבות התחייבו להשגת איפוס נטו של הפליטות עד לשנת 2050. על פי הארגון "יחידת המודיעין לאנרגיה ואקלים",[28] נכון לפברואר 2024, נמנו 41 מדינות בהן נקבע בחוק יעד איפוס פליטות, ביניהן רוב מדינות אירופה, ארה"ב, אנגליה ואוסטרליה, ועוד 52 מדינות בהן היעד פורסם במסמכי מדיניות, ביניהן סין, הודו, רוסיה וברזיל. בסה"כ כ-88% מפליטות הפד"ח העולמיות מכוסות בהתחייבות כלשהי לאיפוס. נכון ל-2021, כשלושה-רבעים מסך הפליטות העולמיות מקורן במשק האנרגיה

[23] מדינת ישראל הציבה לעצמה יעדים בהחלטת ממשלה 171 מה-25 ביולי 2021. במסגרת החלטה זו קבעה הממשלה כי תפחית את פליטת גזי החממה ב-27% עד שנת 2030 וב-85% עד שנת 2050 ביחס לשנת 2015 - אז סך הפליטות בישראל נאמד בכ-79 $MtCO_2e$ (מיליון טון שווה ערך לפחמן דו-חמצני). יעדים אלו התבססו בין השאר על עבודה מקצועית שנערכה במשרד האנרגיה והתשתיות אשר התוותה את מפת הדרכים להפחתה של 85% בפליטות גזי החממה במשק החשמל עד שנת 2050 וכן לשיפור שנתי של 1.3% במדד עצימות האנרגיה (צריכת האנרגיה ליחידת תוצר).

[24] *היסטוריה! חוק האקלים עבר היום בקריאה ראשונה בכנסת*, אתר המשרד להגנת הסביבה, מתאריך 26/6/2022.

[25] איפוס פחמני משמעותו "נטו-אפס". כלומר, פליטות מעשה ידי אדם שאותן יש להפחית לאפס או לאזן באמצעים אחרים בעוד שמונחים כגון "ניטרליות פחמנית" כוללים איזון של כלל פליטות הפחמן במשק - כולל מבעלי חיים, שימושי קרקע ופסולת.

[26] הכוונה ב"איפוס נטו" היא כי יתכן ויוותרו מגזרים בהם תתקיימנה פליטות של גזי חממה, אך אלו יקוזזו באמצעות אמצעים שונים להסרת גזי חממה מהאטמוספרה כך שבחישוב הכולל "נטו" תהיינה אפס פליטות.

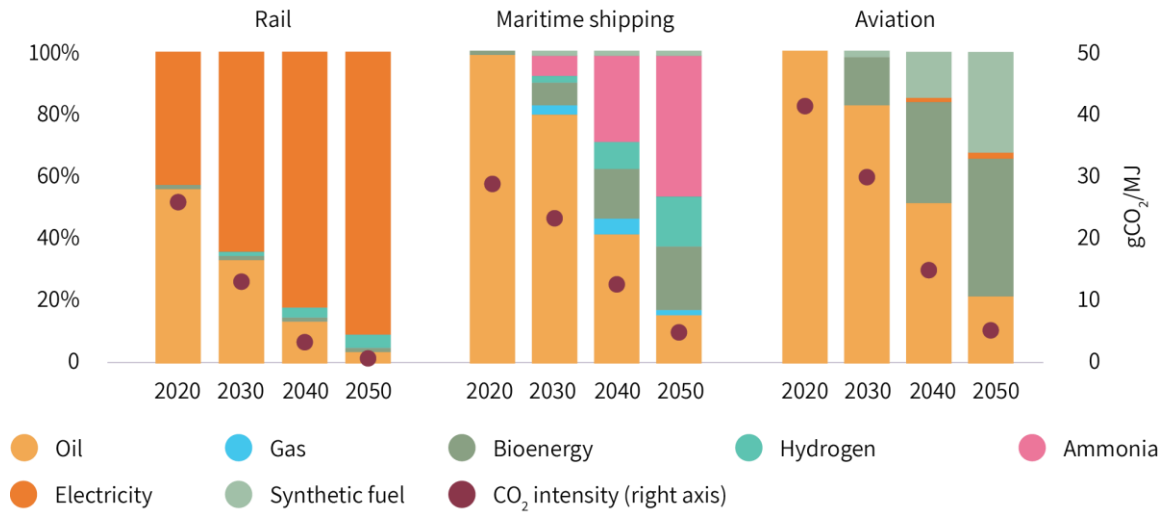
[27] ראו את הדוח IPCC Special Report on Global Warming of 1.5°C.

[28] https://eciu.net/netzerotracker and https://zerotracker.net/

ועל כן נדרשות תכניות פעולה לאיפוס פחמני של מגזר זה.[29] בעולם, תכניות לאיפוס פחמני מבוססות על מספר הנחות מרכזיות: גידול משמעותי בביקוש לחשמל, בעקבות חישמול מגזרים כגון תחבורה ותעשייה; התייעלות משמעותית באנרגיה; מעבר לייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים; שימוש באנרגיות נקיות נוספות להשגת האיפוס, דוגמת גרעין; ולבסוף רכיבי "פליטה שלילית" שמטרתם הסרת פחמן דו-חמצני (פד"ח) מהאטמוספירה עד להשגת איפוס נטו.

תחום התובלה מהווה אתגר משמעותי בדרך לאיפוס פחמני. כמויות האנרגיה הגדולות הנדרשות לשינוע אלפי טונות של סחורות מסביב לעולם מציבה קשיים טכניים רבים בניסיון לאפס את הפליטות. בחלק מהמגזרים ניתן יהיה להשתמש בחשמל ממקורות נקיים, בחלקם במימן נקי, אך בעיקר בתחומי התעופה והספנות, יהיה צורך להשתמש בדלקים מאופסי פליטות – דלקים ממקור ביולוגי, דלקים סינתטיים או אמוניה. להלן הערכות ה-IEA לתמהיל הדלקים בתרחיש האיפוס (Net Zero). ניתן לראות את השימוש הרב בדלקים ממקור ביולוגי וסינתטי, אך גם כי אף בשנת 2050 עדין צפוי שימוש מסוים בדלקים ממקור מחצבי.

תרשים 11: המתווה למעבר דלקים במגזרי הרכבות, הספנות והתעופה[30]



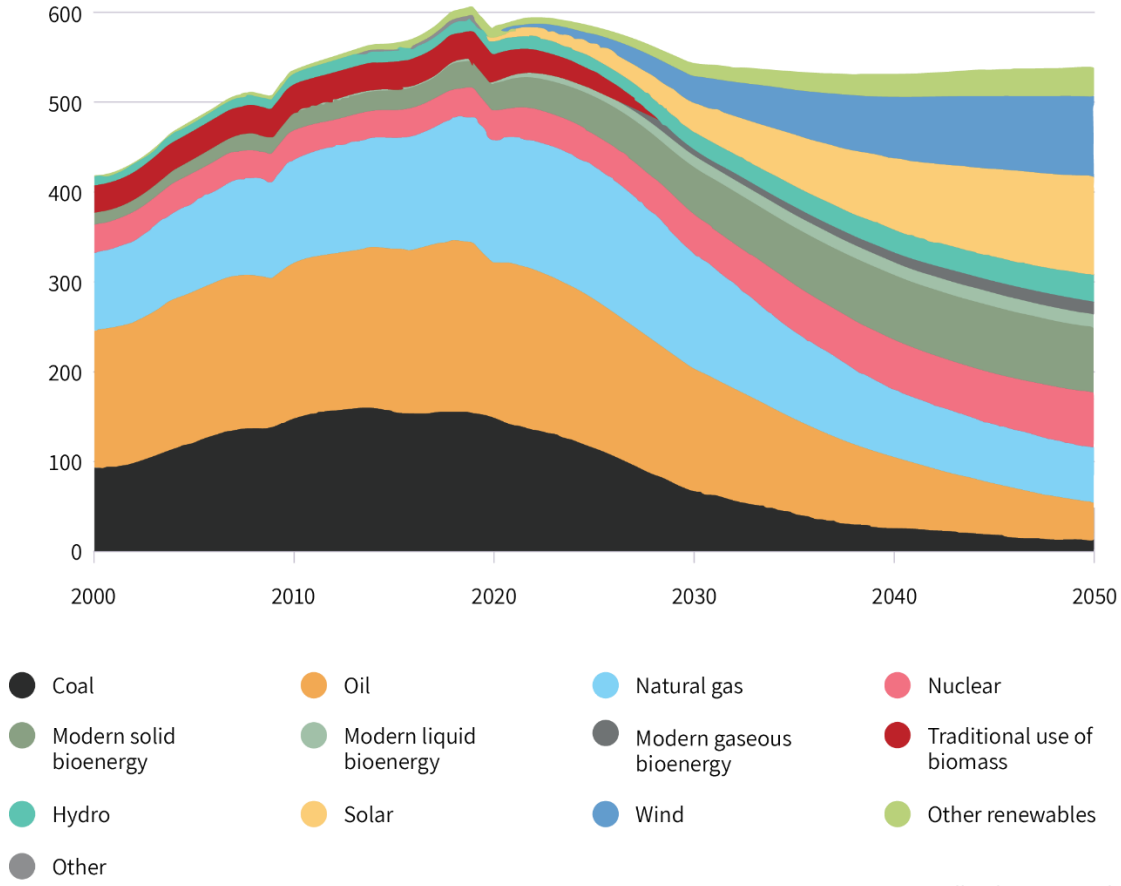
סוכנות האנרגיה הבינלאומית (IEA) הציגה תרחישי האיפוס (Net-Zero) לשנת 2050. הביקוש העולמי לאנרגיה בשנת 2050 אמנם קטן בכ-8% בעקבות התייעלות, אך משרת כלכלה גדולה פי שניים ואוכלוסייה אשר גדולה בכ-2 מיליארד איש נוספים. מסלולי ההפחתה בתחום האנרגיה מבוססים ברובם על אנרגיה מתחדשת: שני שלישים מכלל אספקת האנרגיה העולמית בשנת 2050 מקורם באנרגיה סולארית, רוח, אנרגיה גיאותרמית, ביו-אנרגיה ואנרגיית מים. מקורות אנרגיה אלה צפויים לספק כ-70% בעוד השאר יגיע ברובו מגרעין. במקביל, השימוש בדלקים מאובנים נופל מכמעט 80% מהביקוש לאנרגיה לכ-20% עד 2050, תוך שימוש בתפיסת פחמן, ומעבר לייצור דלקים דלי פחמן בדוגמת מימן. אם מתמקדים בייצור חשמל, עד 2050, כמעט 90% מהייצור צפוי להתבסס על מקורות מתחדשים, מתוכם, 70% אנרגיה סולארית ורוח.[31]

[29] *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, IEA. May 2021. Retrieved: July 10, 2022.

[30] Net Zero by 2050 - IEA

[31] *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, IEA. May 2021. pp. 9, Retrieved: July 10, 2022.

תרשים 12: תחזית ה-IEA לתמהיל מקורות האנרגיה הגלובלי בתרחיש איפוס הפליטות (NZE) [32]



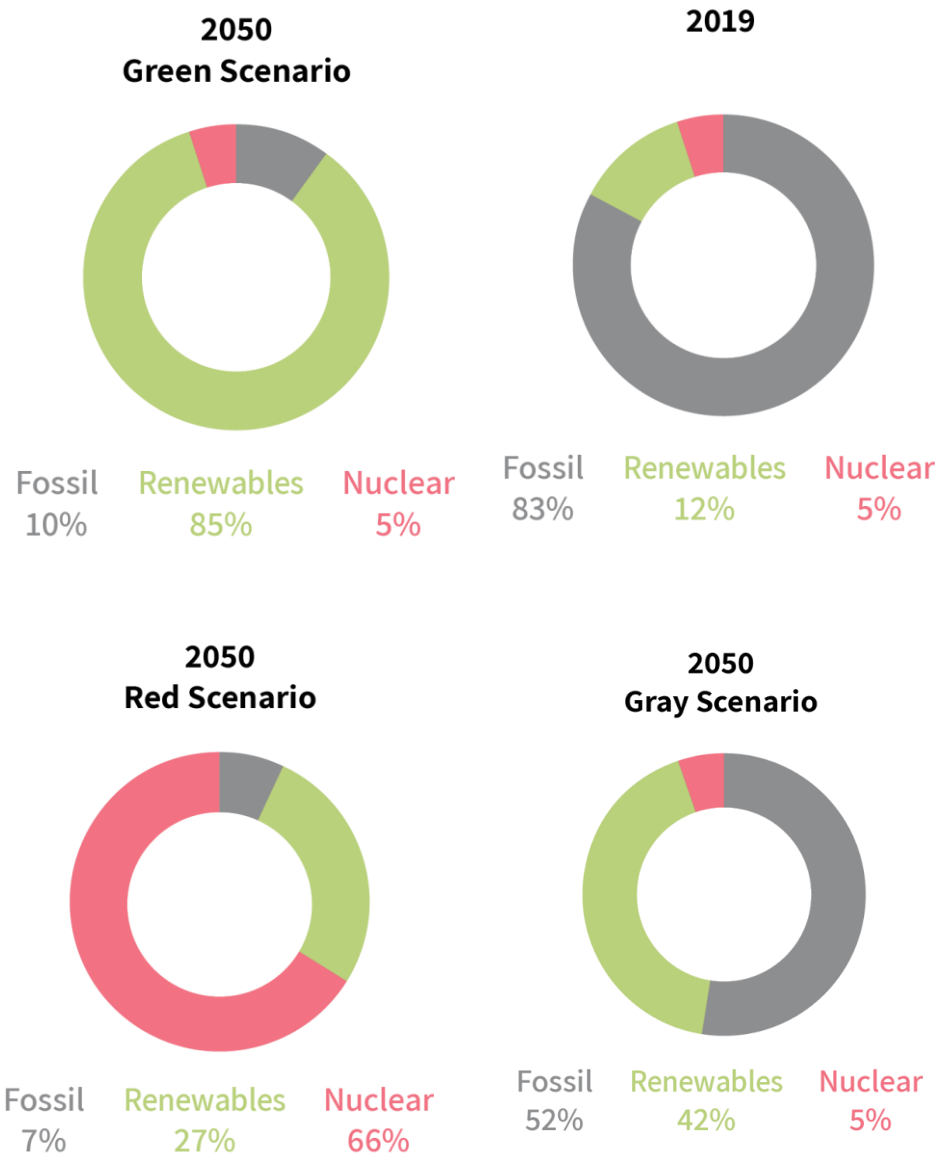
IEA. All rights reserved.

חברת הייעוץ הבינלאומית **בלומברג**, במסגרת סקירת האנרגיה שלה לשנת 2021,[33] מציגה מספר תרחישים לאיפוס פחמני: **התרחיש הירוק**, אשר מתעדף חשמל נקי ומימן ירוק. בתרחיש זה אנרגיות מתחדשות מהוות 85% מהתמהיל (אנרגיות רוח ושמש צפויות להגיע ל-70% מתוך המתחדשות, השאר מימן וביו-מסה), 10% דלקי מאובנים ותפיסת פחמן ו-5% גרעין. **התרחיש האדום**, אשר מצביע על גרעין כמקור המרכזי לאנרגיה ראשונית אשר תעמוד על 66% בשנת 2050, לעומת 5% כיום. שאר האנרגיה הראשונית בתרחיש האדום מגיעה מאנרגיות מתחדשות (27%) ומדלקים מאובנים ותפיסת פחמן (7%). **התרחיש האפור**, אשר מציג שימוש נרחב בתפיסה, אחסון ושימוש של פחמן אשר משמעותו היא המשך שימוש בדלקי מאובנים אשר צפויים להוות כ-52% מאספקת האנרגיה הראשונית ב-2050. בתרחיש זה אנרגיות מתחדשות מספקות כ-42% וגרעין נותר 5%. בשלושת התרחישים השימוש בחשמל כאנרגיה סופית צפוי לעלות לפחות לכ-50% בשנת 2050, בעוד שבתרחיש הירוק חלקו של החשמל אף גדול יותר בעיקר בשל הצורך להשקיע אנרגיה חשמלית להפקת מימן ירוק. להלן תרשים שמציג את התרחישים.

[32] *Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector*, IEA. May 2021. pp. 57, Retrieved: July 10, 2022.

[33] *The New Energy Outlook 2021*, BloombergNEF, Retrieved: July 17, 2022.

תרשים 13: פילוח מקורות האנרגיה בעולם בשנת 2050 בשלושה תרחישים עיקריים[34]



שלושת התרחישים לשנת 2050 שנבחנו: תרחיש "ירוק" מבוסס אנרגיה מתחדשת, "אפור" מבוסס דלקים פוסיליים עם תפיסת פחמן, ו"אדום" מבוסס חשמל ממקור גרעיני.

לאור הצורך התכוף להפחתת פליטות מדינות רבות בעולם הבינו ומבינות תכניות לאומיות למעבר לכלכלה מאופסת פחמן. עם זאת, מרבית המדינות שהתחייבו לאיפוס טרם הצהירו על תמהיל האנרגיה הצפוי ב-2050. נכון למרץ 2024, IPAC זיהתה 110 מדינות שאימצו יעדי אפס פליטות אשר אחראיות על 85% מסך פליטות גז החממה בעולם.[35]

אחד התהליכים השאפתניים ביותר להשגת איפוס פליטות הוכרז על ידי האיחוד האירופי בתוכנית **Fit for 55:**[36] תכנית האיחוד האירופי להאצת הפחתת פליטות גזי החממה באירופה ליעד של 55% בשנת 2030 ולהשגת איפוס מלא בשנת 2050. התוכנית כוללת הרחבה של שוק הפחמן האירופי תוך הגדלת מחיר הפחמן, האצת המעבר לאנרגיות מתחדשות, והגדלת היעילות באנרגיה. בבדי לתמוך בתהליכים הללו האיחוד האירופי התחייב להשקיע

[34] The New Energy Outlook 2021, BloombergNEF

[35] נתוני OECD.

[36] https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55/

בטריליון אירו בהרחבת השימוש באנרגיות מתחדשות, בעידוד השימוש בתחבורה ציבורית וברכב חשמלי, בשיפור היעילות האנרגטית של מבנים ובעידוד המעבר של התעשייה למקורות אנרגיה נקיים.

בעקבות משבר האנרגיה העולמי שנגרם כתוצאה מהעימות בין רוסיה לאוקראינה וצמצום אספקת הגז הטבעי מרוסיה, עדכן האיחוד האירופי את התוכנית ופרש את מתווה **REPowerEU**[37] שקרא להאיץ את תהליך המעבר למקורות אנרגיה נקיים ולהפסיק את התלות ביבוא דלקים פוסיליים עד שנת 2030. במסגרת התכנית הוחלט על מספר כיוונים: **ייצור אנרגיה נקייה** על-ידי העלאת היעד של אספקת חשמל ממתחדשות ל-42.5% (בשאיפה ל-45%), **גיוון מקורות האנרגיה** על-ידי פיתוח מסופי LNG במקביל ליצירת שותפויות אסטרטגיות ליבוא מימן ירוק (כיום, מיובא בצנרות אלו גז טבעי), **וחיסכון באנרגיה** על-ידי צמצום השימוש בגז טבעי וחלוקה פנימית בתוך אירופה בין מדינות לפי צרכים.

במקביל לכך, ממשל ביידן בארה"ב פרסם את **Inflation Reduction Act**[38] – חקיקה אמריקאית שתחת הכותרת של הפחתת האינפלציה בארה"ב מעבירה כספים רבים לתמיכה בפיתוח אנרגיות מתחדשות ומימן במטרה להפחית את פליטת גזי החממה. צעדים אלו צפויים להפחית את פליטות הפחמן דו-חמצני בכ-40% עד 2030, זאת על-ידי חוקים ייעודים בתחומים שונים. בין היתר, סעיפי חוק לצרכני האנרגיה הביתיים – כגון מענקים לרכישת כלי רכב נטולי פליטות, הקמת פאנלים סולאריים ועוד; סעיפי חוק לביטחון אנרגיה ותמיכה בייצור ותעשייה מקומיים – כגון זיכויי מס, תמריצים והשקעות בטכנולוגיות לייצור אנרגיה ירוקה, עידוד מחקרים לפיתוח אנרגיה ירוקה ועוד; סעיפי חוק להפחתת פליטות – כגון מענקים למעבר לייצור חשמל נקי, תכנית להפחתת פליטות מתאן ועוד; סעיפי חוק לשינויי אקלים – תמיכה בהפחתת זיהום בנמלים, משאיות, פליטות סולר ועוד.

לצד תכניות מורכבות אלו, ישנן מדינות שקבעו יעדים ופרשו תכניות. למשל, תכנית "נטו-אפס" הלאומית של בריטניה מציגה שלושה תרחישים אפשריים:

1. **חשמול נרחב (High Electrification):** תרחיש זה מציג יותר מהכפלה בייצור החשמל בבריטניה וייצור נרחב של מימן ירוק. במסלול זה פליטות מתחבורה, מבנים ותעשייה מגיעות לכמעט אפס באמצעות חשמול נרחב. הפליטות מייצור החשמל מופחתות באמצעות פריסה נרחבת של מקורות אנרגיה מתחדשים לצד ייצור אנרגיה דלת פחמן אחרת כדוגמת אנרגיה גרעינית וגז טבעי עם תפיסה, שימוש והטמנת פחמן (CCUS).
2. **משאבים נרחבים (High Resource):** מסלול זה שם דגש על שימוש נרחב במימן דל פחמן, במיוחד עבור מגזרי התעשייה והתחבורה הכבדים והפחתת פליטות במגזר המבנים. מסלול זה גם מניח רמות גבוהות יותר של נטיעת עצים אשר מגדילות את "הפליטות השליליות". השוני מהמסלול הראשון הוא בעיקר ביקוש נמוך יותר לחשמל.
3. **חדשנות גבוהה (High Innovation):** מסלול זה שם דגש על חידושים טכנולוגיים מוצלחים אשר מאפשרים להגיע לפליטות נמוכות במגזר התעופה ובאמצעות טכנולוגיות תפיסת פחמן. הזמינות של דלקים בני קיימא וטכנולוגיות תפיסת פחמן בקנה מידה גדול גורמים לסטייה מתרחישים 1 ו-2 בפריסת טכנולוגיות מסוימות ומגדילים את הפוטנציאל לשימוש בדלקים מאופסי פליטות בתחבורה, מבנים, חקלאות ובתעשייה.[39]

יודגש כי שלושת התרחישים כוללים התייחסות לטכנולוגיות נוספות מעבר לאנרגיות מתחדשות לטובת השגת האיפוס. נכון לעכשיו בריטניה מתעתדת לגייס בין 150 - 270 מיליארד ליש"ט בהשקעות פרטיות וציבוריות לטובת מעבר למשק חשמל מאופס פליטות. כך למשל, הוחלט להשקיע במתקן גרעיני לייצור חשמל בקנה מידה גדול עד סוף הכהונה ולהשיק קרן חדשה של 120 מיליון ליש"ט להיערכות להטמעה של טכנולוגיות גרעיניות עתידיות, כולל כורים מודולריים קטנים.[40]

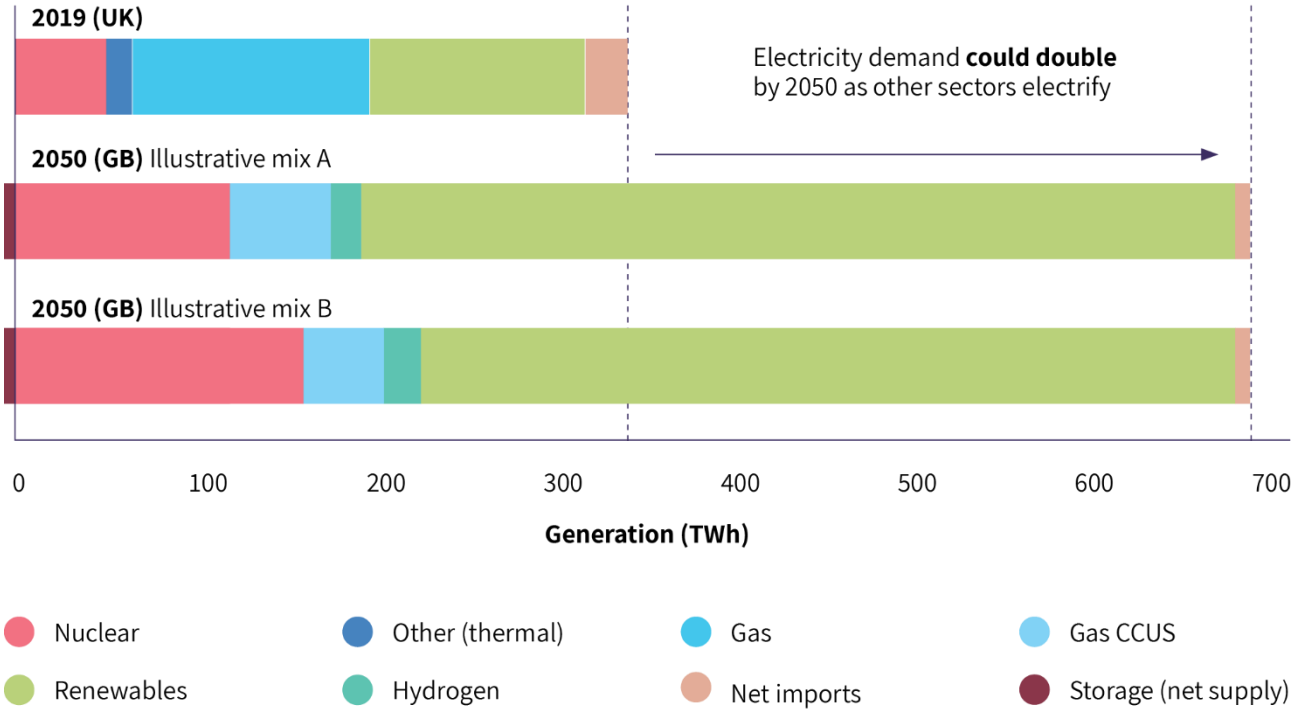
[37] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_22_3131

[38] https://www.whitehouse.gov/cleanenergy/inflation-reduction-act-guidebook/

[39] Net Zero Strategy: Build Back Greener. BEIS, October 2021, pp. 66 - 77. Retrieved: July 13, 2022.

[40] שם, ע' 8.

תרשים 14: תמהיל מקורות החשמל בבריטניה, כיום ובשני תרחישים בשנת 2050[41]

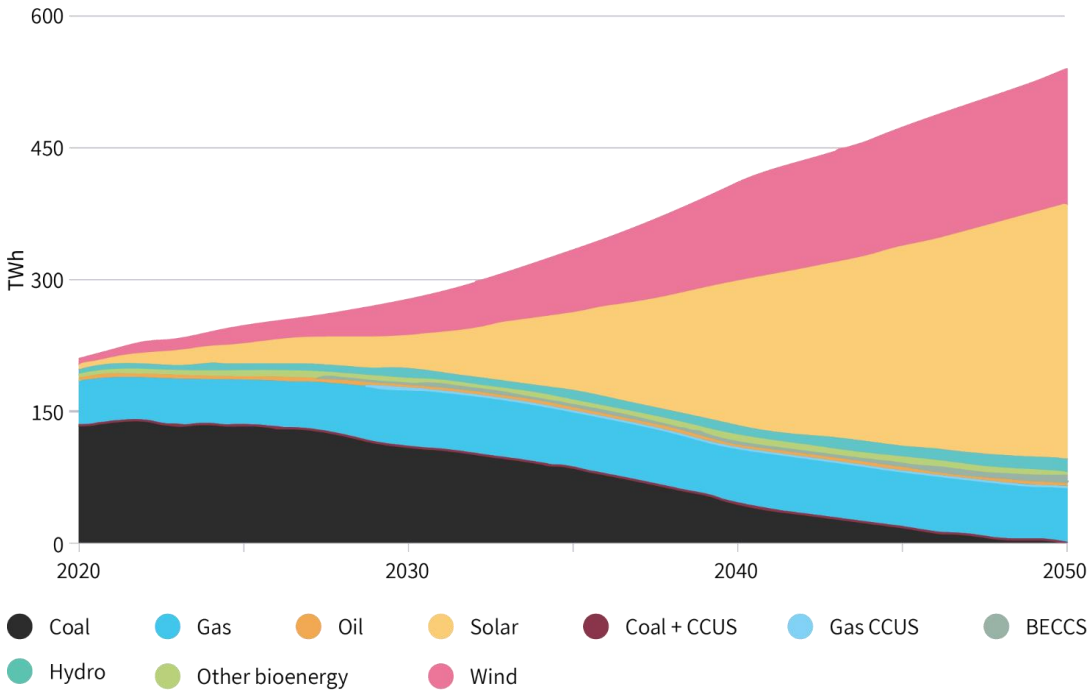


דוגמה נוספת היא **תכנית הפחתת הפליטות של אוסטרליה**[42] – גם אוסטרליה לא מתחייבת לתמהיל אנרגיה אחד לשנת 2050 אך במודלים של תכנית הפחתת הפליטות, מוצג תמהיל אפשרי לייצור החשמל בשנת 2050. על פי ההערכות, ייצור החשמל צפוי להיות בערך פי 2.6 מרמות הייצור של שנת 2020, כאשר אנרגיות מתחדשות יהוו כ-80% מהייצור.

[41] שם.

[42] Australia's Long-Term Emissions Reductions Plan, Australian government 2021, pp. 37.

תרשים 15: תמהיל החשמל הצפוי באוסטרליה עד לשנת 2050[43]



גם **מדינת קליפורניה**[44] הצהירה על איפוס פחמני של משק החשמל עד שנת 2045 והציבה יעד ביניים של 60% מקורות מאופסי פחמן עד לשנת 2030. ניתוח ראשוני של מקורות האנרגיה הנדרשים למעבר לחשמל דל פחמן העלה כי מבחינה טכנולוגית ניתן להגיע לאיפוס באמצעות מספר מסלולים, וכי הגיוון במקורות האנרגיה והטכנולוגיות מוריד את העלויות הכוללות. עוד עולה בניתוח כי שמירה על אספקה של גז טבעי עשויה למזער עלויות תוך הבטחת אספקת חשמל ללא הפרעה במהלך המעבר ל-100 אחוז אנרגיה נקייה. להלן תחזית למקורות האנרגיה בקליפורניה ב-2050, בדגש על מתחדשות ואגירת אנרגיה.

[43] שם.

[44] SB 100 Joint Agency Report Summary Achieving 100% Clean Electricity in California, 2021.

תרשים 16: מקורות אנרגיה נקיים לייצור חשמל במדינת קליפורניה[45]

	Existing Resources	Projected New Resources	
	2019*	2030**	2045**
Solar (Utility-Scale)	12.5 GW	16.9 GW	69.4 GW
Solar (Customer)	8.0 GW	12.5 GW	28.2 GW
Storage (Battery)	0.2 GW	9.5 GW	48.8 GW
Storage (Long Duration)	3.7 GW	0.9 GW	4.0 GW
Wind (Onshore)	6.0 GW	8.2 GW	12.6 GW
Wind (Offshore)	0 GW	0 GW	10.0 GW
Geothermal	2.7 GW	0 GW	0.1 GW
Biomass	1.3 GW	0 GW	0 GW
Hydrogen Fuel Cells	0 GW	0 GW	0 GW
Hydro (Large)	12.3 GW	N/A	N/A
Hydro (Small)	1.8 GW	N/A	N/A
Nuclear	2.4 GW	N/A	N/A

[45] שם

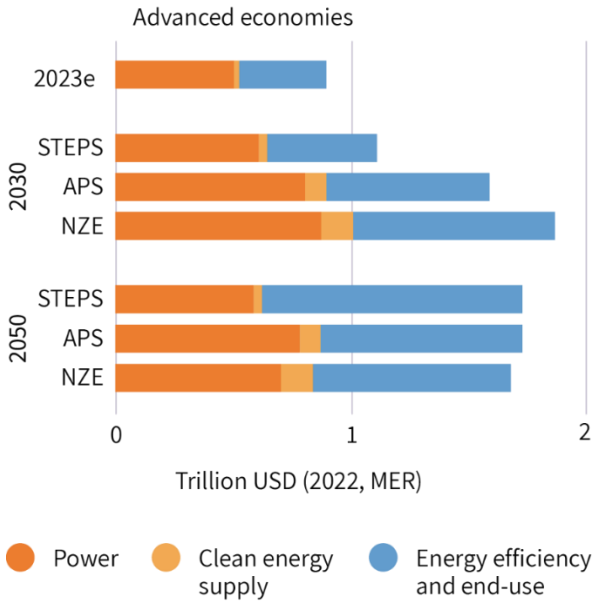
יש לציין שיש מדינות (רובן באירופה) הנהנות ממגוון מקורות אנרגיה מתחדשים ולכן נמצאות כבר היום באחוזי גבוהים יחסית של אנרגיה מתחדשת ועל-כן המעבר לאיפוס פחמני בשנת 2050 פשוט יחסית. בנוסף, ברוב המדינות המפותחות האוכלוסייה יציבה או אף מצטמצמת, והביקוש הבסיסי לאנרגיה יציב, וזאת בשונה מישראל בה האוכלוסייה הגדלה מחייבת להגדיל את הפקת האנרגיה באופן קבוע.

2.1. השקעות במו"פ וחדשנות לאיפוס פליטות

מהסקירה הבינלאומית ניתן לראות שמדינות רבות הצהירו על יעדי איפוס, הציגו תכניות ארוכות טווח ואף עיגנו הצהרות אלו בחקיקה או החלטות ממשלה. המתווים להשגת יעד האיפוס משתנים ממדינה למדינה בהתאם למאפיינים הייחודיים ומקורות האנרגיה והשימושים בכל מדינה, כמו גם בתחזיות של אירגוני האנרגיה המשמעותיים. עקב השינויים המהירים בשוק האנרגיה ואי הוודאות הגבוהה בנוגע לביצועים ולמחיר של הטכנולוגיות השונות בשנת 2050, תכניות רבות מתבססות על מספר תרחישים עתידיים בעוד אחרות לא מתחייבות לתמהיל מוגדר. עוד עולה כי כמעט בכל העבודות שנסקרו כשני שליש מתמהיל מקורות האנרגיה ב-2050 יהיה ממקורות מתחדשים, תוך ניסיון לגוון את המקורות להבטחת האספקה.

התגובות והמגמות העולמיות, הן בעקבות המשבר בשנים 2008-2009, והן לאחר משבר הקורונה, הדגישו את חשיבות ההשקעות בתשתיות בכלל, ובאנרגיה בפרט, ליכולת העולמית והלאומית ליציאה ממשברים. בהתאם ל-IEA,[46] השקעה במשק האנרגיה, ובפרט במשק האנרגיות הנקיות, יכולה להגביר את הצמיחה הכלכלית, לייצר מאות ואף אלפי מקומות עבודה חדשים, ולעמוד ביעדים ארוכי טווח שמדינות העולם, וביניהן ישראל, הציבו לעצמן. אי היציבות בשוק הדלקים הפוסילים, בנוסף למגמות עולמיות ושינויים בסביבה המוניטרית, מובילה מדינות שכלכלתן מבוססת על יצוא דלקים פוסילים לגוון את מקורות ההכנסה שלהן ולעבור לאנרגיות נקיות ובטוחות,[47] ובכך להצליח לצאת מהמשברים השונים.

תרשים 17: סיכום ההשקעות הגלובליות בתחומי האנרגיה הנקיה בפילוח לפי מגזרים[48]



בתרשים מוצגות ההשקעות שידרשו בפילוח לפי תחומים – חשמל, אספקת אנרגיה נקיה והתייעלות באנרגיה, בשנים 2030 ו-2050, בשלושת התרחישים. **ניכרת ההשקעה הגבוהה הצפויה על-ידי ה-IEA בתחום ההתייעלות באנרגיה** – כמחצית מההשקעות בכל שנה ובכל תרחיש. כמו כן, ניתן לראות כי ה-IEA חוזים, עבור תרחיש איפוס הפליטות (NZE) השקעה גבוהה מאד עד לשנת 2030, אך לקראת 2050 ירידה בהשקעות, וזאת בשונה מהצפוי עבור תרחיש

[46] Sustainable Recovery, IEA, June 2020.

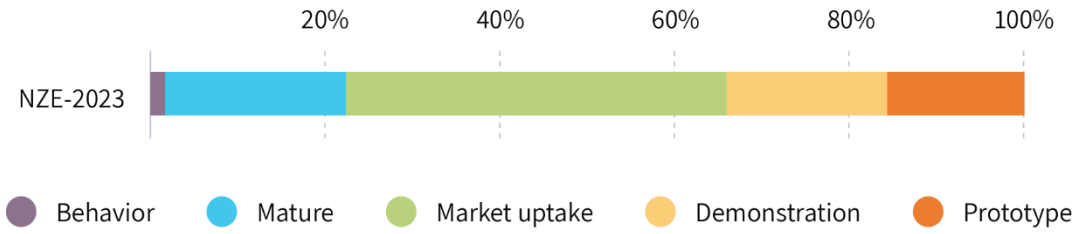
[47] RepowerEU, Europe Commission plan in a response to energy crisis, Russia invasion of Ukraine.

[48] IEA

STEPS (עמידה במדיניות הנוכחית) ו-APS (עמידה ביעדים המוצהרים של המדינות), המראים עליה מתמדת בהשקעות.

דוח בחסות ה-OECD וה-IEA [49] ניתח את תכניות האיפוס הלאומיות של מדינות שונות ומצא כי יש חוסר אחידות באופן שבו הן מגדירות את המטרה הסופית ("איפוס-נטו", "ניטרליות פחמנית", "ניטרליות אקלימית" ועוד) ובעיקר, חוסר אחידות באמצעים לעמידה ביעדים. רוב המדינות ב-OECD שואפות להשיג אפס נטו עד 2050, אם כי למדינות מסוימות יש יעדים מוקדמים יותר (למשל אוסטריה, פינלנד, איסלנד, המלדיביים) או מאוחרים יותר (למשל ברזיל, סין, אינדונזיה). מדינות בודדות אף אימצו התחייבויות לשמירה על האיפוס, בשנים שלאחר 2050 (למשל פינלנד, איסלנד, גרמניה, שוודיה. כמו גם האיחוד האירופי). **מדינות רבות משאירות חלק נכבד מהאיפוס לטכנולוגיות עתידיות ואינן מפרטות כיצד הן מתכננות לעמוד ביעדים שהציבו לעצמן. כלומר, לצד ההצהרות ותכניות עקרוניות, מעטות המדינות אשר הכינו מתווה מדויק הכולל אמצעי מדיניות מפורטים.**[50, 51]

תרשים 18: הטכנולוגיות שידרשו לאיפוס פליטות עד לשנת 2050 לפי רמת מוכנות[52]



בניתוח השקעות שנערך על ידי ה-IEA,[53] נמצא כי ההשקעות העולמיות בתחומי האנרגיה הנקייה עולות בקצב מהיר, ובכדי לעמוד ביעדים הגלובליים לשנת 2030 יהיה להכפיל ואף יותר את קצב ההשקעות. זהו שוק פוטנציאלי ענק שלישראל יש מספר מאפיינים המציבים אותה במקום מצוין לפיתוח פתרונות עבורו, ככל שהיא תגדיל את ההשקעות, הן הממשלתיות והן הפרטיות, במו"פ בתחומי האנרגיה הנקייה.

לישראל יתרון משמעותי בתחומי המו"פ והחדשנות ביחס למדינות העולם, בדו"ח השנתי "מצב ההיי-טק 2023", ניתן לראות שההאב הישראלי הוא השלישי בעולם בכמות הסטארטאפים שפעילים בו.[54] כמו כן שיעור הסטרטאפים בתחום האנרג'יטק בישראל גבוה מאוד, ועומד על כ-4.3% מכמות הסטרטאפים הפעילים בישראל (בהשוואה ל-2.1% בעולם).[55] אקוסיסטם מוביל בתחום המחקר, הפיתוח והחדשנות חיוני לצורך הטמעה יעילה של טכנולוגיות וגיבוש של מדיניות מתקדמת שתתאים למאפייני המשק המקומיים (לרבות מאפייניו הטכנולוגיים, הכלכליים, הדמוגרפיים, הפוליטיים והרגולטוריים הייחודיים). בתחום החדשנות והמו"פ באנרגיה, מגבלותיה הפיזיות והגיאופוליטיות של ישראל מיטשטשות, וכך ישראל יכולה לנצל את יכולותיה הגבוהות בתחום, להיות מוקד ידע ולהביא בשורות וטכנולוגיות חדשניות שישפיעו על העולם כולו. ככל שישראל תשכיל לפתח פריצות דרך טכנולוגיות בתחומי האנרגיה והאקלים, ההשפעה תצא מגבולות המדינה ותוכל להגביר את ההשפעה הגלובלית על משבר האקלים. הביקוש לטכנולוגיות אלו אדיר, והוא הולך וגדל, כך שלהצלחות בתחום יהיו השלכות כלכליות חיוביות על המשק הישראלי, והשלכות סביבתיות על העולם כולו.

[49] *Understanding countries' net-zero emissions targets*, OECD/IEA Climate Change Expert Group Papers. October 27, 2021. Retrieved: July 11, 2022.

[50] שם.

[51] *The Energy White Paper: Powering our Net Zero Future*, December 2020, pp. 44. Retrieved: July 11, 2022

[52] *Net Zero Roadmap, 2023 Update*, IEA 2023.

[53] *World Energy Investment 2023*, IEA.

[54] מתוך דו"ח רשות החדשנות לשנת 2023 ע"מ 37

[55] על פי נתוני Startup nation Central בישראל, נכון לאוגוסט 2024, פעילים מעל 300 סטרטאפים בתחום האנרג'יטק מסך כולל של 7200 סטרטאפים בישראל. שיעור הסטרטאפים בתחום האנרג'יטק יחסית לכלל הסטרטאפים בעולם הן על פי Energy Start-up Data Explorer, IEA

טכנולוגיות בתחום האנרגיה סובלות מקושי רב בגיוס מימון מהשוק הפרטי לצורך פיתוחן והבשלתן, וזאת בשל ההון הרב הדרוש להשקעה בטכנולוגיות אלו כבר בשלבים הראשוניים (תחומי עתירי תשתיות וחומרה) וזמני ההחזר הארוכים להשקעה. כמו כן, שוק האנרגיה נחשב שמרני יחסית ודורש עדויות רבות לביצועי הטכנולוגיות בקנה מידה מסחרי.[56] חברות טכנולוגיה מתקשות למצוא שדות ניסוי מתאימים ולגייס הלוואות נדרשות להתחלת פעילות בקנה מידה תעשייתי. לצורך צליחת אתגרים אלו, חברות בתחום נדרשות לתמיכה ממשלתית משמעותית, בערוצים מגוונים (לרבות מענקים, הלוואות, עמקי נסיינות) לאורך כל שלבי המוצר – מחקר, פיתוח, הדגמה וסקיילאפ. ההשקעה הממשלתית הממוצעת ב-OECD גבוהה פי 5 מההשקעות הממשלתיות בתחום האנרגיה בישראל.

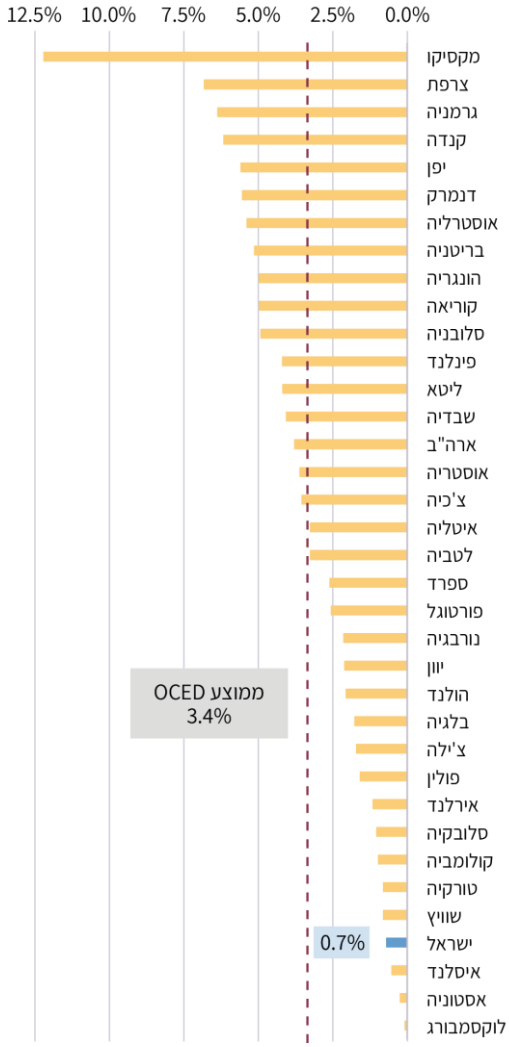
השקעה ממשלתית במו"פ ובסטרטאפים בתחומי האנרגיה מאפשרת למדינה לכוון את הפיתוח לכיוונים המתאימים לצרכים הייחודיים של מדינת ישראל. כך, למשל, פיתוח פתרונות להפקת אנרגיה ממט"שים, ניהול ממשק הקרינה במערכות אגרו-וולטאיות, התקנת קולטים סולאריים על קירות מבנים (BIPV), ועוד, יוכלו לסייע בהקמת חברות מצליחות בקנה מידה עולמי, אך גם יסייעו בפתרון הבעיות המאפיינות את משק האנרגיה בישראל.

בשנים האחרונות מדינת ישראל חוותה טלטלות רבות – החל ממשבר הקורונה, דרך השפעות מלחמת רוסיה-אוקראינה, ועד מלחמת חרבות ברזל. ההשקעות בפרויקטים בתחומי האנרגיה סייעו בעבר לישראל להתאושש מהמשברים, ואף לצמוח מהם, וגם במציאות הנוכחית סביר כי השקעה בתשתיות תומכות צמיחה, ובפרט תשתיות אנרגיה ירוקות, יסיעו לישראל להיחלץ מהמשברים, הנוכחיים ועתידיים.

בהמשך עבודה זו, נבחן את תמהיל מקורות האנרגיה בישראל, כמו גם את המאפיינים הייחודיים של המשק הישראלי בכלל ומשק האנרגיה הישראלי בפרט, ונציע מתווה שיאפשר לאפס את פליטות גזי החממה ממשק האנרגיה כולו עד לשנת 2050.

[56] "ישראל 2050 | הסרת חסמים לקידום חדשנות אקלים בישראל", 2023, המכון הישראלי לדמוקרטיה.

תרשים 19: ההשקעה הממשלתית במו"פ בתחומי האנרגיה מתוך סך השקעות הממשלה על מו"פ בישראל מול מדינות מובילות מה-OECD[57]



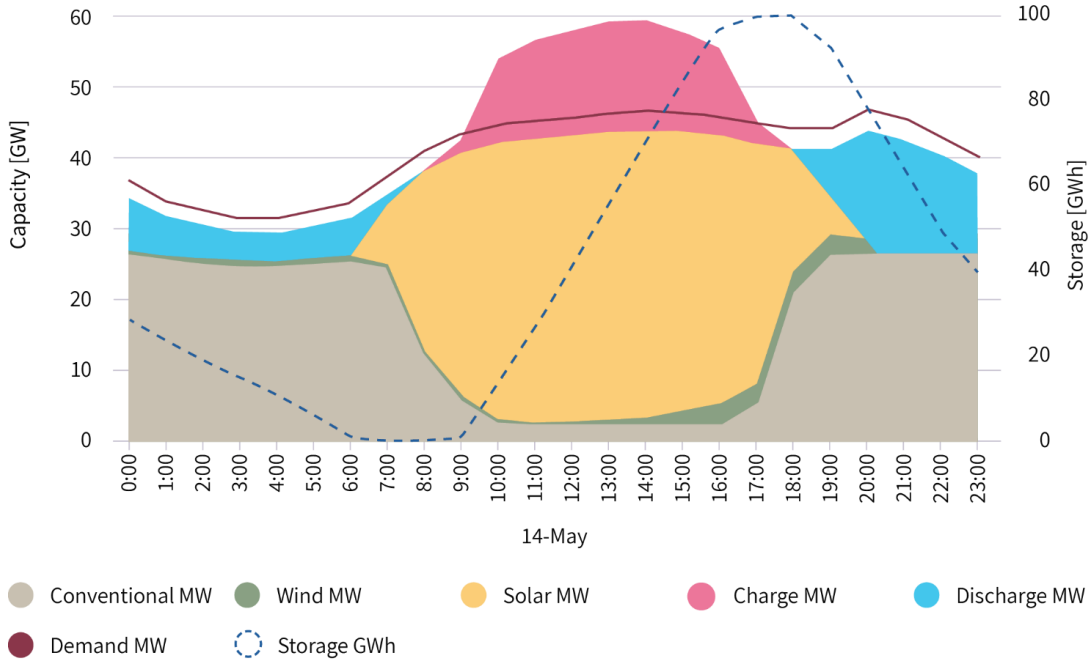
[57] עיבוד משרד האנרגיה לנתוני ה-OECD מתוך ה-OECD Data Explorer: https://data-explorer.oecd.org

2.2. מפת הדרכים למשק דל פליטות בשנת 2050

באפריל 2021 פרסם משרד האנרגיה והתשתיות את מפת הדרכים למשק דל פחמן. העבודה דנה באפשרויות להמשך מגמת הפחתת הפליטות **ממשק החשמל** בלבד, לאחר שנת 2030, וכללה מודל טכנו כלכלי ייחודי.[58] העבודה שימשה כנקודת המוצא והבסיס ממנה יצאנו לעבודה זו, על מנת להעמיק את היעדים, ומתוך כך גם את הבחינה.

המודל שבבסיס העבודה בחן את היחסים בין ההספק הנדרש ממקורות מתחדשים (שמש ורוח), וכמויות האגירה וההספק הקונבנציונלי (טורבינות גז) שידרשו כדי לספק את הביקוש לחשמל עד לשנת 2050 בחדירה משמעותית של אנרגיה מתחדשת לבין תמהיל הדלקים. הסוגיה הראשונה שנבדקה הינה הצורך באגירה לשם התאמה בין שעות הייצור הסולארי לשעות הביקוש לחשמל, ובפרט בהתחשב בפער העונתי, כאשר מצד אחד בעונות המעבר קיים עודף ייצור סולארי, ומצד שני נוצר מחסור בחורף. סוגיה שניה שנבחנה היא ההספק הקונבנציונלי שנדרש להתקין לצורך אספקת האנרגיה הנדרשת, ובעיקר האם יידרש גיבוי מלא של המערך הסולארי באמצעות הספק קונבנציונלי לתקופות חורפיות של מספר ימים בלבד בהם העננות גבוהה.

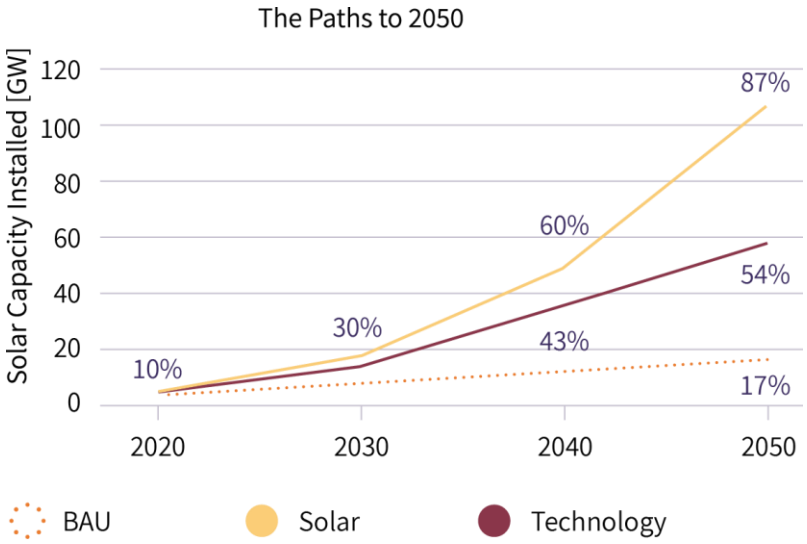
תרשים 20: דוגמא לסימולציה השעתית במשך יום אופייני, מפת הדרכים למשק אנרגיה דל פחמן, משרד האנרגיה והתשתיות 2021



על פי המודל נמצאו שני תרחישי קצה שיוכלו להביא את משק החשמל הישראלי, בהשקעות סבירות, להפחתה של 85% מפליטות גזי החממה ביחס לשנת 2015. התרחיש הראשון מתבסס על אנרגיות מתחדשות לצורך הפחתת הפליטות ודורש שילוב של 87% אנרגיה סולארית בתמהיל הדלקים לייצור חשמל. לשם כך יידרש שטח של כ-900,000 דונם למערכות סולאריות (הן למערכות קרקעיות והן למערכות בשימוש כפול בקרקע, כגון על גבי גגות, סככות, מאגרי מים וכד'), ומערכות אגירה בסך של כ-260,000 מגהואט-שעה (שגם להן דרישת שטח). מתוך הבנה כי מדובר בתרחיש שאפתני ביותר, הוצע תרחיש נוסף של 54% ייצור מאנרגיה מתחדשת, הדורש כ-500,000 דונם סולאריים ו-150,000 מגהואט-שעה אגירה, אך מסתמך על טכנולוגיות נוספות להפחתת פליטות שאינן בנמצא באופן מלא (כגון תפיסת פחמן, אנרגיה גרעינית או טכנולוגיות שטרם פותחו ואינן ידועות), להשגת הפחתה כוללת של 85% בפליטות.

[58] *מפת הדרכים למשק אנרגיה דל פחמן עד שנת 2050*, משרד האנרגיה והתשתיות, אוקטובר 2021.

תרשים 21: שני תרחישי הקיצון להשגת הפחתה של 85% בפליטות גזי החממה ממשק החשמל[59]



בגרף מתוארים ממצאי מודל האנרגיה, בצהוב התרחיש הסולארי, בחום התרחיש הטכנולוגי.

יש לציין כי עד כה (מחצית שנת 2024), הוקמו מערכות סולאריות על פני כ-50,000 דונם, הייצור באמצעות אנרגיות מתחדשות עומד על מעל 13% מסך ייצור החשמל, ומשק החשמל הפחית כ-7% בפליטות גזי החממה ביחס לשנת 2012.

מאז פרסום מפת הדרכים למשק דל פחמן, אירעו בעולם מספר אירועים שחידדו את הרגישות של משקי האנרגיה לתהליכים גלובליים, בין אם מדובר בתהליכים הקשורים לשרשראות האספקה הגלובליות, כפי שאירע לאחר היציאה במדינות העולם מסגרי הקורונה, בין אם מדובר בשינויי אקלים שגרמו לחורף קר במיוחד בשנת 2021 בצרוף רוח חלשה מהממוצע שהקשתה על אספקת האנרגיה באירופה, ועד לאירועים נקודתיים כמלחמת רוסיה-אוקראינה, המשפיעים על מחירי הסחורות והאנרגיה בעולם כולו.[60] המסקנות העיקריות מאירועים אלו הן כי יש לנוע מהר ככל האפשר למשק מבוסס אנרגיות מתחדשות ונקיות תוך התייעלות מקסימלית בשימוש באנרגיה, אך יש לגוון משמעותית את מקורות האנרגיה – כך למשל, קיים סיכון בהתבססות מלאה על אנרגיה סולארית בישראל. יש לבסס את משק האנרגיה על מספר מקורות נקיים, באופן שיאפשר גיבוי ותמיכה לשמירה על הרציפות התפקודית גם כאשר מקור אחד או אפילו שניים יפגעו. כמו כן הודגש כי יש להקדיש תשומת לב רבה לאופן ולקצב בהם מוציאים משימוש את התשתיות הפוסיליות משום שיש נטייה לתת-השקעה במגזר הפוסילי, וזו עלולה לגרום לפגיעה בחוסן של מגזר האנרגיה כולו.

כאמור, שני התרחישים שפורטו במפת הדרכים הגיעו ליעד הפחתה של 85% מפליטות גזי החממה ממגזר החשמל בשנת 2050. בכדי להשיג את יעד האיפוס המלא, העבודה הנוכחית מתבססת על מפת הדרכים ובוחנת את האמצעים הטכנולוגיים הנוספים שיאפשרו להפחית את ה-15% הנותרים של פליטות גזי החממה. בנוסף, העבודה הנוכחית מרחיבה את מסגרת הניתוח ממשק החשמל בלבד לכלל משק האנרגיה.

כמו כן, התרחיש הטכנולוגי במפת הדרכים לא התייחס בפירוט לטכנולוגיות הפוטנציאליות להפחתת פליטות. בשנים האחרונות נעשו בעולם קפיצות טכנולוגיות ובן התפתחויות בהתייחסויות של מדינות שונות בעולם לאיפוס פליטות. כך למשל היו התפתחויות משמעותיות בתחומי האגירה, הן בסוללות והן בטכנולוגיות מקבילות, בהפקה ובשימוש במימן, בטכנולוגיות גרעין, הן לביקוע והן להיתוך, ובהסרת פד"ח. עבודה זו מעמיקה את הבחינה ביחס לטכנולוגיות המרכזיות הקיימות כיום, בשלותן היחסית, הערכת עלויות, ומפרטת את הצעדים שיש לבצע כבר כיום בכדי שניתן יהיה להגיע לשימוש בקנה מידה רחב בישראל עד לאיפוס מלא של הפליטות.

[59] מפת הדרכים למשק אנרגיה דל פחמן, משרד האנרגיה והתשתיות 2021.

[60] ראו למשל את הניתוח בפרק 4 של IEA World Energy Outlook 2022, כמו כן, ראו את תוכנית RepowerEU.

הצורך בבחינה של מקורות אנרגיה שונים, וכן הצורך להגיע לאחוזים גבוהים של מקורות אנרגיה מתחדשים בתמהיל, מחייבים בחינה מושכלת באמצעות מודל משולב. השילוב של מספר מקורות אנרגיה נקיים, עם המאפיינים הייחודיים של כל מקור, וכן השימוש בכמויות מאד גדולות של אנרגיה סולארית, עלולים לגרום להשלכות בלתי צפויות, למשל צורך באגירה עונתית להתמודדות עם המחסור באנרגיה הסולארית בחורף, או פיתוח הרשת שיידרש לקבלת האנרגיה הסולארית, הספקי האלקטרולייזרים שידרשו לאספקת המימן או כמויות המים שידרשו לכך. בכדי להתמודד עם ההשפעות הצולבות הללו ולהבין את המשמעויות הנגזרות, פותח מודל אנרגיה שיאפשר לבחון את ההשפעות ההדדיות של הטכנולוגיות השונות. חשיבות המודל אינה בתחשיבים המדויקים של הביקוש, הייצור או ההספקים, אלא בהבנת יחסי הגומלין בין הטכנולוגיות השונות והמסקנות על הפעולות שיש לעשות כיום בכדי להבין את הקרקע להשגת יעד האיפוס עד לשנת 2050.

3. ישראל - מצב קיים ומדיניות נוכחית

בפרק זה נסקור את המצב הנוכחי של משק האנרגיה בישראל כמו גם את עיקר החלטות המדיניות שנוגעות לו. בנוסף, תתואר הייחודיות של המצב בישראל אל מול מדינות מפותחות אחרות בעולם ויפורטו העקרונות היסודיים לאורם נפתח ונבחן את המדיניות העתידית.

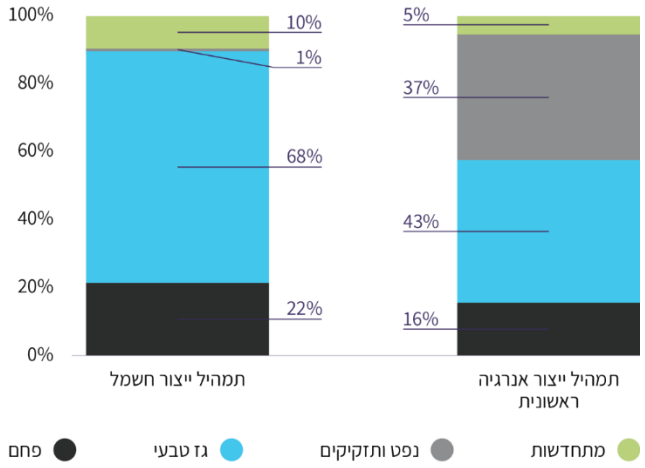
3.1. משק האנרגיה בישראל – תמונת מצב

בשנת 2022[61] תמהיל האנרגיה בישראל היה מורכב בעיקרו מגז טבעי, נפט ותזקיקים, כאשר החלק היחסי של אנרגיה מתחדשת נמצא במגמת עלייה ושיעור הפחם הולך ומצטמצם בהתאם למדיניות הממשלה.

משק החשמל היווה כ-40% מסך משק האנרגיה, כאשר שאר הצריכה כוללת גז טבעי ודלקים. במשק החשמל, הגז הטבעי היווה כ-60%, החלק היחסי של הפחם עמד על כ-22% ומקורות מתחדשים כ-10% (נכון ליוני 2024, חלקן של האנרגיות המתחדשות בתמהיל החשמל עמד על מעל 13%). על פי מדיניות הממשלה, השימוש בפחם יסתיים בשנת 2026 ועד לשנת 2030 המקורות המתחדשים יספקו 30% מהביקוש לחשמל.

נפט ותזקיקים משמשים בעיקר את משק התחבורה, כאשר לאחרונה החל מעבר לרכבים נטולי פליטות בדגש על רכב חשמלי. על פי מדיניות הממשלה, עד שנת 2030, כ-90% מהרכבים הפרטיים החדשים שיימכרו בישראל צריכים להיות נטולי פליטות, ומרביתם צפויים להיות חשמליים.[62]

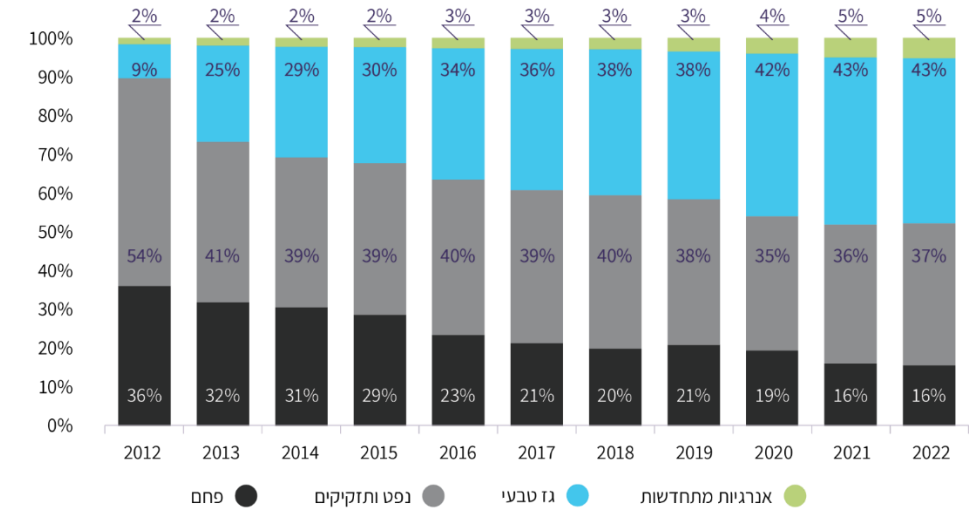
תרשים 22: תמהיל מקורות האנרגיה וייצור החשמל בישראל, 2022

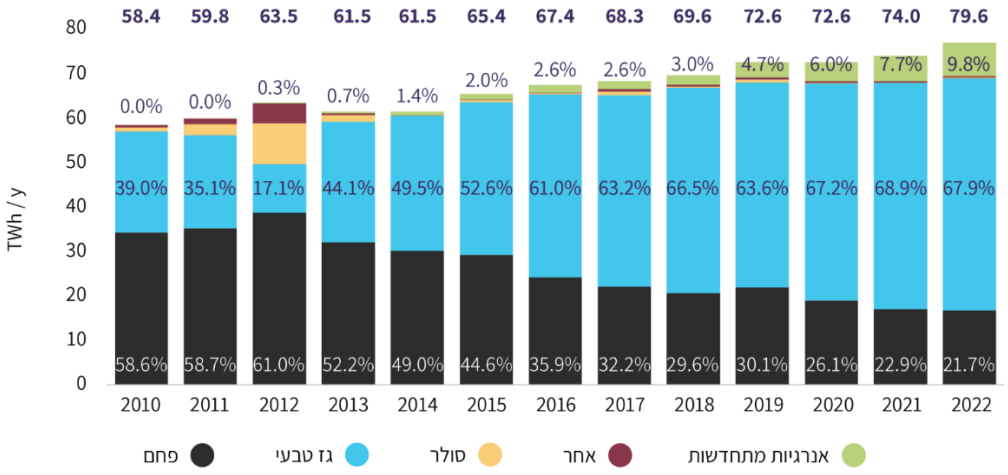


[61] תמהיל האנרגיה של שנת 2022 מבוסס על דוח "מצב משק האנרגיה 2022" שפורסם באפריל 2024

[62] המדיניות קוראת להפחתה של 95% בפליטות ביחס לשנת 2020, אך בהתייחס להפחתת הפליטות של רכבים היברידיים, ההערכה היא כי ידרשו כ-90% רכבים חשמליים להשגת יעדי הממשלה.

תרשים 23: מגמות בתמהילי האנרגיה (בגרף העליון) והחשמל (בגרף התחתון) בישראל בעשור האחרון[63]





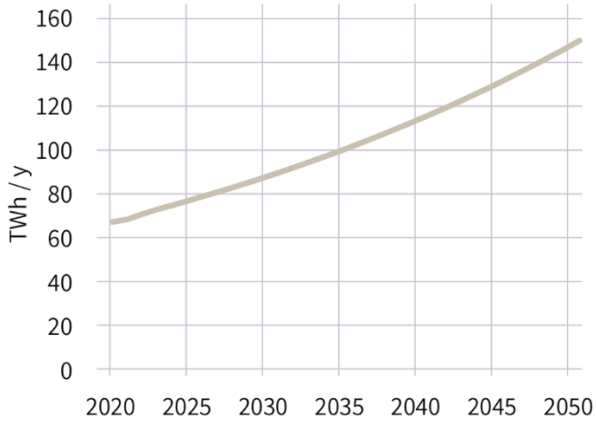
בעשור האחרון הביקוש **לחשמל** עלה בממוצע בכ-2.4% כל שנה, וכך גם ייצור החשמל (ראו תרשים 23 ב' לעיל). בעוד שהביקוש הכללי **לאנרגיה** עלה בממוצע בכ-1% בשנה בלבד (בשנת הקורונה הייתה ירידה בביקושים לאנרגיה אך לא לחשמל, בנטרול שנה זו הביקוש הממוצע לאנרגיה עלה בכ-1.5% בשנה). כלומר, לצד מגמת הגידול בביקוש הכולל לאנרגיה, בתוך משק האנרגיה קיימת מגמת חישמול, ובכך הביקוש לחשמל גדל באופן משמעותי מדי שנה.

3.1.1. מאפיינים ייחודיים למדינת ישראל

בפרק זה יפורטו העקרונות, האילוצים והמאפיינים הייחודיים של משק האנרגיה הישראלי. המעבר למשק אנרגיה מאופס פליטות בישראל הינו קשה במיוחד עקב מספר מאפיינים ייחודיים של המשק הישראלי. ממאפיינים ייחודיים אלה נגזר מרחב הפתרונות האפשרי להשגת איפוס הפליטות ממגזר האנרגיה.

[63] דוח מצב משק האנרגיה, משרד האנרגיה והתשתיות (2024).

תרשים 24: תחזית ביקוש לחשמל, ללא מעבר לרכב חשמלי[64]



להלן המאפיינים הייחודיים לישראל:

- **מחסור בשטח:** ישראל היא מהמדינות הצפופות בעולם, שטחי קרקע נדרשים לשימושים רבים ונמצאים במחסור תמידי, וכבר כעת ישנו קושי רב בקידום תשתיות אנרגיה ואיתור שטחים למתקני תשתית בכלל, ותשתיות אנרגיה בפרט. אי לכך, יש עדיפות לפתרונות שידרשו פחות שטחים, ושיעוררו ביקורת והתנגדות NIMBY מועטות ככל הניתן. בעבודות קודמות שניסו להעריך את פוטנציאל השטח להקמת מערכות סולאריות נמצאו פערים גדולים – בין 180,000 דונם בעבודת רשות החשמל[65] ועד ל-690,000 דונם בעבודת המשרד להגנת הסביבה.[66] בנוסף, יש לבחון שטחים פוטנציאלים נוספים, כדוגמת המרחב הימי.

- **צפיפות אוכלוסייה גבוהה וגידול טבעי גבוה:** ישראל מאופיינת בגידול אוכלוסייה מהגבוהים בעולם המערבי. בהתאם לתחזיות הצמיחה של הלמ"ס, האוכלוסייה בישראל צפויה להכפיל את עצמה עד לשנת 2065. נכון לשנת 2021, צפיפות האוכלוסייה בישראל היא 433 נפשות לקמ"ר, וממוקמת במקום הרביעי מבחינת צפיפות האוכלוסייה מתוך מדינות ה-OECD. לשם השוואה, בשווייץ המונה כ-8.7 מיליון תושבים צפיפות האוכלוסייה היא 220 לקמ"ר וצ'כיה המונה כ-10.5 מיליון תושבים צפיפות האוכלוסייה היא כ-136 לקמ"ר. מעבר לפער בצפיפות האוכלוסייה כיום, רוב האוכלוסייה בישראל מרוכזת במטרופולינים, כך שהצפיפות בישראל עתידה להחריף. לגידול האוכלוסייה בישראל שלוש השפעות מרכזיות המאתגרות את משק האנרגיה: ראשית, גידול האוכלוסיה מגדיל בהתאם גם את הביקוש לאנרגיה, גידול מהיר משמעותית מאשר במדינות מפותחות אחרות, בהן הגידול הדמוגרפי מתון יותר. כך בישראל עלינו לבצע מעבר למשק אנרגיה מאופס פליטות תוך התמודדות עם צמיחה מתמדת בביקוש. האתגר השני נובע מכך שהאוכלוסייה הגדלה דורשת תשתיות נוספות, וכך תשתיות האנרגיה 'מתחרות' במוסדות התכנון מול תשתיות קריטיות אחרות כמים, תחבורה, דיור, ועוד. תחרות זו מאריכה את הליכי התכנון ומקשה על הקמת התשתיות הנדרשות. שלישית, הצפיפות הגוברת מדגישה את סוגיות NIMBY (Not in My Back Yard – דהיינו, ההתנגדות להקמת תשתיות בקרבה לאוכלוסייה), ההתנגדויות גוברות ומחריפות וכך, הליכי התכנון מתארכים והופכים מאתגרים עוד יותר.

- **אי אנרגטי:** נכון להיום, ישראל היא "אי אנרגטי" מבחינת חיבורים בינלאומיים משמעותיים לתשתיות אנרגיה בכלל, וחשמל בפרט. תשתיות האנרגיה חוצות הגבולות הקיימות היום בישראל הן למצרים וירדן לצורכי ייצוא גז טבעי בלבד. בימים אלו מקודמות יוזמות שונות לחיבור ישראל למדינות שכנות ולאירופה ולמדינות נוספות, אך ישראל טרם התחברה פיזית לתשתיות אנרגיה אזוריות. חיבורים מסוג זה, כדוגמת כבל האינטרקונקטור לקפריסין ומשם לאירופה, יוכלו להגביר את הביטחון של משק האנרגיה בישראל בזמן מחסור וגם בשגרה כחלק מגיוון האספקה ושימוש באנרגיות נקיות. בנוסף, חיבורים למדינות נוספות יאפשרו גם למכור את עודפי הייצור ובכך לשפר גם את שתופי הפעולה הכלכליים עם מדינות שכנות ואחרות. לצד זאת, מדינת ישראל מתמודדת באופן

[64] נתוני נגה, חברת ניהול המערכת

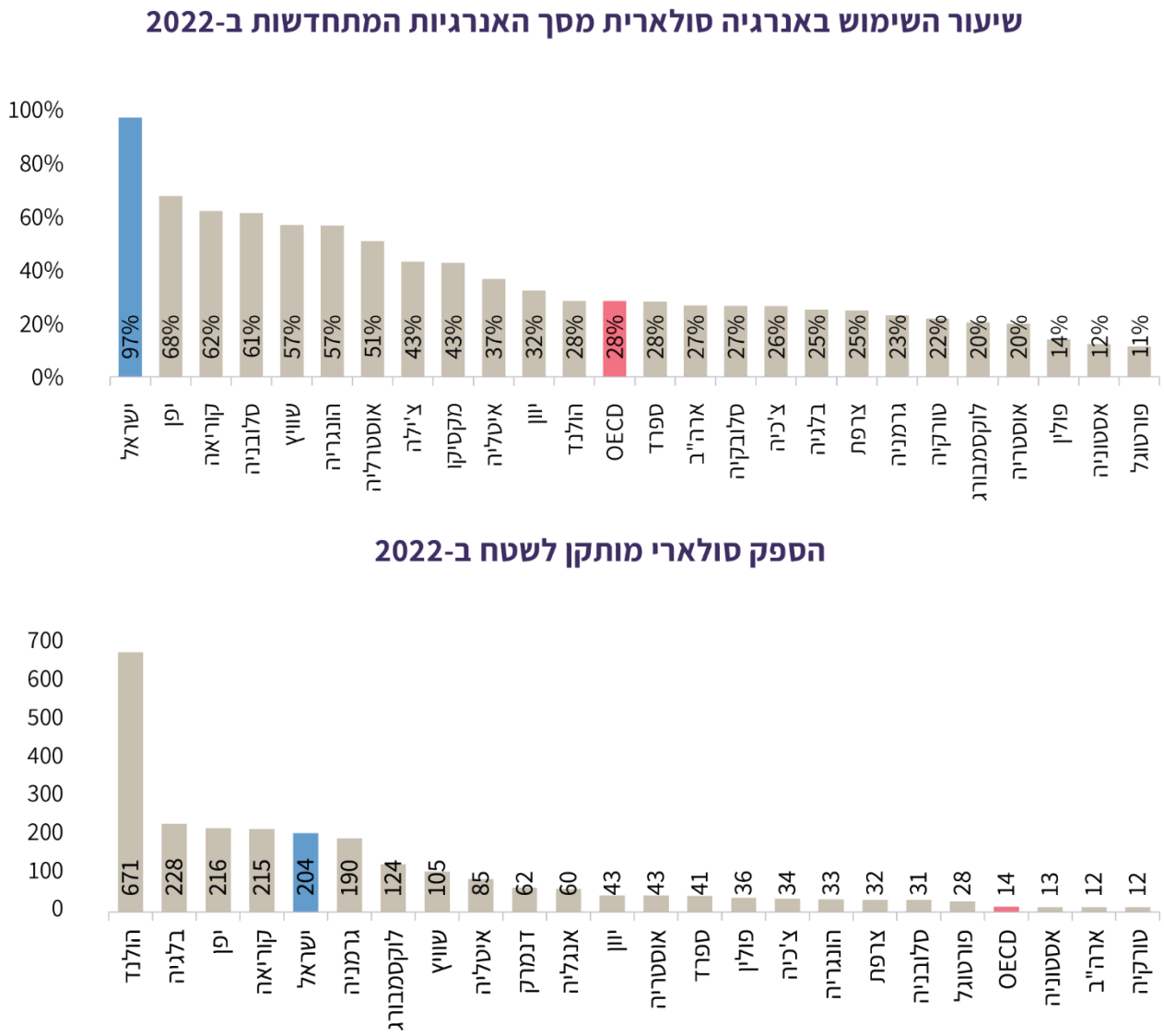
[65] הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030, רשות החשמל, 2020.

[66] הערכת פוטנציאל הייצור הסולארי במרחב הבנוי בישראל, המשרד להגנת הסביבה, 2020.

תדיר עם אתגרים ביטחוניים המשפיעים גם על הביטחון האנרגטי והיכולת להסתמך על מקורות אנרגיה חיצוניים. רק בשלוש השנים האחרונות חווינו שני אירועים ביטחוניים קשים – מבצע שומר החומות, מלחמת חרבות ברזל ואיומים נוספים. אירועים אלה חידדו את החשיבות של עצמאות באנרגיה ואת היכולת לספק את צורכי המשק מבלי להסתמך באופן משמעותי על גורמים חיצוניים.

- **אנרגית שמש משמעותית:** לישראל יש משאב משמעותי של אנרגית שמש (ראו תרשים 25 להלן), אך אפשרויות מוגבלות לייצור אנרגיה ממקורות מתחדשים אחרים. אמנם בישראל ישנן כ-1,700 שעות שמש אפקטיביות בשנה (כמעט פי שתיים מאשר באירופה), אולם שעות אלה מוגבלות לחלקים מסוימים בשעות היום, ולכן יעדי האנרגיות המתחדשות שמציבה לעצמה מדינת ישראל שאפתניים יותר ביחס למרבית המדינות האחרות בעולם. משכך, למרות מאפייני האקלים בישראל והיתרונות הכלכליים של ייצור אנרגיה סולארית, קיימת מורכבות רבה בהסתמכות על הספק משמעותי של אנרגיה מתחדשת ממקור אחד בלבד, ובפרט מקור שאינו זמין בכל שעות היום, תנודתי, ושיכולות האגירה שלו והשליטה בו, נכון להיום, מוגבלים. בנוסף, ייצור חשמל מאנרגיית שמש בהיקפים גדולים אף כרוך באתגרים רבים, בין היתר תכנוניים, סביבתיים, פיננסים וטכנולוגים.

תרשים 25: ההספק הסולארי ושיעור השימוש באנרגיה סולארית, ישראל ביחס למדינות ה-OECD[67]

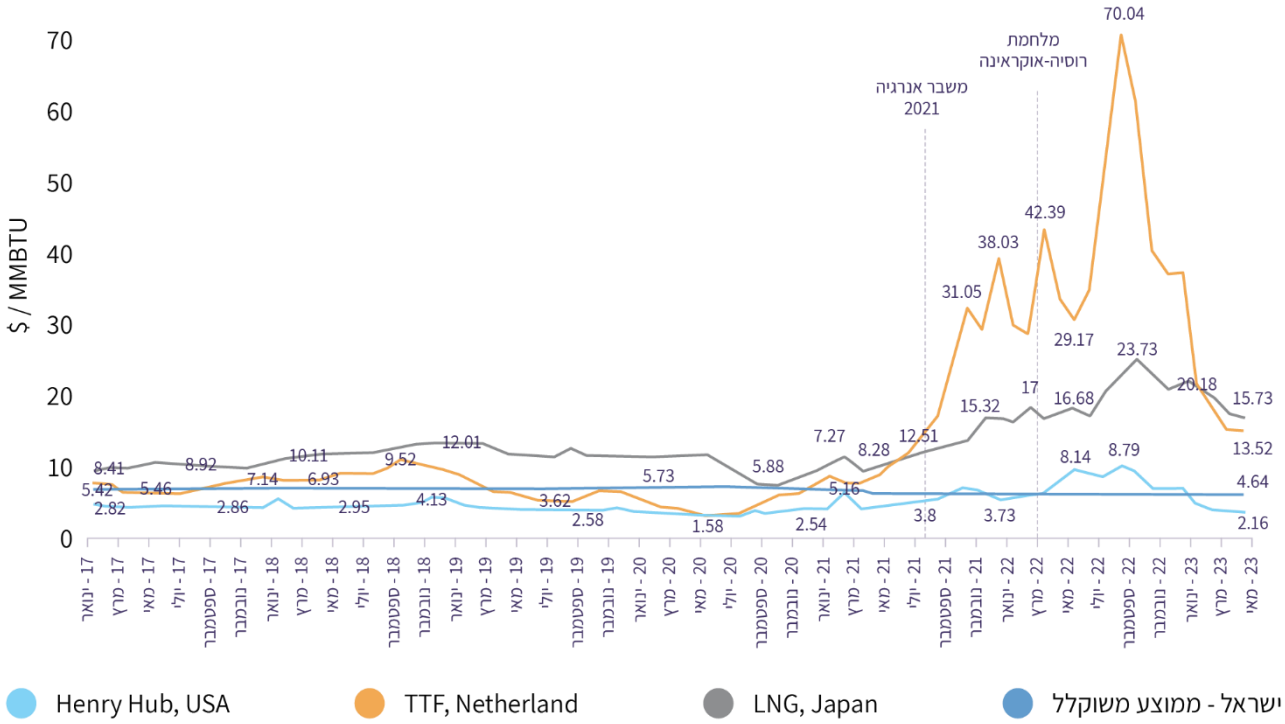


ניתן לראות כי ישראל היא המדינה היחידה בה כמעט כל האנרגיה המתחדשת מגיעה ממקור סולארי.

[67] דוח מצב משק האנרגיה, משרד האנרגיה והתשתיות (2024).

- **מאגרי גז טבעי משמעותיים:** לישראל מאגרי גז טבעי המאפשרים לה עצמאות באנרגיה ושמירה על יציבות מחירי הגז הטבעי. עתודות הגז הטבעי שאותרו בישראל מהוות היום אחוז גבוה מתמהיל הדלקים לייצור החשמל בישראל הן בשל היותן נקיות ביחס לאנרגיות הזמינות האחרות (פחם, סולר וכו'), והן בשל מחירן הזול והיציב ביחס לעולם, גם בתקופות של משברים עולמיים (דוגמת משבר הקורונה ומלחמת רוסיה-אוקראינה), וגם בשעת מלחמה, כמו חרבות ברזל. בתרשים 26 להלן ניתן לראות כי למרות ההשפעות הקיצוניות שהיו למשברי האנרגיה בשנת 2021, וביתר שאת למלחמת רוסיה-אוקראינה, על מחירי הגז הטבעי בעולם (אירופה, ארה"ב ואסיה), בישראל מחיר הגז הטבעי נותר יציב, ואף נמוך ביחס למדינות אחרות. עתודות הגז הטבעי בישראל, בשילוב הרגולציה הקיימת היום, מייצרות כדאיות לניצול מאגרים אלו תוך הפחתת פליטות גזי החממה. לצד זאת, מאחר שעתודות הגז הטבעי הן סופיות, בראייה ארוכת טווח יש להבטיח כי קיימת כמות מספקת של גז טבעי לכל צרכי המשק המקומי עד שימצא מקור אנרגיה חליפי. בנוסף, הפקת גז טבעי ושימוש בו אינם נקיים מפליטות, ולבן נדרשות פעולות משלימות, כדוגמת הקמת תשתיות לתפיסת והטמנת פד"ח.

תרשים 26: מחירי הגז הטבעי בעולם ובישראל והשפעת המשברים האחרונים עליהם[68]



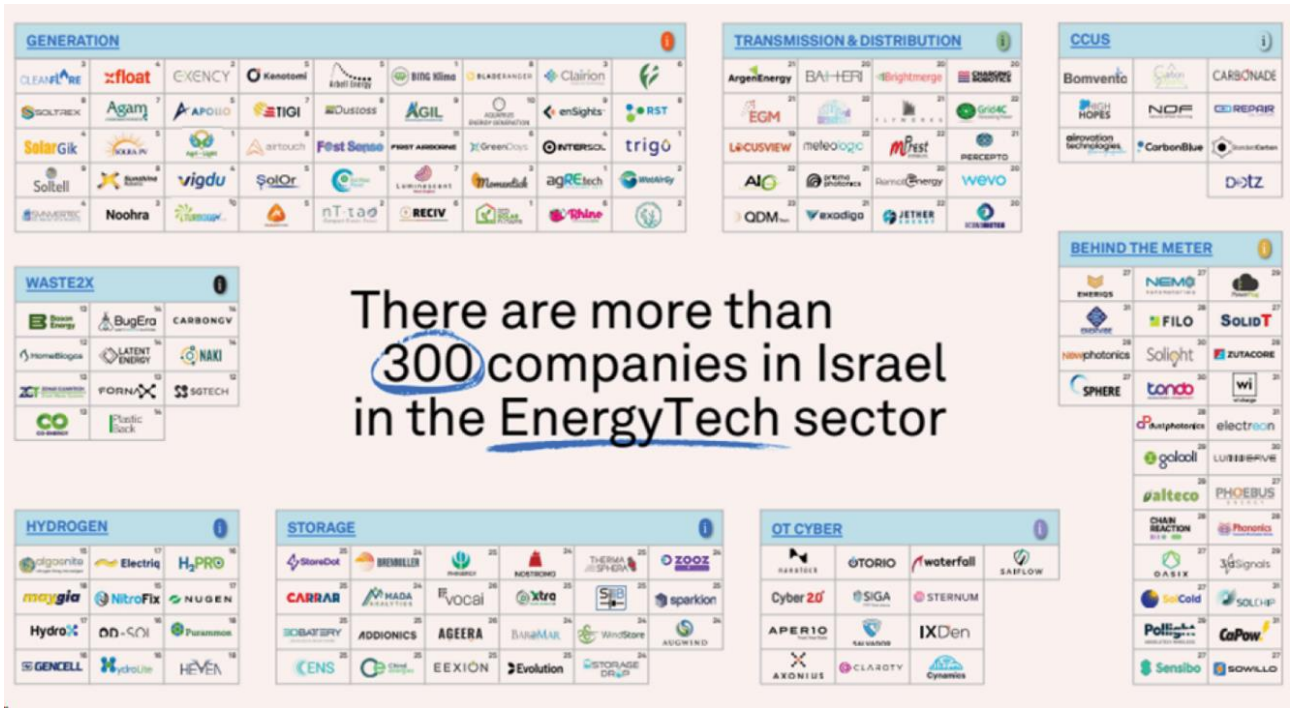
- **חדשנות:** ישראל מאופיינת ביכולותיה הטכנולוגיות הגבוהות והיותה "סטארט-אפ ניישן". על אף היקפי ההשקעות הגבוהים בטכנולוגיות ובמו"פ מהתמ"ג הישראלי,[69] ההשקעות בטכנולוגיות בתחום האנרגיה בישראל נמוכות באופן יחסי לעולם. כך למשל, ההשקעה הציבורית על מו"פ אנרגיה בישראל מהווה כ-0.004% מהתמ"ג – ערך נמוך משמעותית מהמקובל במדינות ה-OECD (0.022%). כמו כן, ההשקעה הפרטית בתחום מו"פ האנרגיה מהווה רק כ-0.7% מסך ההשקעות הפרטיות בתחום המו"פ (זאת לעומת 26.5% השקעה בתחומי התוכנה הארגונית ו-13.8% בתחומי הסייבר).[70]

לישראל יתרון משמעותי בתחומי המו"פ והחדשנות ביחס למדינות העולם, בדו"ח השנתי "מצב ההיי-טק 2023", ניתן לראות שההאב הישראלי הוא השלישי בעולם בכמות הסטארטאפים שפעילים בו.[71] כמו כן שיעור הסטרטאפים בתחום האנרג'יטק בישראל גבוה מאוד, ועומד על כ-4.3% מכמות הסטרטאפים הפעילים בישראל (בהשוואה ל-2.1%

[68] דוח מצב משק האנרגיה, משרד האנרגיה והתשתיות (2024).
[69] מתוך דו"ח רשות החדשנות לשנת 2022
[70] מתוך דו"ח מצב ההייטק של רשות החדשנות לשנת 2024, עמוד 58
[71] מתוך דו"ח רשות החדשנות לשנת 2023 ע"מ 37

בעולם).[72] אקוסיסטם מוביל בתחום המחקר, הפיתוח והחדשנות חיוני לצורך הטמעה יעילה של טכנולוגיות וגיבוש של מדיניות מתקדמת שתתאים למאפייני המשק המקומיים (לרבות מאפייניו הטכנולוגיים, הכלכליים, הדמוגרפיים, הפוליטיים והרגולטוריים הייחודיים). בתחום החדשנות והמו"פ באנרגיה, מגבלותיה הפיזיות והגיאופוליטיות של ישראל מיטשטשות, וכך ישראל יכולה לנצל את יכולותיה הגבוהות בתחום, להיות מוקד ידע ולהביא בשורות וטכנולוגיות חדשניות שישפיעו על העולם כולו. ככל שישראל תשכיל לפתח פריצות דרך טכנולוגיות בתחומי האנרגיה והאקלים, ההשפעה תצא מגבולות המדינה ותוכל להגביר את ההשפעה הגלובלית על משבר האקלים. הביקוש לטכנולוגיות אלו אדיר, והוא הולך וגדל, כך שלהצלחות בתחום יהיו השלכות כלכליות חיוביות על המשק הישראלי, והשלכות סביבתיות על העולם כולו.

תרשים 27: מפת האקו-סיסטם של סטרטאפים במשק האנרגיה בישראל המפרטת מעל 230 חברות בתחומים מגוונים של מגזר האנרגיה[73]



ג.1.

[72] על פי נתוני Startup nation Central בישראל, נכון לאוגוסט 2024, פעילים מעל 300 סטרטאפים בתחום האנרג'יטק מסך כולל של 7200 סטרטאפים בישראל. שיעור הסטרטאפים בתחום האנרג'יטק יחסית לכלל הסטרטאפים בעולם הן על פי Energy Start-up Data Explorer, IEA

[73] Startup Nation Central

3.2. עקרונות ואילוצים לקביעת תמהיל האנרגיה בישראל

3.2.1. עקרונות בסיס להשגת היעדים

בנוסף למאפייני המשק הישראלי שפורטו לעיל, ישנם מספר עקרונות ואילוצים לקביעת המדיניות. העקרונות כלליים ואינם כמותיים, וכוללים בראש ובראשונה שמירה על בטחון באנרגיה, שמירה על איבוד אנרגיה מינימלי בייצור, בהתמרה ובמסירה, התייעלות באנרגיה, והתחשבות באילוצים ובמאפיינים הייחודיים של מדינת ישראל – בין אם מחסור בשטח וצפיפות או עתודות הגז הטבעי ופוטנציאל השימוש באנרגיית השמש. יצוין, כי המודל אינו מתייחס לשינויים קיצוניים (אקלימיים, גיאופוליטיים או טכנולוגיים) שעשויים להתרחש. אירוע חריג יכול להשפיע הן על צד הביקוש והן על צד ההיצע, ומשכך, ככל שאכן יתרחש אירוע משמעותי שיוביל לשינויים מהותיים, יש לבצע בחינה מחודשת של המודל והפתרונות המוצעים.

להלן פירוט העקרונות הנמצאים בבסיס עבודה זו:

- **שימוש יעיל בשטח:** בשל המחסור בשטח בישראל, צפיפות האוכלוסייה והגידול הדמוגרפי, יש להבטיח שימוש יעיל ככל הניתן בשטח. בין היתר באמצעות הקמת מערכות לייצור אנרגיה מתחדשת ואגירה בדו-שימוש, בחירת טכנולוגיות "חסכניות" בקרקע ועוד.

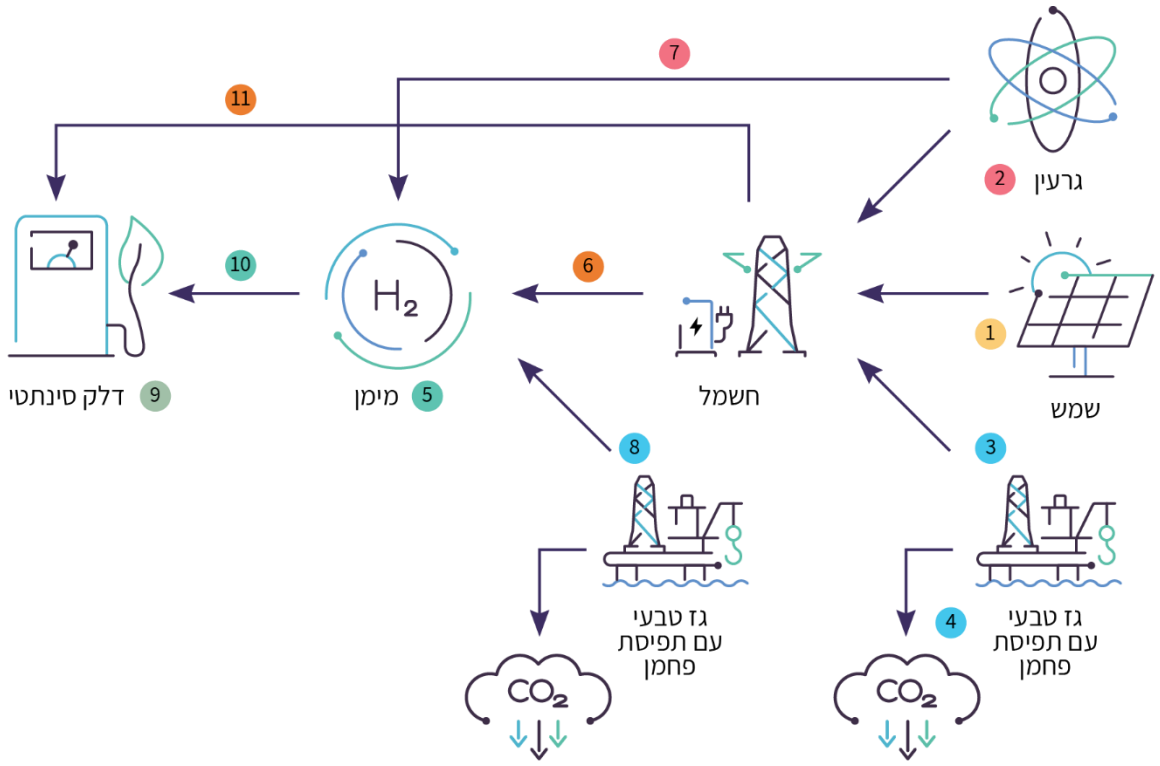
- **רציפות תפקודית וביטחון האספקה:** אספקת אנרגיה רציפה היא חיונית להבטחת תפקוד מתמשך בכלל תחומי החיים בישראל, ולכן שמירה עליה מהווה ערך מרכזי והכרחי. הצורך בשמירה על רציפות תפקודית מתחזק לאור מלחמת חרבות ברזל, ואף מתחדד בשל העובדה שישראל היא אי אנרגטי והיכולת שלה, נכון להיום, להסתמך על מקורות אנרגיה חיצוניים נמוכה מאוד. כל פתרון עתידי בדרך לאיפוס יהיה חייב להבטיח את הרציפות התפקודית של משק האנרגיה בשגרה ובחירום.

- **התייעלות באנרגיה:** האנרגיה הזולה והנקייה ביותר היא זו שאינה מיוצרת. כמו כן, הקטנת הביקוש לאנרגיה תקטין גם את הצורך בתשתיות בצד הייצור וההולכה, ובפרט במדינת ישראל בה גידול האוכלוסייה והצמיחה הכלכלית מחייבות הרחבה מתמדת של תשתיות האנרגיה, תהליך שהופך מאתגר יותר ויותר ככל שישראל מצטופפת. לכן, **הן מהבחינה הפרטית והן מהלאומית, יש הכרח לקדם התייעלות באופן מסיבי בכל תרחיש עתידי**. כפי שיוצג בהמשך, יעד איפוס הפליטות, תוך הגדלה מתמדת של הביקוש לאנרגיה, הינו מאתגר ביותר ויהיה כרוך בהשקעות עתק בטכנולוגיות חדשות ובתשתיות ארציות. כל חיסכון בצד הביקוש באמצעות התייעלות, יקל על השגת יעד האיפוס במסגרת הזמן הנתונה ויפחית את העלויות.

- **מדרג השימוש במקורות האנרגיה:** אחד העקרונות המרכזיים על פיהם יש לבחון את הטכנולוגיות החדשות ואת סדר השימוש בהן הוא יעילות השימוש באנרגיה. קיימת עדיפות מובהקת לצריכה ישירה של אנרגיה מתחדשת על פני מקורות המותמרים מהאנרגיה הראשונית תוך איבודי אנרגיה כדוגמת מימן או דלקים סינתטיים. אמנם הנצילות הפיסיקלית של פאנל PV היא מעט יותר מ-20%, אך נעשה שימוש בכל האנרגיה המופקת כחשמל מהפאנל. בהמרה למימן, למשל, יאבדו עוד 20-30% במעבר מחשמל למימן, ולהפקת דלק סינתטי מהמימן יאבדו עוד כ-30% מהאנרגיה. משכך, השימוש במקורות המותמרים יעשה, אם כך, רק במקומות בהם קיימים אילוצים המחייבים זאת כגון מחסור בשטח לייצור אנרגיה סולארית, חימום לטמפרטורה גבוהה, או שמירה על בטחון האספקה. כך, תהיה עדיפות לייצור וצריכה ישירה של חשמל מהשמש ורק בשל מגבלות כגון מחסור בשטח או צורך בייצור חשמל בלילה או בחורף, ייוצר החשמל מגז טבעי בצירוף תפיסת פחמן .דוגמא נוספת ליישום העיקרון תהיה עדיפות לשימוש בחשמל בכל מקום בו הדבר אפשרי, ורק במקרים בהם לא ניתן לחשמל ייעשה שימוש במימן או דלקים נקיים אחרים.

התרשים להלן מתאר את שרשרת הפקת מוצרי האנרגיה השונים בהם נוכל להשתמש בעתיד מאופס פליטות:

תרשים 28: מדרג השימוש במקורות אנרגיה



מקור האנרגיה הראשוני הינו החשמל, וניתן להפיקו ישירות מהשמש במערכות סולאריות 1 , מכורים גרעיניים 2 או מגז טבעי 3 תוך תפיסת הפד"ח הנפלט 4 , תהליך מורכב ויקר.

מקור אנרגיה שניוני הוא המימן 5 שניתן להפיקו מחשמל 6 בתהליך אלקטרוליזה מחשמל שמגיע ממקורות מתחדשים ("מימן ירוק"). ניתן להפיק מימן גם בכורים גרעיניים 7 ("מימן אדום"), או מגז טבעי 8 תוך תפיסת הפד"ח הנפלט ("מימן כחול") והטמנתו.

מקור אנרגיה שלישוני הוא דלקים סינתטיים 9 שלהפקתם נדרשים מימן 10 , וחשמל 11 ועבור רוב הדלקים גם פד"ח.

במדרג השימוש נעדיף ראשית מקורות ראשוניים, לאחר מכן שניוניים ורק אם אין אפשרות אחרת, מקורות שלישוניים.

3.2.2. תנאים הכרחיים להשגת היעדים

לשם השגת היעדים המפורטים במסמך זה יהיה צורך בפיתוח של תשתיות שיאפשרו את הטמעת הטכנולוגיות החדשות במשק האנרגיה:

- **יבוא אנרגיה לישראל:** בישראל מקורות אפשריים מועטים של אנרגיה נקייה – בעיקר אנרגיה סולארית וגז טבעי עם תפיסת פחמן. שני מקורות אלו מוגבלים, בהיקף השטח שניתן לכסות בפאנלים סולאריים, בכמות הגז הטבעי במאגרים הישראליים וביכולת תפיסת והטמנת הפחמן. מכאן, שעל מנת להשיג איפוס פליטות יהיה צורך לייבא רכיבי אנרגיה נקייה, בין אם חשמל ממקורות מתחדשים בכבלים שיתחברו לרשתות שכנות, בין אם בצינורות שיובילו מימן נקי, ובין אם בייבוא של דלקים נקיים. אמנם יבוא רכיבי אנרגיה עלול לייצר אי-וודאות שיכולה לפגוע בביטחון אספקת האנרגיה, אך ניתן להתמודד עם חוסר וודאות זה על ידי יצירת גיוון במקורות הייבוא וקידום תשתיות בינלאומיות לאנרגיה אשר ישראל תהיה חלק מרכזי ובלתי ניתן להפרדה מהן. מעבר לכך, כבר כיום משק האנרגיה תלוי בייבוא דלקים, המהווים כמחצית מצריכת האנרגיה הראשונית בישראל. משכך, יש לגוון את מקורות האספקה, את סוגי האנרגיה המיובאת ואת אופן הייבוא, וליצור ערוצים משלימים כגיבוי. כמו כן, יש להבטיח את האקלים הגאופוליטי המתאים ליצירת שיתופי פעולה ארוכי טווח כאלו.

- **השקעות נרחבות בתשתיות אנרגיה לרבות רשת:** עקב המרחק בין אזורי ייצור החשמל לאזורי הביקוש העיקריים, רשת החשמל מסתמנת כאתגר מרכזי לשילוב אנרגיה נקיה וטכנולוגיות חדשות. יש לקדם בחינה ומחקר של כלים וטכנולוגיות להגדלת קיבולת הרשת תוך שמירה על חתימה נופית ופגיעה סביבתית נמוכה, והקטנת העלויות. מגוון הכלים נע מניהול ביקושים וניהול דינאמי מבוזר וחכם של מקטעי רשת שיאפשרו ניצול טוב יותר של רכיבי הרשת, דרך הגדלת מתח הקווים והטמנתם, ועד הולכה בזרם ישר (DC), הולכה במימן, ועוד.

- **ניהול ביקושים:** במעבר ממשק מוטה ייצור ממקורות פוסיליים למשק מבוסס מקורות מתחדשים סירוגיים[74] ובלתי נשלטים, יש לעבור גם לניהול המשק כך שבמקום שרק הייצור יתאים עצמו לביקוש, גם הביקוש יתאים עצמו, ככל האפשר, לייצור. למשל, בהתאם למחזור היומי נרצה להגדיל את הביקוש לחשמל בשעות הצהריים, כאשר המערכות הסולאריות ייצרו עודפים, ובמקביל להקטין את הביקוש בערב ובלילה. דוגמה נוספת היא ניהול הביקושים בהתאם לתנודתיות של הייצור הסולארי בשעות היום, עקב מעבר ענן למשל, באופן שניתן יהיה להגדיל ולהקטין את הביקוש כחלופה לאגירה. מכאן שדווקא במשק חשמל מוטה מקורות מתחדשים, יש צורך מוגבר בניהול מדויק של הביקושים. בראיה כלכלית, כבר כיום מנגנוני ניהול ביקושים זולים יותר משמעותית מהגדלה של כושר הייצור.[75] מאחר שהמצב יחריף במשק האנרגיה העתידי, שיהיה מוטה הון (CAPEX) על פני עלויות התפעול והדלקים (OPEX) המוכרות כיום,[76] כל חריגה בשיאי ביקוש תדרוש עיבוי של תשתיות יקרות. טכנולוגיות לניהול צד הביקוש מסוגלות להתמודד עם תנודות בביקוש ו"לגלח" את שיאי הביקוש, כך שבעתיד מערכות אלו יהיו נחוצות אף יותר מאשר בהווה ויש לפתח תחום זה באופן קבוע. לצורך כך יידרש יישום של טכנולוגיות מתקדמות לניהול דינאמי של הביקוש מרמת הצרכן הביתי או המפעל הבודד, ודרך אגרגטורים שיאגדו מספר רב של צרכנים ו/או יצרנים זעירים שיוכלו לספק כלים לניהול כולל של הביקוש כ"תחנת כוח וירטואלית" (VPP, Virtual Power Plants). בכדי ליישם אמצעים אלו יש ליצור תיאום בין מנהל רשת ההולכה הארצית למנהלי רשתות החלוקה האזוריות (TSO-DSO Coordination).[77]

---

[74] דהיינו, פועלים לסירוגין (Intermittent).

[75] ראו למשל דוח של מנהלת המידע לאנרגיה האמריקאית:
Demand-side management programs save energy and reduce peak demand, eia 2019.

[76] מערכות סולאריות, מערכות אגירה, מתקני הפקת מימן ותפיסת פחמן – כל אלו דורשים עלות הון ראשונית גבוהה ועלויות תפעול נמוכות יחסית. כך שחלק ה-CAPEX בעלות המשוקללת יהיה גבוה יותר מאשר במתקני ייצור קונבנציונליים כדוגמת טורבינות גז או תחנות פחמיות.

[77] ראו למשל את המחקר:
F. Najibi, *et. al.*, *TSO-DSO Coordination Schemes to Facilitate Distributed Resources Integration*, Sustainability 2021, 13(14), 7832.

אמנם בישראל קיימת כיום אסדרה להשלת עומסים בשעות שיאי הביקוש, אך זו אסדרה המיועדת לתעשייה, ובהתראה של יום מראש. היות ואנרגיה סולארית מגיעה בשעות הצהריים, צפוי כי בעתיד שיאי העומס יהיו דווקא בערב ולכן יש צורך לבחון קידום מנגנוני השלת עומסים בקרב משקי בית, המהווים את רוב הביקוש בשעות אלו. מנגנונים אלו גם ידרשו להיות בהתראה קצרה או בזמן אמת, וכן בהפעלה אוטומטית שלא תדרוש מהצרכנים לעסוק באופן פעיל בתהליך.

- **קידום טכנולוגיות והשקעה במו"פ:** יצור ויבוא של אנרגיות נקיות אינו מספיק להשגת יעדי הפחתת הפליטות ויהיה צורך בטכנולוגיות נוספות שישלימו את המהלך, ביניהן קידום תחבורה נקייה מבוססת חשמל או מימן, הסבת התעשייה לשימוש בחשמל או מימן והסבת מתקני התעופה והספנות לשימוש בדלקים מקיימים. יש לעודד מו"פ בנושאים אלו וכן הטמעה של טכנולוגיות חדשות בתחום. מאחר שמדובר בפיתוחים טכנולוגים רבים ומשמעותיים, בנוסף לקידום מו"פ במסלולים ובכלים העומדים היום לרשות משרד האנרגיה והתשתיות, יש לקדם תכנית מקיפה לעידוד חדשנות ומו"פ אנרגיה בישראל הכוללת השקעות רחבות, שיתופי פעולה בינלאומיים, מערך תשתיתי של מעבדות לאומיות ומכוני מחקר, שיתמקדו במציאת פתרונות המותאמים ליעדי הממשלה, תוך ראיה משקית רחבה ולטווח ארוך. זאת, בנוסף להכנת התשתיות הנדרשות וקידום המגזרים המשלימים להשגת יעדיהם הם חיוניים להשגת היעדים הכוללים של משק האנרגיה.

3.2.3. סוגיות מתודולוגיות

להלן מספר סוגיות מתודולוגיות בהן נתקלנו בבניית המודל לביקושים לאנרגיה בישראל:

- **שאלת המינוע:** למרות שרמת המינוע (כלי רכב לנפש) בישראל נמוכה ביחס למדינות אירופה וצפון אמריקה, קיימת עליה מתמדת במספר הרכבים בישראל, וכפועל יוצא מכך גם בגודש בכבישים.[78] לצד פיתוח רשת תחבורה ציבורית ענפה שתוביל למעבר ממכוניות פרטיות לתחבורה ציבורית, ובהתייחס לצפיפות הגבוהה ולהיעדר תשתיות מספקות לרכב הפרטי, לא סביר כי רמת המינוע בישראל תמשיך לעלות באותו הקצב של מגמות העבר, והיא צפויה להאט. היות וכך, המודל מניח האטה בקצב צמיחת רמת המינוע העתידית בישראל.

- **סוגיית הדלקים לתעופה ולספנות:** בישראל אין תעשייה מקומית של ייצור מטוסים וספינות, ולכן ניאלץ להשתמש בתמהיל הדלקים שיהיה מקובל בשאר העולם לספנות ולתעופה. בהתאם לכך תמהילי הדלקים העתידיים בתעופה והספנות נגזרו מתחזיות בינלאומיות. תחזיות הגידול בתנועת הנוסעים והסחורות בספינות ומטוסים לישראל וממנה, התבססה על מגמות הגידול באוכלוסיה.

- **אגירה עונתית:** בתרחישים הכוללים אחוזים גבוהים מאד של אנרגיה סולארית נדרשת אגירה עונתית בכדי להעביר עודפי חשמל מהאביב והקיץ, בהם התפוקה הסולארית עולה על הביקוש, לחורף, בו התפוקה הסולארית נמוכה. בעזרת המודל נמצא כי יש צורך באגירה עונתית באשר אנרגיות מתחדשות מהוות יותר מ-80% ממקורות ייצור החשמל. בכדי להימנע מהאתגרים הקשורים באגירה עונתית, ובשל היעדר בשלות טכנולוגית מספקת בתחום כיום, נבחנו תרחישים בהם היקף האנרגיות המתחדשות אינו עולה על 80%.

- **קיזוז פליטות:** בסיכומו של דבר, אי אפשר יהיה להשיג אפס פליטות מוחלט בכלל מגזר האנרגיה. בין היתר, גם בתחזיות האופטימיות חלק מהספינות והמטוסים ימשיכו להשתמש בדלקים פוסיליים, חלק מהמשאיות ישתמשו בסולר, וטכנולוגיות תפיסת הפחמן עבור טורבינות גז טבעי או לתהליכי הפקת מימן "כחול" לא תהיינה מסוגלות לתפוס 100% מהפליטות, כך שחלקן יזלגו לאטמוספרה. מכאן, בדומה ליתר מדינות העולם שהצהירו על איפוס פליטות, המונח "איפוס פליטות נטו" מבוון לכך שיהיה שימוש בטכנולוגיות משלימות להסרת גזי חממה

או את שיתוף הפעולה שיצר איגוד מנהלי הרשתות באירופה (entso-e) עם איגוד מנהלי רשתות החלוקה (EU DSO) בדוח השנתי של entso-e לשנת 2021:

ENTSO-E Annual Report, 2021 Edition, chapter 7.

[78] *כלי רכב מנועיים בישראל בשנת 2023* תרשים 9, הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.

מהאטמוספרה בכדי לקזז את מעט הפליטות שיוותרו במגזרים הקשים מאד לאיפוס.[79] השגת היעד של אפס פליטות נטו, תלויה בהתפתחות טכנולוגיות להסרת הפחמן מהאטמוספרה והטמנתו או השימוש בו.[80]

3.3. מדיניות נוכחית

עבודה זו נשענת על עבודות קודמות שנערכו במשרד וכן על הידע הנצבר בתחומים הרלוונטיים:

1. **"הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030"**[81] – עבודת רשות החשמל שבחנה את ההשלכות הטכניות והכלכליות של הגדלת יעד האנרגיה המתחדשות מ-17% ל-30% בשנת 2030.
2. **"התכנית הלאומית להתייעלות באנרגיה"**[82] – תכנית שפרסם משרד האנרגיה והתשתיות להשגת התייעלות מתמשכת בשימוש באנרגיה בסך 1.3% בשנה בעצימות האנרגיה, המוגדרת בכמות האנרגיה לייצור מיליון ₪ של תמ"ג. יישום התכנית יביא להפחתה של 7.5% בסך הפליטות ממשק האנרגיה עד לשנת 2030.
3. **"מפת הדרכים לאנרגיות מתחדשות בשנת 2030"**[83] – תכנית פעולה שנכתבה במשרד האנרגיה והתשתיות הבוחנת את היעדים השנתיים הנדרשים להשגת יעד 30% אנרגיות מתחדשות לייצור חשמל בשנת 2030, וכן מפרטת את צעדי המדיניות שיש ליישם בכדי להשיג יעדים אלו.
4. **"מפת הדרכים למשק אנרגיה דל פחמן עד שנת 2050"**[84] – עבודת משרד האנרגיה והתשתיות המפרטת תכנית להשגת הפחתה של 85% בפליטות גזי החממה ממשק החשמל עד לשנת 2050. התוכנית מציגה שני ערוצים להפחתת הפליטות – ערוץ סולארי בו מירב ההפחתה מושגת באמצעות ייצור חשמל ממקורות סולאריים, וערוץ טכנולוגי המשלב שימוש במקורות סולאריים וטכנולוגיות שונות להשגת מלוא ההפחתה. בעבודה זו נעשה ניתוח ראשוני ללא התייחסות מפורטת לטכנולוגיות העתידיות.
5. **אסטרטגיית המימן**[85] – עבודת משרד האנרגיה והתשתיות שבחנה את שילוב של המימן במשק הישראלי כדרך משלימה להשגת האיפוס הפחמני. בעבודה גובשו שני תרחישים מרכזיים לשילוב מימן במשק הישראלי ומתוכם נגזרה מפת דרכים לשילוב המימן במשק האנרגיה הישראלי, אשר תעודכן בהתאם להתפתחויות הבינלאומיות והטכנולוגיות.
6. **עתיד משק הדלק**[86] – עבודת משרד האנרגיה והתשתיות לאסטרטגיה ארוכת טווח למשק הדלקים הישראלי, כוללת התייחסות לשמירה על אספקת הדלקים ה"מסורתיים" תוך מעבר לשימוש בדלקים ה"חדשים" – ביולוגיים, סינתטיים ומימן. יחד עם **מסמך המדיניות לדלקי תעופה בני קיימא**[87] שפרסם המשרד, משורטטת מפת הדרכים לפיתוח משקי הדלקים לתחבורה היבשתית ולעולם התעופה עד לשנת 2050.

בהמשך לעבודות שפורטו לעיל, ארבע החלטות ממשלה מרכזיות אימצו עבודות אלה ועיגנו את מדיניות משרד האנרגיה והתשתיות. המרכזיות שבהן:

1. החלטת ממשלה מספר 465 בנושא "**קידום אנרגיה מתחדשת במשק החשמל ותיקון החלטת ממשלה**" מיום 25.10.2020:[88] במסגרת ההחלטה אימצה הממשלה יעד של 30% אנרגיות מתחדשות מסך ייצור החשמל עד

---

[79] ראו למשל: World Resource Institute, *Carbon Dioxide Removal*

[80] להסבר על טכנולוגיות הסרת פד"ח מהאטמוספרה, ראו למשל:
6 Ways to Remove Carbon Pollution from the Atmosphere, World Resource Institute (2023)

[81] https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/2030_final

[82] https://www.gov.il/he/departments/news/energy_2030

[83] https://www.gov.il/he/departments/news/re_290522

[84] https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/energy_121021

[85] https://www.gov.il/he/departments/publications/Call_for_bids/hydrogen-160523

[86] https://www.gov.il/he/pages/fuel-strategy-june-2024

[87] https://www.gov.il/he/pages/saf-110724

[88] https://www.gov.il/he/departments/policies/dec465_2020

לשנת 2030, ויעד ביניים של 20% עד לסוף שנת 2025. בנוסף, עיגנה הממשלה את עקרונות המדיניות של שר האנרגיה על הפסקת השימוש בפחם. ההחלטה אף קבעה צעדי מדיניות על מנת לעמוד ביעדים אלה.

2. החלטת ממשלה מספר 171 בנושא **"מעבר לכלכלה דלת פחמן"** מיום 25.7.2021:[89] במסגרת ההחלטה הכירה הממשלה בחשיבות ההגעה לאיפוס פליטות עד לשנת 2050, וקבעה יעדי הפחתת פליטות לשנת 2030 ולשנת 2050. בנוסף, במסגרת ההחלטה נקבעו תתי-יעדים, בין היתר במשקי התחבורה, הפסולת והחשמל.

3. החלטת ממשלה מספר 541 בנושא **"אישור עדכון לתכנית הלאומית להתייעלות באנרגיה והפחתת פליטות גזי חממה"** מיום 24.10.2021:[90] במסגרת ההחלטה אומץ יעד ביניים לאומי להתייעלות באנרגיה, וכן נקבעו מנגנונים ותכנית פעולה לניהול וניטור העמידה ביעדים.

4. החלטת ממשלה מספר 542 בנושא **"קידום תחבורה נקייה ודלת פחמן"** מיום 24.10.2021:[91] במסגרת החלטה זו הוגדרו יעדים לאומיים לכניסת תחבורה בת-קיימא למשק הישראלי, פורטו הפעולות שידרשו לשם השגת יעדים אלו, ונקבע מנגנון למעקב אחר קיום ההחלטה.

המדיניות הנוכחית של משרד האנרגיה והתשתיות נגזרת במידה רבה מהעבודות והיעדים שפורטו לעיל. מרבית צעדי המדיניות בעבודות אלו הינם עד לשנת 2030. בעבודה הנוכחית יוצגו התרחישים האפשריים להשגת משק אנרגיה מאופס פליטות עד לשנת 2050 ואמצעי המדיניות שידרשו להשגתם. בהמשך למפת הדרכים למשק דל פחמן עד לשנת 2050, בעבודה זו יפורטו התרחישים הטכנולוגיים שיאפשרו להשיג איפוס פחמני מלא (נטו) עד לשנת 2050.

[89] https://www.gov.il/he/departments/policies/dec171_2021

[90] https://www.gov.il/he/departments/policies/dec541_2021

[91] https://www.gov.il/he/pages/dec542_2021

4. מודל אנרגיה לבחינת תרחישים להפחתת הפליטות

על מנת לנתח את האפשרויות לאיפוס פליטות במשק האנרגיה בישראל נבנה מודל אנרגיה. המודל מעריך את הביקוש הצפוי למוצרי האנרגיה השונים – חשמל, מימן, דלקים וגז טבעי, במגזרים השונים של משק האנרגיה: חשמל, תחבורה, ותעשייה. עבור ביקושים אלו המודל מנתח את מרחב האפשרויות הטכנולוגי, האילוצים, והשפעות הגומלין בין הטכנולוגיות השונות המאפשרות את איפוס הפליטות, ומבצע מבחני רגישות שונים. **המודל מהווה כלי בעזרתו ניתן להעריך את ההשפעות וההשלכות של תרחישים שונים לגיבוש מתווה מיטבי להשגת איפוס פחמני בשנת 2050 במשק האנרגיה ולהבנת ההשלכות ואמצעי המדיניות שידרשו בכדי להשיג זאת.**

4.1. מתודולוגיה

בכדי לנתח תרחישים שונים להשגת איפוס פחמני, התבצע ניתוח בשלושה שלבים – הערכת הביקושים לשירותי אנרגיה, בחינת תמהילי מוצרי האנרגיה השונים ובחינת התרחישים הטכנולוגים לאספקת הביקושים.

4.1.1. מודל הביקושים לשירותי אנרגיה

ראשית הוערכו הביקושים **לשירותי אנרגיה** במגזרי המשק השונים עד לשנת 2050. המודל מסתמך על מגמות העבר ועל הנחות ביחס למגמות הגידול העתידיות בכדי לחשב את השינוי שיתחולל עד לשנת 2050 בביקוש **לשירותים** השונים – כגון סך הנסועה בכלי הרכב השונים, סך טיסות הנוסעים, סך הביקוש לחשמל ולחום במפעלי התעשייה, הביקוש הצפוי לחשמל במבני מגורים ותעסוקה, ועוד.

עקב אי הוודאות בהתייחס לטווחי הזמן הארוכים בוצעו שלוש הערכות – גבוהה, מרכזית ונמוכה. בהערכות אלו נלקחו בחשבון פרמטרים גבוהים, בינוניים ונמוכים כגון מספר כלי רכב פרטיים, הנסועה הממוצעת, הצמיחה בתעשייה וכד'. ברוב הניתוחים נבחר הערך המרכזי, אך במבחני רגישות וניתוחי מצבי קצה נעשה שימוש בערכים הגבוהים והנמוכים כערכי הגבול הקיצוניים.

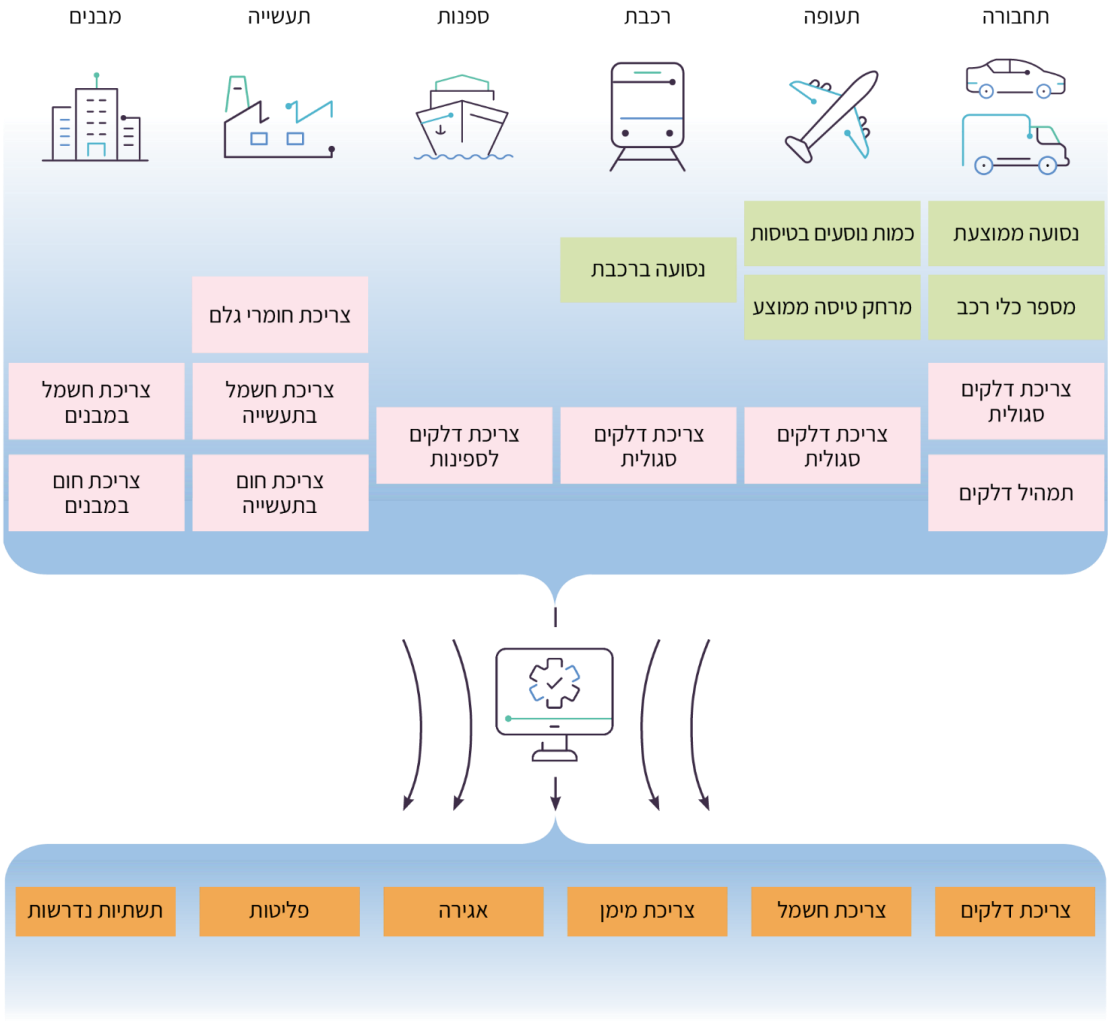
במודל נבחנו המגזרים המפורטים בטבלה להלן:

טבלה 3: מגזרי הכלכלה שנבחנו בניתוח הטכני

ענף	מגזרים שנבחנו
ביתי ומסחרי	צריכת חשמל, צריכת גפ"מ (גז בישול), ודלקים לבישול ולחימום.
תחבורה יבשתית	מכוניות פרטיות, מוניות, אוטובוסים קטנים, אוטובוסים גדולים – ציבוריים ופרטיים, רכבים מסחריים עד 3.5 טון, משאיות קלות 3.5-12 טון, משאיות כבדות מעל 12 טון, אופנועים, רכבים מיוחדים, רכבות נוסעים, רכבות משא, רכבות קלות (במטרופולינים), מטרו.
תעופה	טיסות פנים, טיסות בינלאומיות, טיסות מטען בינלאומיות.
ספנות	ספינות בקווים בינלאומיים.
תעשייה	חשמל לתפעול מערכות, דלקים, וגז טבעי לחום.
אחר	חקלאות, הרש"פ, מתקני התפלה וכדומה

בתרשים 29 להלן מתואר באופן סכמתי המודל להערכת הביקושים לאנרגיה. המודל בוחן את המגזרים שפורטו לעיל ובכל מגזר משתמש בפרמטרים כלליים (כדוגמת מספר כלי הרכב הצפוי בכל שנה עד לשנת 2050), ופרמטרים הקשורים בצריכת האנרגיה (לדוגמא צריכת חום בתעשייה בכל שנה). על פי פרמטרים אלו המודל מחשב את צריכת מוצרי האנרגיה השונים (כדוגמת דלקים, חשמל וכד'), כמו גם את אגירת האנרגיה שתידרש ותשתיות נוספות כגון אלקטרולייזרים להפקת מימן. לבסוף, המודל מחשב גם את הפליטות ממשק האנרגיה.

תרשים 29: תרשים סכמתי של המודל להערכת הביקושים



המודל מקבל נתונים כלליים (בירוק, למעלה) ונתוני צריכת דלקים סגולית (בוורוד), במגזרים השונים, מעבד את המידע ומפיק את תמהיל מקורות האנרגיה השונים (למטה) כמו גם תשתיות שידרשו במשק.

לצורך חישוב הביקושים הכוללים לאנרגיה במשק נלקחו בחשבון מספר גורמים:

- **הביקוש המשקי הבסיסי לחשמל** נלקח מתחזית חברת ניהול המערכת (נגה), האמונה על פי חוק לערוך תחזית ארוכת טווח בחלק מתכנון משק החשמל. על פי התחזית[92] הביקוש לחשמל יגיע לכדי 115TWh בשנת 2040 ו-150TWh בשנת 2050.

[92] התחזית הוצגה לציבור בספט' 2022 אך לעת כתיבת עבודה זו עדין לא פורסמה רשמית. יצוין כי לקחנו את תחזית הביקוש של נגה והורדנו את איבודי החשמל של 7.5%.

- **ביקוש לחשמל לתחבורה היבשתית:** החשמל יידרש לתפעול ולטעינת כלי הרכב החשמליים במגזרים השונים – פרטיים, תחבורה ציבורית (לרבות רכבות), ותובלה. הביקוש חושב על פי הערכות לקצב כניסת כלי הרכב החשמליים, רמת הנסועה, צריכת החשמל לק"מ, היחס בין שימוש בתחבורה פרטית לציבורית, ועוד.
- **תעופה וספנות:** ביחס למגזרים אלו חושבה צריכת האנרגיה וממנה נגזרו צריכת החשמל, המימן והדלקים הנקיים על פי הערכות לתמהילי הדלקים בדוחות בינלאומיים.
- **תעשייה:** במגזר התעשייה הונח כי הפעילות השוטפת של המפעלים תחושמל, ואנרגיית החום שמסופקת כיום מדלקים ומגז טבעי תוסב לחשמל ככל הניתן ולדלקים נקיים במקרים האחרים. ביחס לחומרי הגלם שלגביהם לא קיים תחליף כיום (כדוגמת נפטא), הונח כי הביקוש לחומרים אלו ישאר זהה.
- **המגזר הביתי והמסחרי:** הונח מעבר מלא לחשמל.

לתיאור מפורט יותר של הנחות המודל ראו נספח ג': הנחות היסוד של מודל הביקוש.

4.1.2 תמהילי הדלקים

לאחר חישוב תרחישי הביקוש לשירותי האנרגיה, נבחנו תמהילי מוצרי האנרגיה השונים (דלקים, גז טבעי, חשמל, וכד') שיוכלו לאפשר מענה לביקושים אלו.

בניתוח נבחנו מוצרי אנרגיה שונים כגון חשמל, מימן ודלקים נקיים. הבחירה בתמהילים השונים נעשתה בהתאם להערכת היכולות הטכנולוגיות. בסקטור התחבורה הפרטית למשל, הונח כי כל כלי הרכב יעברו לחשמל מבוסס סוללות (Battery Electric Vehicles – BEVs) עד לשנת 2050. לעומת זאת, ביחס לתחבורה הכבדה הונח כי יהיו כלי רכב חשמליים מונעי מימן (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEVs), לצד כאלו בעלי מנועי דיזל שיונעו בסולר נקי ממקור ביולוגי או סינתטי, ואף משאיות שיונעו בסולר פוסילי. בדומה לכך, גם התעשייה תחושמל ברובה עד לשנת 2050, אך המגזרים הקשים לחישמול יעשו שימוש במימן או ישתמשו בגז טבעי עם תפיסת פחמן. בניתוח התחבורה הבינלאומית – תעופה וספנות – הונחו תמהילים על בסיס דוחות בינלאומיים.

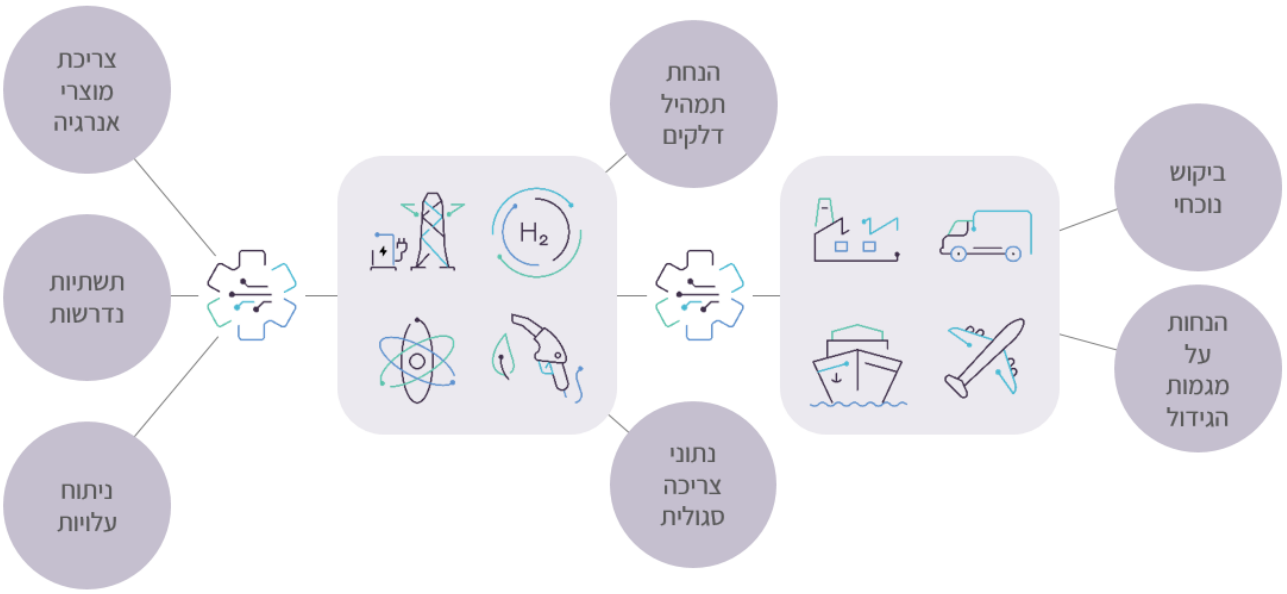
4.1.3 תרחישי הפקת אנרגיה

בשלב האחרון נבחנו התרחישים הטכנולוגיים שיאפשרו לספק את ביקושי מוצרי האנרגיה שנמצאו בתמהילים שפורטו לעיל. בניתוח הטכנולוגי נלקחו בחשבון סינרגיות בין הטכנולוגיות השונות והערכות לגבי היכולות והמגבלות הטכניות כאשר טכנולוגיות אלו יגיעו בעתיד לבשלות מסחרית.

במויות האנרגיה שמחושבות על ידי המודל מאפשרת לחשב גם תשתיות שיהיה צורך להקים, כגון הספק אלקטרולייזרים, או שטח המערכות הסולאריות שיידרש בבדי להשלים את ייצור החשמל במגזרים השונים.

בתרשים להלן מתוארים באופן סכמתי שלבי המודל החישובי:

תרשים 30: תיאור סכמתי של מודל הביקושים בבסיס העבודה

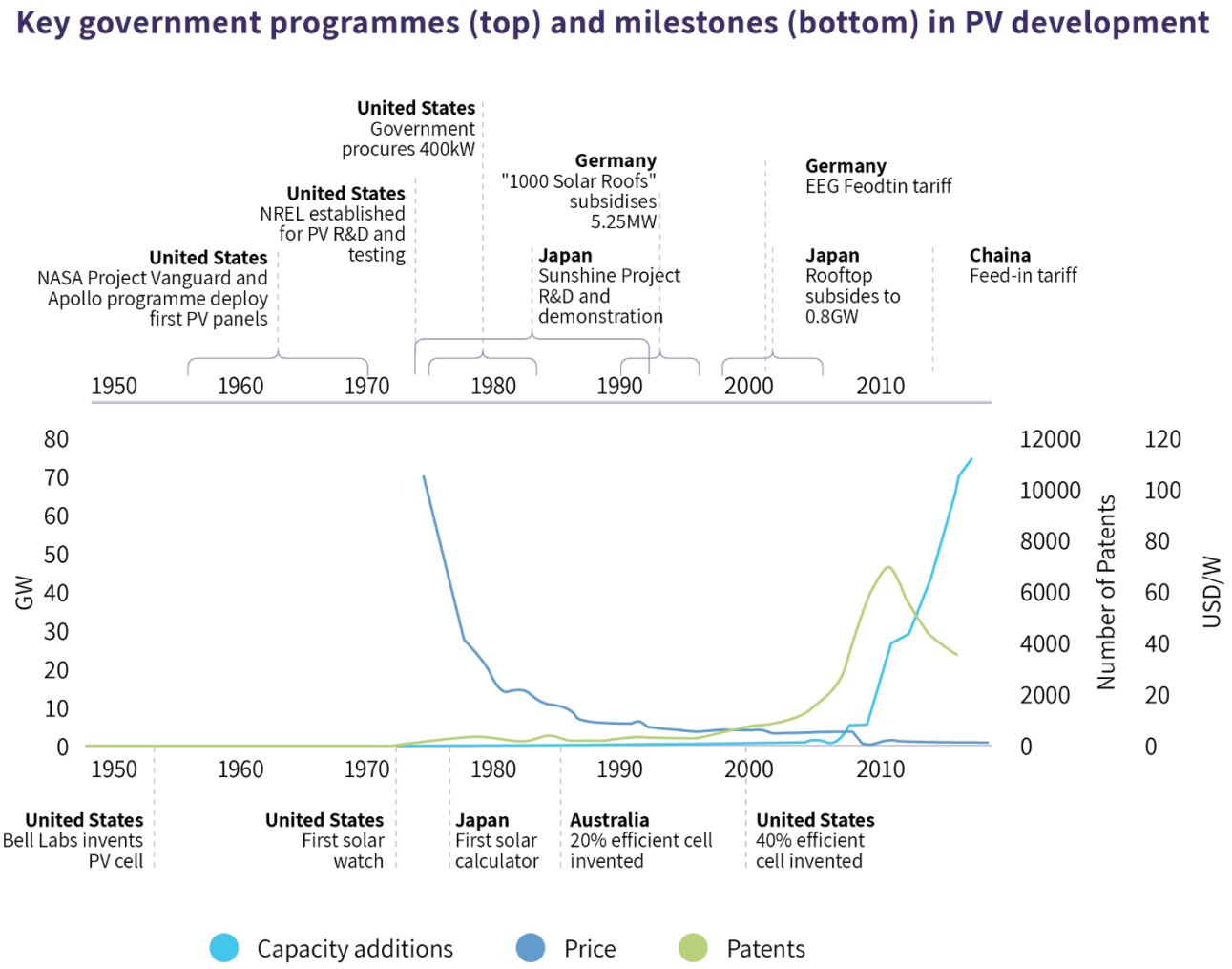


המודל מתמקד בהיבטים הטכניים של משק האנרגיה. בשל אי הוודאויות הרבות הכרוכות בהערכת המחירים העתידיים של הטכנולוגיות השונות, טכנולוגיות שברובן עדיין לא קיימות באופן מסחרי, נעשה ניתוח בלבלי ראשוני של העלויות הכרוכות בתרחישים השונים. עם התבהרות האופק הטכנולוגי, ניתן יהיה לעדכן את התחשיבים ולהוסיף גם ניתוחי עלויות מפורטים ותיעדוף בלבלי לתרחישים השונים.

4.1.4. ניתוח כלכלי – עלויות הפקה ותפעול

הכדאיות הכלכלית של הטכנולוגיות השונות הינה אחד הגורמים המרכזיים המשפיעים על קצב אימוץ הטכנולוגיות ויישומן, בארץ ובעולם. מחזור החיים של טכנולוגיות חדשות מורכב וכולל נקודות מפנה שונות. למשל, לטכנולוגיה הפוטו-וולטאית לקח מספר עשורים עד שהגיעה לכדאיות כלכלית במדינות שונות בעולם ללא תמיכה ממשלתית, כפי שניתן לראות בגרף להלן:

תרשים 31: התפתחות מחירי המערכות הפוטו-וולטאיות מול קצב ההתקנות וציר הזמן של אמצעי המדיניות שיושמו בעולם[93]



IEA 2020. All rights reserved

למרות שהמחקר על טכנולוגיה זו החל עוד בשנות ה-50 של המאה הקודמת, רק סביב שנות ה-80 המחירים ירדו מספיק כדי לאפשר התקנות מסחריות. על אף ירידה זו, נדרשה עוד נקודת מפנה סביב שנת 2010. בתקופה זו נכנסו לתוקף מספר רגולציות, בין היתר בגרמניה וביפן, שתמכו בהתקנת מערכות לייצור אנרגיה סולארית. תמיכות אלו עודדו גם את התפתחות המחקר והביאו לעלייה דרמטית במספר הפטנטים, לצד ירידה משמעותית נוספת במחיר. המסקנה היא כי שינויים טכנולוגיים אינם מתרחשים בוואקום, ומושפעים מהצטלבות של מספר תהליכים המחזקים זה את זה – התפתחות מו"פ בתחום, לצד מדיניות תומכת ורגולציה מתמרצת (בין באמצעות חיוב ובין ע"י תמריצים). הבשלת שני תהליכים אלה, מביאה לרוב לירידה במחירים, ושילוב כל אלו עשוי להביא באופן פתאומי ובלתי צפוי לאימוץ הטכנולוגיה בהיקפים משמעותיים.

[93] IEA Energy Technology Perspectives 2020.

עבודה זו עוסקת באופק של 25 שנים ויותר, ולכן קשה מאד לחזות את ההתפתחויות הטכנולוגיות והמחירים על פני טווח זמן כה ארוך במשק עולמי דינאמי ומתפתח בשוק האנרגיה. אולם, לעלויות של הטכנולוגיות השונות יש השפעה מהותית על אימוצן ולכן נעשה ניסיון להעריך, עד כמה שאפשר, את העלויות של הטכנולוגיות השונות. בעבודה זו הונחו היסודות המתודולוגיים לתחשיב העלויות העתידיות, תחשיב שניתן יהיה לבצע מידי מספר שנים, ולבחון את ההתפתחויות לאור תחזיות מחירים מעודכנות.

למרות חוסר הוודאויות הרבות הכרוכות בהערכת עלויות בטווח של 25 שנים, ישנה חשיבות בהערכת העלות הכלכלית של הטכנולוגיות השונות אשר, בזהירות הנדרשת, מסוגלת לתת בסיס מסוים להשוואה ולהערכת מידת הישימות שלהן.

עקב אי הוודאות הטכנולוגית והשינויים המהירים בתחום האנרגיה קשה למצוא מקורות האומדים את העלויות עד לשנת 2050. עבודה זו מסתמכת על המעבדה הלאומית האמריקאית לאנרגיות מתחדשות, NREL (National Renewable Energy Laboratory), ועל הדוח השנתי המפורסם על ידם, אשר מעריך את עלויות הטכנולוגיות לטווח הארוך – NREL Annual Technology Baseline[94]. תחומים נוספים כדוגמת המימן, שלא מופיעים בניתוח של NREL, נלקחו ממקורות משלימים כדוגמת Bloomberg NEF.

מדד ה-LCOE מחשב את עלויות ההון, ואת עלויות התפעול והדלקים השוטפות על פני אורך החיים של המערכת (בין אם מדובר במערכת סולארית או בתחנת כוח), מהוונות על פי ריבית מקובלת, מחולקת בסך כל האנרגיה שתיוצר במשך חיי המערכת, מהוונת גם היא על פי אותו שער ריבית:

$$LCOE = \frac{total\ costs\ over\ lifetime}{total\ energy\ over\ lifetime} = \frac{\sum_{t=1}^{N} \frac{C_t + O_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^{N} \frac{E_t}{(1+r)^t}}$$

כאשר C_t, O_t, F_t מסמנים את עלויות ההון, התפעול והדלקים בהתאמה בכל שנה, ו-E_t היא כמות האנרגיה המופקת בכל שנה. r היא הריבית המשוקללת לטכנולוגיות אנרגיה עתידיות, והוערכה ב 7%. חישוב ה-LCOE, כאמור, מבטא את הערכת העלות האפקטיבית לקוט"ש עבור המערכת לאורך חייה.

על מנת לבחון את העלויות של התרחישים העתידיים נעשה שימוש במדד LCOE – Levelized Cost of Electricity שהוא מדד מקובל המהוון את עלות מערכות ייצור החשמל לאורך חייהן ומחשב את העלות האפקטיבית לקוט"ש. באמצעות מדד ה-LCOE ניתן לחשב את העלות לקוט"ש בטכנולוגיות ובתרחישים עתידיים שונים, ובכך להשוות את הכדאיות הכלכלית של תרחישים אלו. חשוב לציין כי העלות המוערכת מתייחסת רק להקמה ותפעול ישיר של מגזר ייצור החשמל, ללא שקלול עלויות נוספות כגון: הוספה והקמה של קווי הולכה, תשתיות תפיסה והטמנה של פחמן, עלויות ביטחוניות ועוד.

חישוב זה אמור להיערך לכל שנה באופן שישקלל את עלויות ההון של כל המערכות שהוקמו בעבר ועדין פעילות באותה השנה, עם עלויות התפעול והדלקים של כל אותן המערכות. לצורך הפשטות, בבדי להשוות בין התרחישים הטכנולוגיים השונים, החישוב בוצע רק עבור שנת 2050. היות ובשנה זו קיימים מתקנים שהוקמו בשנים שונות, ולכן בעלי עלויות הון ותפעול שונות, החישוב נעשה עבור שנה אחת מייצגת. השנה האפקטיבית נבחרה ע"י שיקלול ההספקים שיהיו מותקנים בשנת 2050 לפי השנים בהן הותקנו. השנה האפקטיבית שנמצאה בניתוח זה היא שנת 2042,[95] כך שלחישוב עלות האנרגיה בשנת 2050 יש לחשב את עלויות המקורות השונים לאנרגיה על פי נוסחת ה-LCOE **במחירי שנת 2042** בשיקלול המקורות השונים על פי כמות הקוט"ש שייצרו באותה השנה.

[94] https://atb.nrel.gov/

[95] החישוב שבוצע הינו כדלקמן: היות ובשנת 2050 יהיו עדין קיימות מערכות שהוקמו במהלך 20 השנים הקודמות בהספקים הולכים וגדלים, סיכמנו את מכפלת **ההספק המותקן** בכל שנה עם **השנה** עצמה, משנת 2030 ועד 2050. לבסוף חילקנו את הסכום בסך ההספק שהותקן באותן השנים. חישוב זה מבטא את השנה המשוקללת של המערכות המותקנות בשנת 2050 לפי ההספקים שהותקנו בשנים השונות – והיא שנת 2042. אם כעת נחשב את המחיר של ההספקים המותקנים בשנת 2050, לפי המחיר בשנה המשוקללת (2042), נקבל את המחיר של כלל המערכות המותקנות בשנת 2050, במחיר בשנים בהן הותקנו, משוקלל על פי הספקיהן.

הנחות נוספות שנלקחו בחישוב העלויות:

- הונח כי כל טכנולוגיה תוקם ותמומן על פני אורך החיים של המערכת – בין 25-50 שנה, בהתאם לטכנולוגיה הנבחנת ועל פי האומדנים של NREL.
- בשל אי-הוודאות הגבוהה לגבי רמות הסיכון העתידיות בפרויקטי אנרגיה נקייה, עבור כלל הטכנולוגיות הוערכה ריבית סיכון לפרויקט של 7% בשנה. ריבית זו תשמש הן להיוון התזרים העתידי והן כריבית על ההשקעה.
- בחישוב על פי מדד ה-LCOE, עלות המימן לייצור חשמל נכללת דרך מחיר הדלק, וזאת על פי תחזיות נוכחיות לעלויות מימן בשנת 2042. כך, למשל, בחישוב עלות ייצור החשמל ממימן כחול הוערך מחיר המימן ב-1.75$/kg.[96] ההנחה היא כי עלות זו משקפת את כל תהליכי המרת הגז הטבעי למימן ותפיסת הפחמן והטמנתו, ואין צורך להתייחס לשלבים אלו בנפרד.

מדד ה-LCOE מכליל את **עלויות ייצור החשמל בלבד**, אך ישנם מספר משתנים נוספים שעשויים להיות משמעותיים בחישוב **העלות המשקית** כגון: עלות החיבור לרשת החשמל, מרחק מאזורי הביקוש שמטיל עלות נוספת בעיבוי רשת ההולכה, שיקולי מיסוי, מינוף ובדומה. כמו כן, בתרחישים שנבחנו ישנן עלויות נוספות במגזרים משלימים של משק האנרגיה כגון מגזר הדלקים והגז הטבעי. משתנים אלו עשויים להשפיע באופן משמעותי על העלות המשקית לתרחישים, אולם קשה להעריך גורמים אלו בשלב זה, ובוודאי ביחס למאפיינים הייחודים של ישראל.

4.2. הנחות המודל

בנספח ג' מפורטות הנחות היסוד ששימשו לחישוב מגמות הביקוש לשירותי האנרגיה השונים. להלן יובאו תיאורים והסברים להנחות העבודה המרכזיות ששימשו להכנת המודל.

4.2.1. התייעלות באנרגיה

האנרגיה הנקייה והזולה ביותר היא זו שאינה נצרכת מלכתחילה – להתייעלות בשימוש באנרגיה יש חשיבות גדולה במאמץ לאיפוס הפליטות

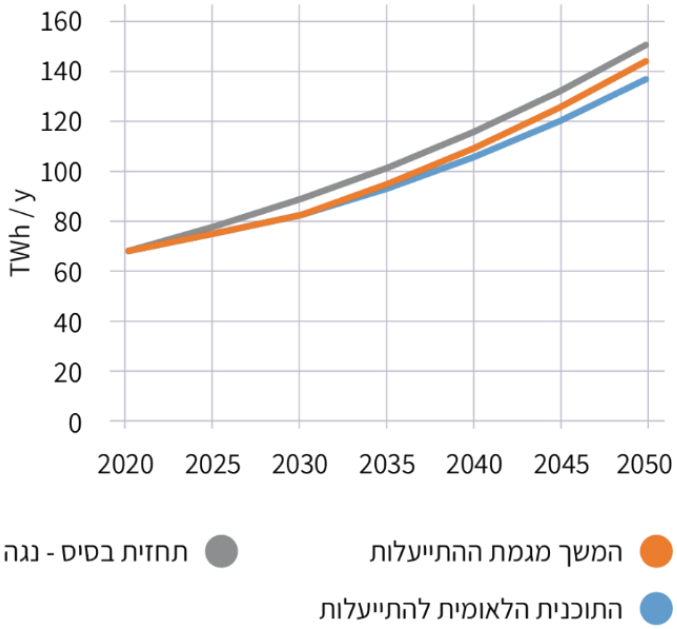
האנרגיה הנקייה והזולה ביותר היא זו שאינה נצרכת מלכתחילה. להתייעלות באנרגיה יש חשיבות גדולה הן בצד ההפחתה הישירה של הפליטות, הן בצד הקטנת עלויות האנרגיה ושחרור משאבים להפחתת הפליטות, אך גם בהקטנת הצורך להשקעות הון בטכנולוגיות האיפוס. כך למשל, הפחתת הביקוש לחשמל תקטין את השטח ואת העלויות שיידרשו להקמת מערכות סולאריות שישמשו להפקת החשמל. בישראל, בה יש גידול משמעותי בביקוש לחשמל, קיימת חשיבות יתרה להתייעלות באנרגיה המהווה כלי משמעותי להפחתת הביקושים.

במודל הונח כי תהיה התייעלות בשימוש בחשמל, וזאת בנוסף להתייעלות ה"טבעית" הנובעת מכך שעם הזמן מוצרי החשמל הופכים יעילים יותר. על פי "התוכנית הלאומית להתייעלות באנרגיה"[97] עד לשנת 2030 יושג חיסכון של 6.5TWh בשנה, בכל שנה, דהיינו קצב של 0.72TWh התייעלות נוספות בכל שנה. בכדי להעריך את החיסכון עד לשנת 2050, ומתוך מחשבה כי בעשור הקרוב ימוצו הערוצים הפשוטים והזולים להפחתה ("הפירות הנמוכים"), הונח כי קצב ההתייעלות ירד לאחר שנת 2030 לכדי מחצית ויעמוד על 0.36TWh התייעלות נוספת בכל שנה, ובכך יגיע לחיסכון של 13.7TWh בשנת 2050 מתחת לתחזית הבסיס. חיסכון זה של 13.7TWh בשנה שווה ערך לחיסכון בהקמת שדה סולארי בן 8,250 מ"ו ששטחו 70-80,000 דונם – **יותר מכל ההספק הסולארי שמותקן כיום בישראל**.

[96] ממוצע התחזיות של בלומברג וגולדמן-זקס.

[97] התוכנית הלאומית להתייעלות באנרגיה, משרד האנרגיה והתשתיות (2020), https://www.gov.il/he/departments/news/energy_2030

תרשים 32: מתווה ההתייעלות בביקוש לחשמל



בכחול תחזית הבסיס של חברת נגה, בכתום מתווה ההתייעלות על פי התוכנית הלאומית להתייעלות – שתשיג הפחתה של 6.5TWh בשנה מתחזית נגה עד לשנת 2030, ובאפור מגמת המשך ההתייעלות לאחר תום התוכנית הלאומית, להשגת הפחתה של 13.7TWh בשנה מהתחזית עד לשנת 2050.

4.2.2. מס פחמן

מס פחמן הינו כלי כלכלי מרכזי וגלובלי להפחתת פליטות גזי חממה. מיסוי מושת על הגופים הפולטים גזי חממה, ומייצר הפנמה במחיר הסחורות של העלויות החיצוניות. בכך, הוא מתמרץ באופן טבעי מוצרים מתחרים מופחתי פליטות. בישראל מיושם מס פחמן החל מינואר 2025 במתווה מדורג, כאשר המס עולה מידי שנה עד לגובהו המלא שיושג בשנת 2030.

מס הפחמן בישראל לא ממסה את הפליטות עצמן אלא את הדלקים והגזים הפוסיליים (בדומה למס הבלו), בהתאם לתחשיב של כמות הפד"ח שיפלט בשימוש בדלקים וגזים אלו בשריפה. גופים שתופסים או מפחיתים את פליטות הפד"ח ידרשו לפנות למשרד הכלכלה לקיזוז המס ששולם.

מתווה המס הקיים בישראל אינו משקף את מלוא העלויות החיצוניות, ונמוך בכ-60% מעלות הפליטות במערכות סחר בינ"ל בפליטות כגון ה-ETS האירופאית. כתוצאה מכך, התמריץ בישראל להפחית ולתפוס פליטות פד"ח הינו נמוך ואינו משתווה לעלויות הגבוהות של תהליכי ההפחתה. יתכן כי מחירי הפליטות המאמירים באירופה, יחד עם הלחץ המופעל באמצעות מנגנון התאמת מס הגבולות (CBAM), יובילו בטווח הארוך לעליית מס הפחמן בישראל.

מודל הביקושים הנוכחי לא לקח בחשבון את התרומה הצפויה למס הפחמן בהפחתה ותפיסת פליטות פד"ח. עם התקדמות מתווה היישום ניתן יהיה לבחון את ההשפעה של המס על הפליטות והשימוש במקורות מתחדשים ולעדכן את המודל בהתאם.

4.2.3. ניתוחים עתידיים

עקב התמורות המהירות בתחום האנרגיה בעולם יהיה צורך לשוב ולבחון את הנחות המודל באופן תקופתי. כמו כן, בעדכונים עתידיים יתווסף מודל כלכלי מקיף יותר שיפנים היבטים רחבים של משק האנרגיה. ראוי לציין גם כי המדדים הכלכליים אינם קנה המידה היחיד לבחינת תרחישי הפעולה השונים. לתרחישים השונים ישנן השפעות סביבתיות, ביטחוניות, גיאו-פוליטות, וחברתיות, שיש קושי לחשב את עלותן אך גם הן נלקחות ויילקחו בחשבון. בראייה הגלובלית ניתן להרחיב את החישוב לניתוח מחזור חיים מלא (LCA) הכולל גם את העלויות וההשפעות החיצוניות לאורך שרשרת האספקה וכן בסוף חיי המתקן.

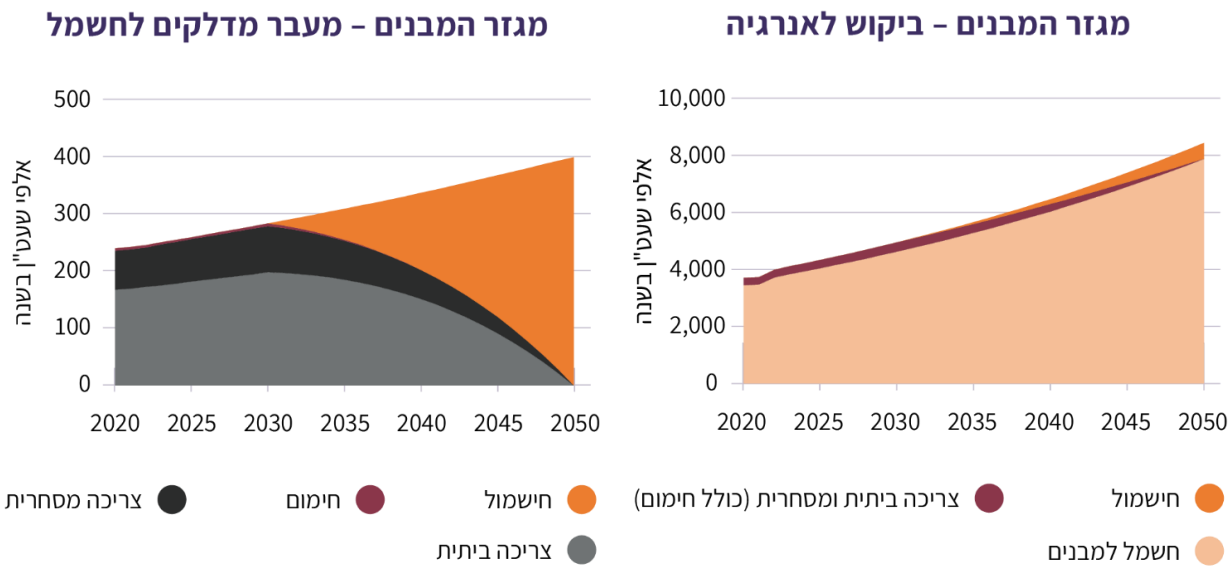
4.3. הביקושים לאנרגיה במגזרים השונים

בפרק זה נסקור את מגזרי המשק השונים ונתאר את המתודולוגיה ששימשה לחישוב הביקושים לאנרגיה בכל אחד מהמגזרים.

4.3.1. מגזר המבנים - ביתי, מסחרי וציבורי

בשנת 2022 89% מסך צריכת האנרגיה במגזר המבנים הייתה בחשמל והיתר בגפ"מ (גז לבישול או חימום) וסולר (לחימום).[98] עם זאת, במגזר זה חימום המים נעשה ברובו על-ידי דוודי שמש ובכך נחסכים חשמל או גפ"מ לחימום מים. כרגע אין מדיניות ממשלתית לעידוד מעבר לחשמל במגזר המבנים, אך שימוש הולך וגובר בכיריים חשמליים לבישול, משאבות חום לחימום מבנים ומעבר לבנייה לגובה המקשה על השימוש בדוודי שמש, יביאו בכל הנראה לעלייה בביקוש לחשמל במגזר זה. מגמה זו ניכרת כבר כיום – בחמש השנים האחרונות צריכת החשמל במגזר המבנים גדלה מ-86% ל-89%, במקביל להפחתת השימוש בגפ"מ מ-14% ל-11%.[99] לאור זאת, במודל הביקושים הונח כי יהיה מעבר הדרגתי לחשמל עד שנת 2050.

תרשים 33: מעבר הדלקים במגזר המבנים מגפ"מ ודלקים לחשמל



מימין כלל הביקוש למוצרי אנרגיה במגזר המבנים כולל חשמל. מימין ניתן לראות את המעבר מדלקים (אפורים) לחשמל (תכלת). משמאל, פירוט ממוקד על מעבר השימוש מדלקים לחשמל במגזר המבנים.

4.3.2. מגזר התעשייה

ביום מגזר התעשייה עושה שימוש בגז טבעי כמקור אנרגיה עיקרי, והוא מהווה כ-20% מהביקוש לגז טבעי במשק המקומי. מגמות צריכת הגז הטבעי במגזר זה שונות. מחד, ישנו גידול קבוע בצריכה עקב פתיחה וחיבור של מפעלים חדשים ולעיתים אף גידול בצריכה של מפעלים קיימים. מאידך, מגמת החשמול לא פוסחת גם על מגזר זה וחלקים הולכים וגדלים בו מסיטים את צריכת הדלקים לחשמל. עם זאת, פלח משמעותי בתעשייה עדיין יזדקק לדלקים ולא יוכל להסתמך על חשמל. זאת, בין היתר, בשל הטמפרטורות הגבוהות בהם מפעלים אלו עובדים אשר לא ניתן לספקם ע"י אנרגיה חשמלית.

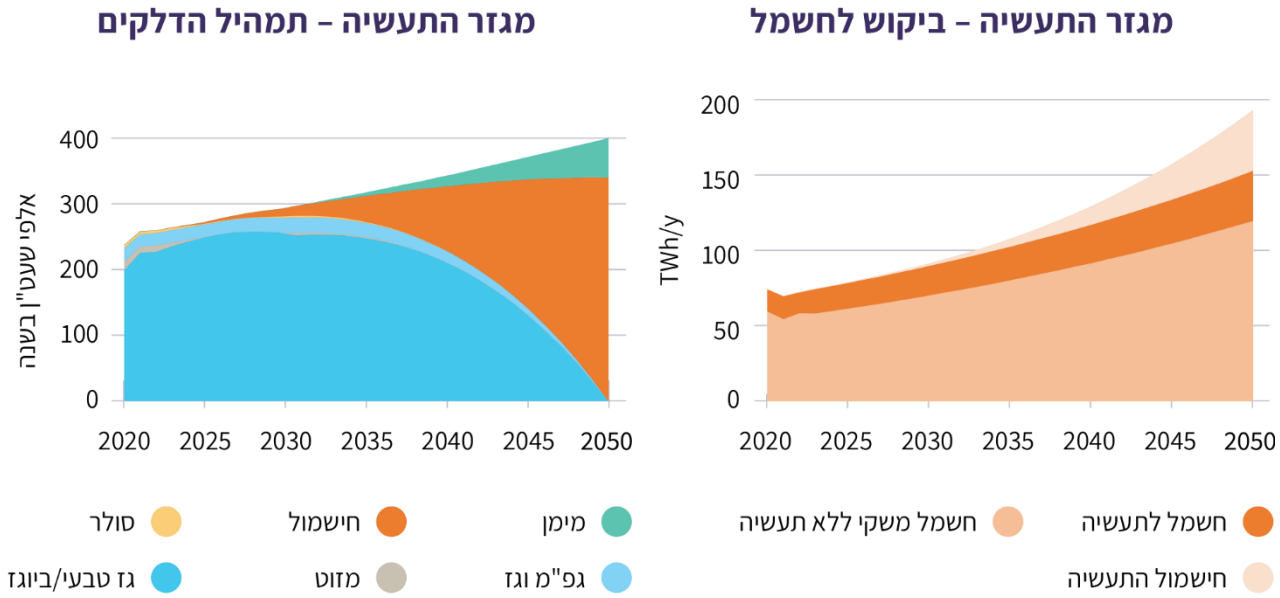
במגזר התעשייה נערכה הפרדה בין צריכת החשמל שיש כיום בתעשייה, שהונח כי היא משמשת להפעלת ציוד, לבין צריכת הדלקים בתעשייה אשר משמשים לייצור חום. כמו כן, לא הוכללו מוצרי פטרוכימיה (נפטא, בנזין וגז טבעי) אשר מהווים חומרי גלם לתעשייה. על מנת לבחון מתווים לאיפוס פליטות חושבה כל צריכת הדלקים אשר משמשים

[98] צריכת האנרגיה אינה כוללת את האנרגיה המתקבלת מדוודי שמש.

[99] עיבוד נתונים של משרד האנרגיה לגבי צריכת דלקים וחשמל במגזר המבנים.

לייצור אנרגיית חום והונח כי היא תוסב לחשמל או למימן באותו הערך הקלורי. למגזר זה, על בסיס נתוני עבר, נמצא גידול בצריכת החום של 1% בשנה. במודל הונח שלא יהיה גידול מיוחד בתעשייה המסורתית הדורשת בעיקר חום ולכן הצמיחה תישאר 1% בשנה. לגבי רכיב **צריכת החשמל** בתעשייה, הונח כי הוא ישמור על חלקו היחסי בביקוש המשקי לחשמל, דהיינו ימשיך לגדול עם כלל הגידול בביקוש לחשמל בקצב של 2.7% בשנה.

תרשים 34: מעבר הדלקים בתעשייה משימוש מרכזי בגז טבעי ודלקים, לחשמל ומימן



מימין תוספת הביקוש לחשמל לתעשייה ומשמאל פירוט ממוקד של תמהיל צריכת הדלקים בתעשייה במעבר מדלקים לחשמל ומימן.

יש לציין כי עבור חימום ניתן להשתמש באנרגיית שמש באמצעות קולטים תרמו-סולאריים (לחימום מים או שמן). קולטים אלו יעילים יותר מקולטים פוטו-וולטאיים, ולכן צורכים פחות שטח לקבלת אותה כמות אנרגיה. כמו כן ניצול חום שיורי מתהליכים תעשייתיים יכול להקטין אף הוא את צריכת הדלקים והחשמל ולהפחית את הפליטות.

בהסבת תהליכים תעשייתיים לחשמל יש להתחשב בעובדה שהפליטות כיום ממשק החשמל הן עדיין יחסית גבוהות – לקבלת 1 קוט"ש חום משריפת גז טבעי יפלטו כ-200 גר' פד"ח, בעוד משק החשמל בישראל פולט 591 גר' פד"ח לקוט"ש.[100] שימוש במשאבת חום יעילה, יאפשר להקטין את הפליטות, ואת העלויות, כבר כיום אל מתחת לאלו של גז טבעי. סביב שנת 2035, כאשר תמהיל הדלקים במשק החשמל יהיה כ-60% גז טבעי ו-40% מתחדשות, ישתוו הפליטות בין שריפה ישירה של גז טבעי לשימוש ישיר בחשמל לחימום. יש לזכור כי מתקן תעשייתי חשמלי שיוקם בשנת 2025 יפעל במשך 30-40 שנים, כך שגם אם בשנים הראשונות הפליטות תהיינה גבוהות מאשר בשריפת גז טבעי, הרי שלאורך חייו הוא ישיג חיסכון משמעותי.

4.3.3. תחבורה יבשתית ונסועה

הנסועה השנתית הממוצעת של כלי רכב פרטיים מונעי בנזין הינה כ-15 אלף ק"מ בשנה.[101] ככלל, הנסועה מושפעת ממגוון משתנים אך הגורמים העיקריים הם כמות כלי הרכב (לדוגמא, רכישה של רכב שני למשפחה מגדילה את מספר כלי הרכב אך מאחר שלרוב השימוש בו נמוך מהרכב הראשון, הנסועה הממוצעת יורדת), וחלופות לרכב הפרטי כגון תחבורה ציבורית, תחבורה שיתופית, שבילי אופניים ועוד. בשל אי הוודאות הרבה במשתנים אלו, הונח כי טווח הנסועה הממוצעת יהיה בין 14 אלף ל-17 אלף ק"מ בשנה בתרחישים הנמוך והגבוה בהתאמה.

[100] חברת החשמל לישראל, דין וחשבון סביבתי 2023.
[101] הלמ"ס, דו"ח נסועה לשנת 2022, לוח 7.

בבניית התחזית למספר כלי הרכב עד לשנת 2050 קיימות שתי מגמות מנוגדות. מחד, מספר המכוניות גדל אף מהר יותר מגידול האוכלוסייה, ולכן רמת המינוע בישראל[102] נמוכה ביחס למקובל במדינות מפותחות. מאידך, כבר כיום תשתיות התחבורה עמוסות, ובמקביל להקמת רשת התחבורה הציבורית במטרופולינים (רכבות קלות, מטרו וכו') ולהקטנה של תקני החנייה במבנים חדשים סביר כי רמת המינוע תקטן. משכך, ולמרות המגמה הנוכחית, קשה לדמיין כי מגמת הגידול במספר כלי הרכב תימשך עוד זמן רב.

צריכת הדלקים העתידית חושבה על פי הנוסחה להלן:

מספר כלי רכב × נסועה ממוצעת שנתית לכלי רכב × צריכת אנרגיה לק"מ

עקב אי הוודאות בחיזוי של כל אחד מהפרמטרים הללו העבודה מתייחסת לשלושה ערכים – גבוה, מרכזי ונמוך ביחס לכל אחד מהפרמטרים. בניתוח ממצאי המודל נלקח לרוב הערך המרכזי.

במגזרי התובלה והתחבורה הציבורית הונח כי מגמות הגידול הנוכחיות תימשכנה תוך מעבר משימוש בסולר לחשמל ולמימן. בתחום האוטובוסים העירוניים המודל מתבסס על יעדי הממשלה[103] הקובעים כי החל משנת 2026 האוטובוסים העירוניים החדשים שיירכשו יהיו נקיים בלבד. האוטובוסים הבין-עירוניים והפרטיים יעברו תחלופה באופן איטי יותר, אך מלאי האוטובוסים כולו יהיה נטול פליטות עד לשנת 2050. עבור המשאיות הונחה כניסה איטית של משאיות נקיות, וכן, יעדי הממשלה,[104] לפיהם החל משנת 2035 לפחות 50% מכלי הרכב שייובאו לישראל מעל 3.5 טון יהיו נקיים - דהיינו חשמליים או מבוססי מימן. בהתייחס לקצב התחלופה של כלי הרכב הכבדים (ברובם המכריע משאיות), לא יתאפשר להחליף את כל מלאי המשאיות לנקיות עד לשנת 2050, ועל פי ממצאי המודל גם בשנה זו יישארו משאיות עם מנועי בעירה פנימית. לצורך השגת יעד איפוס הפליטות הונח כי משאיות אלו יתודלקו בסולר סינתטי שאינו גורם לפליטות פד"ח תוספתיות לאטמוספרה, ולחלופין יבוצע "קיזוז פליטות" או תפיסה של הפליטות במקור.

להלן תקציר ההנחות בנוגע לביקושים לאנרגיה במגזר התחבורה והנסועה בשנת 2050 (לפירוט מלא ראו נספח ג'):

בענף התחבורה הפרטית: עד לשנת 2050, כל כלי הרכב בישראל יהיו חשמליים (Battery Electric Vehicles – BEV).

בתחום התחבורה הכבדה: אוטובוסים עירוניים ומשאיות קלות **יוסבו במלואם** להנעה נקייה, בעיקר חשמל, עד לשנת 2050. אוטובוסים בין-עירוניים ומשאיות בינוניות וכבדות כנראה לא יעברו במלואם להנעה נקייה – בחלקם יונעו בחשמל או במימן (באמצעות תאי-דלק Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV-), אך **יתכן וגם בשנת 2050, בדומה להערכות מדינות נוספות השואפות לאיפוס, עדין יוותרו כלי רכב מונעים בדלקים פוסיליים.** בכדי לצמצם את הפליטות במגזר זה ניתן להשתמש בתחליפי דלקים נקיים (סינתטיים או ביולוגיים). כיום דלקים אלו יקרים יחסית, אך עד לשנת 2050 צפוי כי מחיריהם ירדו.

בענף התעופה, שהוא קשה במיוחד להפחתת פליטות, הונח תמהיל דלקים שנחלק בין דלקים סינתטיים לדלקים ביולוגיים עם חלק משמעותי שישאר מבוסס קרוסין: SAF סינתטי 35%, SAF ממקור ביולוגי 30%, חשמל 5%, מימן 5% וקרוסין 25%.[105]

בענף הספנות, שגם הוא קשה להפחתה, נלקחו תחזיות בין-לאומיות שנעות בין העדפת דלקים סינתטיים כגון e-Methanol לבין העדפת אמוניה: אמוניה 60%, מתנול 25%, מימן 5%, מזוט 10%.[106]

---

[102] רמת המינוע הינה מספר המכוניות למשק בית.

[103] ראו החלטת ממשלה מספר 171 מיום 25.7.2021 בנושא "מעבר לכלכלה דלת פחמן".

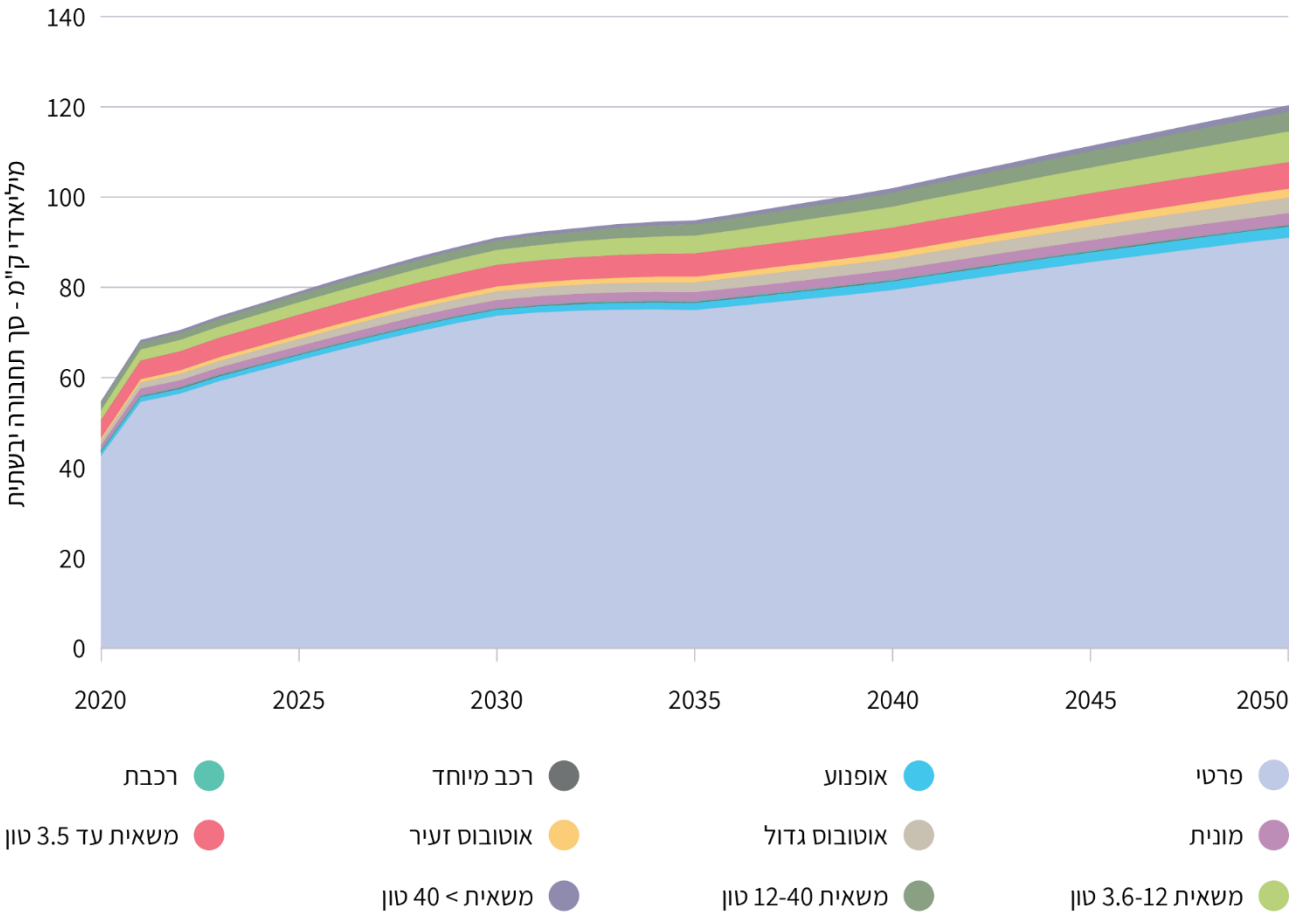
[104] ראו החלטת ממשלה מספר 542 מיום 24.10.2021 בנושא " קידום תחבורה נקייה ודלת פחמן".

[105] מבוסס על תרחיש חברת הייעוץ הבינלאומית DNV: Pathway to Net Zero Emissions, 2023.

[106] שם

להלן פירוט התחזית לנסועה הכוללת של כלי הרכב הקרקעיים. הנסועה מחושבת על פי המכפלה בין כמות כלי הרכב הצפויה בכל קטגוריה לבין הנסועה השנתית הממוצעת לכלי רכב:

תרשים 35: תחזית סך הנסועה בכלי הרכב מהסוגים שנבדקו עד לשנת 2050

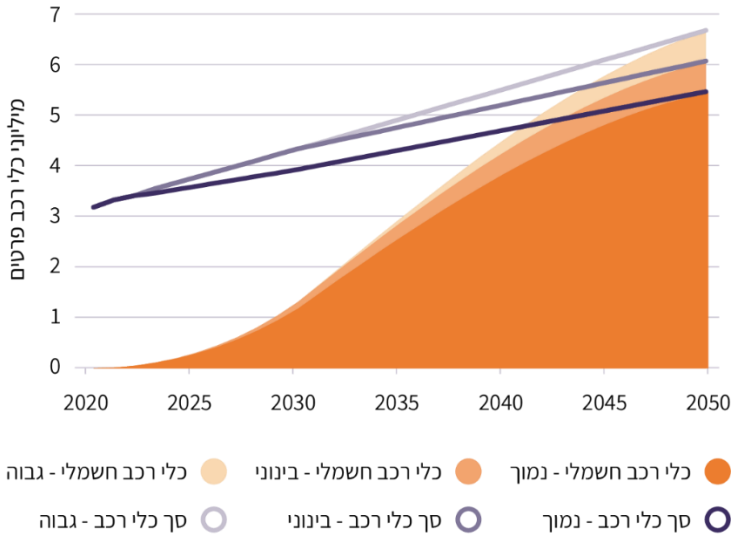


בתרשים מעלה ניתן לראות את העלייה ארוכת הטווח בביקוש לנסיעות פרטיות, לתובלה ולתחבורה ציבורית, לעומת הנסועה באוטובוסים זעירים ובמשאיות כבדות שיעלו מעט מאד, אם בכלל.[107]

עקב אי הוודאות בהערכת מגמות הצמיחה העתידיות במכוניות הפרטיות, נבחנו מספר תרחישים לכמות כלי הרכב והנסועה. בתרשים 36 להלן ניתן לראות שלושה תרחישים לתחבורה הפרטית – נמוך, מרכזי וגבוה (בקווים הכחולים) – במקביל לכמות כלי הרכב החשמליים מתוך כלל הרכבים (בשטחים הכתומים). בתרחיש הנמוך סך כלי הרכב הפרטיים יגיע עד לכ-5.4 מיליון כלי רכב בשנת 2050 ובתרחיש הגבוה 6.6 מיליון. כאמור, בעבודה זו נלקח התרחיש המרכזי המגיע ל-6 מיליון כלי רכב פרטיים בשנת 2050. התחבורה הפרטית בכל התרחישים תגיע ל-100% חישמול עד לשנת 2050.

[107] ניראה כי הנסועה במשאיות עד 3.5 טון עולה בקצב איטי מבשאר המגזרים אך הדבר נובע משינוי רישומי בלמ"ס בקטגוריה זו ואינו משקף נכונה את המציאות.

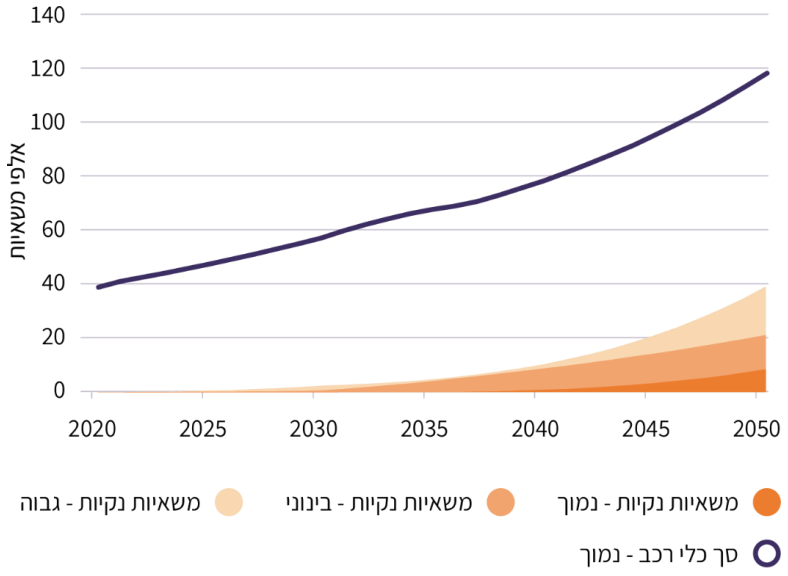
תרשים 36: המעבר למכוניות חשמליות במגזר הרכב הפרטי



בתרשים מוצגים תרחישי הביקוש – גבוה, מרכזי ונמוך. ניכר כי בכל התרחישים משיגים תחלופה מלאה לרכב חשמלי עד לשנת 2050.

באופן דומה נותחו גם מגזרי המשאיות השונים וכלי הרכב הציבוריים. בניתוח נמצא כי ככל שמדובר בכלי רכב כבדים יותר, הטכנולוגיות תחליפיות לדלקים הפוסיליים יכנסו מאוחר יותר וההחלפה תארך זמן רב יותר, וככל הנראה לא יתרחש מעבר מלא מדלקים לחשמל או מימן עד לשנת 2050.

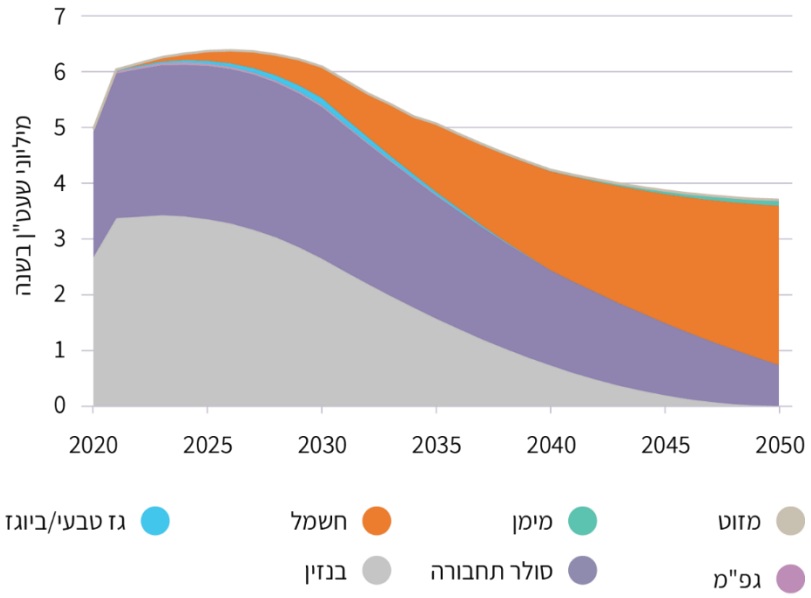
תרשים 37: מספר כלי הרכב הנקיים במגזר המשאיות הכבדות



בתרשים מתואר סך המשאיות הכבדות (מעל 12 טון) והמעבר להנעה נקייה – חשמל ומימן – בתרחיש המרכזי. ניתן לראות כי במגזר זה לא תושג תחלופה מלאה לרכבים נקיים עד לשנת 2050.

כך, למשל, בתרשים 37 לעיל, ניתן לראות כי במגזר המשאיות הכבדות, מעל 12 טון, המעבר לכלי רכב מבוססי חשמל או מימן יחל רק סביב שנת 2030 ויעלה באיטיות עד לשנת 2050, כך שככל הנראה לא יהיה מעבר מלא למקורות אנרגיה חליפיים עד לשנת 2050. בכדי להשיג את יעד איפוס הפליטות יהיה צורך להשתמש בדלקים סינתטיים במנועי הדיזל או ליישם תהליכים שיסירו מהאטמוספרה את הפד"ח הנפלט (ראו הרחבה בהמשך).

תרשים 38: צריכת הדלקים לתחבורה יבשתית



ניכרת הירידה בכלל האנרגיה הנצרכת עם המעבר לחשמל חרף עלייה מתמדת בביקוש לנסועה, וזאת עקב היעילות הגבוהה של הנעה חשמלית.

בתרשים 38 מתוארת התחלופה בדלקים בכלל מגזר התחבורה היבשתית. ניתן לראות את הירידה בשימוש בדלקים מול העליה המהירה בשימוש בחשמל ומעט במימן. יש לציין כי בשיאם, הביקוש לדלקים יעמוד על מעל 6.1 מיליון שעט"ן בשנה, כאשר בשנת 2050 סך האנרגיה לתחבורה יעמוד על כ-3.5 מיליון שעט"ן בלבד **למרות המשך מגמת העלייה בנסועה,** זאת בשל היעילות הגבוהה של השימוש בחשמל ביחס למנועי הבעירה הפנימית.

במגזר הרכבות נכללות הרכבות הכבדות (רכבת ישראל), הרכבות הקלות והמטרו. בניתוח הרכבות הכבדות המודל מבחין בין רכבות נוסעים לרכבות משא ומתבסס על יעדי הפיתוח והנסועה כפי שפורסמו בתכנית האסטרטגית של רכבת ישראל עד שנת 2040.[108] על פי התכנית, עד לשנת 2025 יחושמלו כ-90% מכלל המסילות המשמשות את רכבות הנוסעים. עבור הרכבות הקלות החישוב התבסס על נתוני ממוצע נסועה תקופתי לק"מ. התחשיב העתידי התייחס לתוספת המסילות המתוכננות באזורים ירושלים, גוש דן וחיפה. תחשיב המטרו התבסס על תחזיות משרד התחבורה לצריכת החשמל של המטרו בגוש דן.

על בסיס התכנית האסטרטגית של רכבת ישראל חושבה הנסועה השנתית הצפויה לרכבות נוסעים, יחד עם הנחה על צריכת החשמל הממוצעת, חושבה צריכת האנרגיה הצפויה עבור רכבות הנוסעים. עבור רכבות המשא הונח שהגידול בנסועה יהיה דומה לגידול בתמ"ג (3.5% בשנה), ומכאן חושבו כמויות הדלקים.

הנסועה השנתית של הרכבת הקלה הינה נגזרת של אורך הקווים בכל עיר. בנוסף הונח כי צריכת החשמל הממוצעת היא כ-15 קוט"ש לק"מ על בסיס ממוצע נתונים תפעוליים של הקו האדום של הרכבת הקלה בירושלים. כמו כן הונחה התייעלות של 10% בצריכת החשמל עד לשנת 2050.

באמור, במגזר הרכב הפרטי והמשאיות הקלות ניתן יהיה להגיע לאיפוס הפליטות על-ידי מעבר מלא של צי הרכב לחשמל או מימן עד לשנת 2050, אולם בתחום התחבורה הכבדה (משאיות ואוטובוסים) המעבר יהיה איטי מידי וכנראה לא יושלם עד לשנת 2050. בכדי לאפשר איפוס מלא של הפליטות מכלל מגזר התחבורה ניתן יהיה ליישם מספר ערוצים:

- **שימוש בדלקים סינתטיים:** דלקים סינתטיים מופקים מפד"ח שנתפס מהאוויר ומימן ממקור נקי. כמות פד"ח הנפלטת בשריפת דלקים שווה לכמותה הנפלטת בתהליך הפקת הדלק, ולכן בתהליכי הייצור והשימוש בדלק

[108] ראו תכנית חישמול רכבת ישראל, באתר הרכבת.

יש אפס פליטות **נטו.** באמצעות תהליכים כימיים ניתן להפוך את הפד"ח והמימן לנוזל הדומה בתכונותיו לדלק הפוסילי. טכנולוגיות אחרות להפקת דלקים סינתטיים כוללות טיפולים תרמו-כימיים לפסולת, פלסטיק וחומרים אורגניים אחרים. כיום טכנולוגיות תפיסת הפד"ח מהאוויר, הפקת המימן הנקי, וייצור הדלקים הסינתטיים יקרות מאד ואינן מסחריות ליישום בקנה מידה רחב.

- **שימוש בדלקים ביולוגיים:** מאחר שצמחים קולטים פד"ח מהאטמוספרה, ניתן לייצר מהחומר האורגני נוזלים המהווים תחליף לדלקים הפוסיליים. בדומה לדלקים הסינתטיים, גם לדלקים אלו יש נטו אפס פליטות פד"ח. ענף זה מתקדם יותר מהפקת דלקים סינתטיים אך הוא דורש הסבה של שטחי חקלאות עצומים לגידול צמחים המתאימים לדלקים על חשבון גידולים חקלאיים או פיתוח שיטות לניצול פסולת חקלאית לייצור דלקים (לדוגמה Cellulosic ethanol[109]). בשלב זה לא ברור אם יבשילו שיטות אלו, עד כמה ניתן יהיה להסב שטחים חקלאיים לדלקים, והאם יש מספיק שטחים ומים נקיים בעולם לאספקת דלקים ביולוגיים לכלל הצרכים הגלובליים העתידיים. בישראל כבר כיום קיים מחסור בשטחי חקלאות ובמים והסבת שטחים לצמחי דלקים עלולה לפגוע בביטחון המזון. היות וכך, הנחנו כי שימוש בדלקים ביולוגיים בישראל, ככל ויתקיים, יתבסס על דלקים מיובאים.
- **המשך שימוש בדלקים מחצביים תוך קיזוז הפליטות:** אפשרות נוספת היא המשך שימוש בדלקים פוסיליים הפולטים פד"ח לאטמוספרה, אך במקביל ליישם פרויקטים הקולטים פד"ח בכמות שווה מהאטמוספרה, כדוגמת נטיעת יערות או תפיסת פד"ח מהאוויר באמצעים טכנולוגיים, להשגת "נטו אפס" פליטות. המנגנונים הבין-לאומיים המסדירים ומוודאים את תהליכי קיזוז הפליטות עדיין נמצאים בדיונים ובתהליך כתיבה ובמקביל עומדים בפני ביקורת קשה.[110]

4.3.4. ספנות

ענפי התעופה והספנות מתמודדים עם אתגר קשה אף יותר מהתחבורה הכבדה. המשקל והנפח של סוללות חשמליות או מכלי אגירה למימן, שידרשו לאחסון כמות האנרגיה המשמשת לטיסות טראנס-אטלנטיות או לשייט של ספינת סחר, הינם עצומים וידרשו פיתוחים טכנולוגיים דרמטיים בכדי לאפשר תעופה וספנות המבוססות על מקורות אנרגיה אלו.

בעולם הספנות, בו נפח מהווה אתגר קטן יותר מאשר בתחום התעופה, ניתן יהיה להשתמש באמוניה – שצפיפותה נמוכה ולכן דורשת נפח גדול. להבדיל מדלקים מחצביים המורכבים מפחמן ומימן, אמוניה מורכבת מחנקן ומימן, ולכן שריפתה אינה גורמת לפליטת פד"ח אלא רק לפליטה של חנקן (70% מהאטמוספרה מורכבת מחנקן) ואדי מים. עקב כך אמוניה נחשבת כיום כפתרון אפשרי לעולם הספנות, אולם אמוניה הינה רעילה וכן תהליכי הפקתה ממימן ומהחנקן באוויר עדין אינם יעילים מספיק וייקח זמן רב עד שיתאפשר להפיק אמוניה ירוקה במחיר סביר ובכמויות הנדרשות לצרכי הספנות הגלובליים. ערוצים טכנולוגיים מקבילים הם שימוש בדלקים סינתטיים וביולוגיים כפי שתואר לעיל, ושימוש בחשמל או במימן לנתיבים קצרים יחסית.

4.3.5. תעופה

בעולם התעופה המגבלות מאתגרות יותר, מאחר שגם נפח וגם משקל מהווים גורמים מגבילים. קיימים ניסיונות לפתח מטוסים המונעים בחשמל או מימן לטווחים הקצרים, אך נראה כי בטווחים הבינוניים והארוכים יוותרו מנועי סילון מבוססי דלקים עד לשנת 2050 ומעבר לה. לכן, איפוס הפליטות במגזר זה יתבסס גם הוא על דלקים סינתטיים וביולוגיים. היות וישראל תלויה במגמות העולמיות בתחומים אלו, מגמות המעבר לדלקים נקיים מתבססות על דוחות בינלאומיים בנושא.[111] בתרשים להלן ניתן לראות את המתווה למעבר הדלקים בענפי התעופה והספנות על פי

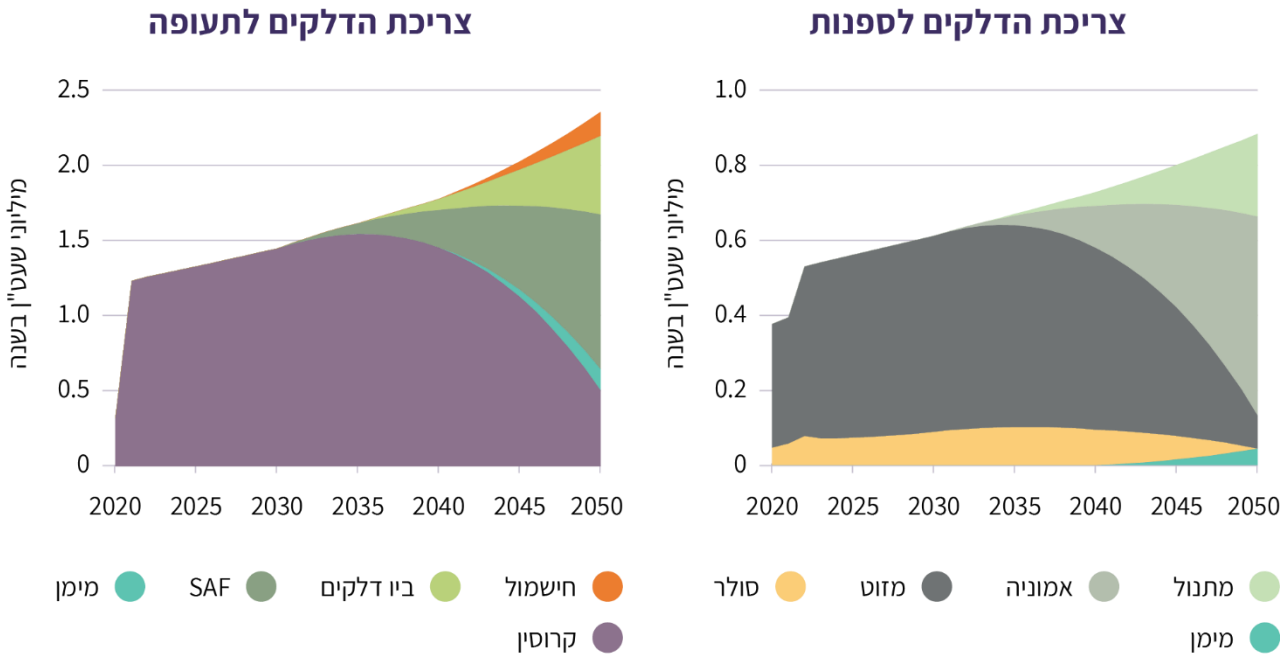
[109] https://www.ctc-n.org/technologies/cellulosic-ethanol

[110] ראו לדוגמא:
Revealed: more than 90% of rainforest carbon offsets by biggest certifier are worthless, analysis shows, The Guardian 18/1/2023.

[111] בין השאר: IEA Net Zero by 2050, DNV Hydrogen Forecast to 2050, DNV Pathway to Net Zero Emissions.

התרחישים שתוארו לעיל. ניתן לראות כי גם בשנת 2050, למרות השימוש הגובר בדלקים נקיים, עדין צפוי שימוש משמעותי בדלקים פוסיליים.

תרשים 39: המתווה למעבר דלקים במגזרי הספנות והתעופה

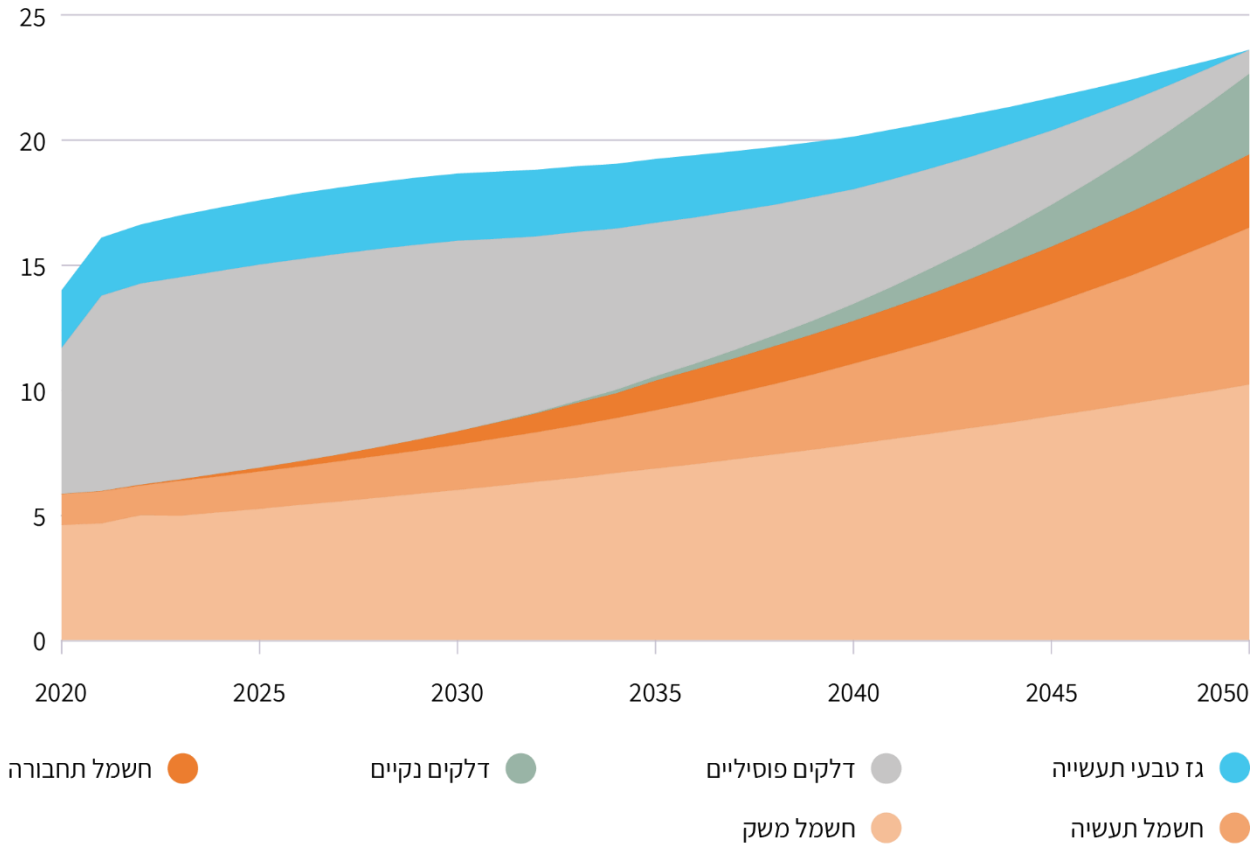


ניתן לראות כי למרות מעבר משמעותי לדלקים נקיים (סינתטיים וביולוגיים), גם בשנת 2050 יוותר שימוש ניכר בדלקים פוסיליים. בגרף הימני, צריכת הדלקים לספנות, ניכר ביקוש נמוך לדלקים בשנים 2020, 2021, כתוצאה מהקטנת הפעילות הכלכלית בעקבות מגפת הקורונה והמשבר בשרשראות האספקה שלאחריה.

4.4. הביקוש המצרפי למקורות אנרגיה

לאחר תחשיב הביקוש בכל אחד מהמגזרים, סוכמו הביקושים לפי מקורות האנרגיה השונים כפי שמתואר בתרשים להלן:

תרשים 40: צריכת האנרגיה במשק 2020-2050 על פי מודל הביקוש בתרחיש חישמול מקסימלי



בתרשים ניתן לראות את המגמות המסתמנות בביקושים לאנרגיה: צריכת החשמל למשק תגדל ואליה תתווסף צריכת חשמל לתחבורה ולתעשייה. בהתאם למודל, עד לשנת 2050, הביקוש לחשמל צפוי לגדול עד לכ-19.2 מיליון שעט"ן בשנה (כ-220 TWh) – למעלה מפי 3 מהביקוש לחשמל היום. לצד זאת, מגזר הדלקים, המשמש בעיקר לתחבורה ולתעשייה, ילך ויצטמצם ויגיע כמעט לאפס בשנת 2050 (אך לא יאופס לחלוטין). במקביל לחישמול התחבורה והתעשייה יתפתחו מגזרים נוספים של תחליפים לדלקים הפוסיליים – מימן, דלקים סינתטיים וביו-דלקים. עקב המעבר מדלקים לחשמל, שהוא יעיל יותר בשימוש באנרגיה, הגידול בסך צריכת האנרגיה הינו מתון יחסית, אך הגידול במגזר החשמל הינו מהיר מאד ויגדל בכ-230% עד לשנת 2050 – כך, סך הביקוש לאנרגיה יעלה מכ-16.4 מיליוני שעט"ן בשנת 2022 לכ-23.6 מיליוני שעט"ן בשנת 2050, הביקוש המשקי לחשמל יעלה מכ-6.1 מיליוני שעט"ן בשנת 2022 לכ-19.2 מיליוני שעט"ן בשנת 2050, משק הדלקים יצטמצם מכ-7.9 מיליוני שעט"ן בשנת 2022 ל-0.9 מיליוני שעט"ן דלקים פוסיליים בשנת 2050 בתוספת של כ-2.7 שעט"ן דלקים נקיים, ועל כל אלה יתווספו כ-0.9 מיליוני שעט"ן מימן.[112]

בפרק זה סקרנו את המתודולוגיה של המודל, המגזרים שנבחנו, וההנחות שהונחו- הן בצד הביקוש והן בצד ההיצע. משילוב כל אלה, נוצר תרחיש ביקוש מצרפי לאיפוס פליטות במשק האנרגיה. בפרק הבא של העבודה נעבור לבחינת הדרכים להגעה לאיפוס זה.

[112] בהמשך יתכן ויוצגו מספרים מעט שונים עקב ההבדלים בין התרחישים השונים, למשל בתרחיש הכולל שימוש במימן כחול לייצור חשמל יגדל השימוש במימן ובמקביל גם יתפתח ביקוש לגז טבעי.

5. הדרך לאיפוס פליטות

בהמשך לתחזית הביקושים לאנרגיה במגזרי המשק, בפרק זה יוצגו הטכנולוגיות השונות באמצעותן ניתן יהיה לספק ביקושים אלו תוך איפוס (נטו) של פליטות גזי החממה והבטחת משק אנרגיה אמין.

5.1. מהפחתת 85% פליטות לאיפוס פליטות נטו

בעבודה זו נבחנו מספר ערוצים טכנולוגיים המאפשרים להפחית את פליטות גזי החממה ממשק האנרגיה בישראל ונבדקו היתרונות והחסרונות של כל טכנולוגיה

רק לפני 50 שנים, בשנות ה-70 של המאה הקודמת, משק האנרגיה בישראל התבסס על 100% דלקים מיובאים. בשנות ה-80 החל מעבר מדלקים לייבוא פחם, ורק בעשור הראשון של המאה הנוכחית, לפני כעשרים שנה בלבד, התרחש מעבר מפחם לגז טבעי בהפקה מקומית. נוכח קצב השינויים במשק האנרגיה, סביר להניח כי מהפכות דומות, ואף משמעותיות ומהירות יותר, יחולו גם ב-50 השנים הבאות, ולכן יש לקחת בחשבון כי כל הנחה לגבי המגמות בטווח הזמנים הזה הינה הערכה בלבד שלה מרווחי טעות גדולים. למרות אי הוודאות המובנית בניתוח שכזה, ומול ההכרח בתכנון ארוך-טווח להתמודדות עם האתגר הגלובלי של משבר האקלים, נערך ניתוח אסטרטגי רחב ומבוסס מודל, המרחיב את הגבולות הטכנולוגיים ומתמקד בצעדים שיש לעשות היום על מנת לאפס פליטות עד לשנת 2050.

בשיח על הפחתת פליטות גזי החממה נהוג להתייחס בעולם לשתי קבוצות של צרכני אנרגיה – קלים להפחתה מול קשים.[113] **המגזרים הקלים להפחתה** הם משקי הבית, שבהם ניתן לחשמל את כלל צרכי האנרגיה, כך גם מגזר התחבורה הפרטית, שמכוניות חשמליות יוכלו לספק את כל הצרכים באופן משביע רצון ובעלות דומה ואף נמוכה מהקיימת. מתוך הערכה כי משק החשמל יתבסס בעתיד על מקורות מתחדשים ומאופסי פליטות, הרי שמגמת החישמול תביא ישירות להפחתת פליטות במגזרים אלו. מאידך, ישנם **מגזרים קשים להפחתה** הכוללים מתקני תעשיה כבדה, כגון תנורים גדולים הדורשים טמפרטורה גבוהה (מעל 400 מ"צ); את מגזר המשאיות הכבדות – כיום עדין לא ברור אם משאיות מבוססות סוללות תוכלנה לספק את הטווח וכושר הנשיאה שמשאיות דלק מספקות כיום; וכן את מגזרי התעופה והספנות – קשה למצוא מקורות אנרגיה נקיים המתקרבים לצפיפות אנרגיה למאסה ולנפח של הדלקים הפוסיליים.

כפי שתואר בפרקים הקודמים, לשם איפוס הפליטות, ובהתייחס לכלל משק האנרגיה, ובפרט למגזרים הקשים להפחתה, יהיה צורך להשתמש בכלים טכנולוגיים. בפרקים הבאים תוצג סקירה תמציתית של הטכנולוגיות הנמצאות כיום בשימוש או בפיתוח מתקדם ואשר יוכלו להיות בשימוש שיוביל להפחתת פליטות גזי החממה ולהשגת יעד איפוס הפליטות במשק האנרגיה. הסקירה שלהלן הינה של המאפיינים העיקריים של כל טכנולוגיה, **לפירוט והרחבה ראו נספח ב'.**

כאמור, עבודה זו יוצאת מנקודת המוצא של **מפת הדרכים למשק דל פחמן עד שנת 2050**[114] (להלן: עבודת משק דל פחמן), וממשיכה ובוחנת את היכולת להגיע **לאיפוס פליטות בכלל משק האנרגיה** באמצעות ארבע טכנולוגיות מרכזיות, כפי שיפורט בהמשך.

בתרחיש הטכנולוגי בעבודת משק דל פחמן, מירב החשמל יסופק ממקורות מתחדשים – בעיקר שמש אך גם רוח, גלים, וביומאסה. כמו כן, יחושמלו צרכני האנרגיה ככל האפשר – כלי רכב חשמליים, רכיבי אנרגיה ביתיים כגון בישול וחימום, ומכשור תעשייתי. כמות האנרגיה הסולארית שתיוצר תוגבל על ידי יכולת איתור השטחים להקמת המערכות הסולאריות ויכולת שילוב אנרגיה זו ברשת, כ-54% מסך הביקוש לחשמל (שהם כ-45% מסך הביקוש לאנרגיה הצפוי במשק). לשם התאמה בין שעות הייצור הסולארי לביקוש, יהיה צורך ביכולת אגירה בלתי מבוטלת, אך מדובר בכמות שמבחינת גודל הסוללות הנדרשות ומשך האגירה ניתנת להשגה בטכנולוגיית הסוללות הנוכחית (יון-ליתיום), ולבטח

[113] ראו למשל את דוח הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה מתחדשת (IRENA):
Decarbonising hard-to-abate sectors with renewables, IRENA (2024)

[114] https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/energy_121021

תהיה אפשרית בטכנולוגיות הסוללות העתידיות. על פי ההערכה, להשגת הספק כזה של מקורות מתחדשים יידרש שטח נרחב של כ-500-650,000 דונם של מערכות סולאריות. בישראל, בה המקור העיקרי לאנרגיה מתחדשת הוא השמש, נבון להיום, זהו ערך מינימלי לאיפוס פחמני.

5.2. טכנולוגיות מרכזיות לאיפוס פליטות

באמור, התרחיש שתואר בעבודת משק דל פחמן מתייחס **רק למשק החשמל (ולא האנרגיה), ואף אינו מגיע לאיפוס מלא של הפליטות** ומותיר שימושים בגז טבעי בתחומים ה"קשים להפחתה", בעיקר לייצור חשמל בחורף ובתעשייה הכבדה, וכן יוותר שימוש בדלקים בחלק מתחומי התחבורה. לצורך השגת איפוס פחמני מלא של פליטות גזי החממה יתוארו להלן חמש טכנולוגיות עיקריות:

1. **אנרגיות מתחדשות ומימן "ירוק":** תוספת ייצור סולארי עד לאספקת 100% מכלל הביקוש לאנרגיה בשילוב מתקני אגירה ומימן ירוק,
2. **גז טבעי בצירוף טכנולוגיות לתפיסת פחמן:** המשך שימוש בגז טבעי, בשילוב תפיסת פליטות הפחמן והטמנתן בקרקע,
3. **מימן "כחול":** מימן המופק מגז טבעי תוך תפיסת פליטות הפחמן והטמנתן,
4. **אנרגיה גרעינית ומימן "אדום":** שימוש בכורי חשמל חדשניים לאספקת יתרת הביקוש לאנרגיה,
5. **יבוא אנרגיה וחיבוריות אזורית ובינלאומית:** יבוא אנרגיה נקייה בכבל (חשמל), צינור (מימן), או בספינות (דלקים).

להלן יתוארו טכנולוגיות אלו, ההזדמנויות והאתגרים העיקריים בכל אחת מהטכנולוגיות.

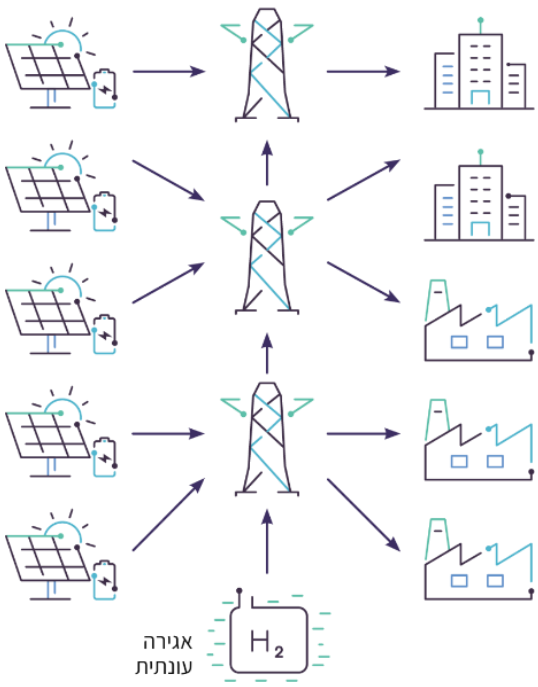
5.2.1 אנרגיות מתחדשות ומימן "ירוק"

אנרגיה סולארית

אנרגיה סולארית היא המקור העיקרי לאנרגיה מתחדשת ונקייה בישראל, אולם היא דורשת שטח רב ושעות הייצור לא תואמות באופן מלא את שעות הביקוש לחשמל. בכדי להתאים בין הייצור לביקוש יש להוסיף אמצעי אגירה. על מנת להגיע ל-100% ייצור סולארי תידרש יכולת אגירה עצומה, אך עדיין לא קיימת טכנולוגיית אגירה מסחרית שיכולה לספק זאת בעלות סבירה. אנרגיה סולארית גם אינה יכולה לספק באופן ישיר פתרון למגזרי התעופה, הספנות, התובלה הכבדה והתעשייה הכבדה ויהיה צורך בפתרונות משלימים למגזרים אלו.
תנאים נדרשים לשימוש נרחב: בכדי לצמצם את השטח הנדרש לכיסוי בלוחות סולאריים תידרש עלייה בנצילותם. כיום נצילות הפאנלים עומדת על קצת מעל 20% (משמע, רק חמישית מקרינת השמש הופכת לחשמל, והיתר מוחזר או הופך לחום). כיום במעבדות נבחנים לוחות בעלי נצילות של 30% ואף 40%. שימוש מסחרי בלוחות כאלו יצמצם ב-30-50% את דרישת השטח להשגת יעדי הייצור הסולאריים. כמו כן יידרש שיפור משמעותי בטכנולוגיית אגירת האנרגיה – הן שיפורים טכניים כגון הגדלת הספק הטעינה והפריקה, אורך החיים, צפיפות האנרגיה, הקטנת הסיכון לשריפה והקטנת הפריקה העצמית – והן שיפורים כלכליים בעלויות ההקמה והתחזוקה. בישראל הרחבת השימוש במקורות מתחדשים תדרוש עיבוי משמעותי של רשת החשמל, תהליך מורכב שעשוי להיות מוגבל בשל אילוצי קרקע.

שימוש בהספקים גבוהים של אנרגיה סולארית, ידרוש להסב את כלל המשק לשימוש בחשמל (כולל התחבורה והתעשייה), ומנגד גורר יצור עודף של חשמל בשעות שיא הייצור. עודף זה "מושלך" ולא נעשה בו שימוש (curtailment). פתרון ל"בזבוז" זה יכול להיות שימוש **במימן "ירוק"** (ראו בהמשך), העושה שימוש בעודפי החשמל הסולארי לפירוק מים להפקת המימן. המימן הירוק יכול לשמש כמקור אנרגיה נוסף עבור התעשייה, התחבורה או כמאגר אנרגיה לשעת הצורך, תוך מיצוי מירבי של הייצור הסולארי.

תרשים 41: שימוש ב-100% אנרגיות מתחדשות עם אגירה



שימוש משמעותי באנרגיה סולארית יחייב לכסות שטחים נרחבים, עד מאות אלפי דונם, בלוחות PV. בישראל הצפופה ישנה חשיבות רבה להתקין לוחות אלו תוך שימוש כפול בקרקע ככל הניתן, על גגות וקירות מבנים, על סככות והצללות, על גבי מאגרי מים, במערכות אגרו-וולטאיות ועוד. כיום מעל 60% מההספק המותקן הוא בדו-שימוש. יש לזכור כי למערכות סולאריות קרקעיות, אך גם למערכות בדו-שימוש, יש השפעות סביבתיות שיש לצמצם ככל האפשר – ניראות והשפעה נופית, גידור וקיטוע בתי גידול, תאורה בלילה, משיכה או פגיעה בבעלי חיים מסוגים שונים, ועוד.

אנרגיה סולארית ניתן לנצל גם **כאנרגיית חום**, בפרט בתעשייה שם חלק משמעותי מצריכת האנרגיה, בין אם בדלקים וגז ובין אם בחשמל, משמשת לחימום. קולטים תרמו-סולאריים הם יעילים יותר מקולטים פוטו-וולטאיים ולכן דורשים פחות שטח לקבלת אותה כמות אנרגיה, וניתן לאגור חום בעלויות נמוכות משמעותית ממתקני אגירת חשמל. ערוץ אחר הוא **ניצול חום שיורי** – חום הנפלט בתהליכים התעשייתיים. תפיסה של החום הזה ושימוש בו חלף שימוש בדלקים פוסיליים וחשמל יכולה לאפשר הפחתה משמעותית בפליטות.

לצד האנרגיה הסולארית, בישראל ניתן לייצר חשמל גם באמצעות **אנרגיית רוח**. לרוח יתרונות רבים – ההספק מגיע בשעות מגוונות ובמקרים רבים בערב כאשר האנרגיה הסולארית דועכת; ישנה חפיפה מסוימת בין ימי הקור בחורף לבין רוח חזקה, וכך ניתן לספק את הביקוש לחשמל בתקופות מעוננות כאשר הייצור הסולארי נמוך; צריכת השטח של הטורבינות נמוכה; ותפוקת האנרגיה למגהוואט מותקן בפולה כמעט מסולארי.

יחד עם זאת, בישראל ישנם אזורים מצומצמים בלבד בהם מהירות הרוח גבוהה מספיק להצדיק הקמת טורבינות רוח. בנוסף, ישראל מהווה ציר נדידה עיקרי לציפורים ופעמיים בשנה חולפות בשמי הארץ כחצי מיליארד ציפורים בדרך מאירופה לאפריקה ובחזרה. למרבה הצער אזורי הרוח הם במקרים רבים על צירי הנדידה. גם עטלפים, המהווים חוליה חשובה במארג האקולוגי לשליטה באוכלוסיות החרקים, עלולים להיפגע מלהבי הטורבינות. כמו כן, אזורי הרוח חופפים במקרים רבים אזורי טבע ונוף. מאפיינים אלה מקשים על הקמת טורבינות רוח ומשכך הונח הספק מתון של טורבינות רוח (כ-1,300 מ"ו), שיהווה כ-2% בלבד מסך הייצור ממקורות מתחדשים בשנת 2050.

מקור פוטנציאלי נוסף לאנרגיה נקייה הוא הפסולת. ניתן להמיר **פסולת לאנרגיה** באמצעות שריפה, טיפולים תרמיים מתקדמים כדוגמת גזיפיקציה, ועיכול אנאירובי.[115] המרת פסולת אורגנית לאנרגיה נחשבת לשימוש באנרגיה מתחדשת משום שהצמחים בפסולת קלטו בעת גידולם פד"ח מהאטמוספרה באותה הכמות שנפלטת בעת השריפה. פסולת פלסטיק ונייר לא נחשבת כאנרגיה מתחדשת ויש לתפוס את הפד"ח הנפלט בדומה למתקנים המשתמשים בגז טבעי עם תפיסת פחמן. מתקני המרת פסולת לאנרגיה ניתן להפעיל ולכבות על פי העומס ברשת, ובכך יש להם **יתרון משמעותי** על פני מקורות אנרגיה מתחדשים אחרים כשמש ורוח שהם סירוגיים ובלתי נשלטים.

בחישוב מקורב, בשנת 2050 ייוצרו בישראל כ-10.6 מיליון טון של פסולת עירונית. טיפול תרמי מלא של כל הפסולת יביא להפקת כ-9.8 TWh חשמליים בשנה, שווה ערך למתקן בהספק של כ-1,200 MW.[116] מדובר בהספק מכובד, של תחנת כוח גדולה, אולם יש לזכור שבשנת 2050 שיא ביקוש החשמל יעמוד על כ-32,000 MW, כך שמתקני הטיפול בפסולת יוכלו לספק כ-4% בלבד מהביקוש, וכן כי אסטרטגיית הפסולת של ישראל קוראת למיחזור פסולת ככל הניתן. בפסולת האורגנית הנותרת לטפל בעיכול אנאירובי (המספק כשליש מכמות האנרגיה לטון ביחס לטיפולים תרמיים), ורק את השאר להעביר לטיפול תרמי. כך שבפועל כמות האנרגיה שניתן יהיה להפיק מהפסולת תהיה נמוכה מהערכה זו. למרות זאת, יש לקדם פתרונות אלו משום שהם יאפשרו ייצור אנרגיה נקייה ונשלטת, בשונה מהשמש והרוח.

אפשרות נוספת היא הפקת **אנרגיות מתחדשות בים** – בין אם באמצעות שדות סולאריים צפים, חוות רוח צפות, או ניצול הגלים וזרמי הים. מספר חברות מפתחות מתקנים סולאריים צפים לסביבה הימית. בהתייחס לצפיפות בישראל ועומס השימושים בקרקע, הקמת שדות סולאריים צפים בים עשויה לספק פתרון מצוין למצוקת הקרקע. בתחום טורבינות הרוח הצפות בים, שיפורים טכנולוגיים מהשנים האחרונות מביאים לבדאיות כלכלית, אך בהינתן מהירות הרוח הנמוכה באזור מזרח הים התיכון הסבירות לכדאיות בהקמת טורבינות כאלו לחופי ישראל הינה נמוכה. בים התיכון הגלים נמוכים ומעוטי אנרגיה ביחס לאוקיינוסים, אף על פי כן בישראל מספר חברות המנסות לפתח טכנולוגיות להפקת אנרגיה מגלי הים. טכנולוגיות אלו יכולות לספק תוספת משמעותית למגוון מקורות האנרגיה משום שגלים אינם תלויים בקרינת השמש ולעיתים קרובות גלים גבוהים יתרחשו בתקופות סערה בהן הייצור הסולארי נמוך עקב העננות כבדה והביקוש לחשמל גבוה עקב הטמפרטורות הנמוכות. בהתייחס לזרמי הים והגאות, נראה כי בישראל אין זרמים חזקים מספיק להצדיק להקמת מתקנים להפקת חשמל בהספק משמעותי בשלב זה. לצד כל אלה, נערכת בימים אלו במשרד האנרגיה והתשתיות עבודה הבוחנת את הפוטנציאל הימי של ישראל, כמו גם את הסיכונים הסביבתיים, במסגרת **סקר אסטרטגי סביבתי** (סא"ס), ובשיתקבלו תוצאותיה ניתן יהיה להעריך את ההיתכנות והתועלת הפוטנציאלית של משאב זה.

בנוסף, שימוש מאסיבי באנרגיות מתחדשות יחייב גם שימוש בכמויות אגירה גדולות, ולכן ידרשו שיפורים גם בטכנולוגיית האגירה. יש לציין כי אגירה עשויה להתבצע בטכנולוגיות שונות, החל מאגירה באמצעות סוללות כימיות

[115] לפירוט ראו:
הפקת אנרגיה מפסולת, פורום האנרגיה במוסד שמואל נאמן 2019
מפת דרכים להשבת פסולת לאנרגיה בישראל, קהילת החדשנות באנרגיה של ישראל (EnergyCom) 2023

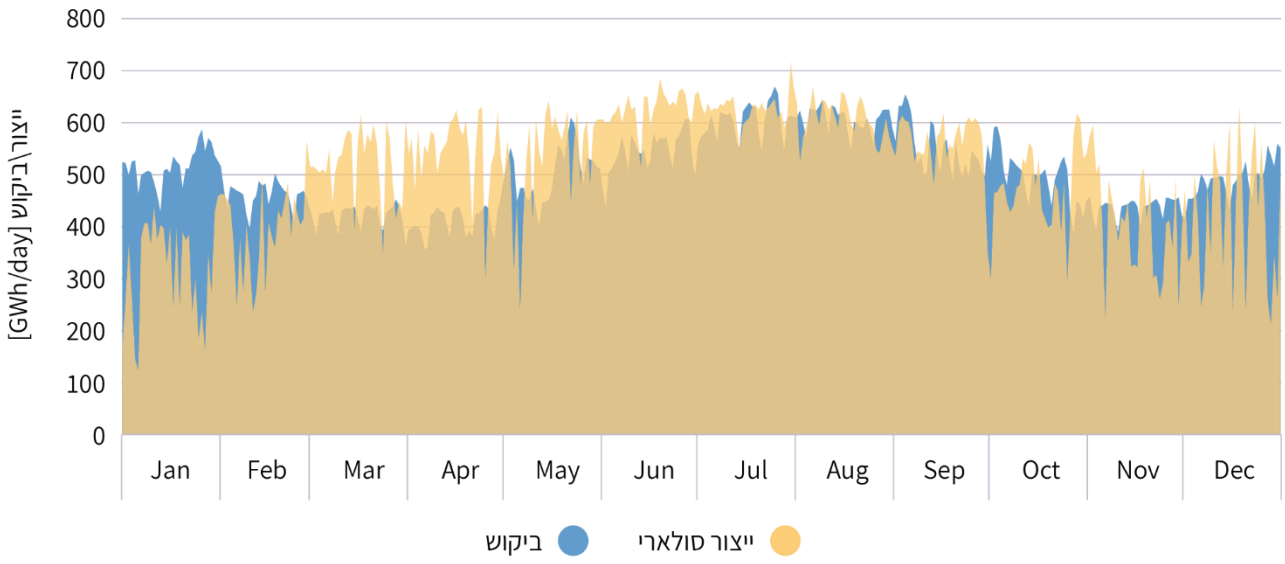
[116] הנתונים מתוך:
אסטרטגיה למשק פסולת בר קיימא 2021–2030, המשרד להגנת הסביבה 2020
בהנחה של 925 קוט"ש לטון פסולת עירונית בטיפול תרמי, ומקדם קיבולת (Capacity Factor) למתקן של 60%.

מגוונות, כדוגמת יוני-ליתיום המוכרות כיום, אך גם יוני-נתרן (Sodium Ion), מתכת אויר וכדומה, דרך אגירה פיזיקלית כדוגמת לחץ אויר או הרמה גרביטציונית, וכלה באגירת חום בצורות שונות.

בעולם מקובל להקים מערכות אגירה בהיקף של 4 שעות – לדוגמא, סוללה בהספק מקסימלי של 1 מ"ו ובקיבולת של 4 מ"ו-שעה. בסימולציות שנערכו לבחינת תרחישי האיפוס השונים, נמצא כי היחס האופטימלי נע בין 3.9-4.6 שעות אגירה.

להלן מוצג גרף התפוקה הסולארית אל מול הביקוש במצב היפותטי בו סך הייצור הסולארי שווה לסך הביקוש בחישוב שנתי. ניתן לראות כי באביב ובתחילת הקיץ התפוקה הסולארית גבוהה מהביקוש (השטח הצהוב גבוה מהכחול), בעוד בחודשי החורף היא אינה מספקת (השטח הכחול גבוה מהצהוב). משמעות הדבר היא שיש להעביר אנרגיה עודפת מהאביב אל החורף באמצעות אגירה עונתית.

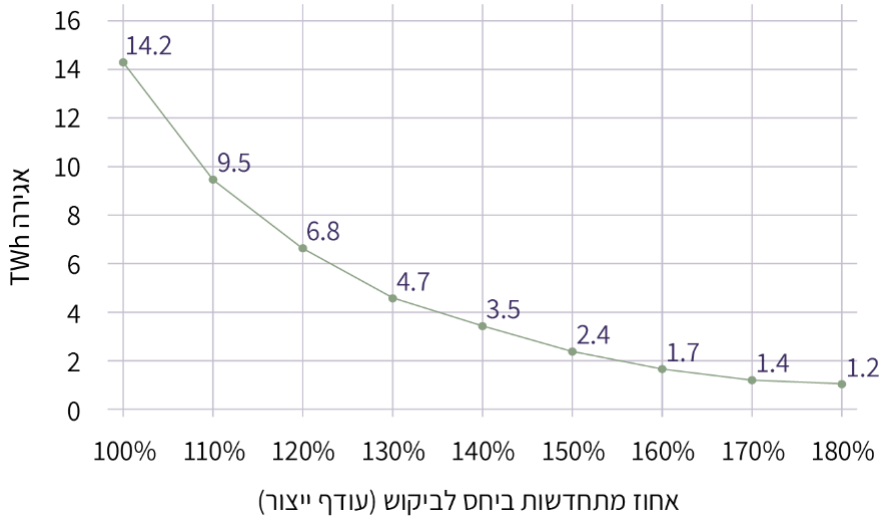
תרשים 42: הייצור הסולארי אל מול הביקוש לאורך השנה



ניתן לראות כי באביב ישנו עודף ייצור סולארי (השטח הצהוב חורג מעל לכחול) בעוד בחודשי החורף קיים מחסור (השטח הכחול גבוה מהצהוב), משרד האנרגיה והתשתיות.

להלן ניתן לראות את כמות האגירה שתידרש לצורך העברת עודפי הייצור הסולארי על פי תחזית הביקוש לחשמל בשנת 2050. להשגת 100% אנרגיה מייצור סולארי תידרש אגירה בסך של כ-14 TWh, אך ניתן להגדיל את הייצור הסולארי ולייצר עודפי אנרגיה, כך שהאגירה הנדרשת תקטן ותגיע לכ-1.7 TWh עם ייצור עודף של 160%. במצב זה יהיו עודפי אנרגיה גדולים בקיץ ובעונות המעבר שיושלכו (curtailed), אך בחורף תיוצר מספיק אנרגיה והצורך להעביר אנרגיה בין העונות יקטן. שטח המערכות הסולאריות במצב זה מחייב שימוש בשטחים נרחבים ולכן **ידרוש שיפור משמעותי בנצילות** המערכות הסולאריות שיאפשר להפיק כמות חשמל גדולה יותר מכל יחידת שטח. על פי הנצילות כיום, ידרשו כמיליון וחצי דונם של מערכות סולאריות – הן קרקעיות והן בדו-שימוש. שטח זה מהווה כ-7% משטחה של מדינת ישראל, וגם אם רובו ינוצל בדו-שימוש (שטחי אגרו-וולטאי, גגות והצללות בערים), עדיין מדובר בפתרון קיצוני. התפתחויות טכנולוגיות בתחום נצילות הלוחות הסולאריים עשויות לאפשר לצמצם משמעותית את השטח הנדרש.

תרשים 43: התחליפיות בין אגירה לייצור סולארי בתרחישי 100% סולארי[117]



נכון להיום, אין אפשרות מעשית לאגור כמויות של טרה-ואט שעה בסוללות – כיום הסך הכולל של סוללות אגירה **בעולם כולו** עומד על כ-0.19 TWh[118] וצפוי להגיע בשנת 2030 לכ-0.45 TWh בלבד.[119] הטכנולוגיה המסתמנת כיום לאגירה של כמויות אנרגיה כאלו היא ייצור מימן מעודפי החשמל, אחסונו, ובעת הצורך המרתו חזרה לחשמל. לשם כך ידרשו תשתיות מימן ארציות כדוגמת מערכות להפקת מימן ממים (אלקטרולייזרים), מערכי דחיסה הובלה ואחסון, ומערכות להפקת חשמל חזרה מהמימן (תאי דלק או טורבינות). מכיוון שיידרש אחסון של כמות גדולה מאד של מימן, לא תהיה ישימות לאגירה במכלים. הפתרון המקובל בעולם לאגירה עונתית של מימן הוא במאגר תת קרקעי, כאשר מוכרות שלוש טכנולוגיות מרכזיות: דחיסת המימן למאגר גז טבעי שאזל; יצירת חלל (ניקרה) בשכבת מלח אטומה ודחיסת המימן לתוכה; או בעבוע המימן לתוך אקוויפר מים מליחים בהם לא יעשה שימוש. מימן בתכולת אנרגיה של 12 טרה-ואט שעה מגיע לנפח של כ-10 BCM (10 מיליארד מ"ק). זהו נפח משמעותי הגדול בשני סדרי גודל מנפח נקרות מלח (מספר מאות אלפי מ"ק בנקרה), ואף גדול ממאגרי גז טבעי קטנים כדוגמת ראש-זהר ליד ערד (המסוגל לאחסן כ-2 BCM).

בין הטכנולוגיות הנוספות לאגירה ארוכת טווח ניתן למנות אגירה באוויר דחוס במכלים או במבנים גיאולוגיים תת-קרקעיים או תת-ימיים, הנזלה של אויר ושמירת האויר הנוזלי במכלים קריוגניים, אגירה גרביטציונית – דהיינו הרמה והורדה של מאסות כבדות, או לגובה מתקן אגירה, או לעומק הקרקע – לדוגמא לעומק מכרות נטושים. לכל טכנולוגיה כזו יתרונות וחסרונות, ההפסדים בתהליכי האגירה והפריקה עדין גבוהים (מעל 30%), והן עדין בשלבי פיתוח וניסוי ראשוניים. יחד עם זאת, ההתפתחויות בתחומים אלו מהירות ויתכן שבטווח של שנים מספר יגיעו טכנולוגיה אחת או יותר לבשלות טכנולוגית וכלכלית.

בנוסף לאגירה העונתית, שימוש מאסיבי באנרגיה סולארית יחייב הגדלה משמעותית של תשתיות הרשת ויהיה צורך בפיתוח משמעותי של תשתיות הרשת תוך קידום מתקני אגירה. בנוסף, הליכי התכנון וההקמה של הרשת נתקלים בקשיים נרחבים הן מצד גורמי הממשלה והן מצד החברה האזרחית והציבור. פיתוח רשת החשמל הכרחי כדי לתת מענה לעליית הביקוש הצפויה במשק החשמל, בפרט כאשר מדובר בייצור באנרגיה מתחדשת.

כמו כן, בעתיד בו חלק משמעותי מאספקת האנרגיה בישראל יהיה חשמל ממקורות מתחדשים, יהיה צורך להסב את כלל המשק, ובכלל זה את התעשייה והתחבורה, לשימוש בחשמל או מימן ירוק. מדובר בפרויקט תשתית משמעותי שידרוש שדרוג של הדוודים והמכונות התעשייתיות שעושות כיום שימוש בדלקים, כמו גם שדרוג רשת החשמל לאספקת הביקושים המוגדלים ומתן פתרונות להפקה, הפצה ותדלוק במימן ירוק (יתכן ובתחומי התחבורה הכבדה,

[117] מודל משרד האנרגיה והתשתיות.

[118] *Batteries and Secure Energy Transitions*, IEA 2024.

[119] *Global Energy Storage Market Records Biggest Jump Yet*, BNEF Apr. 2024.

התעופה והספנות, נידרש להשתמש בדלקים סינתטיים או בדלקים ממקור ביולוגי). השקעה בתשתיות מקומיות להקמת מתקנים לייצור מימן ירוק בפרויקטים בסקאלה קטנה יהוו את הבסיס העתידי לתשתית הנרחבת שתידרש.

התקנת כמויות גדולות של פאנלים סולאריים וסוללות תביא לכך שבסוף חייהם ידרשו חידוש או החלפה. בכדי למנוע השלכה של פאנלים וסוללות **יידרש פתרון למחזור אפקטיבי** של הרכיבים באופן שיקטין את כמויות הפסולת, יצמצם את צריכת המינרלים הנדירים וגם יפחית את העלויות. סוגיה זו רלוונטית גם ללא העמקת השימוש באנרגיות מתחדשות, אך הינה משמעותית במיוחד במקרה זה עקב ההספק הסולארי הגבוה שיידרש.

משכך, אנרגיות מתחדשות בישראל משמעותן אנרגיית שמש באופן כמעט בלעדי. יש להדגיש כי שימוש מאסיבי באנרגיות מתחדשות יכול להשיג משק אנרגיה מקיים שיאפשר להתקיים לאורך זמן **ותוך עצמאות מלאה באנרגיה.** עם זאת, השגת 100% אנרגיות מתחדשות כרוכה באתגרים רבים שקשה לראות כיום כיצד ניתן יהיה למצוא להם פתרון מספק.

לסיכום, האתגרים המרכזיים בטכנולוגיה זו הם היקף השטח שיידרש והיכולת להקים את מתקני האנרגיה המתחדשת, מתקני האגירה ואת תשתיות הרשת בהיקפים הנדרשים. ללא שיפורים מהפכניים בטכנולוגיות הייצור והאגירה, וללא אגירה עונתית, אין היתכנות למעבר מלא לאנרגיות מתחדשות בישראל.

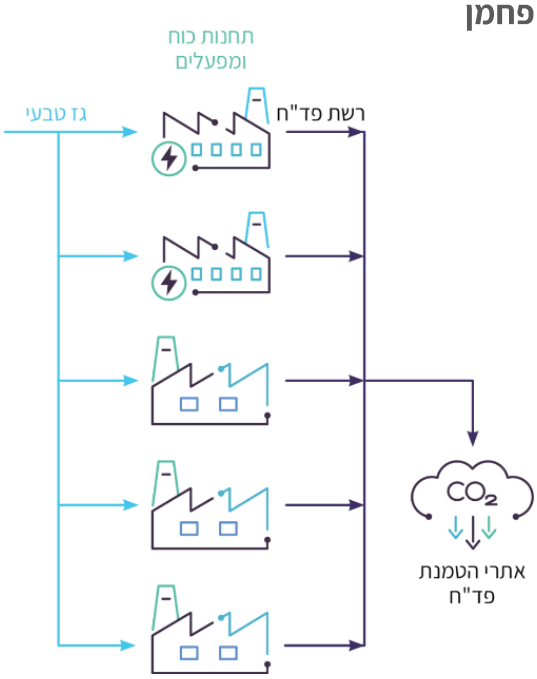
5.2.2. גז טבעי בצירוף טכנולוגיות לתפיסת פחמן

תפיסת פחמן

במגזרים הקשים להפחתה, כגון משק החשמל והתעשייה הכבדה, קיימת אפשרות להמשיך ולהשתמש בדלקים מזהמים, יחד עם תפיסת גזי החממה הנפלטים בארובת המתקן. טכנולוגיה זו דורשת שינויים ותוספות במתקני הייצור עצמם, כמו גם הקמה של תשתיות אזוריות או ארציות לקבלת הפד"ח שנתפס וסילוקו, באמצעות הטמנתו בתת-הקרקע או שימוש בו כחומר מוצא לתהליכים תעשייתיים.[120]

תנאים הנדרשים לשימוש נרחב: שיפורים טכנולוגים להעלאת יכולת התפיסה (כיום רק חלק קטן מהפד"ח בגזי הפליטה נתפס), הוזלת עלויות משמעותית, הקטנת השטח הנדרש למתקני התפיסה ויצירה של כלים סטנדרטיים לתפיסה, דחיסה והובלה של הפד"ח ועוד. לשימוש בישראל נדרש למצוא אתרים המתאימים להטמנה ולהקים תשתיות הולכה והטמנה ארציות, ולחלופין לפתח שימושים לכמויות גדולות של פד"ח.

תרשים 44: שימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן



שימוש בטכנולוגיה זו מאפשר למפעלים הקשים לחישמול ותחנות הכוח להמשיך להשתמש בגז טבעי, אך בתוספת אמצעים לתפיסת גזי החממה מגזי הפליטה. לשם כך יהיה צורך להקים מערכות לתפיסת הפד"ח במתקנים הרלוונטיים, שהן יקרות ומורכבות, תשתיות לאיסוף והובלה של הפד"ח לאתרי ההטמנה או השימוש, ומתקנים להטמנת הפד"ח או השימוש בו לצורך הכנת חומרי גלם לתעשייה. יתכן ויהיה צורך בפרישה של תשתיות להולכת הפד"ח לאורך הארץ, ממפרץ חיפה והצפון ועד לאזורי התעשייה שבנגב. אפשרות נוספת היא ריכוז התעשייה שתזדקק לתפיסת הפחמן באתרים מצומצמים, וכך יצומצמו משמעותית תשתיות ההולכה שידרשו.

בשלב זה עדין אין מיפוי של אתרים המתאימים להטמנת פד"ח בישראל. משרד האנרגיה והתשתיות יחד עם המכון הגיאולוגי ממפים בימים אלה את האתרים המתאימים, כמו גם את כמויות וקצבי האיחסון האפשריים בהתאם לתנאי הקרקע. בתום בחינה זו יהיה צורך לוודא את ישימות ההטמנה, בין היתר משיקולי סביבה, לגבש רגולציות מתאימות, ולקדם הליכי תכנון והקמה של תשתיות תומכות. הליכים אלו עלולים להתמשך זמן רב, בשל רגישויות סביבתיות, בשלות הטכנולוגיות ועלויות הקרקע.

שימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן יאפשר לתעשייה שלא לעבור תהליך הסבה לחשמל ולמימן, אך הסבת מתקני התעשייה לתפיסת הפד"ח הנפלט מהארובות הינה משימה מורכבת לא פחות. מתקני תפיסת הפחמן דורשים שטח נרחב, לעיתים דורשים שטח המתקרב לשטח המפעל שאותו הם משרתים, הם מורכבים וצרכני אנרגיה משמעותיים, ויתכן אף שידרשו שינויים מהותיים בתהליכי הייצור עצמם. כמו כן, יהיה צורך להתייחס לסוגיות הבטיחות של הולכת הפד"ח. למרות שפד"ח לכשעצמו אינו רעיל, הרי שדליפה משמעותית מצינור הולכה עשויה לדחוק את החמצן באזור ולגרום לקשיי נשימה.[121]

[120] להרחבה ראו: *שימוש בתת הקרקע לאיפוס פליטות גזי חממה*, משרד האנרגיה 2024.

[121] ראו לדוגמא תיאור של תאונה שאירעה במיסיסיפי בשנת 2023:
A rupture that hospitalized 45 people raised questions about CO2 pipelines' safety, npr, 10/5/2023.

עם זאת, יש לציין כי טכנולוגיית תפיסת הפחמן עומדת בפני ביקורת,[122] היא עדיין יקרה לשימוש, אינה נמצאת בשימוש נרחב למרות שמתקנים ספורדיים פועלים כבר 50 שנים ברחבי העולם,[123] והיא אינה מהווה רכיב משמעותי בתוכניות אסטרטגיות לאיפוס פליטות. כך, לדוגמא, במתווה האיפוס של ה-IEA,[124] מוקצים רק כ-10% מייצור החשמל לכל טכנולוגיות תפיסת הפחמן, הכוללת שימוש בגז טבעי אך גם אמוניה ומימן כחולים.

מנגנוני תפיסת הפד"ח הקיימים כיום אינם יעילים ב-100% וחלק מהפד"ח חומק לאטמוספירה. היות וכך, ובכדי להגיע לאיפוס מלא של הפליטות (נטו), יהיה צורך ביישום טכנולוגיות להסרת פליטות אלה מהאטמוספירה (CDR).[125]

כמו כן, יש להתייחס גם לסוגיית **דליפות המתאן.** המתאן, שהוא המרכיב הכמעט בלעדי בגז הטבעי, הינו גז חממה החזק פי 120 מפד"ח.[126] אולם היות והוא מתפרק בתוך מספר שנים, בממוצע במשך 20 שנים השפעתו על האקלים גבוהה פי 84 מפד"ח, ולאורך 100 שנים, פי 28.[127] משכך, יש להימנע מכל דליפה או שחרור (בעת פעולות אחזקה) של גז טבעי לאטמוספרה. בשנים האחרונות עולות טענות על דליפות מתאן ממערכות ההפקה, ההולכה והשימוש בגז טבעי בעולם.[128] בישראל נבחנו דליפות המתאן ונמצא כי הן נמוכות ביחס למקובל בעולם.[129] יחד עם זאת, עדיין ישנן מספר פעולות שהומלצו להפחתת הדליפות ושיפור הבקרה. בכל תרחיש עתידי שיכלול שימוש משמעותי בגז טבעי תידרש אטימה של דליפות מתאן, וכן התמודדות עם השחרור המבוקר של מתאן בעת פעולות תחזוקה וטיפול בתקלות.

השימוש בגז טבעי עד לשנת 2050, מחייב לוודא כי יתרות הגז הטבעי יספיקו למשק הישראלי. המשך השימוש בגז הטבעי בתעשייה ובמשק החשמל ידרוש כמות שנתית של מעל 20 BCM גז טבעי בשנה, ויש להבטיח יכולת אספקת כמות כזו בשנת 2050 ובכל שנה מעבר לה. ככל שיאזלו מאגרי הגז הישראליים, יהיה צורך לתת מענה לביקושים העתידיים בייבוא גז טבעי, בין אם בצינור ממדינות שכנות או בייבוא LNG דרך הים מהשוק העולמי. למענים אלו ישנן השלכות להיבטי ביטחון אנרגיה, עלויות, תשתיות מורכבות ועוד.

לסיכום, האתגרים העיקריים בטכנולוגיה זו הם איתור אתרים להקמת המתקנים לתפיסת הפליטות והקמת תשתיות ארציות להולכת והטמנת הפד"ח, עתודות הגז הטבעי שישארו בשנת 2050 ולאחריה, פיתוח והוזלת הטכנולוגיות לתפיסת הפחמן, והתאמת הרגולציה.

---

[122] לדוגמא:

Carbon capture and storage is a dangerous distraction, Reuters 2023,
Don't Fall for Big Oil's Carbon Capture Deceptions, Scientific American 2023.
Why carbon capture and storage will not solve the climate crisis any time soon, The Guardian 2023.

[123] ראו למשל:

Carbon capture has a long history. Of failure, Bulletin of the Atomic Scientists 2022.

[124] *Net Zero Roadmap, 2023 Update*, IEA 2023, chapter 2.3.

[125] ראו הרחבה בפרק 5.2.6 טכנולוגיות משלימות.

[126] *Methane emissions: choosing the right climate metric and time horizon*, Env. Scince: Processes and Impact, **20** 1323-1339 (2018)

[127] שם.

[128] ראו לדוגמא:

Assessment of methane emissions from the U.S. oil and gas supply chain, Science **361** 186-188 (2018)

[129] *חישוב פליטות מתאן משרשרת האספקה של הגז הטבעי*, משרד האנרגיה 2023.

5.2.3. מימן "כחול"

מימן

בעירת המימן פולטת אדי מים בלבד ועל כן מדובר בדלק נקי שיכול להחליף, תוך התאמות נדרשות, דלקים וגז טבעי בתשתיות הקיימות כגון טורבינות לייצור חשמל או תנורים בתעשייה. כמו כן, באמצעות תאי דלק ניתן להפיק חשמל ישירות ממימן וכך להניע כלי רכב כבדים לטווח ארוך או להוות מאגר אנרגיה למשק החשמל בעתיד בו מקורות מתחדשים ותנודתיים יהוו רכיב מרכזי בייצור החשמל בישראל. מימן ודלקים סינתטיים, הנגזרים ממימן, נחשבים למועמדים מבטיחים לשמש כדלקים נקיים בענפי הספנות והתעופה. יחד עם זאת, מימן אינו קיים באופן חופשי בטבע ויש להפיקו ממים בתהליך אלקטרוליזה או מגז טבעי (מתאן) תוך תפיסת הפד"ח הנפלט בתהליך ההפקה. תנאים נדרשים לשימוש נרחב: שיפורים טכנולוגיים כגון הגדלת יעילות האלקטרולייזרים ותאי הדלק, אורך החיים, הספקי הטעינה והפריקה, וגמישות ההפעלה. זאת, בד בבד עם ירידה משמעותית של המחיר. שיפורים ידרשו גם בטכנולוגיות האחסון וההובלה של המימן – הגדלת הצפיפות והקטנת העלויות. שימוש נרחב במימן ידרוש הקמת תשתיות ארציות נרחבות להפקת, לשינוע, לאחסון ולשימוש במימן.

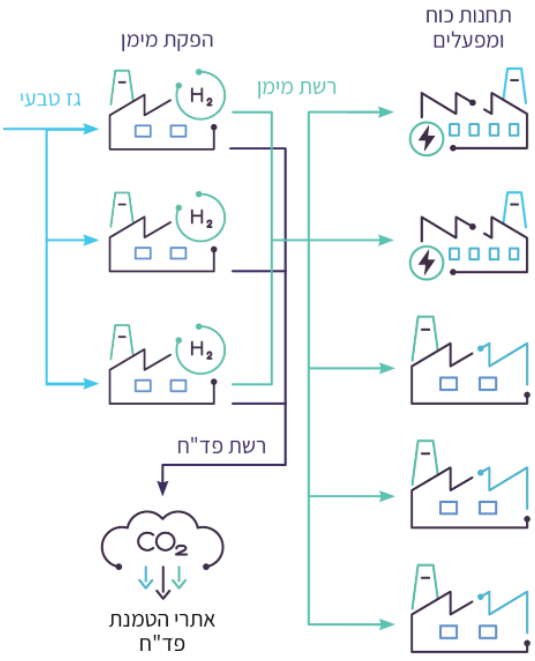
נהוג לסווג את המימן על פי מקורו בשמות צבעים:
מימן אפור: מימן המופק מגז טבעי בתהליך הפולט פד"ח בכמויות גדולות ולכן אינו מתאים לעתיד של איפוס פליטות גזי חממה.
מימן כחול: מימן המופק מגז טבעי בדומה למימן האפור, אך בצרוף תהליך של תפיסת הפד"ח כך שהגז לא נפלט לאטמוספרה. מימן כחול מתאים לשימוש בעתיד מאופס פליטות.
מימן טורקיז: דומה למימן הכחול, מופק מגז טבעי, אך בטכנולוגיית פירוליזה של מתאן המותירה את הפחמן כאבקה מוצקה. כך, שיטה זו אינה גוררת פליטות פד"ח וקל לאסוף את הפחמן המהווה חומר גלם לתעשייה.
מימן ירוק: מימן המופק ממים בתהליך אלקטרוליזה הדורש חשמל. על החשמל להגיע ממקורות מתחדשים. מימן ירוק אינו גורר פליטה כלשהי של גזי חממה.
מימן אדום: מימן המופק בתהליך אלקטרוליזה תוך פירוק טרמי של המים העושה שימוש בחום שיורי מכורי גרעין. מימן אדום דורש פחות אנרגיה חשמלית מירוק וגם הוא אינו גורר פליטת גזי חממה.
מימן ורוד: מימן המופק בתהליך אלקטרוליזה מחשמל ממקור גרעיני.

לאחר שהמימן נוצר, אין הבדל בין הצבעים השונים, גז המימן המופק זהה ואופני השימוש בו אחידים.

מימן כחול הוא מימן המופק מגז טבעי בתהליך הפולט כמויות גדולות של פד"ח, תוך כדי תפיסה של הפד"ח בקצה התהליך והטמנתו או שימוש תעשייתי בו. היתרון בשימוש במימן הכחול כרוך בעובדה **שיחסית קל לתפוס את הפד"ח** הנפלט בזרם כמעט טהור מתהליך הפקת המימן, ביחס למורכבות של תפיסת הפד"ח מגזי הפליטה של תחנות הכוח ומפעלי התעשייה, שם הוא מהווה כ-10% בלבד מתוך תערובת הגזים והחלקיקים.

יש לציין כי קיימת טכנולוגיה נוספת להפקת מימן מגז טבעי, **"פירוליזה של מתאן"**, והמימן המופק ממנה מוגדר **כמימן "טורקיז"**. מדובר בפירוק הגז הטבעי (שרובו מתאן) בטמפרטורה גבוהה וללא נוכחות חמצן באופן שמפריד בין מרכיבי המתאן – מימן ופחמן – כשהפחמן מתגבש לאבקה מוצקה. אבקה זו ניתן לאסוף בקלות לשימוש כחומר גלם בתהליכים תעשייתיים רבים. לטכנולוגיה זו קיימת עדיפות מאחר שהיא אינה דורשת מתקנים ייעודיים לתפיסת הפד"ח. יחד עם זאת, טכנולוגיה זו עדיין בשלבי פיתוח ראשוניים ולא ברור אם תהפוך מסחרית בעתיד.

תרשים 45: ערוץ שימוש במימן כחול



עבודת אסטרטגיית מימן לישראל,[130] בוחנת תרחישי קצה לכמויות וביקושים עתידיים למימן נקי. המתודולוגיה מניחה כי התפתחות המשק המקומי בפועל תהיה בטווח בין מינימום (578 אלף טון מימן בשנה) למקסימום (5,276 אלף טון). אספקת המימן לישראל בשני התרחישים תחייב יבוא משמעותי בשילוב ייצור מקומי (לרבות שימוש במימן לצורך הפקת דלקים סינתטיים). יכולת הייצור המקומי מוגבלת, הן בשטח פנוי לייצור מימן ירוק, והן במשאבי טבע זמינים לייצור מימן כחול ולהטמנת פד"ח. לאור זאת, יהיה צורך בהשלמת הייצור המקומי באמצעות יבוא. ככל שמימן יתבסס במשק הבינלאומי כמקור אנרגיה מוביל, ישראל תתאים עצמה למגמות העולמיות. על מנת להשתמש במימן כחול ולהישען עליו, יהיה צורך להקים בנוסף על תשתיות ההולכה וההטמנה של הפד"ח גם תשתיות להולכת המימן, שיתבן שחלקן יתבססו על הסבת רשת הולכת הגז הטבעי הקיימת. מאידך, היות והמרת הגז הטבעי למימן תתבצע במספר מצומצם של אתרים ייעודיים, יתכן ותשתית הפד"ח שתידרש תהיה מצומצמת ביחס לנדרש בשימוש ישיר בגז טבעי עם תפיסת פחמן, שידרוש תשתית ארצית נרחבת. גם שימוש במימן כחול ידרוש עתודות גז טבעי ניכרות שיובלו לספק את חומר הגלם להפקת המימן לאורך שנים רבות.

לסיכום, שימוש במימן כחול עשוי לאפשר תפיסה פשוטה וזולה יותר של פליטות הפד"ח, אולם הוא ידרוש תשתית ארצית נוספת להולכת מימן. בנוסף, תידרש הקמה של מתקנים להפקת המימן והפרדת הפד"ח בספיקה של מיליוני טון בשנה. בעולם עדין אין מתקנים בסקאלה כזו ויש לעקוב אחר ההתפתחויות הטכנולוגיות וירידת המחירים כצעד מקדים להיתכנות שימוש משמעותי במימן כחול. בנוסף לכך, מדובר במתקנים תעשייתיים גדולים שידרשו שטחים נרחבים עם גישה לקווי גז טבעי, פד"ח ומימן. יש לבחון טכנולוגיה זו גם בראייה תכנונית המתייחסת לצרכים אלו.

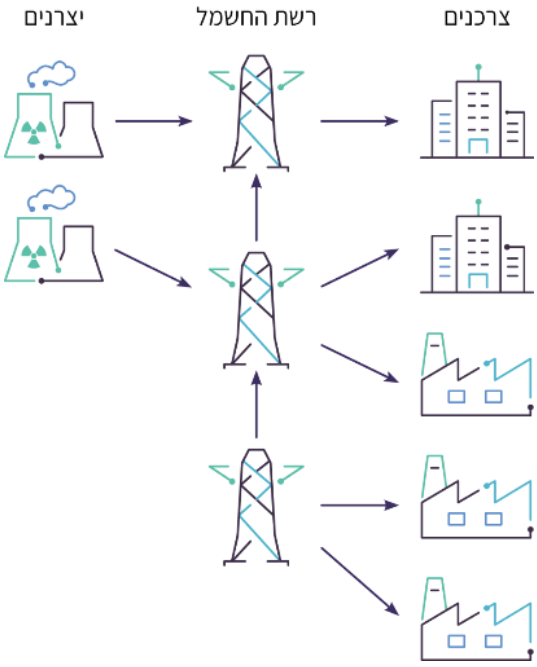
[130] אסטרטגיית מימן לישראל, פברואר 2024, משרד האנרגיה והתשתיות.

5.2.4 אנרגיה גרעינית ומימן "אדום"

אנרגיה גרעינית

תחנות כוח גרעיניות (תג"ר) מאפשרות ייצור חשמל ללא פליטה ישירה של גזי חממה, ובכך יכולות להוות מקור לאנרגיה נקייה ונשלטת, המספקת חשמל ללא תלות במזג האוויר. כמו כן, החום המיוצר בחלק מסוגי הכורים הגרעיניים מאפשר להפיק מימן זול, שיכול להחליף דלקים במגזרים קשים לחישמול כגון תעשייה כבדה, תעופה וספנות. מאחר שאנרגיה גרעינית מייצרת חשמל בהספק קבוע, קיים קושי לשלבה עם אנרגיה סולארית שהיא תנודתית במהותה, ובכדי לגשר על הפערים יהיה צורך בשימוש בכמות גדולה יחסית של אמצעי אגירת אנרגיה. תנאים נדרשים לשימוש נרחב: יש לתת מענה למגוון סוגיות טכנולוגיות, רגולטוריות ומדיניות. בנוסף, יש לבצע עבודת מטה בין-משרדית שתהווה קדם בחינת היתכנות להקמת תג"ר בישראל.

תרשים 46: ערוץ אנרגיה גרעינית



ההתפתחויות האחרונות בתחום כורי הגרעין לייצור חשמל מציבות תחום זה כטכנולוגיה אפשרית לייצור אנרגיה ללא פליטות פד"ח במשק האנרגיה בישראל. כורים מודולריים (Small Modular Reactors – SMR), וטכנולוגיות גרעין מהדור הרביעי מבטיחות מחירים נמוכים יחסית, זמני הקמה קצרים, בטיחות מוגברת, יעילות גבוהה, והפחתת הפסולת הרדיואקטיבית.

מדינות רבות בעולם פועלות לשילוב אנרגיה גרעינית בתמהיל האנרגיה שלהן. על פי נתוני הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה אטומית (סבא"א)[131] ישנם כ-60 כורים גרעיניים להפקת חשמל בבניה במדינות שונות בעולם בהספק כולל של כ-61 GW. המדינות המובילות בבניית כורים חדשים הן סין והודו, עם צריכת אנרגיה שהולכת וגדלה בקצב מסחרר. אחריהן, מדינות שלראשונה מקימות תחנות כוח גרעיניות: טורקיה, מצרים וקטאר, ומדינות המפעילות כורים כיום כגון ארה"ב, בריטניה, קוריאה הדרומית ויפן.

במסגרת סיכום ועידת האקלים COP28 שהתקיימה בדובאי בנובמבר 2023, הוכרז לראשונה כי אנרגיה גרעינית מהווה את אחד הפתרונות להתמודדות עם משבר האקלים. עמדה זו משתקפת גם בתרחיש איפוס הפליטות של ה-IEA,[132] לפיו השימוש באנרגיה גרעינית יגדל משמעותית בשנים הקרובות, כך שלקראת 2050 ההספק הגרעיני הגלובלי יותר מיוכפל – מ-417 GW בשנת 2022 ל-916 GW ב-2050.

[131] *Power Reactors Information System*, IAEA, Accessed 24/7/2024.

[132] *Net Zero Roadmap, 2023 Update*, IEA 2023.

תרשים 47: ההספק הגרעיני הצפוי בעולם עד לשנת 2050[133]



מטעמים כלכליים וטכניים, נהוג להפעיל כורים גרעיניים בהספק חשמלי קבוע לאורך כל שעות היום ובכל עונות השנה. הספק קבוע זה משפר משמעותית את בטחון האספקה אך, השילוב עם האנרגיה הסולארית התנודתית, מאתגר ויאלץ בכל הנראה להשליך חשמל.[134] פיתוחים עתידיים בתחום אגירת אנרגיה תרמית, למשל באמצעות מלחים מותכים, יאפשרו לווסת פערים אלה ולהוריד את ההספק החשמלי המופק מהכור בשעות השפל תוך אגירת החום העודף הנוצר בכור במאגר החום. בעת הצורך, ניתן יהיה להשתמש בחום האגור לייצור חשמל מעבר לתפוקה הנומינלית של הכור וכך לענות על הצורך בתפוקת חשמל משתנה, למרות שליבת הכור פועלת באופן רציף וקבוע. תג"ר "גמישות" כאלו יוכלו להשלים את הייצור הסולארי ללא הגדלת השלכת החשמל.

בנוסף לשימוש בגרעין לייצור חשמל, ניתן להשתמש בחום בכורי הגרעין להפקת מימן בקלות יחסית **(מימן "אדום")**, ומימן זה יכול גם הוא לשמש בטורבינות גז כתוספת ייצור וגיבוי למערכות הסולאריות ולמקורות אחרים.

כורי החשמל כיום מתבססים על טכנולוגיה של ביקוע גרעיני של אטומי אורניום תוך יצירת חומרים רדיואקטיביים. אך בעתיד יתכן וניתן יהיה לעשות שימוש **בטכנולוגיית היתוך גרעיני,** המתבססת על היתוך של אטומי מימן והליום. טכנולוגיה זו לא מאפשרת לייצר חומר בקיע, ולכן עשויה לעקוף את המגבלות המדיניות, היא בטוחה, זמינה ונקייה יותר מטכנולוגיית הביקוע. מסקירה של התחום בעולם נראה כי בשנים האחרונות קמו מספר חברות הזנק בתחום, המסתמכות על עקרונות חדשים ופיתוחים טכנולוגיים שעשויים לזרז את ההגעה של טכנולוגיה זו לבשלות מסחרית.

לסיכום, לטכנולוגיית הגרעין יתרונות רבים, העיקריים שבהם – אספקת חשמל יציבה, מתמשכת וניתנת לשליטה, ודרישת שטח נמוכה וכל זאת ללא פליטת גזי חממה. הטמעת טכנולוגיה זו בישראל מחייבת מענה לסוגיות טכנולוגיות, רגולטוריות ומדיניות, תוך בחינת ההשלכות הבטיחותיות והסביבתיות, וקבלת החלטה בהקדם האפשרי.

[133] שם.

[134] כאשר המתקנים הסולאריים בשיא התפוקה ואין אפשרות לקלוט את החשמל המיוצר לרשת או למתקני אגירה, החשמל "מושלך", דהיינו מתבזבז ללא שימוש. שימוש באנרגיה גרעינית יביא לכך שהרשת שאמורה לקבל את עודפי החשמל הסולארי בשיא הייצור תיתפס על-ידי ההספק הגרעיני הקבוע, ובכך תקטן יכולת הרשת לקבל את עודפי החשמל והם יושלכו.

5.2.5. יבוא אנרגיה וחיבוריות אזורית ובינלאומית

יבוא אנרגיה נקיה

לישראל מגבלות פיזיות המציבות אתגר להפקת 100% אנרגיה נקיה. פתרון אפשרי הוא יבוא אנרגיה נקיה, בין אם חשמל, מימן, או דלקים אחרים שיוצרו ממקורות נקיים. ניתן לייבא חשמל ממדינות שכנות או מהרשת האירופאית על ידי יצירת תשתית פיזית מתאימה, בין היתר באמצעות כבל תת-ימי או חיבור למדינות שכנות. כך למשל, ערב-הסעודית ומצרים מתעתדות לייצר מימן "ירוק" ממקורות מתחדשים, בעיקר שמש ורוח, ועשויות להוות מקור לייבוא אנרגיה נקייה לישראל בעתיד. אפשרויות נוספות הן ייבוא מימן, אמוניה ירוקה ודלקים נקיים אחרים בספינות מספקים שונים בשוק הגלובלי. בשיקול האפשרויות לייבוא אנרגיה יש להתייחס לגיוון המקורות וההשלכות על ביטחון האספקה.

תנאים נדרשים לשימוש נרחב: גיבוש אסטרטגיה לחיבוריות בינלאומית וייבוא, זיהוי מקורות ייבוא מגוונים, קידום פרויקטים בעלי פוטנציאל, וקידום הסכמים בינלאומיים. זאת, במקביל לקידום תשתיות קבלת האנרגיה, כגון מסופי פריקה בנמלים, כבלי חשמל תת-ימיים או צינורות להולכת מימן. כדי לקיים ביטחון אספקה, יהיה צורך באחסון אסטרטגי של מלאי דלקים למקרי חירום.

מדינות מפותחות רבות בעולם הגיעו למסקנה כי לא יוכלו לעמוד ביעדי הפחתת הפליטות, ובפרט ביעדי איפוס פליטות, באמצעות ייצור אנרגיה נקיה מהמשאבים המצויים בתחומן בלבד, ולכן הן מעודדות פיתוח שווקי אנרגיה גלובליים. בהנחה כי אכן יתפתחו שווקים גלובליים משוכללים למוצרי אנרגיה, גם ישראל תוכל להשתלב בשווקים אלו ולייבא אנרגיה נקיה בדרכים מגוונות.

האפשרויות לייבוא אנרגיה עשויות לכלול:

- חיבור רשת החשמל הישראלית לרשתות חשמל במדינות שכנות לרכישת חשמל ירוק; חיבור ישיר לשדות סולאריים וחוות רוח במדינות שונות לקבלת החשמל המיוצר; או חיבור הרשת הישראלית לאירופה באמצעות כבל תת-ימי (EuroAsia Interconnector), שיאפשר לרכוש חשמל ממקורות מתחדשים בשעות המחסור בישראל, ולמכור עודפי אנרגיה מתחדשת חלף השלכתה.

- רכישת מימן ממדינות שכנות כגון מצרים, ירדן או סעודיה, ייבוא המימן בצינור (שאולי אף ימשיך למדינות אירופה) ושימוש בו לצרכי התעשייה או לייצור חשמל.

- אפשרות אחרת לייבוא מימן תהיה בספינות. כיום מקובל להניח כי הובלת כמויות גדולות של מימן במצב דחוס או מונזל אינה כלכלית. לכן, ההנחה היא כי השוק הגלובלי יתבסס על שינוע נגזרות של מימן, לדוגמא אמוניה, שהיא תרכובת של מימן וחנקן, שניתנת להובלה כנוזל בצפיפות מימן גבוהה. אפשרות אחרת היא באמצעות נשאים כימיים – Liquid Organic Hydrogen Carrier LOHC – שהם חומרים כימיים נוזליים הנקשרים למימן ומאפשרים הובלה בספינות מכליות סטנדרטיות. חומרים אלו דורשים תהליכים כימיים לפני ההובלה, ל'טעינה' של החומר במימן, ולאחר ההובלה, ל'פריקה' של המימן.

- קיימת אפשרות לייבוא גז טבעי מונזל (LNG) לשימוש מאופס פליטות באמצעות המרה למימן כחול תוך תפיסת הפד"ח הנפלט בתהליך, או בשימוש בתחנות כוח ומפעלים תוך תפיסת הפד"ח. יבוא LNG ידרוש הקמת מסופים גדולים ויקרים על קו החוף, מחירו בדרך כלל גבוה, והמרתו למימן אינה כדאית כיום ביחס לעלויות יבוא מימן. יחד עם זאת, זוהי אפשרות שיהיה צורך לבחון לכשיתבהרו ההשלכות הטכניות והכלכליות של תפיסת הפחמן והמימן הכחול.

- היות וכנראה נידרש לשימוש בדלקים ביולוגיים או סינתטיים בישראל, לפחות לענפי התעופה והספנות, בסבירות גבוהה יהיה כדאי לייבא דלקים אלו מאשר לייצר אותם בישראל.

- בהתאם למדיניות הממשלה,[135] בית הזיקוק בחיפה צפוי להפסיק את פעילותו בעשור הקרוב, בכפוף להשלמת התנאים הנדרשים, והדלקים המיוצרים בו כיום, ייובאו. סביר כי עד לשנת 2050 המעבר לייבוא, בשילוב המגמות העולמיות, יעודדו מעבר לדלקים חלופיים נקיים יותר.

עם ההתקדמות הגלובלית למעבר לשימוש באנרגיות מתחדשות ובטכנולוגיות חדשות בתחום האנרגיה, עולה החשיבות של בניית חיבורים אנרגטיים אזוריים. הקמת תשתיות לייבוא חשמל ומימן והעברת אנרגיה בין אזורים שונים יכולה להביא לשיתוף פעולה כלכלי, מדיני וטכנולוגי שיתרום לכלל המדינות המעורבות. חיבוריות אנרגטית צפויה גם להגביר את היציבות בין המדינות המעורבות בעקבות ההישענות ההדדית שהיא מייצרת והקביעות ביחסים הנובעת מהקמת תשתית פיזית יקרה.

לצד ההבנה של החשיבות הגוברת של חיבורי תשתיות האנרגיה, מדינות רבות בעולם מקדמות פרויקטים מסוג זה, חותמות על הסכמים עם שכנותיהן ומקדישות משאבים גוברים לסוגיה. כך לדוגמה, האיחוד האירופי שואף לחבר כ-10% מרשת החשמל בין מדינות האיחוד כחלק מהמאמצים להבטיח אספקת אנרגיה יציבה ובת-קיימא. פרויקטים כדוגמת North Sea Link, המחבר את בריטניה ונורבגיה, ורשת ה-GCCIA של מדינות המפרץ מדגימים גם הם מגמה זו לחיבור רשתות חשמל בינלאומיות.

ישראל ממוקמת במיקום גאוגרפי ייחודי, המחבר בין יבשות, והיווה לאורך ההיסטוריה צומת דרכים מרכזי למעבר סחורות ותרבויות. מקסום היתרונות של מיקומה הייחודי, יאפשר למצב את ישראל כגשר בין המזרח התיכון ואירופה. הקמת חיבורים אנרגטיים עם מדינות המזרח התיכון ואירופה תוכל לסייע בפיתוח וחיזוק הקשרים המדיניים והכלכליים בין מדינות אלו לבין ישראל. שיתוף פעולה אנרגטי יכול לשמש כמנוף לפיתוח כלכלי משותף, להשקעות הדדיות ולהחלפת ידע טכנולוגי, ובכך לתרום לחיזוק ההסכמים וליציבות האזורית. במקביל, שיתוף פעולה בתחום האנרגיה עם מצרים וירדן השכנות יכול להעמיק את הקשרים הכלכליים והאנרגטיים בין המדינות. הקמת תשתיות אנרגיה משותפות וייבוא חשמל ומימן דרך מצרים וירדן יש בהם כדי לחזק את האמון ההדדי, ליצור הישענות הדדית בריאה ובכך לתרום ליציבות האזורית.

בנוסף, חיבוריות אנרגטית תמצב את ישראל כאלטרנטיבה יציבה וזולה לייבוא אנרגיה עבור אירופה, במיוחד נוכח האתגרים הגיאופוליטיים איתם מתמודדת היבשת והצורך בהפחתת התלות בגז הטבעי ובדלקים רוסיים. המזרח התיכון, ובכללו ישראל, יכולים להציע אלטרנטיבה יציבה וזולה לאירופה תוך הבטחה לגיוון מקורות. חיבור זה ניתן יהיה למנף גם לקידום מרכזי מחקר בינלאומיים בתחומי האנרגיה, וכן מרכזי פיתוח ויישום טכנולוגיים ובכך להביא תועלות נוספות לישראל – גיאופוליטיות, כלכליות, ביטחוניות ועוד.

פרויקט ה-IMEC (India–Middle East–Europe Economic Corridor) הוא דוגמה לפרויקט חיבוריות אנרגטית רחב במיוחד הצפוי לכלול תוואים להובלת חשמל, מימן וסחורות מהודו לאירופה דרך איחוד האמירויות, סעודיה, ירדן וישראל ומובל בשיתוף ארצות הברית.

כבר היום ישראל מקדמת פרויקטים של חיבוריות אזורית, כדוגמת הכבל התת ימי לאירופה וחיבור תשתיות אנרגיה למדינות שכנות. לחיזוק שיתוף הפעולה עם מדינות באזור המזרח התיכון בעלות אינטרסים דומים לנו יש יתרונות רבים. ראשית, סוגיות סביבתיות ואקלימיות לא נעצרות בגבולות המדיניים ולכן יש יתרון בפעילויות משותפות כדוגמת התמודדות עם בצורות, או שימוש בשטחים פתוחים במדינות שכנות. בנוסף לכך, לשיתוף פעולה אזורי יש יתרונות כלכליים וטכניים. כך למשל מחקר משותף של מכון הערבה ואוניברסיטת אוקספורד[136] בחן את **התועלות בשיתוף פעולה אזורי** ישראלי-פלסטיני-ירדני, ומצא כי שיתוף הפעולה יקטין את סך ההשקעות שידרשו להשגת יעדי הפחתת הפליטות בכ-10%, את ההספק הסולארי והאגירה שידרשו להשגת יעדי המדינות בכ-20% ובפרט, ההספק הסולארי שיידרש בישראל יקטן בכ-84% משום שתהיה עדיפות להקים את המערכות הסולאריות בשטחי המדבריות של ירדן, שם הקרינה חזקה בכ-20% מאשר בישראל. על מנת לייצר את תשתית שיתוף הפעולה הבינלאומי יש לבנות מסגרות

[135] ראו החלטת ממשלה מספר 1231 מיום 6.3.2022 בנושא "אסטרטגיה לפיתוח ולקידום מפרץ חיפה ותיקון החלטת ממשלה".

[136] בעת הזו עדין אין פרסומים רשמיים של הצוות, אך להלן כתבה המתארת את הממצאים העיקריים:
https://www.zman.co.il/326346/popup/

המשלבות בין גופים שונים כגון: גופים אזרחיים, גורמי אקדמיה, גורמי תעשייה ועסקים במדינות האזור זאת בתמיכה של משרדי ממשלה וגורמי ממשל במדינות האזור השותפות.

צעד רלוונטי נוסף יכול להיות **הקמת עמק מימן וחדשנות בישראל שיהווה קטליזטור לחיבוריות אזורית.** העמק יהווה אקוסיסטם למספר מערכות השותפות לאותה תשתית פיזית של אספקת מימן ודלקים נקיים. העמק ימוקם באזור גיאוגרפי מוגדר והוא יכסה חלק משמעותי של שרשרת הערך של מימן, החל מטכנולוגיות ייצור, דרך אגירה והובלה ועד לשימושי צרכני הקצה בסקטורים השונים – תחבורה, תעשייה וחשמל. הקמת עמק מימן וחדשנות בישראל תקדם את היכולת ליישם בפועל שימוש במימן הן בהיבט התשתיתי והן בהיבט המסחרי, תסייע בגיבוש רגולציה מותאמת, קידום מחקר ופיתוח, תשמש הן כשטח נסיינות פיסי וכן לשימושים תעשייתיים, וזאת תוך ראייה אזורית ושיתוף פעולה עם מדינות שכנות בשיתוף ידע, ועבור מסחר במימן בין מדינות בעלות יכולת ייצור גבוהה למדינות עם ביקוש גבוה למימן.

יבוא אנרגיה ידרוש הקמת תשתיות מקומיות, אזוריות ובינלאומיות. בנוסף, בעת קבלת ההחלטות לגבי היקף הייבוא ומקורותיו, יהיה צורך לשקול את ההשלכות על ביטחון אספקת האנרגיה בישראל ביחס לגיוון מקורות, חיבוריות וגיאופוליטיקה, משמעויות בשעת חירום, השפעות של מגמות עולמיות, ועוד. צעד מרכזי להבטחת הביטחון האנרגטי בהקשר של יבוא יכול להיות מיצובה של ישראל כגשר תשתיתי אזורי.

לייבוא חשמל ומוצרי אנרגיה יש היבטים הקשורים בביטחון האנרגטי ואמינות האספקה, אלה צריכים להיבחן אל מול התועלת ביבוא ובן מול ההתפתחויות הגאופוליטיות והטכנולוגיות בתחומים אלה.

לסיכום, מומלץ לגבש תכנית אסטרטגית ארוכת טווח בייחס לחיבוריות אזורית ומקורות ייבוא אפשריים. במסגרת זו יש להתייחס לאתגרים השונים, מקורות אפשריים ליבוא, יתרונות יחסיים לישראל, וצעדים לגידור הסיכון ביחס ליבוא ולצורך הבטחת רציפות האספקה והביטחון האנרגטי.

5.2.6. טכנולוגיות משלימות

פתרון משלים לטכנולוגיות העיקריות שהוצגו לעיל הוא דלקים נקיים (סינתטים וביולוגים).

דלקים סינתטיים

דלקים סינתטיים מאפשרים ייצור חומרי דלק ללא פליטות של גזי חממה. ניתן להשתמש בדלקים אלו במגזרים הקשים להפחתה באמצעים אחרים כגון התעשייה כבדה, תובלה לטווחים ארוכים, תעופה וספנות, וכן לייצור חשמל. הדלקים הסינתטיים יקרים יותר משימוש ישיר בחשמל או במימן, ולכן סביר שישמשו רק כאשר אין אפשרות אחרת להפחתת פליטות. חלק מהדלקים, לדוגמא מתנול סינתטי, פולטים פד"ח בעת השימוש ומשכך תידרש תפיסה של הפד"ח הנפלט.

תנאים נדרשים לשימוש נרחב: מקור זמין וזול של מימן ואולי גם פד"ח. כמו כן יידרש שיפור בשיטות הפקת הדלקים בגון הוזלת עלויות, הגדלת קצבי ההפקה, מציאת זרזים אפקטיביים וארוכי חיים, ועוד.

הדלקים הנקיים אינם יכולים לבסס תרחיש מלא לאספקת האנרגיה למשק הישראלי, אך הם בכל הנראה יקחו חלק בכל תרחיש עתידי. בניתוח מגמות המעבר למקורות אנרגיה נקיים, נמצא כי לא בכל המגזרים ניתן יהיה לעבור באופן מלא לשימוש במקורות נקיים. כך למשל במגזר התחבורה חלק מהמשאיות הכבדות, המטוסים והספינות ימשיכו, גם בשנת 2050, להתבסס על דלקים. עולם הדלקים הסינתטיים והביולוגיים יאפשר להמשיך ולהפעיל כלים אלו תוך שימוש בדלקים נקיים.

דלקים אלו אינם מונעים את פליטת גזי החממה, הם מכילים תרכובות פחמימניות הדומות לדלקים הפוסיליים, אך בשעת ייצורם נקלט פד"ח מהאוויר, ובשעת השימוש בהם הוא נפלט חזרה לאטמוספרה, כך שבראיה כוללת, הפליטות מתקזזות והינן "נטו" אפס. כפי הנראה כיום, דלקים אלו יהיו יקרים יותר מהדלקים הפוסיליים הנוכחיים, אך בתוספת מיסוי פחמן שסביר שיושת בעתיד, יתכן ויהיו אף זולים מהדלקים הפוסיליים.

הסרת פחמן דו-חמצני

בבדי להשיג איפוס נטו של פליטות גזי החממה יהיה צורך להסיר פד"ח מהאטמוספרה (Carbon Dioxide Removal – CDR) בכמות שווה לזו שתיפלט. ישנן מספר טכנולוגיות לבצע זאת: אמצעים טכנולוגיים כגון תפיסה ישיר מהאוויר (Direct Air Capture – DAC) המשתמשת בתמיסות או מוצקים כימיים לקשירת הפד"ח מהאטמוספרה; הסרה של פד"ח מהאוקיינוסים; פיזור אבקת סלעים סיליקטיים הקושרים את הפד"ח והאוויר; ואמצעים ביולוגיים כגון גידול צמחים, הקולטים פד"ח מהאטמוספרה, והטמנת הפחמן האגור בצמחים[137] או שריפת הביומאסה לקבלת חשמל, תוך תפיסה והטמנה של הפד"ח הנתפס (טכנולוגיה המוכרת כ- Bioenergy with CCS – BECCS).[138]

תנאים נדרשים לשימוש נרחב: המשך מחקר ופיתוח הטכנולוגיות והבאתן לבשלות מסחרית, הוזלת העלויות והעלאת כדאיות השימוש בטכנולוגיות אלו.

למרות הטכנולוגיות העתידיות, יתכן ולא יתאפשר לאפס לחלוטין את פליטות גזי החממה ממשק האנרגיה – בכל הנראה יהיה קושי להסב את כל צי המשאיות לחשמל או מימן, אתגר משמעותי בהסבת המטוסים והספינות באופן מלא לשימוש בדלקים נקיים. גם במגזר התעשייה יתכן ולא יתאפשר להמיר את כל המתקנים למקורות אנרגיה נקיים בחשמל או מימן.

בבדי להשיג **איפוס נטו** של פליטות גזי החממה יהיה צורך להסיר פד"ח מהאטמוספרה בכמות שווה לזו שתיפלט. לשם כך יהיה צורך להשתמש בטכנולוגיות של "הסרת פחמן" (Carbon Dioxide Removal – CDR), דהיינו הסרה

[137] למשל, באמצעות פיחום והטמנת הפחם שנותר, טכניקה הידועה כ-"ביו-צ'אר". ראו למשל הסבר זה באתר משרד החקלאות האמריקאי: https://www.climatehubs.usda.gov/hubs/northwest/topic/biochar

[138] לסקירה של טכנולוגיות ההסרה השונות ראו:

Carbon removals: How to scale a new gigaton industry, McKinsey Sustainability 2023.

של הפד"ח מהאטמוספרה בכמות הנדרשת לאיפוס. נושא הסרת הפחמן מובר גם מתוכניות "נטו אפס" נוספות כגון מתווה ה-IEA לאיפוס עד 2050[139] והתוכנית האירופאית לאיפוס.[140] טכנולוגיות הסרת הפחמן עדין בפיתוח ויש לעקוב אחר התחום ולבחון את הטכנולוגיות לכשיבשילו גם בישראל.

5.3. טכנולוגיות נוספות

מעבר לטכנולוגיות להפחתת פליטות שתוארו לעיל, קיימות טכנולוגיות נוספות הנמצאות בשלבי מחקר ופיתוח שונים. טכנולוגיות אלו הינן בסבירות נמוכה יחסית להגיע לבשלות מסחרית עד לשנת 2050, ולכן הן אינן נכללות בעבודה זו, אך אם יצליחו הן עשויות לשנות באופן מהותי את פני מגזר האנרגיה.

בין הטכנולוגיות הנוספות להפחתת פליטות ניתן למנות **שיפורים בטכנולוגיית PV** שיורידו את העלויות ויגדילו את הנצילות של הפאנלים הפוטו-וולטאיים ויאפשרו בכך להפיק יותר חשמל מכל יחידת שטח; **הפקת מימן ישירות מקרינת השמש** שתאפשר הפקה של מימן בעלות נמוכה ובנצילות גבוהה יותר לשימושים תעשייתיים או להפקת חשמל; **שיפורים בטכנולוגיית האגירה** שיאפשרו לייצר סוללות זולות ללא סכנת התלקחות ובעלות אורך חיים ארוך למכוניות חשמליות ולאגירה ברשת; **היתוך גרעיני** המבוסס על היתוך אטומי מימן שיוכל לאפשר גישה למקור אנרגיה זול, נקי ושופע, ללא שימוש בחומרים רדיואקטיביים וללא סיכוני תאונות או הפצה של נשק גרעיני; **גיאותרמיקה עמוקה** המאפשרת גישה לחום של ליבת כדור הארץ בכל אתר בעולם בקידוח לעומק מספר ק"מ, ובכך להפיק אנרגיה בלתי מוגבלת, נשלטת, ונקייה מכל מזהמים; **אנרגיית רוח בגבהים** המבטיחה גישה לזרמי רוח מהירים וקבועים שניתן לנצל לייצור חשמל בכל שעה בגובה של מספר מאות מטרים; **אנרגיית רוח בים העמוק** תוך שימוש בטורבינות רוח צפות המאפשרת ייצור כמויות חשמל גדולות ללא השפעות נופיות או פגיעה בבעלי כנף; **אנרגיה סולארית בים** המאפשרת להתמודד עם בעיית השטחים הקרקעיים ולהפיק כמויות אנרגיה גדולות מהשמש.

מומלץ כי בכל מספר שנים תערך בחינה מחודשת של כלל הטכנולוגיות המוזכרות, ושאינן מוזכרות, והערכה מחדש של מידת הרלוונטיות שלהן ליישום במשק הישראלי.

לפירוט טכנולוגיות נוספות לאיפוס פליטות, יתרונות וחסרונות ראו נספח ב': טכנולוגיות פורצות דרך.

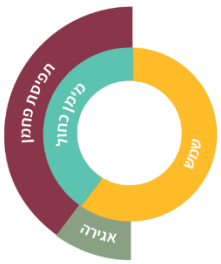
בתרשים בעמוד הבא מתוארות חמש הטכנולוגיות העיקריות לאיפוס פליטות הפחמן שפורטו לעיל.

[139] *World Energy Outlook 2022*, IEA 2023.

[140] *Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050*, EU JRC 2020.

תרשים 48: תרחיש הבסיס וחמשת הטכנולוגיות להשגת איפוס פחמני מלא במשק האנרגיה

מימן כחול
ייצור מימן מזג טבעי, בתוספת תפיסת הפחמן הנפלט והטמנתו.



יבוא
יבוא אנרגיה בכבל (חשמל), צינור (מימן), או ספינות (מימן ודלקים סינתטיים)







תרחיש הבסיס
54% סולארי בתוספת אגירה, חישמול ככל הניתן.
משאיות, ספינות ומטוסים יתודלקו על פי המגמות העולמיות.



אנרגיה מתחדשת
תוספת סולארי, כולל אגירה עונתית.
מימן ירוק במגזרים קשים לחישמול.





גז טבעי ותפיסת פחמן
המשך השימוש בגז טבעי להשלמת ייצור החשמל ובמגזרים הקשים לחישמול, בתוספת תפיסת הפחמן הנפלט והטמנתו.



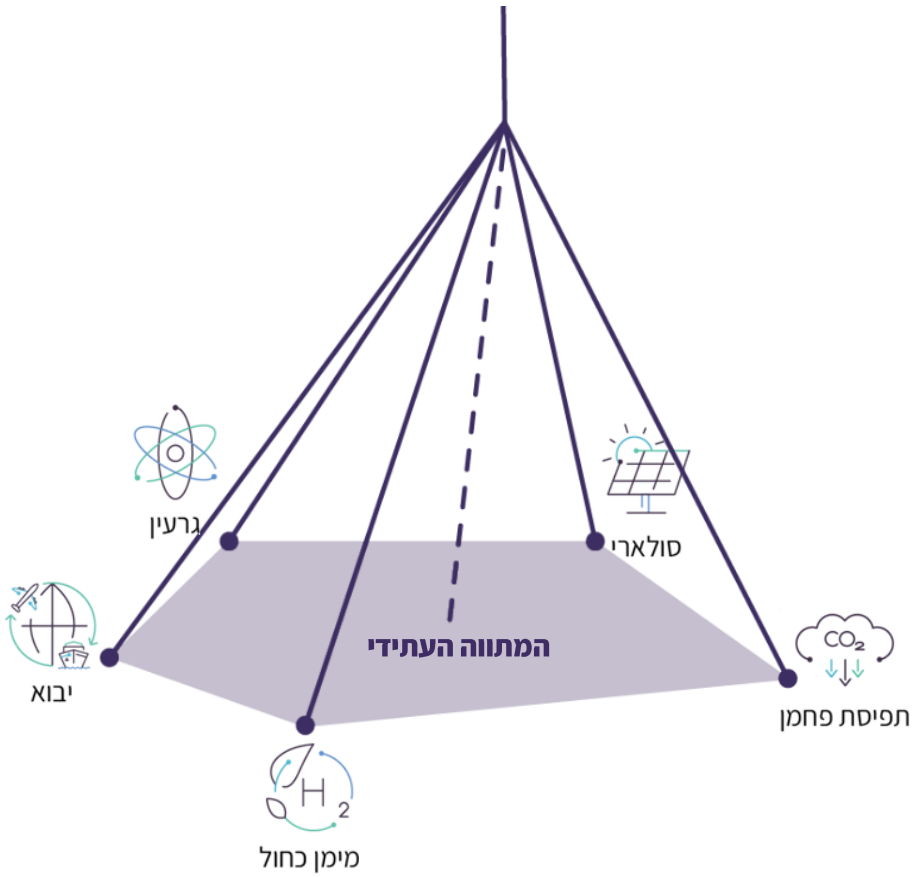


גרעין
שימוש באנרגיה גרעינית להפקת חשמל ומימן.
ידרוש תוספת ייצור סולארי או מגז טבעי עם תפיסת פחמן.





תרשים 49: מרחב הפעולה העתידי לאיפוס הפליטות. חמש הטכנולוגיות שנבחנו מתוות את קצוות מרחב הפעולה בו נוכל לפעול בעתיד



כפי שניתן לראות בתרשים 49, חמש הטכנולוגיות שתוארו לעיל מתוות את הקצוות של מרחב הפעולה העתידי ובוחנות את התנאים וההשלכות של שימוש בכל טכנולוגיה בפני עצמה. אולם, כפי שראינו בניתוח לעיל, לכל טכנולוגיה קיימים אתגרים משמעותיים ליישום מלא, **ולא ניתן יהיה להסתמך על טכנולוגיה אחת בלבד להשגת איפוס פחמני.** כל פתרון עתידי יהיה חייב להתבסס על **שילוב של מספר טכנולוגיות** בכדי לקבל חליפה שלמה המכסה את כל צרכי המשק בכל עת.

בנוסף, שיקולי ביטחון באספקת האנרגיה מחייבים אף הם גיוון במקורות האנרגיה, ולכן יש לשלב מספר טכנולוגיות באופן שיאפשר גיבוי הדדי באירועי קיצון. שילוב הטכנולוגיות יביא את המשק לנקודה כלשהי במרחב הפעולה התחום בחמש טכנולוגיות הקצה כפי שניתן לראות בתרשים. יחד עם זאת, לשילוב טכנולוגיות יש מחיר משמעותי בהקמה של תשתיות תומכות, ולכן יש לבצע איזון בין התועלת בשילוב טכנולוגיות חדשות ומגוונות אל מול העלות של הקמת התשתיות הנדרשות לטכנולוגיות אלו.

הטבלה להלן מרכזת את הסוגיות המרכזיות ומשווה בין הטכנולוגיות השונות.

טבלה 4: השוואת חמשת טכנולוגיות ההפחתה שנבחנו

	אנרגיה מתחדשת ומימן "ירוק"	גז טבעי עם תפיסת פחמן	מימן "כחול"	אנרגיה גרעינית ומימן "אדום"	יבוא אנרגיה והפיכת ישראל לגשר אנרגטי
בשלות הטכנולוגיה	קיימת, למעט אגירה עונתית. נצילות נמוכה	בפיתוח	בפיתוח	קיימת, בתהליכי שיפור ושדרוג	ישנם פרויקטים בפיתוח. נדרשים פרויקטים נוספים
סוגיות שטח ותכנון	דרישת שטח גבוהה מאד, עד 1.5 מיליון דונם	נדרש איתור שטחי הטמנה וסלילת רשת הולכת פד"ח	נדרשים שטחי ייצור ותשתיות הולכה	איתור שטחים והקמת רשת לאתרים	אתרי קליטה לדלקים ואחסון
דרישת גז טבעי	אין	גבוהה	גבוהה	אין	אין
תשתיות נוספות	פרישה של רשת חשמל ואגירה נרחבת	רשת ארצית להולכת פד"ח ואתרי הטמנה	אתרי הפקת מימן, רשתות ארציות להולכת מימן ופד"ח ואתרי הטמנה לפד"ח	פרישת רשת לתחנות הכוח, מיגון	תשתיות קליטה, מכלי אחסון ותשתיות להפצה
סוגיות נוספות	אגירה עונתית	צריכת הגז הטבעי ביחס לעתודות	צריכת הגז הטבעי ביחס לעתודות	סוגיות טכנולוגיות, רגולטוריות ומדיניות	ביטחון אנרגיה, פיתוח שווקי הדלקים הנקיים

בהתאם לטבלה לעיל, נראה כי אף טכנולוגיה אינה יכולה להוות פתרון שלם, וכל אחת מהן מתנגשת באחד או יותר מהעקרונות לתכנון המדיניות כפי שתוארו בפרק 3.2.1 עקרונות בסיס להשגת היעדים:

- שימוש מאסיבי **באנרגיה מתחדשת** ידרוש שטח עצום שקשה לראות כיום ביצד יושג ללא פגיעה קשה בסביבה ובנוף. כמו כן תידרש אגירה עונתית של כ-14 TWh – פי 75 מסך סוללות האגירה העולמי בסוף שנת 2023(!) – וייצור של מימן ודלקים סינתטיים לתעשייה ולתעופה וספנות;
- שימוש מאסיבי **במימן כחול או בגז טבעי עם תפיסת פחמן** ידרשו בשנת 2050 ומעבר לה כמויות גז טבעי של מעל ל-20 BCM בשנה (כמעט כפול מהצריכה הנוכחית), הקמת תשתיות נרחבות לתפיסה והולכה של הפד"ח, וכן אתרים לאחסון הפד"ח;
- שימוש **באנרגיה גרעינית** בישראל מוגבל בשל הקושי באיתור מיקומים מתאימים, ולבן ההספק הגרעיני יוכל לייצר בכל הנראה כ-15-20% מסך הביקוש לאנרגיה בלבד, כך שידרשו אמצעים נוספים להשלמת הביקוש;
- **יבוא אנרגיה** בכמויות גדולות יאתגר את הבטחת האספקה ויחייב גיבוי בהיקף משמעותי.

מחווה לאיפוס פליטות גזי חממה ממגזר האנרגיה בישראל עד לשנת 2050

תרשים 50: בכל טכנולוגיית איפוס קיימים מכשולים משמעותיים



ממצאי הניתוח מלמדים כי הטכנולוגיות הקיימות לאיפוס פליטות במשק האנרגיה לא מסוגלות לספק בפני עצמן פתרון שלם. כל טכנולוגיה שתבחר תדרוש שילוב עם טכנולוגיות וכלים נוספים על מנת להשיג את יעד האיפוס.

בפרק הבא נציג בחינה של תרחישים המשלבים מספר טכנולוגיות באופן שיאפשר את השגת יעד האיפוס מבלי להיתקל במגבלות של כל טכנולוגיה כשהיא מיושמת בפני עצמה.

6. תרחישים משולבים

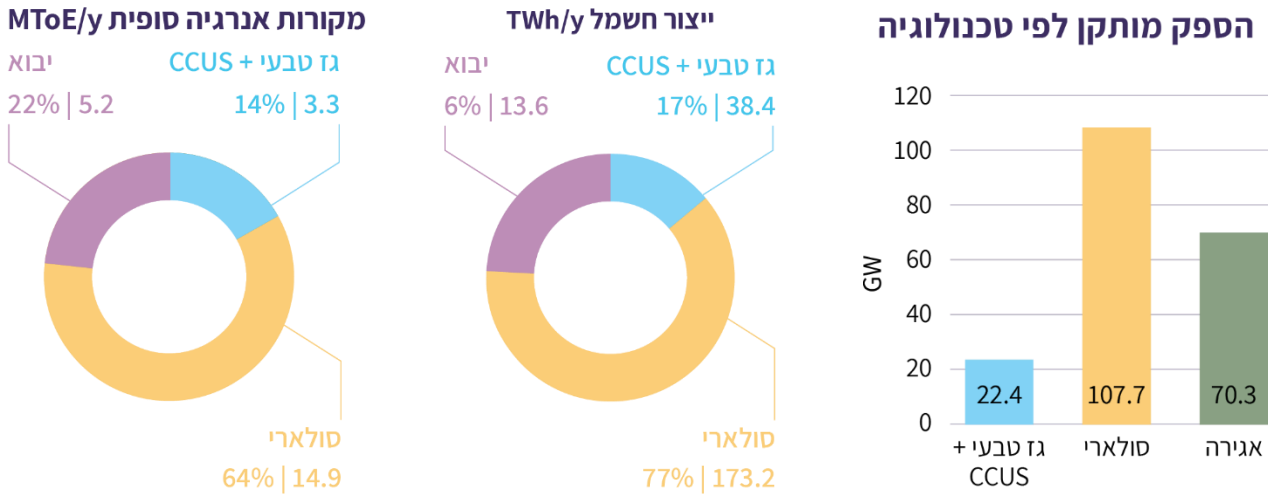
היות ואף טכנולוגיה בודדת לא תאפשר לספק את כלל הביקוש לאנרגיה בשנת 2050 ומעבר לה, הרי שיהיה צורך בשילוב מספר טכנולוגיות למענה מלא על הביקושים. שילוב טכנולוגיות שונות, שיאפשרו לגבות אחת את השנייה במקרה חירום או כשל, יענה גם על צרכי ביטחון האספקה שפורטו לעיל, ובמקביל יעמדו בעקרונות לתכנון שתוארו בתחילת המסמך.

בנקודת הזמן הנוכחית קשה לבצע אופטימיזציה מלאה של משק האנרגיה עד לשנת 2050, בשל חוסר הוודאות ביחס ליכולת היישום של הטכנולוגיות השונות, לפרמטרי התפעול שלהן, לעלויות הצפויות, לשיפורים הטכנולוגים העתידיים שלהן ועוד. לכן, נבחנו שלושה תרחישים כדוגמא לתרחישים עתידיים אפשריים. תרחישים אלה משלבים טכנולוגיות שונות באופן שלא יעמיס באופן קיצוני טכנולוגיה בודדת, אך גם לא יידרשו השקעות גבוהות מידיי בתשתיות.

6.1. התרחיש המשולב הצהוב

התרחיש הצהוב משלב כמות גדולה ככל האפשר של מקורות מתחדשים, בעיקר אנרגיה סולארית, בצירוף גז טבעי עם תפיסת פחמן וייבוא חשמל ודלקים, באופן שיאפשר להתמודד עם המחסור העונתי ללא אגירה ארוכת טווח. הגז הטבעי עם תפיסת הפחמן וייבוא האנרגיה הנקיה יאפשרו גיבוי לתקלות ולתקופות בהן אספקת האנרגיה הסולארית נמוכה (ימי חורף מעוננים או סופות חול ואבק בקיץ).

תרשים 51: ההספק המותקן, תמהיל הדלקים לייצור חשמל ומקורות האנרגיה בתרחיש הצהוב



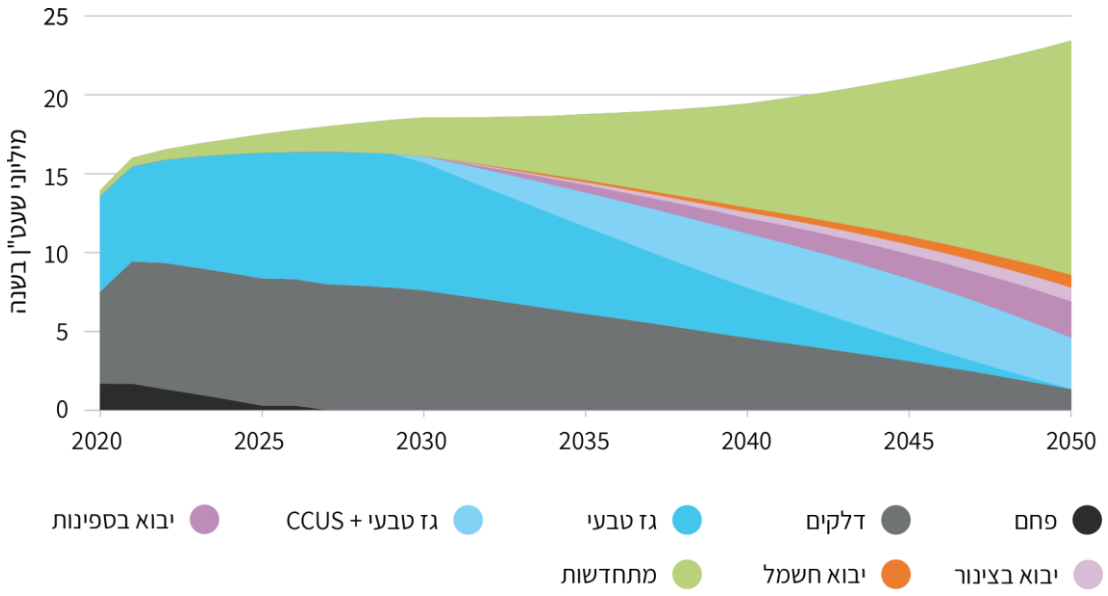
בתרחיש זה כ-77% מהחשמל ייוצר ממקורות מתחדשים ויהווה כ-60% מכלל הביקוש לאנרגיה בישראל, כש-40% הנותרים יתבססו על גז טבעי עם תפיסת פחמן ואנרגיה מיובאת – חשמל שיגיע מאירופה או מטורבינות רוח מחוץ לישראל, מימן נקי שיוכל להגיע בצינורות ממדינות שכנות, ודלקים סינתטיים וביולוגיים כגון אמוניה או מתנול. הגז הטבעי יסייע בייצור חשמל בפרקי זמן בהם השימוש באנרגיה סולארית נמוך (שעות הלילה וחודשי החורף), וחשמל מיובא יוזן ישירות לרשת ההולכה הארצית. המימן והדלקים הנקיים יזינו משאיות כבדות ומפעלי תעשייה שבכך יפסיקו את פליטת גזי החממה משריפת הדלקים. בנוסף לכך דלקים נקיים ישמשו את מגזרי התעופה והספנות.

למימוש תרחיש זה יידרש הספק סולארי עצום של כ-108 ג'יגה-ואט שמשמעותו היא ביסוי שטח של כ-800-900 אלף דונם במערכות סולאריות (מרביתם בדו-שמוש), כתלות בנצילות המערכות בעתיד. במקביל, יידרש הספק אגירה משמעותי מאד של כ-70GW בבדי להתאים בין הייצור לצריכה לאורך המחזור היומי. יש לציין כי במתווה בו נעשה שימוש בחום (לדוגמא, בתעשייה), קולטים תרמו-סולאריים (למים חמים) הינם יעילים פי 4-5 מקולטי PV ולכן ידרשו

שטח קטן פי 4-5, ובנוסף ניתן לאגור חום בעלות נמוכה בהרבה מאגירת חשמל. כך ששימוש בחום סולארי עשוי להפחית משמעותית את השטח הנדרש.

להלן תיאור התפתחות תרחיש זה משנת 2020 ועד לשנת 2050:

תרשים 52: צריכת אנרגיה סופית בתרחיש המשולב הצהוב



ניתן לראות כי השימוש בדלקים ובגז הטבעי במשק יצטמצם, ובמקום דלקים אלה יגדל הייצור הסולארי, ויגדלו גם ערוצי הייבוא של מוצרי אנרגיה נקיים. יש לזכור כי ברקע תרשים זה נמצא גידול מתמיד בביקושים לאנרגיה, כך שעד לשנת 2050 הביקוש יצמח פי שתיים ויותר ביחס לשנת 2024. הגידול בגרף נמוך יותר, משום שבמעבר מדלקים לחשמל, בעיקר בתחום התחבורה, קיימת התייעלות משמעותית באנרגיה.

התרחיש הצהוב מבוסס על העקרונות הבאים:

- השגת יעד הפקת חשמל של 30% מאנרגיות מתחדשות בשנת 2030, והמשך העלאת אחוז המתחדשות בקצב הולך וגובר עד להשגת 108,000 מ"ו סולאריים בשנת 2050. בכדי להגיע להספק זה יהיה צורך להאיץ את קצב ההתקנות מהתקנה של כ-1,500 מ"ו בשנה בשנת 2050, עד לכ-7,500 מ"ו בשנה בשנת 2050. מדובר בהספק עצום, אך תרחיש זה יוכל להתקיים רק אם יושגו התפתחויות משמעותיות בתחום הסולארי וסביר שאלו יאפשרו קצבי התקנה גבוהים כאלו.

- במקביל, יותקנו גם מתקני אגירה בסוללות או בטכנולוגיות שונות כגון אוויר דחוס, אגירה גרביטציונית, וכדומה. ככל שהספק האנרגיה הסולארית יעלה, יגבר גם הצורך במתקני האגירה שיוכלו לשמור את עודפי החשמל מהצהריים ולהעבירם ללילה. הספק האגירה הכולל שיידרש יגיע עד לכדי 70,000 מ"ו בשנת 2050. היקף ייצור החשמל מאנרגיה סולארית הוגבל על מנת לייתר את הצורך באגירה עונתית, שאינה סבירה בטכנולוגיות המוכרות.

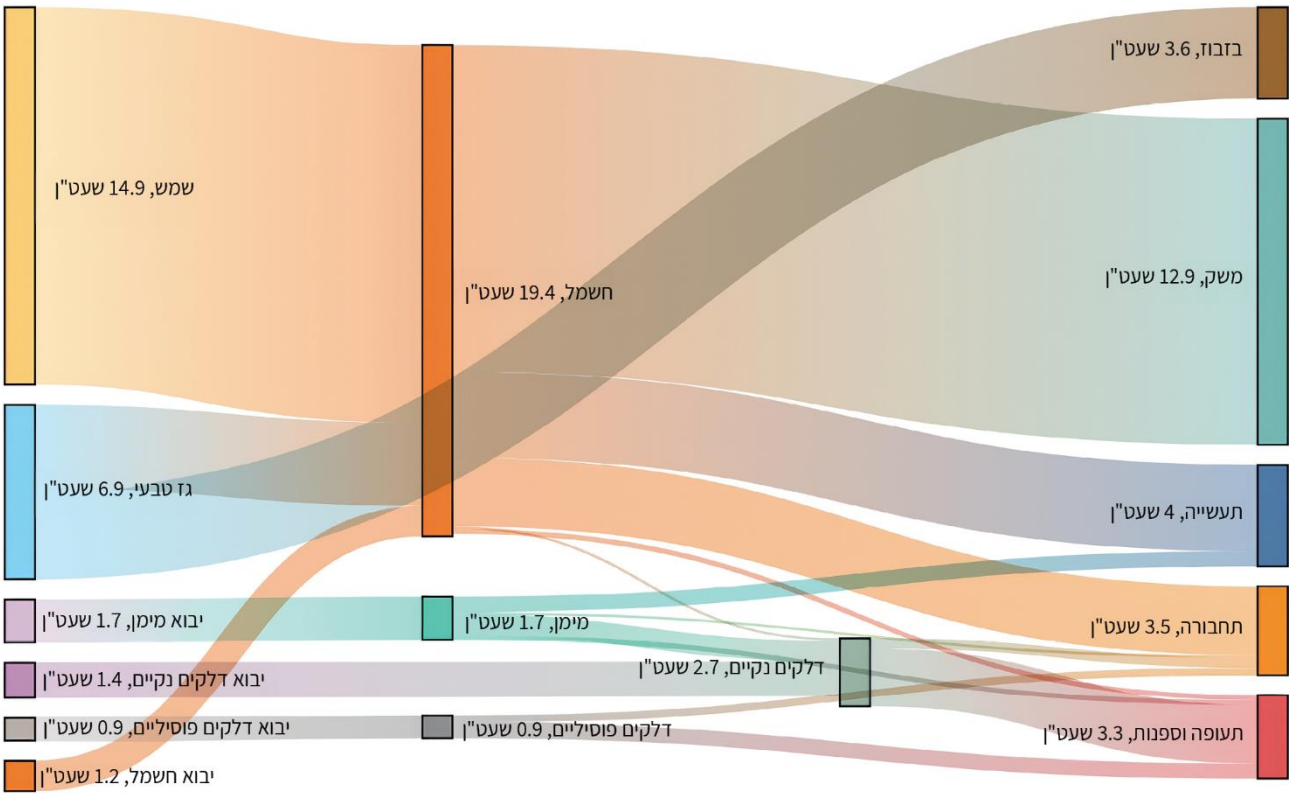
- בנוסף למערכות הייצור הסולארי והאגירה, יתוחזקו גם טורבינות גז בהספק כולל של כ-22,400 מ"ו שיונעו בגז טבעי עם תפיסת פחמן. טורבינות אלו יופעלו בתקופת החורף, לאספקת חשמל בלילה כאשר בסוללות לא ייאגר מספיק חשמל סולארי, ולהטענת הסוללות ביום כאשר המשק יצרוך את החשמל הסולארי שייווצר. שימוש זה בגז טבעי יגיע עד כדי **צריכה של כ-7.6 BCM גז טבעי בשנה** בשנת 2050. צריכה זו תימשך גם מעבר לשנת 2050, ויש לבחון זאת בהתייחס לתחזיות עתודות הגז הטבעי.

- מימן ישמש את מגזרי התעשייה והתחבורה. הוא ייובא ממדינות שכנות באמצעות צינורות או כאמוניה או באמצעות LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) בספינות. יבוא זה ידרוש תשתיות מורכבות כגון צינורות מימן חוצי גבולות או תשתיות נמל לייבוא ואחסון הדלקים.

בנוסף לכך, בתרחיש מוטה אנרגיה סולארית, יהיו עודפי יצור סולאריים שאי אפשר יהיה לקלוט לרשת או לאגור והם יושלכו (curtailment). בתרחיש הצהוב, צפויים להיווצר כ-4.7 TWh עודפים של חשמל סולארי בשנה שניתן יהיה להפיק מהם מימן ירוק. כמות חשמל זו תאפשר להפיק כ-116,000 טון מימן ירוק בשנה בייצור מקומי, שיהוו כ-20% מצריכת המימן הצפויה בתרחיש זה. למימן ירוק בייצור מקומי על גבי תשתיות סמובות לצרכני הקצה יש יתרונות רבים כתחליף לייבוא מימן – מחירו הכולל הוא ככל הנראה יהיה זול יותר, הוא מתאפשר ללא תשתיות מרובות ומורכבות, ומחזק את העצמאות באנרגיה וביטחון האספקה.

תרחיש זה, תלוי בכמה קפיצות דרך טכנולוגיות – פאנלים סולאריים יעילים יותר שידרשו פחות שטח, טכנולוגיות אגירה שיאפשרו אגירת חשמל בכמויות גדולות בעלות נמוכה וללא צורך במינרלים אקזוטיים כליתיום או קובלט, איתור שטחים נרחבים להקמת מערכות סולאריות כדוגמת שטחי חקלאות בטכנולוגיה אגרו-וולטאית, ועיבוי רשת הולכת החשמל כך שתהיה מסוגלת לקלוט את הייצור הסולארי ולפזר אותו לאזורי הביקוש. כמו כן ידרשו התפתחויות בתחום תפיסת הפחמן והטמנתו, וכן בערוצים המדיניים לפיתוח צינורות מימן חוצי גבולות או שווקים בינלאומיים למימן ונגזרותיו כמו גם דלקים נקיים נוספים שיאפשרו יבוא רציף בכמויות גדולות. בתרחיש זה עד לשנת 2050 יפחת משמעותית השימוש בגז טבעי במשק. על פי המודל, **משנת 2020 ועד 2050 ידרשו למשק הישראלי כולו סך של כ-430 BCM גז טבעי**, וצריכה זו תמשיך בקצב של **כ-7.6 BCM** גז טבעי בשנה, כמות שתגדל ככל שימשיך לגדול הביקוש הבסיסי לאנרגיה.

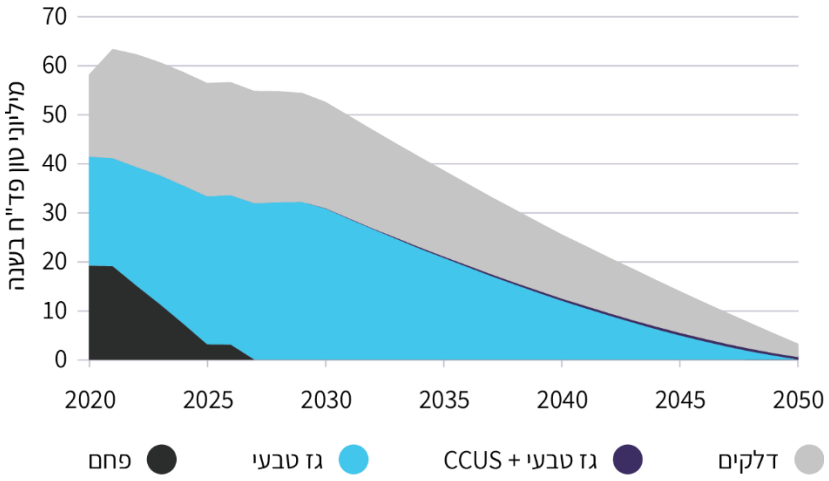
תרשים 53: תרשים סאנקי של מעברי האנרגיה בתרחיש הצהוב בשנת 2050



תרשים סאנקי (Sankey) מתאר את מעברי האנרגיה בין הרכיבים השונים של המשק – ממקורות האנרגיה הראשוניים ועד לשימוש הסופי. ניתן לראות בתרשים 53 לעיל את הרכיב של אנרגיית השמש המופנה להפקת חשמל, כמו גם את רכיב הגז הטבעי (עם תפיסת פחמן) המשמש לייצור החשמל. עקב נצילות טורבינות הגז, כמחצית מהאנרגיה הגלומה בגז הטבעי הופכת לחום ו"מבוזבזת". בשל השימוש הנרחב באנרגיית השמש בתרחיש הזה, רכיב ה"בזבוז" יחסית נמוך בהשוואה לתרחישים האחרים. יבוא המימן בתרחיש זה משמש רק לצורך התעשייה והתחבורה הכבדות. רכיב השימוש של המשק בתרשים, מגלם בתוכו את מגזרי המגורים, המסחר, מבני הציבור, הרש"פ, חקלאות ומשק המים.

לפי מדד ה-LCOE, בתרחיש זה מחיר קוט"ש חשמלי משוקלל, בשנת 2050 יעמוד על כ-91.5 $/MWh. מחיר זה ברובו מיועד להחזר עלויות ההקמה של התשתיות הסולאריות. מדובר בעלות נמוכה יחסית, אך יש לציין כי למרות שהיא כוללת את עלות המערכות הסולאריות עצמן ומערכות האגירה הנלוות לה, היא אינה כוללת את עלויות משמעותיות אחרות כגון עלות הקרקע ועלויות שדרוג רשת החשמל לקבלת ההספקים הגבוהים של המערכות הסולאריות.

תרשים 54: הערכת פליטות גזי החממה ממגזר האנרגיה עד לשנת 2050 בתרחיש הצהוב



בהתאם לתרחיש הצהוב, בשנת 2050 תושג הפחתה של כ-95.3% בפליטות גזי החממה ממשק האנרגיה ביחס לשנת 2015. ניכר כי ההתקנות הסולאריות המואצות והשימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן יביאו לאיפוס כמעט מלא של הפליטות מהגז הטבעי. בשנת 2050 מתקני תפיסת הפחמן יתפסו כ-16 מיליון טון פד"ח. הפליטות שעדיין יוותרו נובעות מכך ששימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן אינו מבטיח תפיסה של 100% מפליטות גזי החממה וכ-3% מהן יפלטו בסופו של תהליך לאטמוספרה. המעבר המשמעותי לרכב חשמלי יצמצם כמעט לחלוטין את הפליטות בעולם הדלקים – למעט מגזרי התחבורה הכבדה, התעופה והספנות, שיוותר בהם שימוש מועט בדלקים פוסיליים.

בכדי להגיע לאיפוס מלא (נטו) של פליטות גזי החממה יהיה צורך להסיר מהאטמוספרה בטכנולוגיות CDR (Carbon Dioxide Removal) את כמות הפליטות השיוריות שעדיין יפלטו בשנת 2050, בסך של כ-3.2 מיליון טון פד"ח בשנה. ערכים אלו דומים לכמות הפליטות השיוריות שהוערכו בדוחות שונים. כך למשל, התכנית הגלובלית לאיפוס פליטות של ה-IEA העריכה שיהיה צורך בהסרת פד"ח בסך של 1.5 מיליארד טון פד"ח בשנת 2050[141], והתכנית האירופאית לאיפוס פליטות העריכה הסרה של 200-260 מיליון טון פד"ח בשנת 2050.[142] לפי עלות משוערת של כ-100$ להסרת טון פד"ח,[143] ההוצאה הכוללת להסרת 3.2 מיליון טון פד"ח בשנה עשויה להגיע לכדי כ-1.2 מיליארד ש"ח בשנה.

לסיכום, התרחיש הצהוב יאפשר להשתמש באחוז הגבוה ביותר של מקורות מתחדשים בשילוב מימן ירוק, תוך הימנעות מהקושי הכרוך באגירה עונתית, עם השלמת ההספק הנדרש באמצעות שימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן ויבוא אנרגיה נקיה שיאפשרו אספקת חשמל גם בימי ולילות החורף, גם בעננות וגם באובך.

[141] *World Energy Outlook 2022*, IEA 2023.

[142] *Towards net-zero emissions in the EU energy system by 2050*, EU JRC 2020.

[143] ראו הערכות לעלויות טכנולוגיות ההסרה השונות:
Carbon removals: How to scale a new gigaton industry, McKinsey Sustainability 2023.

טבלה 5: סיכום התרחיש הצהוב

יתרונות
• **שימוש מקסימלי במקורות אנרגיה מתחדשים.** • **הימנעות מהצורך באגירה עונתית** המהווה אתגר טכנולוגי וכלכלי כבד. • יצור חשמל באופן מקסימלי **ממקור האנרגיה הזול ביותר** – השמש.
תנאים
• **שטח נרחב:** ההספק הסולארי הגבוה ידרוש שטחים נרחבים. גם אם יעשה שימוש מקסימלי בשימוש כפול בשטח (דו שימוש), עדיין ידרשו שטחים קרקעיים ושטחי אגרו-וולטאיים למערכות. כמו כן, השימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן דורש הקמה של תשתית לתפיסה והטמנת הפחמן. • **עיבוי רשת החשמל:** שילוב אחוז מאד גבוה של אנרגיה סולארית ברשת ידרוש עיבוי וחיזוק הרשת והגדלת הגמישות, הן ברשתות החלוקה והן ברשת ההולכה. • **שיפור משמעותי בנצילות הפאנלים וטכנולוגיות חלופיות** כגון יריעות גמישות וקלות או מערכות סולאריות בצביעה. • **נדרש שיפור משמעותי בטכנולוגיות האגירה:** נצילות גבוהה יותר, עלות מופחתת, אורך חיים גבוה יותר, שימוש בחומרים נפוצים וזולים, השפעות סביבתיות מופחתות. • **עתודות גז טבעי** מעבר לאופק שנת 2050.
אתגרים
• **שעות הייצור אינן תואמות באופן מלא את שעות הביקוש** לחשמל. • **מקור האנרגיה העיקרי הוא תנודתי** ומייצר מחסור באינרציה ברשת. • מחייב **הסבת המשק לחשמל** באופן מקסימלי.

6.2. חלופת המשך – שימוש במימן ירוק

בתרחיש זה ניתן להסיט חלק מהחשמל המיוצר באנרגיה סולארית לטובת ייצור מימן ירוק לשימוש מקומי, וזאת עבור פרויקטי מימן בכלל, ועמק מימן בפרט בייעוד עבור אזורי תעשייה ותחבורה משמעותיים.

בראיה ארוכת טווח, הסטת חלק מהחשמל לייצור מימן ירוק תאפשר את חיזוק משק האנרגיה בישראל במספר אפיקים: פיתוח משק המימן בישראל, מתן מענה לאתגרים בפיתוח תשתיות, גיוון מקורות האנרגיה, ועידוד יזמות וחדשנות ישראלית. אפיקים אלה שזורים זה בזה ויכולים לקדם את ישראל לאיפוס פליטות, לבסס את הבטחון באנרגיה, ולמצב את ישראל כמובילה עולמית בתחום האנרגיה הנקיה.

כבר כיום ישנם מפעלים וארגונים המקדמים הלכה למעשה פרויקטי מימן ירוק, וזאת מתוך צורך וראייה עתידית ביתרונות האנרגיה הנקייה. הפרויקטים כוללים יצור חשמל בשדה סולארי סמוך והזנתו לאלקטרולייזר להפקת מימן ירוק. הובלת המימן נעשית במיכליות או ברשת צנרת מקומית לצרכני הקצה. מעבר להיותו מקור אנרגיה הניתן לאגירה ולהמרה לחשמל בחזרה, ייצור המימן הירוק משמש גם להפקת חום בטמפרטורות גבוהות לתהליכים תעשייתיים קשים לחישמול, כדלק לכלי רכב כבדים, וכחומר גלם הנדרש בתהליכים תעשייתיים השונים. ככל שהרגולציה העולמית מתקדמת לייצור מאופס פליטות ומפעלים נדרשים לעמוד בסטנדרטים בינלאומיים על מנת לסחור, השקעה בתשתיות מקומיות לייצור המימן הירוק היא כורח המציאות.

בהתאם לאסטרטגיית המימן לישראל,[144] נדרשת היערכות הנוגעת להקמת תשתיות לשימוש במימן; בין אם מדובר על ייצור מצומצם לצריכה מקומית בכמויות קטנות אשר ייתנו מענה משלים לאיפוס פליטות של מגזרי התחבורה והתעשייה הכבדה, ובין אם מדובר על אפשרויות ייבוא שיתנו מענה לביקושים העתידיים, עובדה אשר תחזק את מעמדה של ישראל כגורם מקשר בין מדינות ייצוא לייבוא מימן.

בהתאם לטכנולוגיות הקיימות היום, יצור מימן ירוק דורש המרה של החשמל המיוצר מאנרגיה מתחדשת למימן, והמרה נוספת לשימוש חוזר בו כחשמל. המרות אלה גוררות איבודי אנרגיה, ומשכך ידרשו תוספת משמעותית של

[144] אסטרטגיית מימן לישראל, פברואר 2024, משרד האנרגיה והתשתיות

שטח להקמת מתקנים לייצור אנרגיה מתחדשת נוספת. ככל שתהיה התקדמות טכנולוגית משמעותית ושיפור ביעילות ייצור המימן הירוק, שילוב נרחב של מימן ירוק יהיה בדאי מבחינה אסטרטגית.

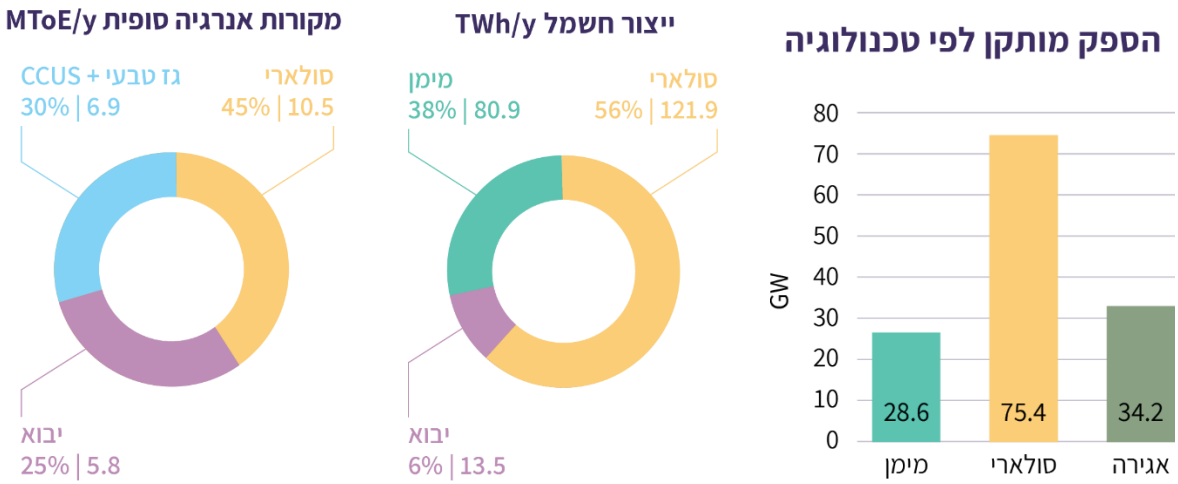
לפי מדד ה-LCOE, בתרחיש זה מחיר קוט"ש חשמלי משוקלל, בשנת 2050 יעמוד על כ-102 $/MWh. מחיר זה כולל בעיקר את התשתיות הסולאריות ואת האלקטרולייזרים לייצור מימן ירוק. כאמור, בשלב זה נראה כי העלויות גבוהות, אך ככל שיהיו התפתחויות טכנולוגיות יש לבצע בחינה מחודשת של תרחיש זה.

6.3. התרחיש המשולב הכחול

בתרחיש הכחול כ-30% מהאנרגיה יופקו ממימן שייוצר בארץ מגז טבעי עם תפיסת פחמן (מימן כחול). בנוסף, כ-45% מכלל ממקורות האנרגיה ייוצרו ממקורות מתחדשים (בעיקר אנרגיה סולארית), והם יהוו כ-55% מאספקת החשמל. שאר האנרגיה תיובא לישראל כמימן נוסף, חשמל ודלקים נקיים.

למרות שהתרחיש הצהוב מאפשר לצמצם את הצורך באגירה עונתית ומקטין את השטח שיידרש למערכות הסולאריות בכ-30%, עדיין מדובר בדרישת שטח גבוהה וישנן השלכות משמעותיות לשימוש הגבוה באנרגיה סולארית, כגון כמות גדולה של אגירה וצורך בעיבוי משמעותי של רשת ההולכה. גם מבחינת ביטחון אנרגיה ההסתמכות המשמעותית על מקור אנרגיה שאינו נשלט מגדילה את הסיכונים לאספקה רציפה של חשמל. התרחיש הכחול מציע חלופה באמצעות שימוש מוגבר במימן כחול במשק החשמל.

תרשים 55: ההספק המותקן, תמהיל הלדקים לייצור חשמל ומקורות האנרגיה בתרחיש הכחול



באמור, כבר כיום מדינות רבות, כדוגמת מדינות אירופה, יפן וסינגפור, מתכננות כי משק האנרגיה העתידי שלהן יתבסס על יבוא אנרגיה כמימן או כנגזרות שונות של מימן (אמוניה, LOHC). בהנחה כי יתפתחו בהתאם שווקים גלובליים לסחר במוצרי אנרגיה אלו, ובהם ספקים מרובים בדומה לשוק הנפט כיום, ישראל תוכל להשתלב בסחר העולמי ולייבא מימן ודלקים לשימוש במשקי החשמל, התעשייה והתחבורה. לצורך הייבוא תידרש הקמת מתקני קבלה בנמלי הים ואולי אף מתקני הפרדה לשימוש חלק מהטכנולוגיות המאפשרות להוביל את המימן באמצעות חומר נושא (כדוגמת LOHC) הדורש תהליך כימי לחילוץ המימן מהנשא לאחר הפריקה. יבוא מימן יחייב גם הקמת תשתית הולכה אל תחנות הכוח או התאמת רשת הגז הטבעי הקיימת, ככל שהדבר יתאפשר.

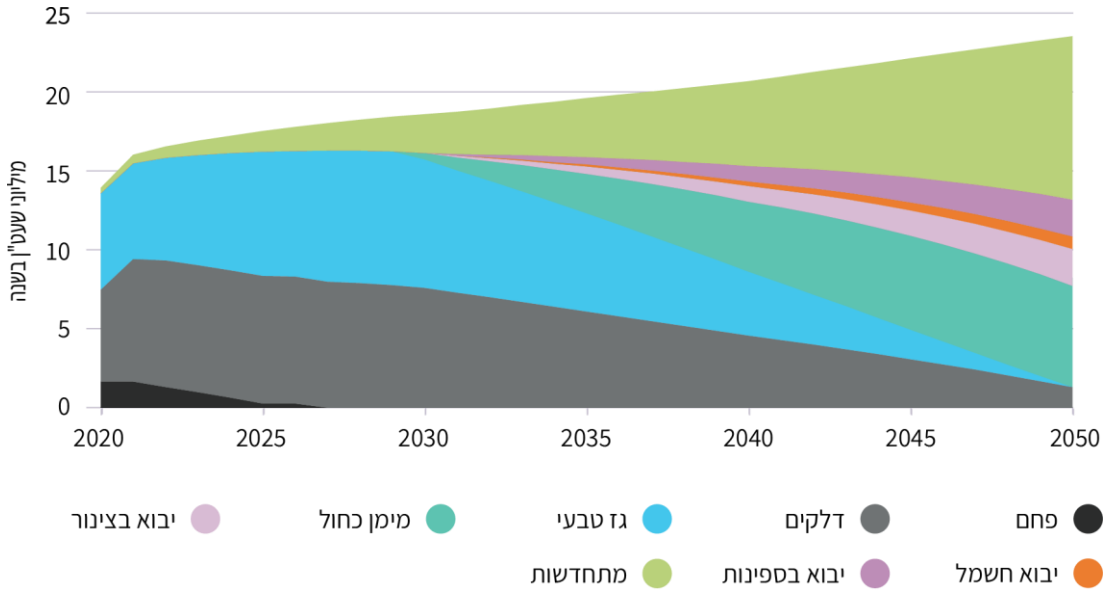
בתרחיש זה כ-45% מסך הביקוש לאנרגיה יגיע ממקורות מתחדשים, כ-30% ממימן כחול וכ-25% נוספים מייבוא חשמל ודלקים. לייצור החשמל יידרש הספק סולארי של כ-75 ג'יגה-ואט, שישתרעו על פני שטח של כ-550-650 אלף דונם למערכות הסולאריות (מרביתם בדו-שמוש). בנוסף יידרשו תחנות כוח בהספק של כ-29 ג'יגה-ואט שיונעו במימן או בדלקים נקיים אחרים. ההספק הקונבנציונלי עומד כיום על כ-18 ג'יגה-ואט, כך שמדובר בהספק גבוה, שיתמוך בביקוש גדול פי 2.5. טורבינות הגז הנוכחיות יסיימו את חייהן לפני שנת 2050, ולכן יעשה שימוש בטורבינות חדשות

שיהיו מסוגלות להשתמש גם במימן נקי. הספק נוסף של כ-34 ג'יגה-ואט במערכות אגירה יגבה את המערכות הסולאריות וטורבינות המימן לאספקת מלוא הביקוש.

בהשוואה לתרחיש הצהוב, תרחיש זה מורכב מהספק סולארי נמוך יותר (75GW לעומת 108GW), אך הספק תחנות הכוח יהיה גבוה יותר (29GW לעומת 22GW). הדבר נובע מכך שבתרחיש הכחול חלק מהתעשייה והתחבורה הכבדה יונעו במימן הכחול, בעוד בתרחיש הצהוב מערכות אלו יעשו שימוש בחשמל סולארי ולכן הביקוש לחשמל יהיה גבוה יותר.

להלן תיאור התפתחות תרחיש זה משנת 2020 ועד לשנת 2050:

תרשים 56: צריכת אנרגיה סופית בתרחיש המשולב הכחול



ניתן לראות כי גם בתרחיש זה ניכר גידול בייצור הסולארי, אך הוא מתון יותר מאשר בתרחיש הצהוב. השימוש בדלקים יצטמצם, ומגזר הגז הטבעי יומר בהדרגה במימן כחול. בדומה לתרחיש הצהוב, גם בתרחיש זה יגדלו ערוצי הייבוא של מוצרי אנרגיה נקיים.

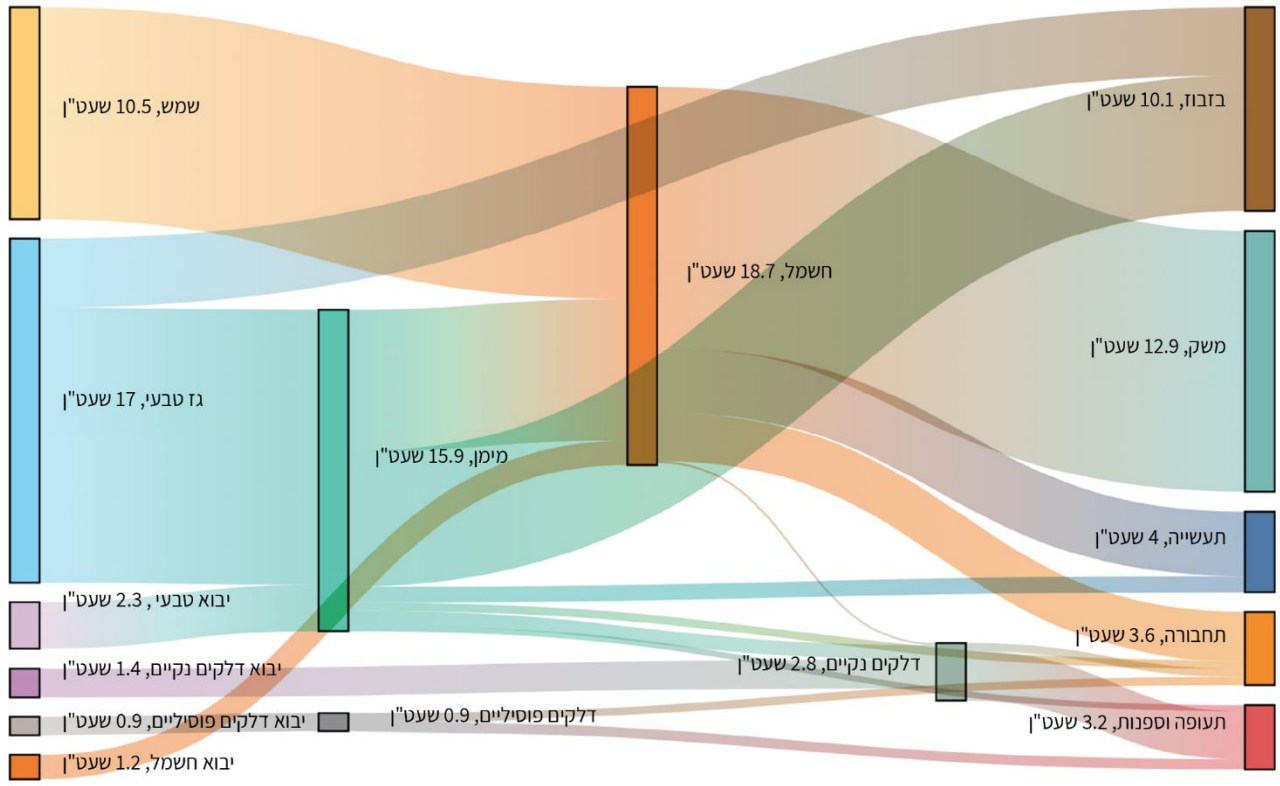
התרחיש הכחול מבוסס על העקרונות הבאים:

- המשך הגדלת ההספק הסולארי עד 75,400 מ"ו, והקמת מתקני אגירה בהספק כולל של כ-34,200 מ"ו עד לשנת 2050. יעד זה יושג בהתקנת הספק ממוצע של כ-3,000 מ"ו בשנה – קצב נמוך יותר מאשר בתרחיש הצהוב, אך עדיין קצב גבוה שידרוש התארגנויות לוגיסטיות, תשתיתיות, פיננסיות ורגולטוריות משמעותיות.
- בכדי להשלים את הייצור הסולארי והאגירה יפותחו בארץ יכולות ייצור מימן כחול. דרישת המימן לענפי התחבורה, התעשייה, הדלקים הסינתטיים והחשמל יגיעו לכ-4.7 מיליון טון מימן בשנה בשנת 2050, ולהפקתו ידרשו כ-18.9 BCM גז טבעי מידי שנה. מדובר בכמויות משמעותיות שידרשו עתודות גז טבעי משמעותיות במאגרים ישראליים (אלא אם תהיה כדאיות להפיק מימן מגז טבעי מונזל מיובא), וכן מתקנים להפקת המימן ואגירתו.
- בנוסף לאנרגיה הסולארית ולמימן, התרחיש כולל יבוא מוצרי אנרגיה שונים כגון חשמל, דלקים סינתטיים ואולי אף חלק מהמימן. יבוא מוצרים אלו יוכל להקל על התשתיות הארציות, להפחית את השטח שיידרש למערכות הסולאריות ולהקטין את הביקוש המקומי למימן שיידרש להפקת הדלקים הסינתטיים. זאת, בנוסף לפוטנציאל פיתוח כלכלי משותף, להשקעות הדדיות ולהחלפת ידע טכנולוגי.

התרחיש הכחול יאפשר להקטין את השטח שיידרש בעתיד למקורות מתחדשים, אך יגדיל את ההסתמכות על טכנולוגיית המימן ותפיסת הפחמן שעתידן עדיין לא ברור. התרחיש גם מניח תגליות של מאגרי גז טבעי נוספים במים

הכלכליים של מדינת ישראל בכמות שתותיר עתודות גז טבעי למספר עשורים ולחלופין על הוזלת מחירי הייבוא. בנוסף לעתודות גז טבעי מספקות יהיה צורך בקפיצות דרך טכנולוגיות – התפתחויות בטכנולוגיית הפקת המימן הכחול, תפיסה והטמנה של פד"ח, וכן איתור שטחים בארץ להטמנת הפד"ח והקמת רשתות להולכת מימן ופד"ח. על אף שמדובר בדרישות משמעותיות, כבל שימצא מספיק גז טבעי לחופי ישראל שיאפשר לשמור על מחירים נמוכים למשק המקומי, התועלות בתרחיש זה עשויות להיות גבוהות מהעלויות. בתרחיש זה, על פי המודל, **משנת 2020 ועד 2050 ידרשו למשק הישראלי כולו סך של כ-535 BCM גז טבעי,** וצריכה זו תמשיך בקצב של כ-**18.9 BCM** גז טבעי בשנה, כמות שתגדל כבל שימשיך לגדול הביקוש הבסיסי לאנרגיה.

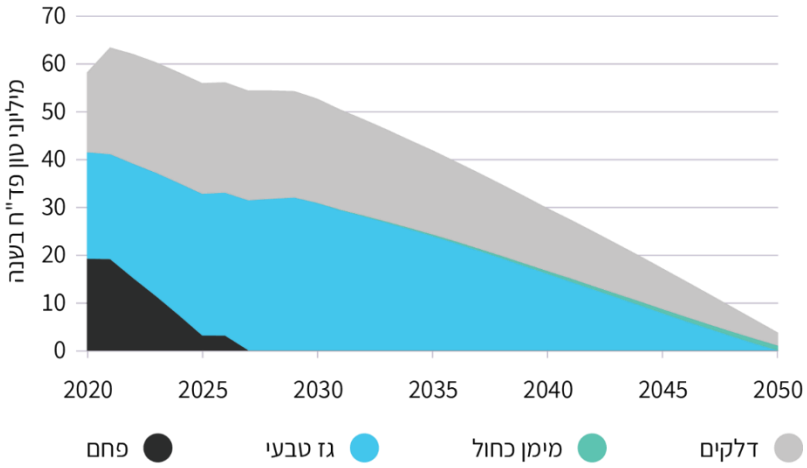
תרשים 57: תרשים סאנקי של מעברי האנרגיה בתרחיש הכחול בשנת 2050



בתרשים 57 ניתן לראות כי תרחיש זה מורכב יותר מהתרחיש הצהוב והוא כולל שלב נוסף של המרת הגז הטבעי למימן לפני שהמימן מוזן לטורבינות גז להפקת חשמל. שלב זה כולל אובדני נצילות ומוסיף לרכיב האנרגיה ה"מבוזבזת". עקב השימוש הרחב יותר בטורבינות גז להפקת חשמל, גם רכיב אובדן האנרגיה גדול יותר. כמו כן, נדרש יבוא מימן בכמויות גבוהות יותר מאשר בתרחיש הצהוב, והוא ישמש, בנוסף לתעשייה והתחבורה הכבדות, גם לייצור חשמל.

לפי מדד ה-LCOE, בתרחיש זה מחיר קוט"ש חשמלי משוקלל, בשנת 2050 יעמוד על כ-105.6 $/MWh. מחיר זה כולל את התשתיות הסולאריות, את תחנות הכוח מבוססות המימן ואת תשתיות ייצור המימן. אולם, המחיר הכולל בתרחיש זה צריך להביא בחשבון גם את עלות הסבת רשת הגז הטבעי למימן, את הקמת רשת הולכה לפד"ח ואת עלות אתרי ההטמנה. באם יאזלו מאגרי הגז הטבעי הישראליים, יהיה צורך להשתמש להפקת המימן בגז טבעי נוזלי מיובא (LNG) שמחירו עלול להיות גבוה ממחיר הגז המקומי ובכך לייקר את העלויות.

תרשים 58: הערכת פליטות גזי החממה ממגזר האנרגיה עד לשנת 2050 בתרחיש הכחול



בהתאם לתרחיש הכחול, בשנת 2050 תושג הפחתה של כ-94.6% בפליטות גזי החממה ממשק האנרגיה ביחס לשנת 2015. בשנת 2050 מתקני תפיסת הפחמן יתפסו כ-34 מיליון טון פד"ח. בתרחיש זה נתח הפליטות מהשימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן להפקת המימן הכחול גדול יותר מאשר בתרחיש הצהוב, אך עדיין מדובר בפליטות מזעריות. גם בתרחיש זה המעבר המשמעותי לרכב חשמלי יצמצם כמעט לחלוטין את הפליטות בעולם הדלקים – למעט מגזרי התחבורה הכבדה, התעופה והספנות, שייוותר בהם עדין שימוש מועט בדלקים פוסיליים.

בכדי להגיע לאיפוס מלא (נטו) של פליטות גזי החממה יהיה צורך להסיר כ-3.7 מיליון טון פד"ח בשנת 2050. לפי עלות משוערת של כ-100$ להסרת טון פד"ח, ההוצאה הכוללת עשויה להגיע לכדי כ-1.4 מיליארד ש"ח בשנה.

לסיכום, התרחיש הכחול יאפשר להקטין את היקף האנרגיות המתחדשות בתמהיל האנרגיה העתידי, אך ידרוש פיתוחים טכנולוגים משמעותיים, כרוך באובדני אנרגיה בהמרות, וידרוש גז טבעי בכמויות יחסית גבוהות לייצור מימן כחול, ולחלופין יבוא מימן. יבוא אנרגיה נקיה יהווה בכל מקרה חלק מתרחיש זה ויאפשר חיבוריות וקישוריות למדינות באזור ובעולם.

טבלה 6: סיכום התרחיש הכחול

יתרונות
• הקטנת דרישת השטח למערכות סולאריות, לאגירה ולרשת. • תוספת מקור אנרגיה משמעותי לגיוון המקורות והגדלת ביטחון האספקה והעצמאות באנרגיה. • ניצול מרבי של תשתיות קיימות (טורבינות הייצור ותשתיות הולכת הגז הטבעי).
תנאים
• **תגליות גז טבעי** נוספות ליצירת ודאות אספקה של מספר עשורים. • **שטח נרחב:** השימוש במימן כחול עם תפיסת פחמן דורש הקמה של תשתיות להפקת המימן ולהטמנת פחמן. • **תשתיות להולכת המימן** לתחנות הכוח ולמפעלי התעשייה הגדולים תוך שימוש בתשתיות הגז הטבעי הקיימות ככל הניתן. • **תשתית ארצית להולכת הפד"ח** מאתרי הפקת הגז הטבעי והמימן לאתרי ההטמנה או השימוש. • כל **תחנות הכוח החדשות יידרשו לאפשר בעתיד הסבה** לשימוש ב-100% מימן. • **איתור אתרים מתאימים להטמנה גיאולוגית** של כמויות גדולות של פד"ח ולחלופין בערוצי שימוש תעשייתי בכמויות הפד"ח.
אתגרים
• **מחירי המימן הכחול יהיו ככל הנראה גבוהים** ממחירי הגז הטבעי כיום ויטילו עלות כלכלית נוספת על מגזר התעשייה והחשמל שיעשו שימוש במימן. • טכנולוגיית המימן הכחול משמשת כרגע **בפרויקטים מעטים** בעולם. • טכנולוגיות תפיסת הפחמן והפקת המימן דורשות תוספת תשתיות משמעותית.

6.3.1. חלופת המשך – שימוש בגז טבעי עם תפיסת פד"ח

כחלופה לשימוש במימן כחול, ניתן יהיה להמשיך להשתמש בגז טבעי עם תפיסת הפד"ח הנפלט בתחנות הכוח. חלופה זו "חוסכת" את הקמת תשתיות הפקת המימן ואת הסבת הטורבינות הקיימות לשימוש במימן, אך היא דורשת הקמת מתקנים לתפיסת פד"ח בכל אתרי תחנות הכוח ובמפעלים וחיבורם לתשתית מסועפת להולכת והטמנת הפד"ח. מתקני תפיסת פד"ח כיום הינם גדולים ויקרים – שטחם כשטח תחנת הכוח ודרישת האנרגיה שלהם גבוהה.

בראייה ארוכת טווח נראה כי קיימת עדיפות מסוימת לשימוש במימן הכחול משום ששימוש במימן לתעשייה ובתחנות הכוח יאפשר המשך תפקוד גם לאחר אזילת הגז הטבעי במאגרים הישראליים באמצעות מימן מיובא או LNG מיובא בהתאם למסחר הבינלאומי שיתפתח. כמו כן, תפיסת הפחמן בתהליך הפקת המימן פשוטה יותר מאשר בשריפת בגז טבעי. בנוסף, הפקת מימן מגז טבעי תתרחש במתחמים מצומצמים ברחבי הארץ, וזאת בשונה מתפיסת פחמן מגז טבעי שתדרוש הקמת מערכות תפיסה בכל תחנת כוח ובכל מפעל תעשייה שימשיכו להשתמש בגז טבעי.

כיום הטכנולוגיות לתפיסת פד"ח מגזי הפליטה של טורבינות גז וכן הטכנולוגיות להפרדת המימן מהגז הטבעי תוך תפיסת הפד"ח נמצאות בשלבי פיתוח ראשוניים. כאשר תתייצב הטכנולוגיה, ויתבררו המחירים בעולם, ניתן יהיה לבצע חישובי עלות/תועלת לבחירה בין שתי האפשרויות, ולקבל החלטה על הכיוון המועדף.

לפי מדד ה-LCOE, בתרחיש זה מחיר קוט"ש חשמלי משוקלל, בשנת 2050 יעמוד על כ-88 $/MWh. מחיר זה כולל את התשתיות הסולאריות, את תחנות הכוח מבוססות גז טבעי ואת מתקני תפיסת הפחמן. אולם, טכנולוגיית תפיסת הפחמן עדיין יקרה מאד, גם אחרי שנים של פרויקטי הדגמה, והמחיר הכולל בתרחיש זה צריך להביא בחשבון גם את עלות רשת הולכת הפד"ח ואת עלות אתרי ההטמנה שבשלב זה אינן ידועות. באם יאזלו מאגרי הגז הטבעי הישראליים, יהיה צורך להשתמש בגז טבעי נוזלי מיובא (LNG) שמחירו עלול להיות גבוה משמעותית ממחיר הגז המקומי.

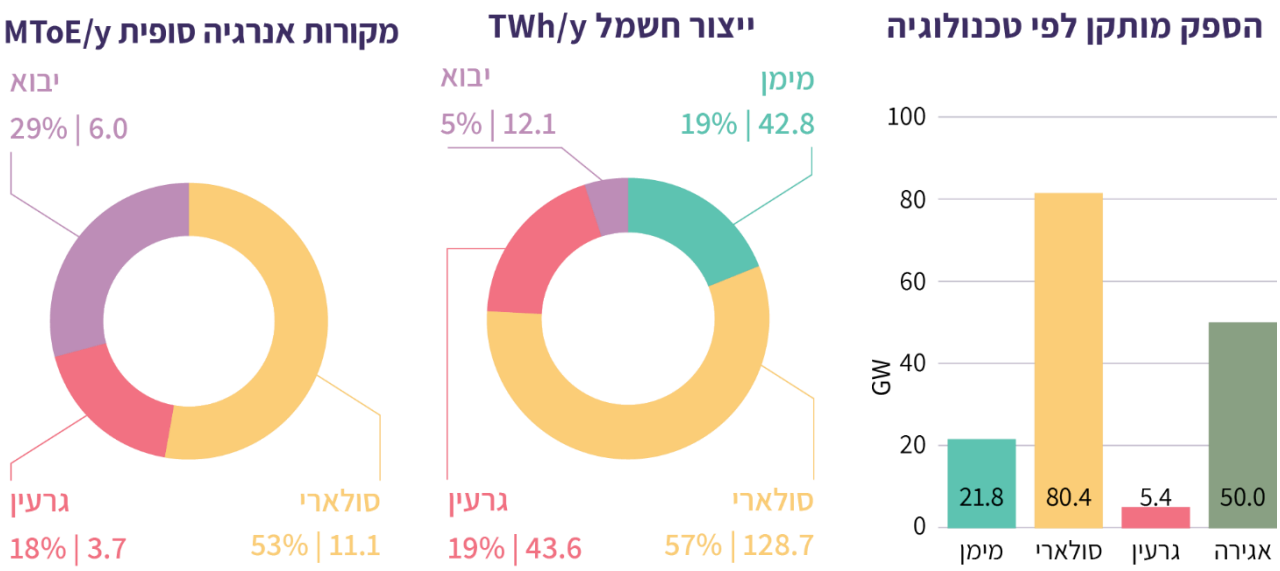
6.4. התרחיש המשולב ה"אדום"

התרחיש ה"אדום" כולל גם תחנות כוח גרעיניות (תג"ר), ובכך מגוון אף יותר את מקורות האנרגיה האפשריים. בתרחיש זה כ-55% מהביקוש לאנרגיה יגיע ממקורות מתחדשים, כ-20% נוספים יופקו מתחנות הכוח הגרעיניות וכ-

25% יסופקו באמצעות יבוא. בתרחיש זה יידרש הספק סולארי של כ-79 ג'יגה-ואט שמשמעותו שטח של כ-600-700 אלף דונם למערכות הסולאריות (מרביתם בדו-שמוש), וכן כ-21 ג'יגה ואט של טורבינות גז שיוזנו במימן מיובא או במימן 'אדום' שיופק בישראל.

התרחיש מניח הספק חשמלי מקסימלי של כ-5 ג'יגה ואט בלבד מאנרגיה גרעינית בשל הצורך לשמור מרחקי בטיחות מאוכלוסייה. ככל שיהיו שיפורים טכנולוגיים בגון כורים מודולריים קטנים (SMR), שימוש בדלקים עמידים יותר או מעבר לטכנולוגיית היתוך, יתכן ואפשר יהיה להגדיל את מספר האתרים ואת ההספק המקסימלי האפשרי בישראל בשנת 2050. בהתחשב בהליכי התכנון הארוכים בישראל והצורך בדיון ציבורי רחב ועמוק הנדרש בנושא, סביר להניח כי עד שנת 2050 ניתן יהיה להקים תחנת כוח או שתיים גדולות, או מספר יחידות קטנות נפרדות שיספקו כ-5 ג'יגה ואט.[145] הספק זה יוכל לייצר כ-20% מסך הביקוש לחשמל בשנת 2050. האנרגיה הגרעינית שתיוצר תחליף את הייצור בגז טבעי מקומי (במתקני גז טבעי עם תפיסת פחמן או במתקנים המשתמשים במימן כחול מייצור מקומי), ותייתר את הצורך בגז טבעי בישראל.

תרשים 59: ההספק המותקן, תמהיל הדלקים לייצור חשמל ומקורות האנרגיה בתרחיש האדום

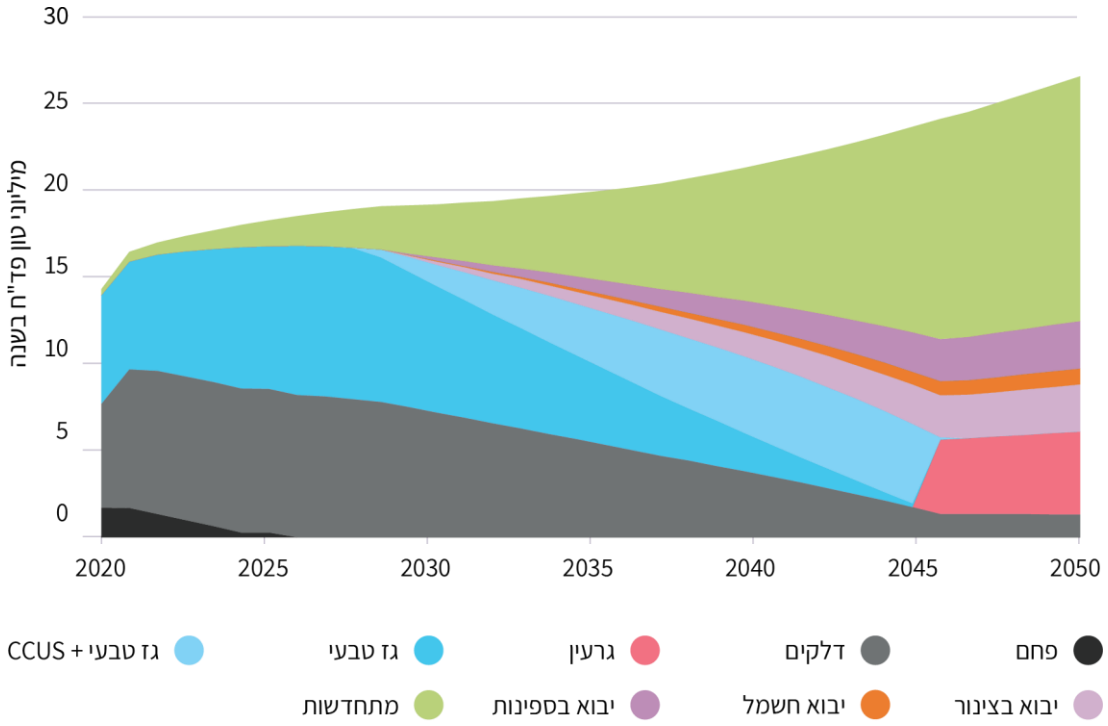


באמור, התחנות הגרעיניות, ייצרו בשנת 2050 כ-20% מהביקושים הכוללים לאנרגיה, באמצעות הספק של 5.4 ג'יגה ואט בלבד, משום שתחנות גרעיניות פועלות כמעט ברציפות (מקדם קיבולת של כ-95%), ולכן גם הספק נמוך יחסית מסוגל להפיק כמויות אנרגיה גדולות.

להלן תיאור התפתחות תרחיש זה משנת 2020 ועד לשנת 2050:

[145] ראו דוח המכון הגיאולוגי RD-12-23:
M. Sharon *et. al.*, *Probabilistic Evaluation of Seismic Hazard for Siting Nuclear Power Plants in Israel* (2023)

תרשים 60: צריכת אנרגיה סופית בתרחיש המשולב האדום



תרחיש זה נמשך מעבר לשנת היעד 2050 וזאת עקב פרק הזמן הצפוי לתכנון והקמה של תג"ר בישראל. עד לשנת 2050 ההתייעלות הכרוכה בתחלופה של דלקים בחשמל מקזזת את הגידול בביקושים לאנרגיה וסך הביקוש יחסית יציב. בשנת 2050 מסתיימת התחלופה והביקוש לאנרגיה חוזר לעלות בקצב של כ-2% בשנה עקב הגידול באוכלוסיה ובתמ"ג, תוך שמירה על איפוס הפליטות.

תרחיש לשילוב תחנות כוח גרעיניות בישראל (ראו תרשים 60) מבוסס על העקרונות הבאים:

- הגדלת ייצור החשמל ממקורות מתחדשים, ובפרט מאנרגיה סולארית, ככל שניתן במגבלות השטח והשילוב ברשת.
- בכדי להשלים את אספקת האנרגיה ממקורות נקיים, המשק ימשיך להשתמש בגז טבעי באמצעות מימן נקי, הכולל תפיסת פחמן בשלבי הפקת המימן. יש להתחיל את תהליך הסבת תחנות הכוח והקמת תשתיות הפקת המימן תפיסת הפד"ח וההטמנה כבר בשנת 2035, כדי שניתן יהיה להגיע לסיום עד לשנת 2050.
- בתחום הדלקים יש להמשיך בתהליך של הפחתה מתמדת בשימוש והמרתם בחלופות נקיות: חשמל, מימן, או במקרי קצה גז טבעי עם תפיסת פחמן או דלקים סינתטיים. על התהליך להגיע להפסקת שימוש בדלקים מזהמים עד לשנת 2050.
- יבוא אנרגיה מהווה חלק משמעותי מתרחיש זה ויש לקדמו בדרכים שונות – יבוא חשמל בכבלים, יבוא מימן בצינורות או יבוא דלקים נקיים בספינות.
- ההנחה בתרחיש זה היא כי עד לשנת 2050 יוקם אתר גרעיני עיקרי ובו מספר יחידות ייצור בהספק כולל של 3,000MW[146] ועוד אתר משני, או מספר אתרים קטנים, בהספק כולל של עוד 2,400MW. אתרים אלו יספקו כ-19% מסך הביקוש לאנרגיה במשק. החל משנה זו המשק הישראלי צפוי להיות מאופס פליטות – יתבסס על כ-55% מתחדשות, כ-19% גרעין לרבות מימן אדום, ו-26% יבוא של חשמל ודלקים נקיים.

[146] לשם השוואה, אתר הגרעין האמירותי "בארכה" כולל 4 יחידות ייצור בהספק כולל של 5,600MW.

באמור, הקמה של תג"ר בישראל כרוכה בתהליך מורכב ותלויה בגורמים רבים, בראשם מענה לסוגיות טכנולוגיות, רגולטוריות ומדיניות. הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה אטומית (סבא"א) מפרטת 19 נושאים שיש לפתח בבדי להקים תג"ר.[147] בין השאר על המסמך להתייחס לנושאים הבאים:

- **הצורך:** הערכת ההספק נדרש מאנרגיה גרעינית במסגרת תמהיל מקורות האנרגיה בישראל בשנת 2050 והלאה.
- **טכנולוגית הכורים והקונפיגורציה:** בחינת טכנולוגיות הכורים לבחירת הטכנולוגיה המתאימה לישראל, מספר האתרים הנדרש, וההספק של כל אתר ומספר היחידות בכל אתר.
- **דיון ציבורי רחב ועמוק** שיבחן את כלל ההיבטים של שימוש בטכנולוגיה זו בישראל במקביל למהלכי הסברה והנגשת ידע שיציגו לציבור את מורכבות הנושא ואת הסוגיות הכרוכות בהקמת תחנת כוח גרעינית: בטיחות הכורים, עצמאות וביטחון אנרגטיים, השפעות סביבתיות ובריאותיות, צמצום הפליטות, ועוד.
- **בחינת עלות/תועלת טכנו-כלכלית** שתנתח את כלל העלויות הפרויקטליות והמשקיות הכרוכות בהקמת תג"ר מול התועלות הכלכליות ואלו שאינן כלכליות. תוצאות הבחינה יאפשרו קבלת החלטה מושכלת להמשך פיתוח תג"ר בישראל.
- **איתור אתרים** מתאימים בישראל ושמירתם עבור מטרה זו. בחירת האתרים תתבסס על נתונים סיסמיים, הידרולוגיים וגיאולוגיים באזור, קירבה לריכוזי אוכלוסין ומרחקים נדרשים (כפונקציה של הטכנולוגיה הנבחרת), ושיקולים תכנוניים אחרים.
- **הכשרת כוח אדם** אקדמי וטכני בהיקפים ובתחומים הנדרשים להקמת התחנות, תחזוקתן ותפעולן. הרחבת הפעילות האקדמית לתפעול תחנות כוח גרעיניות אורכת כשלושה "דורות" אקדמיים לפחות היות ויש לשלוח מומחים להתמחות בחו"ל, ורק לאחר חזרתם ניתן יהיה להכשיר תלמידים לתארים גבוהים ולפוסט-דוקטורט, כמו גם טכנאים במקצועות אנרגיית הגרעין. נושא זה דורש תכנית לאומית רב-שנתית מתוקצבת המתואמת עם אוניברסיטאות, מכללות, בתי ספר מקצועיים ומכוני מחקר.
- **בחינת סוגיות רגולטוריות ומשפטיות** כגון תעריפים, בטיחות קרינה, גבולות אחריות, כיסוי ביטוחי ועוד, והסרת חסמים באופן שוטף.
- **בחירת טכנולוגיה** מתאימה לישראל בהתאם להתפתחויות הטכניות בעולם הכורים המודולריים, התקדמות היישום של כורים אלו בעולם ובהתייחס לצרכים הייחודיים של ישראל.
- **הקמת התג"ר ותפעולה:** תכנון הנדסי וסטטוטורי של האתרים ומכרוז השלבים השונים, הקמת **מנגנון ניהול ובקרה** על הפרויקט, בחינת ארוכי טווח הכוללים שותפות, הן בכסף והן בערבויות, של המדינה יחד עם גורמי מימון פרטיים.
- **פיתוח תעשיות תומכות:** הקמת תג"ר תהווה הזדמנות ייחודית לקדם את התעשייה הישראלית לתחומי החומרים, המתכות, הבקרה, הגרעין ועוד. יהיה צורך להכין את הקרקע ולסייע לתעשייה להתארגן לקראת השתתפותה בתהליכי ההקמה.

היות ומדובר בתהליך ארוך ויקר, מומלץ להתמקד ראשית בשישה נושאי ליבה, שיאפשרו לבחון את המשמעויות ואת הכדאיות של הקמת תג"ר בישראל. עם סיום בחינה ראשונית זו ניתן יהיה לקבל ההחלטה להמשך הפרויקט.

על מנת לעמוד בלוחות הזמנים לייצור חשמל מאנרגיה גרעינית בשנת 2050 יש להתחיל לפעול כבר כעת במספר מישורים, וביניהם **גיבוש תכנית, העמקת החלופות, וקבלת החלטה על בדיקת ההיתכנות** הראשונית של נושאי

[147] *Milestones in the development of a national infrastructure for nuclear power*, Nuclear Energy Series, No. NG-G-3.1, IAEA 2015.

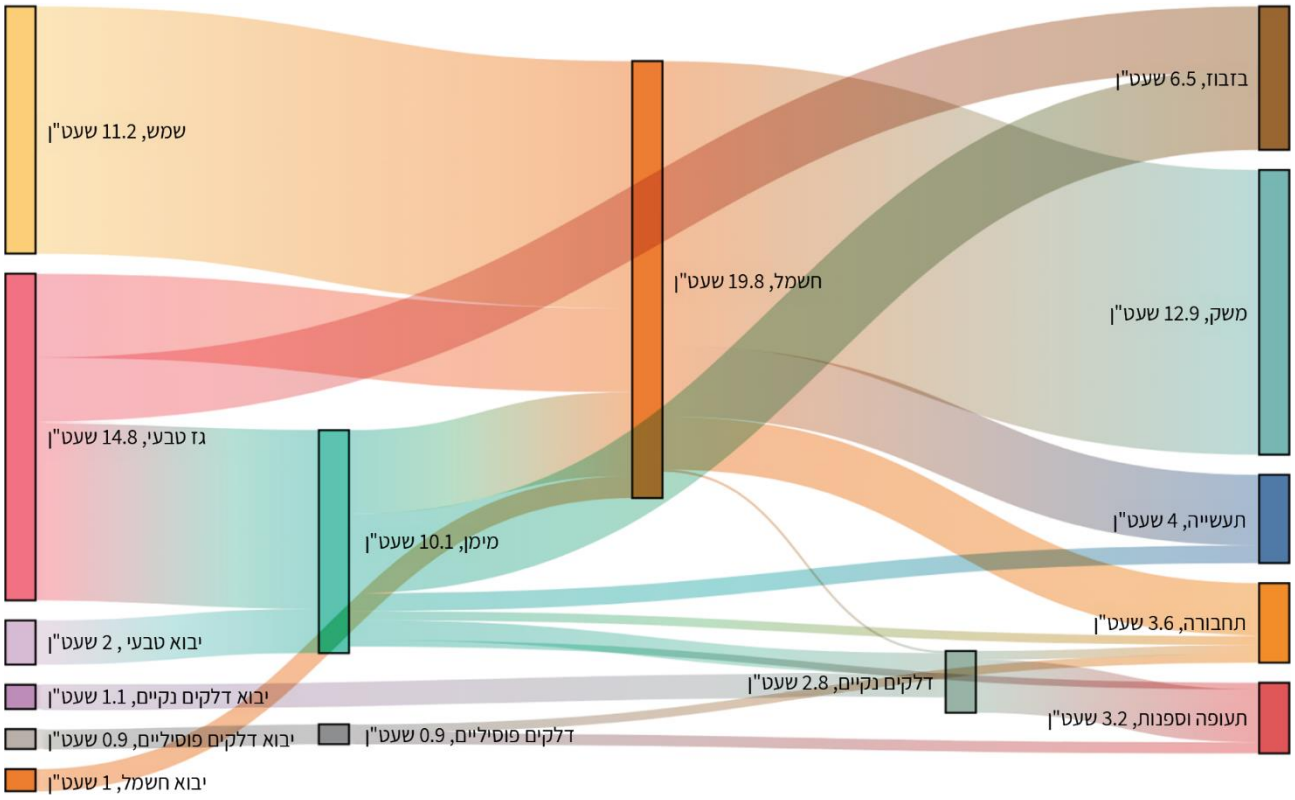
הליבה שפורטו לעיל. הבחינה ככל הנראה תארך כשנתיים, ותתבצע בשיתוף הציבור. בסיומה, יפורסם דוח מסכם ובו המלצה, בהתאם לממצאי הבחינה, כיצד להמשיך בבחינת הכדאיות.

לאחר בחינת נושאי הליבה הראשונים, ימשיך הצוות לבחינת שאר הנושאים הנדרשים על פי הנחיות סבא"א. בחינה זו תארך כשלוש שנים נוספות, כאשר בתום כל שנה יוגש דוח ביניים למקבלי ההחלטות ובו תיאור ההתקדמות בבחינה וסיכום הממצאים. בתום הבדיקה הרחבה ניתן יהיה לקבל החלטה סופית לעצירה או המשך ההקמה.

מאחר שהפקת אנרגיה מגרעין כרוכה בתהליכים מורכבים שיארכו כ-25 שנים, יש לפעול לקידום הנושא בהקדם.

בתרחיש האדום, על פי המודל, **משנת 2020 ועד 2050 ידרשו למשק הישראלי כולו סך של כ-410 BCM גז טבעי,** צריכת הגז הטבעי תיפסק בשנת 2050 עם כניסת התחנות הגרעיניות לפעולה.

תרשים 61: תרשים סאנקי של מעברי האנרגיה בתרחיש האדום בשנת 2050

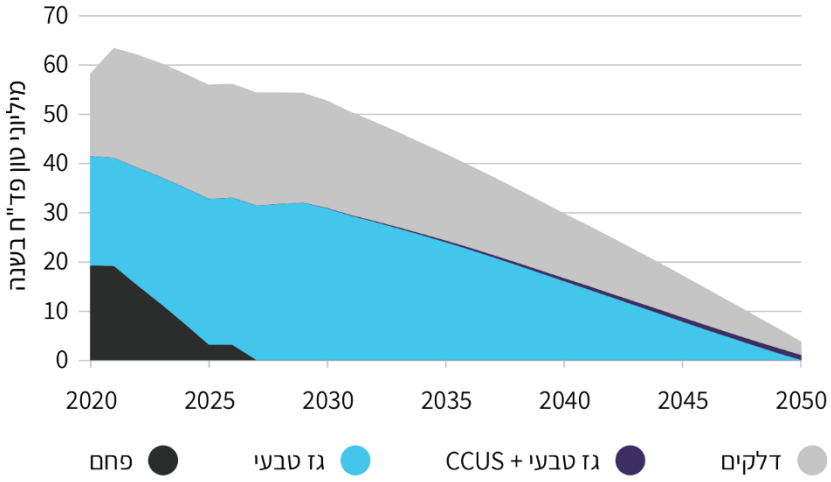


בתרשים 61 ניתן לראות את החלק המשמעותי של האנרגיה הגרעינית במשק האנרגיה בתרחיש האדום. למרות ההספק הנמוך יחסית של כורי הגרעין (כ-5% מסך ההספק המותקן), הרי שהם מייצרים רכיב של כ-20% ממשק החשמל, ועוד רכיב משמעותי של חום המסייע בייצור המימן האדום. גם בתרחיש זה ישנו נתח משמעותי של אנרגיה שיורית "מבוזבזת" הנובע הן מהשימוש באנרגיה גרעינית (למרות השימוש בחום שיורי להפקת מימן), והן מהשימוש בטורבינות מימן להפקת חשמל. כמו בתרחיש הכחול, גם בתרחיש זה יבוא המימן משמש, בנוסף לתחבורה והתעשייה הכבדות, גם להפקת החשמל.[148]

לפי מדד ה-LCOE, בתרחיש זה מחיר קוט"ש חשמלי משוקלל, בשנת 2050 יעמוד על כ-96.5 $/MWh. מחיר זה כולל את התשתיות הסולאריות ואת תחנות הגרעין. תחשיב זה מתייחס לעלות משוערכת של תג"ר בטכנולוגיית SMR, ואינו כולל את העלויות הנלוות בגון ערך הקרקע ותשתיות הולכת וחלוקת החשמל.

[148] בגרף לא מוצג רכיב נוסף של חשמל המשמש להפקת המימן האדום וזאת מהסיבה הטכנית שבבך היה נוצר מעגל (החשמל מסייע להפקת מימן, שבתורו משמש לייצור חשמל).

תרשים 62: הערכת פליטות גזי החממה ממגזר האנרגיה עד לשנת 2050 בתרחיש האדום



בהתאם לתרחיש האדום, בשנת 2050 תושג הפחתה של כ-96% בפליטות גזי חממה ממשק האנרגיה ביחס לשנת 2015. בתרחיש זה קיים רכיב של פליטות הנובעות מהשימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן, אך עם כניסת הכורים הגרעיניים לפעולה בשנת 2050 הם יחליפו את הגז הטבעי ובשנה זו הפליטות יתאפסו. שנה קודם לכן, בשנת 2049, מתקני תפיסת הפחמן מהשימוש בגז הטבעי יגיעו לשיא ויתפסו כ-34 מיליון טון פד"ח. בעולם הדלקים עדיין יוותרו מעט פליטות ממגזרי התחבורה הכבדה, התעופה והספנות, שייעשה בהם שימוש מועט בדלקים פוסיליים.

בכדי להגיע לאיפוס מלא (נטו) של פליטות גזי החממה יהיה צורך להסיר כ-2.8 מיליון טון פד"ח בשנת 2050. לפי עלות משוערת של כ-100$ להסרת טון פד"ח, ההוצאה הכוללת עשויה להגיע לכדי מיליארד ש"ח בשנה.

לסיכום, התרחיש האדום יאפשר להקטין את השטח שיידרש בעתיד למקורות מתחדשים ויביא להפסקת השימוש בגז טבעי בשנת 2050. לצד זאת, עדיין יידרש שימוש בטורבינות גז שיוזנו במימן מיובא או מייצור מקומי, טכנולוגיה שעדין לא קיימת באופן מסחרי. גם בתרחיש זה יבוא אנרגיה נקיה יהווה חלק משמעותי מתמהיל האנרגיה ולצד השמירה על הביטחון באנרגיה הוא יאפשר חיבוריות אזורית ובינלאומית ויסייע בפיתוח וחיזוק הקשרים המדיניים והכלכליים בין מדינות המזרח התיכון ואירופה לבין ישראל.

טבלה 7: סיכום התרחיש האדום

יתרונות
• הקטנת דרישת השטח למערכות סולאריות, לאגירה ולרשת. • הגדלת מגוון מקורות האנרגיה והגדלת ביטחון האספקה. • ייצור יציב ובאמינות גבוהה של הספק בסיס (Baseload).
תנאים
• **התמודדות עם הסוגיות הטכנולוגיות, הרגולטוריות והמדיניות.** • איתור **אתרים מתאימים** להקמת תחנות כוח גרעינית. • **עיבוי תשתיות רשת החשמל.**
אתגרים
• **עלויות הוניות** משמעותיות. • **מוכנות ציבורית.**

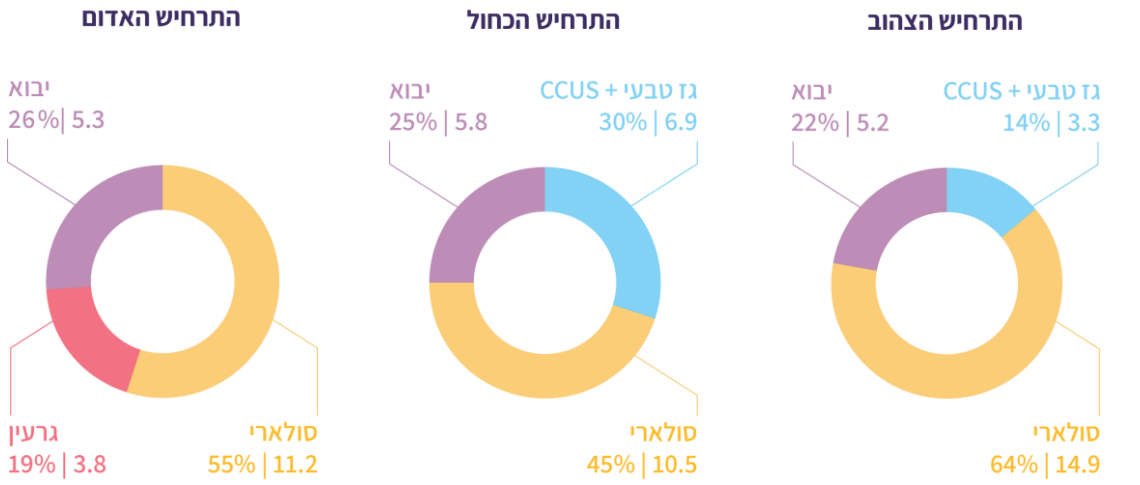
7. סיכום

בפרק זה הוצגו שלושה תרחישים מרכזיים לעמידה ביעד איפוס הפליטות עד לשנת 2050. באמור, לכל אחד מהתרחישים יתרונות, חסרונות וסיכונים, וכל תרחיש מחייב היערכות מתאימה.

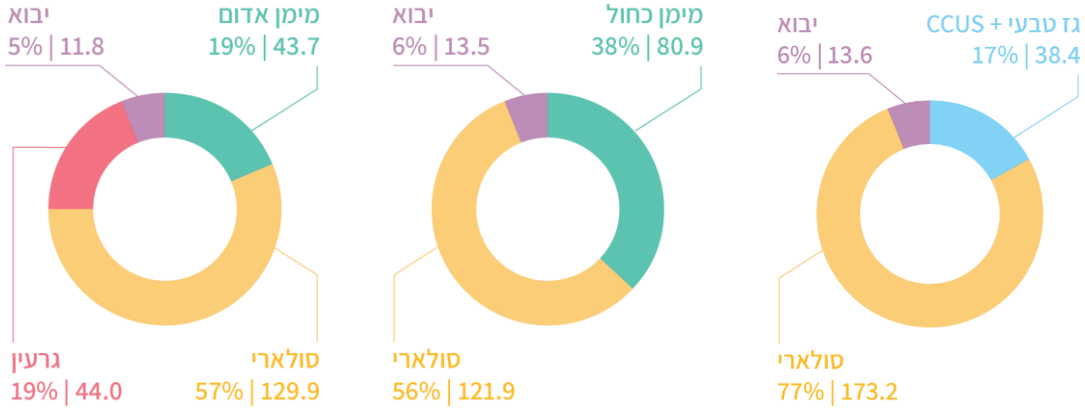
להלן תרשימים וטבלה המסכמים ומשווים פרמטרים שונים של התרחישים המשולבים:

תרשים 63: סיכום שלושת התרחישים המשולבים

מקורות האנרגיה על פי שלושת התרחישים



מקורות ייצור חשמל על פי שלושת התרחישים

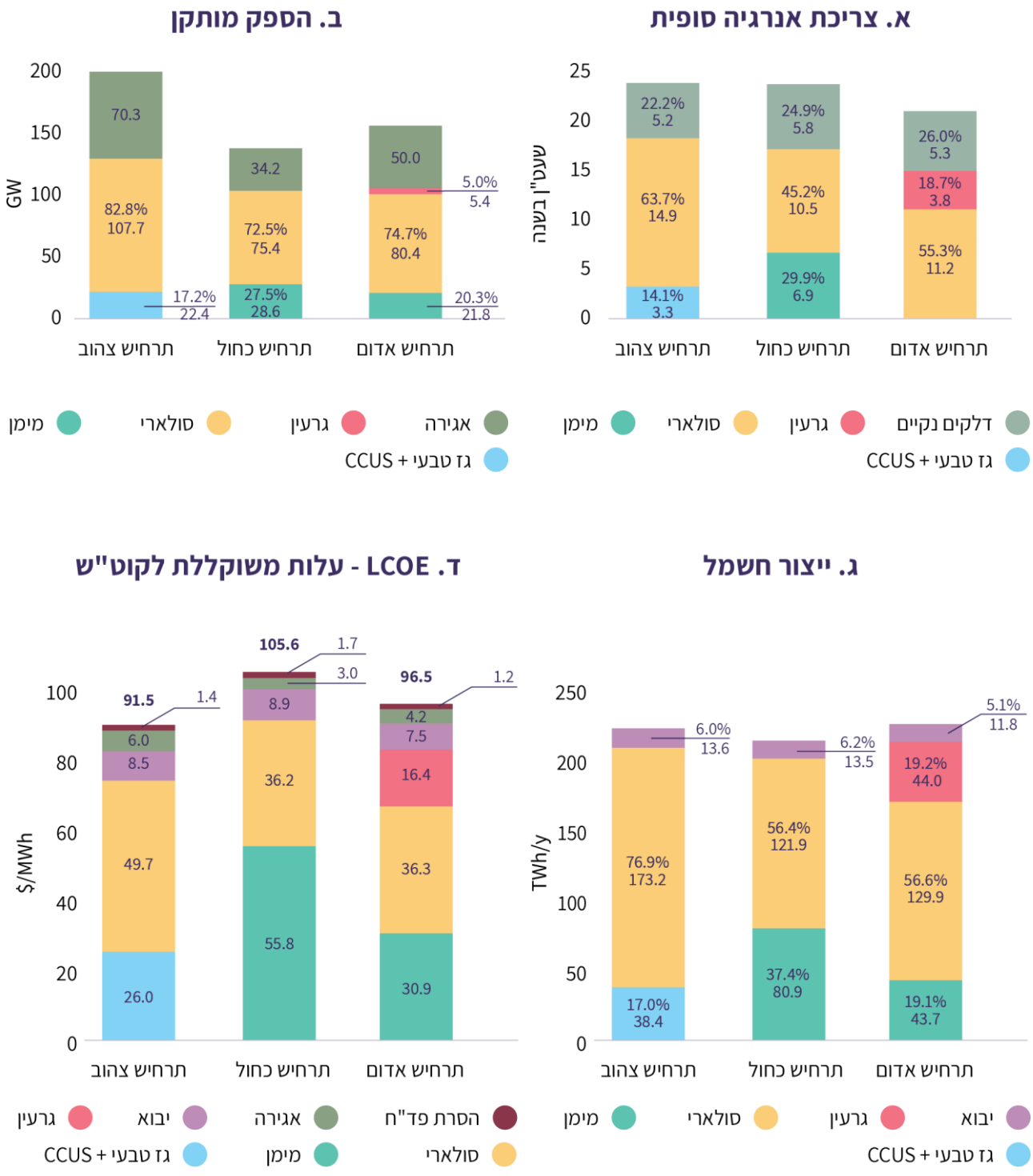


טבלה 8: סיכום הפרמטרים העיקריים בשלושת התרחישים המשולבים

תחום	התרחיש הצהוב	התרחיש הכחול	התרחיש האדום
אנרגיה סולארית	כ-108GW להקמת המערכות ידרשו -800 900 אלף דונם (מרביתם בדו-שמוש).	כ-75GW להקמת המערכות ידרשו -550 650 אלף דונם (מרביתם בדו-שמוש).	כ-80GW להקמת המערכות ידרשו -600 700 אלף דונם (מרביתם בדו-שמוש).
	פיתוח פאנלים סולאריים בנצילות גבוהה יאפשר להקטין את השטח הנדרש עד כדי מחצית		
אגירה	כ-70GW ל-4 שעות כמות גבוהה ביחס לתרחישים האחרים.	כ-34GW ל-4 שעות הספק נמוך יותר מאשר בתרחישים הצהוב והאדום אך עדיין מדובר בכמות גדולה של אגירה.	כ-50GW ל-4 שעות הספק נמוך יותר מאשר בתרחיש הצהוב אך עדיין מדובר בכמות גדולה של אגירה.
	טכנולוגיות אגירה חדשות מבוססות נתרן או גופרית יובלו לאפשר עלויות נמוכות ויהפכו אגירה בסדר גודל כזה לסבירה.		
תחנות כוח	22GW לגיבוי המערכות הסולאריות בתקופת החורף בה הייצור הסולארי נמוך ידרשו תחנות כוח בהספק כולל של כ-22GW (ההספק כיום עומד על כ-18GW). התחנות ידרשו לפעול בגז טבעי עם תפיסת הפד"ח הנפלט.	29GW להשלמת הייצור במערכות הסולאריות ידרשו תחנות כוח בהספק כולל של כ-29GW. תחנות אלו ידרשו לפעול במימן כחול שיופק בארץ מגז טבעי.	22GW להשלמת הייצור במערכות הסולאריות ובגרעין ידרשו תחנות כוח בהספק כולל של כ-22GW. תחנות אלו ידרשו לפעול במימן אדום שיופק בארץ בכורי הגרעין או במימן מיובא.
	תחנות הכוח ידרשו להיות גמישות והן ידרשו להפעלה וכיבוי מהירות, יפעלו במחזורי הפעלה וכיבוי מהירים, ויושבתו לתקופות ארוכות.		
הערכת עלות מערכת ייצור החשמל LCOE	91.5 $/MWh העלות הנמוכה ביותר. כ-60% ממנה עלות המערכות הסולאריות, כ-30% גז טבעי עם תפיסת פחמן וכ-10% ייבוא.	105.6 $/MWh העלות הגבוהה ביותר, אך הפער בינה לבין הנמוכה ביותר הוא כ-10%,טווח שאינו משמעותי ביחס לאי-הוודאות עד לשנת 2050. עיקר העלות היא לשימוש במימן (כ-55%), כ-36% לייצור הסולארי וכ-9% לייבוא.	96.5 $/MWh עלות בינונית. העלויות מתחלקות בין המערכות הסולאריות (כ-40%), השימוש במימן אדום (כ-35%), כורי הגרעין (כ-20%) והייבוא (פחות מ-10%).
	מדד ה-LCOE מחשב את עלות ייצור החשמל בלבדו ואינו לוקח בחשבון עלויות תשתיות נלוות ואת עלות הקרקע – רכיבים שעשויים לשנות משמעותית את העלות הכוללת.		
שימוש בגז טבעי בשנת 2050	במערך ייצור החשמל יעשה שימוש בכ-7.6 BCM של גז טבעי בשנת 2050 בטורבינות גז עם תפיסת פחמן.	לשם הפקת מימן כחול ידרשו כ-18.9 BCM של גז טבעי בשנת 2050.	אין.
שימוש במימן	ידרשו כ-600 אלף טון מימן בשנה עבור מגזרי התחבורה והתעשייה.	להפקת כ-37% מצריכת החשמל בטורבינות מימן ידרשו כ-5.5 מיליון טון מימן בשנה, מתוך כך כ-	להפקת כ-19% מצריכת החשמל בטורבינות מימן ידרשו כ-3.4 מיליון טון מימן בשנה, מתוך כך כ-

תחום	התרחיש הצהוב	התרחיש הכחול	התרחיש האדום
		790 אלף טון מימן ידרשו לתעשייה ולתחבורה.	850 אלף טון מימן לתעשייה ולתחבורה.
יצור מימן מקומי	ייצור מקומי של מימן ירוק בהיקפים קטנים.	כ-4.7 מיליון טון בשנה מימן כחול.	כ-2.7 מיליון טון בשנה מימן אדום.
תפיסת פד"ח	כ-16 מיליון טון בשנה. טורבינות הגז הטבעי יפלטו כ-16 מיליון טון פד"ח בשנה. מתקני הייצור יפרידו את הפד"ח ויעבירו אותו לאתרי הטמנה בישראל.	כ-34 מיליון טון בשנה. ייצור המימן הכחול יפלוט כ-34 מיליון טון פד"ח בשנה. מתקני ייצור המימן יפרידו את הפד"ח ויעבירו אותו לאתרי הטמנה בישראל.	אין.
הסרת פד"ח	כ-3.2 מיליון טון בשנה, בעלות של כ-1.2 מיליארד ש"ח בשנה.	כ-3.8 מיליון טון בשנה, בעלות של כ-1.4 מיליארד ש"ח בשנה.	כ-2.8 מיליון טון בשנה, בעלות של כ-1.0 מיליארד ש"ח בשנה.
יבוא מימן או דלקים אחרים	כ-600 אלף טון מימן. עוד כ-1.7 מיליוני טון של דלקים נקיים למגזרי התעופה הספנות. עוד כ-1.1 מיליוני טון של דלקים פוסיליים.	כ-810 אלף טון מימן. עוד כ-1.7 מיליוני טון של דלקים נקיים למגזרי התעופה והספנות. עוד כ-1.1 מיליוני טון של דלקים פוסיליים.	כ-700 אלף טון מימן. עוד כ-1.3 מיליוני טון של דלקים נקיים למגזרי התעופה והספנות. עוד כ-1.1 מיליוני טון של דלקים פוסיליים.
תשתיות כלל ארציות	לקבלת והולכת החשמל מייצור סולארי יהיה צורך בעיבוי רשת ההולכה הארצית. ייצור חשמל בטורבינות גז עם תפיסת פחמן ידרוש הקמת רשת ארצית להולכת הפד"ח וכן הקמה של אתרי הטמנה לפד"ח.	אמנם בתרחיש זה ההספק הסולארי נמוך מאשר בתרחיש הצהוב, עדיין יהיה צורך בעיבוי רשת ההולכה הארצית. השימוש במימן כחול ידרוש תשתיות הפקת מימן מגז טבעי עם תפיסת הפחמן הנפלט, רשת הולכת מימן ארצית אל תחנות הכוח (יתכן שימוש ברשת הגז הטבעי הנוכחית שתוסב למימן) ורשת ארצית להולכת הפד"ח והטמנתו.	הקמת כורים גרעיניים בהספק גבוה תדרוש הקמה של מקטע הולכה משמעותי אל אתרי הכורים. ייצור המימן האדום באזור הכורים (ישתמש בחום השיורי של הכורים) ידרוש הקמת תשתיות הולכה גם למימן אל הרשת הארצית.
	יבוא דלקים סינתטיים ידרוש תשתיות קבלה של הדלקים בנמלי הים וחלוקת הדלקים לתחנות הכוח והצרכנים ברחבי הארץ.		

תרשים 64: השוואת ממצאי המודל בשלושת התרחישים העיקריים שנבחנו



בתרשים 64 מוצגים גרפים המשווים את שלוש החלופות העיקריות להשגת איפוס פליטות בשנת 2050.

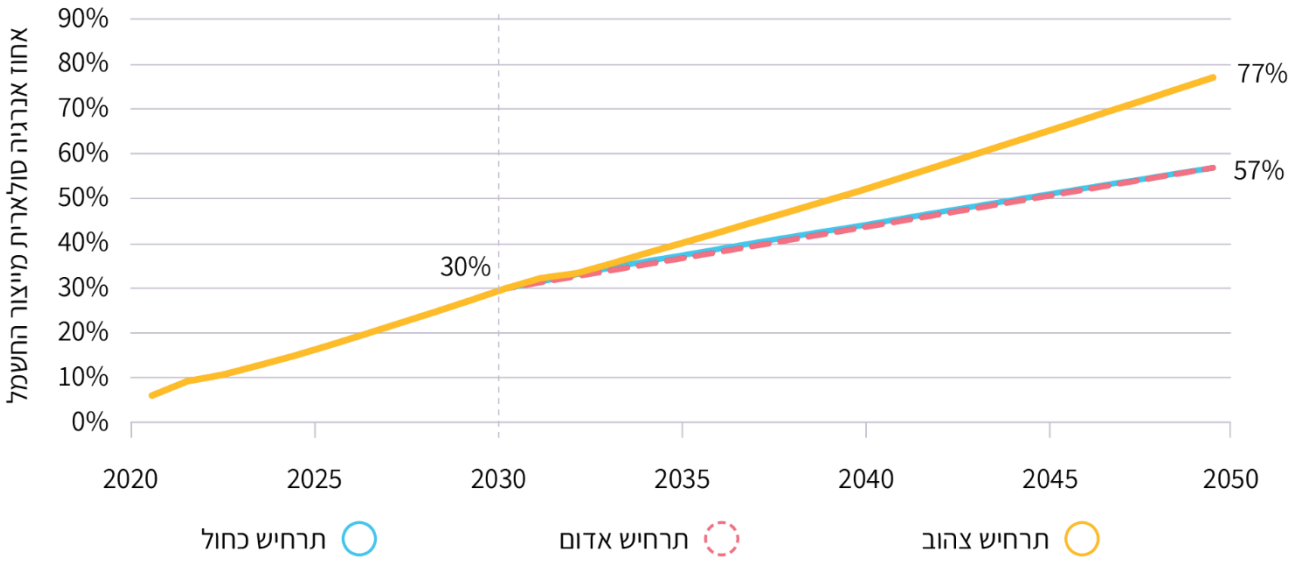
בגרף א' מתוארת השוואה של מקורות האנרגיה לצריכה סופית בשלושת התרחישים. ניתן לראות כי התרחישים הצהוב והכחול דומים, אך התרחיש האדום נמוך משמעותית כתוצאה מהפקת המימן האדום, העושה שימוש בחום מהכורים הגרעיניים ולכן דורש יחסית מעט חשמל.

בגרף ב' מתואר ההספק המותקן בטכנולוגיות השונות. ניתן לראות כי בתרחישים האדום והכחול ההספק הסולארי דומה, וזאת בשל יעד ייצור דומה של כ-55%, אך בתרחיש הצהוב נדרש הספק גבוה משמעותית בשל היקפי האנרגיות המתחדשות הגבוהים והאגירה הנדרשת לגיבוי.

בגרף ג' מתוארים מקורות האנרגיה לייצור חשמל, המסתכמים לסך דומה בתרחישים השונים למרות ההבדל בתמהילים. בתרחיש הצהוב ניתן לראות את המרכזיות של השימוש באנרגיה סולארית, בתרחיש הכחול בולט חלקו המשמעותי של המימן הכחול, ובתרחיש האדום ניכר הדגש על רכיב האנרגיה הגרעינית.

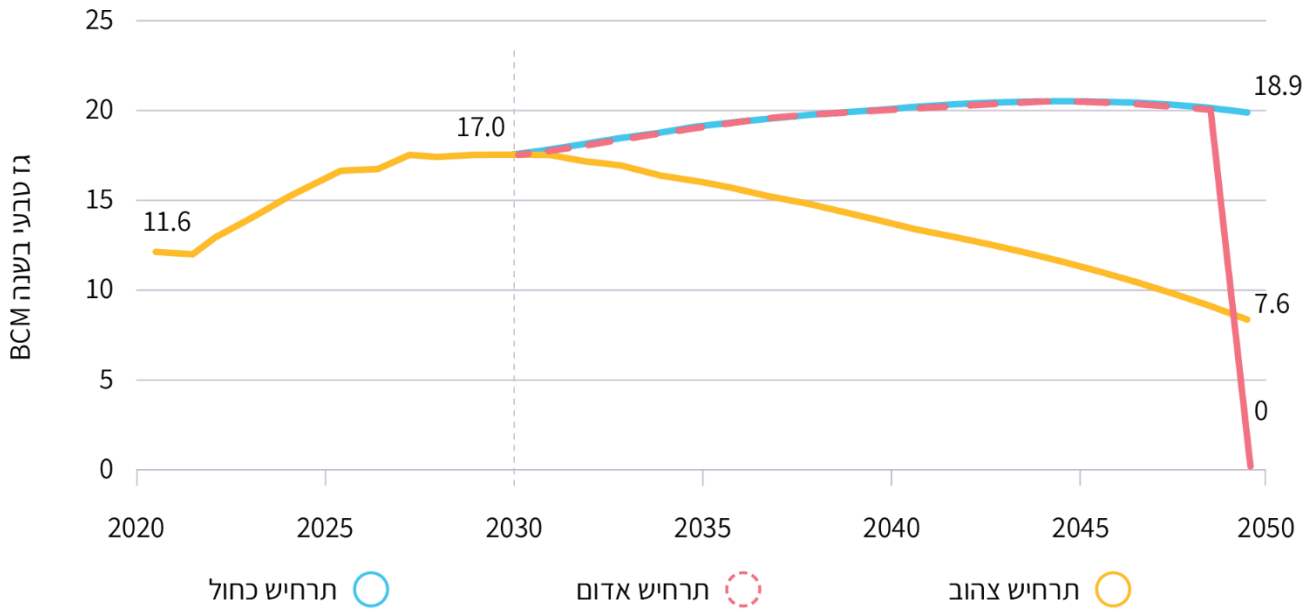
בגרף ד' מתוארת העלות המשוקללת לקוט"ש, על פי ההערכה הבלבלית המבוססת על מדד ה-LCOE, כאשר העלות הכוללת עבור התרחיש הצהוב נראית הכדאית ביותר. כאמור, עלויות אלה אינן כוללות חלק משמעותי מרכיבי התשתית שידרשו כגון ערך הקרקע, עלויות רשת, תשתיות פד"ח ומימן, בטחון ומיגון, ועוד. עלויות אלו עשויות להשפיע באופן מהותי בבחירת התרחיש המועדף, אך נכון להיום לא קיים בסיס מידע מספק להערכת עלויות אלו ולכן המדד לא מביא אותן בחשבון בשלב זה. ככל שיתבהר האופק הטכנולוגי ויתבררו עלויות התשתיות שאינן כלולות במודל, תידרש עבודה מקצועית נוספת לחידוד כלל העלויות בתרחישים השונים.

תרשים 65: אחוז האנרגיה הסולארית מסך ייצור החשמל בתרחישים השונים



בתרשים 65 ניתן לראות את אחוז האנרגיה המתחדשת מתוך כלל ייצור החשמל בתרחישים השונים. אחוז האנרגיות המתחדשות יהיה גבוה יותר בשנת 2050 וינוע בין 57% בתרחישים הכחול והאדום, ל-77% בתרחיש הצהוב.

תרשים 66: צריכת הגז הטבעי לייצור החשמל בתרחישים השונים



בתרשים 66 מחושבת צריכת הגז הטבעי השנתית המשמשת לייצור חשמל בתרחישים השונים. בתרחיש הכחול, המתבסס על המשך השימוש בגז טבעי תוך המרתו למימן כחול, צריכת הגז הטבעי היא הגבוהה ביותר ומתייצבת בסביבות רמת צריכה של כ-19 BCM בשנה (בשנת 2023 צריכת הגז הטבעי השנתית עמדה על כ-13 BCM). בתרחיש הצהוב תהיה התקנה משמעותית של מערכות סולאריות, אך עדיין ימשיך שימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן, ולכן צריכת הגז הטבעי תגיע לכ-7.6 BCM בשנה בשנת 2050. בתרחיש האדום הביקוש לגז טבעי ילך ויצטמצם עקב התקנת מערכות אנרגיה מתחדשת, ובשנת 2050, עם חיבור הכורים הגרעיניים לרשת צריכת הגז הטבעי תרד לאפס.

8. בטחון באנרגיה וניהול סיכונים

התרחישים המשולבים שהוצגו לעיל הציעו חלופות המאזנות בין עקרונות המדיניות השונים לבין המגבלות הטכניות של הטכנולוגיות השונות. **עקב אי הוודאות הגדולה** בניסיון לחזות את מצב משק האנרגיה בעוד שלושה עשורים, יש לבחון מתווים בהם היעדים שהוגדרו בתרחישים אלו לא יושגו.

אתגרים שעלולים לעמוד בדרך להשגת התרחישים המשולבים כוללים התפתחות איטית מידי בתחום האנרגיה הסולארית ומקורות מתחדשים אחרים, כך שלא תתאפשר הגעה ליעד האספקה הנדרש במגבלות השטח בישראל. כמו כן, התפתחות איטית או קשיים בהשגת חומרי הגלם לסוללות ומתקני האגירה, כמו גם קשיי אספקה או פיתוח של הרשת, עלולים אף הם לפגוע ביכולת להשיג את יעד האיפוס. עיכוב בהתפתחות טכנולוגיות תפיסת הפחמן, דרישת שטח גבוהה מידי של מתקני התפיסה, או מחסור באתרי הטמנה בישראל, כל אלו עלולים לפגוע באפשרות להשיג תפיסת פחמן בכמות מספקת בישראל להשגת יעדי ייצור המימן הכחול או השימוש בגז טבעי. גם עתודות גז טבעי נמוכות במאגרים ישראליים יאתגרו את אפשרות המשך השימוש בגז טבעי עד לשנת 2050 ומעבר לה. בנוסף לכך, עיכוב בטכנולוגיית ייצור המימן הכחול או בהסבת מתקני ייצור החשמל והתעשייה לשימוש במימן יפגעו באפשרות השימוש במימן הכחול. אפשרות הייבוא מחייבת שיתופי פעולה וחתימה על הסכמים בינלאומיים וקידום תשתיות להובלת האנרגיה כגון כבלים וצינורות. בשימוש באנרגיה גרעינית יתכן ולא ימצאו פתרונות לסוגיות הטכנולוגיות, הרגולטוריות והמדיניות.

8.1. בטחון באנרגיה כתנאי הכרחי

מלחמת חרבות ברזל חידדה את ההבנה בדבר החשיבות הרבה של עצמאות באנרגיה, ובהכרח לבסס יכולת לספק את כמות האנרגיה הנדרשת לקיום אזרחי באופן עצמאי גם תחת איום על תשתיות האנרגיה, כדוגמת נמלי הים, אסדות הגז הטבעי, רשתות ההולכה והחלוקה, תחנות הכוח ועוד. יכולת זו מתבטאת במספר עקרונות:

1. הבטחת מענה לביקושים באמצעות **היצע מקומי קיים או רזרבות מספיקות,** הנגזר בין היתר מכושר הייצור והאחסון המקומיים. משכך, ההספק המותקן הנדרש, הן הפוסילי והן באנרגיות מתחדשות, יצטרך להיקבע בהתאם. היבוא, יצטרך להיות בכמות אשר תספק נתח משמעותי מהביקוש לאנרגיה, אך לא כזו שישראל תשען עליה לאספקת הצרכים הקריטיים של המשק המקומי.

2. **ביזור** הייצור של החשמל. ביזור גורר באופן ישיר פיזור פיזי של הסיכונים הביטחוניים. הגדלת ההספק הסולארי המותקן, בפרט בדו-שימוש, מתיישבת עם עקרון זה. במקום לייצר חשמל ע"י מספר תחנות כוח גדולות, המהוות מקור קריטי למספר רב של צרכנים, החשמל ייוצר באמצעות אלפי מערכות פוטו-וולטאיות מפוזרות. כך, פגיעה במקור ייצור תשפיע על מספר קטן יחסית של צרכנים. ביזור זה יאפשר גם ייצור קרוב יותר למוקדי הצריכה, ובכך יפחית את הסיכון לאתגרי אספקה כתוצאה מפגיעות ברשת. יתרונות הביזור הומחשו באופן טרגי במלחמת חרבות ברזל, ובפרט באירועי ה-7.10.2023. מתקפת חמאס על יישובי עוטף עזה כוונה גם לתשתיות אנרגיה, ופגיעות ברשת גררו ניתוק של יישובים שלמים לפרקי זמן ארוכים. ייצור חשמל באמצעות מערכות פוטו-וולטאיות מקומיות, בשילוב אגירה ועם שימוש מינימלי ברשת, יכלו במקרים רבים לשמש גיבוי ולהגביר את הביטחון באנרגיה באזורים אלו. יצוין כי רשת מבוזרת המורכבת ממערכות המותקנות ומתוחזקות על ידי אנשים פרטיים רבים מעלה את הסיכון למתקפות סייבר ותדרוש מענה הולם לנושא.[149]

3. המסקנה כי לא ניתן להסתמך על טכנולוגיה אחת אף היא משרתת בבסיסה בטחון באנרגיה ומעלה את הצורך **בגיוון מקורות אספקת האנרגיה** כך שיתאפשר שימוש חליפי גם בשגרה וגם בחירום. במקרה פגיעה או אירוע ביטחוני, עוצמת הנזק במשק אנרגיה המבוסס על מספר מקורות ייצור תהיה במרבית המקרים קטנה יותר. גם עקרון זה התחדד במהלך מלחמת "חרבות ברזל" ובאירועים ביטחוניים קודמים. כך למשל, עוצמת הנזק הפוטנציאלי מפגיעה באסדות הגז הטבעי, פוחתת ככל שישנם אמצעי ייצור נוספים במשק שאינם תלויים באספקת גז טבעי.

4. יכולת **ניהול אנרגיה באופן מקומי** תביא להגברת הביטחון באנרגיה ותתאפשר באופן מקיף יותר ככל שיגדל הייצור המבוזר. ניהול משק האנרגיה באופן אזורי ("איים אנרגטיים"), יאפשר צריכה יעילה יותר של אנרגיה בשגרה, לצד הגברת אמינות האספקה וניהול הרשת באופן אסטרטגי בזמן חירום.

5. מעבר מאסיבי למשק אנרגיה נקי, כדוגמת שימוש באנרגיות מתחדשות, אגירה ורכב חשמלי, דורש **שימוש גובר במתכות ומינרלים נדירים.** מאחר שמדובר במגמה עולמית, הביקוש העולמי למתכות ומינרלים אלו צפוי לגדול משמעותית ועלול להגיע עד כדי מחסור, ויש להבטיח כי אספקת המינרלים הקריטיים לישראל לא תיפגע. בין מינרלים אלה ניתן למנות את הליתיום, הנחושת, הניקל והקובלט. ביקוש זה צפוי לגדול משמעותית גם מצד ביקושים שאינם קשורים לאנרגיה, כדוגמת עולמות המיקרו-אלקטרוניקה וה-AI, ובכך אף להעצים את האתגר. יתרה מכך, מחסור זה צפוי להיות מושפע משמעותית מהקשרים גיאופוליטיים, ובכך להחריף את המצב עבור חלק מהמדינות, ולייצר תחרות לצד שותפויות אסטרטגיות. משכך, משרד האנרגיה והתשתיות מקדם בימים אלו עבודה על מנת למפות את האתגרים וההזדמנויות הצפויים, וכדי להיערך בהתאם.

[149] כמעט כל הממירים כיום מחוברים לרשת ומדווחים בזמן אמת על הייצור. בעתיד הממירים יוכלו גם להישלט מרחוק ולספק לרשת שירותים שונים ("ancillary services"). כל הפונקציות הללו פגיעות למתקפת סייבר ודורשות עדכוני תוכנה וקושחה (firmware) מתמידים, כמו גם הגדרות חומת-אש מתאימות ועוד.

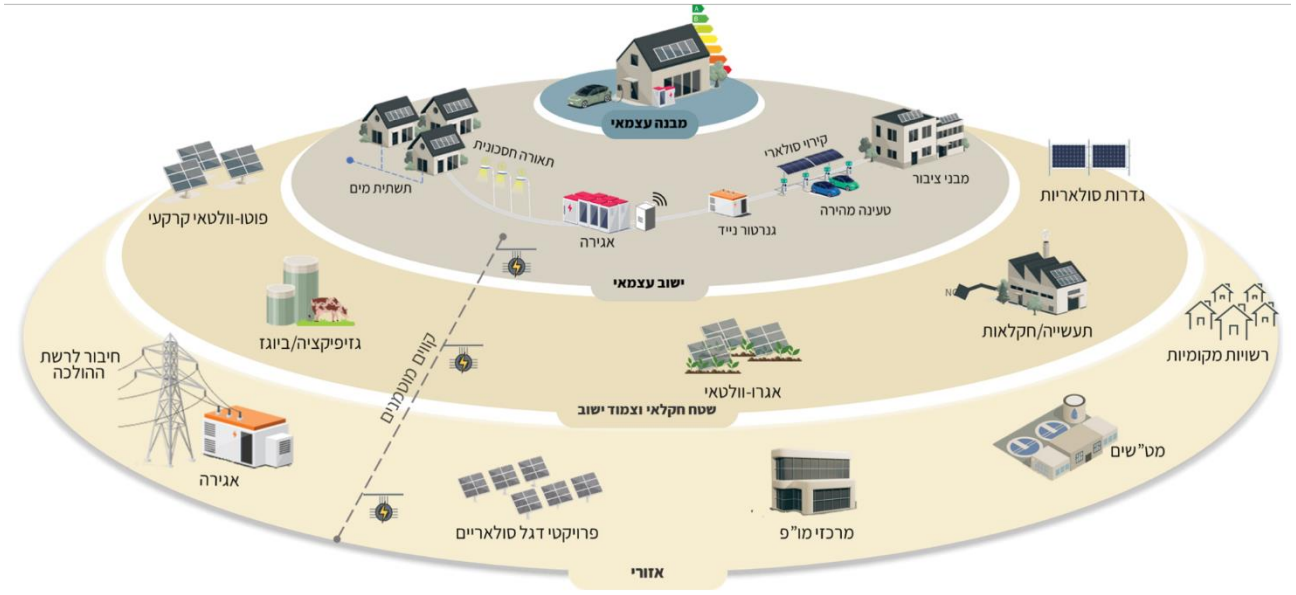
6. השפעות משבר האקלים ניכרות כבר היום. לכן, לצד נקיטת פעולות להפחתת פליטות ואיפוסן, יש לפעול כבר היום **להתמודדות עם שינויי האקלים** הנוכחיים והצפויים. בין היתר, יש לוודא כי תשתיות האנרגיה ערוכות לעליה בטמפרטורה, ירידה ניכרת בכמות המשקעים ולשכיחות אירועי קיצון של מזג האוויר, כולל גלי חום וסופות חול לצד סופות גשם ושיטפונות.

עקרונות אלה באים לידי ביטוי בתכנית משרד האנרגיה והתשתיות לשיקום ולפיתוח חבל תקומה (עוטף עזה).[150] מטרות העל של התכנית הן פיתוח עצמאות ויתירות באנרגיה באמצעות קידום אנרגיה מקיימת, מבוזרת ומאופסת פליטות, ותוך האצת חדשנות אקלימית ופיתוח כלכלי.

התכנית פורטת מטרות ועקרונות אלה לרמות שונות – החל מהמבנה הבודד מאופס אנרגטית, דרך תצורת יישוב עצמאי באנרגיה, ועד ליצירת חוסן אזורי ועצמאות באנרגיה. כך למשל, בהתאם לחזון, המבנים בחבל תקומה (פרטיים וציבוריים) ייבנו בהתאם לדירוג האנרגטי הגבוה ביותר, הם יקורו באנרגיה מתחדשת לצד התקנת מערכות אגירה, ויוקמו לצידם תשתיות לטעינת רכבים חשמליים ונקיים. בהמשך לכך, עבור כל יישוב, ימופו צרכי האנרגיה הנוכחיים והעתידיים, כולל תחזיות ביקושים שעתיות ופוטנציאל ייצור האנרגיה והצריכה המקומית. מתוך מיפוי זה ייגזרו תכניות לכל אחד מהיישובים שיכללו, בין היתר, הטמנה של תשתיות החשמל, הקמת מערכות אנרגיה יעילות (לדוגמה מערכת תאורה יישובית חכמה), והתקנת מערכות לניהול האנרגיה ברמה היישובית ("מיקרוגריד"). כמו כן, גם בשטחים החקלאיים וצמודי יישוב יוקמו מערכות לייצור אנרגיה מתחדשת ואגירה, בין היתר בדו שמוש אגרו-וולטאי, טיפול אזורי בפסולת חקלאית לאנרגיה (גזיפיקציה), שדרוג תשתיות המים האזוריות והקמת מרכז מו"פ וחדשנות באנרגיה.

מימוש החזון והתכנית, יהפכו את חבל תקומה למרכז אנרגטי, כלכלי ואקלימי שיוכל להיות מנוהל באופן עצמאי בשעת חירום ובשגרה, ובבך יהווה מודל למשק האנרגיה העתידי.

תרשים :67 המתווה הכללי לשיקום חבל תקומה על בסיס חוסן ועצמאות באנרגיה. משרד האנרגיה.[151]



[150] *תכנית אב רב-שנתית לשיקום תשתיות האנרגיה והמים בחבל תקומה*, משרד האנרגיה והתשתיות 2024.

[151] משרד האנרגיה והתשתיות.

8.2. עקרונות לעמידה ביעדים

בהנחה כי יתקיים בעולם שוק פעיל לסחר במוצרי אנרגיה, הוא יוכל לגבות כל חוסר שיתפתח בערוצים האחרים היות והביקוש הישראלי זעיר ביחס לביקושים הצפויים בעולם. עד לשנת 2004 ישראל נסמכה ב-100% על ייבוא אנרגיה בספינות (מוצרי נפט), מצב זה אינו רצוי מבחינת ביטחון באנרגיה, אך אפשרי, בהינתן הגיבויים הנדרשים. גם כיום כמחצית ממשק האנרגיה תלוי בייבוא נפט ודלקים בשוק הגלובלי. גם בשוק גלובלי משוכלל מוצרי האנרגיה שיסחרו – בין אם מימן, אמוניה, דלקים סינתטיים או ביולוגיים – יהיו יקרים משמעותית משימוש בחשמל מייצור מקומי. כמו כן, יבוא אנרגיה בכמויות גדולות יעלה את הסיכון לרציפות האספקה ועלול להפוך את ישראל לפגיעה בעיתות של קשיי סחר בינלאומיים. עם זאת, יבוא יהווה חלק מכל תמהיל אנרגיה עתידי וידרוש תשתיות מתאימות כגון נמלי דלקים, מסופי קבלה, מתקני אגירה וטיפול בדלקים, מסופי ניפוק, צנרת הולכה, ועוד.

בנוסף, יש לוודא כי קיימים אופנים שונים לייבוא אנרגיה, כגון חיבור כבלי חשמל לרשתות שכנות או ישירות לשדות סולאריים או חוות רוח במדינות שונות, או חיבור בצינור להולכת מימן ממדינות קרובות. גם ערוצים אלו יכולים לספק אחוזים ניכרים של הביקוש בישראל, אך יש לוודא את בטחון האספקה במקרים אלו על ידי גיבוי מספק ולחלופין באמצעות בטוחות אחרות. מיקומה של ישראל בין אזור המזרח התיכון ואירופה, יכול לאפשר הקמה של צינור להובלת מימן ירוק או כחול ממדינות המפרץ לאירופה שיעבור בישראל. צינור כזה ישען על יתרון הגודל שינבע מהביקוש הגבוה למימן באירופה, לצד ניצול מיקומה האסטרטגי של ישראל, ובכך יאפשר לישראל לרכוש מימן זול לשימוש במשק האנרגיה המקומי.

8.3. מעבר הוגן ("Just Transition") למשק מאופס פליטות

הבטחת אספקת אנרגיה רציפה מחייבת שמירה גם על האוכלוסיות החלשות ביותר בחברה, העלולות להיפגע מתהליך המעבר של משק האנרגיה לעתיד מאופס פליטות. תחום ה"מעבר ההוגן" ("Just Transition"), בוחן את הסכנות הפוטנציאליות הכרוכות במעבר זה, ומציע מספר כלי מדיניות להתמודדות עם אתגרים אלו. להלן מספר דוגמאות לסוגיות בולטות בתחום זה:

1. **איזון הגדלת ההוצאות הרגרסיבית:** כלים כלכליים לתמרוץ הפחתת פליטות הם לעיתים רגרסיבים, ומשכך פוגעים באופן קשה יותר באוכלוסיות מוחלשות. לדוגמא, מס פחמן, שידוע כאחד הכלים הכלכליים האפקטיביים ביותר לעידוד המעבר לשימוש במקורות אנרגיה נקיים יותר, מטיל עול כבד יותר, באופן יחסי, על משקי הבית החלשים. משקי בית אלו מוציאים את מירב ההכנסות על צרכים בסיסיים, ביניהם חשמל, מים, ורכב, ואלו רגישים מאד להשפעות מס הפחמן. לכן, כאשר תקבע מדיניות העלולה להעלות את מחירי האנרגיה, יש לוודא כי מובנים בתוכה מנגנונים פרוגרסיביים, השומרים על השכבות המוחלשות מפני פגיעה משמעותית.

2. **אובדן משרות פוטנציאלי:** המעבר למשק דל פליטות כרוך בזניחת תחומי עיסוק מסורתיים, כגון עולמות הדלקים והנפט, הגפ"מ והפחם או סגירה של מפעלים מזהמים. יש לוודא כי המדיניות התומכת במעבר למקורות אנרגיה נקיים ומתחדשים תכלול גם סיוע לעובדי התעשיות המסורתיות, בהכשרה מקצועית למעבר למקצועות האנרגיה החדשים, או בהסכמי פרישה מוקדמת. ללא אמצעים אלו מדיניות המעבר עלולה להיתקל בהתנגדות ציבורית על רקע פגיעה בעיסוק, וזאת ללא נגיעה ענייינית בעצם הצורך במעבר למשק נקי.

3. **מגבלות מימון למעבר לאנרגיה נקיה:** לאוכלוסיות מוחלשות קיימות מגבלות על יכולת ההשקעה, ולכן סביר כי הן תתקלנה בקשיים בתהליך רכישת מערכות סולאריות. במקרים רבים לאוכלוסיות אלה אין יכולת לקבלת הלוואה בנקאית או הלוואת בערוצים מקבילים, בתנאים טובים שיאפשרו לרכוש מערכות סולאריות וליהנות מהיתרונות הכלכליים שהן מספקות. יש לתת את הדעת לקשיים אלו ולבחון אמצעי מדיניות תומכים כדוגמת הלוואות מדינה בריבית נמוכה לבעלי הכנסה נמוכה לצורך רכישת מערכות אנרגיה סולארית בשילוב אגירה ולרכישת מוצרים יעילים באנרגיה.

4. **רציפות אספקת החשמל:** בעתיד בו לאחוז גבוה מהאוכלוסייה יהיו מערכות סולאריות בשילוב אגירה, שיאפשרו גיבוי של רשת החשמל למספר שעות, יתכן וישתנו קריטריוני אמינות האספקה ויגדלו שעות אי האספקה לציבור, משום שעוצמת פגיעתן של הפסקות חשמל תקטן. מאחר שאוכלוסיות מוחלשות יהיו בכל הנראה האחרונות להתקין מערכות סולאריות או סוללות אגירה וגיבוי, סביר שהן יפגעו באופן תדיר יותר מהפסקות חשמל ויש לוודא כי אמינות האספקה תישמר גם עבורם.

9. תובנות עיקריות

כפי שניתן להבין, השגת איפוס הפליטות בשנת 2050 יכולה להיעשות במספר דרכים, אולם אף אחת מדרכים אלו אינה "פתרון קסם". כאמור, אין טכנולוגיה יחידה המסוגלת להתמודד עם כל האתגרים שיעמדו בפני משק האנרגיה הישראלי בעתיד, ואף לא נראה שתהיה כזו. לכן, כל דרך אל יעד האיפוס מורכבת מתמהיל הכולל מספר פתרונות וטכנולוגיות, ודורשת היערכות מראש במספר מישורים - התאמת הרגולציה, הרחבת ההשקעות, ותכנון והקמת התשתיות הפיזיות הנדרשות. היערכות זו צריכה להיבחן באופן תקופתי, לאור השינויים הטכנולוגים המהירים ועל מנת למקסם השקעות אלו.

בטחון באנרגיה: הבטחת אספקת אנרגיה רציפה ואמינה מהווה תנאי בסיסי והכרחי לכל תרחיש שייבחר. בין היתר יש לבחון את רמת ואופן גיוון מקורות הייצור, ביזור אמצעי הייצור ואת היכולת לנהל באופן מקומי את צריכת החשמל.

הפחתה וניהול ביקושים: אחד המכשולים המשמעותיים ביותר להצלחת המעבר למשק נטול פליטות הוא סך הביקוש לאנרגיה, וכן ההתאמה בין ייצור החשמל לביקוש. ישנה חשיבות עצומה לתהליכי התייעלות, כמו גם לשינויים טכנולוגיים והתנהגותיים שיפחיתו את הביקושים לאנרגיה ובכך יצמצמו את ההשקעות והיקף התשתיות שידרשו למעבר למשק אנרגיה נקי – כל חיסכון של 1% בביקוש לחשמל בשנת 2050 שווה ערך לחיסכון בשדות סולאריים בהספק של כ-1,200 מ"ו. באופן דומה, ככל שניתן יהיה לנהל חלק גדול יותר מהביקוש ולהתאימו להיצע, כך יקטן הצורך באגירה וביחידות ייצור לגיבוי המשק הסולארי.

אין טכנולוגיה אחת: בבחינה הראשונית נמצא כי אין "פתרון קסם" המאפשר לספק באופן ריאלי את כל צרכי המשק באמצעות טכנולוגיה אחת. בכל טכנולוגיה שנבחנה נמצאו חסמים לאספקת מלוא הביקוש לאנרגיה – אנרגיה סולארית דורשת שטח רב ואגירה עונתית, המשך השימוש בגז טבעי עם תפיסת פד"ח דורש כמויות גז טבעי גדולות ותשתיות פד"ח ארציות, השימוש בגרעין מחייב מרחקי בטיחות שלא מאפשרים הספק גרעיני גבוה בשלב זה, ושימוש נרחב בייבוא מאתגר את תפיסת העצמאות באנרגיה. המסקנה היא כי יש לשלב טכנולוגיות שונות באופן שיאזנו זו את זו.

גיוון טכנולוגיות: הצורך בגיוון ושילוב טכנולוגיות בתרחישים השונים נובע ראשית משיקולי בטחון באנרגיה מחייבים גיוון מקורות באופן שיאפשר גיבוי וימנע תלות משקית במקור אנרגיה בודד. מאחר שכבל שאחוז השילוב של טכנולוגיה מסוימת גדל, כך השילוב הופך קשה ויקר יותר, נשאף לשלב מספר טכנולוגיות, באופן שיספק את התועלת המקסימלית, תוך איזון עם היקף ההשקעות הנדרשות לתשתיות השונות.

הסרת פחמן: בערוצים הטכנולוגיים שתוארו, גם בהתייחס לתחזיות העתידיות לשנת 2050, לא ניתן יהיה לבטל את כלל הפליטות בכל המגזרים וכ-5% מהפליטות יוותרו וישוחררו לאטמוספרה. בכדי להשיג איפוס מלא של הפליטות יהיה צורך להשתמש בטכנולוגיות של "הסרת פחמן" (Carbon Dioxide Removal – CDR), דהיינו הסרה של הפד"ח מהאטמוספרה בכמות של 3-4 מיליוני טון בשנה.

יש להתחיל כבר כעת: על מנת להגיע לאיפוס פליטות בשנת 2050 יש לבצע שינויים דרמטיים במשק האנרגיה, הן בצד מערכות ייצור האנרגיה, והן בתשתיות תומכות כעיבוי רשת החשמל הארצית או הקמת מתקנים להטמנת פד"ח. היות ומדובר בטכנולוגיות חדשניות ותשתיות משמעותיות, ישנם צעדים רבים שיש להתחיל בביצועם כבר בימים אלו, אף ששנת היעד היא בעוד שניים וחצי עשורים. שינויים אלו כוללים צעדי מדיניות לצד צעדים יישומיים, אשר יאפשרו להאיץ את קצב התקנת מערכות האנרגיה הנקייה והרכיבים התומכים מעבר לתמהיל החזוי בהמשך המתווה הקיים

("תרחיש מדיניות מוצהרת"). עקב אי הבהירות הטכנולוגית, יש להתקדם בכל הערוצים במקביל עד להתבהרות האופק הטכנולוגי.

השקעות ללא חרטה: ישנם מספר פתרונות שידרשו כנראה בכל תרחיש עתידי. כך למשל, בכל תרחיש שייבחר יהיה צורך במיקסום הפוטנציאל לייצור אנרגיה סולארית ואגירה, לצד יבוא מוצרי אנרגיה. כמו כן, ברור כבר כיום כי כל פתרון עתידי ידרוש השקעות מסיביות בפיתוח רשת החשמל. בהיבטים אלו יש לפעול כבר כעת באופן משמעותי היות והם מהווים צעדים **ללא חרטה,** דהיינו השקעות שידרשו בכל תרחיש עתידי ולא נתחרט על ביצוען. כאמור, כלל הפתרונות דורשים השקעות משמעותיות בתשתיות אנרגיה, ולכן נדרש לבצע איזון בין התועלת בשילוב מספר רב של טכנולוגיות לבין עלויות ההתאמה והגיוון שלהן.

אתגר השטח: בכל תרחיש עתידי ידרשו שטחים נרחבים לייצור אנרגיה. השטחים הגדולים ביותר ידרשו עבור המערכות הסולאריות (שיהיו ככל האפשר בדו-שימוש בקרקע), ובפרט בתרחיש הצהוב. התרחיש הכחול ידרוש, בנוסף לתשתיות הפד"ח גם שטחים עבור מתקני המרת הגז הטבעי למימן ותשתיות תומכות. התרחיש האדום ידרוש מרחקי בטיחות סביב תחנות הכוח. בנוסף, יבוא אנרגיה ידרוש שטחים למתקני קבלה, המרה, ניפוק והולכה של אנרגיה.

רגולציה מאפשרת: התרחישים השונים שנדונו בעבודה זו מסתמכים על טכנולוגיות הקיימות כיום אך עדיין אינן בפרישה רחבה מספיק או שעדיין נמצאות בשלבי הדגמה והטמעה ראשוניים, והן צפויות להשתפר במהלך השנים הקרובות ולהגיע להיקף הייצור וההתקנה בקנה המידה הגלובלי הנדרש. תחומי העיסוק שידרשו להשגת היעד מתפרשים מעבר לגבולות האחריות של משרד האנרגיה והתשתיות ולהשגתו יידרש שיתוף פעולה של משרדים וגופים נוספים כדוגמת משרד הגנת הסביבה, מנהל התכנון, משרד האוצר, משרד הכלכלה וגופים נוספים. בכדי לעמוד ביעד האיפוס עד לשנת 2050, ובהתחשב בזמן הארוך שייקחו תהליכי התכנון הסטטוטורי, גיבוש הרגולציה, התכנון ההנדסי ושלבי ההקמה, יש להתחיל להתנסות כבר כעת בטכנולוגיות השונות, ולבחון את השפעתן על הסביבה והחברה בישראל. לכן, יש לגבש רגולציה גמישה, המאפשרת התנסות בטכנולוגיות חדשות, אשר תקדם את יישומן, ובחינת השפעתן על הסביבה והחברה בישראל עוד טרם הטמעת הרגולציה הסופית, תוך הקפדה שלא לפגוע בבטיחות, בסביבה או בבריאות הציבור. רגולציה זו תהיה המכוונת יעדים ולא טכנולוגיה, ובכך תאפשר גמישות לשימוש בטכנולוגיות ובשיטות שונות. רק כך, הידע הנדרש להחלטות אלו יהיה בידינו כאשר הטכנולוגיות יבשילו וניתן יהיה לקבל החלטות מושכלות בנוגע ליישומן הרחב במשק, במהירות ובאופן שיאפשר ליישמן בהיקף הנדרש עד לשנת 2050.

אנרגיות מתחדשות הן הזולות והכדאיות ביותר: אנרגיה סולארית מייצרת חשמל באופן ישיר ובמחיר הנמוך ביותר, אך היא מוגבלת הן בשטחים שניתן להקצות למערכות הסולאריות והן ביכולת לשלב אחוזים גבוהים מאד ברשת (נדרשת יכולת אגירה עצומה). אנרגיה סולארית מהווה נדבך מרכזי בכל תרחיש, אך יש להשלים אותה בטכנולוגיות תומכות כייבוא, גרעין או טורבינות גז עם תפיסת פחמן.

ניהול מקומי של רשת החשמל (מיקרוגריד): ביזור מקורות ייצור האנרגיה הקרובים למוקדי הצריכה, לצד העלייה בדיגיטציה של רכיבי הרשת, מאפשרים ניהול משק חשמל באופן מקומי (יישובי או אזורי). בניגוד למשק חשמל המסורתי, בו הייצור מותאם לביקוש, במשק חשמל מבוזר, יכולות להיות תועלות ויתרונות מניהול מקומי של החשמל תוך התאמת הביקוש לייצור, ניהול הביקוש, ניהול מקומי של הסחר בחשמל. וניהול מקומי של רשת החשמל (מיקרוגריד). הניהול המקומי יאפשר לבצע זאת לא רק ברמה הארצית, אלא גם ברמה המקומית. כך למשל, ניתן יהיה לנהל צרכנים לא חיוניים בשעות העומס או לאותת לרכבים חשמליים המחוברים לעמדות טעינה להחזיר זמנית אנרגיה לרשת, ולחלופין לנהל את רשת החשמל באופן אסטרטגי בשעת חירום.

במשק עתידי הכולל אחוזים גבוהים של אנרגיות מתחדשות סירוגיות (כדוגמת האנרגיה הסולארית), יש צורך בתגובות מהירות ומגוונות לתנודות ולאתגרים בצד הייצור. לכן במשק מוטה אנרגיות מתחדשות יש מוגבר בשכלול ניהול צד הביקוש, בפרט בניהול מקומי, באופן שיאפשר התאמה מהירה ומדויקת לתנודתיות בייצור. יש לציין כי ניהול מקומי אינו מוגבל רק לתחום החשמל – ניתן לייצר, לאגור ולהשתמש גם בחום, במימן, ועוד, ויש לבחון את משק האנרגיה בכללותו באתר ולנהל אותו באופן אחוד.

חיבוריות אזורית והצורך בייבוא: לאור המאפיינים הייחודיים של ישראל, כבל הנראה לא ניתן יהיה לענות על צרכי משק האנרגיה בישראל באמצעי ייצור נקיים מקומיים בלבד. יבוא חשמל ממקורות מתחדשים הינו חיוני על מנת להצליח לספק מענה אנרגטי מתאים, והתגברות על אתגרי המשאבים והשטח בישראל. בנוסף, שיתוף פעולה אנרגטי יכול לשמש כמנוף לפיתוח כלכלי משותף, להשקעות הדדיות ולהחלפת ידע טכנולוגי, מה שיתרום לחיזוק ההסכמים ובכך ליציבות האזורית. מכאן, שבכל תרחיש עתידי יהיה צורך לשלב יבוא אנרגיה בכמות שאינה זניחה. מתוך הצורך לגוון את מקורות האנרגיה, ניראה שגם את היבוא יש לגוון, הן בספקים מרובים והן בטכנולוגיות שונות – לדוגמא ייבוא חשמל בכבלים ממדינות שכנות, ייבוא דלקים נקיים בספינות, וייבוא מימן ודלקים נוספים בצינורות.

שמירה על משק הגז הטבעי: בכל התרחישים שנבחנו קיימות תחנות כוח מבוססות טורבינות גז, בין אם יוזנו בגז טבעי ויכללו תפיסת פחמן ובין אם יוזנו במימן מיובא או מהפקה מקומית. לכן, יש לשמור על משק הגז הטבעי המקומי, שישמש את מדינת ישראל עוד שנים רבות, ובמקביל לוודא כי תחנות הכוח המוקמות כיום יהיו מוכנות לשילוב אמצעים עתידיים להפחתה ואף איפוס של פליטות גזי החממה.

תחנות כוח גרעיניות: בין הטכנולוגיות שצוינו ניתן למנות את הגרעין, שהיא אמנם טכנולוגיה ותיקה ומסחרית אך העבודה מתייחסת לטכנולוגיית הכורים המודולריים (SMR) אשר נמצאת כעת בשלבי פיתוח. במדינת ישראל הנושא נמצא בשלבי בחינה ראשוניים, אולם נראה כי מדובר בפתרון משמעותי וחשוב לשנת 2050 ואחריה.

המשך סריקת האופק: לצד הטכנולוגיות שנסקרו בעבודה ושדרוגיהן, סביר להניח כי עם השנים יופיעו טכנולוגיות נוספות שיוכלו להשלים או להחליף חלק מהטכנולוגיות המוכרות כיום. יש להמשיך לסרוק את האופק הטכנולוגי באופן מתמשך בכדי לאתר טכנולוגיות עתידיות אלו כמו גם להתעדכן בחידושים הנוגעים לטכנולוגיות שתוארו בעבודה. רק כך נוכל להשיג את יעד איפוס פליטות גזי החממה בעלות הנמוכה ביותר ובאופן האפקטיבי ביותר.

10. צעדי מדיניות

בפרק זה יובאו המלצות להמשך פעילות בשנים הקרובות בהתאם לתרחישים ולטכנולוגיות שהוצגו בעבודה. עקב השינויים הדרמטיים העוברים על עולם האנרגיה וקצב פיתוח הטכנולוגיות, **בכל מספר שנים יש לערוך בחינה מחודשת** של כלל הטכנולוגיות לאנרגיה נקייה ושל צעדי המדיניות המצוינים בעבודה זו, ולהעריך מחדש את מידת הרלוונטיות שלהם ליישום במשק הישראלי ולעמידה ביעדי הממשלה.

10.1 צעדי מדיניות רוחביים

היות ונקודות ההחלטה ברוב התרחישים נמצאות בין השנים 2030-2040, ההמלצות לשנים הקרובות הן לצעדים שיש לעשות בכל תרחיש עתידי. כחלק מכך, נשמר עיקרון **ללא חרטה,** על פיו בהתחשב באי-הוודאות בטכנולוגיות השונות יש להשקיע בכל שלב באופן שלא ירד לטמיון באף תרחיש עתידי. כך לדוגמא, האצת הקמת מערכות לייצור אנרגיה סולארית ואגירה תהיה רלוונטית בכל תרחיש עתידי. יצוין כי חלק מההמלצות מיועדות על מנת לאפשר בחינה של הטכנולוגיות כך שניתן יהיה לקבל החלטה מושכלת במהלך העשור הבא.

להלן מספר צעדים רוחביים עיקריים הנובעים מניתוח הטכנולוגיות השונות לאיפוס הפליטות:

1. **קביעת יעדי אנרגיות מתחדשות:** בשל הצורך בהשגת אחוזי מתחדשות גבוהים בשנת 2050 לעמידה ביעד איפוס פליטות, יש צורך להציב יעדים לאחוזי אנרגיה מתחדשת מעבר ליעד הקיים בשנת 2030.

   א. יש לבחון, בהתייעצות עם רשות החשמל, יעד שאפתני של אנרגיות מתחדשות לשנת 2035, שיעמוד בקנה אחד עם היעדים המקובלים במדינות המפותחות ובהתחשב במאפיינים הייחודיים של מדינת ישראל.

   ב. בנוסף, עקב אי הוודאות הטכנולוגית, הכלכלית והתכנונית, יש להציב טווח יעדים לעתיד הרחוק באופן שיאפשר למשק לכוון את צעדיו תוך גמישות שתאפשר יישום טכנולוגיות שונות בהתאם להתפתחויות העתידיות. מומלץ לבחון טווח מצומצם יחסית לאנרגיות מתחדשות לשנת 2040, וטווח רחב יותר לשנת 2050.

קביעות אלה יציבו רף מינימום אליו המגזר הפרטי יוכל לכוון, ורף מקסימום אליו תוכל הממשלה לשאוף, וכל זאת בתוך מסגרת, שבצרוף טכנולוגיות משלימות, תאפשר להשיג את יעד האיפוס.

2. **קביעת יעדי התייעלות באנרגיה עד לשנת 2050 ועדכון ותקצוב התוכנית הלאומית להתייעלות באנרגיה:** התייעלות באנרגיה תסייע בכל נתיב עתידי והיא חלק משמעותי בהשגת יעד איפוס הפליטות. ככל שהביקוש לאנרגיה יקטן, כך יקטנו ההשקעות שידרשו בכל תרחיש איפוס שיבחר. בנוסף, התייעלות באנרגיה לרוב מחזירה את ההשקעה בתוך שנים ספורות, ולכן היא כדאית לצרכנים.

   א. משרד האנרגיה והתשתיות פרסם תכנית לאומית להתייעלות באנרגיה עד לשנת 2030.[152] על מנת לעמוד ביעד האיפוס לשנת 2050 יש להציב יעדים שאפתניים עד לשנה זו, ולפרסם תכנית יישום מתוקצבת לכלל הפעולות הנדרשות לעמידה ביעדים אלו.

   ב. יש להגדיל את התמיכה והמענקים להתייעלות באנרגיה בתעשייה, בצרכני אנרגיה גדולים נוספים, ובמשקי הבית.

[152] *התוכנית הלאומית להתייעלות באנרגיה*, משרד האנרגיה והתשתיות 2020.

3. **תכנית רב-שנתית מתוקצבת למו"פ וחדשנות במשק האנרגיה, ובפרט במשק החשמל:** מדינת ישראל מובילה עולמית במו"פ וטכנולוגיות, ויכולותיה בתחום זה הן מהמתקדמות בעולם.[153] ההשקעות שבוצעו בטכנולוגיות במשק האנרגיה הניבו השקעות רבות נוספות ואף הובילו לפריצות דרך טכנולוגיות בעלות ערך עולמי.[154] פיתוח טכנולוגיות אנרגיה מתקדמות בישראל יאפשר התקדמות מהירה להשגת יעדי האקלים ובו בזמן יפתח בפני הכלכלה הישראלית שוק גלובלי צומח הצמא לחדשנות. מו"פ וחדשנות בתחום האנרגיה דורשים השקעות גבוהות לפרקי זמן ארוכים יותר מתחומים אחרים, ולכן קיים כשל שוק המחייב התערבות מצד המדינה והשקעות ממשלתיות. יחד עם זאת, תקציבי המו"פ לאנרגיה בישראל נמוכים משמעותית מהמקובל בעולם. משכך, ועל מנת לאפשר את העמידה ביעדים בישראל, יש להגדיל את ההשקעות במו"פ בתחום האנרגיה, ובפרט במשק החשמל, ולהפוך את ישראל למובילה עולמית בקידום חדשנות בתחום האנרגיה והאקלים. פריצות דרך בתחום זה יסייעו לישראל להשיג את יעד האיפוס, ויוכלו להשיג אפקט גלובלי רחב יותר אשר ימקם את ישראל כמובילה עולמית בתחום.

לשם כך יש לתמוך בהשקעות באמצעות הצעדים הבאים:

א. גיבוש ותקצוב **תכנית לאומית ארוכת טווח** להשקעות ממשלתיות, המבטאת את תחומי העניין על פי מדרג חשיבות לאומי, אשר תיתן ודאות למשקיעים הפרטיים ותאפשר השקעת משאבים נוספים בהתייחס למדיניות הממשלה ובראייה לטווח ארוך.

ב. **מתוך התכנית הלאומית יש לגזור תכנית חומש ייעודית הניתנת למימוש באופן מידי לקידום** טכנולוגיות מובילות שיסייעו להפחתת פליטות בקנה מידה בינלאומי.

ג. **הגדלת תקציב המו"פ והחדשנות באנרגיה** בישראל עד ל-0.04% מהתמ"ג לפחות, בדומה לממוצע המקובל במדינות ה-OECD.[155]

ד. **הקמת מכוני מחקר לאומיים** – מעבדות על-פי המודל האמריקאי בהן המדינה מכוונת מדע בסיסי ויישומי בפרויקטים ארוכי טווח בתחומים הנדרשים להשגת יעדיה, מכשירה את כוח האדם המדעי בהתאם לצרכי העתיד ומקימה תשתיות המאפשרות פיתוח, בדיקה והוכחה של הטכנולוגיות.

ביכולותיה של ישראל לייצר פתרונות חדשניים המותאמים למאפייניה הייחודיים, שיסייעו לה ולמדינות נוספות לעמוד ביעדי האיפוס ולהפחית משמעותית את הפליטות. לפתרונות חדשניים אלו למשק אנרגיה מאופס פליטות צפוי ביקוש עולמי הולך וגדל. השקעה משמעותית בתחום זה בישראל, הן בתשומות תקציביות והן בגיבוש ומימוש אסטרטגיה ארוכת טווח, תאפשר להרחיב את האקו-סיסטם הקיים ולהפוך את ישראל למובילה עולמית לצד פיתוח תעשיית האנרגיה העתידית כך שתהווה קטר משמעותי לכלכלת ישראל.

4. **השקעות נרחבות ברשת ובתשתיות חשמל:** כבר היום רשת החשמל בישראל עמוסה עד לגבול היכולת. בשל מאפייניה הייחודיים של מדינת ישראל, הגידול בביקוש לחשמל בישראל ממשיך לעלות בהתמדה במקביל לצמיחה מהירה ביכולת הייצור הסולארית בפריפריה. מגמות אלו מובילות לעומסים הולכים וגדלים על תשתיות ההולכה בישראל, עומסים שימשיכו לגדול בקצב מואץ עם הגדלת אחוזי האנרגיה הסולארית במשק וחישמול מקביל של התחבורה והתעשייה. לכן, יש להשקיע ולהיערך כבר היום להמשך הגידול בביקושים, בין היתר בדרכים הבאות:

א. התייחסות למוקדי ייצור סולאריים משמעותיים עתידיים, ובפרט מתחמים אגרו-וולטאיים. זאת, במקביל להתייחסות למוקדים עתירי צריכה עתידיים, ובפרט לאזורי תעשייה בהם התעשייה

[153] מתוך דו"ח רשות החדשנות לשנת 2022

[154] ראו למשל כתבה בנושא פיתוחים טכנולוגיים ישראליים, ואת נתוני משרד המדע על תגליות ופיתוחים ישראליים שהשפיעו על העולם.

[155] עיבוד לנתוני ה-IEA בדו"ח: Energy Technology RD&D Budgets Data Explorer

תחושמל. תכנון הרשת בהתאם ומבעוד מועד תשפר את יכולת הרשת לקבל את ההספק שייוצר ולהוליכו למוקדי הביקוש.

ב. בחינת ישימות הולכת חשמל מאזורי ייצור מרוחקים לאזורי הביקוש באמצעות כבלי זרם ישר (DC).

ג. שמירת רצועות תכנוניות לתשתיות הולכת אנרגיה, ותשתיות חשמל בפרט.



5. ניהול מתקדם של רשת החשמל: באמור, פיתוח הרשת הוא קריטי לפיתוח משק החשמל העתידי, וחשיבות הרשת תעלה ככל שכמות המקורות המתחדשים והמבוזרים במשק תגדל. הליכי תכנון והקמה של רכיבי רשת אורכים שנים רבות ולעיתים מעכבים חיבור והפעלה של מתקני ייצור חדשים. בכדי לאפשר הולכה של כמויות אנרגיה גדולות, סירוגיות, ורב-כיווניות באמצעות הרשת הקיימת, יש להשתמש בכלים מתקדמים לניצול הרשת:

א. שימוש באגירה ליד מתקני הייצור הסולאריים כך שניתן יהיה לשחרר את האנרגיה גם בערב ובלילה, בשים לב לשינויים הצפויים במשק, ביניהם כניסה מאסיבית של רכבים חשמליים.

ב. ניהול חכם יותר של רשת החשמל, ובכלל זאת בקרה בזמן אמת על העומסים ברשת (DLR – Dynamic Line Rating) עם העמסה מקסימלית של הספק סולארי ואפשרות השלה מהירה בעת תקלה, כמו גם התאוששות מהירה, אוטומטית או בבקרה מרחוק, מתקלות.

ג. ניהול ובקרה של רכיבי רשת חכמים, כגון ממירים חכמים למערכות סולאריות ואגירה, המסוגלים להזרים הספק ריאקטיבי בעת הצורך ולסייע בבקרת התדר, או מערכות השלת עומסים אוטומטיות המסוגלות לתמוך בניהול התדר במערכת.

ד. ניטור רציף של רכיבי ההולכה וההשנאה ברשת להעברת הספקים מקסימליים בכל עת ממערכות הייצור.



6. תכנון אינטגרטיבי למשק האנרגיה: הניתוח שנעשה בעבודה זו מציג את מורכבות הקשרים בין המגזרים השונים של משק האנרגיה ואת מרכזיותן של השפעות הגומלין ההדדיות ביניהם. מכאן, שיש לתכנן את כלל משק האנרגיה באופן המשלב התייחסות למערך ייצור החשמל, ההולכה והחלוקה, כמו גם לתהליכי ההתייעלות באנרגיה במשק.

בנוסף, הפחתת פליטות במשקים אחרים עלולה להשפיע על משק האנרגיה. כך למשל, למעבר משק התחבורה מדלקים לחשמל, ישנן משמעויות רבות על משק האנרגיה והחשמל. חשמול הרכבים הפרטיים דורש התייחסות לניהול הביקושים ויש לו משמעויות רבות לפיתוח וניהול הרשת. בנוסף, חשמול רשת התחבורה הציבורית, שתכלול מערכת מטרו ורכבות קלות הצורכות חשמל בהספקים גבוהים ולאורך רוב שעות היממה, דורש אף הוא התייחסות ומענה בהיבטי רשת, ייצור חשמל, אגירה וכדומה. בדומה לסקטור התחבורה, גם סקטור התעשייה דורש מענים ותכנון מוקדם, מאחר שגם הוא יעבור בעשורים הקרובים מדלקים פוסיליים לחלופות נקיות יותר.

תכנון אינטגרטיבי יכלול בין היתר, את הרכיבים הבאים:

א. שקלול הביקושים העתידיים של המשקים השונים, הן בשלבי התכנון של הרשת והן בתכנון מערך הייצור.

ב. שקלול תהליכי ההתייעלות באנרגיה במשק בתהליכי התכנון של הרשת ושל מערך הייצור (IRP – Integrated Resource Planning).

ג. טכנולוגיות מופחתות פליטות ברכב חשמלי, מערכות סולאריות, סוללות ועוד, דורשות מינרלים נדירים. קיימת סכנה למחסור עולמי במינרלים אלו. יש לבחון אמצעי מדיניות להתמודדות עם אתגר זה ולוודא שישראל לא תעמוד בפני מחסור במינרלים אלו.

ד. שמירת רצועות תכנוניות לתשתיות.



7. גמישות וודאות רגולטוריות: כלל תרחישי איפוס הפליטות כוללים שילוב טכנולוגיות חדשות שונות, בין אם תפיסת פחמן, הפקה ושימוש במימן, אנרגיה גרעינית, ועוד. על מנת לייצר ודאות למשק, ולאפשר את ההשקעות וההיערכות של השוק הפרטי באופן מיטבי, יש להכין את המשק לאפשרות לאימוץ טכנולוגיות חדשות במהירות וללא ביורוקרטיה מכבידה. זאת, בין היתר באמצעים הבאים:

א. פיתוח רגולציה מאפשרת להקלה על שילוב של טכנולוגיות חדשות. רגולציה מכוונת יעדים ולא טכנולוגיות, תאפשר כניסה של טכנולוגיות חדשות ללא צורך בכתיבת רגולציה ייעודית ואישורים פרטניים.

ב. פיתוח "ארגזי חול" רגולטוריים שיתמכו במחקר ופיתוח בכיוונים טכנולוגיים חדשניים ובקידום פיילוטים לבחינת הטכנולוגיות בתנאים הייחודיים למדינת ישראל. "ארגז חול" רגולטורי יאפשר לבחון חידושים מסוג זה תחת רגולציה "אד-הוק" ולשפר אותה תוך כדי בחינה להשגת רגולציה בוגרת ומתאימה בסוף התהליך.



8. שכלול צד הביקוש: עם העלייה בדיגיטציה של רכיבי הרשת, והתרחבות אפשרויות הבקרה והשליטה מרחוק על צרכנים, מתאפשרות דרכים חדשות לשלוט מרחוק בצרכני האנרגיה באופן שתואם את צרכי הרשת. כך, ניתן יהיה להשבית צרכנים לא חיוניים בשעות עומס או לאותת לרכבים חשמליים המחוברים לעמדות טעינה להחזיר זמנית אנרגיה לרשת ולחלופין להגדיל את הצריכה שלהם בשעות של עודף ייצור. אמצעים אלו לניהול צד הביקוש זולים יותר מתוספת אמצעי ייצור או אגירה, ומשפרים את הניצולת של רכיבי הרשת. לבן, ובפרט במשק עתידי המורכב מאחוזים גבוהים של אנרגיות מתחדשות סירוגיות, יש לנקוט באמצעים הבאים:

א. יש לשכלל את הבקרה על צד הביקוש, גם בניהול מקומי, באופן שיאפשר מתן תגובות מהירות ומגוונות לתנודות בצד הייצור.

ב. יש לפתח כלים טכנולוגיים ורגולציה שיאפשרו פעילות של חברות המנהלות את ביקושי האנרגיה בקרב מאות ואלפי לקוחות בהתאם לצרכי מנהל המערכת (אגרגטורים).

ג. בנוסף לטכנולוגיות חדשות, ניתן ואף רצוי לייצר מבנה תעריפי חדשני אשר ישקף את העלויות הרגעיות ויתמרץ צריכה חכמה שתאפשר את הפחתת הביקושים בשעות השיא ובכך יצמצם את הצורך בהשקעה בתשתיות ואף יוכל להביא להפחתה בפליטות.

ד. יש לפתח מנגנון לתיאום בין מנהל רשת ההולכה הארצית בחברת נגה למנהלי רשתות החלוקה האזוריות בחברת החשמל (TSO-DSO Coordination).



9. קידום אנרגיות מתחדשות בשילוב אגירה: בכל תרחיש אפשרי יהיה שימוש מאסיבי באנרגיות מתחדשות, ובעיקר באנרגיה סולארית. משכך, על מדינת ישראל לשאוף להיות מובילה עולמית בהקמת אנרגיה סולארית בכלל, ובדו-שימוש בפרט.

א. יש להמשיך ולהשקיע בכל מתווה שיאפשר הגדלת ההספק הסולארי ולתוספת הספק ממקורות מתחדשים שונים בשילוב אגירה, ובפרט בדו-שימוש. עידוד זה יכול להיעשות הן באמצעות התעריף

ושימוש בתמריצים כלכליים אחרים, והן באמצעות הפחתת נטל רגולטורי, כדוגמת צעדי המדיניות המפורטים במפת הדרכים לשנת 2030.[156] הגברת הייצור בדו-שימוש מאנרגיה מתחדשת, בתוספת אגירה (במתקנים חדשים וקיימים), תגדיל את ההספקים המתחדשים ללא צורך משמעותי בתוספות של הרשת ותקרב את מקורות הייצור לצריכה.

ב. יש לבחון הקמת תשתיות חשמל ואנרגיה מתחדשת בים. שטחי הים יכולים לאפשר הקמה של מערכות סולאריות וטורבינות רוח צפות, כמו גם מערכות לניצול אנרגיית גלים, גאות וזרמי ים. בימים אלה נעשית עבודה כוללת על פוטנציאל המרחב הימי של ישראל בהיבטי אנרגיה בכלל ואנרגיה מתחדשת בפרט. יש לאמץ את המלצות הבחינה וליישמן בהתאם על מנת למקסם את הפוטנציאל.



10. חשמול התחבורה הפרטית, הציבורית והמסחרית: תחבורה חשמלית היא היעילה ביותר בשימוש באנרגיה ומהווה מרכיב משמעותי בהפחתת הפליטות במשק. התועלות מחשמול התחבורה רלוונטיות במיוחד לישראל, בה טווחי הנסיעה קצרים יחסית, והרגלי הנסיעה תואמים את יתרונות הרכב החשמלי. למרות שחלק מהתחבורה היבשתית, ובפרט משאיות כבדות, לא יוכל לעבור להנעה חשמלית, יש לפעול לחשמול התחבורה ככל הניתן.

א. יש לתמרץ את הרחבת פריסת תשתיות הטעינה הציבוריות בהיקף הנדרש בהתאם לתכנית האסטרטגית של משרד האנרגיה והתשתיות, כך שעד לשנת 2030 העמדות שייפרשו יהיו בהיקף של לפחות 1 GW, ועד לשנת 2050 בהספק של לפחות 2 GW.

ב. יש לפעול לקידום ניהול חכם של טעינת רכבים חשמליים באמצעות תמריצים ורגולציה. ניהול טעינה יביא לחיסכון ניכר בתשתיות חשמל ולהפחתת עלויות.

ג. יש להסדיר את הקמת תשתיות הטעינה הפרטית בבתים משותפים באמצעות חקיקה ותמריצים.

ד. יש לפעול לקידום רגולציה, בדומה לאירופה וארה"ב, המחייבת יבואנים ליעדים ממוצעים של ביצועי רכב במונחי פליטות גזי חממה לק"מ (אימוץ רגולציה מקבילה לדירקטיבה האירופית 631/2019, או תקנות ה CAFE).

ה. יש להשלים את מהפכת חשמול התחבורה הציבורית בישראל עוד לפני שנת 2030, ולפעול להקמה של תשתית טעינה למשאיות ורכבים כבדים, שתביא לעמידה ביעדי הממשלה.



11. קביעת מדיניות להפעלת המשק לאורך זמן במהלך פגיעה ביכולת אספקת האנרגיה (גז טבעי, דלקים, חשמל): כחלק מהיערכות משק האנרגיה לשעת חירום, יש לקבוע מדיניות כוללת להתמודדות עם פגיעה ארוכת טווח באחת או יותר מתשתיות האנרגיה המשמעותיות למשק, בין היתר:

א. יש לייצר רשימת אמצעים מדורגת להפחתת ביקושים לאנרגיה בשעת חירום, לפי קדימויות לכלל המשקים, ולקבוע מדרג לאספקת אנרגיה לפי סדר עדיפויות לאומי.

ב. יש לפתח כלים לניהול ביקושים לשעת חירום מתמשכת, ולפתח אמצעים נקיים להתמודדות עם האיומים השונים בשעת חירום. למשל, יכולת ייצור עצמאית של חשמל נקי ואספקתו לאורך זמן, בין היתר באמצעות מערכות סולאריות ואגירה, לצד ניהול הרשת באופן מקומי.

ג. יש לבצע התאמה של הרגולציה והחקיקה כך שתתאפשר אספקת אנרגיה נקיה וניהולה בשעת חירום. זאת, בהתאם לחומרת מצב החירום, לצד משמעויות כלכליות והשלכות נוספות.

[156] *מפת הדרכים לאנרגיות מתחדשות בשנת 2030*, משרד האנרגיה והתשתיות 2022.

12. חיבוריות אזורית ובינלאומית של אנרגיה: עם ההתקדמות הגלובלית למעבר לאנרגיות נקיות, עולה החשיבות של בניית חיבורים אנרגטיים ושיתופי פעולה אזוריים. הקמת חיבורים אנרגטיים עם מדינות המזרח התיכון ואירופה תוכל לסייע בפיתוח וחיזוק הקשרים המדיניים והכלכליים בין מדינות אלו לבין ישראל. מגמה זו, בשילוב מיקומה הייחודי של ישראל, פותחת חלון הזדמנויות לישראל לקידום חיבוריות אזורית ובינלאומית אשר תסייע מהותית גם בהבטחת תשתיות ומקורות לייבוא אנרגיה. היות ובכל תרחיש עתידי נזדקק לייבוא של אנרגיה לישראל, יש לקדם הסכמים ושותפויות בינלאומיות ביחס להגדלת מקורות האנרגיה. עקב הזמן הרב הנדרש להבשלת הסכמים בינלאומיים, יש להתחיל לפעול בערוצים אלו כבר כעת:

א. יש לקדם תכנית אסטרטגית לחיבוריות אזורית וייבוא אשר תבחן בין היתר פרויקטים להפקת אנרגיות מתחדשות במדינות שכנות בדומה לפרויקטי 'פרוספריטי' המשותפים עם ירדן ואיחוד האמירויות.

ב. על התכנית לבחון גם הקמה של מסגרות לשיתוף פעולה המשלבות בין גופים שונים כגון: גופים אזרחיים, גורמי אקדמיה, גורמי תעשייה ועסקים במדינות האזור זאת בתמיכה של משרדי ממשלה וגורמי ממשל אחרים במדינות האזור השותפות.

ג. מומלץ לקדם פרויקטים קיימים של חיבוריות, בין היתר חיבור הרשת הישראלית לאירופה (כדוגמת כבל EuroAsia Interconnector וצינור הגז EastMed).

ד. יש לבחון את מקומה ותפקידה של ישראל בשוק הגלובלי העתידי שצפוי להתפתח ביחס להובלת מימן ודלקים נקיים אחרים כאמוניה, מתנול ודלקים ממקורות מתחדשים לתעופה וספנות.

ה. יש לבחון את ההשלכות של ייבוא מימן, דלקים סינתטיים ודלקים ביולוגיים לישראל, כגון מתקני קבלה בנמלים ותשתיות הובלה לצרכנים.

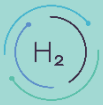
10.2 צעדי מדיניות נושאיים

בנוסף למסקנות הרוחביות, להלן פירוט של צעדי המדיניות המומלצים לביצוע כבר כיום להכנת המשק לאימוץ טכנולוגיות העתיד וכן לצורך קבלת החלטות לקראת העשור הבא:

טבלה 9: צעדים מומלצים להכנת המשק לקראת טכנולוגיית העתיד

פוטו-וולטאים	על מדינת ישראל להיות מובילה עולמית בהקמת אנרגיה מתחדשת, באנרגיה סולארית בכלל ובדו-שימוש בפרט. לצורך כך יש לפעול במספר מישורים: • **אגרו-וולטאי:** יש להאיץ את פרויקטי החלוץ של משרד האנרגיה והתשתיות ומשרד החקלאות במערכות אגרו-וולטאיות, לפתח את הרגולציה שתאפשר יישום נרחב של מערכות סולאריות על שטחי חקלאות, ולתמרץ הקמה של מערכות כאלו. יישום מסחרי של מערכות אגרו-וולטאיות יפתח פוטנציאל עצום של שטח לטובת ייצור חשמל נקי ויקדם חדשנות ישראלית בתחום. • **גגות מבנים:** האצת הקמת מערכות סולאריות על גגות חדשים ואף קיימים, בדגש על הסרת חסמים לקידום אנרגיה סולארית על גגות משותפים. העמדת המערכות הסולאריות בעת הקמת הבניין מורידה משמעותית את העלויות ותאפשר השגת כיסוי סולארי משמעותי בשכונות העתיד. • **שיפורים טכנולוגיים:** הטכנולוגיות השונות לקולטים סולאריים, כגון קולטים על קירות מבנים (BIPV), יריעות גמישות, קולטים שקופים על גבי חלונות, ועוד, מתפתחות במהירות. יש לבחון אילו צעדים נדרש לנקוט על מנת שניתן יהיה לשלב טכנולוגיות אלו לכשיבשילו לשם הגדלת הייצור הסולארי, בעיקר במרכזי הערים. • **אנרגיית חום:** בייחוד במפעלי תעשייה הדורשים משאבי חום ניכרים, יש לבחון תמרוץ הקמת מתקנים סולאריים-תרמיים להפקת חום מהשמש, שבצירוף מתקני אגירת חום וניצול חום שיורי, יאפשרו להפחית שימוש בחשמל ודלקים לחימום. • פרסום הנחיות לכתיבת **נספח אנרגיה** בכל תכנית בינוי סטטוטורית שיבטיח ייצור מקסימלי של אנרגיה מתחדשת במתחם המתוכנן. • מיפוי, זיהוי וקידום **שטחים עתידיים נוספים** להקמת מתקנים סולאריים גדולים. • בחינה וקידום הקמת **אנרגיות מתחדשות במרחב הימי.** • בחינת **חיוב הקמת מתקני אגירת חשמל** בכל המתקנים לייצור אנרגיה מתחדשת הגדולים מ-50 מ"ו, חדשים ואף קיימים. • מיקוד מאמצים **בהאצת הקמת רשת החשמל** בהולכה ובחלוקה, והתאמתה לניהול דינאמי ומתקדם שיאפשר שילוב מקסימלי של מקורות מתחדשים. • להמשיך ולתמוך במאמצי **מו"פ** בתחומי האנרגיה הסולארית, האגירה והניהול. פיתוח טכנולוגיות ישראליות יאפשר התאמה לאתגרים הייחודיים לישראל תוך יצירת מנוע כלכלי לצמיחה. • בחינת ביטול או הפחתת אגרות והיטלים בפרויקטים סולאריים ואגירה, כולל הרחבת תנאי הפטור מתוכנית והיתרי בניה. • בחינת תמריצים להקמת מתקנים לייצור אנרגיה מתחדשת ואגירה באזורי ביקוש או תיעדוף לאומי. **נקודת החלטה:** יש לקבל עד לשנת 2035 החלטה האם פונים לביסוס משק האנרגיה על אנרגיה סולארית ואגירה בהתאם לתרחיש הצהוב, וזאת תוך שיקול העלויות של המערכות הסולאריות והאגירה, נצילות המערכות, יכולת השילוב ברשת, בגרות טכנולוגיות האגירה לטווח ארוך ובהתייחס לאתגר השטח וההתקדמות בטכנולוגיות האחרות.

מימן



המימן מסתמן כדלק בעל חשיבות להשגת יעדי האקלים בעולם. בישראל קיימת יכולת טכנולוגית לפיתוח בתחומי הייצור, האחסון, ההובלה והשימוש במימן. יש לפתח את יכולות המו"פ בתחום בישראל תוך בחינה של הצרכים העתידיים במשק האנרגיה.

- לקדם **מרכז מימן מקומי** ("Hydrogen Valley") בו ניתן יהיה ליישם במתחם מצומצם ייצור, אגירה ושימוש תעשייתי במימן וזאת אף לפני הקמתן של תשתיות מימן ארציות.
- לבחון הקמה של **מרכז ניסוי והדגמה לאומי** לטכנולוגיות מימן בו יוכלו חוקרים וחברות הזנק לבחון טכנולוגיות חדישות.
- להמשיך ולהשקיע **במו"פ** בתחום המימן ולגבש תכנית ייעודית לתמיכה מוגברת במו"פ מימן.
- לבחון את ההתאמות הנדרשות **להסבת רשתות ההולכה והחלוקה** של הגז הטבעי למימן תוך מיפוי המשמעויות הנגזרות.
- **להשלים את הליכי התקינה** הנדרשת וגיבוש רגולציה מצומצמת, גמישה ומאפשרת (בשלב הראשון בענייני בטיחות בלבד) להקמת פיילוטים לשימוש במימן בתחומי התעשייה, התחבורה והחשמל, ובטווח הרחוק הגדרת המימן כמקור אנרגיה והתייחסות מסודרת לגז זה בחוק חומרים מסוכנים.
- לבחון **עדכון הרגולציה** כך שכל מתקן חדש המשתמש בגז טבעי (בין אם לייצור חשמל, תעשייה או חימום), יהיה מסוגל בעתיד, לאחר שדרוג, להשתמש ב-100% מימן נקי.

נקודת החלטה: יש לקבל עד לשנת 2030 החלטה ביחס לשימוש בקנה מידה ארצי במימן לתובלה הכבדה ולייצור חשמל, תוך בחינת ההתקדמויות בשווקים העולמיים, הנצילויות לאורך שרשרת הערך של המימן, כמויות הגז הטבעי במאגרים הישראליים, יכולת הטמנת הפד"ח והמשמעויות של הקמת רשת הולכה ארצית או הסבת רשת הגז הטבעי למימן. החלטה זו תשפיע על הקמת תשתיות והרחבת רגולציה, ככל שאכן יהיה צורך בכך.

לכידת פחמן וטמנה



תפיסה והטמנה של פד"ח תידרש ככל שמשק האנרגיה העתידי בישראל יתבסס על גז טבעי או מימן כחול. יש להתחיל כבר כיום בהבנת המשמעויות הטכניות, הגיאולוגיות והכלכליות של התפיסה וההטמנה בכדי לאפשר קבלת החלטות מושכלת לעתיד משק האנרגיה.

- יש להשלים את **סקר אפיון תת הקרקע** בישראל לאיתור אתרים המתאימים להטמנת פד"ח, הערכת הכמויות שניתן להטמין וקצב ההטמנה. יש לבחון את הפתרונות שימצאו ולהעריך את ההיתכנות הכלכלית וההנדסית ביחס לכמויות המימן והפחמן הנדרשות להטמנה.
- יש **להשקיע במו"פ** בתחום תפיסת הפד"ח ולגבש תכנית ייעודית לתמיכה מוגברת במו"פ זה. פיתוח הטכנולוגיה נדרש הן לשיפור הישימות והן להפחתת העלויות.
- יש לקדם **פרויקטי חלוץ להטמנת פד"ח** לאימות ותיקוף ממצאי הסקר בטכנולוגיות השונות, ולבחינת ההשפעות הסביבתיות.
- יש לקדם ולפתח את **התשתיות הרגולטוריות** הנדרשות, לפחות באופן המינימלי שיאפשר הקמה של מתקני פיילוט ("רגולציה מאפשרת"). לאחר הפקת הלקחים משלבי הפיילוט תורחב הרגולציה לכלל מדיניות תכנונית שלמה.
- יש לבחון את **התאמת מאגרי הגז הטבעי** להטמנת פד"ח לכשיאזלו.
- יש להתאים את הרגולציה על **עתיד מאגרי הגז הטבעי לכשיאזלו** להמשך הפעלתם בעתיד להטמנת פחמן או מימן.
- יש לבחון **עדכון הרגולציה** כך שכל מתקן חדש המשתמש בגז טבעי (בין אם לייצור חשמל, תעשייה או חימום), יהיה מסוגל בעתיד, לאחר שדרוג, לתפוס את פליטות הפחמן באחוז גבוה.

נקודת החלטה: יש לקבל עד לשנת 2030 החלטה בדבר השימוש בתפיסת פחמן בתעשייה ובייצור החשמל, הכוללת הקמת תשתיות ארציות להובלת והטמנת פחמן, תוך התייחסות לעלויות התהליך, יעילותו, פוטנציאל ההטמנה בישראל, והתקדמות טכנולוגיות האנרגיה הסולארית, הגרעין, והייבוא.

מחקר	אנרגית הגרעין מאפשרת להפיק כמויות אנרגיה גדולות באופן רציף, ללא פליטות גזי חממה ובשטח מצומצם. יש לבחון את האפשרות להקמת תג"ר בישראל כחלק מהמאמץ להפחתת הפליטות. • קידום הפקת אנרגיה מגרעין בישראל מחייב **מענה למגוון סוגיות טכנולוגיות, רגולטוריות ומדיניות**. • בנוסף, יש לבצע **עבודת מטה בין-משרדית שתהווה קדם בחינת-היתכנות** להקמת תג"ר בישראל. • במסגרת עבודה זו יוגדרו **שיקולים ותבחינים לבחירת טכנולוגיות מתאימות, איתור אתרי הקמה אפשריים** ובדומה. בנוסף, יבוצע ניתוח טכנו-כלכלי מקיף של תג"ר בטכנולוגיות המסתמנות כישימות טכנית בישראל, כולל רכיבים תומכים כגון הטיפול בפסולת, עלויות מיגון, ועוד. • לחזק את **היכולות האקדמיות** בישראל בתחום אנרגית הגרעין כבסיס להכשרת כוח האדם המקצועי להקמה ותפעול תג"ר בעתיד. • לחזק את תחום מחקר הגרעיני בישראל, בין היתר באמצעות **חיזוק הקשרים הבינלאומיים** עם גופים המחקר והפיתוח בעולם, פיתוח **אקו-סיסטם תעשייתי** והמשך התמיכה במכון הלאומי להיתוך גרעיני. **נקודת החלטה:** תהליכי הבחינה, התכנון והדיון הציבורי בנושא הגרעין יארכו זמן רב, לכן יש לקבל כבר כיום החלטה בדבר **בחינת האפשרות** להקמת תג"ר בישראל, וכפועל יוצא מכך להתחיל בדיון הציבורי בנושא ולהקים את צוותי העבודה שיחלו בביצוע קדם בחינת-ההיתכנות.
פיתוח טכנולוגיות פליטה נמוכה	היות וחלקים מענפי התחבורה והתעשייה לא יוכלו לעבור הסבה לחשמל או למימן עד לשנת 2050, יהיה צורך בשימוש בדלקים נקיים – סינתטיים וביולוגיים – כתחליף לדלקים הפוסיליים. יש להכין את הקרקע לייצור ושימוש בדלקים אלו בישראל. • השלמת התאמת **התקנים לדלקים סינתטיים וביולוגיים** לישראל . • לבחון את האפשרות **לייצור דלקים סינתטיים וביולוגיים בארץ** אל מול ייבוא. יש לבחון סוגיות כגון ביטחון באנרגיה, זמינות חומרי הגלם, אפשרות לשימוש בפסולת, צריכת אנרגיה, זיהום סביבתי, זמינות קרקע, השפעות כלכליות ומשאבים נדרשים אחרים. • **לעקוב** אחר המגמות העולמיות בשימוש בדלקים סינתטיים וביולוגיים (בתחומי התחבורה הכבדה, התעופה והספנות) כמו גם כוונות לחיוב השימוש בדלקים אלו, ולהסיק את המסקנות המתאימות ביחס לישראל. • למתן וודאות רגולטורית לעוסקים בתחום, יש **לקבוע בהקדם מדיניות ולבחון קביעת יעדים עוקבים ליעדים האירופים,** בנוגע לשילוב דלקים נקיים במשק הישראלי, ובפרט בתחום דלקי התעופה בני-הקיימא (SAF) ודלקים נקיים לעולם הספנות. המדיניות תתייחס לאפשרות לייצור וייבוא של דלקים נקיים לארץ, אחסונם והולכתם, ועד לשימוש הסופי, ובכלל זאת יקבעו אחוזי שימוש הולכים וגדלים של דלקים נקיים בתמהיל הדלקים בישראל. • להמשיך **במו"פ** בתחום, כמו גם בפרויקטי חלוץ להדגמת הייצור והשימוש בדלקים אלו בישראל. **נקודת החלטה:** יש לקבל עד לשנת 2030 החלטה בדבר ייצור מקומי או ייבוא הדלקים והשימוש בהם כתחליף לדלקים פוסיליים, בהתייחס לפיתוחים הטכנולוגיים בתחום, לצמצום העלויות ולדרישה מחו"ל לשימוש בדלקים אלו בעולמות התעופה והספנות. למתן וודאות רגולטורית מומלץ **לבחון** ללוות את ההחלטה בקביעת יעדים להחלפת הדלקים המחצביים בדלקים נקיים בהתייחס למגמות העולמיות.

אנו

כפי שנמצא בניתוח החלופות, יהיה קשה מאד לספק את כל צרכי האנרגיה לישראל ללא פליטות ובייצור מקומי בלבד. מכאן שייבוא מוצרי אנרגיה נקיים יהווה חלק הכרחי בכל תרחיש עתידי למשק – הן חשמל, הן מימן והן דלקים נקיים. לצורך כך יש להתחיל כבר כיום בהכנת המשק לייבוא בעתיד.

- להמשיך בקידום **פרויקטי קישוריות** שכבר החלו כגון כבל הקישור לרשת החשמל האירופית EuroAsia, צינור הגז לאירופה EastMed, ואת השדה הסולארי בירדן (Prosperity Green).
- **לעקוב** אחר פיתוח פרויקטים במדינות האזור ולבחון אפשרויות חיבור נוספות: שדות סולאריים או חוות רוח במדינות שכנות כמו ירדן או מצרים, קישור לרשתות חשמל במדינות שכנות במעגל הראשון והשני, צינורות מימן למדינות שכנות כדוגמת ערב-הסעודית או מצרים ועוד.
- לעקוב אחר התפתחות **שווקי האנרגיה הגלובליים** – דלקים סינתטיים, אמוניה, LOHC (נשאי מימן נוזליים) ואחרים – באופן שיאפשר קבלת החלטות בנוגע להצטרפות לסחר.
- **להעריך את העלויות והסיכונים בייבוא** מוצרי אנרגיה שונים, כולל עלות תשתיות הייבוא, עלות תשתיות הניפוק הארציות, סיכונים בריאותיים וסביבתיים הקשורים בתהליכי הייבוא, וסיכוני ביטחון לאומי שיתעוררו עקב ייבוא שיעור נכבד מצרכי האנרגיה של ישראל.

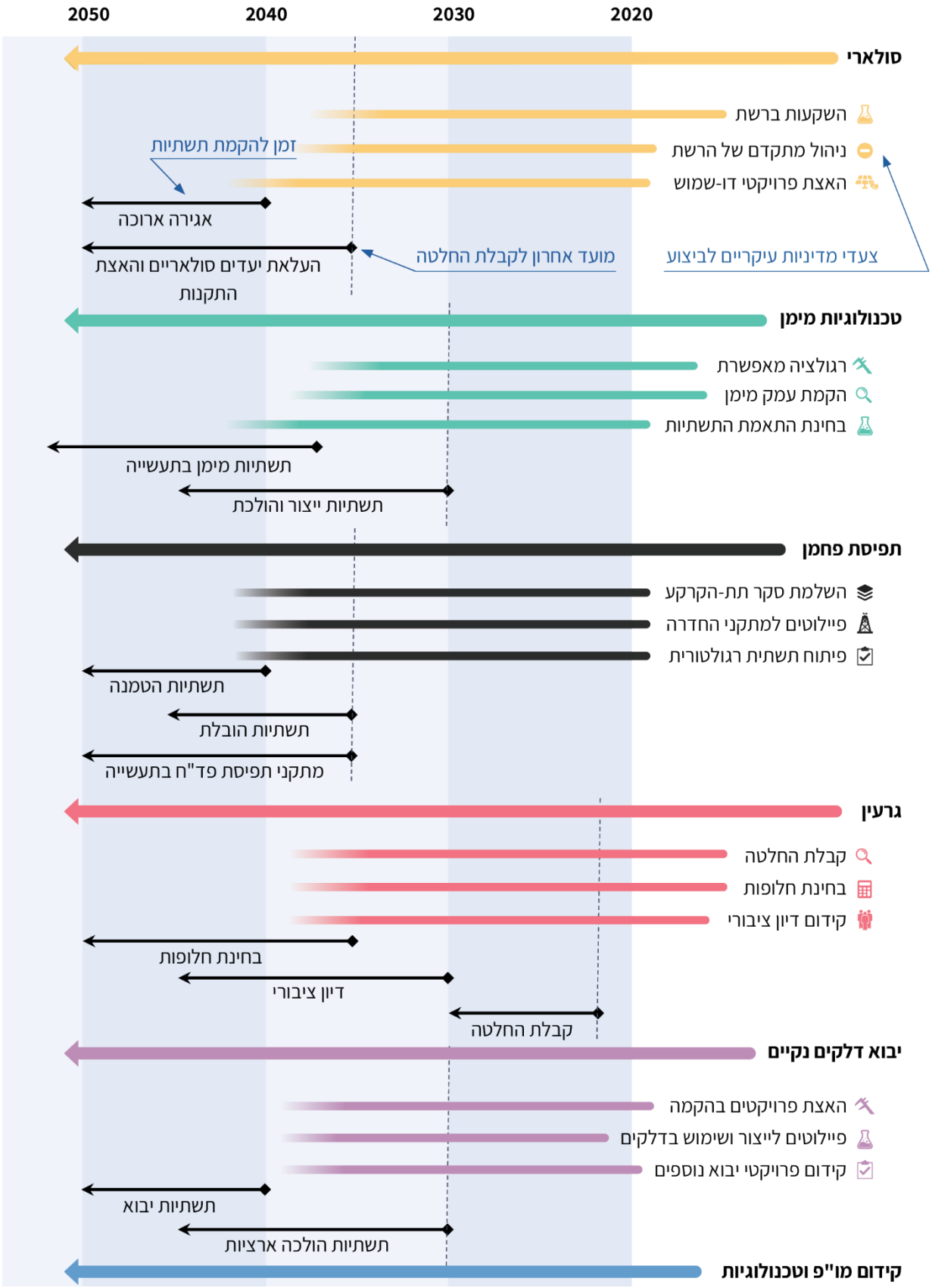
נקודת החלטה: יש לקבל עד לשנת 2030 החלטה בדבר ייבוא מוצרי אנרגיה – האם קיימת כדאיות בייבוא המוצרים השונים, מאין ובאילו כמויות? וזאת בהתייחס לפיתוחים הטכנולוגיים בתחום, לביקושים הצפויים, למגמות העולמיות, לעלויות ולערוצים המדיניים שיתפתחו לייבוא.

10.3. נקודות החלטה להשקעה בתשתיות

בהתאם ללוחות הזמנים הצפויים ליישום והכללה (אינטגרציה) של הטכנולוגיות בתרחישים השונים, ניתן לגזור לאחור את נקודות הזמן האחרונות להחלטות בדבר יישום טכנולוגיות להפחתת הפליטות בשנת 2050. איחור בקבלת החלטה בטכנולוגיה מסוימת אינו פוסל כליל את הטכנולוגיה ועדין ניתן יהיה להאיץ את יישום הטכנולוגיה במקרה של החלטה מאוחרת, או להספיק ליישמה באופן חלקי עד לשנת 2050, ולהמשיך ליישום מלא בשנים שלאחר מכן.

בתרשים להלן מתוארות מימין הפעילויות שיש לבצע **כיום** בהכנה לקבלת החלטות מושכלת בעוד כעשור, לדוגמא איסוף מידע, השקעה במו"פ או הטמעת תיקוני רגולציה; ומשמאל, נגזרים לאחור משנת 2050, הצעדים התשתיתיים שיש לבצע, כך שהקצה הימני של החיצים, והקו המקווקו האנכי, מציינים את **נקודת הזמן האחרונה בה ניתן לקבל החלטה** ועדיין להספיק להקים את התשתיות לצורך השגת היעדים עד לשנת 2050.

תרשים 68: אמצעי המדיניות העיקריים שיש ליישם כיום מצד ימין, אל מול נקודות ההחלטה האחרונות להשגת איפוס בשנת 2050, מצד שמאל.

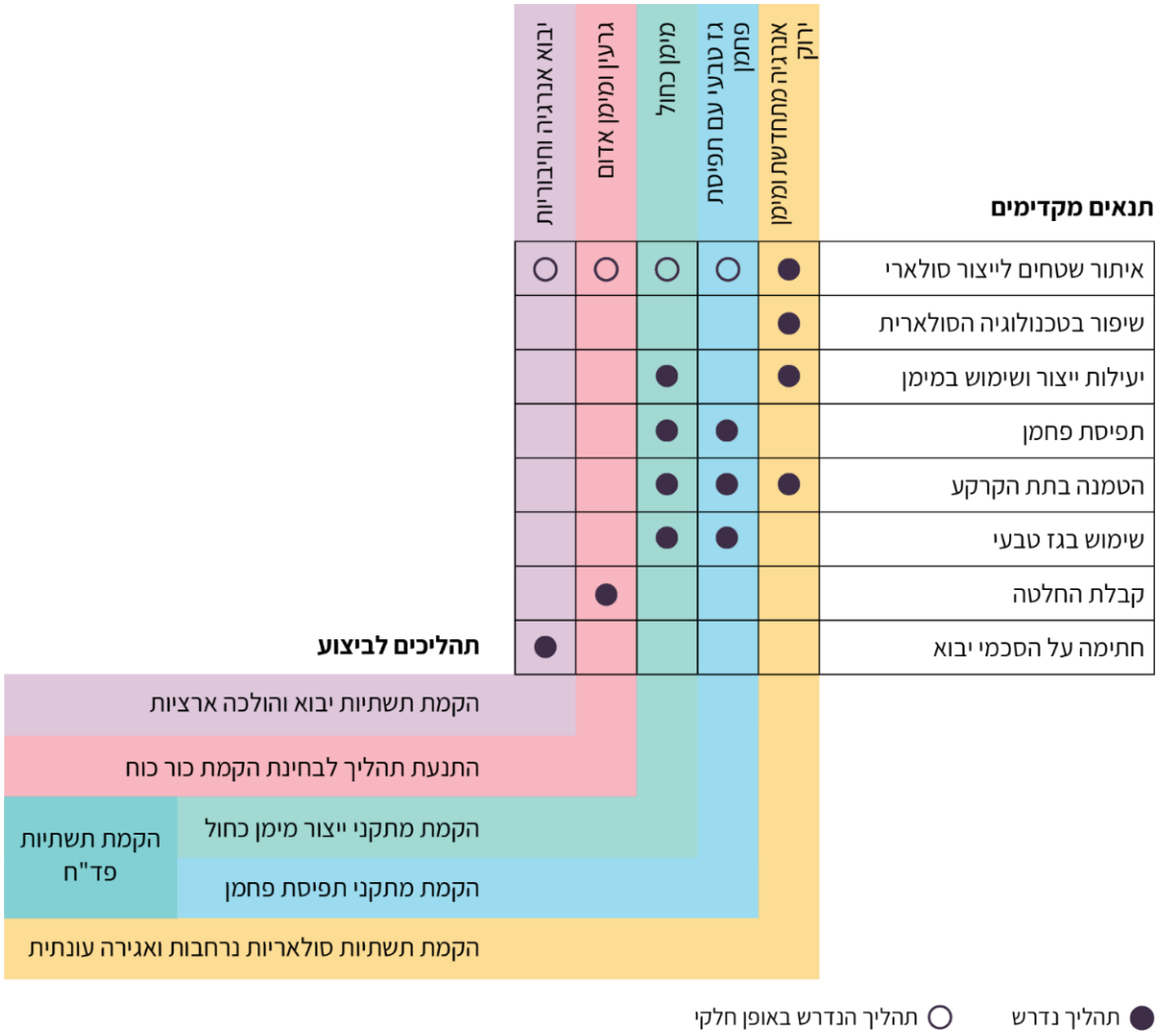


על פי התרשים, השנים 2030-2035 מסתמנות כתקופת הכרעה בהתאם להערכה כי ידרשו כ-15 שנים להטמיע את התשתיות הנדרשות לרוב הטכנולוגיות, ובחלקן ידרשו עוד מספר שנים לתשתיות נוספות. החלטה על התנעת תהליך בחינת הכדאיות להקמת תג"ר יש צורך לקבל כבר היום, עקב תהליכי הבחינה, התכנון וההקמה הארוכים.

בטבלה להלן מתוארים התנאים הנדרשים לקידום טכנולוגיות האיפוס השונות:

טבלה 10: התנאים הנדרשים להתקדמות בטכנולוגיות האיפוס השונות.

תנאים מקדימים	אנרגיה מתחדשת ומימן ירוק	גז טבעי עם תפיסת פחמן	מימן כחול	גרעין ומימן אדום	יבוא אנרגיה וחיבוריות
איתור שטחים לייצור סולארי	●	○	○	○	○
שיפור בטכנולוגיה הסולארית	●				
יעילות ייצור ושימוש במימן	●		●		
תפיסת פחמן		●	●		
הטמנה בתת הקרקע	●	●	●		
שימוש בגז טבעי		●	●		
קבלת החלטה				●	
חתימה על הסכמי יבוא					●



ניתן לראות כי **איתור השטחים לייצור סולארי** קיים בכל התרחישים ויש לקדמו במרץ בכל תרחיש טכנולוגי עתידי. בנוסף לכך, נושא תת הקרקע ואפשרויות ההטמנה בקרקע מסתמן גם הוא בערוץ מרכזי הרלוונטי לשלוש טכנולוגיות הפחתה – הגברת השימוש באנרגיה הסולארית, המשך השימוש בגז טבעי עם תפיסת פחמן, ושימוש במימן כחול. מכך ניתן להסיק כי יש לפעול במרץ להשלמת סקר תת-הקרקע לכימות פוטנציאל ההטמנה וזיהוי האתרים המתאימים, לאחר מכן יש לבצע קידוחי ניסיון לבחינת התהליך וההשפעות הסביבתיות של החדרת פד"ח וגזים נוספים לתת הקרקע. נושא נוסף בעל חשיבות הינו כמות הגז הטבעי שתישאר במאגרים הישראליים עד לשנת 2050 ולאחריה. סוגיה זו תשפיע בעיקר על שני ערוצי השימוש בגז טבעי – גז טבעי עם תפיסת פחמן ומימן כחול.

11. סיכום

במסגרת עבודה זו נבחנה האפשרות להגיע לאיפוס פליטות בישראל עד לשנת 2050. זאת, תוך שמירה על משק אנרגיה אמין, זול, וכמובן נקי. העבודה סקרה את הנעשה בעולם, לצד המגבלות הקיימות והתחשבות במאפייניה הייחודים של ישראל.

כפי שהוצג בהרחבה, ישנן מספר דרכים להגיע אל יעד האיפוס. יחד עם זאת, מדובר ביעד שאפתני וכל תרחיש להשגתו מחייב התגברות על אתגרים רבים, נקיטת פעולות מיידיות, תיאום בין גורמים שונים, ואומץ רגולטורי. כלל התרחישים משלבים מספר טכנולוגיות, שרובן עדין לא בשימוש מסחרי נרחב, ומסתמכות על מקורות מגוונים. באמור, יעד איפוס הפליטות אפשרי ואף יש לו תועלות רבות, אך הוא מאתגר מאד ודורש היערכות והשקעת משאבים – תקציביים ואחרים – כבר כעת.

על מנת לבסס את השגת היעדים ולהבטיח את איפוס הפליטות תוך שמירה על הביטחון האנרגטי של ישראל, נדרשות גם עבודות עומק ושכלול הטכנולוגיות הקיימות המהוות את הכלים המרכזיים להשגת היעד. בין היתר, נדרש לגבש מדיניות וודאות רגולטורית בתחומי העבודה לרבות המימן, הגרעין, תפיסת הפחמן, וגיבוש תכנית אב לקידום מו"פ וחדשנות בתחומי האנרגיה הנקייה, ובפרט בתחומים שפורטו בעבודה.

כפי שצוין בהרחבה, הקפיצות הטכנולוגיות במשק האנרגיה עצומות, וההתפתחויות השונות יכולות להוביל לשינוי משמעותי – הן ביעדים והן בפתרונות ובדרך אליהם. יחד עם זאת, יצירת תשתיות בתחום האנרגיה נמשכת זמן רב. לכן, יש להתחיל כבר היום בצעדים שידרשו בכל מקרה (צעדים ללא חרטה), לצד השקעה נדרשת בתשתיות לשנים הקרובות. כך, יתאפשר בהמשך לשלב טכנולוגיות חדשניות שאינן מוכרות כיום, לצד שמירה על עלויות סבירות ואמינות אספקת האנרגיה.

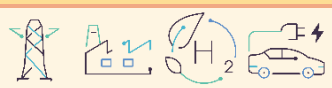
הפיתוחים הטכנולוגים והצעדים ליצירת משק אנרגיה נקי תומכים בצורך לשמור על הביטחון באנרגיה בישראל ולהבטיח משק אנרגיה אמין גם בשעת חירום ובתקופות קיצון. הביזור, גיוון מקורות האספקה ושימוש משמעותי באנרגיה סולארית מאפשרים גיבוי ועצמאות, ובכך משפרים את היכולת להבטיח את אספקת האנרגיה והרציפות התפקודית הנדרשת.

קביעת המדיניות הרצויה חייבת לכלול יעדים וצעדים אופרטיביים למימוש, ולהיבחן מעת לעת, על מנת להבטיח את העמידה ביעדים למשק אנרגיה אמין, זול ומאופס פליטות, תוך מעקב מתמיד אחר ההתפתחויות בתחום, באופן שיאפשר לבחור את הדרך הטובה ביותר להשגת היעדים.

12. נספחים

נספח א': סקירת טכנולוגיות

ייצור אנרגיה סולארית

ליישום במגזרים  **שנת החלטה** 2035



הטכנולוגיה המובילה ביותר להשיג איפוס של פליטות הפחמן בישראל היא אנרגיה ממקורות מתחדשים. בישראל מקור האנרגיה המתחדש היחיד במעט הינו אנרגיה סולארית. לצורך כך מנצלים את קרינת האור או החום של השמש לייצור חשמל ו/או חום. את חום השמש ניתן לנצל בעזרת קולטים כדוגמת דודי השמש לחימום מים או קיטור למבנים ולתעשייה, או כפי שנעשה בשני המתקנים התרמו-סולאריים באשלים, בהם חום השמש משמש להפקת קיטור, ובעזרת טורבינה וגנרטור מיוצר חשמל. את קרינת השמש ממירים באמצעות קולטים פוטו-וולטאיים (PV) באופן ישיר לחשמל. המתקנים התרמו-סולאריים הם יקרים ומורכבים יותר ומסוגלים לנצל רק כ-15% מקרינת השמש לחשמל, אך מסוגלים "להחליק" את תנודתיות קרינת השמש עקב ההתמד של מערכות החום, ומסוגלים לספק אגירה בחום של 8 ואף 10 שעות פעילות לאחר שקיעת החמה. מתקני ה-PV, מאידך, פשוטים וזולים להקמה אך לצורך החלקת תנודתיות התפוקה ולאגירה נדרשת תוספת אמצעי אגירה, כגון סוללות, שהן יקרות.

קיימים אתגרים משמעותיים בדרך לאיפוס כלל הפליטות בישראל ממקור סולארי. ראשית, דרישת השטח – בכדי להשיג בשנת 2050 ייצור של 100% מצרכי האנרגיה של ישראל באמצעות אנרגית שמש ידרשו כמיליון דונם של פאנלים סולאריים (מרביתם בדו-שמוש). שטח זה ניתן להשיג בשדות סולאריים בשטחים פתוחים, או בדו-שימוש מעל גגות, הצללות במגרשי חניה, מגרשי ספורט ובפארקים, קירוי מאגרי מים, מעל לשדות חקלאיים פעילים ("אגרו-וולטאי") ועוד. שטח נוסף בשימוש כפול קיים על דפנות המבנים במערכות PV אינטגרליות – Building Integrated PV (BIPV), מערכות המוטמעות בחיפוי המבנה או בקירות הזכוכית והחלונות. לטכנולוגיה זו חיסרון עקב זווית ההתקנה האנכית שאינה אופטימלית, אך השטח הפוטנציאלי הגדול יכול לחפות על חיסרון זה. ועדין, קשה לראות כיום כיצד ניתן יהיה למצוא אתרים מתאימים ברחבי ישראל להשגת שטח זה ומבלי לפגוע באופן משמעותי בשטחים הפתוחים ובנוף הפתוח והעירוני בארץ. יש לזכור כי מעבר לפגיעה הנופית, למערכות סולאריות קרקעיות, אך גם למערכות בדו-שימוש, יש השפעות סביבתיות רבות שיש לצמצם ככל האפשר.

פתרון אפשרי לסוגיית השטח הוא להקים חלק מהמערכות מחוץ לגבולות ישראל, כדוגמת השדה הסולארי שיוקם בירדן. ראו דיון בנושא בסעיף יבוא אנרגיה נקיה . בנוסף, שילוב מימן ירוק בקנה מידה משמעותי יכול אף הוא לתת מענה למיצוי הייצור הסולארי. יצוין כי שיפורים טכנולוגיים הנמצאים כיום במעבדות צפויים להגדיל את נצילות הפאנלים הסולאריים ב-50% ואף 100%, ובכך תקטן דרישת השטח ב-33-50% בהתאמה.

	האנרגיה הסולארית מגיעה בשעות מסוימות בלבד – בכך מתקבל עודף ייצור בצהריים ולאחר מכן מחסור בערב, בלילה ובשעות הבוקר המוקדמות. בכדי לאזן בין הייצור לביקוש, יש להצמיד למערכות הסולאריות מערכות אגירה שיקלטו את העודפים בצהריים ויספקו את המחסור בלילה. הצורך במערכות אגירה מגדיל את דרישת השטח ואת גובה ההשקעה הנדרשת להקמת המערכות הסולאריות. ההתפתחויות האחרונות בטכנולוגיות הסוללות והאגירה מביאות לשיפורים מתמידים בביצועי המערכות תוך ירידה רצופה בעלויות. כך למשל, המכרז האחרון של רשות החשמל למערכות סולאריות הכוללות אגירה אינטגרלית נסתיים בעלות של 17.45 אג' לקוט"ש, נמוך יותר מעלות ייצור החשמל בגז טבעי.[157] פיתוחים טכנולוגיים נוספים הנמצאים כיום במעבדות ישפרו עוד את יכולת סוללות האגירה ויקטינו את עלותן ואת ההשפעות הסביבתיות של ייצורן. בעיה נוספת הינה יציבות האספקה – ייצור חשמל ממקורות סולאריים משתנה עם חלוף ענן ובהתאם למזג אויר כגון תקופות עננות או אובך. כמו כן המערכות הסולאריות הינן חסרות "אינרציה" חשמלית, ובכך מקשות על ייצוב רשת החשמל. בשנים האחרונות נכנסים לשימוש ממירים מתקדמים שבצרוף סוללות אגירה מסוגלים למתן את תנודתיות האספקה וכן לספק שירותים מערכתיים לרשת החשמל (Ancillary Services) כולל "אינרציה סינתטית" ובכך ניתן לייצב את הרשת גם ללא גנרטורים סובבים. סוגיה נוספת הקשורה בניסיון להשיג שימוש מלא באנרגיה סולארית לכל צרכי האנרגיה במשק הינה הפער בין התפוקה הסולארית לביקוש לאורך השנה. אם נקים מערכות סולאריות בהספק המתאים למלא את כלל הביקוש השנתי לאנרגיה בישראל נמצא כי בעונות המעבר קיים באופן קבוע עודף ייצור על פני הביקוש, ואילו בחודשי החורף קיים מחסור קבוע. בכדי להעביר את עודפי הייצור בין העונות יידרש מאגר אנרגיה בן כ-12 טרהוואט-שעה. זהו היקף אדיר שבטכנולוגיות הנוכחיות קשה לראות פתרונות מספקים ובמחיר סביר. יחד עם זאת, טכנולוגיות חדישות שנמצאות כיום במעבדות מצביעות על כך שבשנים הקרובות יתכן וימצאו פתרונות גם לסוגיה זו. כמו כן ישנה תמורה בין גודל האגירה הנדרשת לייצור סולארי עודף – ככל שניתן להגדיל את שטחי המערכות הסולאריות, יקטן נפח האגירה הנדרש להשגת 100% אספקה של הביקוש. כך, למשל, הגדלת התפוקה הסולארית ב-50% יקטין את היקף האגירה הנדרש לכ-3 טרהואט-שעה. אמנם זו כמות אגירה קטנה משמעותית, אך תדרוש תוספת של כחצי מיליון דונם של מערכות סולאריות (מרביתם בדו-שמוש), דרישה שקשה יהיה לספק בישראל.
יתרונות	אנרגיה נקיה ובלתי מוגבלת ● עצמאות אנרגיה מקסימלית לישראל ● ביטחון באנרגיה עקב הביזור הרב של מערכות הייצור, באופן שאי אפשר יהיה לגרום לנזק משמעותי באמצעות פגיעה בנקודה בודדת ● ייצור קרוב למקום הצריכה ● שיפורים טכנולוגיים מתמשכים מביאים לירידה מתמדת בעלות המערכות ולעלייה בנצילות, כך שהשגת היעדים בעתיד תהיה זולה ואולי גם תוך דרישת שטח מצומצמת ביחס להערכות כיום.
אתגרים	נדרש שטח רב ● ייצור בשעות מסוימות בלבד ● תנודתיות בייצור ● נדרשות מערכות אגירה צמודות ● נדרשת הרחבה וחיזוק של רשתות החשמל בישראל, הן ההולכה והן החלוקה ● פערי ייצור עונתיים – עודף ייצור בעונות המעבר ומחסור בחורף – דורשים אגירה עונתית בכדי להתקרב לאספקת 100% מהביקוש ● נדרש חישמול של כלל מערכות האנרגיה בישראל, כולל כל מערכות התחבורה והתעשייה ● עדין אין פתרון טוב למחזור הפאנלים הסולאריים והסוללות בסוף חייהם ● הן הפאנלים והן הסוללות דורשים מינרלים נדירים, יקרים ושכרייתם מזהמת.
צפי	טכנולוגיית הלוחות הסולאריים בשלה, אך עדין נצילות המרת האנרגיה הסולארית לחשמל נמצאת סביב 20%. בטווח של כ-**5-10 שנים** צפויים שיפורים טכנולוגיים שיובלו להעלות את הנצילות הזו עד ל-30% ואף 40%, שיפור שיצמצם ב-30% ו-50% בהתאמה את השטח הנדרש לסיפוק כלל הביקוש. באמור, התקנת כמות גבוהה של מערכות סולאריות תחייב התקנה של מערכות אגירה בכמות תואמת. טכנולוגיית הסוללת הגיעה למסחריות והוכיחה בשלות טכנית ותפעולית, אך הטכנולוגיה עדיין מתפתחת

[157] ריכוז ההליכים התחרותיים המפורסמים על ידי רשות החשמל,
https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/halichim_taharutihim

	במהירות וגם כאן טכנולוגיות הנמצאות כיום בפיתוח וצפויות להגיע לשוק בטווח של **5-10 שנים** יביאו לשיפורים משמעותיים בביצועי המערכות תוך ירידה תלולה בעלויות ושימוש בחומרים ידידותיים יותר לסביבה. מעל לכ-80% אנרגיה סולארית בתמהיל תידרוש **אגירה עונתית** בכמויות גדולות מאד. טכנולוגיה זו עדין אינה בשלה וצפוי כי תגיע לבשלות רק **בעוד עשור או שניים.** מאידך, לא יהיה צורך בטכנולוגיה זו לפני שנת 2040. כמו כן, טכנולוגיית מחזור הפאנלים והסוללות עדין אינה בשלה וצפוי כי ב-**5 השנים** הקרובות תהפוך מסחרית.
צורכי תשתית	**תשתית פיזית:** בכדי להגיע לשטח הנדרש יהיה צורך בהקמת הצללות רבות בשטח הבנוי ● יהיה צורך לחזק את רשתות ההולכה והחלוקה לקליטת עד 100% אנרגיה סולארית כולל שדרוג של מערכת ניהול רשת החלוקה ושימוש בסוללות הרכבים לטובת הרשת (V2G) ● ידרשו מתקני מחזור לפאנלים ולסוללות ● חישמול התחבורה והתעשייה ידרשו עיבוי רשתות החשמל בערים ובאזורי תעשייה. **תשתית רגולטורית:** חובת התקנת מתקנים לייצור אנרגיה סולארית על גגות חדשים, ובהמשך בכל הנראה גם על גגות קיימים ● בחינת חיוב דו-שמוש כגון הצללת מגרשי חניה, מגרשי ספורט עם מערכות סולאריות ● תידרש אסדרת ניהול ההזרמה לרשת ואספקת שירותי המערכת בין אם משדות סולאריים גדולים ובין אם ממערכות זעירות על גגות, ובכלל זאת ניהול מערכות האגירה.
סטטוס	בישראל מותקנים כיום מעל 6,000 מגהואט סולאריים, קיים שוק פעיל עם עשרות מתקינים והבנקים יודעים ומוכנים לממן מערכות מסוג זה. רשות החשמל נעה לכיוון אסדרות שוק בגמישות גבוהה בהקמת מערכות לצד תחרותיות ומחירים נמוכים.

מימן

ליישום במגזרים  **שנת החלטה** **2035**



תיאור

למימן תכולת אנרגיה ליחידת מאסה מהגבוהות בטבע, כמו כן שריפת מימן גורמת לפליטה של אדי מים בלבד ובכך זהו דלק נקי ללא השפעות אקלימיות.[158] המימן הינו היסוד הקל בטבע ולכן ליחידת נפח תכולת האנרגיה של המימן נמוכה במיוחד. כמו כן המימן אינו קיים כגז חופשי בטבע ולכן אינו יכול לשמש כדלק אלא כמאגר אנרגיה בלבד – יש צורך להשקיע אנרגיה בכדי להפיק את המימן מתרכובות הקיימות בטבע כגון מים או מתאן, וזאת כדי לקבל את האנרגיה מהמימן לאחר מכן. במדינות העולם, בפרט מדינות בעלות תעשיה כבדה ונתיבי תובלה ארוכים, המימן מקודם כדלק נקי שיוכל לספק פתרונות לתעשייה ולתחבורה הכבדה.

את המימן ניתן להפיק מגז טבעי, בתהליך הגורר פליטה גבוהה של פד"ח, או ממים בתהליך אלקטרוליזה הדורש חשמל. ניתן גם לנצל את החום הנוצר בבורים גרעיניים לתהליכי הפקת המימן מגז טבעי או ממים. את המימן מסווגים בצבעים שונים: מימן אפור מופק מגז טבעי תוך פליטה גבוהה של פד"ח, מימן כחול מופק באותה הדרך אך הפד"ח נתפס בתהליך ואינו משוחרר לאטמוספרה[159] (ראו סעיף תפיסת פחמן בהמשך). מימן ירוק מופק מחשמל ממקורות מתחדשים, מימן אדום או ורוד מופק באמצעות אנרגיה גרעינית ומימן טורקיז מופק מגז טבעי בתהליך פירוליזה המותיר את הפחמן שבגז הטבעי כאבקה ואינו גורם לפליטות פד"ח.

מימן יכול לשמש כתחליף לגז טבעי ולדלקים לחימום בתעשייה. באמצעות תאי-דלק ניתן להפיק ישירות חשמל מהמימן וכך הוא יכול לשמש את רשת החשמל הארצית, ברשתות מקומיות לצרכי גיבוי. המימן יכול לשמש לתחבורה, בעיקר במשאיות כבדות, בה מנוע חשמלי מניע את הרכב. ניתן גם להזין את המימן גם ישירות לטורבינות לייצור חשמל או כתחליף לדלק במטוסים ובספינות. מחיר המימן כיום גבוה ביחס לחשמל, ולכן הוא מיועד לשמש במגזרים הקשים לחישמול בתעשייה (כגון תעשיית הפלדה), בתחבורה הכבדה, בתעופה ובספנות. האפשרות לייצר מימן מחשמל, וחזרה חשמל ממימן, הופכת את המימן לערוץ לאגירת חשמל, והערוץ המועדף לאגירה ארוכת טווח. לצורך כך יש לאחסן את המימן במאגרים תת-קרקעיים, נקרות מלח או מאגרי גז טבעי נטושים, כך תתאפשר אגירה של כמויות גדולות מאד של אנרגיה שיוכלו לספק את המשק הישראלי כולו במשך שעות וימים.

כאמור צפיפות האנרגיה במימן נמוכה מאד, ולכן אחסונו והובלתו מאתגרים במיוחד. ניתן להוביל את המימן במכלים בלחצים של 350 או 700 אטמ', לחצים גבוהים מאד הדורשים מכלים מסורבלים, כבדים ויקרים ודחיסת המימן עצמה עלולה לצרוך עד 20% מתכולת האנרגיה של המימן הנאגר. אפשרות אחרת היא

[158] אדי מים מהווים גזי חממה בפני עצמם, אולם בטבע מתקיים שווי משקל במחזור המים המאזן את ריכוז אדי המים באטמוספרה.

[159] כיום יכולת התפיסה של הפחמן אינה גבוהה, לדוגמא המאמר "Clean' hydrogen? – Comparing the emissions and costs of fossil fuel versus renewable electricity based hydrogen" מצא כי בפרויקטי מימן כחול הפעילים כיום אחוז התפיסה נע בין 53-90% עם ערך ממוצע של 56% בלבד. יעדי התעשייה הם להשיג אחוז תפיסה של 90-95% מהפד"ח.

מסקנות	להנזיל את המימן בטמפרטורה של 250°C-, תהליך הצורך מעל 30% מתכולת האנרגיה של המימן, ודורש אחסון במכלים קריוגניים מיוחדים. עקב אתגרים אלו נשקל לאחסן את המימן כאמוניה – מולקולה המכילה מימן וחנקן ההופכת לנוזל בטמפ' פחות קיצונית, של 33°C-. אמוניה נוזלית מכילה 50% יותר מימן ליחידת נפח ממימן נוזלי, וניתן לאחסנה במכלים פשוטים. אולם, המרת מימן לאמוניה עשויה לצרוך 55-60% מתכולת האנרגיה של המימן והאמוניה רעילה בריכוזים גבוהים. ניתן גם לאחסן ולהוביל מימן כשהוא משולב במולקולות אחרות כגון הידרידים (Hydrides) או נשאים אורגניים (Liquid Organic Hydrogen Carriers LOHC –). הובלת המימן בצינורות מאתגרת גם היא – למימן גזי תכולת אנרגיה העומדת על כשליש מגז טבעי, הוא עשוי להגיב עם פלדות מסוימות ובכך לגרום לפריכות הצנרת ולבסוף לסדיקה ודליפות, והוא מסוגל לדלוף מריתוכים ואיטומים העמידים בפני גז טבעי. כך שגם אם תשודרג רשת הגז הטבעי לעמידות בפני מימן, כמות האנרגיה שניתן יהיה להוביל בה תהיה נמוכה יותר מאשר בהובלת גז טבעי. במדינות מפותחות רבות המימן נתפס כפתרון המועדף לאיפוס הפליטות בתעשייה הכבדה, בקווי תובלה ארוכים, בתעופה ובספנות. היות והשוק הישראלי קטן מכדי להשפיע על המגמות העולמיות, ניאלץ להמתין להתייצבות השוק הגלובלי ביחס למקור האנרגיה המועדף למשאיות הכבדות, למטוסים ולספינות.
יתרונות	שריפה נקיה ● תחליף לדלקים במגזרים קשים להפחתת פליטות – תעשייה כבדה, תובלה, תעופה וספנות ● כשלא מהווה תחליף בפני עצמו, הוא חומר מוצא לדלקים סינתטיים אחרים היכולים לשמש כתחליף ● מאפשר איפוס פליטות בהחלפת הגז הטבעי תוך שינויים מינוריים בציוד קיים ובתשתיות ● מאפשר אגירת חשמל ארוכת טווח ● השקעות מאסיביות בעולם, יביאו להקטנת עלויות.
חסרונות	אינו קיים כגז חופשי בטבע ● תכולת אנרגיה נמוכה לנפח ● יקר ● הובלה ואחסון מורכבים ויקרים וברוב הערוצים צורכים חלק משמעותי מתכולת האנרגיה במימן ● דורש שינויים והתאמה בתשתיות קיימות ● שריפתו עלולה לייצר תחמוצות חנקן (NOx).
מצב הטכנולוגיה	הטכנולוגיה עדין בתחילת דרכה אולם טכנולוגיות האלקטרולייזרים ותאי-הדלק כמו גם טכנולוגיות לאחסון והובלת מימן מתפתחות במהירות, עוברות שינויים מהירים תוך ירידת מחירים ● עדין לא נקבעו הערוצים הטכנולוגיים לשימוש במימן בתובלה, בתעופה ובספנות והם כיום בשלבי ניסוי ופיילוטים ● השימוש במימן כחלופה לדלקים בתעשייה גם הוא עדין בראשית דרכו ובשלבי ניסוי, אין עדין מוצרי מדף והניסיון בתחום מועט.
תשתיות שיתמכו	תשתית פיזית: ככל ויידרש שימוש במימן לתעשייה, לתובלה, לספנות, לתעופה, או לאגירת חשמל, יהיה צורך להקים את התשתיות הנדרשות לייצור, אחסון, הובלה, ושימוש במימן ● שימוש במימן לתובלה ידרוש הקמת רשת תחנות תדלוק בפריסה ארצית ● שימוש במימן לתעופה וספנות ידרוש תשתיות אגירה ותדלוק ליד נמלי הים והאוויר ● להחלפת דלקים וגז טבעי בתעשייה יהיה צורך בהתאמת מערכות הייצור ודוודי החימום לשימוש במימן ● אגירת חשמל עונתית תדרוש איתור אזור בעל מבנה גיאולוגי מתאים והקמת המתקנים הדרושים לדחיסת המימן בתת הקרקע וחילוצו וכן הסבת תחנות הכוח לשימוש במימן. תשתית רגולטורית: יש לסיים את התקינה לשימוש במימן בתחבורה, בתעשייה ובמשק החשמל ● יש לפתח תשתית רגולטורית "מאפשרת" שתתיר שימוש במימן ובנגזרותיו במתקני ניסוי גם לפני סיום חקיקת הרגולציה המלאה ● יש להגדיר שנת יעד בה לא ייובאו ויותקנו מתקני דלקים וגז בתעשייה אלא רק מתקנים מבוססי מימן ● יש לבחון שנת יעד להפסקת השימוש בדלקים וגז ומעבר מלא מדלקים וגז למימן.
סיכום	בעולם קיימים מספר דגמים של משאיות ואוטובוסים המונעים במימן. מעבר לכך שימושים אחרים בתעשייה, בתובלה ובתחבורה הינם בשלבי ניסוי שונים, אולם השקעות אדירות במדינות המפותחות יביאו להתקדמות מהירה ליישום הטכנולוגיה ● ניראה כי **ב-5 השנים הקרובות** יושקו דגמי משאיות, אוטובוסים, רכבות ורכבים תפעוליים מבוססי מימן ● יישום מימן בתעשייה יהפוך מסחרי **בעשור הקרוב** ● מטוסים וספינות מונעים במימן או בנגזרותיו (אמוניה, מתנול) יופיעו **בעשור הבא.**

תפיסת פחמן

ליישום במגזרים | **שנת החלטה** 2026



תאור

טכנולוגיה זו מאפשרת להמשיך להשתמש בדלקים פחממניים, כולל גז טבעי, ובתהליכים הפולטים פד"ח, אך לתפוס את הגזים הנפלטים לאחר התהליך ולעשות בהם שימוש כחומר גלם לתעשייה (Carbon Capture and Usage – CCU), או להטמינם בתת הקרקע (Carbon Capture and Sequestration – CCS). תפיסת הפחמן נעשית כשגזי הפליטה מוזרמים על פני נוזלים, מוצקים, או דרך חומרים דמויי מסננת הסופחים את הפד"ח. חומרי הספיחה כיום עדין אינם יעילים מספיק וסופחים בין 50-80% מהפד"ח,[160] אך במעבדות נבחנים חומרים המסוגלים לספוח קרוב ל-100% מהפד"ח.[161] לתהליך הספיחה גם עלות אנרגטית משמעותית, כך למשל הוספת אמצעי ספיחה לתחנת כוח עלולים לצרוך כ-6-7% מתפוקת התחנה.[162]

טכנולוגיה זו נחשבת הכרחית להשגת יעדי הפחתת הפליטות ולהשגת איפוס פחמני, ובפרט במגזרי התעשייה הקשים להפחתה ובייצור חשמל. בנוסף, היא עשויה לסייע למתווה השימוש במימן היות ותאפשר הפקה זולה ופשוטה של מימן מגז טבעי תוך תפיסת הפד"ח הנפלט ("מימן כחול"). טכנולוגיות תפיסת הפחמן נבחנת כבר מספר עשורים אך עדיין נמצאות בשלבי בדיקה והדגמה ויארך עוד בעשור עד שיגיעו לבגרות.

בצד **השימוש,** ניתן להפיק מהפחמן הנתפס מוצרי מוצא לתעשיית הפלסטיקה כגון אוראה או מתנול, מינרלים היכולים להחליף חלק מהאגרגטים בתעשיית הבניה, או דלקים נוזליים וגזיים שישמשו שוב במתקנים בעלי תפיסת פחמן וכך יאפשרו שימוש בפחמן במעגל סגור.

ייצור מימן "טורקיז" באמצעות פירוליזה של פסולת-ביומסה יכול לתרום לסילוק פד"ח מהאטמוספרה, במניעת פליטות מתאן ופד"ח מהפסולת המוטמנת, ולבן בעזרתה ניתן לקזז פליטות אחרות ולהשיג "נטו אפס" פליטות. לתוצר הפחמני של הפירוליזה (carbon-black) ידועים שימושים תעשייתיים רבים (תעשיית גומי, אלקטרודות, סיבי פחמן וחומרי בנייה).

מאגר

---

[160] להלן מאמר שסקר פרויקטי תפיסת פחמן ומצא שלמרות הכרזה על יעילות של 85-90% בתפיסת הפחמן, בפועל נתפסו בממוצע רק 55%:
https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2019/ee/c9ee02709b

[161] ראו למשל מחקר של טכנולוגיה המסוגלת לתפוס 99% מהפד"ח:
https://www.nature.com/articles/s41560-021-00969-5

[162] ראו לדוגמא ניתוח של חברת General Electric שמצא כי תפיסת פחמן במוצא טורבינות גז תביא להפסד של 6% בתפוקת האנרגיה עם תפיסה של 85% מהפד"ח, והפסד של 6.3% עם תפיסת 90% מהפד"ח:
https://www.ge.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/future-of-energy/decarbonizing-gas-turbines-ccus-gea34966.pdf

סוגיות	לצורך **הטמנת** הפד"ח יש לאתר אזור בעל מבנה גיאולוגי מתאים ולוודא כי הפד"ח המוטמן לא ידלוף, גם במשך מאות שנים. לאחר מכן יש להקים את תשתיות ההולכה ממתקני הפקת הפד"ח לאתרי ההטמנה, ולבסוף את מתקני הדחיסה וההחדרה. כאשר הפד"ח מגיע מהאטמוספרה, באמצעות תפיסה ישירה (Direct Air Capture – DAC) או מביו-דלקים (BECCS), הטמנת הפד"ח מסלקת אותו מהאטמוספרה ובכך מהווה פליטה "שלילית", דהיינו הסרה של פד"ח מהאטמוספרה, שבעזרתה ניתן לקזז פליטות מהתהליכים הקשים ביותר לאיפוס או להפחתה – לדוגמא פליטות מפעילות חקלאית – בכדי להשיג "נטו אפס" פליטות. טכנולוגיה זו מהווה מוצא אחרון עבור תחומים קשים לאיפוס, אך עקב העלות האנרגטית הגבוהה הכרוכה בה, היא צפויה לספק פתרון מצומצם לתחומים אלו בלבד.
עמדות	טכנולוגיה זו מאפשר להמשיך את השימוש בטכנולוגיות הקיימות ללא שינוי מהותי במערכות ובתשתיות, כך ממשיך השימוש בידע שנצבר על אודות המערכות והתהליכים הקיימים, אין צורך בהכשרה מחדש של העובדים המקצועיים, נשמרות התשתיות ותהליכי הייצור הנוכחיים ונחסכת השקעה מאסיבית בהחלפתם ● מאפשר להפחית ולאפס את הפליטות מתהליכים תעשייתיים קשים להפחתה כגון תעשיית המלט או החקלאות.
עמדות	הטכנולוגיה לתפיסת פחמן רלוונטית רק למתקנים גדולים, ועדיף בעלי ריכוז גבוה של גזי חממה בגזי הפליטה ● הטכנולוגיה כיום בראשית דרכה וניתן לתפוס רק אחוז נמוך מהפד"ח שבגזי הפליטה ● הטכנולוגיה דורשת מתקנים יקרים, גדולים ומורכבים שעלולים לדרוש שטח רב בקרבת מתקני הייצור ולהפריע לתהליכי הייצור הקיימים ● נדרשות תשתיות נרחבות להולכת הפד"ח ● נדרש לפתח יכולות לשימוש בפד"ח בתעשייה או אתרים להטמנת הפד"ח ● תהליכי התפיסה, ההולכה והשימוש בפד"ח דורשים **תשומות אנרגיה משמעותיות** ופוגעים בכך ביעילות המערכות ● נמשך השימוש בדלקים ובגז טבעי ולכן נותרים הסיכונים הכרוכים בשימוש בהם ובפרט דליפה של גז טבעי (מתאן) לאטמוספרה, המהווה גז חממה חזק, שימשיך לחזק את משבר האקלים.
סטטוס	הטכנולוגיות לתפיסת פחמן נמצאות כבר זמן רב בשלבי ניסוי בעולם, הניסויים חלקם מוצלחים וחלקם נכשלים. הערכה היא כי **בתוך 5-10 שנים** יוכרזו ניסויים מוצלחים והטכנולוגיות תהפוכנה מסחריות ● במקביל, יש לפתח בישראל אתרים להטמנת הפד"ח ולבחון את ההשפעות הסביבתיות של תהליך ההטמנה, תהליך שעשוי לקחת **10-15 שנים** ● טכנולוגיות השימוש בפד"ח כחומר גלם לתעשייה הינן גם בשלבי ניסוי בעולם ויעבור עוד **בעשור** עד שיבשיל למסחריות. **תשתית פיזית:** בישראל יש למצוא ערוצים לשימוש בפחמן ● לבצע סקר לאתרים המתאימים להטמנת פחמן ולבחון את ההשפעות הסביבתיות של תהליכי ההטמנה ● יש לתכנן ולהקים את תשתיות ההולכה והאגירה הנדרשות, תהליך שעלול לקחת **5-10 שנים** מקבלת החלטה. **תשתית רגולטורית:** יש לאסדר אישור, ניטור ובקרה של תהליכי תפיסת פחמן ● להגדיר הליכי תכנון סטטוטוריים לתת הקרקע בבדי שניתן יהיה לתכנן את אתרי הטמנת הפחמן ● לאסדר ולתקנן את תהליכי הטמנת הפחמן, כולל הליכי רישוי וניטור של האתרים עצמם ושל מתקני הדחיסה וההטמנה.
סטטוס	בעולם פעילים כ-30 פרויקטי תפיסת פחמן וכמאה נוספים בפיתוח, אולם מתקנים אלו נהנים מתמיכה ממשלתית, אינם כלכליים עדין ומצליחים לתפוס אחוזים נמוכים מהפד"ח, על אף שחלקם פועלים עשרות שנים. בישראל נערך בשנת 2010 על ידי המכון הגיאולוגי סקר ראשוני של שכבות הקרקע ואותרו אקוויפרים מלוחים תת קרקעיים בהם יש סבירות כי ניתן להטמין עד 7 מיליארדי טונות פד"ח. בימים אלו נערך סקר משלים לבחינה מדויקת יותר של אתרי ההטמנה האפשריים וכן נפח, קצבי הטמנה, וביוכימיה של האתרים.

אנרגיה גרעינית

ליישום במגזרים **שנת החלטה** **2025**



תאור

תחנות כוח גרעיניות (תג"ר) מאפשרות ייצור חשמל ללא פליטה ישירה של גזי חממה. כמו כן החום המיוצר בכורים גרעיניים מאפשר להפיק מימן בתהליכים נקיים וזולים יחסית. כמעט כל כורי הגרעין הפעילים כיום שייכים לקבוצת "דור-3+", המפצלים גרעיני אטומי אורניום ומפיקים מכך חום. החום משמש להפקת קיטור, המניע גנרטור לייצור חשמל. התהליך יחסית אינו יעיל – רק כ-5% מהאנרגיה האצורה באורניום הופכת לחשמל, חלק גדול נפלט כחום וחלק אחר נפלט מחומרי הדלק המשומש, המוצא מהכור לאחר מספר שנות שימוש, ופולטים קרינה וחום במשך אלפי שנים. לכן יש להרחיק את הדלק המשומש למשך תקופה ארוכה מאנשים וממי התהום. כורים גרעיניים אינם יכולים להגיע לפיצוץ גרעיני, אך תקלות חמורות עלולות להביא לדליפה של חומרים רדיואקטיביים לסביבה, כפי שקרה בצ'רנוביל בשנת 1986 ובפוקושימה בשנת 2011. אירועי עבר אלו גורמים לחשש ציבורי משמעותי משימוש בכורים גרעינים.

כיום נמצאים בפיתוח כורי "דור-4" המפצלים גרעיני אורניום או ת'וריום, בטמפרטורות גבוהות מאד, תוך קירור הליבה בגזים אינרטיים כדוגמת הליום, או מתכות ומלחים נוזליים כדוגמת נתרן. כורים אלו עובדים ביעילות גבוהה יותר ובכך מגיעים לנצילות גבוהה יותר, דורשים פחות חומרי דלק, מותירים פחות חומרי פסולת, והפסולת שנותרת הינה ברמת רדיואקטיביות נמוכה יותר. כמו כן טכנולוגיות דור-4 הינן בטוחות יותר מדור הכורים הנוכחי, דבר שעשוי לסייע לקבלה הציבורית של טכנולוגיות אלו.

שיפור נוסף בתחום הגרעין הינו פיתוח הכורים הקטנים המודולריים (Small Modular Reactors – SMR), כורים אלו קטנים יחסית, בהספק עד 200 מגהואט, ועתידים להיות מיוצרים בקו ייצור סדרתי, בשונה מהכורים הנוכחיים המתוכננים ומיוצרים באופן פרטני וייעודי לכל פרויקט. תהליכי ייצור סדרתיים יאפשרו להקטין משמעותית את העלויות ולהוזיל בכך את החשמל המופק מגרעין. כורי ה-SMR מתוכננים הן בטכנולוגיות דור-3 (כדוגמת חברות NuScale ורולס-רוייס) וחלק בטכנולוגיות דור-4 (כדוגמת TerraPower, General Atomics ועוד). הכורים שישתמשו בטכנולוגיות דור-4 ייהנו מיתרונותיה וביניהם בטיחות ויעילות משופרות.

טכנולוגיה חדשנית נוספת המפותחת כיום הינה מיזוג ("היתוך") של אטומים קלים כמימן או הליום לאטומים כבדים יותר. טכנולוגיות ההיתוך לא משתמשות בחומרים רדיואקטיביים ולכן הן נקיות יותר ובסיכון נמוך. טכנולוגיות ההיתוך נמצאות בפיתוח שנים רבות ועל פי פרויקט המחקר המרכזי בעולם, ITER שבצרפת, תגיע לכדי מסחריות רק אחרי שנת 2050. אולם, בשנים האחרונות קמו מספר חברות קטנות בעלות רעיונות יצירתיים להיתוך בטכנולוגיות חליפיות כדוגמת Commonwealth Fusion Reactors, First Light Fusion, nt-Tao, ועוד, ויתכן כי ערוצים אלו יגיעו לבשלות עוד קודם לכן ובעלויות נמוכות יותר.

בישראל יהיה צורך לשמור על מרחקי בטיחות מריכוזי אוכלוסייה ומאזורים סיסמיים פעילים, תנאים שמצמצמים את האתרים הפוטנציאלים להקמת תג"ר. כמו כן, מטעמי ביטחון אספקת אנרגיה יש צורך לבזר

	את הייצור במספר אתרים. עקב כך, גם בתרחיש גבוה יופקו בישראל מאנרגיה גרעינית לא יותר מ-20% מסך הביקוש לחשמל. ככל שיהיו שיפורים טכנולוגיים כגון שימוש בדלקים עמידים יותר (לדוגמא TRISO), או מעבר לטכנולוגיית היתוך, יתכן ואפשר יהיה לצמצם את מרחקי הבטיחות ובכך להגדיל את מספר האתרים ואת ההספק המקסימלי האפשרי בישראל מעבר לגבול 20% מהביקוש כבר בשנת 2050.
יתרונות	ייצור חשמל ללא פליטות גזי חממה ● ייצור חשמל נשלט ואמין – בשונה ממקורות מתחדשים כשמש ורוח ● דרישת שטח מצומצמת ● מאפשר ייצור מימן נקי ● טכנולוגיות מתקדמות הנמצאות בפיתוח, כגון דור-4 והיתוך, יעילות ובטוחות יותר.
חסמים	מייצרת פסולת רדיואקטיבית שיש לשמור הרחק ממקום ישוב למשך עשרות אלפי שנים ● מייצרת חשמל בהספק קבוע ומתקשה לעקוב אחר השינויים בביקוש ● סיכון לתקלות חמורות וחשש ציבורי גדול ● בישראל חשש בטחוני מפגיעה בכור ● יהיה צורך למצוא פתרון לסוגיות המדיניות ● כורים מודולריים SMR, כורי דור-4 וכורי היתוך עדין בשלבי פיתוח.
מצב נוכחי	כורי ביקוע גדולים נמצאים בשלב מסחרי אך סבירות נמוכה שיוקמו בישראל ● כורים מודולריים SMR, ובפרט כורי דור-4, נמצאים בשלבי פיתוח והדגמה שונים בעולם וניתן לצפות כי יהפכו מסחריים ב-10-15 השנים הקרובות ● כורי היתוך נמצאים בשלבי פיתוח ראשוניים וכנראה לא יגיעו לבשלות לפני שנת 2040.
צורכי תשתית	**תשתית פיזית:** בהנחה שהתג"ר תוקם הרחק ממקום יישוב, יהיה צורך להקים קווי הולכה ארוכים להובלת האנרגיה לאזורי הביקוש. **תשתית רגולטורית:** יש לאתר אתר או אתרים המתאימים להקמת תג"ר ● לבצע ניתוח טכנו-כלכלי של תג"ר בטכנולוגיות המסתמנות ● לבחון את המצב הבינלאומי ואת האפשרות להשגת הסדר להקמת כור בישראל. **תשתית ידע:** להקמת תג"ר בישראל יהיה צורך בהכשרה מבעוד מועד של כוח אדם מיומן, בהיקפים המתאימים, בתחומי ההנדסה ותפעול תג"ר ● לקידום טכנולוגיית ההיתוך בישראל יש לחזק את התשתית האקדמית בתחומים כגון פיסיקת פלזמה, לייזרים, חומרים, ועוד.
סטטוס	כורי דור 3+ קיימים ומסחריים, אך יקרים ומורכבים עם זמני הקמה ארוכים ● כורי דור-4 וכורי היתוך נמצאים בפיתוח וצפויות 10-30 שנים למסחריות ● כורים מודולריים SMR בטכנולוגיית דור-3+ ראשונים מוקמים כעת בעולם ויגיעו למסחריות בתוך כ-5 שנים ● כורי דור-4 מודולריים עדין בפיתוח וייקח לפחות עשור להבשלה ומסחריות ● מתבצע איתור של מיקומים מתאימים בארץ להקמת תג"ר.

דלקים סינתטיים וביולוגים

ליישום במגזרים  **שנת החלטה** **2035**



תיאור

דלקים סינתטיים מאפשרים ייצור חומרי דלק ללא פליטות של גזי חממה לאטמוספרה, או תוך פליטה של גזי חממה לאחר קיזוזם משום שהוסרה כמות תואמת של גזי חממה מהאטמוספרה בעת הכנת הדלקים. יתרונם של הדלקים הסינתטיים הם באפשרות להמשיך ולהשתמש בטכנולוגיות מוכרות של שריפה כגון בתהליכי ייצור תעשייתיים, בטורבינות לייצור חשמל, במנועי סילון וכד', תוך מניעה של ההשפעות האקלימיות של הדלקים המחצביים.

דלקים סינתטיים יכולים להגיע ממספר מקורות: דלקים "חשמליים" (eFuels) - דלקים המיוצרים באמצעות אנרגיה חשמלית ממקור מתחדש, כגון אנרגיה סולארית; דלקים ביולוגיים (BioFuels) - דלקים המופקים ממקור צמחי. דלקים אלו פולטים פד"ח בעת השימוש, אך כמות שווה של גז נקלטה על ידי הצמחים שמהם הופק הדלק, ולכן מדובר במעגל סגור שאינו מגדיל את כמות הפד"ח באטמוספרה; ודלקים "כחולים" - דלקים ממקור של גז טבעי לאחר שנוטרל מהפחמן שבו, למשל אמוניה המיוצרת ממימן "כחול" שהופק מגז טבעי לאחר תפיסת פחמן. ראו דיון במימן הכחול בסעיף מימן .

בישראל אין קרקעות או מים בכמויות מספיקות בכדי לגדל את צמחי הבסיס לדלקים הביולוגיים, ולכן אם לא יפותחו שיטות לניצול פסולת חקלאית לדלק, ואם יעשה שימוש בדלקים כאלו, ברובם יהיו מיובאים ולכן יקרים ויגבירו את התלות של ישראל במקורות ההפקה הזרים. הפקת דלקים חשמליים דורשת אנרגיה חשמלית וכן מימן, ולכן יהיו יקרים יותר משימוש ישיר בחשמל או במימן. דלקים כחולים גם הם דורשים מימן ואנרגיה נוספת ולכן יהיו יקרים יותר משימוש ישיר במימן. היות וכך, על פי המצב הטכנולוגי הנוכחי, ניראה כי תהיה עדיפות לחישמול ולשימוש ישיר במימן, ורק מגזרים שלא ניתנים לפתרון בכלים אלו ישתמשו בדלקים הסינתטיים.

תחומי הספנות והתעופה קשים מאד להפחתת פליטות ועל פי הנראה כיום יתבססו בעתיד על דלקים סינתטיים או ביולוגיים. במקרה כזה ניאלץ בישראל להשתמש בדלקים אלו אף אם יהיו יקרים ונידרש לייבאם.

יתרונות

בעלי תכולת אנרגיה גבוהה ● מאפשרים שימוש במתקנים קיימים בדומה לדלקי המאובנים ● מאפשרים הובלה ואחסון פשוטים וזולים ● בעלי צפיפות אנרגיה גבוהה ולכן מהווים פתרון מרכזי לתעופה וספנות.

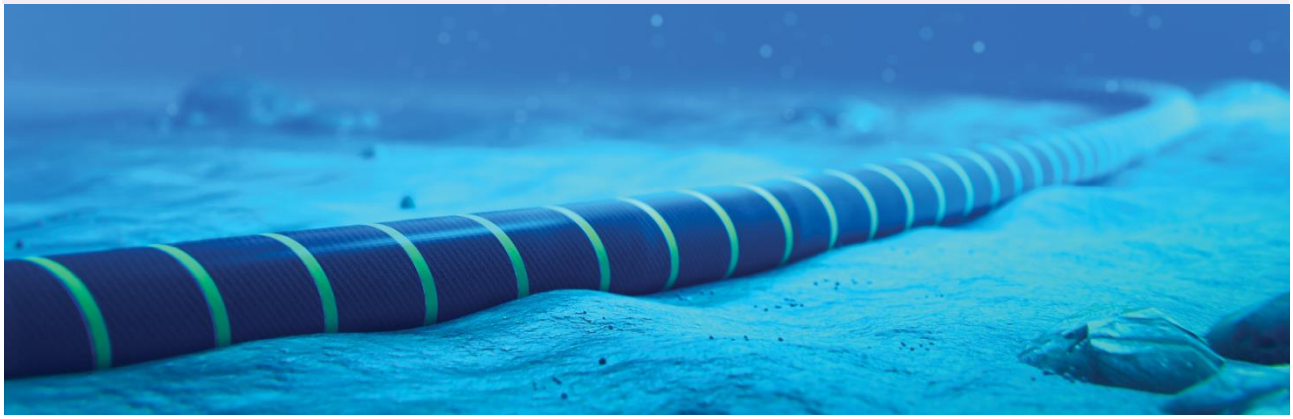
חסרונות

יקרים להפקה ● בישראל אין מקורות אורגניים לייצור מקומי משמעותי של דלקים ביולוגיים ● אין עדין ייצור בקנה מידה גדול של דלקים חשמליים ● ייצור הדלקים דורש מימן ● חלק מהדלקים פולטים פד"ח בשריפה.

שוק	תחום הדלקים החשמליים נמצא בשלבי מו"פ וניראה כי ידרשו **עוד 5 שנים** לפחות להגיע לבשלות מסחרית ● שוק הדלקים החשמליים מתבסס על מימן ופד"ח כחומרי גלם, כך שבכדי להגיע למסחריות יהיה צורך בפיתוח של שווקים אלו במקביל.
תשתית ורגולציה	**תשתית פיזית:** לא נדרש כעת. **תשתית רגולטורית:** יש להתאים לישראל את התקנים לדלקים סינתטיים ● לבצע סקירת רגולציה להתאמות נדרשות באסדרות הדלקים.
סיכום	בעולם מייצרים דלקים ממקור ביולוגי כאתנול ומתנול כבר שנים רבות ובסקאלות גדולות ● דלקים חשמליים נמצאים בתהליכי פיתוח ● בעולמות התעופה והספנות בוחנים מנועים המוזנים בדלקים סינתטיים וביולוגיים אך עדין אין כלים בייצור סדרתי לדלקים אלו.

יבוא אנרגיה נקיה

ליישום במגזרים  **שנת החלטה** 2035



תוכן

עקב האתגר העצום לייצר אנרגיה מתחדשת בישראל באחוזים המתקרבים ל-100%, נבחנת האפשרות לייבא אנרגיה נקיה המיוצרת מחוץ לישראל. האפשרויות הנבחנות כעת כוללות חיבור רשת החשמל הישראלית לרשת זרה כדוגמת הרשת האירופאית ורכישה של חשמל ממקורות מתחדשים; חיבור חשמלי ישירות למקורות מתחדשים מחוץ לגבולות ישראל כגון שדות סולאריים בירדן; או רכישת מימן "ירוק" או דלקים נקיים ממקורות מתחדשים שהופקו בחו"ל.

רכישת חשמל ממקור סולארי בירדן או מצרים תאפשר להשיג את תפוקת החשמל הסולארי הנדרש לישראל מבלי לתפוס שטחים פתוחים בישראל הצפופה. אמנם באופן זה ניתן לקבל כמויות גדולות של אנרגיה נקייה, אך אנרגיה סולארית תגיע כמעט באותו הזמן כמו האנרגיה הסולארית בישראל וכך יוחרפו האתגרים של שילוב אחוז גבוה של חשמל סולארי ברשת הארצית.

נוסף על כך, הולכת חשמל למרחקים ארוכים מהווה אתגר טכני ותכנוני. בצד הטכני במקרים רבים ישנה כדאיות כלכלית בהולכת החשמל בכבלי זרם ישר (DC). הולכה ב-DC מחייבת המרת החשמל מזרם חילופין (AC) ל-DC בנקודת הכניסה לכבל, ושוב מ-DC ל-AC בנקודת היציאה מהכבל בחיבור לרשת הארצית. ההמרה נעשית בתחנות גדולות ויקרות וגורמות לאבדן של כ-2-5% מהחשמל כחום.

את החשמל ניתן להוליך למרחקים ארוכים בכבלים עיליים, המהווים מפגע נופי וסביבתי, או בכבלים תת קרקעיים נסתרים מן העין. בהטמנת כבלי חשמל קיימים מספר אתגרים – קיים קושי לפזר את החום הנוצר בכבלים, דבר המגביל את ההספק הניתן להולכה; תקלות בתת הקרקע קשות יותר לאיתור ותיקון; ותהליך ההטמנה יקר יותר מאשר כבלים עיליים.

קיימת אפשרות לרכוש חשמל מטורבינות רוח בירדן או במצרים. אמנם בירדן ובמצרים פוטנציאל רוח נמוך יחסית לשמש, אך הוא גבוה משמעותית מהפוטנציאל בישראל, ולרוח יתרון בכך שהיא מגיעה בדרך כלל אחר הצהריים ובכך משלימה את הייצור הסולארי בשעות בהן השמש שוקעת ונוצר מחסור משמעותית ברשת.

אפשרות אחרת היא להתחבר באמצעות כבל DC תת ימי אל הרשת האירופית, באמצעות כבל EuroAsia המתחבר לקפריסין, משם ליוון, המחוברת לרשת האירופית. חיבור זה יאפשר רכישת חשמל נקי בשעות המחסור בישראל, כמו גם לייצא את עודפי החשמל המיוצר באביב בצהריים. אולם כבל כזה הוא מורכב עקב אורכו, כ-300 ק"מ, ועומק המים המגיע עד 3 ק"מ.

למרחקים ארוכים זול יותר להוליך אנרגיה כימית מאשר חשמלית, ולכן ניתן לשקול ייבוא מימן בצינורות ממדינות שכנות. ערב הסעודית ומצרים ממצבות עצמן כמקור גלובלי למימן ירוק שיופק באמצעות חשמל זול שיגיע משדות סולאריים ענקיים או חוות רוח. ניתן יהיה להוביל מימן זה בצינורות לישראל ולעשות בו

	שימוש הן לטובת מגזרים קשים להפחתה כדוגמת התעשייה הכבדה והספנות, ואף לייצור חשמל בחורף, כאשר התפוקה הסולארית נמוכה. מימן ירוק ניתן יהיה לייבא גם בספינות, כמימן מונזל. מדינות כמו יפן מבססות את תכניות איפוס הפליטות שלהן על רכש מימן ירוק וסביר כי יווצר שוק גלובלי למימן נוזלי. אולם תהליך ההנזלה הוא מורכב ויקר ולכן סביר כי ייבוא מימן מונזל בדרך הים יהיה יקר, אך יכול להוות ערוץ גיבוי בדומה למצוף ה-LNG שהיווה גיבוי למשק הגז הטבעי בישראל. האפשרות האחרונה לייבוא אנרגיה הינה באמצעות רכש דלקים סינתטיים וביולוגיים. יתכן וחלק מהתחבורה הכבדה, ובפרט תעופה וספנות, יפנו להשתמש בדלקים ממקור ביולוגי או סינתטי. דלקים ביולוגיים לא ייוצרו בישראל בכמויות גדולות היות ואין בישראל שטחי קרקע ומים מספיקים לגידול יבולי אנרגיה, ולכן דלקים אלו, אם יהיה כורח להשתמש בהם, ייובאו. כך גם דלקים סינתטיים, שידרשו תעשיה משמעותית עם יתרון לגודל, יתכן שיהיה זול יותר לייבא. לייבוא אנרגיה ישנן משמעויות של ביטחון אספקה עקב היכולת של הספקים הזרים לעצור את הייצוא, בין אם מדובר בקווי חשמל ובין אם בדלקים או מימן. מזווית זו של ביטחון האספקה יש יתרון גדול לרכש דלקים, בין אם סינתטיים או ביולוגיים, וכן מימן מונזל בספינות, משום שרכש כזה יעשה בשוק גלובלי עם מספר רב של ספקים אלטרנטיביים. וזאת בניגוד לייבוא בקווי חשמל או צינורות מימן, ששם ישנו ספק יחיד בקצה הצינור וביכולתו לעצור את הייצוא בכל עת.
יתרונות	הקמת שדות סולאריים או חוות רוח במדינות שכנות תאפשר לעקוף את מגבלת הקרקע בישראל ● חיבור לרשת האירופית יאפשר איזון טוב יותר של הרשת הישראלית ובפרט באחוז מתחדשות גבוה ● יאפשר להוריד את עלויות ייצור החשמל ● יאפשר גיבוי למשק בשעת חירום ● רכש מימן ירוק בצינור יהיה זול יחסית ויאפשר להשלים את האנרגיה הסולארית להשגת אפס פליטות במשק.
חסרונות	דורש הסדרים בינלאומיים מורכבים ● מחייב הולכת אנרגיה למרחקים ארוכים ● תחנות הקליטה גדולות ויקרות ● מגביר את התלות של ישראל בייצור אנרגיה בחו"ל ● כניסת הספק גבוה בכבל אחד או בצינור אחד מהווה סיכון לביטחון האספקה.
צורך	הטכנולוגיה להולכת חשמל למרחקים ארוכים בוגרת ומסחרית, אם כי עדין מופיעים פיתוחים טכנולוגיים בתחום המרת AC/DC שמשפרים את ביצועי התחנות ומורידים את המחירים ● טכנולוגיה להולכת מימן בצינורות גם היא מוכרת, אם כי צפוי שלאור הביקוש שיגדל בשנים הקרובות התחום ייהנה משיפורים בטכנולוגיה ובעלויות.
תשתית נדרשת	**תשתית פיזית:** לכבל DC יש צורך להקים תחנת המרה באתר החיבור לרשת ההולכה הישראלית ● יש לבחון את האפשרות להובלת מימן בצינורות הולכת הגז הטבעי ● הולכת מימן תדרוש הנחת צינורות מהגבול לרשת הולכת הגז (אם המימן יועבר בה) או לאזורי הצריכה ● קליטת מימן נוזלי בספינות תדרוש הקמת תשתית לקבלה ואחסון באזור נמלי הים, ומסוף הטענה למשאיות להעברה לאתרי הצריכה. **תשתית רגולטורית:** לקבלת חשמל בכבלי DC יש לאסדר את תחנות ההמרה והפיקוח עליהן ● לקבלת והולכת מימן יש לאסדר ולתקנן את מערכת הולכת ואגירת המימן ● שימוש בדלקים סינתטיים או ביולוגיים יחייב אימוץ הסטנדרטים הבינלאומיים לדלקים אלו.
סטטוס	ישראל כיום בתהליך מול קפריסין, יוון והאיחוד האירופי לחיבור רשתות החשמל בכבל תת-ימי ● פרויקט ראשון להקמת שדה סולארי בירדן וחיבורו לרשת הישראלית גם הוא בשלבי תכנון.

נספח ב': טכנולוגיות פורצות דרך

בנוסף לטכנולוגיות שתוארו, ישנן מספר טכנולוגיות הנמצאות בשלבי ניסוי מוקדמים. ההסתברות שיגיעו לבשלות ויתאימו לתנאים בישראל היא נמוכה, אך כל אחת מהטכנולוגיות הללו עשויה לשנות באופן מהותי את פני מגזר האנרגיה.

שיפורים בטכנולוגיית PV: הנצילות של הטכנולוגיה הפוטו-וולטאית (PV), אותם פאנלים הממירים ישירות את קרינת השמש לחשמל, עומדת על מעט מעל 20%. דהיינו, רק 20% מתוך קרינת השמש הופכים לחשמל והשאר מוחזרים או הופכים לחום. אולם, במעבדות כיום מציגים חומרים המסוגלים להגיע לנצילות של 40% בקרינת שמש רגילה ועד 50% בקרינה מרוכזת. אחת הטכנולוגיות המבטיחות מבוססת על קבוצת חומרים הנקראים פרובסקיטים (Perovskites) המשלבים חומרים אורגניים עם אנ-אורגניים והם זולים לייצור. תאים משולבים סיליקון-פרובסקיט הראו נצילות של 30% יגיעו בקרוב לשווקים. תאים אלו יוכלו לצמצם את דרישת השטח לייצור חשמל סולארי ב-33%, ותאים עתידיים בנצילות 40% יאפשרו להקטין את השטח הנדרש למחצית מהנדרש כיום.

טכנולוגיה נוספת שעשויה לשנות את אופן הניצול של אנרגיה סולארית היא הפקת מימן ישירות מקרינת השמש (Photoelectrocatalytic hydrogen production). במקום להשתמש בלוחות פוטו-וולטאיים בנצילות של 20% ולהשתמש בחשמל באלקטרוליזה להפקת מימן ממים, נמצאות כיום בפיתוח טכנולוגיות המאפשרות הפקה ישירה של מימן על גבי משטח או נוזל מתאים המואר על-ידי קרינת שמש. בתהליך זה נחסכת ההמרה משמש לחשמל ואז מחשמל למימן ותוצאות ראשוניות מצביעות על כך שהנצילות בתהליכים אלו תהיה גבוהה יותר מאשר נצילות תאים פוטו-וולטאיים.

כניסת השיפורים הטכנולוגיים הללו לשימוש מסחרי תשנה לחלוטין את תחשיב השטחים והרשת הנדרשים להשגת אחוזים גבוהים של אנרגיה מהשמש בישראל.

שיפורים בטכנולוגיית האגירה: סוללות האגירה המשמשות כיום למכוניות ולאגירת חשמל מבוססות בעיקר על טכנולוגיות יוני-ליתיום (Lithium Ion). לליתיום מספר חסרונות, ביניהם רגישות לשריפה, הספק נמוך יחסית, אורך חיים קצר, אתגרים בהפקה, ופגיעה סביבתית באתרי הכרייה. אולם, ישנם פיתוחים שעשויים לאפשר להתגבר על חסרונות אלו ולספק סוללות זולות, חזקות, ומאריכות ימים, המבוססות על חומרים נגישים יותר.

בין הטכנולוגיות המבטיחות נמצאות סוללות ליתיום משופרות כדוגמת אלקטרוליט מוצק, ליתיום-מתכת, וליתיום-גופרית, או סוללות יוני-נתרן, אבץ-אויר, ועוד. סוללות אלו תוכלנה לאפשר שילוב טוב יותר של אנרגיה מתחדשת ברשת החשמל, בעלות מופחתת, בטביעת רגל קרקעית מצומצמת יותר, ובביצועים משופרים.

פירוליזה של מתאן: טכנולוגיה אלטרנטיבית להפקת מימן מגז טבעי היא פירוליזה של מתאן. מדובר בפירוק הגז הטבעי (שרובו מתאן) בטמפרטורה גבוהה וללא נוכחות חמצן באופן שמפריד בין מרכיבי המתאן – מימן ופחמן – אך עקב המחסור בחמצן הפחמן אינו מתרכב עם החמצן ליצירת פחמן דו-חמצני אלא מתקרר ומתגבש לאבקת פחמן מוצקה. אבקה זו ניתן לאסוף בקלות ולה שימושים תעשייתיים רבים.

טכנולוגיה זו עדין בשלבי ניסוי ראשוניים בעולם במספר מתקנים. אם הניסויים יעלו יפה, שימוש נרחב בטכנולוגיה הזו יאפשר להמשיך ולהשתמש בגז הטבעי להפקת מימן ללא פליטת גזי חממה ובלא ההשלכות התשתיתיות הנדרשות לתפיסה, הולכה, והטמנה של הפד"ח.

היתוך גרעיני: בשונה מטכנולוגיית הביקוע הגרעיני המוכרת, בה מבקעים אטומים כבדים לקבלת אנרגיה, בטכנולוגיית ההיתוך הגרעיני מאחים אטומים קלים לקבלת אטומים כבדים יותר בתוספת אנרגיה, תהליך דומה לקורה בלב השמש שם מאוחים אטומי מימן לקבלת אטום הליום כבד. יתרונות ההיתוך הן שימוש בחומרי דלק הנמצאים בשפע על פני כדור הארץ, ללא שימוש בחומרים רדיואקטיביים וללא סיכוני תאונות.

קיימים ניסיונות לקיים היתוך גרעיני על פני כדור הארץ, אך נדרשים לשם כך טמפרטורה ולחץ עצומים וקשיים טכניים מרובים. פרויקט בינלאומי בשם ITER מקים משנת 2006 כור היתוך בדרום צרפת בעלות של מעל 20 מיליארד אירו. על פי התוכנית רק בשנת 2035 יגיע הכור להיתוך מתמשך שיפיק יותר אנרגיה מזו הנדרשת לקיימו. אך כור זה עדין

לא יוכל להפיק חשמל, ורק הכור DEMO המתוכנן לקום סביב שנת 2040 צפוי להפיק חשמל בשנת 2050. עקב המורכבות והקשיים הטכניים הצפויים בדרך, סביר כי לוחות הזמנים הללו יתארכו.

אולם, בשנים האחרונות קמות חברות קטנות יחסית המציעות פתרונות יצירתיים לבעיית ההיתוך והן מתקדמות בקצב מהיר. ביניהן ניתן למנות את חברת Commonwealth Fusion Systems מארה"ב המשתמשת בשיטת הטורוס המגנטי (טוקמאק), חברת First Light Fusion של יוצאי אוניברסיטת אוקספורד הנעזרת בקליע שאמור בנקודת הפגיעה להגיע ללחץ ולטמפרטורה הנדרשים להיתוך, חברת General Fusion הקנדית העושה שימוש בבוכנות דחיסה להשגת הלחץ הדרוש, חברת HB11 האוסטרלית העושה שימוש בלייזרים להיתוך פרוטון-בורון, ואף החברה הישראלית nT-tao העושה שימוש בטורוס מגנטי אך משתמשת בטכנולוגיה ייחודית לחימום ודחיסה מהירה של הפלזמה באופן המאפשר מתקן קומפקטי, מודולרי וזול לייצור חשמל. על פי תכניות הפיתוח של חברות אלו הן צפויות להשיג היתוך מתמשך עד סוף העשור הנוכחי.

הצלחה של היתוך גרעיני והגעה למסחריות תוכל לאפשר ייצור חשמל ממקורות הנמצאים בשפע ובזול, ותשנה מן היסוד את שוק האנרגיה העולמי. אולם הדרך עדין ארוכה להשגת תוצאות משמעותיות.

גיאותרמיקה עמוקה: ליבת כדור הארץ נמצאת בטמפרטורה של כ-5,000 מעלות צלזיוס עקב החום הנפלט מדעיכת יסודות רדיואקטיביים. שיטת הגיאותרמיקה העמוקה מנסה לנצל חום זה לייצור אנרגיה על פני כדור-הארץ. באתרים בהם קרום כדור-הארץ דק, מי התהום מתחממים וניתן להפיק מהם אנרגיה, כפי שנעשה בקניה, פינלנד, קליפורניה, ועוד. אולם, ברוב מדינות העולם, וישראל ביניהן, החום הגיאותרמי אינו מגיע קרוב לפני הקרקע. בטכנולוגיות הגיאותרמיקה העמוקה קודחים לעומק הקרקע עד לשכבות בהן הטמפרטורה גבוהה, בין 3-4 ק"מ. מים המוזרקים לעומק זה מתחממים והופכים לקיטור, המאפשר הפקת חשמל או שימוש לחימום מבנים. אולם, קידוח לעומקים אלו הינו יקר וידרוש טכניקות קידוח חדשות בכדי להפוך כלכלי.

פיתוח של טכנולוגיית הגיאותרמיקה העמוקה יוכל לספק אנרגיה בלתי מוגבלת, נשלטת, ונקייה מכל מזהמים. אולם בפני הטכנולוגיה מכשולים רבים.

אנרגיית רוח בגבהים: ככל שמתרחקים מהקרקע מהירות הרוח עולה, ובגבהים קיימים זרמי רוח מהירים וקבועים שניתן לנצל לייצור חשמל. ישנן מספר חברות המנסות לפתח טכנולוגיות לניצול הרוח בגובה רב. הטכנולוגיות נחלקות לשתי קבוצות עיקריות: ייצור חשמל באמצעות עפיפונים דמויי מצנחי רחיפה שניתן לשלוט בהם באמצעות מתיחה ושחרור של כבלי העיגון. העפיפונים נעים במסלול דמוי הסיפרה 8 ומנגנון קרקעי מקבל את התנועה הכיוונית ומייצר חשמל; השיטה השנייה מבוססת על טורבינות שמורמות לגובה רב באמצעות דאונים או בלונים.

ישנן מספר חברות המנסות בימים אלו טכנולוגיות שונות לניצול הרוח בגבהים, אך עדין אין צפי להבשלת הטכנולוגיה ולהשגת כדאיות מסחרית.

אנרגיית רוח בים העמוק: בעולם מקובל לנצל את הרוח הנושבת בים וחוות רוח המקובעות לקרקעית הים קיימות כבר משנת 1991. חוות רוח אלו מאפשרות לעקוף את סוגיית השטח הדרוש להקמת חוות רוח ביבשה, הקירבה לאזרחים, ההשפעה הנופית והפגיעה בציפורים הנודדות. אולם, בישראל המדף היבשתי קצר יחסית, ואם רוצים להרחיק את הטורבינות מהחוף להקטנת ההשפעה הנופית, עומק הים מגיע לק"מ ויותר. בעומק כזה אין אפשרות לקבע את הטורבינות לקרקעית הים וכמענה לאתגר זה מתפתחת כיום ברחבי העולם טכנולוגיה של טורבינות רוח צפות. טכנולוגיה זו יקרה ודורשת "מצוף" עשוי פלדה במשקל **אלפי טונות** לכל טורבינה.

בישראל התחזית הנוכחית מצביעה על רוח חלשה יחסית בים התיכון, אף בעומק הים, ברמה שלא מצדיקה כלכלית הקמת מבנים מאסיביים כאלו. אולם, יחידת המדען הראשי במשרד האנרגיה והתשתיות יחד עם השירות המטאורולוגי פועלות לעדכון אטלס הרוחות לקבלת תחזית בעומק הים. עם עדכון האטלס והתקדמות בטכנולוגיות, ניתן יהיה לדעת באם קיים פוטנציאל מעשי להקמת טורבינות רוח צפות בישראל. סוגיה נוספת בישראל נוגעת לציפורי שיר הנודדות בעומק הים. משרד האנרגיה והתשתיות פועל לבחינה באמצעות מכ"ם ייעודי של נדידת הציפורים בכדי להבין את תבנית הנדידה.

אנרגיה סולארית בים: בישראל כמות גדולה של מתקנים סולאריים צפים על גבי מאגרי מים. להתקנה של מערכות צפות יתרונות רבים, אך מספר מאגרי המים בישראל מוגבל ובקרוב ימוצה פוטנציאל השטח. בעולם מכירים בבעיה זו ולאחרונה נבחנות טכנולוגיות של שדות סולאריים צפים בים. שדה סולארי צף בים יכול לאפשר להתמודד עם בעיית השטחים הקרקעיים, שהיא מורכבת במיוחד בישראל הצפופה. אולם, למערכות PV צפות על הים אתגרים טכניים רבים – מהתמודדות עם מי המלח הפוגעים בתשתיות ובציוד, דרך רסיסי מלח שיכסו את הפאנלים, השפעה על הסביבה הימית, התמודדות עם גלים וסערות ועד לשאלת מערכת ההשנאה והולכת החשמל חזרה אל החוף.

ככל שתבשיל הטכנולוגיה להקמת שדות PV צפים בים, נשקול להקים מערכות כאלו גם בישראל.

נספח ג': הנחות היסוד של מודל הביקוש

מודל הביקושים הכללי לאנרגיה בוחן את הביקושים העתידיים לצריכת אנרגיה סופית על בסיס עקרונות כלליים כפי שהוגדרו במודל האנרגיה הכולל (GEC – Global Energy and Climate Model) של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיה (IEA).[163]

ג.1. מבנה המודל

המודל מתבסס על מתודולוגיית "מלמטה-למעלה" (Bottom-Up), ואומד את הביקושים החל מרמת הצרכן הממוצע ועד לרמה הלאומית. המודל מתייחס למגוון משתנים, ומתייחס לכל מגזר בהתאם לקטגוריה אליו הוא שייך. כך למשל, ההתייחסות לכלי רכב שונה מתעופה, הניתוח של צריכת האנרגיה במבנים פרטיים שונה מאופן הניתוח של התעשייה, וכדומה. באמצעות המודל, ניתן לבחון את תחזית הצריכה עבור כל מגזר באופן נפרד, ולאגם את כלל המגזרים או חלקם. כך, ניתן לבצע ניתוח נתונים מגוון שיאפשר להפיק תובנות המתייחסות למשקים שונים או למגזרים שונים בהתאם לצורך.

מודל הביקושים מתבסס על תחזית צריכת החשמל שפורסמה על-ידי חברת נגה, התחזית מביאה בחשבון את ההשפעה של המגזרים השונים על צריכת החשמל. תחזית חברת נגה מתייחסת לכלל הביקושים לחשמל במשק, למעט המגמות הצפויות במגזר התחבורה.[164] הביקושים למגזר התחבורה חושבו במודל על בסיס נתוני הלמ"ס בצירוף מקורות נוספים כדוגמת נתוני משרד התחבורה, מנהל הדלקים במשרד האנרגיה וכד'.

מודל הביקוש חולק למגזרים הבאים:

1. **מגזר התחבורה היבשתית** (ללא מסילה) – המודל בוחן את המעבר מתחבורה מונעת דלקים פוסיליים לתחבורה מונעת דלקים נטולי פליטות. בשל המגוון במשק התחבורה, המודל מתייחס לתתי קטגוריות במשק התחבורה (כלי רכב פרטיים, משאיות, תחבורה ציבורית וכדומה).
2. **מגזר התחבורה המסילתית** (רכבות) – מגזר זה הוא חלק ממגזר התחבורה, אך אופן בחינת המודל שונה מהמתודולוגיה הכללית של מגזר התחבורה. הסיבה לכך היא שצריכת האנרגיה נקבעת בין היתר על בסיס כמות קרונות הנוסעים שעשויה להשתנות בין תחנות או ממשקל שמועמס על הרכבת.
3. **מגזר התעופה** – המודל בוחן את כמות הק"מ הממוצעת לנוסע בכל שנה. הבחינה מתבססת על ממוצע משוקלל לק"מ\נוסע מוכפל בכמות הנוסעים הגדלה בהתאם לגידול באוכלוסיה. הנסועה האווירית השנתית מוכפלת בנצילות הטכנולוגית הרלוונטית, כדי לאמוד את היקף צריכת הדלקים העתידית במשק התעופה.
4. **מגזר הספנות** – המידע על מגזר הספנות לוקה בחסר והוא כמעט ואינו כולל נתונים על מרחקי ההפלגה של ספינות, על ציי הספינות, ועל היקף ותדירות התדלוק. לכן, המודל מתבסס על היקף צריכת הדלקים השנתית כפי שמדווח על ידי מינהל הדלק והגז במשרד האנרגיה והתשתיות.[165]
5. **מגזר התעשיה** – תמהיל האנרגיה המשמש את התעשיה עובר שינויים רבים בשנים האחרונות. כך למשל, ישנו גידול קבוע בצריכת גז טבעי לתעשיה, בין היתר בשל חיבור מפעלים חדשים לרשת החלוקה והגדלת האספקה. במקביל למגמה זו, יותר צרכנים במגזר זה מסיטים את צריכת הדלקים לחשמל. יחד עם זאת, קיים קושי לספק את כלל צורכי האנרגיה למגזר זה באמצעות חשמל בשל הטמפרטורות הגבוהות בהן עובדים חלק מהמפעלים, והונח כי מפעלים אלו יעברו לשימוש במימן.
6. **מגזר ביתי ומסחרי** – המודל בוחן את צריכת החשמל והחום של המגזר הביתי והמסחרי, ואת המעבר מגפ"מ ודלקים לחשמל.

---

[163] מודל GEC IEA.

[164] תחזית הביקוש של חברת נגה שהוצגה ביום 03.08.2022, המודל מתייחס לתחזית ללא כלי רכב.

[165] נתוני צריכת הדלקים משרד האנרגיה .

7. **אחר** – כולל בין היתר את מגזר החקלאות, הרש"פ, התפלה וכדומה. נתונים לגבי קטגוריות אלו הם אקסוגניים ומתקבלים כחלק משלים לביקוש החשמל (ככלל, מחושב על-ידי חברת נגה).

ג.2. הנחות רוחביות

1. **גידול האוכלוסייה** המודל מבוסס על תחזית הלמ"ס,[166] לפיה עד שנת 2050 האוכלוסייה בישראל צפויה להגיע לכ-15.7 מיליון תושבים, התחזית מגלמת גידול שנתי ממוצע של כ- 1.7% באוכלוסייה.

2. **הביקוש לצריכת החשמל** מבוסס על התחזית של חברת נגה, לפיה הצמיחה השנתית הצפויה היא כ-2.7%.[167]

3. מאחר שהביקוש לחשמל מורכב ממגזרים המשתנים בקצב שונה ומשפיעים אחד על השני (תעשייה, מסחרי וביתי, מים, חקלאות ואחר), לשם פישוט המודל ומאחר שהמגמה המרכזית במשק היא חשמול, **הונח כי החלק היחסי של הביקוש לחשמל בכל מגזר ישאר ללא שינוי.** בהתאם לכך החלק היחסי של כל מגזר יהיה בדומה לחלקו כפי שהיה בשנים 2015-2022.

4. **הונח שאיבודי רשת החשמל** הם כ-7.5% וכי הם מגולמים בתחזיות חברת נגה. כדי להימנע מספירה כפולה של איבודי רשת, המודל מנטרל איבודים אלה מתחזיות נגה, ומוסיף אותם לאחר חישוב הצריכה הסופית של כלל המגזרים. בנוסף, סביר כי בעתיד הנצילות תעלה והיקף איבודי הרשת ירד, אך בשל חוסר הוודאות בנושא המודל מתעלם מכך בשלב זה.

5. **טווחי כמויות במגזר התחבורה:** המודל מניח מספר תרחישים עבור שלושה פרמטרים במגזר התחבורה - כמות כלי רכב, היקף נסועה ושיפור טכנולוגי. על אף שהפרמטרים מושפעים אחד מהשני, ועל מנת לאפשר טווח כללי של תחזית, בכל תרחיש הונח כיוון זהה על כלל הפרמטרים. לדוגמה, למרות שהיקף נסועה וכמות כלי רכב הם תחליפיים, בתרחיש גבוה, כמות כלי הרכב תגדל אך במקביל לכך תגדל גם היקף הנסועה.

6. **נתונים גאוגרפיים ודמוגרפים:** גודלה של ישראל משחק תפקיד מרכזי בהיקף הנסועה הנדרש בין תחנות ביניים וכן בכל הנוגע לרמת מינוע. רוחבה של ישראל הוא כ-120 ק"מ (בקעת הירדן ועד הים) ואורכה הוא כ-520 ק"מ (מקריית שמונה ועד אילת), מכאן שבטכנולוגיית הסוללות הקיימת כיום רכב חשמלי יכול לתת מענה, בכפוף לפרישה מספקת של עמדות טעינה, כמעט לכל נסיעה בארץ. בנוסף, כ-90% מהנסיעות לכלל המטרות בישראל הן למרחק הקטן מ-10 ק"מ.[168]

ג.3. הנחות מרכזיות מגזר התחבורה

תחזית חברת נגה כללה את צריכת החשמל לטעינת כלי רכב פרטיים בלבד. היות ועבודה זו בוחנת את כלל משק התחבורה, היא מתייחסת לתחזית נגה **ללא רכיבי התחבורה המופיעים בה** ומוסיפה עליה את התחזית המפורטת לכלל משק התחבורה (כלי רכב פרטיים, אוטובוסים, משאיות, רכבות וכו'). התחזית מתבססת על תחזיות משרד התחבורה לכמויות כלי הרכב העתידיים והמגמות הצפויות בתחבורה הציבורית והשימוש בה. מתחזיות אלו נגזרה צריכת האנרגיה הצפויה אשר תורגמה לחשמל ולדלקים נקיים.

[166] תחזית למ"ס 2020-2065.

[167] התחזית של חברת נגה מגלמת את הביקוש לחשמל גם של הרשות הפלסטינאית.

[168] סקר הרגלי נסיעה משרד התחבורה.

ג.3.1. כלי רכב פרטיים

גידול במספר כלי הרכב – תחזית הגידול במספר כלי הרכב הפרטיים מבוססת על נתוני משרד התחבורה אשר העריך כי עד לשנת 2030 מספר כלי הרכב בישראל יעמוד על כ-4.3 מיליון, ועד לשנת 2050 כ-6 מיליון. המשמעות של הנחה זו היא גידול ממוצע שנתי של כ-2.4% שנתי (על פני שתי התקופות).

נסועה ממוצעת – בהתאם לנתוני הלמ"ס, בעשור האחרון הנסועה הממוצעת בכלי רכב פרטיים נמצאת במגמה יציבה יחסית (ירידה ממוצעת של כ-0.8%), ועומדת על כ-15.5 אלף ק"מ בשנה.[169] בתוך כך, בבחינת נתוני הנסועה הממוצעת של כלי רכב היברידיים וחשמליים נמצא כי הנסועה ברכבים אלו גבוהה יותר, ועומדת על כ-20 אלף ק"מ בשנה. הנחנו כי פער זה נובע עקב מעבר מוקדם לחשמל של נהגים הנוסעים קילומטרז' גבוה, ולכן הנסועה השנתית הממוצעת בכלל הרכבים הפרטיים (גם היברידים וחשמליים), תתכנס לממוצע של כ-15.5 אלף ק"מ בשנה עד לשנת 2040, ומשם תישאר קבועה.

שיפור טכנולוגי – המודל הניח שיפור טכנולוגי ביעילות האנרגטית של כלי הרכב (צריכת אנרגיה לק"מ), כך שבשנת 2050 יחול שיפור של כ-20% (ביחס לשנת 2020). בנוסף, הונח כי צריכת האנרגיה של קוט"ש לק"מ כוללת אובדן בטעינה של כ-10%.

כללי – בהתאם ליעדי הממשלה,[170] הונח כי עד שנת 2030 לפחות 95% מכלי הרכב הפרטיים שימכרו יהיו נטולי פליטות. על בסיס יעד זה חושב כי עד שנת 2050 כל הרכבים הפרטיים שיסעו בכבישי ישראל (למעט מספר חריגים זניחים) יהיו חשמליים. להנחה זו משמעות רבה מאחר שכלל הרכבים הפרטיים מהווים כ-85% מסך כלי הרכב (לרבות אוטובוסים ומשאיות), ומעל 95% מצריכת הבנזין במשק התחבורה.

ג.3.2. משאיות

משאיות עד 3.5 טון – מדובר במשאיות קלות וטנדרים ולכן המודל מניח חישמול בדומה לכלי הרכב הפרטיים, אך בעיכוב של 5 שנים.

משאיות מעל 3.6 טון – יעדי הממשלה קובעים כי עד לשנת 2035, כ-50% מכלי הרכב מעל 3.5 טון יהיו נטולי פליטות.[171] מאחר שישנו שוני בפרטים הטכניים (לרבות ההשפעה של המשקל) בין סוגי המשאיות השונות, המודל מתייחס באופן שונה למשאיות במשקל 3.6-12 טון לבין משאיות מעל 12 טון. בשל האתגרים הנובעים מפערי המשקל והמינוע, הונח כי משאיות מעל 12 טון יעברו גם לחשמל וגם להנעה מימנית, ובקצב איטי יחסית.

גידול במספר המשאיות – הונח המשך מגמות קיימות, כך שהמודל מניח גידול שנתי ממוצע של כ-3.5% בשנה.

נסועה ממוצעת – בשל אופי השימוש במשאיות הונח כי הנסועה תישאר ללא שינוי.

שיפור טכנולוגי – המודל הניח שיפור טכנולוגי לינארי ביעילות האנרגטית של המשאית (צריכת אנרגיה/ק"מ), כך שבשנת 2050 יחול שיפור שבין 15-22% (ביחס לשנת 2020). השיפור הטכנולוגי תלוי במשקל המשאית.

ג.3.3. אוטובוסים

גידול במספר האוטובוסים – מספר האוטובוסים מבוסס על נתוני הלמ"ס, וכולל הבחנה בין אוטובוס גדול לאוטובוס זעיר.[172] הגידול השנתי של כלל האוטובוסים מבוסס על נתוני עבר וכולל אחוז גידול הנמצא במגמת ירידה. המודל

[169] מתוך נתוני למ"ס נסועה של כלי רכב שנת 2022.
[170] מתוך החלטת ממשלה מס' 542 קידום תחבורה נקייה ודלת פחמן.
[171] שם.
[172] מתוך נתוני למ"ס של כלי רכב שנת 2022.

הניח עמידה ביעדי הממשלה,[173] לפיהם עד שנת 2026 כל האוטובוסים העירוניים החדשים שיירכשו יהיו נטולי פליטות, ועד שנת 2035 50% מהאוטובוסים מעל 3.5 טון יהיו נטולי פליטות. בהתאם להחלטה זו, ההנחה היא כי בשנת 2050 האוטובוסים העירוניים יהיו נקיים, והאוטובוסים הבין-עירוניים יהיו נטולי פליטות.

נסועה ממוצעת – הנסועה הממוצעת של אוטובוס גדול נעה סביב 57 אלף ק"מ בשנה, ואנו מניחים כי לא תשתנה, אך יהיה גידול שנתי ממוצע של כ-3% בכמות האוטובוסים.

שיפור טכנולוגי – הונח כי שיפורים טכנולוגיים יובילו לשיפור של 22% בצריכת האנרגיה לק"מ. בנוסף הונח כי צריכת החשמל כוללת אובדן בטעינה של כ-10%.

ג.3.4. רכבות

המודל מנתח באופן נפרד את סוגי הרכבות – רכבת כבדה (רכבת ישראל), רכבת קלה (בדוגמת הרק"ל בירושלים והדנקל בגוש דן) ואת המטרו.

גידול במספר הנוסעים – כמות הנוסעים מבוססת על התכנית האסטרטגית לשנת 2040 של משרד התחבורה.[174] כיוון שהביקוש וכמות הנוסעים ברכבות משפיעה באופן אינהרנטי על היקף הנסיעות, המודל התייחס לכמות הנסיעות ללא תלות בכמות הנוסעים בכל קרון/רכבת.

נסועה ממוצעת – הנסועה השנתית חושבה על בסיס הגידול בהיקף הנסיעות בהתאם לתכנית האסטרטגית לשנת 2040 של משרד התחבורה. לפי התכנית, צפוי גידול של 156% במספר רכבות הנוסעים הכבדות, וכמות הנסיעות צפויה לגדול מכ-53 מיליון נסיעות בשנת 2019 לכ-306 מיליון נסיעות בשנת 2040. הנסועה הממוצעת ברכבות הקלות והמטרו חושבה לפי ממוצע נתונים שהתקבל מחברות התשתית השונות שהעריכו את התדירות הצפויה ואת תוספת הנסועה הצפויה לכל קו.

שיפור טכנולוגי – הונח שיפור בטכנולוגיות החישמול שיוביל להתייעלות של עד כ-10% עד לשנת 2050.

ג.3.5. תעופה

גידול במספר הנוסעים – המודל הניח גידול במספר הנוסעים על בסיס הגידול באוכלוסייה, וכתוצאה מכך גם גידול במספר הטיסות היוצאות.

נסועה ממוצעת – הנסועה חושבה על בסיס נוסע/ק"מ בצירוף הגידול בכמות הנוסעים. הנסועה האווירית השנתית מוכפלת בנצילות הטכנולוגית הרלוונטית, כדי לאמוד את היקף צריכת הדלקים העתידית במשק התעופה.

שיפור טכנולוגי – המודל הניח שימוש בדלקים נקיים לתעופה (SAF), בהם לא צפוי שיפור טכנולוגי.

ג.3.6. ספנות

המידע על מגזר הספנות לוקה בחסר והוא כמעט ואינו כולל נתונים על מרחקי ההפלגה של ספינות, על ציי הספינות, ועל היקף ותדירות התדלוק. לכן, המודל מתבסס על היקף צריכת הדלקים השנתית המפורסמת על ידי מינהל הדלק והגז במשרד האנרגיה והתשתיות[175] וגידול עתידי על בסיס גידול בתמ"ג.

ג.4. הנחות מרכזיות מגזר התעשייה

במסגרת המודל, הונח כי התעשייה הישראלית תישאר יחסית יציבה מאחר שישראל אינה מדינה תעשייתית במהותה. הביקוש לתעשייה מורכב משלוש קטגוריות-

---

[173] החלטת ממשלה 171.

[174] חזון אסטרטגי 2040 – רכבת ישראל.

[175] נתוני צריכת הדלקים משרד האנרגיה.

1. **פעילות שוטפת של המפעלים** (חשמל) –הביקוש לפעילות השוטפת נגזר מתחזיות נגה ומשקף את צריכת החשמל לתפעול ותחזוקה. רכיב זה יגדל באותו הקצב של כלל הביקושים לחשמל במשק (2.7% בשנה)
2. **חומרי גלם** (נפטא, סולר וכו') – מאחר שבשנים האחרונות תמ"ג התעשייה (בניכוי כרייה, חציבה, ייצור מזון ומשקאות) גדל בממוצע בכ-1.5%, הונח כי גם בעתיד המגמה תישאר זהה.
3. **אנרגיית חום** (מזוט, גז טבעי וכו') – המודל הניח מעבר לאנרגיות נקיות במפעלים אלה, ככל הניתן לחשמל. מפעלים שאינם ניתנים לחישמול יעשו שימוש בגז טבעי (עם תפיסת פד"ח) או מימן.

ג.5. הנחות מרכזיות מגזר ביתי ומסחרי

המשק הביתי והמסחרי צורכים מעט גפ"מ ודלקים לחימום. ההנחה המרכזית של המודל ביחס למגזר זה היא חשמול כלל הצריכה הביתית והמסחרית. בנוסף הונח גידול בצריכת החשמל בהתאם לחלק היחסי של המגזר בתחזיות של נגה.



משרד האנרגיה והתשתיות

www.energy.gov.il