

המשרד להגנת הסביבה



الوزارة لحماية البيئة  
Israel Ministry of Environmental Protection

# מעבר למשק חשמל זל פחמן

ינואר 2022

בחינה טכנית-כלכלית להעמקת יעדי  
האנרגיות המתחדשות ומפת הדרכים  
ליישומן עד לשנת 2030



## הוכן ע"י:

ד"ר גיל פרואקטור, ד"ר רותי קירו

המשרד להגנת הסביבה

רון קמרה, אברי שכטר

חברת אקוטריידרס בע"מ

שמעון פרנט

יאשה חאין, אברהם פל

Ydan enterprise LTD

הפורום הישראלי לאנרגיה

## סיוע בהכנת הדו"ח:

שולי נזר, אילה גלדמן, פנינה (פרל) קפלן, רן אברהם, ג'רמי בן-שלום, אביטל עשת

המשרד להגנת הסביבה

איתן פרנס, דין רז

איגוד חברות אנרגיה ירוקה לישראל

ערן טל

וולטה סולאר בע"מ

הילה חדד

נתיבי ישראל

שי פורת

חברת ענבר אנרגיה סולארית

אייל בהרב

גולן סולאר בע"מ

חוני קבלו, שמרית יסער

אנלייט אנרגיה מתחדשת בע"מ

מאיה קרבטרי

פורום ה-15

עמיחי דרורי

מרכז השלטון המקומי

גל שופרוני

רשות החשמל

# תמצית התקציר

המערכת ושיפור הבטחון האנרגטי נדרש להתקין כ- 5.5 גיגה- ואט הספק אנירה (קיבולת- 33 גיגה- ואט שעה). העבודה מראה לראשונה כי הספקי ההשנאה ברשת החלוקה הצפויים ב-2030 יספיקו לקליטת 40% אנרגיות מתחדשות. העבודה מגדירה את הפעולות האופרטיביות הנדרשות לשמירה על שרידות המערכת, ובדגש על: קביעת סדר עדיפויות מוכוון מתחדשות בפיתוח הנוכחי של מערך השנאים, פעולות רגולציה לרבות הכפפת יחידות פרטיות Must Take למנהל המערכת, אחידות בקריטריון העומס על השנאים, רגולציה המאפשרת אגרגטורים הכפופים למנהל המערכת והשקעות בהיקף מצטבר של כ-1 מיליארד \$ במערכות שליטה, בקרה וניטור על רשת החלוקה. תוצאות העבודה מראות כי המשק ירוויח כ-6 מיליארד \$ עד 2030 מהעלאת שיעורי המתחדשות וייתר הצורך בהקמת תחנות כוח פוסיליות חדשות נוספות מעבר למאוסרות היום עד לשנת 2030. לסיכום, העבודה מציגה כי קיימת היתכנות למעבר למשק חשמל דל פחמן, על ידי מתווה של צעדים אופרטיביים, כבר בעשור הקרוב.

על מנת להתמודד עם משבר האקלים וכחלק מההסכמים הבינלאומיים אשר הושגו בוועידת האקלים בגלזגו בסוף 2021 נדרשת הממשלה להעמיק את היעדים להפחתת פליטות גזי חממה עד לשנת 2030, ולעדכן את תכנית הפעולה ליישומן. משק החשמל הוא המקור העיקרי לפליטת גזי חממה ומזהמי אוויר בישראל וחיבתו תתעצם אף יותר בעקבות תהליכי חשמול התחבורה והתעשייה. על כן, יש צורך בהאצה של הפחתת הפליטות ממשק החשמל בעשור הנוכחי באמצעות העלאת שיעורי היצור מאנרגיות מתחדשות. עבודה טכנית-מערכתית וכלכלית מקיפה שביצע המשרד להגנת הסביבה מראה כי ניתן להעלות את שיעורי האנרגיות המתחדשות המיוצרות על גבי השטחים המבונים, כך שישראל תוכל לשמור על השטחים הפתוחים והמערכות האקולוגיות החיוניות. מהעבודה עולה כי ניתן טכנית ותפעולית-מערכתית להעמיק את היקפי הפחתת פליטות גזי החממה ממשק החשמל ל 42% הפחתה בשנת 2030 במקום היעד הנוכחי של 30%. הפחתה זו תושג באמצעות הגדלת שיעור המתחדשות ל 40%, שהם כ-23 גיגה ואט הספק ברובו סולארי על רשת החלוקה, אשר יותקנו על גבי שטחים מבונים כמו גגות, חניונים, מאגרים, בתי עלמין ותשתיות. לצורך שמירה על שרידות



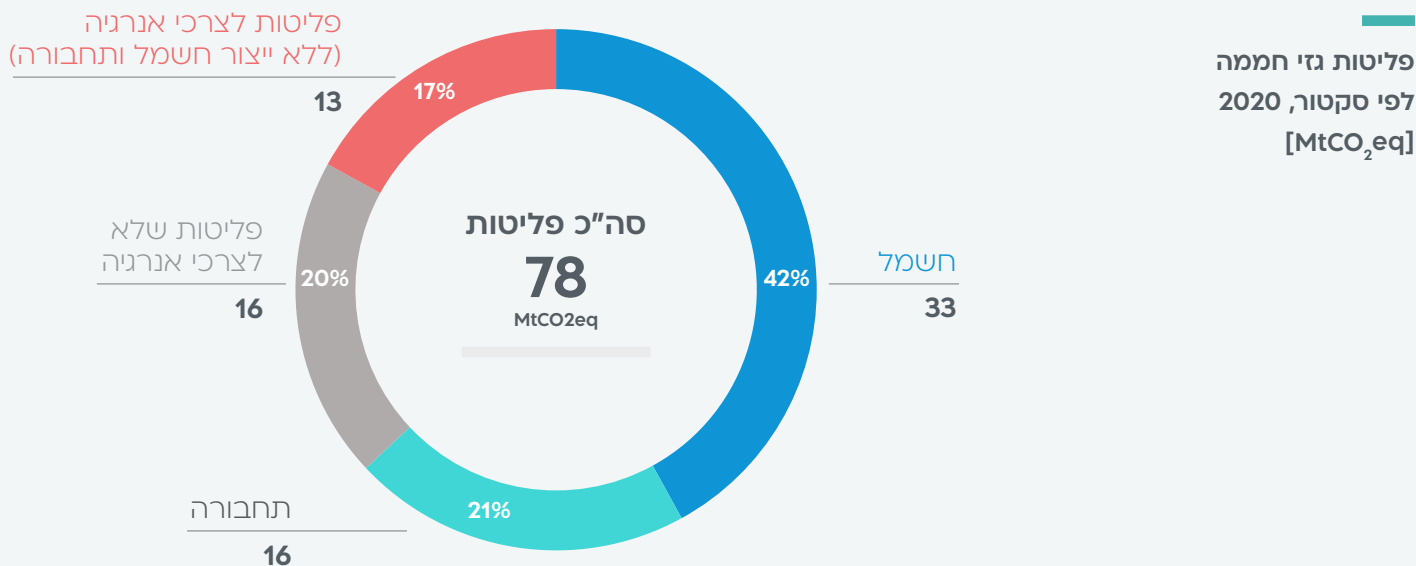
# חשיבות משק החשמל לישראל דלת פחמן

## משק החשמל הוא המשפיע המרכזי על פליטות גזי חממה ועל משבר אקלים

המחויבות הבינלאומית של הממשלה היא לפעול למעבר לכלכלה נקיה, בריאה ומשגשגת. ישראל הצטרפה למדינות העולם המפותחות והתחייבה לאיפוס נטו של פליטות גזי החממה בשנת 2050, בהתאם להכרזת ראש הממשלה, נפתלי בנט, ביום ה-1 בנובמבר 2021, בוועידת האקלים בגלגו. המשמעות המעשית המרכזית של מחויבות זו היא שעל ישראל לסיים את תלותה במקורות האנרגיה הפוסילים, נפט, פחם וגז, ולעבור למשק חשמל מבוסס אנרגיות מתחדשות ואגירה. בנוסף, בהסכמי ועידת גלזגו נקבע כי כל המדינות, לרבות ישראל, נדרשות לבחון ולעדכן בתוך שנה את יעדי הפחתת פליטות גזי חממה לשנת 2030 כך שיעמדו בהלימה עם הצורך הגלובאלי להפחתה של 45-50% מפליטות גזי חממה בעשור זה.

סקטור החשמל בישראל, כמו בכלכלות מפותחות רבות אחרות, הוא מקור הפליטה העיקרי של פליטות גזי חממה ומזהמי אוויר. חשיבותו של סקטור זה צפויה להתעצם אף יותר בעקבות המעבר של סקטור התחבורה וחלקים משמעותיים מהתעשייה לשימוש בחשמל כמקור האנרגיה העיקרי שלהם.

תרשים 1: פליטות גזי החממה בישראל, MtCO<sub>2</sub>eq, 2020<sup>1</sup>



המעבר העולמי למשק חשמל דל פחמן, המבוסס על שילוב אנרגיות מתחדשות ואגירה, מהווה את הבסיס לאסטרטגיית המעבר העולמי לכלכלה דלה עד מאופסת פליטות גזי החממה.

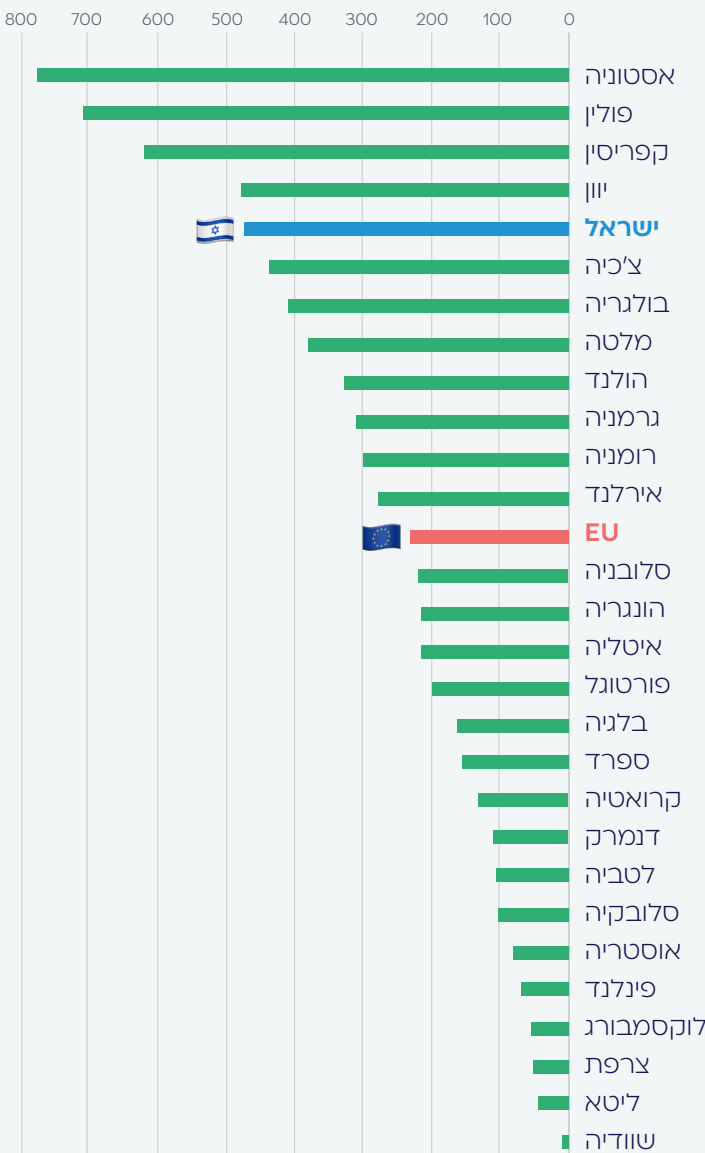
<sup>1</sup> מערך לאומי לניטור, לדיווח וליאמות פליטות גזי חממה (MRV), המשרד להגנת הסביבה, 2020. פליטות של מזהמי אוויר משריפת דלקים, למ"ס 2020.

# בישראל שיעור האנרגיות המתחדשות נמוך ועצימות הפליטות גבוהה ביחס למדינות האיחוד האירופי

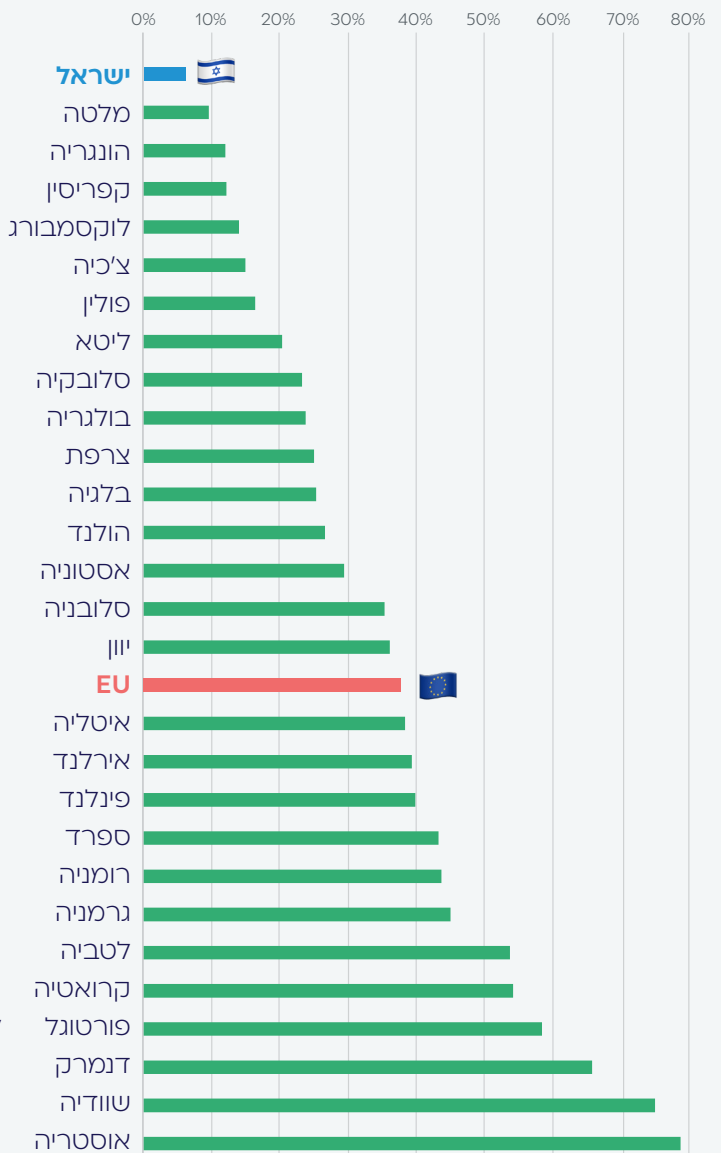
שיעור האנרגיות המתחדשות בתמהיל הדלקים המשמש לייצור חשמל בישראל נמוך משמעותית ממרבית מדינות ה-OECD האחרות. בשנת 2020 אחוז המתחדשות בישראל היה כ-6%, לעומת הממוצע האירופי של 37%, כפי שניתן לראות בתרשים 2. התרומה הנמוכה של מתחדשות לתמהיל יצור החשמל בישראל באה לידי ביטוי במדד עצימות הפליטות לקוט"ש חשמל מיוצר בישראל (כמות גזי חממה הנפלטים בממוצע לקילוואט שעה מיוצר). בישראל נפלטים כמעט פי 2 יותר פליטות גזי חממה בממוצע לכל קוט"ש מאשר באיחוד האירופי. בהסתכלות קדימה מדינות רבות כמו הוואי, דנמרק, בליז, פורטוגל, גואטמלה, ספרד, גרמניה ומדינות נוספות קבעו יעדי פליטות גזי חממה בממוצע של 100% עד 2050 והעלו בהתאם את יעדי הביניים שלהם ל-50% ואף יותר לשנת 2030, מתוך הצורך לעמוד ביעדי הפחתת הפליטות המשקיים שלהן כבר בעשור הנוכחי.

תרשים 2: אחוז המתחדשות ועצימות הפליטות לקוט"ש באיחוד האירופי בשנת 2020<sup>2</sup>

עצימות פליטות גז"ח בשנת 2020  
מייצור חשמל [gCO<sub>2</sub>eq/KWh]



שיעור אנרגיות מתחדשות מתוך סך צריכת החשמל בשנת 2020



מטרת עבודה זו היא בחינת ההיתכנות והצעדים האופרטיביים הנדרשים על מנת להעמיק את הפחתת הפליטות במשק החשמל כבר בעשור הקרוב, באמצעות העלאת שיעורי החדירה של אנרגיות מתחדשות בשילוב אנרגיה.

לצורך כך הקים המשרד להגנת הסביבה צוות מקצועי המורכב מגורמי מקצוע בעלי ניסיון רב בתכנון וניהול משק החשמל ורשת החלוקה בישראל. העבודה בוצעה בשלבים המרכזיים הבאים:

1. ניתוח טכני ותפעולי של מערך הייצור ורשת החלוקה, תוך אפיון האתגרים הצפויים בניהול מערכות אלו, בהתבסס על מתקני אנרגיה מתחדשת מבזרים כמו גם את הפתרונות האפשריים.
2. ביצוע סימולציות שעתיות של פעולת מערך הייצור והפעלת מודל אופטימיזציה כלכלית.
3. זיהוי האתגרים הצפויים בניהול מתקני אנרגיה מתחדשת ואנרגיה מבזרים, והצעה לפתרונות.
4. בחינה כלכלית למעבר למשק חשמל זל פחמן אל מול חלופת היעד הנוכחי, 30% אנרגיות מתחדשות בשנת 2030.
5. זיהוי חסמים העומדים בפני השוק ליישום וחדירה של שיעורי אנרגיה מתחדשת במרחב המבונה.
6. גיבוש הפעולות ואמצעי המדיניות הנדרשים בכדי לשלב אנרגיות מתחדשות במרחב המבונה, ולהתגבר על החסמים שזוהו, בין השאר, על ידי ראיונות עם מומחים מחברות אנרגיות מתחדשות בישראל, המלצות משיתוף ציבור שנעשה ע"י רשות החשמל ועבודת הצוות המקצועי של המשרד.



# מטרת העבודה ומתודולוגיה



הרקע לכתיבת הדוח  
השקת מהלך מעבר ישראל  
לכלכלה דלת פחמן

משק החשמל הוא המשפיע  
המרכזי על פליטות גזי חממה

## ינואר 2022

עבודה מקיפה הכוללת  
מענה בנושא רשת החלוקה

## יוני 2020

בחינת אגירה כחלופה  
להספק קונבנציונאלי

## ינואר 2020

בחינת פוטנציאל ייצור  
סולארי בשטחים מבונים

דוחות

ניתוח מקטע  
הייצור

הקמת צוות  
מומחים

גיבוש  
מתודולוגיה

מתדולוגיית  
כתיבת הדוח

ניתוח מקטע  
החלוקה

ניתוח  
כלכלי

זיהוי חסמים  
ואפיון פתרונות

גיבוש אמצעי  
מדיניות

# האתגרים והצעדים הנדרשים בעשור הקרוב לשילוב אנרגיות מתחדשות במרחב המבונה

## התאמת מערך הייצור לשילוב אנרגיות מתחדשות

ביסוס מערך ייצור החשמל על אנרגיה סולארית ממערכות PV צפוי לייצר מספר אתגרים מרכזיים למקטע הייצור: (1) קיטום (אי ניצול) של הייצור הסולארי (2) שינויים חדים בעומס השיורי (עקום הביקוש השעתי לחשמל, אשר מתקבל בעקבות ניכוי, מעקום העומס המקורי, של החשמל שמסופק על ידי מתקני אנרגיה מתחדשת בכלל ומערכות PV בפרט). הסיבות לאתגרים אלו מובאות להלן:

- מערכות PV מייצרות חשמל בהתאם לשעות השמש ועוצמת הקרינה, המשתנה בין שעות היממה ובין עונות השנה, לעיתים אין התאמה בין פרופיל הייצור הסולארי לבין צרכי המערכת בכלל ופרופיל הביקוש לחשמל בפרט.
- תיעדוף ייצור בתחנות כוח קונבנציונאליות על חשבון האנרגיה הסולארית, וזאת משתי סיבות עיקריות:

**1.** מגבלות טכניות של תחנות הכוח, ובייחוד ההספק המזערי בו ניתן להפעיל את היחידה, זמן הפעלה והפסקה מינימלי. כתוצאה מכך, תחנות כוח שאינן ניתנות להפעלה מתחת להספק מסוים ואשר דורשות זמן רב לכיבוי והתנעה מחדש פועלות במשטר Must-Run גם על חשבון קליטת אנרגיה סולארית. מגבלות נוספות שמביאות להפעלת תחנות כוח קונבנציונאליות גם במחיר אי ניצול חשמל סולארי הן קצב עליית ירידת הספק מרבי, וזמני התנעה מינימליים.

**2.** מגבלות רגולטוריות-מסחריות המחייבות את מנהל המערכת לתעדף חשמל אשר נמכר על ידי יצרני חשמל פרטיים לצרכני חשמל ספציפיים במסגרת הסכמים בילטרליים (הספק Must-Take).

- שמירה על גמישות הייצור בזמן אמת עקב אי וודאות בתחזית הביקוש השעתי, המחייבת את מנהל המערכת להבטיח את יכולת המערכת להוריד (Footroom) או להעלות (Headroom) את ההספק במערכת בהתאם לביקוש בפועל.
- תגובה לשינויי תדר- הפסקה מאולצת של יחידת ייצור גורמת לירידת תדר, ולשם ייצוב התדר יש צורך בהעלאת ההספק ביחידה אחרת.

הניתוח הטכני-תפעולי- והסימולציות הטכנו - כלכליות שבוצעו במסגרת עבודה זו, הראו כי ניתן לשלב אנרגיות מתחדשות ע"י הקמת מתקני אנרגיה הנשלטים על ידי מנהל המערכת, גיבוש דרישות לשליטת מנהל המערכת במתקני PV, גיבוש מסגרת רגולטורית לאספקת שירותים נלווים (ancillary services) ע"י מתקני אנרגיה ו-PV, העברת כל היצרנים לשיטת העמסה מרכזית, תזמון תחזוקת תחנות כוח תוך התחשבות בייצור סולארי עודף, הקמת מערך חיזוי סולארי מתקדם המותאם לצרכי המערכת ויישום מערכת ושיטות מתקדמות לחיזוי ביקושים לחשמל. אמצעים אלו יסללו את הדרך למעבר ישראל למשק חשמל דל פליטות.



## התאמת רשת החלוקה לשילוב אנרגיות מתחדשות במרחב המבונה

שילוב אלפי מגה וואט של אנרגיות מתחדשות בישראל, בעת זאת, מתייחס בעיקר לשילוב של מערכות PV. על מנת לצמצם את הפגיעה בשטחים פתוחים ולקרר את ייצור החשמל לאזורי הביקוש, יש לפעול לשילוב מערכות אלו בשטח המבונה אשר ישפיע באופן ניכר על רשת החשמל, ובפרט על רשת החלוקה במתח גבוה ומתח נמוך. לפיכך, יש לאפשר את המשכיות ההפעלה הטכנו-כלכלית האופטימלית של המערכת כולה, תוך שמירה על שרידות, אמינות, יעילות ובטיחות המערכת. זאת באמצעות הפעולות הבאות:

**א. שמירה על יחס הספק מתקן סולארי- שנאי - השינוי העיקרי הנדרש ברשת החשמל הוא מעבר מרשת חלוקה רדיאלית המאופיינת בזרימת אנרגיה מתחנות כוח לצרכנים, לרשת דו-כיוונית המאפשרת זרימות עומס מהצרכן לרשת ובין הצרכנים השונים. שינוי זה עלול לגרום לפגיעה בתפקוד התקין של מערכות ההגנה ברשת החשמל ויצירת עומס חריג על המערכת. אתגרים אלו יתרחשו רק כאשר ההספק הכולל של מערכות הפאנלים הסולאריים המחוברות לנקודה מסוימת במערכת החלוקה גדול מההספק המרבי שרכיבי המערכת הקיימים יכולים לשאת באותה נקודה. כלומר, שמירה על יחס הספק מתקן סולארי להספק השנאי מוגדר, נדרשת על מנת להצליח לחבר פאנלים סולאריים לרשת החלוקה.**

כבר כיום, בנקודות מסוימות מגבלה זו מונעת את החיבורים של מתקני הפאנלים הסולאריים. לכן, יכולת ניצול מלוא פוטנציאל ההתקנה ברשת החלוקה כרוכה ביישום מוצלח של תכנית חברת החשמל לשדרוג קווי הרשת אשר תגדיל את היקף הפאנלים הסולאריים שניתן להתקין ברשת החלוקה, כמו גם פיזור גאוגרפי אופטימלי של המתקנים באזורים שונים במדינה על מנת להימנע מעומסי יתר בתחנות משנה. כמו כן, התקנת האגירה במקומות האופטימליים במתח הנמוך והגבוה, לצורך הבטחת הגמישות הנדרשת במערך הייצור, אף היא נותנת מענה להקלת העומסים ברשת ותגדיל משמעותית את פוטנציאל ההתקנה.

**ב. ניהול מערכת מבוצרת ברשת החלוקה ע"י המערכת הארצית (אגרגטורים) - בכדי לייצר את היכולות הטכניות שיאפשרו את ניהול המערכת המבוצרת, יש לפעול להשקעה בתשתיות הבאות:**

- ניהול השקעה בתוכנה והטמעת מערכת DMS (Distribution Management System) אשר תאפשר מעקב אחר ייצור והביקוש לחשמל ותאפשר אופטימיזציה של התהליך, עבור רשת החלוקה.
- השקעות בחומרה, חיבור כלל מערכות הפאנלים הסולאריים ואגירה ברשת החלוקה למערכת זו, וזאת בכדי לאפשר ניהול מרכזי של המערכות המבוצרות בחבילות של כ-50 עד 100 מגו"ט עבור שירותי מערכת.

מסקנות העבודה הראו כי הספק השנאים המתוכנן ע"פ תכנית השדרוג הקווים הצפויה של חברת חשמל ותוספת אגירה במקומות הייעודים מאפשרים מבחינה טכנית ותפעולית שילוב האנרגיות המתחדשות במרחב המבונה, תוך הבטחת הפעולה התקינה של רשת החלוקה, עם השקעות תוספתיות מועטות ויצירת אסדרות רגולטוריות שיאפשרו זאת.

**טבלה 1:** סיכום פוטנציאל ההספק למערכות PV במתח נמוך וגבוה ב-2030

מקטע רשת החלוקה	הספק שנאים קיים ל- 2019 (גיגה-וולט אמפר)	הספק שנאים מתוכנן ל- 2030 (גיגה-וולט אמפר)	פוטנציאל התקנה מערכות סולאריות (גיגה-וואט)
מתח נמוך	25.3	31	24.8
מתח נמוך	22.3	28	22.4
פוטנציאל חדירה אפקטיבי	-	-	22.4

# העלאת יעדי האנרגיות המתחדשות של ישראל בעשור הקרוב

יעד האנרגיות המתחדשות הקיים לשנת 2030 בשיעור של 30% אינו מספק להצבת המשק במסלול להפחתת פליטות גזי חממה העומד בהלימה לשאר מדינות ה-OECD ולצורך להעמקת היעדים של ישראל לשנת 2030. מהעבודה עולה כי ישנה היתכנות טכנית-מערכתית להעלות את יעדי האנרגיות המתחדשות ל 40% בשנת 2030 ללא תוספת עלות משקית, ואך השגת חיסכון משמעותי למשק.

## מצב ב-2020 | 5.7%

1.5 GW מאושרת לשנת 2021  
3.5 GW הספק קיים לשנת 2021

0.3 GW אגירה קיימת  
2.5 GW הספק קיים

33 מיליון tCO<sub>2</sub>e פליטות משק חשמל

## יעד כלכלי חדש מופחת פליטות ל-2030 | 40%

5.5 GW אגירה  
18-23 GW הספק הנדרש

23 מיליון tCO<sub>2</sub>e פליטות משק חשמל

## יעד ל-2030 | 30%

3.5 GW אגירה  
17 GW הספק הנדרש

26 מיליון tCO<sub>2</sub>e פליטות משק חשמל  
מקור הנתונים: מידול משרד האנרגיה

מקור הנתונים:

מודל האופטימיזציה כלכלית למערך הייצור / מידול משרד האנרגיה / מידול המשק להגנת הסביבה



# מימוש הפוטנציאל לאנרגיות המתחדשות במרחב המבונה

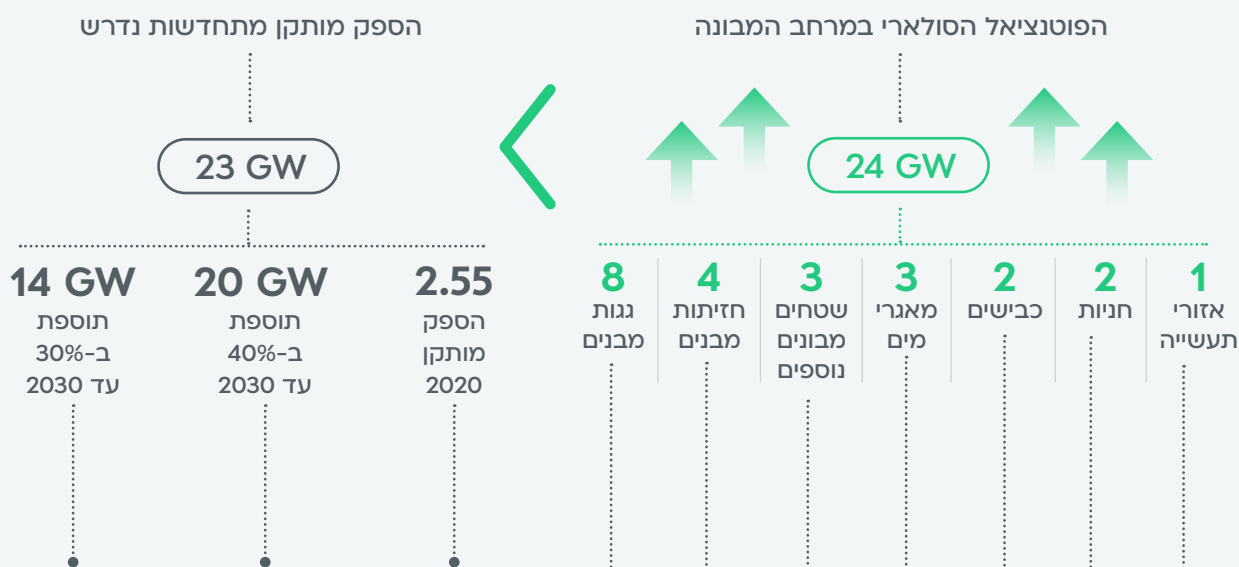
ניתן להגיע ל-40% אנרגיות מתחדשות בשטח המבונה

הגדלת יעדי המתחדשות, ובפרט הגדלה משמעותית של אנרגיה סולארית צריכה להיות מוכוונת לידו שימוש, בדגש על המרחב המבונה, זאת, בין היתר, על מנת למזער את הפגיעה בשטחים הפתוחים, לתרום לביטחון האנרגטי, לקרב את הביקוש לצריכה ולחסוך בתשתיות רשת.

עבודות קודמות של המשרד מראות כי הפוטנציאל להתקנת מערכות סולאריות על גבי מבנים ושטחים בנויים הצפויים להיות ב-2030 נאמד בכ-24 ג'י'ט (גיגה-ואט). אלו צפויים לייצר בממוצע 38 טרה-ואט שעה בכל שנה. כלומר, מימוש פוטנציאל זה יאפשר לייצר 43% מצריכת החשמל בישראל בשטחים מבונים בלבד ב-2030. מלבד זאת, קיים פוטנציאל נוסף בדי שימוש כמו אגרו-ולטאי ובסוגי אנרגיות מתחדשות אחרים כמו רוח<sup>3</sup>.

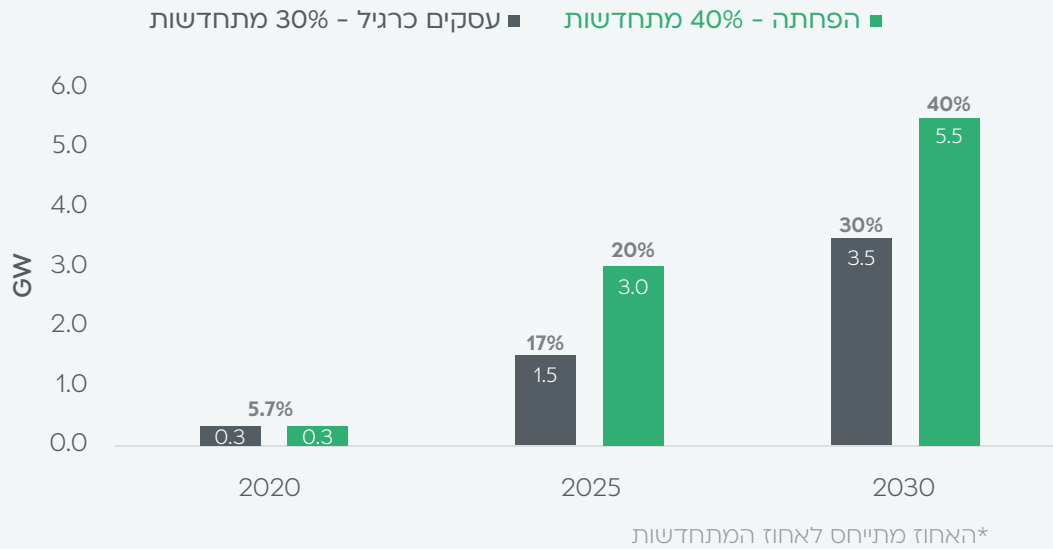
פוטנציאל השטח גדול ביחס לסה"כ הנדרש ל-40% מתחדשות

פוטנציאל בדי-שימוש (אגרו-ולטאי) ופוטנציאל בשטח הפתוח (20,000 דונם, כ-2 GW)



האגירה היא מרכיב הכרחי להעמקת שיעור המתחדשות, וע"פ מודל האופטימיזציה הטכנו-כלכלי בעבודה זו, תוך התייחסות למערך הייצור והשקעות ברשת, ההספק האגירה הנדרש בשנת 2030 נאמד בכ-5.5 גו"ט (כ-33 גוט"ש).

## הוספת מתקני אגירה הכרחית לקליטת האנרגיות המתחדשות

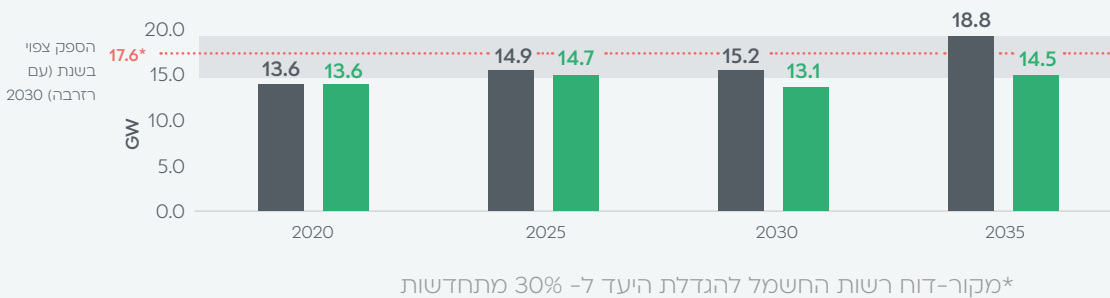


הספק אגירה

תרשים 3: תוצאות המודל להספק האגירה הנדרש עד שנת 2030

תוצאות המודל האופטימיזציה הטכנו-כלכלי, וניתוח ההשפעות הכלכליות מראות כי לא נדרש הספק ייצור קונבנציונלי חדש בעשור הקרוב. הספק הקונבנציונאלי שיידרש בשנת 2030 עומד על כ-15 גיגה-ואט (ללא רזרבה) בתרחיש עסקים כרגיל ועל כ-13 גיגה-ואט (ללא רזרבה) בתרחיש הפחתה.

## שילוב אנרגיות מתחדשות ואגירה מיייתרים את הצורך בהקמת תחנות כוח פוסיליות חדשות



תרשים 4: תוצאות

המודל להספק הפוסילי (ללא רזרבה) הנדרש עד שנת 2035

יישום יעד זה יעמיק את הפחתת פליטות גזי החממה מסקטור החשמל ביחס לשנת 2015 בכ-42% בשנת 2030<sup>4</sup>. כתוצאה מכך, ניתן יהיה להעמיק את היעד הלאומי הכלל משקי הפחתת פליטות גזי חממה של ישראל מעבר ל-27% הקבועים כרגע.

<sup>4</sup> בהינתן 95% אנרגיה מתחדשת בשנת 2050

# התועלות הנוספות למעבר למשק חשמל דל פחמן

**מעבר ל 40% מתחדשות בעשור הקרוב חוסך מיליארדי ₪**

ניתוח ההשקעות והתועלות המשקיות במערך הייצור בוצע תוך שימוש מודל סימולציה טכנו-כלכלי, המסוגל לנתח את צרכי משק החשמל באחוזים משתנים של מקורות האנרגיות המתחדשות במטרה לבחון את הספק האופטימלי של אגירה במערכת, היקף ההספק הקונבנציונאלי החדש הנדרש, ואת ההשפעות הכלכליות המשקיות של מפת הדרכים על מערך הייצור (תרחיש ההפחתה). זאת, לעומת תרחיש בו יעדי ייצור החשמל באנרגיה מתחדשת עומדים על 30% בלבד (תרחיש עסקים כרגיל).

ניהול מספר רב של מערכות סולאריות ואגירה מבזרות יחייב תוספות במערכות מחשוב, תקשורת, בקרה ושליטה של הפיקוח האזורי והארצי. המשמעות הכלכלית נאמדת בעלות של כמיליארד ₪ במשך 10 שנים. השקעה זו נדרשת הן בתרחיש עסקים כרגיל המניח 30% ייצור באנרגיות מתחדשות, והן בתרחיש ההפחתה המניח 40% אנרגיות מתחדשות ב-2030.

מסקנות הניתוח מראות כי העלאת שיעור הייצור מאנרגיות מתחדשות בשנת 2030 ל 40% תניב תועלת משקית של כ-6 מיליארד ₪ (ענ"ן) עד שנת 2030. בנוסף לכך, העלאת שיעור הייצור מאנרגיה מתחדשת בין 80%-95% בשנת 2050 תביא להפחתה של עד 91% בפליטות גזי החממה ביחס לשנת 2015, ותניב תועלת של כ-65 מיליארד ₪ (ענ"ן) למשק.

**טבלה 2:** עלות-תועלת למשק (ענ"ן) מיישום מפת הדרכים, מיליארד ₪

עלות משקית עד שנת 2030 (ענ"ן)			מיליארד ₪
תועלת עודפת	תרחיש הפחתה (40%)	תרחיש עסקים כרגיל (30%)	פרמטר
5.73	196.04	201.77	מערך הייצור
-0.02	1.18	1.16	השקעות בתוכנה וחומרה
<b>5.71</b>	<b>197.22</b>	<b>202.93</b>	<b>סה"כ</b>

מעבר לתועלות אלו, שילוב האנרגיות המתחדשות במרחב המבונה תורם (1) הגברת הביטחון האנרגטי- מקורות האנרגיה המתחדשת מוסיפים חסינות למערך ייצור החשמל לצורך ביטחון האספקה מול איומים ביטחוניים, אסונות טבע, סייבר ועוד. הביזור של מתקני אנרגיה מתחדשת מקטין מאד את הסיכון לפגיעה מערכתית<sup>5</sup>, ובכך תורם לביטחון האנרגטי ואמינות אספקת החשמל; (2) שימור שטחים פתוחים- התקנת מערכות סולאריות בדו שימוש ובפרט בשטח המבונה מונעים פגיעה בשטחים הפתוחים (3) חסכון בתשתיות של דלק גיבוי לתחנות כוח (4) חסכון בצורך בשידרוג רשת החשמל (5) חסכון באיבודי הולכה (6) חסכון בתשתיות הולכה וחלוקה של גז (7) חסכון במיגון ובאבטחה של תשתיות (8) מינוף מקומות עבודה חדשים- בשנת 2019 הערכה העולמית של מספר העובדים בתחום המתחדשות היה 11.5 מיליון, לעומת 11 מיליון של השנה הקודמת<sup>6</sup>.

<sup>5</sup> <https://www.neaman.org.il/EF37-Energy-security-in-Israel-HEB>

<sup>6</sup> [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA\\_RE\\_Jobs\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Sep/IRENA_RE_Jobs_2020.pdf)

## הסרת חסמים במרחב המבונה

מימוש פוטנציאל הייצור הסולארי במרחב המבונה בפועל, מחייב התקנה של מערכות סולאריות על מגוון רחב של מבנים ושטחים וכלל בעלי נכסים שונים. לכל אחד מהשטחים האלו, קיימת רגולציה וסטטוטוריקה שונה, היוצרת חסמים שונים למימוש פוטנציאל הייצור הסולארי. לשם כך, נבחנו החסמים השונים על בסיס הליך שיתוף הציבור שבוצע על ידי משרד האנרגיה ורשות החשמל, ראיונות עם יזמים מענף הסולארי, רשויות מקומיות וגורמי תכנון, תוך התמקדות בחסמים העומדים בפני הקמת מערכות סולאריות בתוך המרחב המבונה. להלן החסמים העיקריים:

### חסמי ידע ומדעות

- העדר ידע וכוח אדם לקידום, ליווי ומימוש הפוטנציאל הסולארי, בפרט ברשויות המקומיות
- העדר מודעות ציבורית לשילוב מתחדשות

### חסמים סטטוטוריים

- הליך רישום וחיבור מערכות סולאריות אינו אחיד
- תהליך טורי במוסדות התכנון
- הקלות בהיטל השבחה וארנונה, לא חלות על שימוש דואלי, שהוא לא על גג
- העדר תכנון מיטבי בשכונות חדשות

### חסמים רגולטורים

- העדר מדיניות ותכנית פעולה לשילוב מתחדשות ואגירה במרחב המבונה
- העדר אסדרה לשירותים נלווים למנהל המערכת ע"י מתחדשות ואגירה
- העדר אסדרה לרכישה ישירה של אנרגיה מתחדשת
- היעדר מדיניות להפחתת השלת אנרגיה בגלל must run-I take

### חסמים כלכליים

- פגיעה בכדאיות למתקנים בטווח 100-400 קו"ט (נפתר עד 300)
- כדאיות נמוכה למתקנים הדורשים קונסטרוקציה
- כדאיות נמוכה וחוסר וודאות לחברות להשקיע בנתחי שוק המאופיינים בגגות קטנים בשטח המבונה
- כדאיות נמוכה לחלק מהמתקנים הדואליים

# צעדי המדיניות המרכזיים

## חלוקה



### העלאת מתחדשות ברשת החלוקה

כתיבת דרישות טכניות למענה לעליה בייצור הכוללות: יחס מותאם בין הספק חשמלי של אנרגיות מתחדשות לבין שנאי, פריסה גיאוגרפית מתאימה לשנאים וייעוד המתחדשות למקומות אופטימליים ברשת



### טכנולוגיה לשליטה בביזור

הטמעת מערכת DMS (Distribution Management System) ברשת החלוקה, במתח גבוה ומתח נמוך לרבות מחשוב, תקשורת, בקרה ושליטה



### ניהול של ייצור מבוזר

מסגרת רגולטורית לחיבור מתקני אנרגיות מתחדשות ומתקני אגירה לניהול מרכזי של המערכות המבוזרות באגרזציה של כ-50 עד 100 מגו"ט



### תכנון מיטבי בשכונות חדשות

יישום הדרישות הטכניות ברשתות חשמל של שכונות חדשות ע"י הטמעה של יחס הספק שנאי מספק והטמעה של חומרה ותוכנה המאפשרים שליטה תפעולי

## ייצור



### הגדרת יעדים לאגירה

לקבוע יעדים לאגירה עד שנת 2030



### אספקת שירותים למנהל המערכת

חיוב התקנת אמצעים טכנולוגיים ואמצעי שליטה במתקני אנרגיה מתחדשת ומתקני אגירה למתן שירותים Ancillary Services כולל מסגרת רגולטורית מאפשרת



### שוק תחרותי לשירותי מערכת

מסגרת המאפשרת שוק תחרותי של שירותים למנהל המערכת למתקני אנרגיה מתחדשת ואגירה



### מניעת השלכת אנרגיה מתחדשת

- הכפפת יחידות פרטיות Must Take למנהל המערכת
- מסגרת דרישות הכוללות את תזמון תחזוקה של יצרני חשמל Must Run ו-Must take בעיקר בעונות במעבר

# מפת הדרכים

## פירוט אמצעי המדיניות



קטגוריה	אמצעי
יעד לאומי לאנרגיה	לקבוע יעדים להקמת מתקני אנרגיה עד שנת 2030.
ניהול מתקני אנרגיה מתחדשת גדולים	לגבש רגולציה אשר תאפשר שליטה של מנהל המערכת במתקני אנרגיה מתחדשת ואנרגיה המחוברים למתח עליון, למתח גבוה ולמתקני מתח נמוך המחוברים לקבוצות של 50 עד 100 מגו"ט, בעמידה בדרישות טכניות המקנות למנהל המערכת תכונות של dispatchability ויכולות טכניות להשתתפות במתן שירותים נלווים.
קביעת נוהל מחייב לבדיקת יכולת המתקנים לעמוד בדרישות אלו.	
יצירת שוק למתן שירותים נלווים	לגבש מסגרת רגולטורית שמטרתה ליצור שוק תחרותי של שירותים נלווים (Ancillary Services), כולל שווקים מקומיים ברמה של מערכת החלוקה המבוזרת, בו מתקני אנרגיה מתחדשת ואנרגיה יוכלו להציע את שירותיהם בתנאים שווים עם היחידות הקונבנציונאליות. לקבוע את אמות המידה ואסדרות נדרשות ליישום המסגרת הרגולטורית ליצירת שוק תחרותי של שירותים נלווים.
צמצום תיעודף מובנה לייצור קונבנציונאלי על פני ייצור באנרגיה מתחדשת	לגבש הנחיות ליצרני החשמל, ובפרט יצרנים פרטיים העובדים בחוזים בילטרליים, לתזמן את השבתת יחידות הייצור לצורך תחזוקה מתוכננת לעונות המעבר, באופן התורם למיקסום היקף האנרגיה הסולארית המנוצלת בפועל.
לבחון כיצד ניתן למקסם את הניצול בפועל של אנרגיה סולארית באמצעות התאמת משטר ההפעלה של יחידות ייצור קונבנציונאליות המוגדרות Must-Run.	
לגבש ולהגיש לממשלה תכנית להעברת כלל יחידות הייצור בבעלות יצרני חשמל פרטיים מעל הספק 50 מגה וואט להעמסה מרכזית.	
להטמיע מערכת DMS (Distribution Management System) ברשת החלוקה, במתח גבוה ומתח נמוך לרבות מחשוב, תקשורת, בקרה ושליטה של הפיקוח האזורי וארצי.	הסבת רשת החלוקה לרשת חכמה
להכין דרישות טכניות (GRID CODE) למערכת חלוקה אקטיבית המאפשרת זרימת חשמל דו-כיוונית כתוצאה מאנרגיה וייצור חשמל מקומי מבוזר באמצעות אנרגיה מתחדשת.	תכנון רשת החלוקה
בהקמת שכונות ויישובים חדשים, לתכנן מראש את רשת החלוקה החדשה - במתח גבוה ומתח נמוך - באופן המתחשב לא רק בצריכה הצפויה, אלא כמערכת חלוקה אקטיבית.	
לגבש תכנית לאופטימיזציה של אגירת אנרגיה ברכבים חשמליים וניצולה ברשת החשמל הארצית, לרבות סנכרון ממוחשב בין רכבים ולבין מערכת החשמל, מערכת תעריפים ועוד.	ניהול מבוזר של סוללות רכבים חשמליים
להגדיר תנאים טכניים לעמדות הטעינה ומערכות המנייה עבור רכבים חשמליים, כך שתתאפשר טעינה מנוהלת ובכלל זה פריקת אנרגיה לטובת הרשת (V2G).	
גיבוש אסטרטגיה לאומית לאינטגרציה של השינויים המפורטים במפת דרכים זו כמו גם שינויים עתידיים נוספים הנדרשים במבנה שוק החשמל לשם פעולה אופטימלית בהתבסס על שיעורים גבוהים של אנרגיה מתחדשת מבוזרת.	מבנה שוק החשמל
לפתח וליישם מערך מתקדם לחיזוי תפוקות סולאריות בטווחי זמן בינוניים ועד זמן אמת, וזאת בהתאם לצרכי המערכת.	חיזוי הייצור במתקני אנרגיה מתחדשת



<p>לבחון מחדש את המדרגות התעריפיות באסדרה מיום 11.01.2021 באופן המבטיח את הכדאיות הכלכלית של מתקנים סולאריים מונחי גגות בהספק העולה על 100 קו"ט. נפתר עד 300 קו"ט מאז כתיבת העבודה.</p>	<p><b>יצירת ודאות ארוכת טווח והתאמת מסגרות תעריפיות לפלחי שוק נוספים</b></p>
<p>לבחון מנגנון תעריפי ייעודי למתקנים מונחי גגות הקטנים מ-10 קו"ט תוך תשלום תעריף מובדל על פני מספר שנים מוגבל.</p>	
<p>גיבוש אסדרות ו/או הליכים תחרותיים ייעודיים למתקנים המוקמים בשטחים מבונים המחייבים קירוי (חניונים, בתי עלמין, פארקים, ועוד).</p>	
<p>לבחון מנגנון תעריפי ייעודי למתקני אנרגיה, אגירה ומיקרו-גרید בטכנולוגיות חדשניות תוך תשלום תעריף מובדל על פני מספר שנים מוגבל.</p>	
<p>קידום אסדרות ארוכות טווח אשר יתנו ודאות על פני מספר שנים בתעריפים קבועים אשר יעודכנו אחת לתקופה בהתאם לשינויים במחירי המערכות, בהתאם למנגנון עדכון שקוף וברור.</p>	
<p>פרסום תכנית רב שנתית אשר תפרוט את המכרזים המתוכננים לשנים הקרובות.</p>	
<p>גיבוש הסדר חקיקתי לחיוב התקנת מערכות סולאריות ואגירה כחלק אינטגרלי בבנייה חדשה.</p>	<p><b>היטל השבחה, ארנונה ושומת קרקע</b></p>
<p>גיבוש הסדר חקיקתי לחיוב קירוי סולארי בחניונים, מוסדות חינוך, בתי עלמין ושטחים כלואים בין מחלפים.</p>	
<p>הרחבת הפטור הקיים מהיטל השבחה למערכות סולאריות שאינן לצרכי רווח על גגות גם למערכות גם בשימושים דואליים נוספים שיוגדרו מראש, עד ל-7,000 מ"ר.</p>	
<p>תקנון תקנות ההסדרים במשק המדינה (ארנונה כללית ברשויות המקומיות – תשס"ז 2007) לקביעת תעריפי ארנונה אחידים למערכות סולאריות, לרבות מערכות שאינן מוקמות על גגות מבנים.</p>	
<p>הענקת פטור מתשלום ארנונה למערכות סולאריות בשימושים דואליים נוספים שיוגדרו מראש (מערכות שאינן על גגות או קרקע) המשמשות לצרכי עצמית עד 200 מ"ר.</p>	
<p>קביעת שומת קרקע למערכות סולאריות לפי שטח המתקן ולא לפי הספקו.</p>	
<p>לבחון ולהציג תכנית להקלות לידו-שימושיות בקרקע בהתאם להחלטת ממשלה 1403 מיום 10.04.2016.</p>	<p><b>קיצור ופישוט הליכי רישום וחיבור של הח"י</b></p>
<p>יש לפעול לייעול ושכלול הליכים לרישום, חיבור, והגדלת גודל החיבור למתקן על ידי מעבר להליכים דיגיטליים ולמערכת אחודה ונוחה המתכללת את כלל התהליך (One port call).</p>	
<p>בחינת אמות המידה המגדירות את משך הזמן לחיבור המתקנים והתאמתן לסטנדרטים המקובלים במדינות מפותחות.</p>	<p><b>חובת היתר בניה וייעוד שימושי קרקע</b></p>
<p>תקנון תקנות התכנון והבנייה (עבודות ומבנים הפטורים מהיתר, תשע"ד 2014) וקביעת פטור למתקנים מונחי גגות המחוברים לרשת מתח נמוך בהתאם לגודל החיבור (KVA 630).</p>	
<p>להטמיע בהוראות כל תכניות הפיתוח המקודמות מערכות סולאריות ומתקני אגירה כשימושים מותרים.</p>	
<p>גיבוש מסמך הנחיות לוועדות התכנון המקומיות לבחינת היתר בניה למערכות סולאריות.</p>	
<p>גיבוש נוהל בוועדות התכנון המאפשר הגשה במקביל של בקשה להיתר בניה ובקשת פטור מהיתר להקמת מערכת PV על גבי גג המבנה/קונסטרוקציה המתוכנן.</p>	<p><b>חסמים ייעודיים ברשויות מקומיות</b></p>
<p>מתן ייעוץ מקצועי לרשויות מקומיות בהיבטים רלוונטיים כמו סקרי שטחים, אופן שילוב המתקנים במרחב הבנוי, שיפור היכולות להתמודד בהליכים תחרותיים ועוד.</p>	
<p>בחינת מנגנוני מימון לפרויקטים כגון: מתן ערבות מדינה להחזר ההשקעה, הלוואות מדינה בתנאים מועדפים, הקמת קרן השקעות או הרחבה של קרן ההלוואות שהוקמה ע"י מפעל הפיס ומשרד האנרגיה.</p>	
<p>גיבוש ופרסום בסיס נתונים אחיד המרכז, לפי קטגוריה (גגות בתי מגורים, בתי עלמין, מגרשי ספורט וכדומה) ולפי רשות, את השטחים הפוטנציאליים להקמת מערכות סולאריות במרחב המבונה אשר יעודכן אחת לשנה.</p>	
<p>גיבוש וקידום תכנית הסברתית המותאמת לצרכי הסקטורים השונים וכוללת פרסום ממוקד, שיתופי פעולה עם הגופים השונים, ימי עיון ועוד.</p>	<p><b>היעדר מודעות ציבורית לאנרגיה מתחדשת</b></p>

## תוכן עניינים

18.....	תוכן עניינים
23.....	מבוא
23.....	א. רקע
30.....	ב. מטרת העבודה
32.....	היערכות מערך ייצור החשמל ליעד של 40% אנרגיה מתחדשת
34.....	א. רקע לניהול מערך הייצור
36.....	ב. האתגרים הצפויים בהפעלת מקטע הייצור
36.....	מניעת קיטום והתמודדות עם עליית עומס מהירה
61.....	אתגרים נוספים בניהול מערך הייצור
672050-ב-80-95% ול-2040 ב-60-80%	עלייה בהיקף החדירה של אנרגיה מתחדשת ל-
70.....	סיכום, מסקנות והמלצות
73.....	הערכות רשת החשמל בדגש על רשת החלוקה
75.....	ג. תכנון ופיתוח רשת החלוקה העתידית
75.....	רקע
77.....	הגנות ואוטומציה של הרשת
80.....	ד. יכולת העברה טרמית וויסות המתחים
81.....	ה. איכות החשמל והרמוניות ברשת
	ו. מתודולוגיה להתקנת מערכות PV במתח נמוך בתרחיש ההפחתה עד
81.....	לשנת 2030
	ז. מתודולוגיה להתקנת מערכות PV במתח גבוה בתרחיש ההפחתה עד
84.....	לשנת 2030
	ח. מערכות אגירת אנרגיה, כולל מצברים ברכבים, בשילוב עם מתקני ה-PV
85.....	ברשת החלוקה
85.....	ט. הגנות סייבר ברשת החלוקה
	י. שוק החשמל העתידי בתנאים של מערכת החלוקה
86.....	"האקטיבית"

87	סיכום והמלצות.....	יא.
	צרכי הרשת לשם ניהול מערכות ה-pv והאגירה כחלק מניהול מערך	יב.
88	הייצור.....	88
88	רשת חכמה – יכולות וצרכים טכנולוגיים.....	88
90	תחנות כוח וירטואליות.....	90
93	סיכום והמלצות.....	93
95	<b>מודל טכנו-כלכלי לבחינת משק החשמל בתרחישים עתידיים.....</b>	95
97	הקדמה.....	יג.
97	מבנה מודל הסימולציה.....	יד.
97	שיטת המידול העיקרית, לרבות אופטימיזציה כלכלית.....	טו.
98	נתונים והנחות מרכזיות, לרבות הנחות לניתוח הכלכלי.....	טז.
98	מחיר הדלק.....	98
99	עלויות הון, תפעול קבוע ותפעול משתנה – יחידות גז.....	99
100	עלויות חיצוניות – יחידות גז.....	100
100	עלויות pv.....	100
102	עלויות ייצור חשמל בטורבינות רוח.....	102
102	עלויות אגירה.....	102
103	פרמטרים נוספים.....	103
103	סיכום ההנחות ששימשו את המודל הכלכלי.....	103
105	הצגת תוצאות המודל.....	יז.
105	ממצאי אופטימיזציה כלכלית.....	105
106	הספק ייצור ואגירה נדרש.....	106
115	תוצאות כלכליות – מערך הייצור.....	115
115	תוספת העלויות ברשת החלוקה.....	יח.
116	תוספת עלויות שליטה ובקרה.....	יט.
119	סיכום תוצאות ניתוח כלכלי ליישום היעדים.....	כ.
120	<b>הסרת חסמים בפני הטמעת מערכות סולאריות במרחב המבונה.</b>	120
122	הקדמה.....	כא.

122.....	שיטת עבודה.....	כב.
123.....	חסמים כלכליים.....	כג.
123.....	חסמים כלכליים הנובעים מאסדרות תעריפיות.....	
126.....	היעדר פטור קבוע מהיטל השבחה.....	
127.....	תעריפי ארנונה לשימושים דואליים.....	
127.....	קביעת שומת קרקע למתקנים סולאריים לפי שטח.....	
128.....	חסמים רגולטוריים.....	כד.
128.....	הליכי רישום וחיבור מערכות סולאריות.....	
129.....	תכנון וסטטוטוריקה.....	כה.
129.....	חובת היתר בנייה למערכות סולאריות.....	
131.....	הגדרת מערכות סולאריות ואגירה כשימושים מותרים.....	
131.....	חסמים ייחודיים לרשויות מקומיות.....	כו.
132.....	קושי תקציבי ומימוני ברשויות מקומיות.....	
132.....	היעדר מומחיות כוח אדם ברשויות המקומיות.....	
132.....	חסמים ייחודיים לגגות משותפים.....	כז.
133.....	חסמים נוספים.....	כח.
133.....	סירוב חיבור עקב גודש ברשת ההולכה.....	
134.....	היעדר מודעות ציבורית.....	
135.....	סיכום חסמים עיקריים ופתרונות מוצעים.....	כט.
139.....	נספח א' – הגדרת תרחישי העבודה.....	
139.....	צריכת החשמל.....	ל.
140.....	מצבת תחנות כוח.....	לא.
142.....	הספק ייצור באנרגיה מתחדשת.....	לב.
145.....	נספח ב' – מצבת תחנות כוח.....	
150.....	נספח ג' – תהליך תכנון הפעלת המערכת.....	
153.....	נספח ד' – דרישות תפ"ט לחיבור מתקני PV במתח עליון.....	
155.....	נספח ה' – שיטות חיזוי סולארי.....	

**רשימת תרשימים**

- תרשים 1 : הפחתת פליטות צפויה עד 2030 מעמידה ביעדים לאומיים במדינות נבחרות. 23
- תרשים 2 : עצימות פליטות לקוט"ש מיוצר, 2020..... 27
- תרשים 3 : סך פליטות, תרחיש "עסקים כרגיל" מול תרחיש ההפחתה..... 30
- תרשים 4 : תכנון הפיתוח של ייצור החשמל – שינוי תפיסתי..... 34
- תרשים 5 : עקום עומס טיפוסי לחודש מאי 2030..... 37
- תרשים 6 : עקום עומס שיורי בשבוע טיפוסי במאי 2030 עבור אחוזי חדירה שונים של אנרגיות מתחדשות 38
- תרשים 7 : עקום העומס השיורי בניכוי פעולת מתקני אגירה שאובה וסוללות במצב פריקה (-) ובמצב טעינה (+)..... 39
- תרשים 8 : ההספק Must Run/ Must Take של היצרנים הקונבנציונאליים שמנהל המערכת נדרש לתעדף בתוכנית העבודה על רקע עקום העומס השיורי בניכוי מתקני אגירה שאובה וסוללות..... 40
- תרשים 9 : הפעלת היחידות הקונבנציונאליות על רקע עקום העומס השיורי בניכוי פעולת מהפעלת מתקני אגירה שאובה וסוללות..... 41
- תרשים 10 : האנרגיה הסולארית הבלתי מנוצלת הצפויה בעקבות ההקפדה על דרישת Must-Run / Must-Take..... 41
- תרשים 11 : היווצרות חלונות אי-וודאות בנוגע לערכי העומס השיורי בזמן אמת..... 43
- תרשים 12 : השתנות Footroom ו-Headroom עם התקרבות לנקודת זמן אמת (T=0)..... 44
- תרשים 13 : תוכנית בלתי אפשרית של הפעלת מערכת הייצור עקב חוסר חלון להורדת ההספק בשעות של עומס שיורי מזערי..... 45
- תרשים 14 : השלכות מיצירת Footroom של 1000 מגו"ט על היקף הייצור הסולארי הלא מנוצל (Dump) ... 45
- תרשים 15 : השלכות מעלייה בזמן ההתנעה (מ-1 ל-3 שעות) של יחידות מחז"מ על היקף הייצור הסולארי הלא מנוצל (Dump)..... 46
- תרשים 16 : הפעלת היחידות הקונבנציונאליות בשבוע של חודש יולי 2030 על רקע עקום העומס השיורי בניכוי פעולת מתקני אגירה שאובה וסוללות..... 47
- תרשים 17 : הפעלת היחידות הקונבנציונאליות בשבוע של ינואר 2030 על רקע עקום העומס השיורי בניכוי פעולת מתקני אגירה שאובה וסוללות..... 48
- תרשים 18 : גמישות ההפעלה ודיוק התגובה של מתקני PV משוכללים עולים על אלה של יחידות תרמיות. 50
- תרשים 19 : ביצועי תחנות PV משוכללות לצורך וויסות תדר עולים על ביצועי היחידות הקונבנציונאליות. 51
- תרשים 20 : פילוג צפוי של אנרגיה מתחדשת בלתי מנוצלת (קיטום סולארי) לפי עונות השנה ב- 2030..... 54
- תרשים 21 : שיעור האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת ב-2030 כתלות ביכולת האגירה..... 57
- תרשים 22 : הפעלת מערך הייצור הקונבנציונלי במהלך יום אחד ביולי 2030 על רקע עקום העומס השיורי בניכוי פעולת מתקני אגירה שאובה וסוללות..... 59
- תרשים 23 : תפקידם של סוגים שונים של עתודה בהחזרת המערכת למצב יציב לאחר אירועים בלתי צפויים משמעותיים..... 63
- תרשים 24 : תיאור כללי של תפקידי האגרגטור..... 91
- תרשים 25 : ריכוז ממצאי האופטימיזציה הכלכלית..... 105
- תרשים 26 : ההספק המותקן בתרחיש עסקים כרגיל מול תרחיש ההפחתה..... 107
- תרשים 27 : כמות האנרגיה במאגרים בשעות השנה..... 108
- תרשים 28 : היקף אגירה נדרשת..... 109
- תרשים 29 : הספק קונבנציונלי מותקן..... 110
- תרשים 30 : טכנולוגיות אגירה לפי משך טעינה וגודל הספק..... 112
- תרשים 31 : יתרונות לשימוש במימן..... 112
- תרשים 32 : תחזית עלות מימן..... 113

114	תרשים 33 : כמות האנרגיה המושלכת
114	תרשים 34 : סך עלות שנתית לפי תרחיש
115	תרשים 35 : סך עלות שנתית, תרחיש "עסקים כרגיל" ותרחיש הפחתה
140	תרשים 36 : תחזית צריכת חשמל תרחיש עסקים כרגיל לעומת תרחיש ההפחתה
143	תרשים 37 : תמהיל ההספק הנדרש באנרגיות מתחדשות, תרחיש "עסקים כרגיל"
144	תרשים 38 : תמהיל ייצור באנרגיות מתחדשות, תרחיש הפחתה
157	תרשים 39 : DR – Demand Response היא אחת הדרכים ליישום DSM- Demand Side Management

## רשימת טבלאות

25	טבלה 1 : יעדים לאנרגיות מתחדשות ב-2050
71	טבלה 2 : טבלת סיכום
83	טבלה 3 : פוטנציאל ההספק המותקן של מערכות PV במתח נמוך בשנת 2030
85	טבלה 4 : סיכום פוטנציאל ההספק למערכות PV במתח נמוך וגבוה ב-2030
98	טבלה 5 : מחירי דלקים
99	טבלה 6 : עלויות הון – יחידות גז טבעי
99	טבלה 7 : עלויות תפעול קבוע – יחידות גז טבעי
99	טבלה 8 : עלויות תפעול משתנה – יחידות גז טבעי
100	טבלה 9 : מקדמי פליטה סגולית (גרי' / קוט"ש)
100	טבלה 10 : עלויות חיצוניות (2020)
100	טבלה 11 : מקדמי עדכון שנתיים לעלויות החיצוניות
100	טבלה 12 : תחזית בלומברג לעלויות הון למערכות סולאריות
101	טבלה 13 : תמהיל עלות משוקלל לפי רכיב
102	טבלה 14 : אורך החיים של מערכות PV
102	טבלה 15 : תחזית עלות ההון למתקני רוח
102	טבלה 16 : תחזית עלות ההון לסוללות אגירה
103	טבלה 17 : פרמטרים נוספים לאגירה
104	טבלה 18 : טבלת סיכום הנחות כלכליות
105	טבלה 19 : ריכוז ממצאי האופטימיזציה הכלכלית
117	טבלה 20 : שיעור ההספק הנשלט מתוך סך ספק הטכנולוגיה, לפי תרחיש
117	טבלה 21 : הספק מחובר למערכות שליטה ובקרה, לפי סוג, תרחיש "עסקים כרגיל" ותרחיש הפחתה, מגו"ט
117	טבלה 22 : הספק מחובר למערכות שליטה ובקרה, לפי סוג, תרחיש "עסקים כרגיל" ותרחיש הפחתה, מגו"ט
118	טבלה 23 : עלות שנתית למערכות שליטה ובקרה, לפי סוג, תרחיש "עסקים כרגיל" ותרחיש הפחתה
119	טבלה 24 : ערך נוכחי נקי
119	טבלה 25 : עלות (תועלת) למשק (עניין) מיישום מפת הדרכים, לפי רכיב ותרחיש, מיליארד ₪
140	טבלה 26 : מצבת תחנות כוח לפי סוג יחידה
142	טבלה 27 : הספק Must-Run / Must-Take

# מבוא

## א.רקע

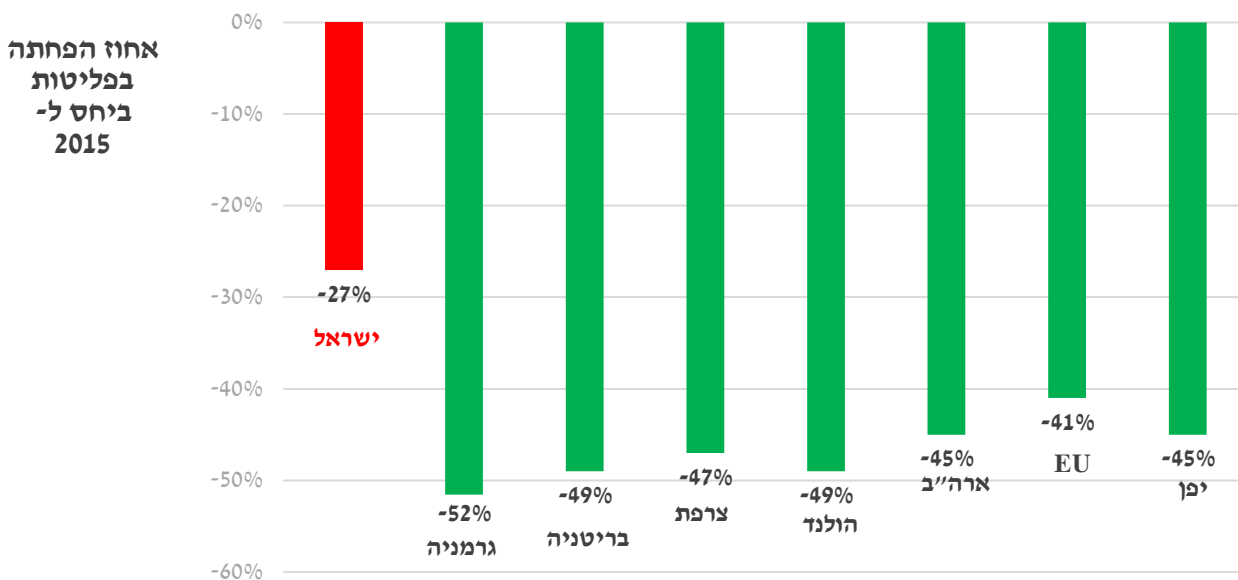
במסגרת הסכם פריז התחייבו מדינות העולם – וביניהן ישראל – להגיש לאו"ם עד סוף שנת 2020 תוכניות אסטרטגיות למעבר לכלכלה דלת פחמן עד שנת 2050 ולהעלות את רמת שאפתנות היעדים לשנת 2030.

המחויבות הבינלאומית של הממשלה היא לפעול למעבר של ישראל לכלכלה דלת פחמן, בריאה ומשגשגת. ישראל הצטרפה למדינות העולם המפותחות ומתחייבת לאפס פליטות גזי חממה נטו בשנת 2050, כפי שהכריז ראש הממשלה ביום ה-1 בנובמבר 2021, בוועידת האקלים בגלזגו. משמעות המעבר של ישראל לכלכלה מאופסת פליטות היא גמילת ישראל מהתלות בדלקים פוסיליים ומעבר לשימוש באנרגיות מתחדשות ואגירה. בנוסף, בהסכמי ועידת גלזגו נקבע כי כל המדינות, לרבות ישראל, נדרשות לבחון ולעדכן בתוך שנה את יעדי הפחתת פליטות גזי חממה לשנת 2030 כך שיעמדו בהלימה עם הצורך הגלובאלי להפחתה של 45-50% מפליטות גזי חממה בעשור זה.

המשרד להגנת הסביבה בשיתוף המכון הישראלי לדמוקרטיה, ארגון ה-OECD ומשרדי הממשלה: תחבורה, האנרגיה, הכלכלה והתעשייה ומנהל התכנון, הובילו בשנתיים האחרונות תהליך רב מגזרי לגיבוש החזון, היעדים והאסטרטגיה למעבר לישראל דלת פחמן, תחרותית ומשגשגת עד 2050.

בעוד שמדינות מפותחות אחרות קבעו יעדים המביאים להפחתה משמעותית, אחוז הפחתה של ישראל נמוך ביחס למדינות OECD אחרות (תרשים 2).

תרשים 1: הפחתת פליטות צפויה עד 2030 מעמידה ביעדים לאומיים במדינות נבחרות<sup>1</sup>



<sup>1</sup> מקור- UNFCCC 2021 אחרי ניתוח על ידי המשרד להגנת הסביבה לנרמול היעדים לפי שנת 2015

כ-140 ארצות ומדינות בעולם החלו תהליך מעבר לכלכלה מאופסת פליטות הכולל קביעת יעדים, גיבוש תוכניות אסטרטגיות ועיגוןם בחקיקה<sup>2</sup>. בין מדינות אלו:

האיחוד האירופאי פרסם ב-2020 את תוכנית ה-'Green new deal'. התוכנית, שעוגנה לאחרונה בחקיקה, העמידה את יעדי 2030 ל-55% הפחתה (במקום 40%) ביחס לרמת הפליטות בשנת 1990 והגדירה יעד לאיפוס פליטות גזי"ח עד 2050. פליטות שלא יופחתו יקוזזו על ידי ייעור ושימוש ב-CCS.



ביולי 2019, בריטניה התחייבה לעבור לכלכלה מאופסת פליטות גזי"ח עד 2050, והייתה למדינה הראשונה מבין מדינות המובילות כלכלית (G7) שהעבירה יעד כזה במסגרת חוק אקלים<sup>3</sup>. נוסף על כך, בריטניה הגישה בדצמבר 2020 יעד מעודכן ל-2030 – 68% הפחתה ביחס ל-1990 (במקום 53%). ב-2021 עבר תיקון לחוק האקלים בו נקבע יעד נוסף להפחתה של 78% עד שנת 2035 ביחס ל-1990<sup>4</sup>.



בדצמבר 2019, גרמניה אימצה חוק אקלים חדש המקבע את יעדי הפחתת הפליטות אליהן התחייבה, ומוסיף יעד של מעבר לכלכלה מאופסת פליטות גזי"ח עד 2050<sup>5</sup>.



בדצמבר 2019, דנמרק אימצה חוק אקלים חדש, המעמיק את יעדי הפחתת הפליטות ל-2030 ל-70% הפחתה ביחס לרמת הפליטות ב-1990 (לעומת היעד של 40% הפחתה) ואיפוס פליטות גזי"ח ב-2050.



ביולי 2019 התחייבה צרפת לעבור לכלכלה מאופסת פליטות גזי"ח עד 2050 והעבירה את היעד גם היא במסגרת חוק אקלים. בדומה להצהרת האיחוד, מצוין כי פליטות שלא יופחתו יקוזזו על ידי ייעור ושימוש ב-CCS.



ב-2017 שבדיה העבירה את חוק האקלים שלה, בו החמירה את יעדיה כפי שהצהירה עליהם בהסכם פריז, וקבעה כי עד 2045 תהיה מאופסת פליטות גזי"ח (במקום 2050). זאת באמצעות הפחתה של לפחות 85% פליטות גזי"ח ביחס לשנת 1990, כאשר ה-15% הנותרים יקוזזו על ידי השקעה בפרויקטים במדינות זרות (Offsetting)<sup>6</sup>.



באוקטובר 2020, הצהיר ראש ממשלת יפן על יעד מעבר לכלכלה מאופסת פליטות גזי"ח עד 2050 – לעומת יעד ההפחתה הקודם של 80% הפחתה עד 2050 ביחס לרמת הפליטות ב-2010, ומעבר לכלכלה מאופסת פליטות פד"ח במחצית השנייה של המאה.



בדצמבר 2019, לוקסמבורג העבירה את חוק האקלים החדש, אשר מציב יעד למעבר לכלכלה מאופסת פליטות עד 2050. יתרה מכך, החוק מעגן את ההחלטה להגביר את מידת השאפתנות של יעדי ההפחתה ל-2030 מ-40% ל-55% הפחתה ביחס לרמת הפליטות ב-2005<sup>7</sup>.



בוועידת האקלים האחרונה (COP25) ציילה הצהירה על כוונתה לחוקק חוק אקלים המעגן יעד למעבר לכלכלה מאופסת פליטות גזי"ח עד 2050<sup>8</sup>.



בנובמבר 2019, ניו זילנד העבירה את חוק האקלים החדש שלה, אשר מציב יעד למעבר לכלכלה מאופסת פליטות פד"ח עד 2050. היעד מתמקד בפליטות פד"ח ומקל בפליטות גזי"ח אחרים (כגון מתאן – גז הנפלט בין היתר מפעילות חקלאית) בכדי לאפשר גמישות לחקלאים האחראיים לעיקר התמ"ג של המדינה.



<sup>2</sup> NDC database – UN; [Net Zero Tracker](#)

<sup>3</sup> (UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2019)

<sup>4</sup> (UK Department for Business, Energy & Industrial Strategy, 2021)

<sup>5</sup> (Clean Energy Wire, 2019)

<sup>6</sup> (Swedish Environmental Protection Agency, 2019)

<sup>7</sup> (The Luxembourg Government, 2019)

<sup>8</sup> (Business Green, 2019)



סקטור החשמל בכלכלות מפותחות לרבות בישראל הוא הסקטור העיקרי המשפיע על פליטות גזי החממה ומזהמי האוויר במדינה<sup>9</sup>. יתרה מכך, השפעה זו רק תלך ותגדל בהדרגה בעקבות המעבר של התחבורה וחלקים מהתעשייה לשימוש בחשמל כמקור האנרגיה הסופית שלהן.

מדיניות למעבר לכלכלה דלת פחמן ומעבר לייצור חשמל מבוסס אנרגיות מתחדשות, כגון שמש ורוח, הוא הבסיס לאסטרטגיה העולמית להפחתת פליטות גזי חממה ומזהמי אוויר ומהווה נדבך מרכזי בהתמודדות עם משבר האקלים.

כפי שניתן לראות בטבלה 1 מדינות מפותחות אחרות קבעו יעדים לייצור של 100% חשמל מאנרגיות מתחדשות בשנת 2050, והעלו בהתאמה את יעדי המתחדשות לשנת 2030 לשיעורים של 50% ואף יותר. זאת לעומת ישראל שקבעה יעד של 30% מתחדשות לשנת 2030 ו-70% גז טבעי.

טבלה 1: יעדים לאנרגיות מתחדשות ב-2050<sup>10</sup>

מדינה	יעד ל-2030	יעד ל-2050
הוואי	40%	100% עד 2045
גרמניה	1165%	12100%
יוון	61%-64%	-
איטליה	1355%	-
אוסטריה	14100%	100%
דנמרק	100%	100%
פורטוגל	1580%	100%
ספרד	74%	100%
אירלנד	1680%	-
שבדיה	172040%	100% עד 2040
הולנד	1870%	100%
בליז	85%	100%
גואטמלה	80%	100%
קולומביה	70%	100%
ניו יורק	1970%	20100%
קליפורניה	60%	-
סין	35%	-

<sup>9</sup> סקטור החשמל אחראי ל-48% מסך פליטות גזי החממה במדינה (מערך לאומי למעקב ובקרה אחר פליטות גזי חממה, 2018), כמו גם כ-60% מפליטות תחמוצות הגופרית (SO<sub>2</sub>), כ-37% מתחמוצות החנקן (NO<sub>x</sub>) וכ-10% מחלקיקי קוטר 10 (מצאי פליטות מזהמים לאוויר לשנת 2018, המשרד להגנת הסביבה)

<sup>10</sup> מקור: [https://www.ren21.net/gsr-2020/tables/table\\_06/table\\_06/](https://www.ren21.net/gsr-2020/tables/table_06/table_06/) אלא אם צוין אחרת.

<sup>11</sup> <https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Dossier/renewable-energy.html>

<sup>12</sup> [/http://wiki.energytransition.org/the-book/policies-for-clean-energy/renewable-energy-act-ee](http://wiki.energytransition.org/the-book/policies-for-clean-energy/renewable-energy-act-ee)

<sup>13</sup> [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/it\\_final\\_necp\\_main\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/it_final_necp_main_en.pdf)

<sup>14</sup> [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/at\\_final\\_necp\\_main\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/at_final_necp_main_en.pdf)

<sup>15</sup> <https://www.iea.org/countries/portugal>

<sup>16</sup> <https://assets.gov.ie/203558/f06a924b-4773-4829-ba59-b0feec978e40.pdf> עמ' 9

<sup>17</sup> [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/necp\\_factsheet\\_se\\_final.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/necp_factsheet_se_final.pdf)

<sup>18</sup> [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nl\\_final\\_necp\\_main\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/nl_final_necp_main_en.pdf)

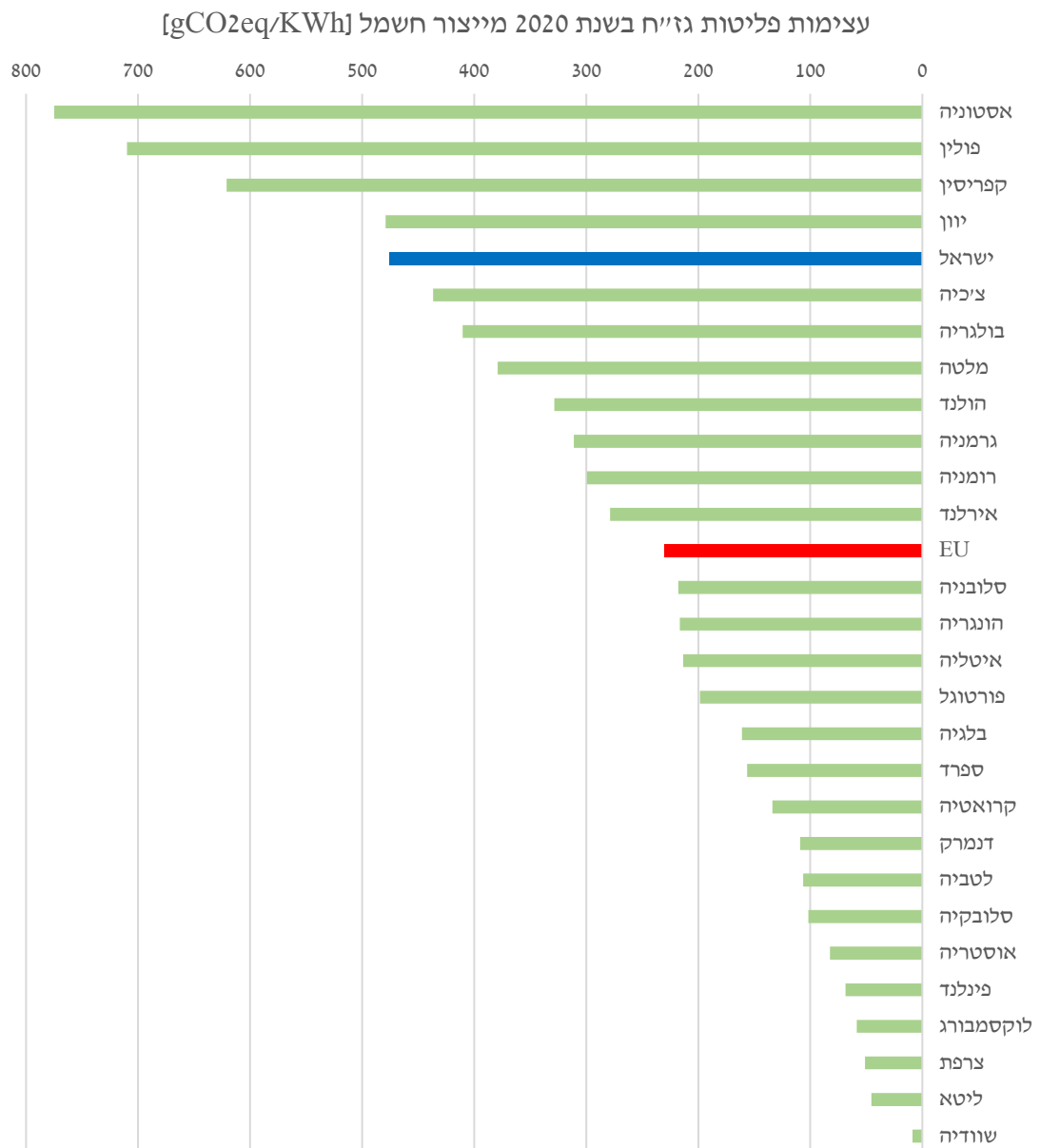
<sup>19</sup> <https://www.nyserda.ny.gov/-/media/Files/About/Strategic-Plan/strategic-outlook.pdf>

<sup>20</sup> <https://www.vox.com/energy-and-environment/2019/6/20/18691058/new-york-green-new-deal-climate-change-cuomo>

מדינה	יעד ל-2030	יעד ל-2050
	הוצע לאחרונה עדכון היעד ל- 2140% אך טרם פורסם אם אושר.	
<b>מצרים</b>	42%	

אולם, כיום בישראל למעלה מ-90% מייצור החשמל מבוסס על דלקים פוסיליים מזהמים ועתירי פחמן, פחם וגז, וכתוצאה מכך כמות גזי החממה הנפלטות בממוצע מכל קו"ט"ש מיוצר גבוה ביחס למדינות אחרות.

<sup>21</sup> <https://ihsmarkit.com/research-analysis/chinas-new-renewable-consumption-targets-an-enabler-to-fulfill.html>



לצד פעולות להתייעלות באנרגיה המתבצעות במגזרים הצורכים חשמל המביאות לצמצום בהיקף החשמל הנדרש, מדיניות הפחתת הפליטות של משק החשמל בישראל התמקדה בשנים האחרונות בשני נדבכים:

**הגברת הייצור בגז על חשבון זלקים מאובנים אחרים בכלל ופחם בפרט - עד לכדי הפסקה מוחלטת** – מראשית המאה הנוכחית התווספו למערך הייצור הקונבנציונאלי בישראל כמעט רק יחידות ייצור אשר מוסקות בגז, רובן המכריע יחידות במחזור משולב. ממערכת שבה לא היה כל שימוש בגז כמקור אנרגיה לייצור חשמל, הפכה מערכת החשמל בישראל לאחת ממערכות החשמל שהישענותן על גז היא מהמאסיביות ביותר. ניתן להצביע על כמה גורמים להאצת תהליך זה:

<sup>22</sup> עצימות הפליטה לקוט"ש מיוצר בישראל מתבססת על תוצאות המערך הלאומי למעקב ובקרה אחר הפחתת פליטות גזי חממה ו-1 <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/co2-emission-intensity-8#tab-> googlechartid\_googlechartid\_googlechartid\_googlechartid\_chart\_11111

- מציאת גז במאגרים בהיקף משמעותי מול חופי ישראל.
- השתלבותם המואצת של יצרני חשמל פרטיים במערכת החשמל בישראל.
- התנגדות ציבורית להקמת תחנות פחמיות חדשות בארץ, והנטייה הכללית בעולם המערבי להקטין את השימוש בפחם במקביל להגדלת ייצור חשמל ממקורות מתחדשים.

כתוצאה משינוי זה נסמך משק החשמל הישראלי על היקפים הולכים וגדלים של יכולת ייצור בגז. במקביל, הולך ויורד משקלן היחסי של יחידות מוסקות בפחם במערכת הייצור, זאת על רקע שורה של החלטות שהתקבלו בשנים האחרונות אשר מטרתן צמצום ואף הפסקת ייצור החשמל בפחם. תחילה, בשנת 2015 נקבעה מדיניות העמסה המעדיפה ייצור בגז על פני ייצור בפחם, תוך הפעלת היחידות הפחמיות בעומס המזערי המאפשר גמישות ואמינות אספקה למשק. ב-2018, במסגרת החלטת ממשלה מספר 4080, הוחלט כי תחנת הכוח בפחם אורות רבין 1-4 (4x360 מגו"ט) תושבת ביוני 2022 ובמקומה תוקמנה שתי יחידות גדולות במחזור משולב (2x650 מגו"ט), אשר תופעלנה בגז.

על פי הוראת שר האנרגיה, בהתאם ליעדי משרד האנרגיה, יש להפסיק באופן מוחלט את השימוש בפחם לייצור חשמל בשגרה כבר במהלך העשור הנוכחי. בעניין זה קיימת תוכנית להסבת התחנות הפחמיות הגדולות של חברת החשמל להפעלה בגז לא יאוחר משנת 2026.

**הגדלת הייצור באנרגיה מתחדשת** – בספטמבר 2015, כחלק מהיערכות המדינה לחתימה על הסכם פריז, התקבלה החלטת ממשלה מס' 542 בעניין הפחתת פליטות גזי חממה וייעול צריכת האנרגיה במשק. במסגרת ההחלטה, נקבעו יעדי ייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת בשיעור של 13% בשנת 2025 ו-17% בשנת 2030. בהמשך להחלטת ממשלה 542, אישרה הממשלה בשנת 2016, במסגרת החלטת ממשלה מספר 1403 – מיום 14.4.2016 תוכנית לאומית ליישום היעדים להפחתת פליטות גזי חממה ולהתייעלות אנרגטית, ובה פירוט האמצעים להשגת יעדי ההפחתה שנקבעו לשנת 2030.

לאחרונה, החליטה הממשלה על הגדלת יעדי האנרגיות המתחדשות ל-30% בשנת 2030 וקבעה גם יעד ביניים של 20% בשנת 2025. יעדים אלה קובעו בהחלטת ממשלה מספר 465 מיום 25.10.2020, קידום אנרגיה מתחדשת במשק החשמל ותיקון החלטות ממשלה.

בהמשך להחלטת הממשלה מספר 542 ועל מנת לעמוד במחויבותה של ישראל לפי החלטת הממשלה מס' 2041 בעניין אשרור הסכם פריז בדבר התמודדות בין-לאומית עם שינויי האקלים מיום 14.11.2016, נדרשה ישראל להגיש למזכירות אמנת האקלים יעד לאומי מעודכן להפחתת פליטות גזי חממה לשנת 2030, וכן לפעול למעבר של ישראל לכלכלה דלת פחמן עד לשנת 2050. ביום ה-25.7.2021, קבעה הממשלה בהחלטה מספר 171 יעד להפחתת פליטות גזי חממה של 27% עד שנת 2030 והפחתה של 85% עד 2050.

מעבר לייצור חשמל מבוסס אנרגיות מתחדשות, כגון שמש ורוח, הוא הבסיס לאסטרטגיה העולמית להפחתת פליטת גזי חממה ומזהמי אוויר ומהווה נדבך מרכזי בהתמודדות עם משבר האקלים. במקביל לצורך הסביבתי, ירידת מחירים דרמטית בעשור האחרון בייחוד בעלות מערכות פוטו-וולטאיות (PV) וסוללות אגירה, הביאו לכך שחשמל ממתקני אנרגיה מתחדשת כבר כיום הוא חשמל הזול ביותר. על פי המכרז האחרון של רשות החשמל מיום 28.12.2020, עמד המחיר על 17.45 אגורות לקילו-וואט שעה (קוט"ש).

אולם, בכדי לעמוד ביעדים שאפתניים אלה, נדרש גם להבטיח יכולת משמעותית של אגירה לפרקי זמן ארוכים. מדינות רבות קבעו יעדים לאומיים תוך התייחסות להתפתחויות הטכנולוגיות הצפויות בתחום אגירת האנרגיה כגון ייצור מימן באמצעות אלקטרוליזה. בתחום המימן צפויה ירידת מחירים משמעותית מאוד כבר בעשור

הקרוב ובמדינות רבות בעולם הושקו תוכניות הכוללות השקעות תקציביות משמעותיות – להרחבה ניתן לראות בפרק הניתוח הכלכלי.

קידום ייצור חשמל באנרגיה מתחדשת, אגירת אנרגיה וצמצום השימוש בדלקים פוסיליים הוא יעד אסטרטגי לאומי של ישראל, אשר הכרחי לצמצום פליטות גזי החממה, זיהום האוויר והתחלואה והתמותה הנובעים ממנו. לפיכך יש לקבוע יעד שאפתני של 40% ייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת כבר בשנת 2030, ויעד של 80% - 95% ייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת בשנת 2050.

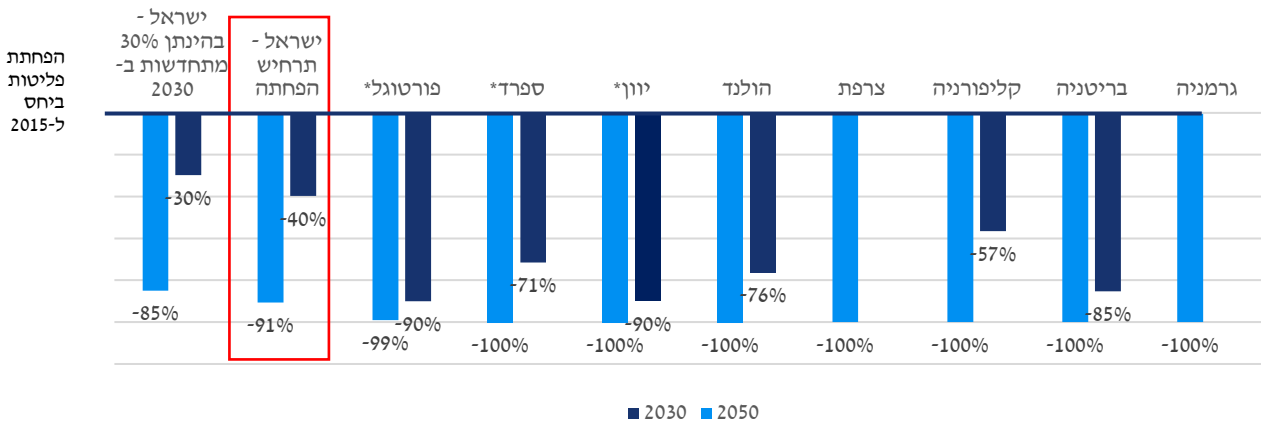
עבודות עומק שביצע המשרד הראה כי היקף השטח המבונה מאפשר יישום של יעד זה על ידי הקמת מתקני ייצור מבוזרים בתוך המרחב המבונה, כגון גגות וחזיתות מבנים כמו גם שטחים מבונים נוספים (דוגמת מאגרי מים, חניונים, ושטחים כלואים). פוטנציאל ייצור החשמל באמצעות מתקני PV במרחב המבונה נאמד בכ-45% מסך צריכת החשמל ב-2020. עמידה ביעד של 40% ייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת ב-2030, תוך התבססות בעיקר על מתקנים מבוזרים בתוך המרחב המבונה, טומנת בחובה יתרונות משמעותיים למשק הישראלי בכלל ולסקטור החשמל בפרט:

- **שיפור הביטחון האנרגטי:** ביזור ייצור החשמל תורם לביטחון האנרגטי היות ופוטנציאל הנזק המשקי מפגיעה או תקלה במתקן בודד קטן משמעותית ככל שנתח גדול יותר מהחשמל מסופק על ידי מספר רב של מתקני ייצור קטנים במקום תחנות כוח גדולות. כמו כן, הייצור באנרגיה מתחדשת בכלל מפחית את החשיפה לזעזועי אספקה ותנודתיות מחירים במשק הגז, המבוסס מספר מצומצם של ספקים, מאגרים, אסדות וצינורות הולכה.
- **ייצור סמוך לצריכה:** ייצור במרחב המבונה, בסמוך למוקדי הצריכה, מפחית את הצורך בהולכת חשמל בין אזורים שונים במדינה, ובכך מצמצם לא רק את איבודי החשמל אלא גם את השקעות בתשתיות הולכה הכרוכות בכך.
- **חדשנות טכנולוגית:** פיתוח ויישום שיטות וטכנולוגיות חדשניות בניהול מערך ייצור ומסירה מבוסס על אנרגיה סירוגית מבוזרות תציב את ישראל בחזית החדשנות העולמית ותאפשר ייצוא פתרונות ישראלים למדינות רבות בעולם.
- **צמיחה ירוקה:** הקמת מספר רב של מתקנים מבוזרים בתוך המרחב המבונה תהווה מנוע לצמיחה ירוקה וייצור תעסוקה במשק, באופן ההולם לא רק את המטרות הסביבתיות של המדינה אלא מסייע למשק להתאושש מהמשבר הכלכלי-תעסוקתי-בריאותי בעקבות מגפת הקורונה.

יישום יעדים אלו יפחית את פליטות גזי החממה מסקטור החשמל ביחס לשנת 2015 ה-42% בשנת 2030 וב-91% בשנת 2050<sup>23</sup> – הפחתת פליטות שעדיין נחשבת שמרנית ביחס ליעדים הנקבעים במדינות מפותחות אחרות.

<sup>23</sup> בהינתן 95% אנרגיה מתחדשת בשנת 2050

הפחתת פליטות גז"ח במשק החשמל ביחס לשנת 2015 (2030 ו-2050)



\* עבור יוון, ספרד, פורטוגל וקליפורניה מדובר באמצע טווח תחזיות הפחתה בהינתן יישום תוכנית האקלים במשק החשמל

**ב. מטרת העבודה**

מטרת עבודה זו היא בחינת ההיתכנות והצעדים האופרטיביים הנדרשים על מנת להעמיק את הפחתת הפליטות במשק החשמל כבר בעשור הקרוב באמצעות העלאת שיעורי החדירה של אנרגיות מתחדשות בשילוב אגירה, על מנת שהמשק כולו יוכל לעבור לכלכלה דלת פחמן עד לשנת 2050. העבודה בוצעה בשלבים המרכזיים הבאים:

- א. בחינת התכנות טכנית-מערכתית למימוש הפוטנציאל להעמקת שיעורי חדירת האנרגיות המתחדשות מעבר ליעד הקיים, עד שיעור של 40% בשנת 2030.
- ב. בחינה אנליטית ואופטימיזציה כלכלית להערכת היקף אגירת האנרגיה הנדרשת על רשת החלוקה למימוש הפוטנציאל שזוהה.
- ג. אפיון טכני של הצרכים התפעוליים ברמת הרשת הנדרשים לקליטת האנרגיות המתחדשות וניהולם במרחב המבונה.
- ד. אפיון החסמים וגיבוש תכנית פעולה אופרטיבית להעמקת שיעורי המתחדשות עד לשנת 2030.

לצורך כך הקים המשרד להגנת הסביבה צוות מקצועי המורכב מגורמי מקצוע בעלי ניסיון רב בתכנון וניהול משק החשמל ורשת החלוקה בישראל. הצוות ביצע ניתוחים של האתגרים וגיבוש של פתרונות נדרשים, לרבות:

- ה. ניתוח טכני ותפעולי של מערך הייצור ורשת החלוקה, תוך אפיון האתגרים הצפויים בניהול מערכות אלו, בהתבסס על מתקני אנרגיה מתחדשת מבוזרים כמו גם את הפתרונות האפשריים.
- ו. ביצוע סימולציות שעתיות של פעולת מערך הייצור והפעלת מודל אופטימיזציה כלכלית.
- ז. זיהוי האתגרים הצפויים בניהול מתקני אנרגיה מתחדשת ואגירה מבוזרים, והצעה לפתרונות.

ח. בחינה כלכלית למעבר המעבר למשק חשמל דל פחמן אל מול חלופת היעד הנוכחי, 30% אנרגיות מתחדשות בשנת 2030.

ט. זיהוי חסמים העומדים בפני השוק ליישום וחדירה של שיעורי אנרגיה מתחדשת במרחב המבונה.

י. גיבוש הפעולות ואמצעי המדיניות הנדרשים בכדי לשלב אנרגיות מתחדשות במרחב המבונה, ולהתגבר על החסמים שזוהו, בין השאר, בראיונות עם מומחים מחברות אנרגיות מתחדשות בישראל, המלצות שהתקבלו מרשות החשמל ועבודת הצוות המקצועי של המשרד.

עבודה זו בוצעה באמצעות ניתוח התוכניות הקיימות להקמת תחנות כוח ופיתוח רשת החלוקה, ביצוע סימולציות שעתיות של פעולת מערך הייצור, והפעלת מודל אופטימיזציה כלכלית. אמצעי המדיניות המוצעים גובשו על בסיס סקירת הצעדים המיושמים במשקי חשמל מפותחים בעולם, והיוועצות עם גורמים מוסדיים ושחקני שוק בארץ.

# היערכות מערך ייצור החשמל ליעד של 40% אנרגיה מתחדשת



## עיקרי הפרק

**מטרות הפרק:** זיהוי האתגרים הצפויים למקטע הייצור במעבר ל-40% אנרגיה מתחדשת בשנת 2030 ובין 80-100% אנרגיה מתחדשת ב-2050, ופירוט הדרכים לפתרונם, תוך מזעור הסיכונים לאמינות המערכת.

האתגרים המרכזיים הם: (א) קיטום משמעותי של הייצור הסולארי, (ב) התמודדות עם שינויים חדים בעקום העומס השיווי בעקבות הייצור הסולארי ו-(ג) התמודדות עם בעיית ייצוב תדר

### המלצות עיקריות:

1. הקמת מתקני אגירה הנשלטים על ידי מנהל המערכת.
2. גיבוש ויישום דרישות טכניות שיאפשרו שליטה של מנהל המערכת במתקני אנרגיה מתחדשת ואגירה, והשתתפותם במתן שירותים נלווים (ancillary services).
3. גיבוש מסגרת רגולטורית לאספקת שירותים נלווים על ידי מתקני אגירה ואנרגיה מתחדשת.
4. העברת יצרני חשמל לשיטת העמסה מרכזית, ללא מחויבות להסכמים בילטרליים (Must take), כך שמנהל המערכת לא יתעדף אותן מעל ייצור PV.
5. תזמון תחזוקת תחנות כוח ה- Must-Run תוך התחשבות בייצור הסולארי.
6. הקמת מערך חיזוי סולארי מתקדם המותאם לצרכי המערכת.

## א. רקע לניהול מערך הייצור

שישה גורמים עיקריים מניעים שינויים מהותיים בתעשיית החשמל בעולם בכלל ובישראל בפרט, וכתוצאה מכך מובילים לשינוי תפיסתי עמוק בתהליך תכנון משק החשמל, כפי שמתואר בתרשים 4.

תרשים 4: תכנון הפיתוח של ייצור החשמל – שינוי תפיסתי



הגורמים הללו עשויים לאתגר את הפרדיגמה הנוכחית לתכנון המשאבים לטווח ארוך באופנים הבאים:

- בעבר תהליך קבלת החלטות לגבי השקעות בייצור החשמל התמקד בעיקר בתחזית הגידול האינקרמנטלי השנתי בביקוש המצטבר לחשמל ויצירת יכולת הייצור המערכתית, יעילה כלכלית ככל הניתן, שתאפשר לספק את הביקושים ברמת האמינות והאיכות הרצויה. גישה זו הולכת ומשתנה עם הזמן: השיקולים הקשורים לשינויי אקלים, מדיניות ותקני איכות הסביבה, הופעת מקורות אנרגיה ידידותיים לסביבה בעלות תחרותיות, סדרי עדיפות של הלקוחות ומוכנותם להשקיע בייצור חשמל - כל אלה ידרשו ניהול סיכונים מקיף במגוון רחב של תרחישים ממנו תיגזרנה החלטות השקעה בשוק החשמל.
- עקב שינויי מדיניות, רגולציה, עלויות, טכנולוגיות ייצור, דפוסי צריכה והתנהגות לקוחות, כל השחקנים במשק החשמל עומדים כעת בפני אי וודאות רבה יותר, הנובעת ממגוון גדול יותר של מקורות ועדים, מאשר בכל עת בהיסטוריה של הענף.
- הופעתו של ייצור חשמל מבוזר זול יחסית יוצרת משוב חשוב בין תכנון מערכת הייצור, מערכת המסירה, מערכת החלוקה ותהליך קביעת כללי הרגולציה והתעריפים. השילוב של יכולות אגירה זולות יחסית בצד הלקוח ופיתוח מערכות מדידה וניהול אנרגיה מתקדמות יבליטו עוד יותר את חשיבותו של המשוב לשיפור תכנון משאבים משולב במשק החשמל.
- שיפור מערכות תקשוב ופריסתן, יספקו איסוף נתונים ברזולוציה גבוהה יותר ויחייבו פיתוח מודלים לתכנון ותפעול מערכת הייצור וניתוחים מתוחכמים יותר. במקביל, מתכנני המערכת יצטרכו לאזן בין התחכום המוגבר של המערכות לבין הצורך המתמשך בשקיפות ובהירות.

- השאיפה להבטיח עמידה ביעדי מדיניות רב שנתיים של משק החשמל בעלות נמוכה ככל הניתן, עשויה לדרוש תשומת לב גדולה יותר לשנים מרוחקות מחד גיסא, והתמקדות עמוקה יותר בתכנון טכנו-כלכלי ארוך טווח של המעבר למערכת הרצויה מאידך גיסא.
- בתנאים האקלימיים של ישראל, פיתוח ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות מתרכז בעיקר בהרחבת הייצור הסולארי (PV) ובמידה פחותה יותר - בהקמת חוות רוח.

מנקודת מבט כלכלית, לחדירה מסיבית של מתקני PV וחוות רוח יש חמישה מאפיינים עיקריים :

1. עלות שולית נמוכה : אפס עלויות דלק ועלויות נמוכות מאוד של מרכיב משתנה של תפעול ואחזקה.
  2. שילוב מתקני PV ורוח בייצור החשמל מלווה במחזורים תכופים יותר של התנעות והפסקות של יחידות ייצור קונבנציונאליות ושינויי העמסתן, דבר הכרוך בעלויות נוספות.
  3. בשל הערך הגבוה של ייצור חשמל באמצעות PV ורוח להפחתת פליטות מזהמים וגזי חממה – היות שייצור PV שנקלט בפועל מפחית ייצור בתחנות מזהמות - העלות לציבור (וגם ליצרן) הנובעת מהפחתת תפוקתן ("קיטום") היא גבוהה יחסית.
  4. למרות ש-PV ורוח מגדילים את יכולת הייצור במשק החשמל ותורמים לאמינות של מערכת הייצור ודחיית השקעות בכושר הייצור האלטרנטיבי (Capacity Credit), ללא תוספת אגירה תרומתן בתחום זה קטנה יותר, קשה יותר להערכה מדויקת בהשוואה לאמצעי ייצור קונבנציונאליים ובדרך כלל יורדת ככל שהיקף החדירה שלהם גדל.
  5. בשונה מטכנולוגיות קונבנציונאליות שעלות הייצור שלהן תלויה משמעותית במחירי הדלק, הוצאות על ייצור החשמל באמצעות PV ורוח נקבעות בעיקר על ידי עלויות קבועות (הקמה + תפעול ותחזוקה) ולכן מתאפיינות ביציבות מרבית לאורך חיי המתקן.
- שילוב הגורמים לעיל צפוי להוביל למספר שינויים מהותיים במצב שוק הייצור :

- עלויות שוליות נמוכות מאוד של PV ורוח פירושו שמקורות אלה, גם בתנאי השוק החופשי, נוטים להביא להחלפה של הייצור הקונבנציונאלי המאופיין בעלויות שוליות גבוהות יותר, ולהפחית את עלויות האנרגיה או, בשוק הסיטונאי (כמו בישראל), את המחירים בשוק. להשפעה זו על סדר ההעמסה של יחידות הייצור עלולות להיות השלכות משמעותיות עוד יותר על השוק מאשר לעלויות עודפות הנובעות מריבוי התנעות והפסקות של יחידות קונבנציונאליות. כך, למשל, שינויים אלה בשוק החשמל הגרמני ערערו את יציבות השוק, גרמו להפסדים כבדים לחלק מיצרני החשמל והצריכו התערבות של המדינה כדי לשפר את המצב.
- ירידה במחירי האנרגיה ובהיקף ההעמסה של יחידות קונבנציונאליות עשויה להעלות באופן ניכר את העלות הסגולית נטו שלהן (סה"כ הוצאות קבועות + משתנות לייצור קוט"ש אחד), דבר אשר יתבטא בעוצמה רבה בשוק הייצור הסיטונאי.
- עלויות אלטרנטיביות בשילוב עם מגבלות טכניות (כגון, זמני התנעה, זמני הפסקה והפעלה מזעריים וכו') של יחידות ייצור קונבנציונאליות עלולות ליצור מחירי יום מראש וזמן אמת שליליים, או מחירי צל שליליים במסגרת אופטימיזציית העלויות. מצבים אלה מתרחשים בפועל בשווקי חשמל בעולם ועלולים להופיע בעתיד גם בארץ.
- מחירים נמוכים בשוק האנרגיה, בשילוב עם ירידה ברמת ההעמסה של יחידות קונבנציונאליות והשתלבות מתקני אגירה במערכת הייצור, עשויים להקטין באופן ניכר את העלויות והמחירים של שירותי גיבוי, תוך פגיעה נוספת בהכנסות של הטכנולוגיות הקונבנציונאליות.

## מטרות פרק זה הן:

- לנתח את פעולת מערכת הייצור, בדגש מיוחד על הביצועים הדינמיים שלה, בתרחיש המניח הרחבה נוספת של הייצור באמצעות אנרגיות מתחדשות, כך שחלקן יגיע לכ- 40% עד 2030 וימשיך לגדול לכ- 60%-80% עד 2040 וכ- 80%-95% עד 2050.
  - להצביע על האתגרים הצפויים בהפעלת מקטע הייצור בשיעורי אנרגיות מתחדשות אלו ועל הדרכים להתמודדות עם האתגרים תוך מזעור הסיכונים והגברת הבטחון האנרגטי ואמינות אספקת החשמל.
- לצורך יישום קפיצת המדרגה הנדרשת על מנת להגיע ליעד המשמעותי של 40% אנרגיות מתחדשות בתוך כ 10 שנים, נדרשת תוכנית פעולה לאומית מקיפה ורחבה. דגש מרכזי והכרחי בתוכנית הוא תכנון והיערכות מתאימה של מערכת הייצור, המסירה והחלוקה בהתחשב בכך שחלק ממשאבי הייצור לא יהיו בשליטת מנהל המערכת.

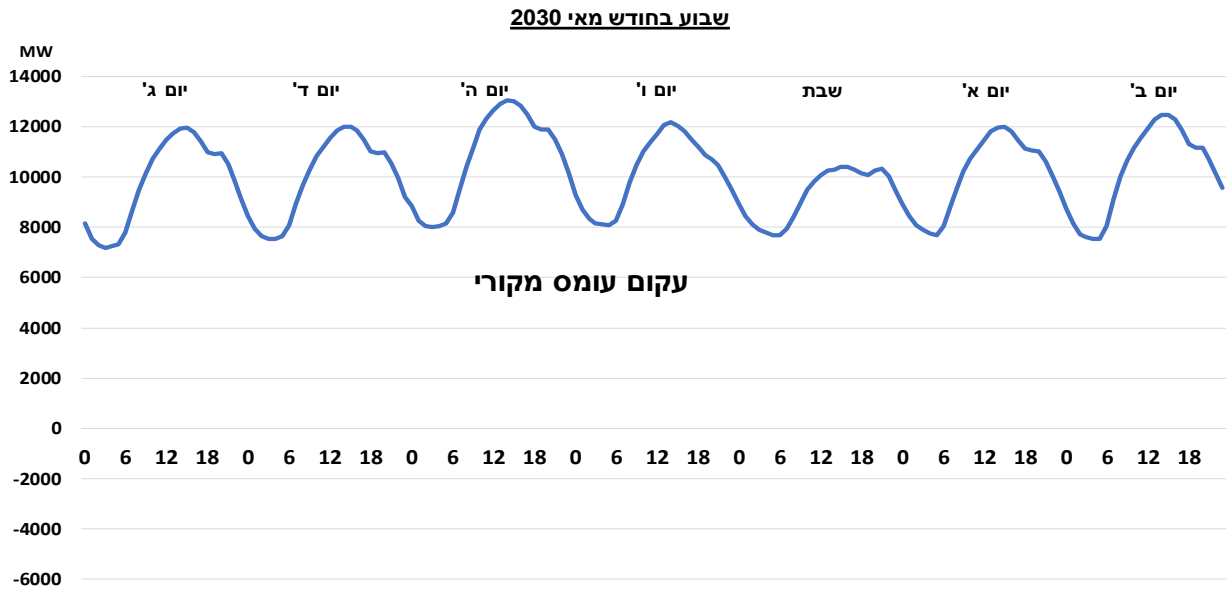
## ב. האתגרים הצפויים בהפעלת מקטע הייצור

### מניעת קיטום והתמודדות עם עליית עומס מהירה

אופטימיזציה של תוכנית הפיתוח מתבצעת במטרה לספק מידע הדרוש לקברניטי המשק לצורך קבלת החלטות לגבי קידום המהלכים הנדרשים בטווח הקצר והבינוני, שבלעדיהם לא ניתן יהיה להשיג את יעדי המדיניות ארוכת הטווח. לפיכך נתמקד בעיקר בניתוח המצב הצפוי במערכת הייצור בשנת 2030, בהנחה שחלקם של מקורות אנרגיה מתחדשים יגיע לכ-40%, כמו גם בפעולות שמומלץ לבצען בעשור הקרוב על-מנת לאפשר ואף לתמוך בהגעה לשיעורי אנרגיה מתחדשת גבוהים יותר בשנים 2040 ו-2050.

דרך נוחה להסביר את הקשיים בהפעלת מערכת הייצור בשנה נתונה היא על ידי ניתוח המצב במספר שבועות מייצגים לאורך השנה.

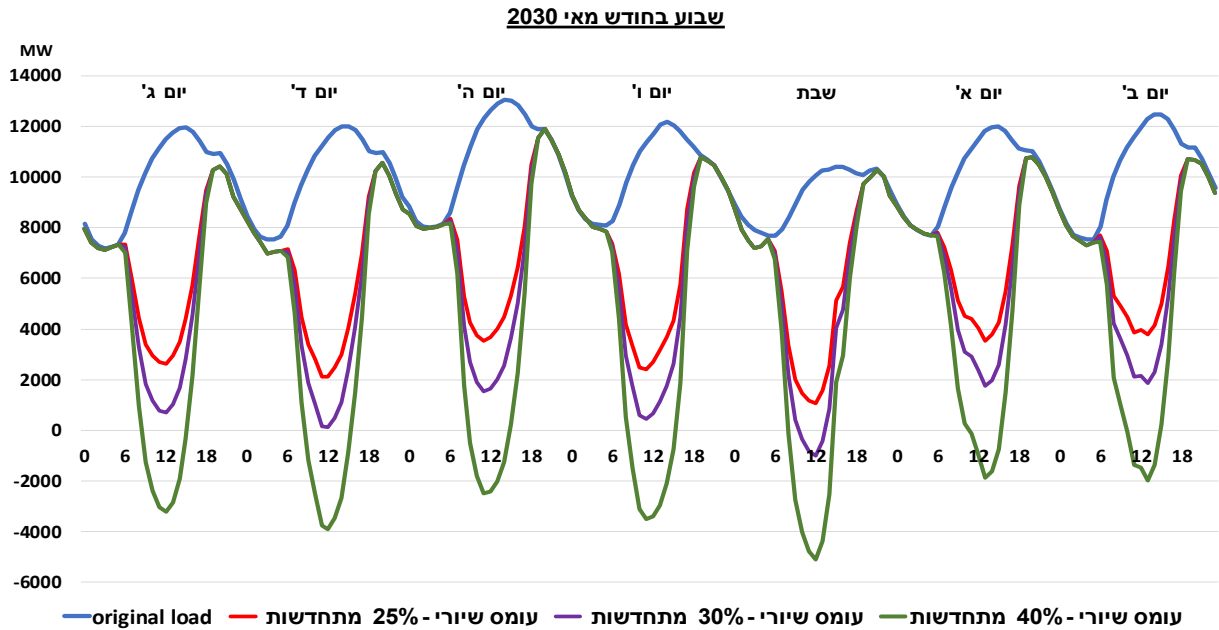
תרשים 5 מראה את עקום העומס הכלל מערכתי, שיכול לאפיין שבוע טיפוסי, ללא תנאי מזג אוויר חריגים, לחודש מאי בשנת 2030.



כפי שהוזכר לעיל, בתנאים האקלימיים של מדינת ישראל, מקור האנרגיה המתחדשת שעליו מתבסס עיקר תכנון הפיתוח של מקטע הייצור לטווח ארוך הוא אנרגיה סולארית פוטו-וולטאית. בנוסף, על פי תוכניות קיימות, במהלך העשור הנוכחי צפויות להשתלב במערכת חוות רוח בהספק כולל של כ- 740 מגו"ט. כפי שהוצג בנספח א' – הגדרת תרחישי העבודה ובפרק מודל טכנו-כלכלי לבחינת משק החשמל בתרחישים עתידיים, על מנת שחלקן של האנרגיות המתחדשות יגיע בשנת 2030 ל-40%, ההספק המותקן הכולל של מתקני PV צריך להגיע לכ- 19–22 גו"ט (כתלות בהיקף האגירה והקיטום).

תרשים 6 : מראה את השתנות עקום העומס השירי, שמתקבל על ידי ניכוי הייצור באמצעות אנרגיות מתחדשות מעקום העומס המקורי, כתלות באחוז חדירת האנרגיות המתחדשות : 25%, 30% ו-40%.

יש לציין שתקופות מעבר מתאפיינות בדרך כלל בצריכת חשמל נמוכה יחסית. במהלך חודשי האביב, עומסי השיא היומיים עוברים משעות הערב (מרץ עד אמצע אפריל) לשעות הצהריים (מאמצע אפריל ואילך). במקביל, עקומת קרינת השמש השעתית, יחד עם פרופיל הייצור הסולארי, עולה ומתרחבת ככל שמתקרבת עונת הקיץ.

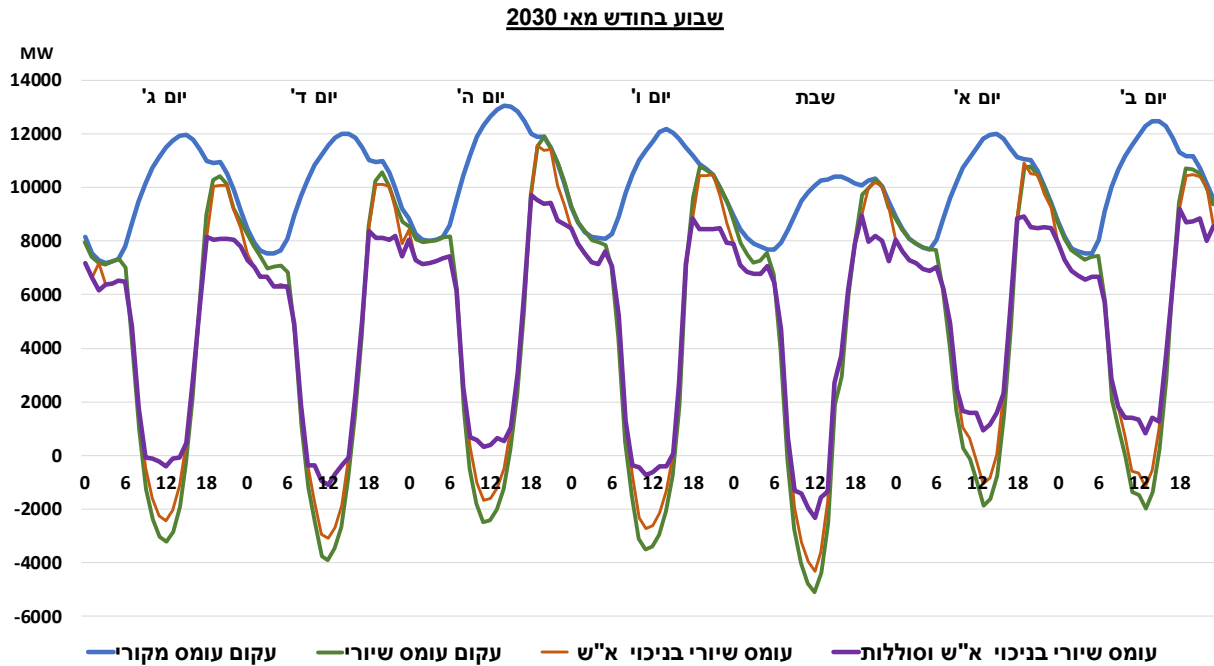


כתוצאה מייצור סולארי בהיקפים המתוארים בתרשים 6, עקום העומס השיורי שהמערכת אמורה לספק יורד בשעות הבוקר במקביל לעלייה בעוצמת קרינת השמש, עולה בשעות אחר הצהריים עם שקיעת השמש ומגיע לשיאו בשעות הערב. בשבתות הביקוש לחשמל בדרך כלל נמוך, אך הייצור הסולארי ממשיך להיות דומה לזה שביתר ימי השבוע, מה שעשוי להשתקף בפוטנציאל לייצור עודף של אנרגיה סולארית אשר אם לא תיאגר - לא תנוצל (קיטום - Dump Energy). כמובן, ההיקף הנדרש של האגירה יעלה עם עלייה באחוז החדירה של הייצור הסולארי. **בהמשך, בהתאם למטרת העבודה, נתרכז בהיקף החדירה של 40%.**

רשות החשמל קבעה מכסה של 800 מגו"ט עבור מתקני אגירה שאובה עם יכולת אגירה שתאפשר הפעלת המתקן בהספק מלא במשך 8 שעות ברציפות. המתקן הראשון (300 מגו"ט) כבר נכנס לפעולה ואילו שני המתקנים הנוספים (156 ו-344 מגו"ט) מתוכננים להשתלב במערכת במהלך שלוש השנים הקרובות. יש לציין שהיחידות הללו משתלבות במערכת בשיטת זמינות קבועה ויהיו בשליטה של מנהל המערכת.

בנוסף, הונח שבשנת 2030 יהיו במערכת לפחות 2,000 מגו"ט של סוללות עם יכולת ייצור במשך 4 שעות ברציפות בהספק מלא, אשר גם הן יפעלו על פי צרכי המערכת. הערך הזה הונח בעקבות ההערכה שתוספת כושר הייצור בהיקף הנ"ל (מעבר למערכת הקיימת והיחידות המתוכננות לקום בשנים הקרובות) מהווה את המינימום הנדרש לעמידה בדרישות אמינות מערכת הייצור ב-2030 – וייתכן כי ניתן להפחית עלויות ייצור באמצעות הקמת מתקני אגירה נוספים. לדוגמא, היקף האגירה שהעריכה רשות החשמל לשם עמידה ביעד של 30% ייצור חשמל באנרגיות מתחדשות בשנת 2030 עומד על כ-2,700 מגו"ט.

בהתאם לכך, סימולציה מקורבת של הקצאת יחידות הייצור לתפעול והעמסתן במהלך השבוע הנדון מביאה למשטר הפעלה של מתקני אגירה שבעקבותיו העומס השיורי שיש לספק על ידי יתר היחידות (הקונבנציונאליות) במערכת ישתנה כפי שמתואר בתרשים 7.



על מנת למנוע רושם מטעה שניתן לקבוע את משטר הפעולה של מתקן אגירה על בסיס פרופיל העומס בלבד, נדגיש באופן מפורש שהמשטר המיטבי חייב להיקבע כחלק מתהליך מורכב ומקיף (Unit Commitment+Optimal Dispatch) אשר מאפשר לחשב את משטר הפעולה האופטימלי של כל יחידת ייצור זמינה במערכת (תזמון התנעות והפסקות, רמת ההעמסה) לאורך ציר הזמן, תוך התחשבות בפרמטרים טכניים וכלכליים של כל יחידה, במדיניות התפעול של מנהל המערכת (המיועדת לשמור על שרידות ואמינות המערכת בעלות סבירה), בכללי הרגולציה בשוק החשמל וכמובן ברמת הניצול בכל רגע של האנרגיה האגורה במאגרי מים או בסוללות. האגירה מתבצעת בדרך כלל בשעות עם עלות שולית מערכתית (System Marginal Price - SMP) נמוכה והייצור – בשעות עם עלות אלטרנטיבית (קונבנציונאלית) גבוהה, תוך התחשבות בעלויות (ובמגבלות) ההתנעה של יחידות קונבנציונאליות, דהיינו בשעות בהן פעולת מתקן האגירה יכולה להביא חיסכון מירבי למערכת.

תרשים 7 מראה, בהתאם לציפיות, כי פעולת האגירה מתקיימת בעיקר בשעות של עומס שיורי נמוך ביותר, בהן הקרינה הסולארית והייצור הסולארי גבוהים, ובהמשך, כאשר השמש שוקעת, המתקנים עוברים ממצב טעינה למצב פריקה ותורמים לאספקת העומס השיורי הגבוה בשעות בהן הייצור הסולארי בלתי אפשרי. נדגיש פעם נוספת שהפעלת מתקני אגירה מושפעת לא רק מערכי העומס עצמם אלא גם מקצב שינוי עקום העומס: אחרי הכל, במהלך העליות או הירידות התלולות של עקום העומס אין מנוס מהתנעות או הפסקות מספר רב של יחידות קונבנציונאליות, שגורמות עלויות ניכרות ולשחיקת המכונות. במצבים אלו הפעלה נכונה של מתקני אגירה יכולה לעיתים קרובות למנוע או לפחות להאט חלק מההתנעות וההפסקות תוך שהיא מביאה לחיסכון מערכתי לא מבוטל. כפי שניתן לראות, בעידן של שימוש נרחב של אנרגיה סולארית, פרקי הזמן הקריטיים בהם העומס משתנה בקצב מהיר במיוחד הם שעות הבוקר, כשהשמש זורחת, ובשעות אחר הצהריים כשהשמש מתחילה לשקוע, ואילו הביקוש עולה לקראת הערב.

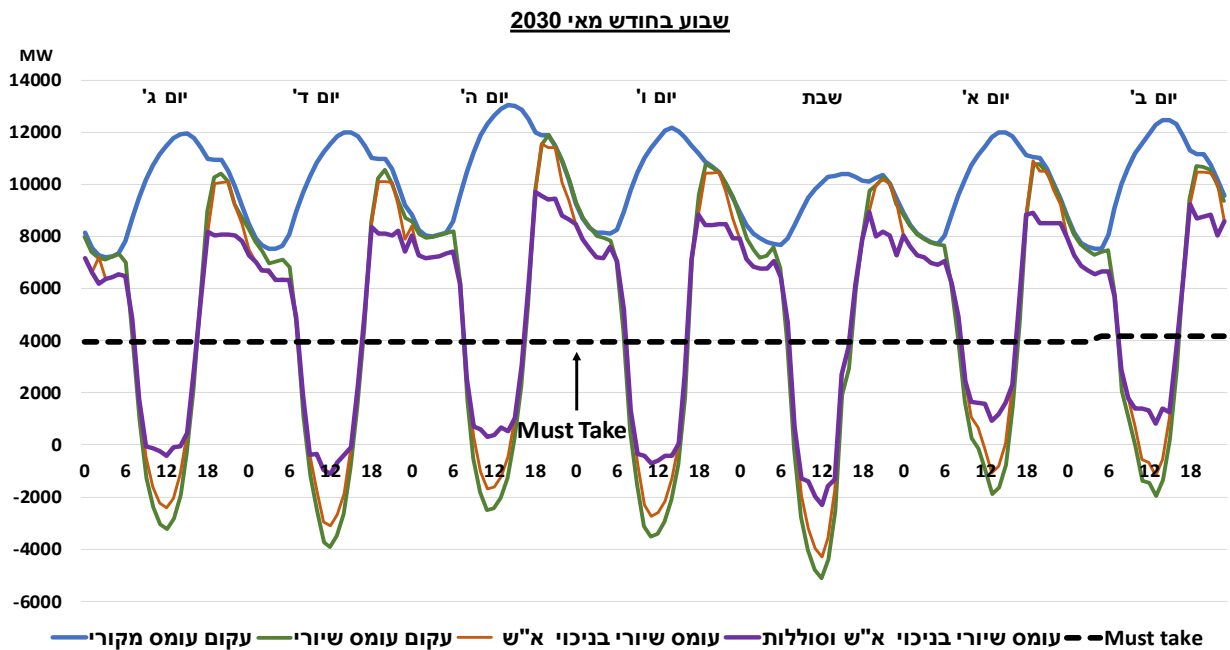
בתרשים 7 רואים בבירור כיצד הפעלת מתקני אגירה צמצמה באופן משמעותי את השטח השלילי מתחת לעקום העומס השיורי המאפיין את האנרגיה הסולארית הבלתי מנוצלת (קיטום סולארי). יחד עם זאת, כפי שנראה

בתרשים הבא, היקפי האנרגיה הסולארית הבלתי מנוצלת עלולים להיות גדולים בהרבה מהמתואר בתרשים 7 בעיקר עקב מגבלות רגולטוריות של משטר ההפעלה ומגבלות טכניות של חלק מיחידות היצור (הספק Must-Run / Must-Take, כפי שהוגדר בנספח א'). הספק Must-Run מתייחס לעומס מינימלי ביחידות קונבנציונאליות שמנהל המערכת חייב להפעיל בשל האילוצים התפעוליים של היחידות עצמן אל מול צרכי המערכת, ובפרט - היחידות הקיטוריות שתהליכי הכיבוי וההתנעה שלהן אורכים מספר ימים. יחידות אלו באתרים רוטנברג ואורות רבין, אשר יוסבו מפחם לגז, יופעלו במשטר Must-Run בהספק המינימלי האפשרי ובהתאם לזמינותן. לעומת זאת, הספק Must-Take מתייחס ליחידות פרטיות שהפעלתן אינה נדרשת בשל אילוצים תפעוליים או אילוצי מערכת, אך רשאיות לפעול בהספק מלא באופן רציף בהתאם להסכמים בילטרליים שלהם או אם צרכי המפעל (קוגנרציה) יצדיקו זאת.

כמוכן, גם במקרה זה רמת ההספק Must-Run / Must-Take תשתנה לאורך ציר הזמן, כתלות בזמינות היחידות בהתחשב בתקופות ההשבתה לצורך תחזוקה מתוכננת או תיקון תקלות.

קו ה-Must-Take וה-Must-Run עבור השבוע הנדון מתואר בתרשים 8. יצוין שהקו לא חייב להיות ישר, מכיוון שחלק מיחידות ה-Must-Run / Must-Take יכולות להיות מושבתות לצורך ביצוע עבודות תחזוקה מתוכננת או תיקון תקלות, ולחילופין לחזור לפעולה לאחר תקופת ההשבתה.

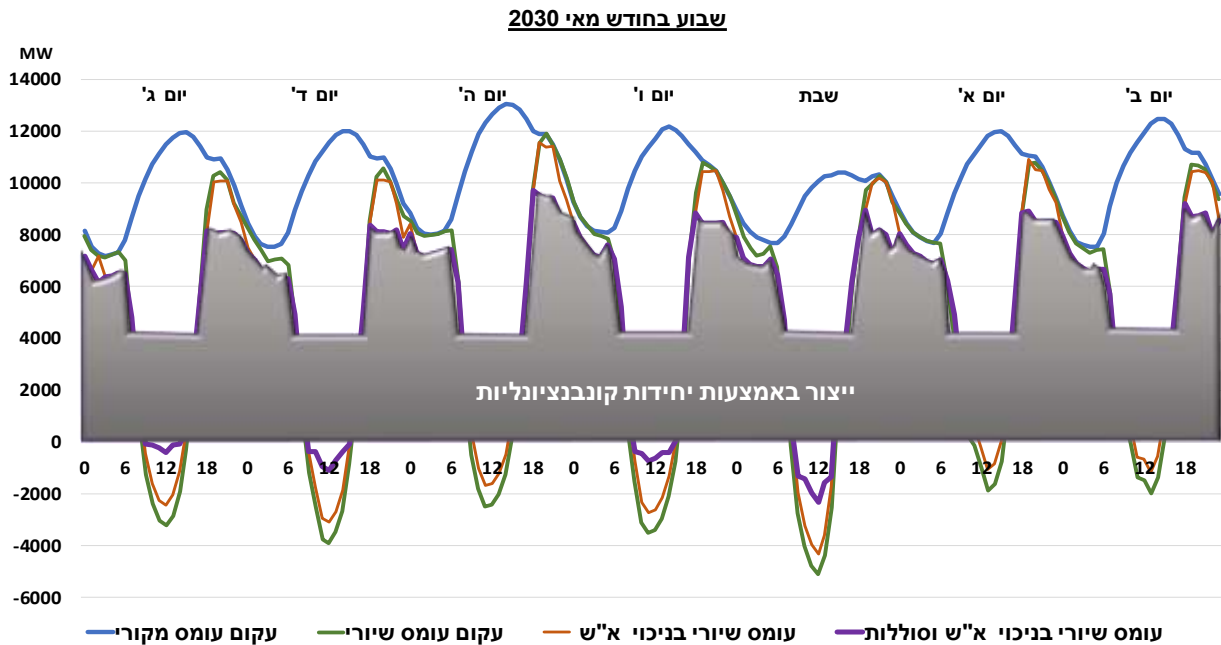
תרשים 8: ההספק Must Run/ Must Take של היצרנים הקונבנציונאליים שמנהל המערכת נדרש לתעדף בתוכנית העבודה על רקע עקום העומס השיורי בניכוי מתקני אגירה שאובה וסוללות



לפיכך, היחידות הקונבנציונאליות (תרמיות) מספקות את השטח (האנרגיה) בין העקום השיורי מנוכה הספק מתקני אגירה (קו סגול) לבין ציר 0, תוך הקפדה שהספקן הכולל לא ירד מתחת לערך של Must-Run/ Must Take, כמתואר בתרשים 9.

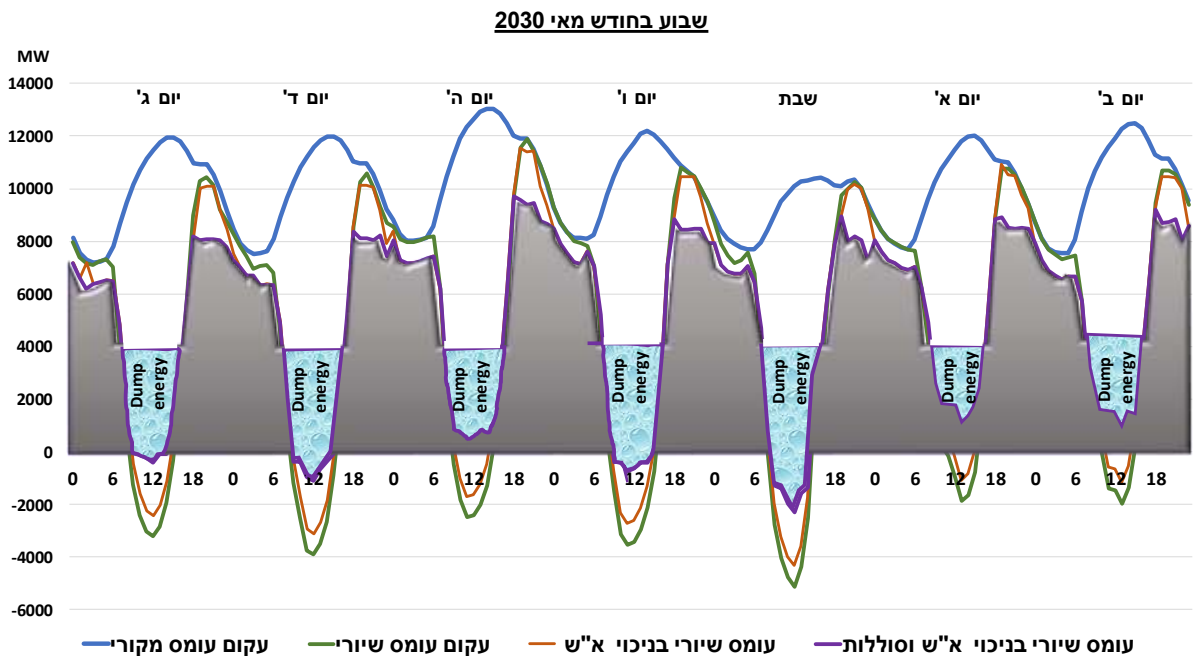


תרשים 9: הפעלת היחידות הקונבנציונאליות על רקע עקום העומס השיורי בניכוי פעולת מהפעלת מתקני אגירה שאובה וסוללות



עקב הייצור הקונבנציונאלי המאוץ "Must-Run / Must-Take", כל האנרגיה הסולארית הזמינה, שנמצאת בשטח הנלכד בין קו ה-Must-Run / Must-Take לבין העקום השיורי בניכוי הספק מתקני אגירה, הופכת לאנרגיה בלתי מנוצלת (קיטום סולארי), כפי שמתואר בתרשים 10.

תרשים 10: האנרגיה הסולארית הבלתי מנוצלת הצפויה בעקבות ההקפדה על דרישת Must-Run / Must-Take



כפי שניתן לראות, בהעדר צעדים תכנוניים, תפעוליים ורגולטוריים נוספים, הפעלת המערכת בהתאם לתרשים 10 צפויה להתבטא בהיקפים גדולים של אנרגיה סולארית בלתי מנוצלת, וזאת אפילו בהנחה של קיום מתקני אגירה בהספק כולל של 2,800 מגו"ט (אגירה שאובה + סוללות). במקרה זה:

- הייצור השבועי הנדרש בהתאם לעקום עומס מקורי הוא כ- 1,690 גוט"ש
- הייצור השבועי הנדרש בהתאם לעקום עומס מקורי בתוספת טעינה ובניכוי ייצור של מתקני אגירה הוא כ- 1,710 גוט"ש
- פוטנציאל הייצור השבועי באמצעות אנרגיות מתחדשות הוא כ- 880 גוט"ש
- הייצור השבועי הקונבנציונאלי (תרמי) הוא כ- 1,040 גוט"ש
- הייצור בפועל באמצעות אנרגיות מתחדשות הוא כ- 670 גוט"ש, המהווים כ- 40% מהייצור הכולל
- האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת (קיטום סולארי) היא כ- 210 גוט"ש, המהווים כ- 24% מפוטנציאל הייצור באמצעות אנרגיות מתחדשות בשבוע הנדון.

למעשה היקפי האנרגיה הבלתי מנוצלת עלולים לגדול אף יותר, שכן הפעלת המערכת כמתואר בתרשים 9 ובתרשים 10 היא בלתי אפשרית מבחינת מנהל המערכת. יהיה קל יותר להסביר זאת לאחר הסבר קצר על תהליך תכנון הפעלת המערכת.

מנהל המערכת מחשב את תוכנית הפעלת המערכת, דהיינו העיתוי ורמת ההעמסה של כל יחידת ייצור ליום או לכמה ימים קדימה במסגרת תהליך האופטימיזציה של הקצאת היחידות לתפעול (Unit Commitment).

**המטרה של תהליך זה היא למזער את עלות הייצור הכוללת במערכת בטווח התכנון, תוך אספקת הביקוש בכל נקודת זמן.**

זאת, בכפוף למגבלות הטכניות של יחידות הייצור:

1. תחום ההעמסה המותר של כל יחידת ייצור (בין הספק מירבי ומזערי).
2. הזמן המינימלי שהיחידה צריכה להיות בפעולה לפני הפסקתה (Minimum Uptime) וצריכה להיות מופסקת לפני הפעלתה מחדש (Minimum Downtime).
3. קצב עליית הספק מרבי (Maximum Ramp-up Rate) וקצב ירידת הספק מרבי (Maximum Ramp-down Rate).
4. זמן ההתנעה המינימלי, דהיינו הזמן עד לסנכרון היחידה ומסנכרון היחידה עד ההספק התפעולי המינימלי. טיפול מיוחד נדרש בנוגע לתהליך ההתנעה או ההפסקה בשלבים של יחידות ייצור במחזור משולב אשר מורכבות מטורבינות גז ומיחידות קיטוריות.
5. מגבלות על פליטת מזהמים כגון SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> וחלקיקים, בשעה מסוימת או בפרק זמן מסוים.

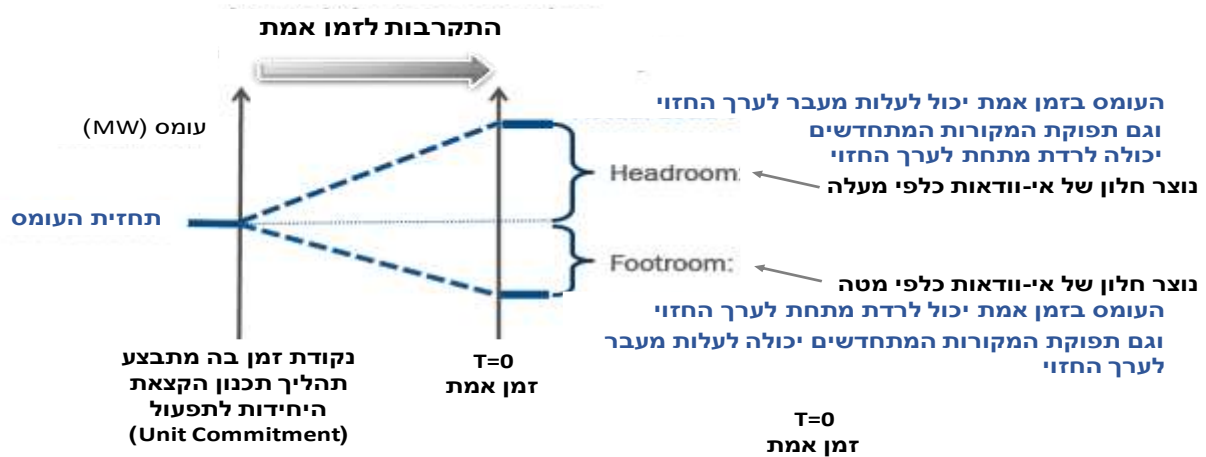
כמו כן, ישנן מגבלות מערכתיות:

1. מגבלות במערכת ההולכה.
2. מגבלות על פליטת מזהמים או גזי חממה, שעתיות או יומיות ברמה כלל מערכתית.
3. מגבלות על צריכת דלק מסוים (למשל גז או פחם) ברזולוציה שעתית או יומית.
4. מגבלות על רמת ההעמסה הכוללת של קבוצת יחידות ייצור ברזולוציה שעתית וכו'.
5. המחויבות של מנהל המערכת לתעדף חלק מיצרני חשמל, כגון היצרנים עם הסכמים בילטרליים, יצרנים בשיטת קוגנרציה, אנרגיות מתחדשות וכו'.

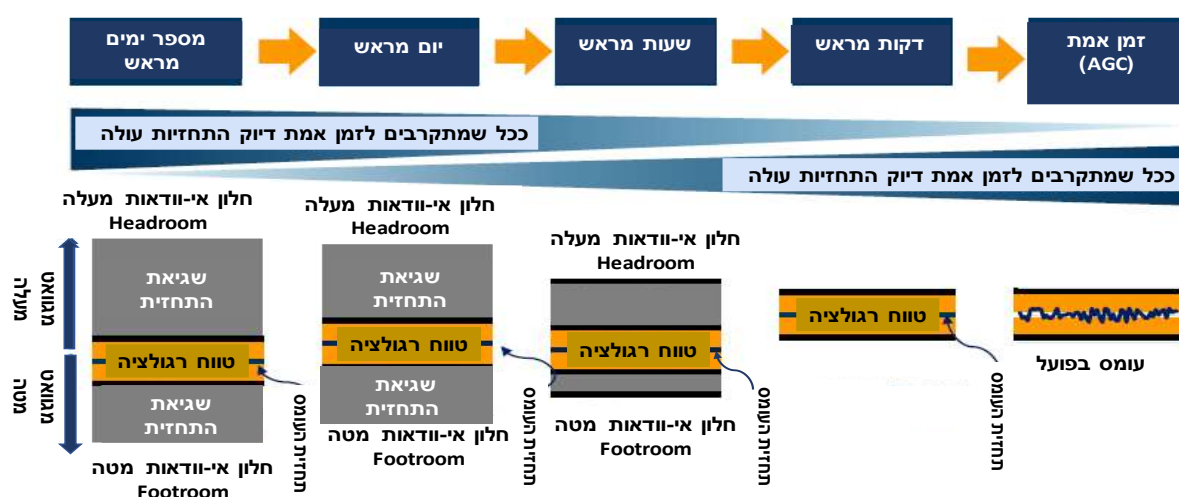
בנוסף, ישנן דרישות מערכתיות, ובפרט דרישות עתודה לצורך התמודדות עם הפסקה מאולצת בלתי צפויה של יחידת ייצור, אשר עשויה לגרום לירידת תדר מסוכנת במערכת אם התגובה המתקנת מצד יתר יחידות הייצור לא תבוא במהירות מספקת.

לפירוט תהליך תכנון הפעלת המערכת ראו נספח ב'. כפי שהוזכר לעיל, מנהל המערכת מחשב את תוכנית הפעלת המערכת, דהיינו העיתוי ורמת ההעמסה הטנטטיבית של כל יחידת ייצור ליום או לכמה ימים קדימה במסגרת תהליך האופטימיזציה של הקצאת היחידות לתפעול, כמתואר בתרשים 11.

תרשים 11: היווצרות חלונות אי-וודאות בנוגע לערכי העומס השיורי בזמן אמת

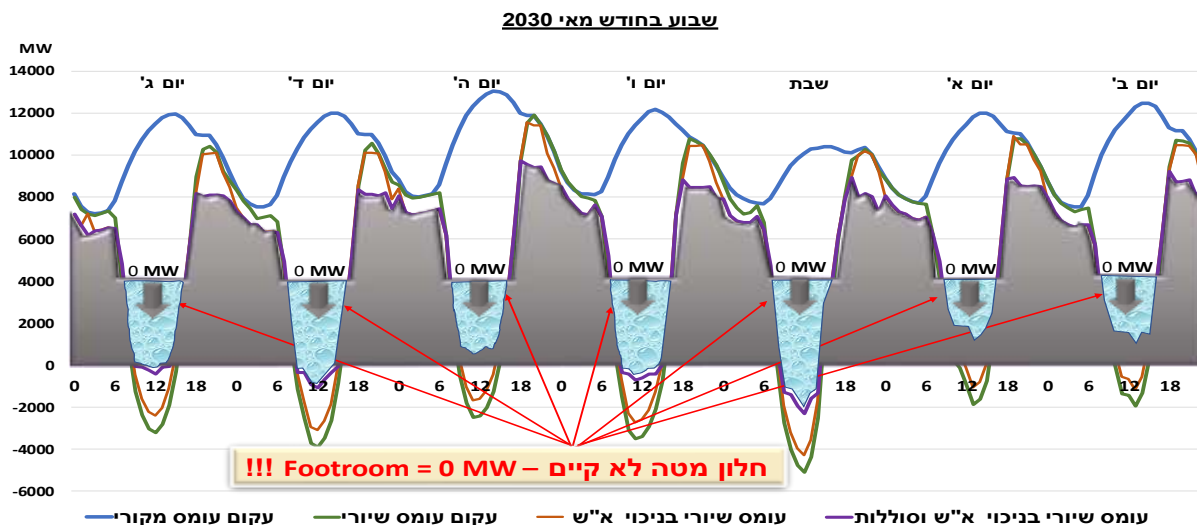


בנקודת הזמן בה מתבצע התכנון, מנהל המערכת נעזר בתחזית העומס במערכת ובתחזית הייצור באמצעות מקורות אנרגיה מתחדשים. מטבע הדברים, יתכנו סטיות בין התחזיות שבידי מנהל המערכת לבין התנהגות העומס או היקף הייצור באמצעות אנרגיות מתחדשות בפועל ( $T \geq 0$ ). לכן, על מנהל המערכת, בתכנון הקצאת היחידות לתפעול, ליצור את היכולת של המערכת להעלות או להוריד את ההספק בזמן אמת, ככל שיידרש כדי לעקוב אחר השינויים האפשריים בעקום העומס השיורי. במילים אחרות, מנהל המערכת, בתכנון מראש לכל נקודת זמן, יקצה שילוב כזה של יחידות ייצור לתפעול שעשוי להספיק למעקב אחר עלייה (Headroom) או ירידה (Footroom) של העומס השיורי. כמובן, ככל שחלקן של אנרגיות מתחדשות במערכת הייצור יגדל, חלונות אי-הוודאות כלפי מעלה (Headroom) וכלפי מטה (Footroom) הנדרשים לשמירה על אמינות אספקת החשמל, עשויים להתרחב גם כן. ככל שמתקרבים לזמן אמת ( $T=0$ ), התחזיות מתעדכנות ותחום אי-הוודאות כלפי מעלה וכלפי מטה יכול להצטמצם, כפי שמוצג בתרשים 12.



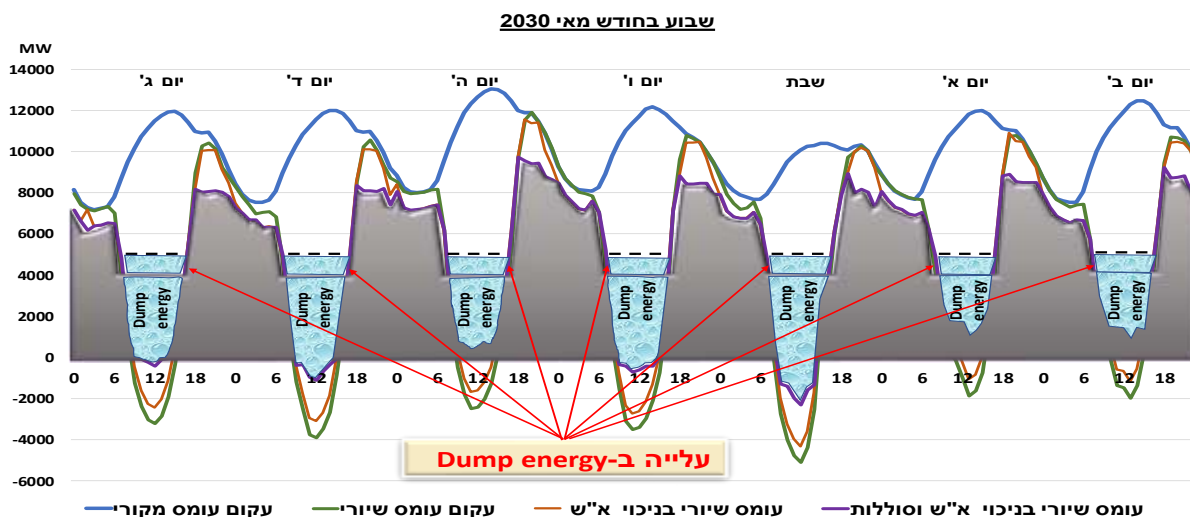
יובהר שוב כי המטרה של Unit Commitment היא לקבוע מראש אילו יחידות ייצור יהיו בפעולה בזמן אמת, וזאת בהתחשב במגבלות הטכניות של כל יחידה, כגון זמן התנעה, זמן מינימלי של הפעלה לפני הפסקה, זמן מינימלי של השבתה לפני הפעלה וכו'. יש לכך חשיבות רבה בגלל ההבדלים המשמעותיים בין המגבלות הטכניות של יחידות שונות. לדוגמא, ההחלטה להפעיל יחידת קיטור גדולה (כגון יחידות באתרי אורות רבין או רוטנברג) חייבת להתקבל מספר ימים מראש. התנעה של יחידת מחזורי מ"מ אחרי הפסקה קרה יכולה לארוך מעל 3 שעות. לכן, אם ההחלטה לא מתקבלת מספיק מוקדם, לא ניתן יהיה להשתמש ביחידה בזמן אמת. עם זאת, אם היחידה כבר מופעלת, היא תמשיך לפעול למשך פרק זמן מסוים לפני שניתן יהיה להפסיק את פעולתה. בהפעלה בפועל של המערכת, טווח התמרון כבר צר יותר והפעילות מתרכזת במעקב אופטימלי אחר עומס המערכת תוך התחשבות במגבלות ההספק המינימליות והמקסימליות של כל יחידה. היה חשוב להביא את ההסבר לעיל לפני שממשיכים לנתח את האתגרים התפעוליים שיעמדו בפני מנהל המערכת, שבה חלק משמעותי מייצור החשמל יבוצע באמצעות מתקני PV. בשלב מוקדם יותר צוין שמשטר הפעולה של המערכת המופיע בתרשים 10 לא יכול להיות מקובל על ידי מנהל המערכת. תרשים 13 מסביר את הסיבה לכך. בשעות של עומס שיורי מזערי, יחידות ייצור זמינות מקבוצת Must-Run (יחידות קיטוריות באתרים אורות רבין ורוטנברג) מועמסות בהספק מינימלי, יצרנים פרטיים בשיטת קונגרציה ויצרנים שברשותם הסכמים בילטרליים (אסדרה 241 ומכרז או.פי.סי.) יועמסו בסדר עדיפות ראשון על פי תוכניות העבודה שייגישו. כתוצאה מכך עשוי להיווצר מצב בו למנהל המערכת לא יישאר חלון מטה (Footroom) כלשהו להורדת ההספק של המערכת אם העומס של המערכת ירד או אם הייצור הסולארי יעלה (או שניהם) ביחס לתחזיות שהיו לו בעת קביעת תוכנית הקצאת היחידות לתפעול.

תרשים 13 : תוכנית בלתי אפשרית של הפעלת מערכת הייצור עקב חוסר חלון להורדת ההספק בשעות של עומס שיורי מזערי



שמירה על Footroom בתהליך של Unit Commitment, תביא להפעלת מספר רב יותר של יחידות קונבנציונאליות בשעות של עומס שיורי נמוך, כאשר לכל יחידה נוספת יהיה מינימום תפעולי משלה. אם במערכת בסדר גודל של המערכת הישראלית, המבוססת על ייצור קונבנציונאלי, ניתן להסתפק ב-Footroom של כ- 500-700 מגו"ט על מנת לכסות את תחום השגיאה האפשרית בתחזית הביקוש לחשמל, אזי במערכת בה בשעות מסוימות ההספק הסולארי מהווה חלק גדול מההספק הפועל במערכת, יידרש Footroom גדול יותר בכדי לכסות את טווח השגיאה האפשרי בתחזית הייצור הסולארי (בנוסף לטווח השגיאה בתחזית הביקוש). לדוגמא, תרשים 14 מראה את העלייה הניכרת בהיקף האנרגיה הסולארית הלא מנוצלת (קיטום סולארי) כתוצאה משמירה על Footroom של כ- 1,000 מגו"ט.

תרשים 14 : השלכות מיצירת Footroom של 1000 מגו"ט על היקף הייצור הסולארי הלא מנוצל (Dump)



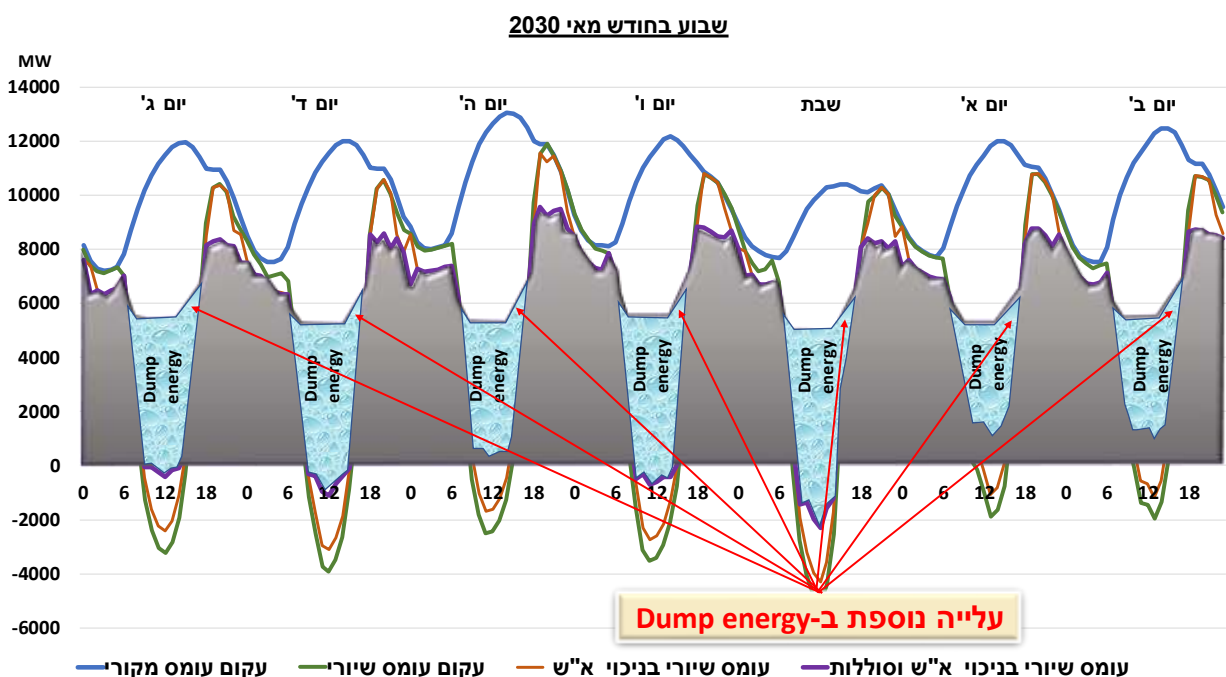
גורם נוסף שעשוי להקשות על הפעלת מערכת הייצור ולגרום לעלייה בהיקף האנרגיה הסולארית הלא מנוצלת טמון בזמני ההתנעה הארוכים יותר בפועל, של יחידות מחז"מ, ביחס לנדרש מהן. בהתאם לספר אמות המידה

של רשות החשמל (אמת מידה 85), משך ההתנעה של יחידת מחז"מ לא יעלה על הערכים המפורטים בטבלה הבאה:

סוג התנעה	משך הפסקת היחידה טרם ההתנעה	משך זמן עד עומס מלא בדקות	משך זמן עד סנכרון בדקות
קרה מאוד	מעל 96 שעות	250	180
קרה	96-48 שעות	220	150
פושרת	48-12 שעות	100	85
חמה	עד 12 שעות	65	55

בהתאם לדרישות לעיל, הונח בחישוב שניתן יהיה להתניע יחידת מחז"מ אחרי הפסקה חמה תוך כשעה. עם זאת, אין להתעלם מכך שמשך זמן ההתנעה בפועל יכול להיות ארוך יותר. במערכת שבה היקף החדירה של אנרגיות מתחדשות מגיע ל-40%, יהיה צורך, כמעט בכל יום לאורך השנה, להתניע מספר רב של יחידות מחז"מ כאשר השמש שוקעת ולבצע מספר רב של הפסקות עם הזריחה. התנעות והפסקות תכופות, המלוות בשינויי עומס בקצב מהיר עשויות לגרום לשחיקה מהירה של היחידות ולכן יש לנקוט בזהירות יתר בכל הקשור למשטרי הפעלתן. אם כתוצאה מכך זמן ההתנעה של מחז"מ בשעות שקיעת השמש יעלה לכ-3 שעות וגם קצב הורדת העומס לפני הפסקת היחידה בבוקר יהיה איטי יותר, תמונת המצב בשבוע הנדון תשתנה כמתואר בתרשים 15, תוך עלייה נוספת בשיעור האנרגיה הסולארית הלא מנוצלת.

תרשים 15: השלכות מעלייה בזמן ההתנעה (מ-1 ל-3 שעות) של יחידות מחז"מ על היקף הייצור הסולארי הלא מנוצל (Dump)

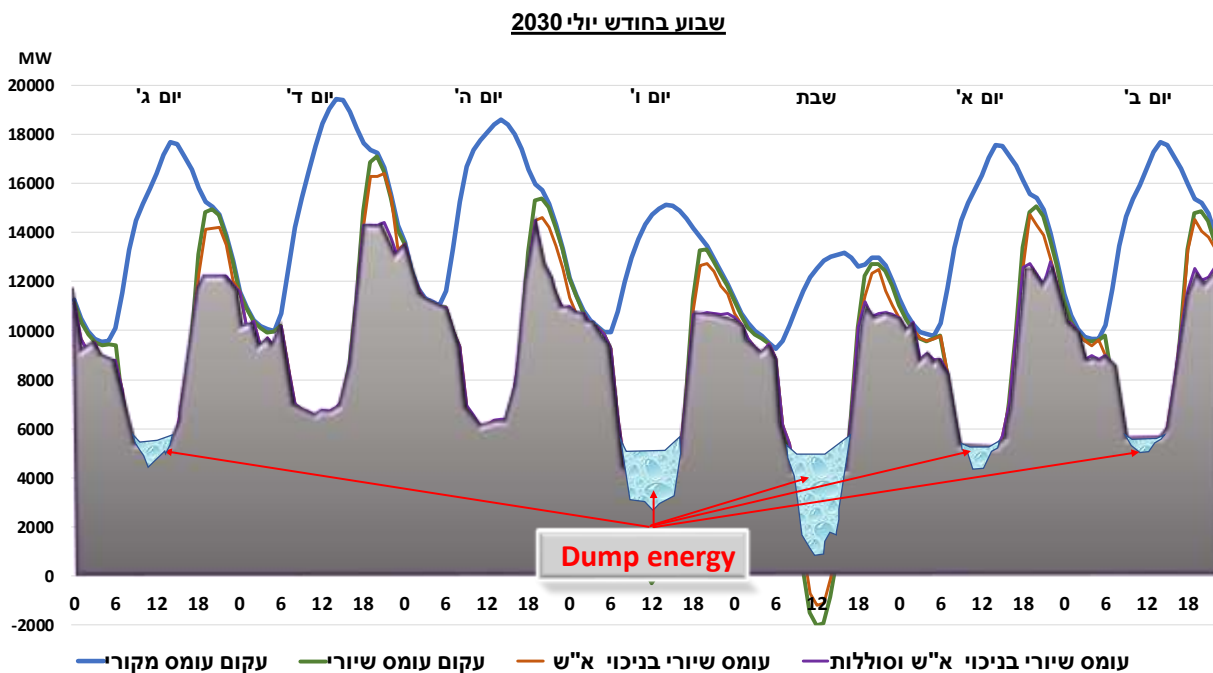


עד לנקודה זו התרכזנו בתיאור המצב הצפוי במהלך שבוע בחודש מאי, המתאפיין בדרך כלל בביקוש נמוך יחסית לחשמל בהשוואה לחודשי הקיץ או החורף. לעומת זאת, פוטנציאל הייצור הסולארי בחודש מאי הוא מהגבוהים בשנה. זו הסיבה העיקרית להיווצרות תנאים שיכולים להוביל לעודפים מופרזים של הייצור



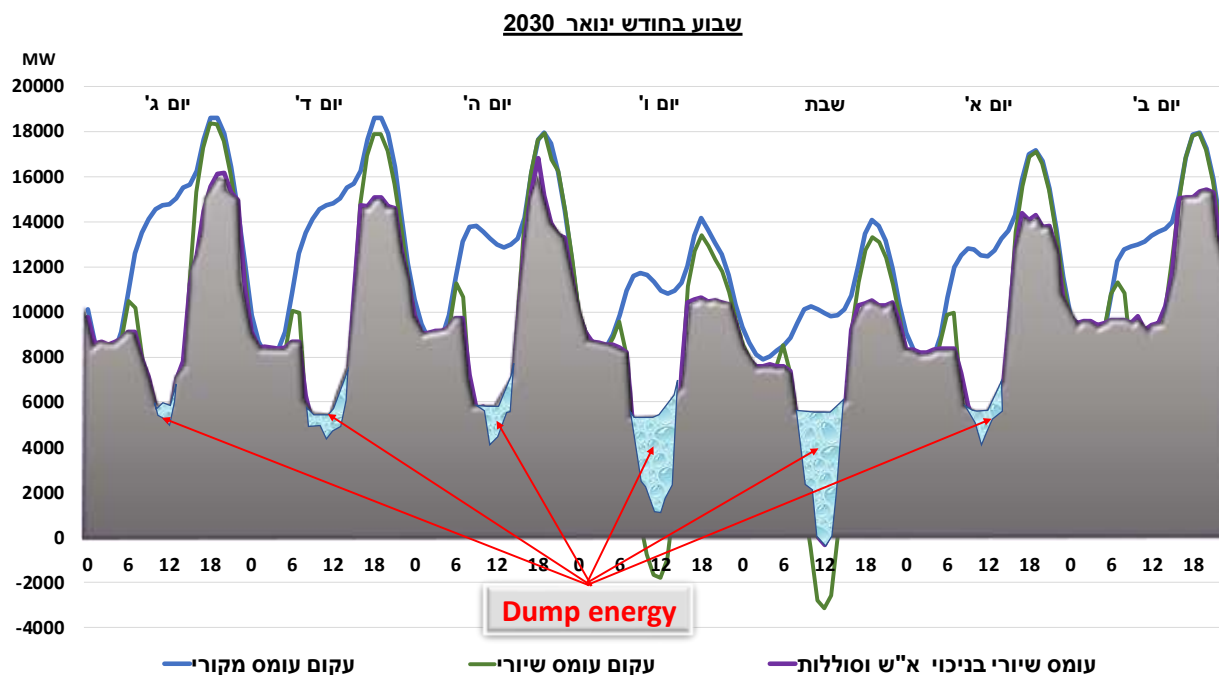
הסולארי. אכן, הערכה של מצב הפעולה של המערכת במהלך שבוע בחודש יולי, המאופיין בעומס גבוה, מצביעה על הפחתה חדה בכמות האנרגיה הסולארית הבלתי מנוצלת לעומת שבוע של חודש מאי, כפי שמוצג בתרשים 16.

תרשים 16 : הפעלת היחידות הקונבנציונאליות בשבוע של חודש יולי 2030 על רקע עקום העומס השירי בניכוי פעולת מתקני אגירה שאובה וסוללות



גם בשבועות עם העומסים הגבוהים ביותר בשנה, עדיין צפויות כמויות גדולות של אנרגיה סולארית עודפת במהלך שבתות ואפילו בימי שישי. עם זאת, הבעיה השנייה שצוינה לעיל תהפוך לחריפה יותר בשבועות הקיץ והיא קשורה לקושי לעקוב אחר עלייה גדולה במיוחד וחדה בעומס השירי במהלך שעות השקיעה (מעל 10,000 מגו"ט) והזריחה.

כדי להשלים את התמונה בנוגע לשונות העומס השירי ומשטרי הפעלת המערכת בעונות שונות של השנה, נראה את המצב הצפוי גם באחד השבועות בינואר, שגם הוא מאופיין ברמת עומס גבוהה (תרשים 17), לרבות עומס גבוה המסופק על ידי יחידות קונבנציונאליות, כאשר שיא הייצור יעמוד על כ-17 גו"ט. עם זאת, יודגש שלא תידרש הקמה של תחנות כוח נוספות על מנת לספק עומס זה מעבר ליחידות קיימות או שיוקמו ברמת ודאות גבוהה, כמתואר בנספח א' ו-ב'.



יש לציין כי בקיץ, הביקוש לחשמל מגיע לשיאו בשעות אחר הצהריים, כאשר הייצור הסולארי נמצא בעיצומו. בחורף לעומת זאת, ערכי הביקוש המרביים מופיעים בשעות הערב ולכן אינם מושפעים מייצור סולארי, כפי שניתן לזהות מההשוואה בין תרשים 16 ותרשים 17. כתוצאה מכך, למרות שבחורף יכולת הייצור הסולארי נמוכה יותר בהשוואה לקיץ, קצב העלייה של עקום העומס השיורי בשעות השקיעה אף עולה לעתים על זה של הקיץ. במילים אחרות, הבעיה של מעקב אחר קצב העלייה בעומס שיורי בשקיעה אינה רק קיימת, אלא אף עשויה להחמיר במהלך השבועות עם עומס גבוה בחורף. נשים לב לכך שגם בשבוע של חורף עם עומס גבוה, יש עדיין לצפות לייצור סולארי עודף בימי שישי ושבת. לסיכום, מהניתוח לעיל של תהליך תכנון הפעלת המערכת בשבועות אופייניים עולות שתי בעיות מרכזיות הדורשות פתרונות טכנו-כלכליים מתאימים:

1. סיכון להיווצרות כמויות מופרזות של אנרגיה סולארית בלתי מנוצלת. בסיכום שנתי, בהנחות ששימשו לביצוע החישובים ובהעדר צעדים תכנוניים, תפעוליים ורגולטוריים נוספים, החלק של האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת עלול להגיע לכ-15%-16% מכלל האנרגיה שניתן להפיק מהמקורות המתחדשים עם הקיבולת המותקנת כפי שהונחה. ברור שמצב זה אינו רצוי, לא מבחינה סביבתית ולא מבחינה כלכלית, וכי יש לנקוט בכל הצעדים האפשריים לשיפורו.
2. עלייה חדה מאוד בעומס שיורי בשעות השקיעה, שיכולה להגיע ל-10,000 מגו"ט ויותר למשך כ-4 שעות, ולהיפך - ירידה חדה בשעות הזריחה.

בנוסף, מההסברים לעיל נראה כי בעיות אלה אינן נפתרות בנפרד, שכן קיימת תלות הדדית חזקה ביניהן.



## דרכים לצמצום כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת (קיטום סולארי)

ראשית, נתמקד בפעולות זולות יותר ופחות מורכבות מבחינה טכנו-כלכלית, ונעבור לאפשרויות מורכבות יותר אשר יישומן עשוי לדרוש פרק זמן ארוך יותר.

### השתתפות תחנות PV במילוי הדרישות ל-Headroom ו-Footroom בתכנון הקצאת היחידות לתפעול (Unit Commitment).

כפי שהוסבר בסעיפים הקודמים, בהכנת תוכנית פעולת המערכת, מנהל המערכת נאלץ להבטיח את יכולת המערכת להוריד (Footroom) או להעלות (Headroom) את ההספק בזמן הנדרש, אם דרישת ההספק במערכת יורדת מתחת לערך הצפוי על פי התחזית שברשותו בזמן ביצוע התכנון, או עולה מעליו. תרשים 13 ותרשים 14 מראים איך סוגיה זו עשויה להעלות את כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת ולהוריד כתוצאה מכך את אחוזי החדירה בפועל של אנרגיות מתחדשות.

מפעילי המערכת נאלצים לכלול שגיאות בתחזית העומס והייצור הסולארי בחישוביהם לגבי דרישות ה-Footroom וה-Headroom, תוך אי הכללה של המתקנים הסולאריים עצמם באספקת חלק מהדרישות הללו. גישה זו עוברת שינוי בעולם.

בזכות יכולות בקרת תפוקה מדויקת, עקב השיפורים הטכנולוגיים שחלו בשנים האחרונות, תחנות PV חדישות רכשו יכולות טכניות המאפשרות להן להשתתף בתהליכי ויסות תדר ומעקב אחר העומס לצורך איזון רציף בין הייצור המערכתי לביקוש לחשמל. בעצם מערך הבקרה של תחנות אלו יכול להיות בשליטה של מנהל המערכת, כך שהוא יכול לבחור להשתמש בתחנות אלו לייצור אנרגיה או לשירותי מערכת חיוניים כגון עתודות רגולטוריות, ויסות תדר, ויסות מתח וכו', ובחירה זו, כמובן, יכולה להשתנות על פני ציר הזמן לאורך טווח התכנון.

אספקת שירותים אלה דורשת קיום יכולת הורדת ההספק של התחנה הסולארית וחלק מהשירותים דורש ממפעיל התחנה לשמור על ה-Headroom שיאפשר את העלאת ההספק במידת הצורך. למרות שזה מוביל לאובדן אנרגיה סולארית, תחנות כוח סולאריות אינן נושאות בעלויות המשתנות המוחשיות של אספקת שירותים אלה. במקום זאת, עלות אספקת השירותים הללו היא עלות אלטרנטיבית (עלות ההזדמנות - Opportunity Cost) שמנהל המערכת יוכל להעריך במסגרת תהליך אופטימיזציה של תוכנית הפעלת היחידות. השתתפות התחנות הסולאריות בשירותי המערכת יכולה במקרים מסוימים גם להפחית את עלויות הדלק במערכת ולהקטין את פליטת המזהמים עקב הפחתת התחייבויות של תחנות תרמיות לאספקת שירותים אלה ולהעלות היעילות בהן פועלות.

בשנת 2016, מנהל המערכת של קליפורניה (CAISO), המעבדה הלאומית לאנרגיה מתחדשת של ארה"ב (NREL) וחברת First Solar ערכו סדרת בדיקות בתחנת PV בהספק של 300 מגו"ט במטרה להפגין את גמישותה התפעולית. הדו"ח המסכם את ממצאי הבדיקות פורסם במחצית השנייה של שנת 2017.

USING RENEWABLES TO OPERATE A LOW-CARBON GRID:  
 Demonstration of Advanced Reliability Services from a Utility-Scale Solar PV Plant



2018 Intersolar Outstanding Project Winner

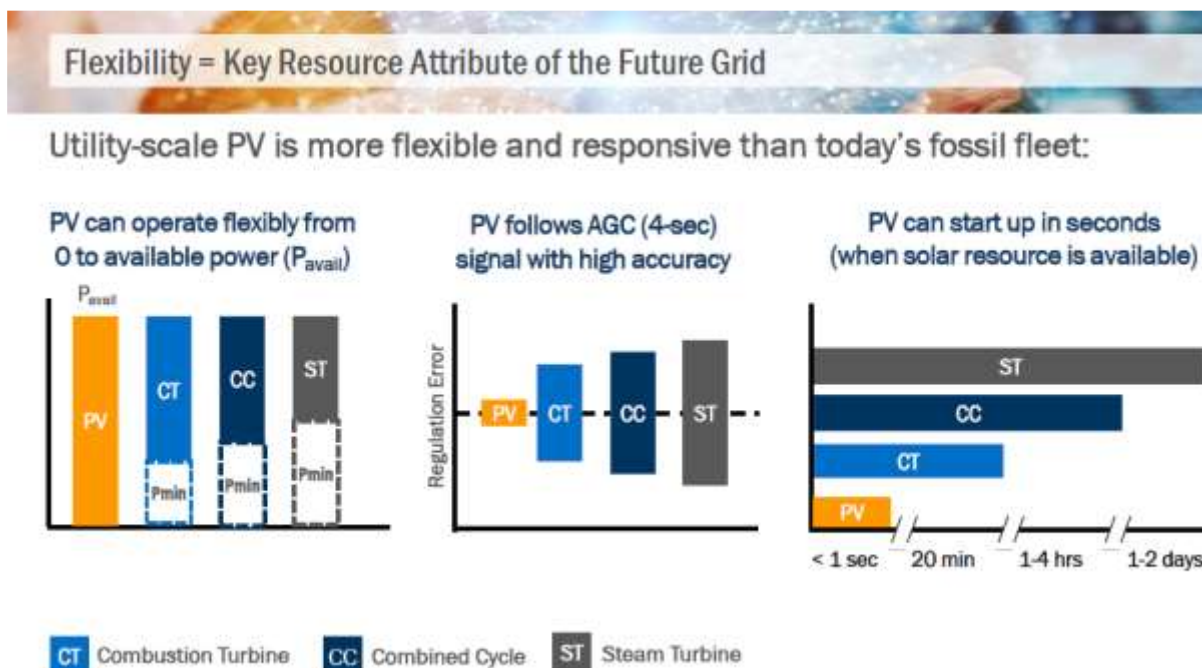
2017 NARUC Award Winner



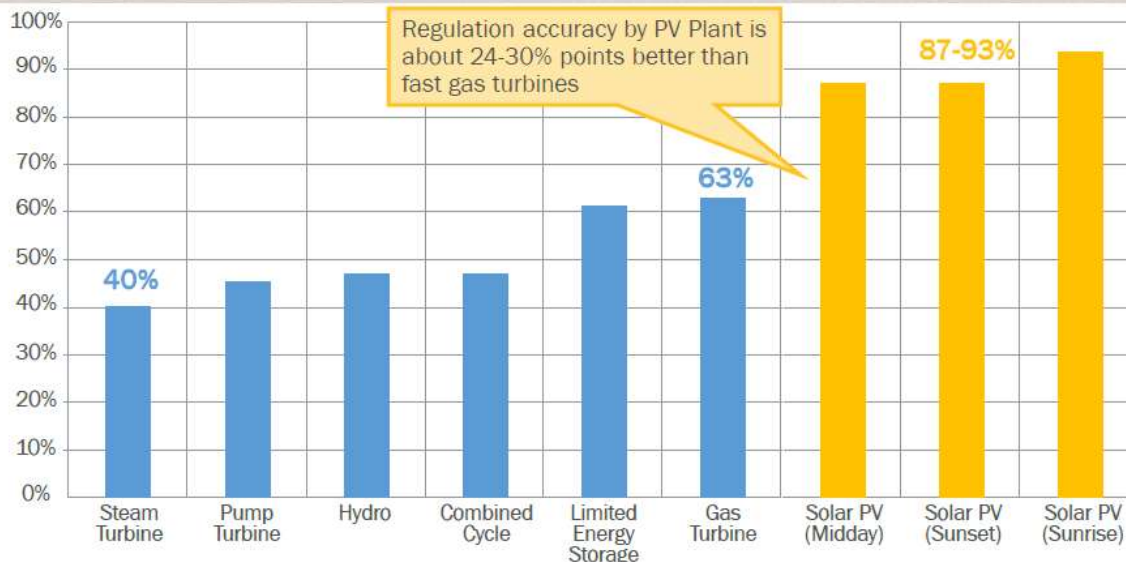
הבדיקות נערכו כדי לקבוע האם תחנות PV מסוגלות לספק ביצועים תפעוליים הדומים למקורות קונבנציונאליים. היחידה נבדקה ביכולתה לספק שירותים נלווים, כמו תגובת תדר, ויסות עומס מעלה ומטה, בקרת מתח וניהול הספק פעיל. **בכל אחת מקטגוריות הבדיקה, ביצועים של היחידה הסולארית היו דומים לביצועים של מקורות קונבנציונאליים או טובים יותר מהם, כפי שמתואר בתרשים 18 ו**

תרשים 19 שהובאו מתוך המצגת של חב' FirstSolar אשר הוצגה ביום עיון שנערך במרץ 2020 במשרד להגנת הסביבה.

תרשים 18 : גמישות ההפעלה ודיוק התגובה של מתקני PV משוכללים עולים על אלה של יחידות תרמיות



### PV PLANTS OUTPERFORM CONVENTIONAL RESOURCES IN FREQUENCY REGULATION



Blue bars taken from the ISO's informational submittal to FERC on the performance of resources providing regulation services between January 1, 2015 and March 31, 2016

תוצאות הבדיקות לעיל הדגימו כיצד טכנולוגיה של ממירים חכמים בשילוב עם כלים מתקדמים לבקרת פעולת התחנה (advanced controller) יכולה לקדם את טכנולוגיית ה-PV החל מייצור חשמל פשוט כמשאב אנרגיה משתנה בזמן וכלה במתן שירותים נלווים מתקדמים ביותר, כגון עתודה סובבת מיידית, מעקב אחר שינויי עומס מהירים ביותר, תמיכה במתח, ויסות תדר ושיפור איכות החשמל.

בעקבות הפיתוחים הטכנולוגיים באמצעי ייצור המבוססים על מקורות אנרגיה מתחדשים, בפברואר 2018, FERC - Federal Energy Regulatory Commission של ארה"ב עדכנה את כללי הרגולציה בדבר הדרישות לחיבור מקורות אנרגיה מתחדשים למערכת החשמל.

UNITED STATES OF AMERICA  
FEDERAL ENERGY REGULATORY COMMISSION

18 CFR Part 35

[Docket No. RM16-6-000; Order No. 842]

**Essential Reliability Services and the Evolving Bulk-Power System - Primary Frequency Response**  
(Issued February 15, 2018)

Taking into consideration that recent technological advancements now enable new non-synchronous generating facilities to have primary frequency response capabilities FERC issued a final rule which requires new large and small generating facilities, including both synchronous and non-synchronous, to install, maintain, and operate equipment capable of providing primary frequency response as a condition of interconnection. FERC also establishes certain uniform minimum operating requirements, including maximum droop and dead-band parameters and provisions for timely and sustained response

בהתאם לתקנות מעודכנות, גם מתקני PV (non-synchronous generators) חדשים מחויבים להקמת יכולת אספקת תגובה ראשונית לשינוי תדר.

FERC גם קובעת דרישות תפעול מינימליות אחידות מכל יחידות הייצור, כולל פרמטרים מרביים של DROOP (המתבטא בשינוי יחסי בהספק כתלות בשינוי יחסי בתדר) ו- Dead-band (תחום מת שבו ההספק לא חייב להשתנות עם שינוי תדר), וכן הוראות לתגובה יציבה בזמן הנכון.

יש לשים לב לכך שה-FERC לא פוטרת מהדרישות החדשות את המערכות הקטנות. בתגובה להערות שהתקבלו מגופים שונים לאסדרה החדשה, ה-FERC מציינת שהתקבל מידע מוגבל ובלתי משכנע על כך שמתקני ייצור קטנים יתמודדו עם עלויות לא מידתיות להתקנה, תחזוקה ותפעול של הציוד המסוגל לספק תגובה ראשונית לתדר.

למען הסר ספק, יש לציין כי ה-FERC אינה מחייבת מערכות PV לשמור על חלק מכושר הייצור שלהם כ-Headroom, כלומר כעתודה להעלאת ההספק במידת הצורך. יש לטפל בסוגיה זו במסגרת כללי השוק, אשר אמורים ליצור תמריצים כלכליים שיעודדו את היצרנים להשתתף במתן השירותים הנחוצים לניהול המערכת.

מטרת דרישות ה-FERC היא רק לאלץ את היצרנים להתקין את הציוד הדרוש בכדי להשתתף במתן שירותים נלווים רלוונטיים. עם זאת, זהו צעד גדול קדימה בהפיכת חלק לא מבוטל מתחנות PV ליחידות ייצור המסוגלות לספק מגוון שירותים הנדרשים על ידי מנהל המערכת ובשליטתו המלאה (Dispatchable).

לאורך המסמך, ה-FERC מרמזת בגלוי כי עלות ההשקעה ביצירת היכולת של המערכת (חומרה ותוכנה) לעמוד בדרישות החדשות אינה גבוהה. גם על פי המידע שבידינו, העלויות הנוספות הנחוצות ליצירת יכולות מתקדמות של תחנת PV (בסדר גודל משמעותי) לצורך אספקת שירותים נלווים בשליטתו המלאה של מנהל המערכת לא יעלו על כ-1% בלבד מעלות הקמת התחנה. זהו ערך זניח בהשוואה לתועלת הצפויה מהשתתפות התחנה במתן שירותי ניהול המערכת בשליטתו של מנהל המערכת.

בישראל, כצעד ראשון בכיוון זה, בשנת 2018 אגף תפ"ט עדכן את הדרישות הטכניות לחיבור תחנות PV לרשת מתח עליון. הדרישות צורפו כנספח (7) במכרז שפרסמה רשות החשמל בנובמבר 2018, לייצור חשמל בטכנולוגיית PV במתקנים שיחוברו למתח עליון (ראו פירוט בנספח ג').

הדרישות לגבי התגובה לשינוי תדר מבדילות בין מתקנים בהם הספק המתקן הוא בהתאם להספק הפאנלים (סעיף ב') ומתקנים בהם הספק הפאנלים גדול מההספק הנומינלי של המתקן (סעיף ג'). המתקנים בסעיף ב' לא

ישתתפו בפועל במתן שירותים לניהול המערכת כגון עתודה סובבת מיידית (הנדרשת לתגובת המערכת כשהתדר בירידה - מתחת ל-50 Hz) או העתודה להעלאת ההספק (Headroom). לעומת זאת, עמידה בדרישות המפורטות בסעיף ג' אכן תסלול את הדרך להכנת היכולות הטכניות הנדרשות להשתתפות מתקנים אלה במתן שירותים נלווים בשליטת מנהל המערכת (Dispatchable), תוך הקמת התשתיות שיאפשרו למנהל המערכת לווסת באופן רציף את ההספק הפעיל של התחנה בפיקוד מרחוק.

בהסברים שהבאנו לעיל, הראינו שעל מנת לאפשר אחוז חדירה גבוה של אנרגיות מתחדשות במשק החשמל קיים הכרח למצוא דרכים אפשריות לצמצום כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת. כמו כן, הסברנו שמפעילי המערכת נאלצים לכלול שגיאות אפשריות בתחזית העומס והייצור הסולארי בחישוביהם לגבי דרישות ה-Headroom ו-Dispatchability בתכנון הקצאת היחידות לתפעול (Unit Commitment) ופעולת המערכת. ללא יכולת שליטה על מתקני PV (Dispatchability), מפעילי המערכת ייאלצו לשמור על ה-Headroom ועל ה-Dispatchability באמצעות יחידות קונבנציונאליות, תוך אי הכללה של מתקנים סולאריים באספקת חלק מהדרישות הללו. עוד הראינו שהדבר יגרום לעלייה לא מבוטלת בכמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת. לפיכך, אחת האפשרויות הזולות ביותר לצמצם את כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת (קיטום סולארי) טמונה בהקמת התשתיות שיאפשרו למנהל המערכת לשלוט על מתקני PV בגודל משמעותי (Dispatchability) ובעקבות זאת לשתף אותם במתן שירותי ניהול המערכת, כמו הבטחת Headroom ו-Dispatchability.

## לסיכום,

- במבט קדימה, מומלץ לקבל החלטה מיידית לפיה בדרישות הקיימות לתחנות PV חדשות שיחוברו במתח עליון, תבוטל אופציה ב' ורק הדרישות המופיעות בסעיף ג' יישארו בתוקף, קרי, המתקנים יחויבו בהספק פאנלים הגדול מהספק הנומינלי של המתקן. זה יהיה צעד קדימה להקמת תשתיות המאפשרות השתתפות תחנות אלה, בשליטה מלאה של מנהל המערכת (Dispatchability), באספקת שירותי ניהול מערכת הייצור.
- הניסיון מלמד כי הכנת הדרישות ממתקני PV חייבת להתבצע במקביל לבניית תהליך מסודר של בדיקת יכולת המתקן לעמוד בדרישות אלה. מאמרים ודו"חות אחרונים ברחבי העולם מצביעים על מורכבות מיוחדת של תהליך הבדיקה ביחס להתאמת המתקנים לחלק מהדרישות. אסדרת התהליך דורשת הבנה מעמיקה של המטרה העומדת מאחורי כל דרישה והכשרה מיוחדת של מתכננים ובודקים על מנת להבין את היכולות הטכנולוגיות של המתקנים והמודלים הנדרשים להפגנת יכולתם לעמוד בדרישות. לכן, מומלץ מאוד להקדיש תשומת לב מיוחדת ולהקצות את המשאבים הדרושים לקידום מהיר של תהליך מורכב זה, תוך שיתוף פעולה הדוק עם גורמים בעלי ניסיון בתחום זה בחו"ל.
- נכון לעכשיו נראה כי הקמת תשתיות המעניקות למתקני PV את תכונת ה-Dispatchability היא הדרך המהירה ביותר והמומלצת לשפר, בעלות זניחה, את היכולות הדינמיות של מערכת הייצור להתמודד עם האופי המשתנה של ייצור סולארי בהינתן אחוז גבוה של חדירת אנרגיה מתחדשת.
- הדרישות ממתקני PV שתוארו לעיל נקבעו עבור יחידות שיחוברו לרשת מתח עליון. בארץ חלק משמעותי של מתקני PV יחוברו לרשת מתח גבוה. באופן עקרוני, מומלץ לכלול דרישות טכניות המקנות את תכונת ה-Dispatchability גם בדרישות למתקנים בגודל משמעותי שיחוברו לרשת מתח גבוה. השתתפות המתקנים המחוברים לרשת מתח גבוה במתן שירותי ניהול המערכת דורשת קיום מנגנון תאום משוכלל בין מנהל המערכת ומפעילי מערכת החלוקה.
- התשובה לשאלה "מהו ההיקף הרצוי במערכת הייצור של מתקני PV בעלי תכונת Dispatchability המסוגלים להשתתף במתן שירותי ניהול המערכת" היא פשוטה – "כמה שיותר". יחד עם זאת ברור שחלק

גדול מהייצור הסולארי יתבסס על מערכות קטנות ומבוזרות המחוברות למתח נמוך. לכן בדרך להגדלת חלקו של הייצור הסולארי במשק החשמל, חשוב ומומלץ להבטיח שלפחות כל היחידות הסולאריות המשמעותיות שיוקמו בעשור הנוכחי יהיו מצוידות בתשתיות המעניקות למנהל המערכת את היכולת לשתף אותן בשירותי ניהול המערכת.

- בדומה ליחידות קונבנציונאליות, מתקני PV שמשותפים במתן שירותי ניהול המערכת עלולים לאבד חלק מהכנסותיהם בשל אובדן האנרגיה הסולארית שהם יכולים לייצר. עם זאת, כפי שהוסבר לעיל, השתתפותם במתן שירותי ניהול המערכת עשויה באופן כללי להגדיל את הייצור באמצעות אנרגיה מתחדשת במשק החשמל וגם להגדיל את היעילות בה פועלות יחידות קונבנציונאליות. בעיקרון, למתקני PV אלו מגיע פיצוי בגובה העלות האלטרנטיבית הנחסכת למערכת הייצור. אולם בשוק תחרותי הפיצוי עבור שירותי ניהול המערכת צריך להיקבע במסגרת הליכים תחרותיים. לכן, חשוב מאוד ומומלץ להכין כמה שיותר מהר את המסגרת הרגולטורית שמטרתה ליצור שוק תחרותי של שירותים נלווים (Ancillary Services) בו מתקנים סולאריים יוכלו להציע את שירותיהם בתנאים שווים עם היחידות הקונבנציונאליות.

## תזמון תחזוקת תחנות כוח תוך התחשבות בייצור סולארי עודף

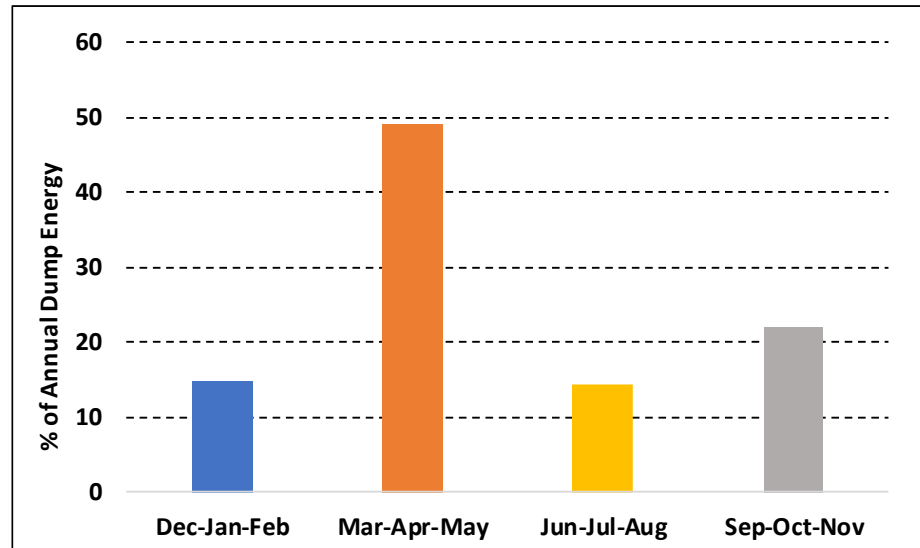
אחד התפקידים המרכזיים של מנהל המערכת הוא להכין תוכנית ההשבתות של יחידות הייצור לצורך ביצוע עבודות תחזוקה, דהיינו לקבוע את משך הזמן והעיתוי המתאים להשבתת כל אחת מיחידות הייצור במערכת לאורך טווח התכנון, תוך התחשבות במגבלות מערכתיות ואילוצים של היצרן, כגון משך הזמן הרציף הנדרש וחלונות זמן מותרים שבמהלכו ניתן לבצע תחזוקה, מספר היחידות הניתנות בו זמנית לתחזוקה, ההיקף הכולל של יחידות ייצור הנמצאות בתחזוקה וכו'.

פונקציות המטרה המקובלות של תכנון פילוג עבודות תחזוקה הן בדרך כלל או מזעור עלות הייצור השנתית של מערכת הייצור, או השגת אמינות מרבית תוך מזעור הסתברות לאי-אספקה או לאנרגיה בלתי מסופקת, או שיטוח עתודות כושר הייצור לאורך השנה, או שילוב כלשהו של כל השיקולים יחד.

באחוזי חדירה גבוהים של אנרגיה מתחדשת, ובעיקר של אנרגיה סולארית, קיים שיקול נוסף שאין להתעלם ממנו בחישוב תוכנית תחזוקת יחידות הייצור. תרשים 20 מציג את התפלגות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת הצפויה בשנת 2030, אשר התקבלה בהנחה שהיקף החדירה של אנרגיות מתחדשות יגיע ל-40%.

תרשים 20: פילוג צפוי של אנרגיה מתחדשת בלתי מנוצלת (קיטום סולארי) לפי עונות השנה ב-2030





תרשים 20 מדגים שהחלק הארי של עודפי האנרגיה המתחדשת צפוי להופיע בחודשים מרץ, אפריל ומאי וזאת עקב ביקוש נמוך לחשמל יחסית לחודשי קיץ או חורף וייצור סולארי משמעותי ההולך וגובר לקראת הקיץ. כפי שראינו בתרשים 10, הגורם המשמעותי להופעת עודפי האנרגיה המתחדשת הוא המחויבות של מנהל המערכת להפעיל את יחידות הקוגנרציה ויצרנים נוספים בהתאם להסכמים בילטרליים שברשותם, ובנוסף הונח שיחידות קיטוריות בחדרה ובאשקלון יופעלו במשטר Must-Run (דהיינו מסביב לשעון ברמת ההעמסה המינימלית לפחות).

יש לציין שבחישוב שהביא לתוצאות המוצגות בתרשים 20 כבר נלקחו בחשבון השבתות לאורך השנה לצורך תחזוקה של היחידות לעיל. כמובן, חלק מההשבתות התקיימו באופן טבעי בעונת האביב בשל הביקוש הנמוך לחשמל בעונה זו. חישוב חוזר, שבו כל היחידות שהוזכרו לעיל הורשו לבצע תחזוקה רק בעונת האביב, הראה שאילוץ זה עשוי להביא לצמצום של כמות האנרגיה הבלתי מנוצלת השנתית בכ-2.5%-4%. לפיכך, בהינתן אחוזי חדירה גבוהים של אנרגיות מתחדשות, מומלץ שבעת ביצוע אופטימיזציה של תזמון יחידות הייצור לתחזוקה, מנהל המערכת ייקח בחשבון גם את ההשפעה של תוכנית ההשבתות על כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת (קיטום סולארי). כמובן, חישוב זה צריך לקחת בחשבון גם את תרומתם של מקורות אנרגיה מתחדשים לחיסכון בעלויות פליטת המזהמים וגזי חממה.

## ההספק העתידי של יצרנים בקטגוריית "Must-Take" (בשל ההתחייבויות לפי האסדרות הקודמות)

ציינו לעיל שבהעדר צעדים תכנוניים, תפעוליים ורגולטוריים מתאימים, החלק של האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת בשנת 2030 עלול להגיע לכ- 15%-16% מכלל האנרגיה שניתן להפיק מהמקורות המתחדשים עם הקיבולת המותקנת המותאמת להיקף החדירה של 40%.

בעקבות זאת, הערכנו עד כמה האנרגיה הלא מנוצלת מושפעת מההתחייבויות הנובעות מתקנות קודמות המחייבות את מנהל המערכת לתעדף יצרני קוגנרציה ויצרנים שפועלים על פי הסכמים בילטרליים בתוכנית הפעולה של מערכת הייצור.

מהתוצאות עולה כי בהעדר תעדוף היצרנים שהשתלבו בהתאם לאסדרה 241 (או מכרז ממשלתי) ושבירותם הסכמים בילטרליים, ניתן לצמצם את סך כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת בשנת 2030 בכ-40%-45%. אם בנוסף ליצרנים אלה גם לא יהיה תעדוף של יצרני קוגנרציה, כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת תצומצם בכ-60% בשנת 2030.

באשר ליצרני קוגנרציה המספקים חום וחשמל (ביעילות משולבת גבוהה) למפעלים ספציפיים בהסכם איתם ושמטרת הפעולה שלהם מותאם בעיקר למשטרי העבודה של מפעלים אלה, אפשר להניח שהמצב הזה יימשך גם בעתיד, אלא אם כן צרכיהם של הלקוחות שלהם ישתנו.

לעומת זאת, קיימת אי-וודאות לגבי משטרי הפעולה העתידיים של היצרנים שפועלים כעת על פי הסכמים בילטרליים. בהחלטה 241 רשות החשמל קבעה: "יצרן שייכלל בהסדרים האמורים יהיה זכאי לתעריפים על פי החלטה זו. בתום תוקפו של אישור התעריף שברשותו והיה וישתלב היצרן במשק יהיה זה בהתאם להסדרים ליצרנים קונבנציונליים שיהיו במשק החשמל באותה עת".

בהתחשב בכך שהיצרנים הללו השתלבו במערכת לפני 2016, תוקף האישורים התעריפיים שלהם יסתיים עד 2035. מאחר שעל פי ההחלטות האחרונות של הרשות כל היצרנים הקונבנציונליים החדשים יופעלו בהתאם לשיטת ההעמסה המרכזית, סביר להניח שגם היצרנים לעיל, לאחר תום תקופת האישור התעריפי, יופעלו בשיטת ההעמסה המרכזית על פי הצעות המחיר שיגישו למנהל המערכת ועל בסיס תחרותי.

לפיכך, ההשפעה הפוטנציאלית הייחודית שלהם על כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת תפחת מעצמה בטווח של כ-14-13 שנים. באופן עקרוני זה יכול להתרחש גם לפני כן. קיום ההסכמים הבילטרליים תלוי לא רק בצד היצרן אלא גם בצד הצרכן. חדירה מסיבית של אנרגיה סולארית לשוק החשמל עשויה להוביל לכך שמחירי החשמל הנמוכים ביותר במשך היממה יהיו בשעות היום, לפני השקיעה, כאשר הייצור הסולארי בעיצומו.

כפי שהוצג קודם לכן, היווצרות עודפי אנרגיה מתחדשת עבור שנת 2030, עשויה להביא בשעות אלו למחיר חשמל שולי (SMP) אפסי ואף שלילי, כפי שזה כבר קורה בפועל בשעות מסוימות בשוק העולם התחרותיים. ייתכן מאוד שזה ישנה את סדרי העדיפויות של הצרכנים, מכיוון שהם יוכלו לרכוש חשמל במחירי שוק אטרקטיביים ממנהל המערכת, וכתוצאה מכך לא תהיה הצדקה כלכלית להמשיך את ההסכמים הבילטרליים עם היצרנים הקונבנציונליים לעיל.

כל זה יחד מעלה ספקות רבים לגבי סבירות ההנחה כי היצרנים הפועלים כיום על בסיס הסכמים בילטרליים ימשיכו לעבוד באותו משטר פעולה גם אחרי 7-8 שנים הבאות, גם אם הרגולציה מאפשרת זאת. תמיכה נוספת בהשערה זו ניתן למצוא במסמך שהוגש לאחרונה על ידי רשות החשמל לשר האנרגיה עם המלצה להגדיל את היעד של חדירת אנרגיות מתחדשות לייצור חשמל ל-30%. בעבודה זו, הורתה הרשות לתפ"ט לבצע חישובים מערכתיים ארוכי טווח בהנחה שהיצרנים לעיל יופעלו בהעמסה מרכזית.

**לפיכך, בסבירות גבוהה יש להעריך כי כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת שחושבה לשנת 2030 תצומצם למעשה בכ-40% - 45% כתוצאה מהשינוי במשטרי הפעולה של היצרנים הללו.**

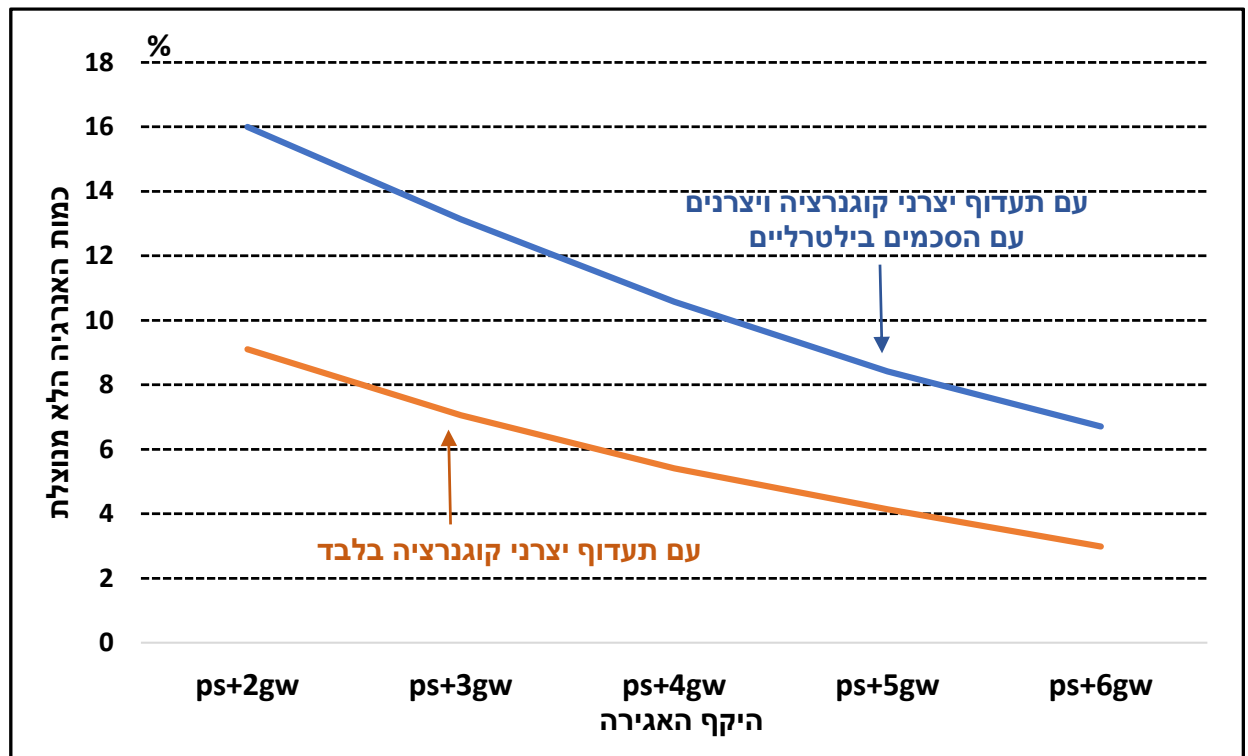


## אגירת אנרגיה

סעיפים 1-3 לעיל הציגו דרכים אפשריות להפחתת עודף ייצור סולארי שאינן דורשות השקעות משמעותיות במערכת הייצור. יחד עם זאת, ראינו כי גם אם יתממשו כל האפשרויות המוצגות בסעיפים אלה, עדיין צפויים עודפי אנרגיה סולארית משמעותיים שלא ינוצלו.

האמצעים היעילים ביותר לניצול עודף ייצור סולארי הם מתקני אגירה. החישובים שתוארו עד כה כללו 2,000 מגו"ט של אגירה באמצעות סוללות עם קיבולת המאפשרת 4 שעות רצופות של ייצור בהספק מלא, וזאת בנוסף ליחידות אגירה שאובה שצפויות להשתלב במערכת במסגרת מכסת 800 מגו"ט (על פני 8 שעות), שקבעה רשות החשמל. כאמור, ערך של 2,000 מגו"ט נבחר לאחר הערכה כי תוספת בכושר הייצור בסדר גודל הנ"ל (מעבר למערכת הקיימת והיחידות המתוכננות לקום בחמש השנים הבאות) מהווה את המינימום הנדרש לעמידה בדרישות לאמינות מערכת הייצור בשנת 2030. כפי שיוצג בפרק "מודל טכנו-כלכלי לבחינת משק החשמל בתרחישים עתידיים", הכמות האופטימלית הנדרשת של אגירה בשנת 2030 היא גבוהה יותר. החישוב מראה כי מתקנים אלה, כשלעצמם, הפחיתו את עודף האנרגיה הסולארית (קיטום סולארי) ב-41%. תרשים 21 מציג באיזו מידה הגדלת יכולת האגירה בסוללות תאפשר צמצום נוסף של הקיטום הסולארי.

תרשים 21: שיעור האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת ב-2030 כתלות ביכולת האגירה



העקומה העליונה בתרשים 21 מתייחסת למצב בו כל יצרני הקוגנרציה והיצרנים עם הסכמים בילטרליים יקבלו עדיפות ראשונה בסדר העמסה ויפעלו בהתאם לתוכנית העבודה שהם מגישים ולא בהתאם לדרישות המערכת. העקומה התחתונה מתייחסת למצב בו רק יצרני קוגנרציה יופעלו על פי דרישותיהם, בעוד שכל שאר היחידות במערכת יופעלו על בסיס תחרותי.

בהתאם לציפיות, התוצאות מראות בבירור כי בהינתן אחוז גבוה של חדירת אנרגיה סולארית, מזעור עודפי הייצור הסולארי דורש הקמת מתקני אגירה (מכל סוג שהוא) בקנה מידה גדול, הרבה מעבר לנדרש בהתאם לקריטריון האמינות לתכנון מערכת הייצור.

כאשר מסתכלים על שנה אחת בלבד (במקרה שלנו 2030), ככל שנוספות יחידות אגירה, התרומה השולית של כל תוספת להפחתת ייצור עודף במערכת פוחתת. כמובן, במקביל גם התועלת הכלכלית השולית למערכת באותה שנה הולכת ופוחתת. עם זאת, יש לזכור שמתקני אגירה אמורים לפעול במשך עשרות שנים. לפיכך, אותה עלייה ביכולת האגירה הצפויה לתרום מעט יחסית בשנה הנסקרת, עשויה להועיל הרבה יותר בשנים הבאות, לאור הגידול המהיר בייצור הסולארי. לכן, אין להתייחס לכל השקעה בתוספת כושר האגירה, מעבר למה שנדרש על פי קריטריון האמינות, כהשקעה נפרדת בפני עצמה, אלא כהשקעה שתידרש בכל מקרה בשנים הבאות בכדי להגדיל את חלקה של אנרגיה מתחדשת בייצור חשמל.

מהאמור לעיל, ועל בסיס העקומות המתוארות בתרשים 21, ניתן להסיק כי בקביעת צרכי האגירה, על מתכנני המערכת לשאוף לא רק לעמידה בקריטריון האמינות או למיצוי מלא של פוטנציאל כושר הייצור הסולארי המותקן בכל שנה באמצעות מתקני אגירה בלבד, אלא לשילוב מיטבי של מתקני אגירה במשק החשמל על פי ציר הזמן שתומך בפיתוח בר קיימא של משק האנרגיה, תוך מזעור עלויות כלכליות וסביבתיות כאחד.

יש לציין כי הפעלת המערכת עם אחוז חדירה גבוה של ייצור סולארי מחייבת הקמת יכולת אגירה משמעותית הנשלטת על ידי מנהל המערכת. יחד עם זאת, רק לצורך הפחתת עודפי האנרגיה הסולארית, אין הכרח לבסס את פוטנציאל האגירה כולו על מתקנים גדולים (Utility-scale) הנשלטים במלואם על ידי מנהל המערכת. תפקיד זה יכול להתבצע גם על ידי מתקני אגירה קטנים ומבוזרים המשרתים צרכנים בודדים או קבוצות צרכנים, תוך ניצול ההזדמנות לבצע טעינה במחיר זול.

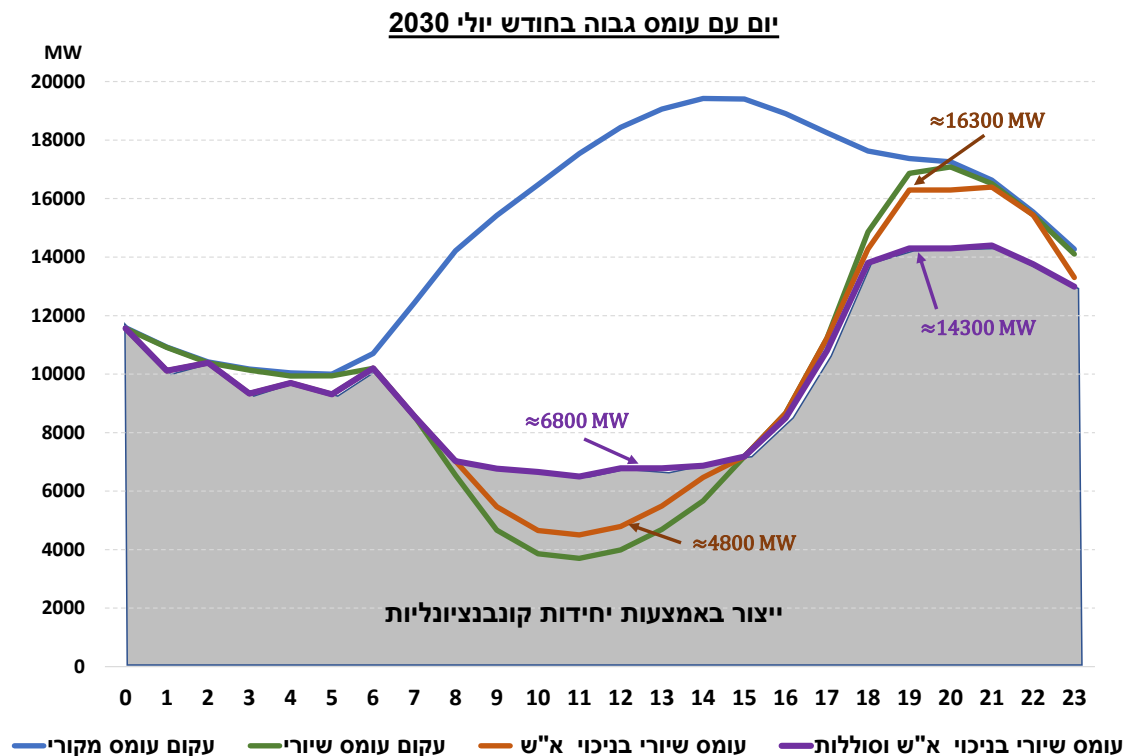
לכן, בהתחשב בקצב הירידה המהיר במחיר הסוללות, קיימת סבירות לא מבוטלת שבעתיד הלא רחוק הערכים הגבוהים לכאורה של כושר האגירה המוצגים בתרשים 21 יתממשו מעצמם על בסיס מתקני אגירה קטנים ומבוזרים.

שיקול זה אינו גורע מחשיבות ההתקדמות בהכנת תשתית אגירה בהיקף נרחב הנשלטת על ידי מנהל המערכת על מנת לאפשר הפעלה אמינה של מערכת הייצור, תוך ניצול כל המשאבים הזמינים (סוללות, אגירה שאובה וכו') בתנאים של המדינה. נושא זה יוסבר ביתר פירוט בהמשך.

## התמודדות מערכת הייצור עם בעיית העלייה החדה בעומס שיורי בעת השקיעה

אחת הבעיות התפעוליות המשמעותיות ביותר שתעמוד בפני מנהל המערכת במקרה של חדירה, בקנה מידה גדול, של ייצור סולארי קשורה לעלייה גדולה מאוד של העומס השיורי בשעות השקיעה, שמתרחשת כעבור מספר שעות לאחר ירידה משמעותית בעומס השיורי בשעות הזריחה. מתקני אגירה מהווים את האמצעי היעיל ביותר להתמודדות עם בעיה זו. לנוחיות מתן הסבר מפורט נחזור לתרשים 16 המתייחס לשבוע של יולי 2030 ונתמקד ביום בודד (יום ד') עם עומס גבוה במיוחד וללא אנרגיה סולארית עודפת. תרשים 22 מציג את פעולת יחידות אגירה והעמסת מערך הייצור הקונבנציונלי ביום הזה.

תרשים 22: הפעלת מערך הייצור הקונבנציונלי במהלך יום אחד ביולי 2030 על רקע עקום העומס השיורי בניכוי פעולת מתקני אגירה שאובה וסוללות



נזכיר שלצורך הערכת משטרי פעולה של מערכת הייצור הונח שבשנת 2030 המערכת תכלול לפחות 2,000 מגו"ט של סוללות (עם יכולת הייצור במשך 4 שעות רצופות בהספק מלא) אשר יפעלו על פי צרכי המערכת, וזאת בנוסף ל-800 מגו"ט של אגירה שאובה עם יכולת ייצור של 8 שעות.

העקום הכתום מציג את העומס השיורי בניכוי פעולת האגירה שאובה ואילו העקום הסגול – את העומס השיורי בניכוי פעולת האגירה שאובה וגם פעולת הסוללות. הביקוש לחשמל עולה עד שעה 14 בצהריים ומתחיל לרדת אחרי שעה 15. הייצור הסולארי מגיע לשיאו בשעות 12-13 ויורד בקצב מהיר אחרי שעה 15. עקב כך העומס השיורי מתחיל לעלות החל משעה 13 ומגיע לשיאו בשעות 19-21 בערב.

בהעדר סוללות העומס השיורי בניכוי אגירה שאובה היה עולה מכ-4,800 מגו"ט בשעה 13 לכ-16,300 מגו"ט בשעה 18 של יום זה בחודש יולי. במקרה זה, תכנון פעולת המערכת מבלי לגרום להיווצרות של אנרגיה מתחדשת בלתי מנוצלת, היה מאלץ את המערך הקונבנציונאלי להעלות את ההספק בכ-11,500 מגו"ט תוך 5 שעות. לעומת זאת, הודות לטעינת הסוללות בשעות הקרינה המרבית, ניתן לשמור על הייצור הקונבנציונאלי ברמה קבועה פחות או יותר מהבוקר ועד שעה 15, מבלי לגרום להיווצרות עודף של אנרגיה מתחדשת. בזכות זה, כפי שמודגם בתרשים 22, בשעה 13 ההספק הקונבנציונאלי היה ברמה של כ-6,800 מגו"ט. עם השקיעה, הסוללות מפסיקות להיטען, עוברות למצב ייצור ומורידות את העומס השיורי בערב לכ-14,300 מגו"ט. כתוצאה מכך, הודות להפעלת הסוללות בהספק מותקן של 2,000 מגו"ט, המערך הקונבנציונאלי נדרש להעלות את הספקו באותן השעות בכ-7,500 מגו"ט במקום 11,500 מגו"ט, במקרה ללא הסוללות.

מכאן ניתן לראות כי בהינתן הדרישה למנוע ככל האפשר היווצרות אנרגיה מתחדשת בלתי מנוצלת, מתקני אגירה מסוגלים לתרום הרבה מעבר לערך של ההספק המותקן שלהם (עד פי שניים מההספק) להפחתת טווח עליית ההספק של המערך הקונבנציונאלי בשעות השקיעה. תכונה זו מעניקה למתקני האגירה את היתרון העיקרי על פני יחידות קונבנציונאליות בעידן החדירה המסיבית של הייצור הסולארי במשק החשמל.

יש לציין כי השיקולים הטכניים, כגון זמן ההפסקה וההפעלה המינימליים (Minimum downtime and uptime) וזמן ההתנעה של כל יחידת ייצור קונבנציונאלית, והשיקולים הכלכליים הקשורים בעלויות ההתנעה, כולל עלויות התחזוקה הנובעות מהתנעות והפסקות, עשויים:

1. במשקי חשמל תחת רגולציה הדוקה, לאלץ את מנהל המערכת להפעיל מספר גדול יותר של יחידות קונבנציונאליות, גם כאשר העומס השיורי אינו דורש זאת.
2. בשוק תחרותי, לאלץ את היצרנים הקונבנציונאליים להגיש הצעות מחיר שליליות במטרה להימנע מהפסקת היחידה בשעות של קרינת שמש מרבית.

כמו כן, ציינו מוקדם יותר את המחויבות של מנהל המערכת לתעדף בתכנון פעולת המערכת את היצרנים בשיטת קונגרציה והיצרנים שפועלים לפי האסדרות הקודמות של הרשות בהתאם להסכמים בילטרליים (Must-Take).

כל הפעולות לעיל, כשלעצמן, אכן יכולות לצמצם את טווח עליית ההספק הנדרש מיחידות קונבנציונאליות בשעת השקיעה, אך יחד עם זאת, הן יגדילו את האנרגיה הסולארית הבלתי מנוצלת, אשר ניתן היה למנוע בנוכחות מתקני אגירה.

השיקולים לעיל מסבירים את הקשר ההדוק בין שתי הסוגיות המשמעותיות, העומדות בפני מקטע הייצור בדרכו לקלוט אנרגיה סולארית בקני מידה גדול: הצורך להימנע מכמויות מופרזות של אנרגיה סולארית בלתי מנוצלת מחד גיסא, והצורך להתמודד עם עלייה חדה בעומס שיורי בשעות השקיעה מאידך.

ההסבר לעיל ממחיש שמתקני אגירה הנשלטים על ידי מנהל המערכת הם המועמד הטכנולוגי האידיאלי לפתרון משותף של שתי הבעיות הללו.

- קודם לכן, הזכרנו את האפשרות שמתקני אגירה קטנים ומבוזרים המחברים למתח נמוך והמשרתים צרכנים בודדים או קבוצות צרכנים יתרמו להפחתת כמות האנרגיה המתחדשת העודפת. בעיקרון, המתקנים הללו יוכלו לתרום גם להפחתת טווח העלייה בעומס שיורי בשעות השקיעה, אך זאת בתנאי שהם יפעלו בזמן הנכון ובהיקף הנדרש. כפי שניתן לראות בתרשים 22, אם הם יבחרו לעבור למצב ייצור בשעות 20-22 ולא בשעות 18-20, או לחילופין לא יבצעו טעינה סמוך לשעות הצהריים במהלכן יש קרינה גבוהה, אז התרומה הפוטנציאלית שלהם להפחתת העלייה בעומס שיורי בשעות השקיעה תצטמצם באופן משמעותי. כמובן שכדי שמנהל המערכת, בתכנון פעולת המערכת, יסתמך על התרומה הפוטנציאלית של מתקנים אלה, חייבת להיות מידה מספקת של ודאות שהם אכן יפעלו בזמן הנדרש. למעשה, זה יכול לקרות אם מתקיים לפחות אחד משני התנאים הבאים:

- קבוצה משמעותית של מתקנים קטנים תנוהל באופן מרוכז על ידי גוף מסחרי (אגרגטור) שיציע למנהל המערכת תוכנית עבודה מאוחדת לכלל המתקנים שבשליטתו (בדומה לתחנות כוח) ושלמנהל המערכת תהיה יכולת להפעיל את התוכנית (בהיקף ובזמן הנכון).

- ייבנה בסיס נתונים סטטיסטיים, למשך מספר שנים לפחות, שיאפשר למנהל המערכת להבין את משטרי הפעולה של המתקנים, את הקורלציה ביניהם לבין הייצור הסולארי ועומס המערכת ולחזות את משטרי הפעולה שלהם בגבולות סבירים של שגיאת החיזוי.

יישום התנאי הראשון כרוך גם בקידום רגולציה בשוק החשמל שתעודד את בעלי המתקנים המבוזרים להשתתף במתן שירותי ניהול המערכת שהוזכרו לעיל. לגבי התנאי השני, מומלץ מאוד שהסטטיסטיקות על משטרי הפעולה של המתקנים ייאספו באופן מרכזי כבר מרגע שילובם של המתקנים הראשונים במערכת.

בשלב זה קיימת אי-וודאות לגבי היקף ועיתוי ההשתלבות במערכת של מתקני אגירה קטנים ומבוזרים. עם זאת, מומלץ כבר בנקודת זמן זו להתמקד בקבלת החלטות לגבי מתקני אגירה (סוללות, אגירה שאובה) שיפעלו תחת שליטה מלאה של מנהל המערכת. הכוונה לאותן החלטות שדחייתן למועד מאוחר יותר תפגע ביכולת ההפעלה הנאותה של המערכת בעתיד, לאור הקמת מערך ייצור סולארי רחב היקף לקראת סוף העשור. את קצב ההשתלבות של המתקנים במערכת והעיתוי הרצוי יש לקבוע במסגרת אופטימיזציה של פיתוח המערכת לטווח ארוך מנקודת המבט של המשק הלאומי ובהתחשב ביעדים העולים לאורך ציר הזמן לגבי חלקן של אנרגיות מתחדשות בייצור החשמל וצמצום פליטות גזי חממה. לאגף תפ"ט (שעבר ב-12.2020 לחברת ניהול המערכת) יש את הידע, הניסיון והכלים הנדרשים לביצוע עבודות מסוג זה.

## אתגרים נוספים בניהול מערך הייצור

### תגובת מערכת הייצור לשינויי תדר

אחד החששות העיקריים שליוו את מתכנני המערכת בשלבים המוקדמים של חדירת האנרגיה הסולארית לתחום ייצור החשמל היה החשש שתנודות תכופות ומהירות של ההספק הסולארי, שנגרמות כתוצאה מתנועת

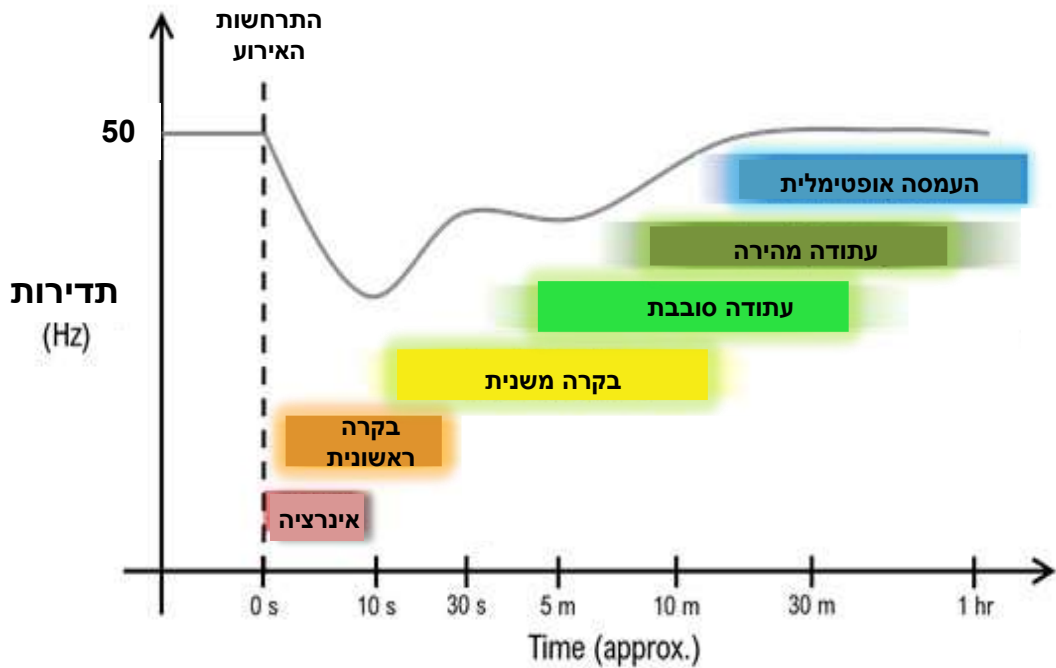
עננים מהירה, יביאו לשינויי תדר קיצוניים ולפגיעה ביציבות המערכת. אכן, ברמה של תחנות בודדות נרשמו תנודות חדות. אך מהר מאוד התברר שככל שאחוז החדירה של הייצור הסולארי גדל והפריסה של המתקנים מתרחבת, התנודות המקומיות מתרחשות בזמנים שונים ומקזזות זו את זו, כך שברמה של אזור מספיק רחב או של מדינה, משרעת התנודות פוחתת, השינויים נעשים איטיים יותר ועקומת הייצור הסולארי מוחלקת. בנוסף, הניסיון שנצבר בתחנות PV גדולות הנפרשות על פני שטח רחב מראה כי גם בזמן שעננים עוברים מעל התחנה, ניתן לשמור על הספק יציב בזכות ממירים חכמים ומערכות בקרה מרכזית מתקדמות (Advanced Controller).

המחקרים שנעשו במטרה להעריך את התנודתיות, ברמה ארצית, של הייצור הסולארי העתידי בישראל והניסיון שנצבר במשקי חשמל בעולם עם אחוז חדירה משמעותי של אנרגיה סולארית מראים שתנודות מהירות משמעותיות לא מתרחשות בפרקי זמן של שניות ואף לא של עשרות שניות אלא בפרקי זמן ארוכים יותר. לפיכך, התנודתיות של העומס השיווי ברמה הארצית פחות קשורה לתגובה מיידית של המערכת לשינויי תדר (Primary Response) אך היא כן דורשת שמירה על יכולת להעלות (Headroom) או להוריד (Footroom) את הספק המערכת בצורה מהירה.

בנוסף, הייצור הסולארי מתבסס, בדרך כלל, על מספר רב יותר של מתקני ייצור מבוזרים בגודל קטן יחסית לתחנות קונבנציונאליות. כתוצאה מכך, השפעת ההפסקה המאולצת של תחנה סולארית על התדירות והיציבות של מערכת הייצור ברמה ארצית תהיה קטנה בהרבה בהשוואה להפסקה של יחידה קונבנציונאלית בגודל משמעותי.

הנ"ל עדיין לא מצביע על כך שהייצור הסולארי בקנה מידה גדול לא יוצר בעיה כלשהי בכל הקשור לתגובה מיידית של מערכת הייצור לאירועים בלתי צפויים, אם כי ניתן לפתור בעיה זו כמתואר להלן.

תרשים 23 מציג את התפקיד של סוגי עתודה שונים בתגובה לאירועים בלתי צפויים במערכת הייצור המובילים לירידת תדר.



תרשים זה מפרט: במקרים מסוימים, לא כל סוגי העתודה נדרשים כדי להחזיר את המערכת למצב הרגיל שלה (תלוי בחומרת ואורך האירוע), וטווחי הזמנים עבור כל שירותי עתודה מדגימים מגמות כלליות בלבד. בתרשים זה, מייד לאחר הפסקה מאולצת של יחידת ייצור גדולה, התדר יורד ושיעור השינוי של התדר יואט הודות לתגובה אינרציאלית של המסה המסתובבת של הגנרטורים.

כחלק מהבקרה הראשונית, ה-"Speed Governor" של יחידת הייצור מזהה את הירידה בתדירות ומגדיל את אספקת הקיטור או הדלק במטרה להגדיל את ההספק ולגרום להאטה נוספת בירידת התדר. תגובה זו מתרחשת בשניות הראשונות מרגע האירוע ואינה דורשת שום התערבות חיצונית.

כפי שנראה בתרשים 23, פרק הזמן הקריטי מבחינת יציבות המערכת הוא מרווח הזמן מהאירוע עד לנקודה בה התדר מתחיל לעלות, בתרשים למעלה – כ-10 שניות ראשונות.

הבקרה המשנית יוצרת משוב המתרגם באמצעות בקר דינמי (Controller) את סטית התדר לאות בקרה המשמש, בנוסף לבקרה הראשונית, להחזרת התדר לערך הנדרש. זוהי בקרה אוטומטית שנמצאת גם בשליטה של מנהל המערכת באמצעות מנגנון בקרה אוטומטית מרכזית (AGC-Automatic Generation Control). בהמשך, אם היחידות המשתתפות בעתודה הסובבת אינן מספיקות בכדי להחזיר את התדר ל-50 Hz, מותנעות יחידות נוספות (שלא היו בפעולה) אשר משתתפות בעתודה המהירה. להלן ההגדרות המופיעות בספר אמות המידה של רשות החשמל:

- "עתודה סובבת מיידית – יכולת זמינה המסופקת לספק שירות חיוני ממתקן ייצור המסונכרן לרשת, אשר יכול לספק אנרגיה תוך 0 עד 30 שניות ממועד קבלת הנחיה מספק שירות חיוני".
- כאשר האירוע מתרחש, כל יחידת ייצור קונבנציונאלית מגיבה בקצב שלה, תלוי בתכונות הספציפיות של כל יחידה, בכיוון הבקרה הראשונית, ברמת ההעמסה של היחידה ברגע האירוע.



• "עתודה סובבת – יכולת זמינה המסופקת לספק שירות חיוני ממתקן ייצור המסונכרן לרשת, אשר יכול לספק אנרגיה תוך 0 עד 5 דקות ממועד קבלת הנחיה מספק שירות חיוני".  
לכל יחידת ייצור קונבנציונאלית יכולת משלה להעלות את ההספק בכל דקה (% מהספק נומינלידקה) במצב רגיל ובמצבי חירום.

• "עתודה מהירה – יכולת זמינה המסופקת לספק שירות חיוני ממתקן ייצור, אשר יכול להשתלב במערכת ולספק אנרגיה תוך 5 עד 10 דקות ממועד קבלת הנחיה על ידי ספק שירות חיוני".  
כאן מדובר על יחידות ייצור שלא מסונכרות לרשת ואשר ניתן להפעילן תוך 10 דקות (כמו, לדוגמא, טורבינות גז סילוניות).

לפעמים, כששירותי העתודה הסובבת אינם מספיקים לעצירת הירידה בתדר מתחת לערך מסוים שנקבע על ידי מנהל המערכת, מופעלת גם מערכת השלת עומס אשר מנתקת באופן סלקטיבי חלק מצרכני חשמל. יחידות הייצור הקונבנציונאליות בהספק מעל 100 מגו"ט נדרשות לאפשר הפעלה באמצעות מערכת AGC (Automatic Generation Control).

צינונו לעיל שלמרות שהתנודתיות בייצור הסולארי אינה צפויה ליצור דרישות מיוחדות בהקשר לתגובה מיידית של המערכת הארצית לאירועי תדר, זה עדיין לא אומר שהמצב יישאר כפי שהוא כעת אם הייצור הסולארי בקנה מידה גדול ישתלב במערכת הייצור.

אם נחזור, למשל, לתרשים 15 המציג את הפעולה האפשרית של המערכת בשבוע עם עומס נמוך וייצור סולארי משמעותי, נזהה מייד שבשעות היום, בהן הייצור הסולארי בעיצומו, הספק המערך הקונבנציונאלי יורד באופן משמעותי. יתר על כן, החלק המתועדף של היחידות (קוגנרציה ויצרנים עם הסכמים בילטרליים) יכול בעיקרון לפעול בהספק מירבי, ללא יכולת לתרום להעלאת ההספק בפרק הזמן הקריטי. לכן, במקרה שתתרחש הפסקה מאולצת של אחת מיחידות הייצור הפועלות בזמן הזה, בגודל משמעותי, או, במקרה הקיצוני, אף יותר מיחידה אחת, הנטל העיקרי ייפול על מספר מוגבל מאוד של יחידות המסוגלות לתרום לייצוב התדר. יתר על כן, לא מן הנמנע שבחלק מטורבינות הגז או מהמחז"מים, שפועלים בעומס מלא, ההספק אפילו ירד בעקבות ירידת התדר וירידת מהירות הסיבוב.

סוגיה זו מחזקת את חשיבות קיומן של יחידות אגירה שיכולות למלא תפקיד מרכזי בייצוב פעולת המערכת. בפרק הזמן כשהייצור הסולארי בעיצומו, יחידות אגירה שאובה נמצאות במצב טעינה. בעיקרון, וזה נקבע גם על פי אמות המידה של הרשות, ניתן להפסיק את הטעינה, באופן כמעט מדי, ובהמשך, עם השעיית זמן מסוימת, לעבור למצב פריקה. עם זאת, בנוכחות מתקני אגירה באמצעות סוללות, כפי שהוצג בתרשים 15, סביר להניח כי מנהל המערכת יעדיף להשתמש בהן ולא לבצע הפסקה מיידית של יחידות אגירה שאובה שעלולה להאיץ את שחיקתן. בנוסף, ניתן להעביר את הסוללות, כמעט מיידית, ממצב טעינה למצב פריקה, מה שיגדיל עוד יותר את תרומתן לאורך פרק הזמן הקריטי.

לפיכך, גם בהיבט של ייצוב פעולת המערכת באירועים של הפסקות מאולצות של יחידות ייצור, בעידן הייצור הסולארי, ברורה החשיבות של קידום הקמת תשתיות האגירה. רצוי להתאים את לוח הזמנים להקמה לתוצאות האופטימיזציה של פיתוח המערכת לטווח הארוך, אשר תיקח בחשבון גם את היתרונות של מתקני אגירה בתחום זה.

בהקשר לביצועים הדינמיים של טכנולוגיות שונות, נקודה חשובה שהועלתה זה מכבר על ידי מתכנני המערכות היא: מה הם התנאים שבהם ניתן לבטא באופן הוגן את היתרונות הדינמיים של מתקני אגירה על פני היחידות התרמיות?

לדוגמא, בדרך כלל הדרישות לגבי היקף העתודה הסובבת המיידית במערכת מותאמות לביצועים הדינמיים של יחידות תרמיות. הרי ברור שתמיד אפשר להגדיל את מספר היחידות התרמיות המסונכרות לרשת, תוך הפחתה



ככל הניתן של רמת העמסתן, כך שבמקרה של אירוע תדר, תגובת המערכת תשתפר וכתוצאה מכך גם איכות החשמל תשתפר. אולם, זה יעלה את ההוצאות המשתנות של מערכת הייצור עקב הפעלת היחידות בעומס חלקי ויעלה את עלות ייצור החשמל ואת הפליטות. לכן, מעדיפים בדרך כלל לדבוק ברמה מסוימת של איכות החשמל, שניתן להשיג בעלויות סבירות, ועל בסיס זה לקבוע את הדרישות לגבי היקף העתודה הסובבת. יש הטוענים שגישה זו אינה הוגנת כלפי מתקני אגירה, כיוון שאם היו קובעים את רמת איכות החשמל הרצויה תוך התחשבות ביכולות של מתקני האגירה, ניתן היה להשיג איכות חשמל גבוהה יותר ובעלויות נמוכות יותר והדבר היה מקנה למתקני אגירה יתרון בולט ביחס ליחידות התרמיות.

אכן זוהי נקודת מחשבה שתתעורר שוב ושוב, במיוחד בתקופת התארגנות משק החשמל לחדירה מאסיבית של הייצור הסולארי, ונראה כי כדאי לקחת זאת בחשבון באופטימיזציה של פיתוח משק החשמל. ברשות אגף תפ"ט (שעבר ב-12.2020 לחברת ניהול המערכת) נמצאים הידע, הניסיון והכלים האנליטיים הייחודיים הנדרשים לביצוע עבודות אופטימיזציה מסוג זה.

גם בהקשר לתגובה מיידית של מערכת הייצור לאירועי תדר משמעותיים, נזכיר כי תחנות PV בגודל משמעותי עם תכונות של Dispatchability, כפי שהסברנו קודם לכן, יאפשרו למנהל המערכת לערב אותן גם, בצורה יעילה מאוד, באספקת התגובה המיידית בפרק הזמן הקריטי, כיוון שהן מסוגלות לספק מענה מהיר ביותר (בהשוואה ליחידות קונבנציונאליות).

נציין שוב את החשיבות של הכנה, בהקדם האפשרי, של תקנות ואמות מידה המסדירות את כללי השוק התחרותי של שירותים נלווים (Ancillary Services) המעודדות את היצרנים להשקיע בהקמת אמצעי ייצור בטכנולוגיות התומכות בשירותים אלה.

## חיזוי התפוקה הסולארית ברזולוציות שונות

יכולת חיזוי היא כלי חשוב מאוד מבחינה טכנית, המועילה מבחינה כלכלית לשילוב מקורות אנרגיה מתחדשת. חיזוי עשוי להשפיע על מגוון פעולות של ניהול המערכת, כגון תכנון הקצאת היחידות לתפעול (Unit Commitment), אופטימיזציה של העמסת היחידות, דרישות העתודה, ייצוב פעולת המערכת בזמן אמת וכו'.

במקרה שלנו, שילוב תחזיות של ייצור סולארי יאפשר למפעילי המערכת לחזות את קצב העלייה או הירידה בייצור הסולארי והעומס השירורי, להכין בתנאים בטוחים יותר את תוכנית עבודה חצי שעתית למחרת ולהפעיל את המערכת ביעילות רבה יותר בזמן אמת. באופן זה עלויות הדלק, עלויות משתנות של תפעול ואחזקה ועלות ההתנעות יפחתו. בנוסף, הדבר יתרום לשיפור אמינות המערכת ופחית את כמות האנרגיה הסולארית הבלתי מנוצלת.

שילוב תחזיות הייצור הסולארי בניהול המערכת וניהול שוק החשמל עשוי לשפר את ביצועי המערכת בטווחי זמן שונים:

- התחזיות בקטגוריה "יום מראש" (Day-ahead) מספקות את תחזית ההספק הסולארי המשולב ברמה שעתית לצורך הכנת תוכנית הקצאת יחידות הייצור לתפעול (Unit Commitment) למספר ימים קדימה. תחזיות אלה נועדו לסייע במניעת עלויות עודפות הנובעות מהתנעות והפסקות מיותרות של יחידות קונבנציונאליות והוצאות משתנות עודפות כתוצאה מהפעלה לא יעילה של המערכת.
- תחזיות לטווחי זמן קצרים יותר (כולל זמן אמת) יכולות לספק את תחזית ההספק הסולארי ברזולוציה גבוהה, למשל כל 10 דקות, עד 6 שעות קדימה. תחזיות אלה נועדו בעיקר לסייע בתהליך ההעמסה האופטימלית של יחידות הייצור בזמן אמת ובקביעת מחירי השוק הסיטונאי.

חשיבות מיוחדת מיוחסת לחיזוי קצב העלייה או הירידה בייצור הסולארי, וכיום עבודות רבות מתרכזות בפיתוח כלים לטיפול בנושא זה.

ביחידות קונבנציונאליות (קיטוריות ומחז"מים) קצב העלייה או הירידה בעומס מוגבל יחסית, לכן תנודות משמעותיות של הייצור הסולארי, שמתרחשות ברזולוציה של דקות (ואף עשרות דקות), יכולות להקשות על מעקב אחר העומס המנוהל על ידי מפעילי המערכת, בהתחשב בכך שבשעות בהן הייצור הסולארי בעיצומו, מספר היחידות הקונבנציונאליות שבפעולה הוא מועט יחסית ופוטנציאל המעקב אחר העומס שהן יכולות להציע מוגבל במיוחד. דווקא בשעות אלה התנודתיות בייצור הסולארי יכולה להיות גדולה ומהירה יותר. לפיכך, ישנה חשיבות רבה לחיזוי הגודל ומהירות התנודה, כך שלמפעילי המערכת יהיה מספיק זמן להכין את המערכת לקצב התנודה הצפוי.

לכן, לא די בצעדים הקשורים לשיפור היכולת הדינמית של המערכת, שתוארו בסעיפים הקודמים כדי להבטיח את אמינותה. על סמך הניסיון שנצבר במדינות אחרות ניתן להסיק כי השגת היעדים המתגרים של משק החשמל בישראל לאחוזי חדירה גבוהים של אנרגיה סולארית לא תתאפשר ללא הקמת מערך חיזוי משוכלל המותאם לצרכים מקומיים. **מומלץ מאוד לקדם פיתוח תשתיות חיזוי מתקדמות הן ברמות מנהל המערכת ומפעילי מערכת החלוקה והן ברמה של כל תחנת PV גדולה.**

## התמודדות מערך הייצור בשעת חירום

כפי שהוזכר בתחילת הפרק הזה, בעקבות מציאת גז בהיקף משמעותי במאגרים מול חופי ישראל, השתלבות היזמים הפרטיים בסקטור ייצור החשמל ובשל התנגדות ציבורית בארץ ובעולם לייצור חשמל בפחם, במשך שני העשורים האחרונים התווספו למערך הייצור הקונבנציונאלי בישראל כמעט אך ורק יחידות ייצור המוסקות בגז. כתוצאה מכך, הפכה מערכת החשמל בישראל לאחת ממערכות החשמל שהישענותן על גז מהמאסיביות ביותר. כמו כן, משרד האנרגיה פרסם עקרונות מדיניות להסבת התחנות הפחמיות הגדולות של חברת החשמל להפעלה בגז לא יאוחר משנת 2026, תוך שמירה על יכולת התחנות לפעול בפחם במקרה שבשלב כלשהו בעתיד יתרחש מחסור חמור באספקת גז.

מידה גבוהה של תלות בגז, שמקורו במספר מוגבל של מאגרים מקומיים, מגדילה את רמת הסיכון לביטחון האנרגטי של המדינה ובפרט ליכולת אספקת החשמל באירוע חירום הכולל פגיעה באספקת הגז למשק. בכדי להתמודד עם סוגיה זו, בהתאם לדרישות ליצרני חשמל, מרבית יחידות הייצור בישראל המופעלות על גז הן יחידות דו-דלקיות המסוגלות, בהיעדר גז, לפעול בסולר. עם זאת, הפעלה על סולר של התחנות המיועדות בדרך כלל לעבוד על גז היא יקרה מאוד, מלווה בפליטה נרחבת של מזהמים וגזי חממה וגורמת לשחיקה מואצת של התחנות. משק החשמל הישראלי כבר חווה את הנזק הכלכלי העצום מהפסקת אספקת הגז ממצרים בשנים 2011-13.

הגדלת יעדי המדיניות הממשלתית לאחוזי החדירה של אנרגיה מתחדשת בייצור חשמל מגדילה את מידת העצמאות האנרגטית של המשק הלאומי ותומכת גם בהפחתת היקף הנזק למשק החשמל אם אספקת הגז נפגעת.

מחסור בגז שמאלץ את הפעלת יחידות הייצור על סולר ומוביל לקפיצה בעלויות הייצור, לא רק נותן יתרון ליחידות המופעלות על ידי מקורות אנרגיה אחרים (פחם, אנרגיות מתחדשות), אלא גם מחדד משמעותית את פערי העלויות בין יחידות עם נצילות שונה, הפועלות על סולר. במצבי חירום מסוג זה עולה עוד יותר החשיבות של קיום אמצעי אגירה הנשלטים על ידי מנהל המערכת.

בנוסף, כפי שהוצג קודם לכן, במערכת בה עומק החדירה של אנרגיה מתחדשת (בעיקר אנרגיה סולארית) מגיע לכ- 40%, עשויות להיווצר כמויות גדולות של עודפי אנרגיה סולארית. אגירת עודפים אלה וניצולם בשעות עומס גבוה תגרום להפחתת ייצור החשמל על סולר, במיוחד ביחידות בעלות נצילות נמוכה. בנוסף, יביא לחיסכון גבוה מאוד למשק החשמל מאשר במצב הרגיל של הפעלת היחידות על גז.

לדוגמה, אם מנתחים שני נתיבי פיתוח של מקטע הייצור:

1. מוסיפים עד 2030 כ-2,000 מגו"ט של מתקני אגירה
2. מוסיפים עד 2030 כ-2,000 מגו"ט של "פיקרים" המבוססים על טורבינות גז מודרניות, גמישות ויעילות המסוגלות לפעול על גז וסולר. אזי, אם מערכת ייצור הכוללת אנרגיה מתחדשת בהתאם לעומק החדירה של 40% תיאלץ לפעול ללא גז בשנת 2030, החיסכון השנתי בהוצאות משתנות למערכת הייצור הנובע מהפעלה אופטימלית של מתקני אגירה (מסלול 1) יכול, להערכתנו, לנוע בין 450 (בהנחת בלו מוקטן על סולר) ל-750 מיליון דולר לעומת הצפוי במסלול השני ללא תוספת של מתקני אגירה (וזאת בהתחשב בעלות הפליטות). מדובר במספרים גבוהים בהשוואה לתוצאות החישובים על בסיס סימולציה של פעולת המערכת שנעשו בעבר על ידי אגף תפ"ט בקשר לתועלת הצפויה ממתקני אגירה במקרה של הפסקת אספקת הגז. אולם הפעם אנו מדברים על המצב בו עומק החדירה של אנרגיות מתחדשות עולה ל-40% לקראת 2030 וממשיך לעלות בקצב מהיר לאחר מכן, בהשוואה לעומק החדירה של 17%-22% שהונח בעבר. כתוצאה מכך, תחת ההנחות החדשות, עודף אנרגיה סולארית עולה באופן משמעותי, מה שמקנה למתקני האגירה אפשרות לבצע חלק משמעותי מטעינה במחירים זניחים באמצעות ייצור סולארי ללא פליטת מזהמים וגזי חממה. זה עשוי להעלות את התרומה של מתקני האגירה לחיסכון בעלויות מערכת הייצור ואפילו בעלויות הסביבתיות. ברור שאם מדינת ישראל תלך בדרך להאצת קצב חדירת האנרגיה המתחדשת, זה בהכרח יביא לצורך לנצל ביעילות את עודפי הייצור הסולארי, וכתוצאה מכך, להגדלת פוטנציאל התרומה של מתקני אגירה לחיסכון בעלויות מערכת הייצור. לפיכך, בנוסף לעובדה שחדירה מוגברת של האנרגיה המתחדשת תתרום לחסינות המשק הלאומי מפני מחסור בגז, קיימת אפשרות וחשיבות לחזק עוד יותר את יכולתו של משק החשמל להתמודד עם מצבים אלה על ידי הקמה במקביל של מערך אגירה משמעותי הנשלט על ידי מנהל המערכת.

## עלייה בהיקף החדירה של אנרגיה מתחדשת ל-80%-60 ב-2040 ול-95%-80

### ב-2050

בסעיפים הקודמים נותחו הקשיים הקשורים להפעלת מערכת הייצור, בדגש על הביצועים הדינמיים, שעלולים להתעורר כתוצאה מהרחבת החדירה של אנרגיות מתחדשות עד כ-40% בשנת 2030, והוצעו דרכים אפשריות לפתרון הבעיה ולמזעור הסיכונים.

הרחבה נוספת לכ-60% עד 2040 וכ-80% עד 2050 היא יעד הכרחי מבחינת הפחתת פליטות מזהמים וגזי חממה ופיתוח בר-קיימא של משק החשמל בישראל.

לעומת היעד של 40%, בו טכנולוגיות קונבנציונאליות עדיין נשארות הגורם הדומיננטי במקטע הייצור החשמל, השגת היעד של 60%-80% ובהמשך 80%-95% הופכת אותן לכלי עזר המספקים רק גיבוי לייצור חשמל ממקורות מתחדשים. זה עשוי לשנות באופן ניכר את דפוסי העבודה של מפעילי המערכת על כל מרכיביה –

ניהול המערכת, ייצור, הולכה וחלוקה, כמו גם לשנות את כללי שוק החשמל ואת הרכב השחקנים והטכנולוגיות המשתתפים בשוק זה על בסיס תחרותי.

נכון להיום ניתן לטעון בוודאות כמעט מלאה כי במהלך התקופה מ-2030 ועד 2050:

- יסתיים בהדרגה אורך החיים של כל יחידות הייצור הקונבנציונאליות הגדולות הפועלות כיום.
- יפוג בהדרגה תוקף ההתחייבויות התעריפיות (והתפעוליות) ליצרנים הנובעות מאסדרות קודמות וקיימות, כך שיוסרו המחויבויות של מנהל המערכת לתעדף חלק מהיצרנים בתוכנית הפעלת המערכת.

לפיכך, בכל מקרה, הרכב המשתתפים בשוק החשמל וכללי השוק אמורים להשתנות בטווח הארוך מקצה לקצה, ולכן האתגר שעומד בפני מתכנני מערכת החשמל והרגולטורים הוא להבטיח שיעדי המדיניות יושגו על בסיס פיתוח אופטימלי של שוק החשמל בהתחשב בשיקולים כלכליים וסביבתיים כאחד.

בסעיפים הקודמים, על סמך ניתוח פעולת המערכת ב-2030, בהנחה שעומק החדירה של אנרגיות מתחדשות יגיע ל-40%, הוסבר שלא ניתן יהיה להשיג את היעד ללא הקמת פוטנציאל אגירה בקנה מידה גדול. השגת יעד מאתגר עוד יותר של 80%-95% תדרוש גם פוטנציאל אגירה גדול בהרבה. במילים אחרות, על מתקני אגירה יוטל התפקיד שבעומק החדירה של 40% יבוצע ברובו על ידי יחידות קונבנציונאליות - לספק את עיקר הביקוש לחשמל בזמנים בהם ייצור סולארי מוגבל או שאינו זמין לחלוטין.

יתרה מזאת, עקב צמצום משמעותי במערך הקונבנציונאלי, יהיה צורך להבטיח את פוטנציאל האגירה לא רק ברמה היומית אלא גם ברמה של מספר שבועות או יותר מכך כדי להבטיח את אמינות אספקת החשמל. עם זאת, מבחינת קבלת ההחלטות בנושא, הכיוון דומה לזה שהומלץ להשגת היעד של 40% : לקדם הרחבת פוטנציאל האגירה, כאשר ההיקף והעיתוי ייקבעו במסגרת אופטימיזציה טכנו-כלכלית של פיתוח המערכת, שמטרתה להבטיח השגת היעד לטווח הקרוב בהתחשב ביעד לטווח ארוך.

השגת יעד של 80%-95%, אשר ברובה תתבסס על הקמת תחנות כוח סולאריות המחוברות לרשת מתח נמוך ומתקני אגירה מבוזרים, לא תתאפשר ללא הקמת תשתיות שיאפשרו למפעילי המערכת לשתף את צד הביקוש והיצרנים המבוזרים במתן שירותי ניהול המערכת. לכן, ההמלצה, שתוצג בהמשך, לקדם הקמת תשתיות "רשת חכמה" המלווה בהקמה ואסדרה של שוק תחרותי לשירותים נלווים, מקבלת כאן חשיבות עליונה. בהקשר זה גדלה גם החשיבות של השתתפות בשוק זה של "תחנות וירטואליות" המייצגות קבוצות גדולות של צרכנים ויצרנים מבוזרים.

גם החשיבות של הקמת תשתיות חיזוי משוכללות, עליה המלצנו מוקדם יותר, עולה ככל שעולה אחוז החדירה של אנרגיות מתחדשות.

סוגיה חשובה נוספת, שמומלץ לטפל בה בהקדם האפשרי, קשורה להתאמת המודלים האנליטיים שמשמשים לתכנון הפיתוח של מערכת הייצור לסימולציה של פעולת המערכת המורכבת ברובה ממתקנים סולאריים ומתקני אגירה. המודלים הקיימים בעולם התפתחו במשך הזמן בהתאם לנתיבי התפתחות של שוק החשמל, אשר ברובו המוחלט היה מורכב מיחידות קונבנציונאליות, גרעיניות, הידרואלקטריות ובמידה מועטה יותר – על תחנות אגירה שאובה.

בעקבות הדה-רגולציה של משקי החשמל, פיתוח המודלים התרכז בעיקר בהדמיית פעולת שוק תחרותי, כך שחלק משמעותי מהמודלים, שפותחו בעשור האחרון, אינם כוללים אפילו את היכולת לבצע הדמיה הסתברותית של פעולת המערכת בהתחשב באופי האקראי של זמינות מתקני ייצור. אילו אותם מודלים מעטים המסוגלים לעשות זאת טרם הותאמו כראוי להדמיה הסתברותית של מקורות אנרגיה מתחדשים. כידוע, בניגוד

לתחנות הקונבנציונליות, הזמינות של ייצור סולארי (או רוח) תלויה לא רק בזמינות מתקני הייצור עצמם אלא בעיקר באופי האקראי של מקור האנרגיה.

לכן, אקראיות זו צריכה לקבל ביטוי מתאים בדימוי פעולת מערכת הייצור ובתכנון הפיתוח של המערכת. כל עוד מדובר באחוזי חדירה לא גבוהים במיוחד, המתכננים בעולם מוצאים דרך להתמודד עם סוגיה זו באמצעות המודלים הנמצאים ברשותם. עם זאת, כשמדובר במערכת חשמל המבוססת כמעט לחלוטין על מקורות אנרגיה מתחדשים, ישנה חשיבות רבה למצוא פתרון לסוגיה זו.

בהפעלה בפועל של המערכת, בעיה זו צפויה להיפתר על ידי שימוש בתשתיות חיזוי, אך תכנון ארוך טווח של המערכת אכן זקוק למציאת פתרון הולם על ידי פיתוח אלגוריתמים מתאימים.

מכיוון שחלק ניכר מהמתקנים הסולאריים ומתקני האגירה צפויים להתחבר במתח נמוך, חשוב שהמודלים יאפשרו גם הדמיה של "תחנה וירטואלית" המייצגת את היכולת המשולבת של צד הביקוש ושל היצרנים המבוזרים בשוק השירותים הנלווים. בישראל, אגף תפ"ט (שעבר ב-12.2020 לחברת ניהול המערכת) רכש ניסיון עשיר הן בפיתוח עצמי של המודלים המשמשים לתכנון ותפעול המערכת והן בקליטת המודלים שפותחו בחו"ל.

בעיקרון, מנקודת הראות של תכנון מערכת הייצור, יש לצפות שאחרי שעומק החדירה של אנרגיות מתחדשות יגיע לכ-40%, הדרך להשגת היעדים הגבוהים יותר (60%-80%) תהיה פשוטה יותר, הן מבחינה טכנית והן מבחינה רגולטורית, מהסיבות הבאות:

1. היעד של 40% הוא כשלעצמו יעד מאתגר והשגתו מחייבת הקמת אמצעי ייצור סולאריים בקנה מידה גדול, אמצעי אגירת אנרגיה, תשתיות תקשורת ובקרה, תשתיות חיזוי הייצור הסולארי והתאמת הכלים האנליטיים שבידי מתכנני המערכת ומפעיליה לדרישות החדשות. בדרך להשגת היעד יתבררו היתרונות והחסרונות של כל תשתית, יירכשו ניסיון מעשי ומיומנויות הנדרשים לקביעת הנתוב האופטימלי להשגת היעדים הבאים.

2. השגת היעד של 40% תחייב להתאים את כללי הרגולציה לשינויים מהותיים, כגון:

- השתתפות של מתקני אגירה שבשליטת מנהל המערכת, בשוק תחרותי, ביחד עם יחידות קונבנציונאליות, תוך ניצול הפוטנציאל שלהם לתרום לשיפור הגמישות התפעולית של המערכת;
- הקמת שוק שירותים נלווים בו ייקחו חלק פעיל גם מתקני ייצור מבוזרים וצד הביקוש;
- מקרים תכופים של עודף אנרגיה סולארית, מה שעשוי להוביל להורדת מחירי השוק לערכים שליליים.

לכן, בדרך להשגת המטרה, המאפיינים העתידיים של השוק התחרותי כבר יתבהרו, כך שכל המשתתפים יוכלו להעריך בביטחון רב יותר מהם אופקי ההשקעה האופטימליים עבורם.

3. כפי שצוין לעיל, אחת הבעיות העיקריות שדורשות פתרון בדרך להשגת היעד של 80%-95% לקראת 2050 היא הצורך להבטיח יכולת משמעותית של אגירה לפרקי זמן ארוכים. עם זאת, אין לשכוח שחלק גדול מהמדינות המפותחות גם כן הולכות בכיוון הזה ואף מקדימות את ישראל באופן משמעותי. לכן, יש לשער כי בטווח הארוך יהיו התפתחויות טכנולוגיות משמעותיות שיביאו לפריצת דרך גם בתחום אגירת האנרגיה לפרקי זמן ארוכים. לדוגמה, אחד התחומים המתפתחים כיום בקצב מהיר הוא ייצור מימן בעזרת אלקטרוליזה של מים. אם משתמשים לצורך התהליך הזה בחשמל המיוצר באמצעות עודפי אנרגיה סולארית, אוגרים כמויות משמעותיות של מימן ומנצלים אותו בהמשך כדלק להפעלת יחידות קונבנציונאליות (כגון מחז"מ) או בתאי דלק (Fuel Cells), זה יכול להוות אחד הפתרונות העתידיים לבעיית אגירת אנרגיה לפרקי זמן ארוכים. הנושא הוא מורכב והמחקרים מתרכזים בשלושת



המישורים : אלקטרוליזה, אגירה והובלה וניצולו כדלק להפעלת תחנות כוח. חברת מיצובישי מקדמת פרויקט להסבת אחת משלוש יחידות המחזוריית בתחנת כוח Magnum בהולנד עד 2025 לעבודה על בסיס מימן (100%).



Vattenfall's Magnum GTCC power plant

מחקרים אחרים מתמקדים בהעלאת אחוז המימן בשריפה מעורבת עם גז בטורבינות גז, שגם היא יכולה לתמוך בניצול מימן כאמצעי אגירה של עודפי האנרגיה הסולארית לפרקי זמן ארוכים. בדרום קוריאה מתמקדים בניצול מימן באמצעות תאי דלק. המתקן הגדול בעולם מספק 50 מגו"ט חשמליים מתאי דלק, ומתוכנן להרחבה עד 1 גו"ט בשנת 2030, בעוד התוכנית האסטרטגית ארוכת הטווח של המדינה היא להגיע לכושר ייצור של 15 גו"ט עד 2040.

אין ספק שאם מדינות, עסקים וחוקרים ימשיכו להקדיש את הידע, המומחיות והתקציבים ליצירת שוק חשמל נטול גזי חממה, תוך 10-15 שנים נראה פריצת דרך משמעותית בנושא ספציפי זה וגם בכל הקשור לאגירה לפרקי זמן ארוכים.

## סיכום, מסקנות והמלצות

מטרות פרק זה :

- לנתח את המאפיינים והצרכים הנובעים מהם של מערכת ייצור חשמל, בדגש על הביצועים הדינמיים שלה, בתרחיש של 40% אנרגיות מתחדשות בשנת 2030, והמשך גידול שיעור המתחדשות לטווח של 60% - 80% ב-2040 ו-80% - 95% בשנת 2050.

- להצביע על האתגרים הצפויים למקטע הייצור והדרכים לפתרונם תוך מזעור הסיכונים ליציבות המערכת. הניתוח מראה שישנם מספר אתגרים משמעותיים אשר ניתן להתגבר עליהם ולהגיע לאחוזי מתחדשות גבוהים מאוד תוך השגת יעילות כלכלית גבוהה ביחס לחלופת תרחיש "עסקים כרגיל".

האתגרים המרכזיים הם :

1. קיטום סולארי : סיכון להיווצרות כמויות מופרזות של אנרגיה סולארית בלתי מנוצלת.
2. שינויים חדים בעומס : עלייה חדה בעומס שיורי בשעות השקיעה ולהיפך - ירידה חדה בשעות הזריחה.

3. תגובה לשינויי תדר: התמודדות עם בעיית ייצוב תדר בעידן הייצור הסולארי ומעקב אחר השינויים בעומס השיורי בעת ההתרחשות של פלוקטואציות מהירות בייצור הסולארי.

הניתוח מראה כי בעיות אלה אינן נפתרות בנפרד, שכן קיימת תלות הדדית חזקה ביניהן, כפי שמוצג בטבלת הסיכום מטה:

טבלה 2: טבלת סיכום

תנודתיות סולארית	שינויים חדים בעומס	קיטום סולארי	
V	V	V	הקמת מתקני אגירה הנשלטים על ידי מנהל המערכת
V	V	V	גיבוש דרישות לשליטת מנהל המערכת במתקני PV
V	V	V	גיבוש מסגרת רגולטורית לאספקת שירותים נלווים (ancillary services) על ידי מתקני אגירה ו-PV
		V	העברת כל היצרנים לשליטת העמסה מרכזית
		V	תזמון תחזוקת תחנות כוח תוך התחשבות בייצור סולארי עודף
V	V	V	הקמת מערך חיזוי סולארי מתקדם המותאם לצרכי המערכת
V	V	V	יישום מערכת ושיטות מתקדמות לחיזוי ביקושים לחשמל

### בפרט, הניתוח מראה כי:

- מומלץ לפעול להקמת תשתית אגירה בהיקף נרחב, הנשלטת על ידי מנהל המערכת, על מנת לאפשר הפעלה אמינה של מערכת הייצור תוך ניצול מיטבי של האנרגיה המתחדשת:
  - מזעור עודפי הייצור הסולארי דורש הקמת מתקני אגירה בקנה מידה גדול, הרבה מעבר לנדרש בהתאם לקריטריון האמינות לתכנון מערכת הייצור.
  - מתקני אגירה מסוגלים לתרום הרבה מעבר לערך של ההספק המותקן שלהם (עד פי שתיים מההספק) להפחתת טווח עליית ההספק של המערך הקונבנציונאלי בשעות השקיעה. תכונה זו מעניקה למתקני האגירה את היתרון העיקרי על פני יחידות קונבנציונאליות בעידן החדירה המסיבית של הייצור הסולארי במשק החשמל.
  - למערך האגירה חשיבות מרכזית במקרה של התרחשות אירוע תדר (תקלה מאולצת של יחידת ייצור אחת או יותר, תקלה במערכת ההולכה וכו') בפרק הזמן בו הייצור הסולארי נמצא בעיצומו ויכולת התגובה של המערך הקונבנציונאלי מוגבלת.
  - הקמת מערך אגירה תתרום רבות לחסינות המשק הלאומי מפני מחסור בגז בעת חירום.

- מומלץ לפעול לכך שחלק משמעותי ממתקני ה-PV יאפשרו הפעלה בשליטת מנהל המערכת (dispatchability), כך שתאפשר השתתפותן במתן שירותי ניהול המערכת שניתנו עד כה על ידי תחנות קונבנציונאליות, כגון וויסות עומס מעלה ומטה, אספקת תגובה ראשונית לירידה או עלייה בתדר וניהול הספק פעיל.
- מומלץ לחייב מתקני PV חדשים במתח עליון בהקמת תשתית שתאפשר dispatchability בהתאם לצרכי המערכת. אגף תפ"ט (שעבר ב-2020.12 לחברת ניהול המערכת) הוא הגוף בעל הידע והניסיון העשיר ביותר הנדרשים לבדיקת הביצועים הדינמיים של מערכת החשמל ולהכנת הדרישות לעיל.
- היות וחלק ניכר מהספק ה-PV החדש יוקם, בהתאם לעמדת המשרד, בתוך המרחב המבונה, מומלץ לכלול את הדרישות לעיל גם עבור מתקנים בגודל משמעותי שיחברו לרשת מתח גבוה, ואף בדרך המתאימה לכך, עבור מתקנים מבוזרים קטנים המחברים למתח נמוך. סוגייה זו תידון בהרחבה בהמשך הדו"ח.
- מומלץ לפעול לצמצם ככל הניתן את התיעדוף המובנה של חשמל המיוצר באמצעות דלקים פוסיליים מזהמים על פני חשמל המיוצר באמצעות אנרגיה מתחדשת. זאת באמצעות:
  - העברת כל היצרנים להעמסה מרכזית: מתוצאות העבודה עולה כי בהעדר תעדוף היצרנים שהשתלבו בהתאם לאסדרה 241 (או מכרז ממשלתי) ושברשותם הסכמים בילטרליים, כמות האנרגיה המתחדשת הבלתי מנוצלת בשנת 2030 עשויה לרדת בכ-40%-45%.
  - תזמון תחזוקת תחנות כוח תוך התחשבות בייצור סולארי. החלק הארי של קיטום אנרגיה מתחדשת צפוי להופיע בחודשים מרץ, אפריל ומאי (תרשים 20). ממצאי העבודה מצביעים על האפשרות לצמצם (בכ-2.5%-4%) את כמות האנרגיה הסולארית הלא מנוצלת על ידי ביצוע עבודות תחזוקה של היחידות לעיל בעונת האביב.
- מומלץ לפעול להקמת שוק תחרותי לשירותים נלווים (Ancillary Services Market) - כגון שירותי תעודה סובבת, אספקת חלון מעלה (headroom) וחלון מטה (footroom), שירותי ייצוב תדר ומתח ושירותי ניהול מערכת נוספים - בו מתקנים סולאריים ומערכות אגירה יוכלו להציע את שירותיהם בתנאים שווים עם תחנות אחרות.
- מומלץ לקדם פיתוח תשתיות חיזוי מתקדמות הן ברמות מנהל המערכת ומפעילי מערכת החלוקה והן ברמה של כל תחנת PV גדולה.
- מומלץ לקדם מערכות ושיטות מתקדמות לחיזוי הביקוש לחשמל.



# הערכות רשת החשמל בדגש על רשת החלוקה

## עיקרי הפרק

**מטרות הפרק:** זיהוי האתגרים הצפויים למערכת החלוקה ממעבר ל-40% אנרגיה מתחדשת תוך התבססות בעיקר על מתקנים מבוזרים בתוך המרחב המבונה, זאת על ידי התייחסות הן לצרכים הפיזיים לשם קליטת החשמל מבלי לערער את יציבות המערכת או בטיחותה, והן לצרכי הרשת על מנת לאפשר ניהול של המערכות המבוזרות כחלק ממערך הייצור.

**מסקנות עיקריות:** ניתן להתקין בשנת 2030 מערכות PV בהספק כולל של כ-22.4 גו"ט ברשת החלוקה – כאשר סך הספק ה-PV הנדרש לשם עמידה ביעדים מוערך ב-18.7-22.9 גו"ט - ולהבטיח את הפעולה התקינה של רשת החלוקה ללא השקעות תוספתיות משמעותיות. בנוסף, יש לעדכן את אמות המידה ביחס בין הספק שנאי להספק סולארי ולפעול לפריסה גיאוגרפית נכונה של השנאים הנוספים המתוכננים על מנת למקסם את שילוב המתקנים.

עם זאת, ניהול המערכת הארצית בתנאים שרוב מערכות ה-PV המותקנות במתח נמוך ומתח גבוה ידרוש הטמעת כלים לשליטה ובקרה על מערכות אלו והפיכתה של רשת החלוקה הישראלית ל"רשת חכמה" (Smart Grid).

### המלצות עיקריות:

- ליישם את התוכנית של חברת החשמל לשדרוג קווי ההולכה באופן שיגדיל את יכולת ההתקנה של PV ברשת החלוקה, ובפרט להתאים לצווארי הבקבוק ברשת.
- להסיר חסמים בפני התקנת מערכות PV בשטחים מבונים נוספים באופן שירחיב את פריסת ההתקנה לאזורים נוספים בארץ, בהם אין כיום עומסים ברשת.
- להתקין מערכות אגירה במתח נמוך ומתח גבוה ולנהלם באופן שיקל על העומס בתחנות משנה שכבר כיום הגיעו לסף הקיבולת שלהן להתקנת PV ברשת החלוקה.
- להכין דרישות טכניות לרשת החלוקה (GRID CODE) שיכללו בין היתר דרישות מפורטות בנוגע להספק המרבי של מערכות PV ביחס להספק שנאי מתח גבוה ומתח נמוך.
- לתכנן מראש את רשת החלוקה החדשה - במתח גבוה ובמתח נמוך - כרשת אקטיבית, בה מותקנים, בנוסף לצרכנים, מערכות רבות של ייצור ואגירת האנרגיה.
- להשקיע במערכת DMS עבור רשת החלוקה, לרבות מחשוב, תקשורת, בקרה ושליטה של הפיקוח האזורי וארצי, ולחבר את כלל מערכות ה-PV והאגירה ברשת למערכת זו באופן המאפשר ניהול מרכזי של המערכות המבוזרות בחבילות של כ-50 עד 100 מגו"ט.
- להתקין בעמדות הטעינה של רכבים חשמליים, לרבות במשקי בית, מונים חכמים המסוגלים לתת פקודת טעינה או פקודת פריקה לסוללות של הרכב החשמלי.
- לקבוע תקנות המאפשרות לצד הביקוש או למקורות אנרגיה מבוזרים לספק שירותים למנהל המערכת או למפעילי מערכת החלוקה.
- לפרסם אסדרה שקובעת את המסגרת הרגולטורית להפעלת "תחנות וירטואליות" לרבות השתתפותן בשוק החשמל הסיטונאי ואספקת שירותים נלווים.

## ג. תכנון ופיתוח רשת החלוקה העתידית

### רקע

הקמת מערכות ייצור של אנרגיה מתחדשת משפיעה באופן ניכר על רשת החשמל, במיוחד על רשת החלוקה במתח גבוה ומתח נמוך. כל שינוי במערכת החשמל, ובמיוחד שינוי כה מהותי במיקומה ובאופייה של מערכת הייצור, צריך להבטיח את המשכיות ההפעלה הטכנו-כלכלית האופטימלית של המערכת, כולל האפשרות לתכנן, לפתח, להקים, להפעיל, לתחזק ולפרק את מתקני החשמל, תוך שמירה על שרידות, אמינות, יעילות ובטיחות. מערכת החשמל צריכה לעמוד בדרישות הבאות<sup>24</sup>:

- בטיחות חיי אדם.
- שמירה על ציוד.
- שרידות המערכת.
- איכות הסביבה.
- איכות ואמינות אספקת החשמל.
- מזעור עלויות.
- שמירה על ניהול משק חשמל הוגן ושוויוני.

מערכת ההולכה 400-161 ק"ו, היא החולייה המקשרת בין מרכזי הייצור הגדולים לבין מערכות החלוקה 13-36 ק"ו, ובאופן מסורתי, מעבירה חשמל למרחק משמעותי מתחנות הכוח למרכזי הצריכה. אמינותה של מערכת ההולכה חייבת להישמר ולהיות תקינה הן במשטרים רגילים (Adequacy of System) והן במהלך הפרעות שונות, ולבסוף לספק את החשמל עם תום ההפרעה (System Security)<sup>25</sup>.

יחד עם זאת, התקנה נרחבת של אמצעי ייצור PV במתח גבוה ומתח נמוך, יגרום להורדת זרימות העומס בקווי ההולכה של מתח על ועליון, וזאת משום שייצור על ידי הצרכן או בסמוך למוקדי הצריכה מפחית את הצורך בהולכת החשמל. לפיכך, ניתן יהיה להתאים את התכנון והתפעול של מערכת ההולכה העתידית הן בתרחיש "עסקים כרגיל" והן בתרחיש ההפחתה, ללא שינויים מהותיים בשיטות העבודה הרגילות.

בעבודה הנוכחית, נתמקד בהשפעתן של מערכות ייצור PV מבוזרות במרחב המבונה על רשת החלוקה במתח גבוה ומתח נמוך. ריבוי גנרציה מבוזרת ביחד עם שינויים טכנולוגיים במערכות PV, אגירת אנרגיה, רכב חשמלי, "מנייה חכמה" ו-"רשת חכמה" יגרמו לשינוי גישה בעיצוב, תכנון ותפעול רשת החלוקה.

פיתוח מערכות מחשוב ותקשורת מאפשרות אינטגרציה ותאום בין המערכות, ובמקביל מקדמות מספר יישומים מתקדמים. הסוגיות הנ"ל, דורשות שיתופי פעולה בין האקדמיה, חברות הנדסה, חברת החשמל, רגולטורים, ספקי הציוד וארגונים הפועלים בתחום האנרגיה המתחדשת.

<sup>24</sup> כללים למערכת החשמל, גירסה 1, יוני 2012

<sup>25</sup> חשמל ואנשים, גליון 75, דצמבר 2018, דוד אמדור – תכנון מערכת ההולכה בעידן תחרות ביצור

פיתוחים חדשים בתחום המיקרו-גנרציה המבוזרת, דרישות חדשות ליעילות, גמישות, בטיחות ואיכות אספקת החשמל גורמות להפיכת מערכת חלוקה "פסיבית" לרשת חלוקה "אקטיבית"<sup>26</sup>. רשת חלוקה "אקטיבית" מוגדרת כרשת, הכוללת גנרציה מבוזרת, עומסים ואגירת אנרגיה.

מפעילי הרשת יכולים לנהל את הזרימות הדו-כיווניות של העומס בעזרת מערכות ממוחשבות עם טופולוגיה גמישה. לפיכך, שלבי התכנון והתפעול של הרשת אינם יכולים להיות מוגדרים כמטלות נפרדות, וחייבים להיות משולבים באופן אינטגרטיבי.

מערכות המחשוב והתקשורת יהיו משולבות במערכות של רשת החלוקה ובעזרתן ניתן יהיה לבצע סימולציות מתקדמות לצורך תכנון המערכת, מבחני אמינות וניהול סיכונים.

בעזרת מערכות "מנייה חכמה" ניתן יהיה לקבל מידע לגבי עקום העומס, הרגלי הצריכה ואפשרויות ניהול הצריכה, כאשר בשונה מהמציאות העכשווית, העומס יעקוב אחר יכולות הייצור במקום שמקורות הייצור יעקבו לאחר שינוי העומס.

בשני התרחישים הנבדקים בעבודתנו, כ-80% עד 98% מהאנרגיה המתחדשת העתידית תקום באמצעות מערכות PV. לפיכך, נתייחס בעיקר לחדירה משמעותית של מתקני PV במתח נמוך (גגות וקירות של בניינים, חניות של תחבורה פרטית וציבורית, קירוי חממות, מאגרי מים ועוד) ומתח גבוה.

השינוי העיקרי ברשת החשמל יהיה, כאמור, הפיכת רשת החלוקה הרדיאלית עם זרימת האנרגיה מתחנות כוח לצרכנים, לרשת דו-כיוונית עם זרימות עומס מהצרכן לרשת ובין הצרכנים השונים.

הסוגיות העיקריות לבדיקה יהיו<sup>27</sup>:

- מערכות הגנה ואוטומציה, כולל סלקטיביות ורגישות לשני כווני זרימת האנרגיה.
- יכולת העברה טרמית של כל מרכיבי הרשת וויסות מתחים.
- איכות החשמל והרמוניות ברשת.
- מערכות אגירת אנרגיה לצורך יישור עקומות העומס (peak shaving) ומעקב אחרי עומס (load following).
- הגנת סייבר למערכות רשת החלוקה "האקטיבית".

<sup>26</sup> CIGRE, Planning and Optimization Methods for Active Distribution Systems, Working Group C 6.19, August

2014 (591)

<sup>27</sup> CIGRE, Capacity of Distribution Feeders for Hosting DER, Working Group C 6.24

## הגנות ואוטומציה של הרשת

הכנסה לתפעול של מערכות ה-PV בתרחיש ההפחתה עלולה להשפיע על מספר סוגיות טכניות, כגון ויסות המתח, בטיחות ואמינות האספקה, יציבות מערכת החשמל באזור מסוים, בקרת המערכת, הגנות ופעילות באי חשמלי<sup>28</sup>. נתייחס לסוגיות הטכניות בהתאם לסקירת הספרות הבינלאומית.

בפרק זה נתמקד בהשפעת מערכות ה-PV על הגנות של רשת החלוקה ולסוגיות טכניות נוספות, כפי שצוינו לעיל. מערכת החלוקה המסורתית מתוכננת כמערכת רדיאלית עם זרימת הזרם לכיוון אחד, מפסי צבירה מתח גבוה לכיוון הצרכנים. לצורך הגנת המתקנים, משתמשים בהגנות יתרת זרם יחסית פשוטות, בהגנות טרמיות ובנתיחים. בנוסף, בקווי מתח גבוה, במשטר עבודה עם סליל כיבוי, משתמשים בהגנות ווטמטריות כיווניות, וזאת לצורך גילוי קצרים חד פאזיים לאדמה.

מערכות הגנה ברשת החשמל פועלות לפי שני קריטריונים עיקריים:

- סלקטיביות - יכולת לפעול רק במקטע, שבו קיימת התקלה ולא לפעול במקטעים הסמוכים לתקלה

- רגישות - יכולת להבחין בתקלה גם כאשר הנתונים החשמליים במקטע הפגוע יהיו קרובים לנתונים הנומינליים

פגיעה בסלקטיביות או ברגישות של מערכת ההגנה יכולה להביא לאי-הפעלה של מערכת ההגנה בעת הצורך, ובכך ליצור סכנה של שריפה או התחשמלות, לרבות פגיעה ברכוש ובחיי אדם. מנגד, תיתכן גם הפעלה של מערכות ההגנה שלא לצורך. מקרים אלו עלולים להביא להפסקות חשמל מיותרות, או בהיקפים נרחבים יותר מהנדרש על מנת לבודד את התקלה, וכתוצאה מכך להגדיל את העלות הכלכלית של התקלה הן מבחינת עלות אי-אספקת החשמל והן מבחינת עלות התיקון.

הכנסת כמויות גדולות של מערכות PV מבוזרות לרשת החלוקה עלולה לפגוע בסלקטיביות וברגישות של מערכות ההגנה מכמה סיבות המובאות להלן:

1. חיבור מערכות ה-PV במתח גבוה ומתח נמוך גורם להפיכת רשת רדיאלית ובה זרימה חד-כיוונית של חשמל, מתחנות הכוח אל הצרכנים, לרשת הכוללת זרימות דו-כיווניות של אנרגיה כתוצאה מהוספת יכולת גנרציה גם מצד הצרכנים. מערכות PV, כמקור גנרציה, יגרמו לעליית זרמי הקצר ולזרימה "הפוכה", אשר עלולה להוביל לזמני הפעלת הגנות שונים מאשר בזרימה רדיאלית ולפעולה לא סלקטיבית של ממסרי ההגנה.

2. ההספק המשתנה של מערכת PV, עקב שינויי מזג אוויר, יגרום לשינויים בגודל זרם הקצר. כתוצאה מכך, ממסרי ההגנה עלולים להיות לא רגישים מספיק לזרמי הקצר או לפעול ללא צורך במקרים אחרים<sup>29</sup>.

ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58 (2016) Renewable distributed generation: 28  
The hidden challenges – a review from the protection perspective, Patrick Tendayi Manditereza,  
Ramesh Bansal

ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58 (2016) Renewable distributed generation: 29  
The hidden challenges – a review from the protection perspective, Patrick Tendayi Manditereza,  
Ramesh Bansal

3. תוספת משמעותית של מערכות PV במתח נמוך עלולה לגרום לשריפת נתיכים ללא צורך, בזמן הפרעות חולפות, כאשר מתקיים חיבור חוזר מוצלח של קווי מתח גבוה. על פי התכנון, הנתיכים אמורים לא לנתק את הצרכן בזמן הקצר החולף.

4. לאחר התקנת מערכות PV, זרמי הקצר יסופקו גם על ידי מערכת ההספק העיקרית, וגם על ידי ה-PV, ויהיו עלולים לעבור את היכולת של מפסק הזרם וציוד נוסף לעמוד בזרם הקצר המוגדל. לפיכך, יש לחשב מחדש ולהתאים את היכולות של הציוד לעמוד בזרמי הקצר גם לאחר התקנה רחבה של מערכות ה-PV. לרוב, מדובר בשליטה בזרם אך לעיתים תידרש החלפה של הציוד עצמו.

ישנן מספר חלופות עיקריות לשמירה על סלקטיביות ורגישות תקינות של מערכות ההגנה לאחר שילוב משמעותי של מערכות PV ברשת החלוקה:

1. שדרוג מערכות ההגנה למערכות הגנה דו-כיווניות והוספת שנאי מתח, אשר לרוב, לא מותקנים כיום בקווי רשת החלוקה. החלפת רוב ממסרי ההגנה במערכת החלוקה תדרוש לא רק השקעות משמעותיות אלא גם זמן ממושך לביצוע השינויים באלפי מתקנים של רשת החלוקה.

2. מערכות הגנה מותאמות מצב המערכת (כיוולים דינמיים - Adaptive Protection). בחלק מן המדינות המתקדמות שוקלים את שילובן של מערכות הגנה עם כיוולים מותאמים לכל מקרה מיוחד (Adaptive Protection), שילובים עם מחשב מרכזי בתחנות משנה (Central computers), ושימוש נרחב במערכות תקשורת בין ההגנות (Communication based protection solution)<sup>30</sup>.

3. פיזור אופטימלי של מערכות ה-PV כך שהספק הייצור לא יעלה על רף מקסימלי ביחס להספק ההשנאה. בכך תימנע היווצרות הבעיות מלכתחילה. פתרון זה אינו מחייב השקעה ברשת כל עוד הספקן של מערכות ה-PV ומיקומן אינם מחייבים הרחבה של הספק ההשנאה.

בחלק מהמקרים ישנו צורך בפתרונות משלימים. לדוגמה, במספר מדינות התקבלו דרישות רגולטוריות חדשות במסגרת כללי הרשת (Grid Codes), אשר דורשות מגנרציה מתחדשת ברשת החלוקה לא להתנתק זמן מסוים בזמן הקצר ולספק אנרגיה אקטיבית וריאקטיבית לתמיכה בתדר ומתח בנקודת ההתחברות, לאחר סילוק ההפרעה<sup>31</sup>. לצורך עמידה בדרישה זו, יש לצייד את הגנרציה המתחדשת במערכות הבקרה המיוחדות.

כפי שצוין לעיל, תוספת גנרציה ברשת החלוקה עלולה לגרום לפעולה של חלק מהמערכת כאי חשמלי, כל זאת לאחר הפסקת מפסק הזרם לצורך סילוק הקצר. עד כה, פעולה במשטר של אי חשמלי הייתה נחשבת כלא רצויה עקב הקושי בבקרת מתח ותדר בתוך האי, בעיות בטיחות וסנכרון בחזרה של האי עם המערכת הראשית, לאחר סיום ההפרעה.

ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58 (2016) Renewable distributed generation: <sup>30</sup>  
The hidden challenges – a review from the protection perspective, Patrick Tendayi Manditereza,  
Ramesh Bansal

ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58 (2016) Renewable distributed generation: <sup>31</sup>  
The hidden challenges – a review from the protection perspective, Patrick Tendayi Manditereza,  
Ramesh Bansal

בכללי הרשת החדשים (Grid Codes) דרישה לעבודה באי חשמלי (או מיקרוגרید) נחשבת כאופציה ממשית<sup>32</sup>. מספר מחקרים מתייחסים לפיתוח הבקרה למערכות מיקרוגריד. בקרת מתח, תדר והתאמה לדרישות העומס באי, הם מורכבים מבחינת איכות ואמינות הספקת החשמל.

שימוש בממירים המחוברים למערכות ה-PV, מוסיף על הקושי בהתאמת ההגנות הפועלות במיקרוגריד. יחד עם זאת, יצוין כי הפעולה כאי חשמלי רלוונטית יותר לרשת ההולכה, ואינה צפויה להיות מהותית ברשת החלוקה, גם לאחר כניסה מסיבית של מערכות PV.

נוסף על כך, הפיכת רשת החלוקה מרשת פסיבית לרשת אקטיבית ואינטגרציה של מערכות PV בכמויות גדולות, מחייבת חישוב מחדש של כל נושא היציבות ברשת החלוקה. מהירות, רגישות וסלקטיביות ההפעלה של ממסרי ההגנה תמיד ייקשרו ליציבות המערכתית. לרוב, נושא היציבות לא נחשב למשמעותי ברשת החלוקה, אך עם הכנסת הגנרציה ברשת, יש צורך להבטיח פעולה תקינה של גנרציה מבוזרת בזמן ההפרעה ולאחר סילוק ההפרעה.

התנתקות ניכרת של מערכות ה-PV בזמן ההפרעה עלולה לגרום לירידת מתח מסוכנת או לתנודות מתח המסכנות את הציוד ברשת החשמל. בנוסף, הכנסה משמעותית של מתקני ה-PV מקטינה את האינטגרציה האפקטיבית של מערכת החלוקה שגורמת לירידה בביצועים הדינאמיים של רשת החלוקה.

יש להתמודד עם אתגר זה על ידי הזרמת אנרגיה אקטיבית במהירות האפשרית ללא תנודות הספק. מספר מחקרים מציינים, שניתן לעשות זאת באמצעים אלקטרוניים של מערכות ה-PV, כאשר הכוונה היא למערכות הבקרה החכמות<sup>33</sup>.

לסיכום, הכנסה מסיבית של גנרציה מבוזרת ברשת החלוקה הופכת אותה מרשת פסיבית לרשת אקטיבית עם זרימות אנרגיה דו-כיוונית, שינויים ברמות זרמי הקצר, בעיות יציבות ואפשרות לעבודה באי חשמלי. כל השינויים הנ"ל עלולים להשפיע על עבודה תקינה של מערכות ההגנה ברשת החלוקה.

לפיכך, תאורטית יש צורך בהתאמת התפיסה של כל מערך ההגנות ברשת החלוקה (כרשת עם זרימה דו-כיוונית) ושילוב בין סכמות מרכזיות והיררכיות עם ארכיטקטורה מבוזרת של מערכת ההגנות, וכל זאת תוך השקעה מסיבית.

בפועל, בעיות הבטיחות והיציבות המועלות בפרק זה **מתהוות רק כאשר הספק ה-PV עולה על רף מקסימלי ביחס להספק השנאי**. על כן, פתרונות אלו נדרשים רק אם הספק ההשנאה אינו מספק על מנת לאפשר חדירה של מערכות PV ברשת בהיקפים הרצויים. כפי שנראה בהמשך, ברשת החלוקה של ישראל, בתרחיש ההפחתה בשנת 2030 ניתן יהיה להבטיח לרוב את הפעולה התקינה של מערכת ההגנות הקיימת עם התאמות מקומיות לא משמעותיות.

ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58 (2016) Renewable distributed generation: <sup>32</sup> The hidden challenges – a review from the protection perspective, Patrick Tendayi Manditereza, Ramesh Bansal

ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58 (2016) Renewable distributed generation: <sup>33</sup> The hidden challenges – a review from the protection perspective, Patrick Tendayi Manditereza, Ramesh Bansal

יחד עם זאת, כן מומלץ להכין עבודה טכנו-כלכלית בתחום התאמת מערכות ההגנה והאוטומציה לדרישות עתידיות ברשת החלוקה בשנים 2040-2050. מומלץ לשלב עבודת מומחים מחברת החשמל ומהשוק הפרטי לצורך הכנת העבודה הנ"ל.

## ד. יכולת העברה טרמית וויסות המתחים

כל מרכיב ברשת החלוקה (קווים, כבלים ושנאים) מאופיין על ידי יכולתו להעביר זרם מסוים, אשר מוגדר כיכולת העברה טרמית של המתקן. העמסת המתקן מעבר ליכולתו הטרמית במשך זמן מסוים עלולה לגרום להרס של המתקן, דליקתו והשלכות חמורות נוספות. נפרט כאן מספר סוגיות עיקריות בהתאם לסקירת הספרות הבינלאומית.

חיבור מערכות ה-PV לרשת החלוקה יכול במספר מקרים להוריד את העומס של הקו או השנאי ובכך להיטיב עם מערכת החלוקה באותו מקום. יחד עם זאת, במקרים אחרים, זרם ממערכת ה-PV עלול לגרום לעומס יתר של מרכיבים מסוימים, במיוחד במקרים של גרציה מקסימלית ועומס נמוך<sup>34</sup>. לפיכך, חשוב לבדוק בזמן התכנון את המיקום והגודל של מתקן ה-PV על מנת לא לעבור בכל המשטרים התפעוליים את היכולות הטרמיות של המתקנים, ללא תלות בכיוון זרימת האנרגיה. חשיבות זאת קיימת גם בזמן העברת העומסים מקו אחד לקו אחר לאחר ההפרעה או לצורך גמישותו התפעולית.

הפתרון המקובל יכול להיות גם העברת מתקנים ממתח נמוך למתח גבוה, אך רמת החדירה של מתקני ה-PV (Penetration limit) ברשת מתח גבוה היא הרבה יותר נמוכה מאשר ברשת מתח נמוך<sup>35</sup>. בגרמניה ואוסטרליה, ההספק המותקן של מערכות ה-PV ברשת החלוקה מהווה 80%-99% בהתאמה מסה"כ מתקני ה-PV, כאשר באירופה בממוצע הוא מהווה כ-9%<sup>36</sup>.

התקנה משמעותית של מערכות ה-PV במתח נמוך עלולה לגרום לזרימת אנרגיה הפוכה, ממתח נמוך למתח גבוה ובכך לגרום לבעיות בוויסות המתח כי הדבר יגרום לעליית מתח לא מבוקרת.

כפי שצוין קודם לכן, עליית המתח מתרחשת בתנאי גרציה מקסימלית ועומס נמוך אצל צרכני מתח נמוך. רמת המתח תהיה תלויה במספר מתקני ה-PV, בפיזורם, ברמת קרינת השמש ועוד. עומס נמוך בזמן ההפעלה המשמעותית של מתקני ה-PV עלול לגרום גם לבעיות בבקרת אנרגיה ריאקטיבית של המערכת. התקנת מערכות אגירת אנרגיה בקרבת מתקני ה-PV נותנת פתרון לוויסות המתח וויסות אנרגיה ריאקטיבית בתנאים של עומס נמוך וגרציה משמעותית.

חשוב לציין, שהתקנת מתקן PV אחד גדול (החל מ-400-500 קו"ט) עלולה לגרום לעליית המתח, בזמן שפיזור מתקנים קטנים בין הצרכנים לאורך קו החלוקה תאפשר הפעלת מערכות ה-PV ללא מתחי יתר<sup>37</sup>.

נסכם כי, בדומה לסוגיות הבטיחות ויציבות שפורטו בפרק הקודם, התקנה משמעותית (כ-90% מהעומס המקסימלי של הצרכנים) של מערכות ה-PV במערכת מתח נמוך לא תגרום לעליית המתחים ולהעמסה טרמית

<sup>34</sup> CIGRE, Capacity of Distribution Feeders for Hosting DER, Working Group C 6.24

<sup>35</sup> IEEE Access, September 19, 2017, PV Penetration Limits in Low Voltage Networks and Voltage Variations, Tariq

Aziz, Nipon Ketjoy

<sup>36</sup> IEEE Access, September 19, 2017, PV Penetration Limits in Low Voltage Networks and Voltage Variations, Tariq

Aziz, Nipon Ketjoy

<sup>37</sup> IEEE Access, September 19, 2017, PV Penetration Limits in Low Voltage Networks and Voltage Variations, Tariq

Aziz, Nipon Ketjoy



במקרה של תכנון נכון ופיזור אופטימלי של המתקנים (קרי, מספר רב של מתקנים קטנים המותקנים תוך שמירה הן על יחס תקין בין הספק ה-PV לבין הספק השנאי והן על מרחק קטן בין המתקן לבין השנאי)<sup>38</sup>. כמו כן, קיימים מיזמי חילוץ, אשר כוללים מחליפי דרגות בשנאים של מתח נמוך, וסתימת נמוך, וסתימת אלקטרוניים במתח גבוה, מערכות בקרה של מתח ואנרגיה ריאקטיבית. כל זאת על מנת לאפשר התקנה יותר נרחבת של מערכות ה-PV (בדומה לגרמניה) ברשת מתח נמוך<sup>39</sup>.

## ה. איכות החשמל והרמוניות ברשת

מערכות ה-PV וטורבינות רוח עלולות לגרום לתופעות של תנודות מתח (Flicker, Voltage fluctuations), הרמוניות והפרעות בהעברת ההתראות<sup>40</sup>. איכות החשמל מושפע על ידי מערכות ה-PV כתלות מקרינת השמש ושינויי המתח. שינויי המתח במתח גבוה עלולים לגרום להפעלה מיותרת של וסתימת המתח בתחנות המשנה.

על מנת להוריד את השפעת השינויים בקרינת השמש כתוצאה של עננים, נהוג להשתמש בבקרת המתח ואנרגיה ריאקטיבית בממירים של מערכות ה-PV. ההספק הריאקטיבי והאקטיבי המיוצר על ידי טורבינת רוח עלול להשפיע על המתח של רשת החלוקה ולגרום לקפיצות מתח בקווים המזינים את הצרכנים. עמידה בתקנים מתאימים (IEEE – 519) תפתור בעיה זו<sup>41</sup>. היות ובעיה זו לא קיימת בישראל אין חובה (או צורך) בעמידה בתקנים הללו. הרמוניות עלולות להופיע בגלל שימוש נרחב בממירים, אשר מחברים בין מערכות אנרגיה מתחדשת לבין רשת החלוקה.

שימוש במסננים תואמים במערכות אנרגיה מתחדשת אמור לגרום לסילוק בעיה זו. לעניין הפרעות בהעברת ההתראות, יש להתייחס לתגובות מתקני האנרגיה המתחדשת בשילוב עם בקרת אדווה (Ripple control signal)<sup>42</sup>. עם זאת, יש להדגיש כי על פי מיטב ידיעתנו בארץ לא נפוצים וגם לא צפויות בעיות של איכות החשמל והרמוניות ברשת כתוצאה של התקנת מערכות PV, לרבות בהספק הנדרש לייצור 40% מצריכת החשמל.

## ו. מתדולוגיה להתקנת מערכות PV במתח נמוך בתרחיש ההפחתה עד לשנת 2030

לפי תרחיש ההפחתה בשנת 2030 נדרש הספק כולל של כ-19000 – 23000 מגו"ט של המערכות המתחדשות, בעיקר מערכות PV. כפי שתואר לעיל, הבעיות המהותיות שחדירה זו לרשת החלוקה עלולות לייצר (סיכונים בטיחות עקב פגיעה במערכות ההגנה, יכולת העברה טרמית וויסות המתח) תיווצרנה רק אם יחס הספק ה-PV להספק ההשנאה עולה על היחס המרבי.

<sup>38</sup> IEEE Access, September 19, 2017, PV Penetration Limits in Low Voltage Networks and Voltage Variations, Tariq Aziz, Nipon Ketjoy

<sup>39</sup> ELSEVIER, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 53, (2016) Photovoltaic penetration issues and impacts

M. Karimia, H.Mokhlisab, K.Naidua, S.Uddinc, H.A.Bakarb in distribution network – a review,

CIGRE, Capacity of Distribution Feeders for Hosting DER, Working Group C 6.24<sup>40</sup>

CIGRE, Capacity of Distribution Feeders for Hosting DER, Working Group C 6.24<sup>41</sup>

CIGRE, Capacity of Distribution Feeders for Hosting DER, Working Group C 6.24<sup>42</sup>

לפי המחקר הבינלאומי<sup>43</sup>, מערכות PV תורמות לזרם הקצר (במחזור הראשון של הזרם הקצר) בשיעור של כ-120% מהזרם הנומינלי של הממירים. לפיכך, במקרה וההספק של מערכות ה-PV המותקנות בסביבת שנאי החלוקה יהיה שווה ל-80% מהספק השנאי – הדבר לא יגרום לפעולה לא סלקטיבית של מערכות ההגנה והנתיכים של השנאי. פיזור מיטבי של מערכות PV בקרבת השנאים יבטיח פעולה תקינה של המערכות גם בתחום העברה טרמית וויסות המתחים.

יודגש שהמרחק הממוצע של קווי מתח נמוך בסביבות השנאי הוא קצר יחסית – כ-0.741 ק"מ<sup>44</sup>, וניתן לרוב למקם את מערכות ה-PV בקרבה מסוימת מהשנאי ובפיזור אופטימלי.

בסוף שנת 2019 ברשת החלוקה הופעלו 51,203 שנאים בעלי הספק מותקן של 25,344 מו"א<sup>45</sup>. בשנים 2020-2025 חברת החשמל מתכננת להתקין 4,270 שנאים חדשים ולהחליף 3,501 שנאים ישנים<sup>46</sup>.

בהיעדר תוכנית פיתוח של מערכת החלוקה לשנת 2030, נניח (כהנחה שמרנית) שקצב הפיתוח של מערכת החלוקה עד שנת 2030 יהיה דומה לקצב הפיתוח בשנים 2001 – 2020:

2001 – 17,958 מו"א<sup>47</sup>

2010 – 21,988 מו"א<sup>48</sup>

2020 – 25,344 מו"א<sup>49</sup>

2030 – 31,000 מו"א

בנוסף למספר השנאים, גם ההספק הממוצע של כל שנאי החלוקה גדל עם השנים:

2001 – 457 קו"א<sup>50</sup>

2010 – 477 קו"א<sup>51</sup>

2020 – 495 קו"א

2030 – 515 קו"א

בהנחה שקצב הגידול של ההספק הממוצע של השנאים יהיה דומה לשנים 2001-2020, נקבל שבשנת 2030 יהיו מותקנים ברשת החלוקה הארצית סה"כ 60,194 שנאים בהספק כולל של 31,000 מו"א (ההספק הממוצע של השנאי יהיה 515 קו"א). הספק זה מאפשר חדירה של 24,800 מ"ו PV ללא פגיעה בתקינות תפקוד הרשת.

43 Investigation of Solar PV Inverters QUANTA, Western Protective Relay Conference (October 16-18, 2012)  
44 Current Contributions during Faults on Distribution and Transmission Systems Interruption Capacity, Farid Katiraei& others

44 חברת החשמל לישראל, דוח תקופתי לשנת 2019

45 חברת החשמל לישראל, דוח תקופתי לשנת 2019

46 חברת החשמל לישראל, דוח תקופתי לשנת 2019

47 חברת החשמל לישראל, דין וחשבון סטטיסטי לשנת 2010

48 חברת החשמל לישראל, דין וחשבון סטטיסטי לשנת 2010

49 חברת החשמל לישראל, דוח תקופתי לשנת 2019

50 חברת החשמל לישראל, דין וחשבון סטטיסטי לשנת 2010

51 חברת החשמל לישראל, דין וחשבון סטטיסטי לשנת 2010

שנאי מתח נמוך ממוצע מזין כ-100 דירות (צרכנים) ומתאים להתקנת PV בהספק של כ-410 קו"ט. בהנחה של 10 דירות למבנה, מדובר ב-10 מבנים נמוכים בגובה של כ-3 קומות, עם פוטנציאל ייצור מוערך של כ-45 קו"ט על גבי גגות וחזיתות המבנים. בהנחה של 20 דירות למבנה, מדובר ב-5 בנייני מגורים נמוכים של כ-5 – 6 קומות כל אחד, עם פוטנציאל ייצור המוערך ב-55-75 קו"ט על גבי גגות וחזיתות. בבנייה גבוהה יותר, כאשר ישנן כ-50 דירות למבנה, מדובר בשני מבנים רבי קומות (כ-12-14) בעלי פוטנציאל ייצור מוערך של 100-140 קו"ט על גבי גגות וחזיתות המבנים. כל זאת לעומת יכולת קליטה של השנאי העומד על כ-410 קו"ט, כאמור, יכולת גדולה משמעותית מפוטנציאל הייצור המוערך. על כן, גם ברמה המקומית, מוערך כי ברוב המקרים הספק ההשנאה יאפשר קליטה של כלל פוטנציאל הייצור ב-PV על גגות וחזיתות מבנים תוך אפשרות לקליטה משמעותית של ההספק המותקן בשטחים ציבוריים ובמתחמים סמוכים.

ניתן לחשב את ההספק המותקן האפשרי של מערכות PV בשנת 2030 לפי הפילוג המחוזי, שמקובל בחברת החשמל, בהנחה שגידול בכמות השנאים ובהספק הממוצע, לפי המחוזות, יהיה ללא שינוי לעומת השנים 2001 – 2020<sup>52</sup>:

טבלה 3: פוטנציאל ההספק המותקן של מערכות PV במתח נמוך בשנת 2030

מחוז	מספר שנאים	הספק שנאים מותקן (מ"א)	פוטנציאל הספק מערכות PV בהינתן 80% מהספק השנאים (מגו"ט)
מחוז חיפה	5,779	3,208	2,566
מחוז צפון	13,698	5,837	4,670
מחוז דן	8,208	5,582	4,466
מחוז דרום	26,279	13,012	10,410
מחוז ירושלים	6,230	3,361	2,688
סה"כ	60,194	31,000	24,800

**סיכום:** ניתן להתקין בשנת 2030 כ-24,800 מגו"ט מערכות PV במתח נמוך ולהבטיח את הפעולה הסלקטיבית של מערכות ההגנה והאוטומציה במקטע זה של רשת החלוקה, כולל ויסות המתח והעברה טרמית, ללא השקעות משמעותיות נוספות.

יצוין כי ככל שיידרש, הוספת שנאי היא חלק משגרת העבודה השוטפת של חברת החשמל וניתנת לביצוע תוך חצי שנה לכל היותר.

קרי, רשת החלוקה במתח נמוך יכולה לקלוט את כלל הספק ה-PV הנדרש ב-2030, קל וחומר את תוספת ההספק שתידרש מעבר למתקנים קיימים ומתוכננים (שחלקם הגדול אינם במתח נמוך).

<sup>52</sup> חברת החשמל לישראל, דוח תקופתי לשנת 2019, חברת החשמל לישראל, דין וחשבון סטטיסטי לשנת 2010

## ז. מתודולוגיה להתקנת מערכות PV במתח גבוה בתרחיש ההפחתה עד לשנת 2030

בפרק הקודם נמצא כי הספק ההשנאה ברשת החלוקה (מתח נמוך) מספיקה לקליטת כלל מערכות ה-PV שיידרשו בעשור הקרוב על מנת לעמוד ביעד של 40% ייצור חשמל מאנרגיה מתחדשת ב-2030. עם זאת, שנאי מתח נמוך מחוברים גם הם בקווי מתח גבוה לתחנות המשנה (תחמ"ש) המחברות בין רשת ההולכה לרשת החלוקה. בכדי להבטיח את התפקוד התקין של הרשת, סך ההספק הכולל של מתקני ה-PV המחברים במתח נמוך ובמתח גבוה אינו יכול לעלות על הרף המקסימלי ביחס להספק ההשנאה בתחנות המשנה, וזאת על מנת להבטיח את ויסות המתח התקין ולצמצם את תנודות ההספק הדינאמיות בעת תופעות המעבר. כיום, חברת החשמל מאפשרת התקנת מערכות PV במתח גבוה עד 60% מהספק השנאי המתאים<sup>53</sup>. **מגבלה זו היא שגורמת בפועל לסירוב חיבור מתקנים במתח נמוך ובמתח גבוה, שכן המתקנים שהוקמו ותוכננו עד כה מרוכזים באזורים מסוימים בארץ בהם מגבלת ההשנאה בתחמ"ש כבר מוצתה.**

זאת ועוד, במקרים בודדים של התקנת מערכות PV במתח גבוה בקרבת פסי צבירה של תחנות המשנה, זרם קצר עלול לעבור את היכולת של הציוד בתחנת המשנה. במקרה זה, יש לשנות את המיקום של מערכת ה-PV או להבטיח את העמידה בזרמי הקצר על ידי האוטומציה המתאימה במשטרים תפעוליים מסוכנים.

אוטומציה נוספת המומלצת להכנסה לתפעול היא אוטומציה למקרים של תנודות מתח או העברת הזנות מקו לקו לאחר הפרעות ברשת החלוקה. על כן, חברת החשמל מבצעת כיום תוכנית סדורה לשדרוג קווי מתח עליון, באופן שיאפשר להגדיל את יחס הספק ה-PV להספק ההשנאה מ-60% ל-80%. **יודגש כי תוכנית זאת נדרשת גם לשם עמידה ביעד של ייצור 30% מהחשמל באנרגיה מתחדשת בשנת 2030.**

בהתחשב בעובדה שהספק שנאי מתח גבוה בסוף שנת 2019 היה 22,260 מו"א<sup>54</sup>, בהנחה שתוספת הספק של שנאי מתח גבוה עד שנת 2030 יהיה דומה לתוספת הספק של שנאי מתח נמוך באותו פרק הזמן ויעמוד על כ-5,656 מו"א. לפיכך, נקבל שהספק מותקן של שנאי מתח גבוה ברשת הארצית בשנת 2030 יהיה כ-28,000 מו"א.

בהתחשב במקדם חדירה של 80% (לאחר ביצוע התוכנית לשדרוג קווי מתח עליון בשנים הקרובות) נקבל שההספק המותקן של מערכות PV במתח גבוה בשנת 2030 יכול להגיע ל- $0.8 \times 28,000 = 22,400$  מגו"ט מערכות PV.

**לסיכום, סך ההספק המותקן של מערכות PV במתח גבוה ומתח נמוך יכול להגיע בשנת 2030 ל-22,400 מגו"ט, כאשר לפי תרחיש ההפחתה בשנת 2030 יש צורך במתקני PV בהספק כולל של כ-19,000 – 23,000 מגו"ט.**

<sup>53</sup> IEEE Access, September 19, 2017, PV Penetration Limits in Low Voltage Networks and Voltage Variations, Tariq Aziz, Nipon Ketjoy  
<sup>54</sup> חברת החשמל לישראל, דוח תקופתי לשנת 2019

פוטנציאל התקנה מערכות PV – (מגו"ט)	הספק שנאים מותקן ב-2030 (מו"א)	מקטע רשת החלוקה
24,800	31,000	מתח נמוך
22,400	28,000	מתח גבוה
22,400	-	פוטנציאל חדירה אפקטיבי

בהתחשב בעובדה שחלק מהאנרגיה המתחדשת בכל זאת יותקן מחוץ למרחב המבונה במתח עליון (כבר כיום רישיונות ייצור קבועים ניתנו למערכות PV המחוברות לרשת ההולכה בהספק כולל של למעלה מ-400 מגו"ט), ניתן להסיק שיש ישימות גבוהה בהתקנת מערכות PV בכמות הנדרשת ברשת החלוקה, עם ההתאמות המתאימות כפי שהוצג לעיל.

## ח. מערכות אגירת אנרגיה, כולל מצברים ברכבים, בשילוב עם מתקני ה-PV ברשת החלוקה

כעת נתייחס בקצרה להתקנת מערכות אגירת אנרגיה מבוזרות בקרבת מתקני ה-PV. כזכור, רשת החלוקה "האקטיבית", מוגדרת כשילוב של גנרציה מבוזרת, עומסים ומתקני אגירה. כפי שיוצג בפרק הבא, המודל הטכנו-כלכלי שהופעל במסגרת עבודה זו מצא כי עד שנת 2030 יש צורך בהתקנה נרחבת של מערכות אגירה בהספק כולל של כ-5,000-6,000 מגו"ט.

אגירת אנרגיה מאפשרת הכנסה הרבה יותר אינטנסיבית של מתקני אנרגיה מתחדשת, משפרת את עקום העומס ומאפשרת תפעול הרשת בהתאם לקריטריונים שנקבעו מראש. בפרט, אגירת החשמל המיוצר במתקני PV בשעות שבהן המערכות מייצרות בהספק מלא, והזרמתו לרשת בשעות שבהן מערכות אלו אינן מייצרות בהספק מלא, מפחיתה את ההספק המרבי האפקטיבי שמוזרם לרשת על מערכות ה-PV המחוברות לכל שנאי ובכך עשויה להגדיל משמעותית את הספק המערכות הניתן להתקנה ביחס לכל שנאי.

בכך, התקנת מערכות אגירה ביחד עם מתקני ה-PV במתח נמוך, תפתור את בעיות ויסות המתח והזרימה ההפוכה במתח נמוך. שימוש בקריטריונים תכנוניים מראש, כאשר מנצלים את מערכות האגירה, כולל שימוש במצברים של רכבים חשמליים, יאפשר התקנה של מתקני PV ברשת החלוקה מעבר לפוטנציאל שמוצג בדו"ח זה<sup>55</sup>.

## ט. הגנות סייבר ברשת החלוקה

הכנסה ניכרת של אנרגיה מתחדשת ברשת החלוקה תגדיל באופן משמעותי את כמות המתקנים שיש להגן עליהם מפני תקיפות סייבר. בנוסף, למען הגנת המתקן עצמו, יהיה צורך בהגנת התקשורת ומערכת הבקרה. במילים אחרות, יש להעלות את רמת ההגנה של הרשת לזו הנהוגה כיום ברשת ההולכה במתח על ועליון. לפיכך,

<sup>55</sup> SIEMENS Power Technologies, Siemens AG 2017, Distribution Grid Planning

יש להגדיר מחדש את הפילוסופיה ואת הכלים הנחוצים להגנת סייבר של רשת החלוקה, בדומה לעבודה טכנו-כלכלית, שהומלצה לביצוע בתחום מערכות ההגנה והאוטומציה של רשת החלוקה.

לדעתנו, בכל מקרה יש צורך בשיפור הגנת סייבר של רשת החלוקה. פעולות אלו נעשות על ידי חברת החשמל באופן שוטף, ולפיכך יש להמשיך ולתכנן את תוספת העלות הזאת במסגרת תקציב הסייבר הכלל ארצי של חברת החשמל. הגדלת ייצור החשמל ממקורות PV ברשת החלוקה הנבחנת בעבודה זו לא צפויה להגדיל את התקציב הנדרש לכך.

## י. שוק החשמל העתידי בתנאים של מערכת החלוקה "האקטיבית"

בספרות המקצועית<sup>56</sup> קיימים מספר מודלים להפעלת שוק החשמל העתידי:

- **GREEN COMMAND AND CONTROL** - בשוק זה המדינה שולטת בנכסים של מגזר החשמל וקובעת את היעדים להכנסה לתפעול של מערכות דיגיטליות לניהול הרשת והתקנת מערכות של אנרגיה מתחדשת. מתאים למדינות כמו סין, דרום אמריקה, מזרח התיכון, נורבגיה (בגלל השליטה של אנרגית מים).

- **ULTRA DISTRIBUTED GENERATION** - בשוק זה ההשקעה העיקרית נמצאת ברשת החלוקה וגנרציה מבוזרת, והיא מבוססת על מדיניות הרגולציה ועל תמריצים כלכליים. מתאים למדינות של אירופה, גרמניה במיוחד, קליפורניה ואוסטרליה.

- **LOCAL ENERGY SYSTEMS** - בשוק זה קיימת חלוקה של מערכת ההולכה והחלוקה לאזורים אשר שולטים באספקת האנרגיה שלהם על בסיס אנרגיה מבוזרת, מערכות אגירה ורגולציה מתאימה. בשוק זה יורדת ההשפעה של תחנות הכוח הגדולות המחוברות לרשת ההולכה המרכזית. מתאים למדינות המתפתחות, אפריקה ואסיה.

- **REGIONAL SUPERGRID** - שוק זה מיועד להעברת אנרגיה מתחדשת למרחקים גדולים ודורש התקנת מערכות מתחדשות. בהספקים גדולים במתח על ועליון, אגירה משמעותית ומערכת הולכה בעלת יכולת העברה של הספקים גדולים. מתאים למדינות של ארה"ב, אירופה ובעתיד - לאזורים של מזרח התיכון ואפריקה.

במציאות, מדינות מפותחות מאמצות מדיניות שמשלבת בין המאפיינים השונים של השווקים לצורך אופטימיזציה של השקעות במערכת החשמל ובו בזמן הבטחת בטיחות ואמינות אספקת האנרגיה. תרחיש ההפחתה מתאים יותר למודל של ULTRA DISTRIBUTED GENERATION בשילוב עם מספר מאפיינים של מודל GREEN COMMAND AND CONTROL. יחד עם זאת, ברור שכל מדינה צריכה לפתח את השוק האופטימלי שלה, כולל יעדים ותקופות מעבר בין השווקים השונים.

מומלץ שתבצע עבודה נפרדת לבחירת השוק האופטימלי בישראל ותשלב את החידושים הטכנולוגיים הקיימים בתחום האנרגיה המבוזרת.

<sup>56</sup> PWC, PwC Global Power & Utilities, (2014) The Road Ahead, Gaining momentum from energy transformation

## יא. סיכום והמלצות

קיימת ישימות לעמוד ביעדים של תרחיש ההפחתה בשנת 2030 ברשת החלוקה, כאשר ניתן להתקין בשנת 2030 לפחות 22,400 מגו"ט מערכות PV במתח נמוך ולהבטיח את הפעולה הסלקטיבית של מערכות ההגנה והאוטומציה ברשת החלוקה, כולל ויסות המתח והעברה טרמית, ללא השקעות תוספתיות משמעותיות. ניתן אף להתקין יותר בתוספת אגירה ובשינוי הקריטריונים בין היחס בין הספק הסולארי להספק השנאי.

זאת לעומת מתקני PV בהספק כולל של 18,700 – 22,900 מגו"ט הנדרשים לעמידה ביעד של 40% אנרגיה מתחדשת ב-2030 ברשת החלוקה וההולכה.

יכולת ניצול מלוא פוטנציאל זה כרוכה ביישום מוצלח של התוכנית של חברת החשמל לשדרוג קווי הולכה אשר תגדיל את היקף ה-PV שניתן להתקין ברשת החלוקה כמו גם פיזור רחב של המתקנים באזורים שונים במדינה על מנת להימנע מעומסי יתר בתחנות משנה פרטניות.

כמו כן, התקנת האגירה הנדרשת לשם הבטחת הגמישות הנדרשת במערך הייצור, אשר היקפה מוערך על פי המודל הטכנו-כלכלי שיוצג בפרק הבא בהספק כולל של 5,000-6,000 מגו"ט במתח נמוך ובמתח גבוה, וניהולה באופן שיקל על העומסים ברשת, תגדיל משמעותית את פוטנציאל ההתקנה ברשת החלוקה, ובפרט, תאפשר התקנה נוספת באזורים בהם כבר היום מתקני PV מתוכננים אינם מקבלים אישורי חיבור לרשת.

בנוסף, נציין כי התקנת מערכות גנרציה מתחדשת בקרבת צרכנים במתח גבוה ונמוך, תקטין משמעותית את איבודי האנרגיה בעת העברתה ברשת ההולכה והחלוקה. על פי דו"ח מצב משק החשמל (2019) שיעור האיבודים לתחנות כוח המחוברות לרשת ההולכה עומד על 6% מהחשמל, בעוד ששיעור האיבודים למתקנים המחוברים לרשת החלוקה עומד על 1% בלבד – חיסכון של כ-5% בייצור החשמל הנדרש. היקף האיבודים במתקנים המותקנים בסמיכות לצריכה (על גגות מבנים לדוגמה) נמוך עוד יותר ומוערך בכ-0%.

על כן, מומלץ:

- ליישם את התוכנית של חברת החשמל לשדרוג קווי ההולכה באופן שיאפשר להגדיל את יכולת ההתקנה של PV ברשת החלוקה.
- להסיר חסמים בפני התקנת מערכות PV בשטחים מבונים נוספים באופן שירחיב את פריסת ההתקנה לאזורים נוספים בארץ (ראו פרק "הסרת חסמים בפני הטמעת מערכות סולאריות במרחב המבונה").
- להתקין מערכות אגירה במתח נמוך ומתח גבוה ולנהלם באופן שיקל על העומס בתחנות משנה שכבר כיום הגיעו לסף הקיבולת שלהן להתקנת PV ברשת החלוקה.
- להכין דרישות טכניות למערכת החלוקה האקטיבית (GRID CODE). דרישות אלו יכללו בין היתר דרישות מפורטות בנוגע להספק המקסימלי של מערכות PV ביחס להספק שנאי מתח גבוה ומתח נמוך. זאת, בשיתוף פעולה בין חברת החשמל, הרגולטורים וגופים הנדסיים פרטים.
- בהקמת שכונות ויישובים חדשים, לתכנן מראש את רשת החלוקה החדשה במתח גבוה ומתח נמוך באופן המתחשב לא רק בצריכה הצפויה אלא כרשת אקטיבית בה מותקנות, בנוסף לצרכנים, מערכות רבות של ייצור אנרגיה ואגירתה.



- לתכנן את רשת החלוקה בטווחים ארוכים של 10 שנים לפחות ולעדכן את התכנון כל 5 שנים תוך בחינת ההתפתחויות הטכנולוגיות החדשות.
- לבצע את הבחינות הנוספות הבאות:
  - בחינה טכנית וכלכלית של מבנה שוק החשמל העתידי האופטימלי לישראל.
  - עבודה טכנו-כלכלית בתחום התאמת מערכות הגנה חשמלית והגנת סייבר לרשת החלוקה האקטיבית.

## יב. צרכי הרשת לשם ניהול מערכות ה-PV והאגירה כחלק מניהול מערך הייצור

בעוד שעמידה ביעד של 40% אנרגיה מתחדשת תוך הישענות בעיקר על מערכות PV מבזורות המחברות לרשת החלוקה נמצאה כשיימה טכנית, ללא השקעות תשתית משמעותיות תוספתיות. מבחינת צרכי מערכת החלוקה, לא ניתן לנהל את המערכת הארצית בתנאים שרוב מערכות ה-PV המותקנות במתח נמוך ומתח גבוה יהיו ללא הטמעת כלים לשליטה ובקרה על מערכות אלו.

הדבר מחייב את הפיכתה של רשת החלוקה הישראלית ל"רשת חכמה" (Smart Grid). היעוד של רשת חכמה הוא להחיל טכנולוגיות דיגיטליות על מערכת החשמל ולספק תיאום מידע בזמן אמת מיחידות ייצור, משאבי ביקוש ומשאבי אנרגיה מבזורים (DER).

### רשת חכמה – יכולות וצרכים טכנולוגיים

סעיף XIII בחוק העצמאות והביטחון של משק האנרגיה של ארה"ב קובע ש"המדיניות של ארצות הברית היא לתמוך במודרניזציה של מערכת הולכה וחלוקה לאומית לשמירה על תשתית חשמל אמינה ובטוחה שיכולה לעמוד בצמיחת הביקוש העתידית, ולהשיג כל אחד מהדברים הבאים, המאפיינים יחד רשת חכמה:

1. שימוש מוגבר במידע דיגיטלי ובטכנולוגיות בקרה לשיפור האמינות, הביטחון והיעילות של רשת החשמל;
2. אופטימיזציה דינאמית של תפקוד המערכת ומקורות אנרגיה, תוך אבטחת סייבר מלאה;
3. פריסה ושילוב של מקורות אנרגיה ואמצעי ייצור מבזורים, כולל מקורות אנרגיה מתחדשים;
4. פיתוח ושילוב של יכולת תגובת הביקוש, ניהול צד הביקוש והתייעלות אנרגטית;
5. פריסת טכנולוגיות "חכמות" (טכנולוגיות אינטראקטיביות אוטומטיות בזמן אמת המייעלות את פעולתן הפיזית של מכשירים והתקני צריכה), למדידה ולתקשורת הקשורים לתפעול מצב הרשת ולאוטומציה של מערכת החלוקה;
6. שילוב מכשירים "חכמים" ומכשירי צריכה;
7. פריסה ושילוב של טכנולוגיות אגירת אנרגיה מתקדמות, כולל רכבים חשמליים והיברידיים, כמו גם מערכות מיזוג אוויר עם אגירת חום;
8. אספקת מידע לצרכנים בזמן הנכון, כולל אפשרויות בקרה;
9. פיתוח תקנים לתקשורת והפעלה הדדית של מכשירים וציוד המחברים לרשת החשמל, כולל התשתית המשרתת את הרשת;
10. זיהוי וצמצום חסמים בלתי סבירים או מיותרים ליישום טכנולוגיות, פרקטיקות ושירותים של רשתות חכמות.



כפי שניתן לראות, התפיסה של רשת חכמה רחבה בהרבה מעצם יצירת שליטה ובקרה על מערכות ייצור ואגירה מבוזרות, ומהווה נדבך מרכזי מהפיכת משק החשמל ממשק חד-כיווני בו הייצור עוקב אחר הביקוש למשק דו-כיווני בו הביקוש, באמצעות צעדי התייעלות וגמישות, יכול לעקוב אף הוא אחר הייצור (להרחבה בנושא ניהול צד הביקוש, ראו נספח ד'). בכך, רשת חכמה מאפשרת לספק גמישות למערכת ושירותים נלווים באמצעות שליטה בו זמנית במערכות הייצור ובמערכות הצריכה ובפרט בשירותים הנלווים (Ancillary Services) העיקריים הבאים:

- הזזה בזמן אמת של עומסים (לרבות בסקטור המסחרי ותעשייתי) לצורך אספקת שירותי ניהול הביקוש למנהל המערכת בהתאם לצרכי המערכות והמחירים בשוק הסיטונאי.
- השתתפות באספקת חלון מעלה (Headroom) או חלון מטה (Footroom) להפעלת המערכת המיועדים, כפי שהוסבר קודם לכן.
- לאפשר למנהל המערכת להתמודד עם סטיות מתחזית העומס והייצור. שירות זה, אם נלקח בחשבון בעת תכנון הקצאת יחידות הייצור לתפעול (Unit Commitment), יכול לאפשר למנהל המערכת להפחית את חלקו של הייצור הקונבנציונלי בשעות של קרינת שמש מרבית, וכתוצאה מכך, להפחית את קיטום האנרגיה הסולארית.
- השתתפות בהתמודדות עם העלייה המהירה בעומס השיורי בשעות השקיעה באמצעות היכולת להפחית את הצריכה.
- אספקת חשמל לרשת על פי צרכי המערכת, אם באמצעות העברת מתקני אגירה למצב הייצור ואם באמצעות העלאת ההספק ביחידות הקונבנציונאליות הקיימות שהיא מייצגת. זה צפוי להיות אחד השירותים החשובים ביותר לניהול המערכת בעידן הייצור הסולארי בקנה מידה גדול.
- תרומה ליכולתה של המערכת לעקוב אחר העומס (Load Following) כאשר מתרחשות תנודות משמעותיות בייצור סולארי או רוח.
- הגברת הגמישות התפעולית ברמת מפעיל מערכת החלוקה, בתנאי כמובן שיש שוק מקומי או אזורי למתן שירות זה.
- משאבי אנרגיה המרכיבים את המערכת (סוללות, אמצעי ייצור מבוזרים ובמידה מסוימת גם תגובת הביקוש) מאפשרים החלפת תחנה "פיקרית" בשעות עומס גבוה. בכך, גם להוריד את המחיר השולי בשוק הסיטונאי ולהקטין את הדרישות להשקעות בכושר ייצור חדש במערכת.
- שירותי ניהול הביקוש והייצור המבוזר יכולים לצמצם את היקף ההשקעות הנדרשות במערכת החלוקה (ואף במערכת ההולכה) בעידן הייצור המבוזר ובמיוחד בעידן הייצור הסולארי רחב ההיקף.

זאת, באמצעות התקנה נרחבת של חומרה (מנייה חכמה, בקר, תשתית תקשורת) ותוכנה, תוך הכנסת מערכות תקשורת, הגנה ואוטומציה לרשת החלוקה בדומה למערכות השלת עומס בתדר ומתח וויסות מתח ותדר המערכתי, ובפרט:

- הטמעת חומרה מתאימה לצורך ניהול מרחוק של משאבי המערכת השונים:
  - משאבי ייצור / אגירת אנרגיה מבוזרים יצוידו במערכות המאפשרות את ניהולם באופן אוטומטי, לרבות התקנת בקר עם יכולות תקשורת על כל מערכת PV / אגירה.
  - משאבי צריכה יצוידו במונים חכמים.

- הטמעת תוכנה מתאימה לצורך ניהול המערכות.
  - תוכנה המאפשרת לזהות, באופן שוטף, את המצב של כל אחד ממשאבי האנרגיה המבוזרים, לבצע סימולציה של פעולתו לאורך פרק הזמן הנדרש ולבצע אופטימיזציה של פעולתם.
- תוכנה המבוססת מודלים אנליטיים לחיזוי משאבי הצריכה והייצור, לרבות התייחסות לתחזיות מזג האוויר ומחירי חשמל בשווקים סיטונאיים, לצורך אופטימיזציה של הפעולה המשותפת של משאבי אנרגיה מבוזרים.
- תקיים ניהול שוטף של פרוטוקול תקשורת לתאום בין מנהל המערכת, מפעילי הרשת (במיוחד רשת החלוקה) וצרכני הקצה.

## שימוש במצברים של רכבים חשמליים

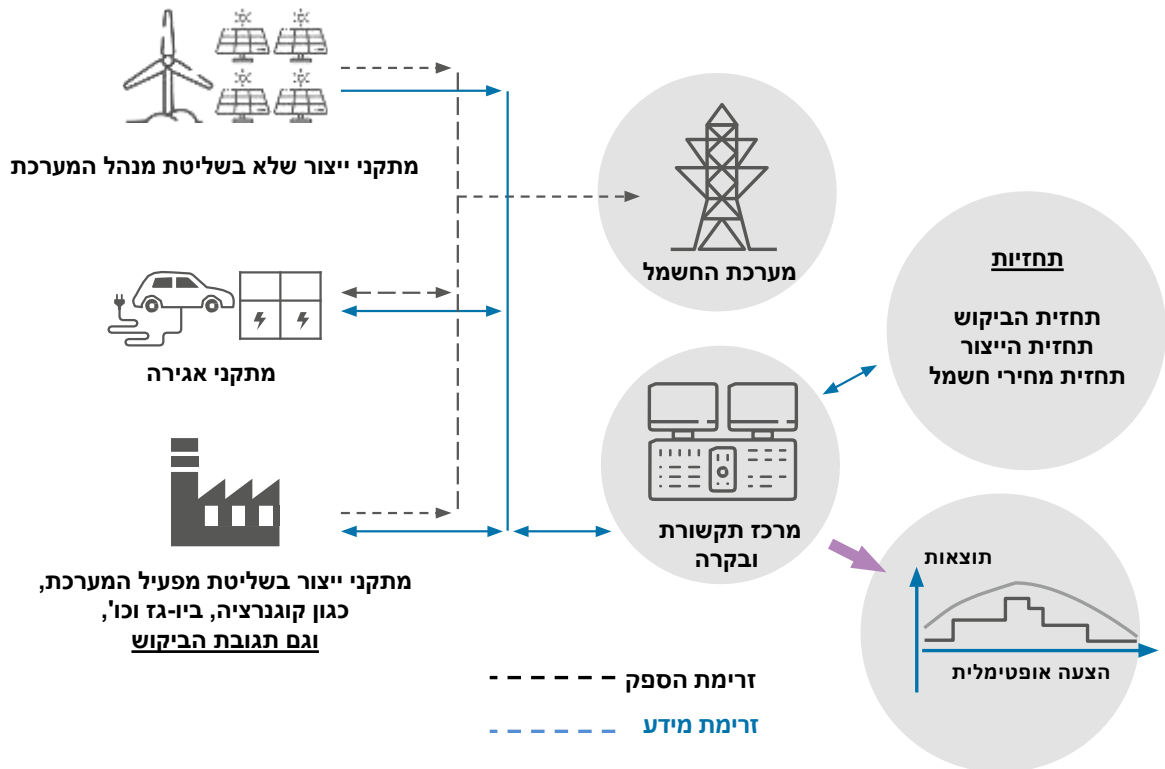
יודגש ששימוש במצברים של רכבים לאגירת אנרגיה וניצולה ברשת החשמל, דורש שימוש בתוכנות מיוחדות לניהול התהליך ותאום רגולטורי בין משרדי אנרגיה ותחבורה. לשם כך, מומלץ להתקין בעמדות הטעינה של רכבים חשמליים, לרבות במשקי בית, מונים חכמים המסוגלים לתת פקודת טעינה או פקודת פריקה לסוללות של הרכב החשמלי. זאת, בצירוף הגדרת מינימום טעינה נדרשת וקביעת מנגנון קנס/פרס, תאפשר ניהול מרכזי של חלק מהספק הסוללות הרכבים בהתאם לצרכי המערכת. לשם ההמחשה: בעל רכב יוכל להגדיר מינימום טעינה נדרשת (ולשנות אותו בהתאם לצרכיו), כאשר יתרת הסוללה תנוצל – לטעינה או לפריקה – בהתאם לצרכי המערכת. ככל שבעל הרכב יעמיד הספק סוללה גדול יותר לרשות הניהול המרכזי, כך יתוגמל יותר.

## תחנות כוח וירטואליות

ניהול ישיר ופרטני של כל צרכן, או מתקן ייצור מבוזרים, או צרכן בעל כושר ייצור (Prosumers), היא משימה בלתי אפשרית. חלק מהרכיבים הנדרשים – ובפרט רכיבי התוכנה המאפשרות ניהול אופטימלי של המערכת כמערכת – לא יוטמעו (בהגדרה) ברמת הרכיב הבודד. מה גם שהניסיון בעולם מראה כי לא די בהכנת תשתיות המאפשרות תקשורת דו כיוונית בין ניהול המערכת לצרכנים, כדי לעודד אותם להשתתף בשוק של שירותים נלווים. עבור שחקן בודד זהו תהליך מורכב עם סיכונים משמעותיים. שחקן בודד עשוי להיות מסוגל לספק שירות (או מערך שירותים) למערכת, אך יתכן שלא יהיה לו את המידע הדרוש לשם כך. לדוגמא, לעיתים קרובות, לצרכנים חסר מידע לגבי מתי עשויים להופיע שיאים מערכתיים, מהם המחירים עבור השירותים השונים שהם צורכים, אילו טכנולוגיות במחירים סבירים יכולות לעזור להם לשלוט בצריכה שלהם, מהם המחירים עבור טכנולוגיות אלה וכו'.

בחלק מהשווקים התחרותיים, מתאפשר מצב בו גורמי ביניים, "אגרגטורים" (Aggregators) מאגדים את הצרכנים והמתקנים ומייצגים אותם, כישות אחת, במתן שירותים נלווים בשוק החשמל. צרכנים ויצרנים אלה נהנים מהיתרון לגודל הנוצר על ידי הייצוג המשותף שלהם ומכיוון שרוב סיכוני השוק נופלים על האגרגטור עצמו. להבדיל משחקן בודד, אגרגטור יכול לקבל גישה ולהעביר לא רק מידע על מחירי שוק בזמן אמת עבור השחקנים הקטנים שהוא מייצג, אלא גם אותות מחירים לשירותים רבים, כגון עתודות תפעול או בקרת מתח.

תרשים 24 מציג סקירה כללית של האופן שבו אגרגטור מפעיל את משאבי האנרגיה המבוזרים.



לפיכך, באופן כללי, אגרגטור מפעיל תחנת כוח וירטואלית (Virtual Power Plant), שהיא אוסף של משאבי אנרגיה מבוזרים, במטרה לאפשר למקורות אנרגיה קטנים אלה לספק שירותים למערכת ובעיקר שירותים נלווים (Ancillary Services), לצורך ניהול המערכת.

מפעילי התחנה הווירטואלית משלבים את כל המשאבים לעיל בכדי לספק לתחנה את התכונות הרגילות של תחנה קונבנציונאלית, כמו עומס מינימלי ומקסימלי, קצב העלייה או הירידה המרבי בעומס, שיעור התגובה לשינויי תדר במערכת וכו'. כל זאת בכדי לאפשר את השתתפותה בשוק החשמל, ובמיוחד בשוק השירותים הנלווים, יחד עם תחנות אחרות.

היות שמטרת האגרגציה היא יצירת תחנה וירטואלית המדמה תחנה קונבנציונלית, מומלץ כי מערכות PV ומערכות אגירה במתח גבוה ונמוך ינוהלו כ"תחנות כוח וירטואליות" בהספק כולל של כ-50-100 מגו"ט - בדומה להספק של טורבינות גז.

מנקודת מבט מסחרית, השתתפות אפקטיבית של צד הביקוש ומקורות אנרגיה מבוזרים במתן שירותים נלווים תלויה בקידום פעולות רגולטוריות מתאימות, כגון:

- הקמת שוק שירותים נלווים (Ancillary Services Market);
- קביעת תקנות המאפשרות לצד הביקוש או למקורות אנרגיה מבוזרים לספק שירותים למנהל המערכת או למפעילי מערכת החלוקה;
- תחנות וירטואליות (אגרגטורים) יורשו להשתתף בשוק החשמל הסיטונאי ולמכור שירותים נלווים;
- יצירת שווקים מקומיים ברמה של מערכת החלוקה לרכישת שירותים נלווים במטרה למנוע מצבי גודש וסיכונים ליציבות המערכת;
- הגדרת מתודולוגיה לחישוב מחירים דינמיים שניתן לאמץ בשוק הקמעונאי.

מפעיל תחנת כוח וירטואלית (או "אגרגטור") יכול להיות גוף מסחרי עצמאי<sup>57</sup> הפועל כמתווך בין המפקח האזורי והארצי לבין הרכיבים והצרכנים הבודדים, אך האגרגטור יכול להיות המפקח האזורי ו/או הארצי בעצמו, המנהל באופן אגרגטיבי ובאמצעות אוטומציה, רכיבים מבוזרים שונים שמחוברים אליו.

בעידן של ייצור סולארי רחב היקף, הגופים הטכניים הזקוקים ביותר לגמישות דינאמית של המערכת הם מנהל המערכות ומפעילי מערכת החלוקה. הם יהיו אלה שיכולים להעריך את הערך המוסף של הכללת תגובת הביקוש וייצור מבוזר במתן שירותים נלווים. אין ספק שגופים גדולים ואובייקטיביים אלו יכולים להקים ולהפעיל את מערכות התקשורת, הבקרה והתוכנה הנדרשות לניהול צד הביקוש והייצור המבוזר כדי לשפר את גמישות המערכת. יתר על כן, במקרה זה היתרון לגודל היה בולט יותר וככל הנראה ניצול המשאבים יכול היה להיות יעיל ובטוח יותר עבור המערכת. עם זאת, בספרות ניתן למצוא דיונים שונים בנושא זה ובחלק משוקי החשמל התחרותיים מעדיפים לקדם כללי רגולציה שיאפשרו לאגרגטורים מסחריים עצמאיים לבצע תפקיד זה בשיתוף עם מפעילי המערכת. איש אינו מטיל ספק במציאות הכלכלית של יתרונות הגודל. השאלה היא האם גורם זה יכתיב כי האגרגציה תמשיך עד לנקודה שיש רק אגרגטור אחד, כגון מנהל המערכת או מפעילי מערכת החלוקה, או אם יעיל יותר לקיים רמות ביניים של אגרגציה. תומכי רמות הביניים מדגישים את היתרון של קיום שוק תחרותי בין אגרגטורים, שיהיה יעיל יותר בהרחבת מעגל הצרכנים או היצרנים המבוזרים המשתתפים בשירותי ניהול הביקוש ו/או מוכנים להשקיע בהקמת מתקני ייצור, אגירה וכו', מה שעשוי להגביר את גמישות מערכת החשמל, להפחית את היכולת של יצרני חשמל להפעיל כוח שוק ולהביא חיסכון למשק החשמל.

למרות המחלוקות המאפיינות את הדיונים בנושא זה בחוגים מקצועיים, דבר אחד אינו מוטל בספק: בתנאים הישראליים, גם אם כללי הרגולציה יאפשרו קיום רמות ביניים של אגרגציה על ידי גופים מסחריים עצמאיים, יש צורך בשיתוף פעולה הדוק מאוד בין אגרגטורים למפעילי המערכת. בראש ובראשונה, תוכנית הפעולה של האגרגטור מצריכה תיאום מראש עם מפעילי מערכת החלוקה, גם אם מדובר במתן שירותים נלווים התומכים בניהול מערך הייצור הארצי. תחזיות הצריכה והייצור המבוזר בבעלות האגרגטור צריכות להיות גם שקופות למפעילי מערכות החלוקה. כדי להמחיש את הצורך בכך, ניקח לדוגמה את המקרה כאשר בנקודת זמן מסוימת, למשל בשקיעה, נוצר צורך דחוף לשירותי מעקב אחר העלייה בעומס השירוי, ומוגדר מחיר אטרקטיבי עבור האגרגטור למתן שירות זה. לאגרגטור יש יכולת להפסיק חלק מהביקוש, להעביר למצב הייצור את הסוללות, שהיו לפני כן במצב טעינה באמצעות אנרגיה סולארית, ולהקצות חלק מההספק של המתקן הסולארי לרשת, כל זאת על מנת לספק את ההספק הנדרש למעקב אחר העומס במערכת הארצית. התרומה של זה למערכת הייצור עשויה להיות גדולה, אך פעולה זו של האגרגטור עשויה לסכן את המצב ברמה המקומית או האזורית במערכת החלוקה, ולכן יש לתאם אותה מראש עם מפעילי מערכת החלוקה. דוגמה זו אמנם די קיצונית, אך היא מדגישה את הצורך בתיאום הדוק בין מנהל המערכת, מפעילי מערכת החלוקה והאגרגטור כשמדובר בהשתתפותו במתן שירותים נלווים.

<sup>57</sup> בעיקרון ספקים (חברות אספקה - Suppliers) הם גם אגרגטורים. עם זאת, האינטרסים של אגרגטורים עצמאיים, קטנים יחסית, יכולים להיות שונים מאינטרסים של ספקים: הראשונים מוכרים גמישות ואילו האחרונים מוכרים חשמל. הראשונים, המוכרים גמישות, יכולים למזער את היכולת להפעיל כוח שוק על ידי חברות ייצור, ואילו ספקים, שיכולים להיות קשורים מבחינה מסחרית ליצרנים גדולים, לא בהכרח ירצו בכך. האגרגטורים המספקים גמישות עשויים, למשל, לקדם הקמת מתקני אגירה בשילוב עם מתקנים סולאריים מבוזרים, ואילו לספקים הקשורים ליצרנים קונבציונאליים עשויים להיות אינטרסים שונים בנושא זה.

## סיכום והמלצות

במעבר למשק החשמל שיתבסס על ייצור סולארי בהיקף נרחב, חלק משמעותי מהייצור המבוזר (בעיקר ייצור סולארי ומתקני אגירה קטנים) יחובר לרשת מתח נמוך בצמוד למוקדי הצריכה. כתוצאה, הצרכנות, שעד כה היוותה חלק פסיבי של מערכת החשמל, צפויה להפוך לגורם אקטיבי אשר, בנוכחות תשתיות מתאימות, גם כן יכול להשתתף במתן שירותי ניהול מערכת החשמל.

למרות המורכבות הטכנית והמסחרית הגלומה במעורבות של צד הביקוש והייצור המבוזר בשוק השירותים הנלווים, היתרונות למערכת החשמל צפויים להיות גדולים.

בנוסף ליתרונות הדינמיים שהוזכרו לעיל, אין להתעלם מהיתרונות למערכת שיכולים לבוא מתגובת צד הביקוש ומתקני האגירה המבוזרים במהלך ייצור סולארי מרבי. כפי שהוסבר קודם לכן והוצג בתרשים 15 ובתרשים 17 - עם עליית הייצור הסולארי בשעות הבוקר יהיה צורך להפסיק חלק ניכר מיחידות הייצור הקונבנציונליות ולהפעילן מחדש עם השקיעה. הדבר מלווה בעלויות התנעה גבוהות ובשחיקת היחידות. במצב זה יתכן כי חלק מהיצרנים יעדיפו להגיש הצעת מחיר נמוכה מאוד ואף שלילית על מנת להישאר בפעולה בעומס מינימלי וכך להימנע מהעלויות הטמונות בהפסקה ובהתנעה מחדש. במערכות חשמל גדולות ומקושרות לעיתים ניתן למכור חשמל, במחיר שלילי, למערכות השכנות. כרגע, אין אפשרות כזו במערכת החשמל של ישראל. לכן, מצב זה יכול ליצור הזדמנויות רווח ייחודיות עבור צד הביקוש ומתקני אגירה מבוזרים, שיכולים להעלות את הצריכה בשעות אלה ולהוריד אותה בשעות של עומס גבוה. כתוצאה מכך, גם עלויות המערכת הכוללות יופחתו, ניהול המערכת יופשט ויושג מצב win-win.

לפיכך, ניתן להסיק כי במערכת עם עומק חדירה משמעותי של ייצור סולארי, אשר חלק ניכר ממנו יחובר לרשת מתח נמוך, חשוב מאוד להבטיח השתתפות של צד הביקוש ושל מתקני ייצור מבוזרים (ובעיקר מתקני אגירה) במתן שירותים נלווים (Ancillary Services). הדבר עשוי לתרום רבות לשיפור גמישות המערכת ולהפחית את הוצאותיה.

### קידום הנושא מחייב השקעות תשתית:

- השקעה במערכת DMS עבור רשת החלוקה לרבות מחשוב, תקשורת, בקרה ושליטה של הפיקוח האזורי וארצי. מומלץ כי כלל מערכות ה-PV והאגירה ברשת החלוקה יחוברו למערכת זו, וזאת בכדי לאפשר ניהול מרכזי של המערכות המבוזרות בחבילות של כ-50 עד 100 מגו"ט.
- הגדרת תנאים טכניים לעמדות הטעינה ומערכות המנייה עבור רכבים חשמליים כך שתתאפשר טעינה מנוהלת ובכלל זה פריקת אנרגיה לטובת הרשת (V2G).

### במקביל, נדרש לקדם גם את הצד המסחרי:

- לקבוע תקנות ואמות מידה המאפשרות לצד הביקוש או למקורות אנרגיה מבוזרים לספק שירותים למנהל המערכת או למפעילי מערכת החלוקה;
- לפרסם אסדרה שקובעת את המסגרת הרגולטורית להפעלת "תחנות וירטואליות" לרבות השתתפותן בשוק החשמל הסיטונאי ואספקת שירותים נלווים;
- ליצור שווקים מקומיים ברמה של מערכת החלוקה לרכישת שירותים נלווים במטרה למנוע מצבי גודש וסיכונים ליציבות המערכת;
- להגדיר מתודולוגיה לחישוב מחירים דינמיים שניתן לאמץ בשוק הקמעונאי.

- להקים ועדה טכנו-כלכלית לצורך אופטימיזציה של אגירת אנרגיה ברכבים חשמליים וניצולה ברשת החשמל הארצית.

# מודל טכנו-כלכלי לבחינת משק החשמל בתרחישים עתידיים

## עיקרי הפרק

### מטרות הפרק:

- בחינת ההספק האופטימלי של אגירה במערכת, היקף ההספק הקונבנציונאלי החדש הנדרש (אם בכלל) באמצעות מודל סימולציה טכנו-כלכלי.
- ניתוח ההשפעות הכלכליות המשקיות של מפת הדרכים תוך התייחסות למערך הייצור ולהשקעות ברשת.

### מסקנות עיקריות:

- עמידה ביעדים של 40% אנרגיה מתחדשת בשנת 2030 ו-80% - 100% אנרגיה מתחדשת ב-2050 תניב תועלת משקית של כ-6 מיליארד ₪ (עניין) עד שנת 2050 וכ-65 מיליארד ₪ (עניין) עד שנת 2050.
- ההספק הסולארי הנדרש לשם עמידה ביעד עומד על 22.9 גו"ט בשנת 2030.
- יש צורך בהתקנה נרחבת של מתקני אגירה כך שהספק האגירה יעמוד על 5 – 6 גו"ט (כ-33 גו"ט).
- לא נדרש הספק ייצור קונבנציונאלי חדש בעשור הקרוב, כאשר ההספק הנדרש בשנת 2030 נאמד בכ-15 גו"ט בלבד.
- מודל הסימולציה מחזק את מסקנות הדו"ח כי צמצום מגבלות הספק ה- / Must-Run Must Take במשק יקטין משמעותית את הקיטום הסולארי, ובכך תגדיל עוד יותר את התועלת המשקית.



## יג. הקדמה

בפרקים הקודמים נבחנו האתגרים עבור מערך הייצור ומערכת החלוקה ממעבר למשק אנרגיה המבוסס 40% אנרגיה מתחדשת בשנת 2030, כאשר עיקרו מיוצר במערכות PV במרחב המבונה. בפרק הזה, בוצעה הערכה נוספת של האפשרות לתפעל את משק החשמל בישראל תחת תרחישים עתידיים בהם אחוזים גבוהים מאד של האנרגיה תסופק ממקור PV, באמצעות מודל סימולציה טכנו-כלכלי המסוגל לנתח את צרכי משק החשמל באחוזים משתנים של מקורות PV.

מטרת ההרצה היא לבחון את הספק האופטימלי של אגירה במערכת, היקף ההספק הקונבנציונלי החדש הנדרש (אם בכלל), ואת ההשפעות הכלכליות המשקיות של מפת הדרכים על מערך הייצור. זאת, תוך הפעלה של המלצות רלוונטיות מהפרקים הקודמים, ובפרט – צמצום תיעדוף של הספק קונבנציונלי על פני ייצור באנרגיה מתחדשת (הספק Must-Run / Must-Take).

## יד. מבנה מודל הסימולציה

הסימולציה בחנה את עקומת הייצור השעתית של מקורות השמש והרוח אל מול עקומת הביקוש, תוך שימוש באגירה בכדי להתאים בין הייצור לביקוש. הסימולציה התבססה על עקומות הביקוש המצרפי בישראל ותפוקת המערכות הסולאריות וטורבינות הרוח בשנת 2018 בפועל. לאחר הרצת הסימולציה ומציאת אופן תפעול אפשרי למשק החשמל, ניתן להסיק את היקף האגירה הנדרש, ההספק הקונבנציונלי הנדרש, כמות החשמל שתושלך, ועוד.

הסימולציה בוצעה על רכיבי המערכת באופן מצרפי ועל פי הערכות כלליות לביצועיהם ולעלויות, ולא בוצעה הפרדה ליחידות הייצור השונות או למיקומן הגיאוגרפי.

## טו. שיטת המידול העיקרית, לרבות אופטימיזציה כלכלית

מהלך הסימולציה היה כדלקמן:

1. עבור כל יום נבנתה עקומת הייצור הסולארית על ידי הכפלת עקומת הייצור משנת 2018 במקדם המתאים להשגת יעד האנרגיה הסולארית השנתי שהוגדר בתרחיש, עליה נוספה עקומת הייצור מאנרגיית רוח בהתאם לצפי התקנת טורבינות הרוח כפי שהוצג בנספח א'.
2. על עקומות אלו נוסף ייצור בסיס קונבנציונלי קבוע על פי מגבלת Must-Run שהוגדרה בתרחיש, והוצגה בנספח א'.
3. עקומת הייצור המצרפית הושוותה לעקומת הביקוש באותו היום.
4. אם הייצור היה גבוה מהביקוש, עודפי החשמל "הופנו" לאגירה, עד גבול כמות האגירה שהוגדרה לתרחיש.
5. הופעל אלגוריתם שמטרתו להשתמש באגירה בכדי להפחית למינימום את ההספק הקונבנציונלי הפעיל בכל יום, וזאת באמצעות גילוח פסגת הביקוש על ידי אספקת אנרגיה ממערך האגירה, ותוך שמירה על מגבלת "Must-Run" שהוגדרה לתרחיש.
6. הביקוש הנותר, מעבר לייצור בשמש ורוח, בסיס Must-Run, והסוללות, סופק באמצעות היחידות הקונבנציונליות.

7. אם ניתן להפחית את ההספק הקונבנציונלי לאורך כל היום אל מתחת למגבלת "Must-Run", יופעל בכל היום הספק פוסילי אחיד הנמוך מהמגבלה, מתוך הנחה כי מגבלת Must-Run דרושה לשמירה על גמישות הרשת, והספק נמוך וקבוע לאורך כל היום לא נדרש לגמישות זו.

בסיום הרצת המודל בוצעה הערכה כלכלית לעלויות המשקיות השנתיות בתרחישים השונים, באופן שיאפשר להשוות בין תרחישים שונים של הקמה ותפעול הספק סולארי, הספק אגירה, הספק קונבנציונאלי, וקיטום עודפי החשמל, למציאת האופטימום הכלכלי.

התחשיב הכלכלי כלל את:

1. עלות הייצור הקונבנציונלי (פוסילי), אשר חושב כייצור בגז בשילוב של מחז"מ וטורבינות במחזור פתוח (פיקריות). התחשיב כולל את עלות ההקמה (CAPEX) ועלויות תפעול (OPEX) קבועות (הנקבעות על פי ההספק המותקן בלבד), ומשתנות (הנקבעות על פי החשמל המיוצר בלבד), עלויות הגז ועלויות חיצוניות.
2. עלויות הייצור הסולארי, אשר חושבו כייצור ב-PV בלבד (ההספק התרמו-סולארי יחשב כהספק PV). התחשיב כולל את עלות ההקמה (CAPEX), בתוספת עלויות תפעול (OPEX) קבועות בלבד.
3. עלויות הייצור ברוח. התחשיב כולל CAPEX ו-OPEX קבועות.
4. עלויות האגירה, אשר חושבו כעלות סוללות בלבד (האגירה השאובה חושבה כתוספת אגירה בסוללות). התחשיב כולל CAPEX ו-OPEX קבועות.

המחירים נאספו ממקורות מוכרים, כגון חברת מקינזי, או מהערכות המקובלות על רשות החשמל כפי שפורסמו בעבודות האחרונות על הפחתת השימוש בפחם או הגדלת יעד אנרגיות מתחדשות לשנת 2030.

בכדי למצוא את התמהיל האופטימלי בתחזיות המחיר שנבחנו, בוצע חישוב העלויות המשקיות תחת אחוז האנרגיה הסולארית בתמהיל כפי שהוגדר בתרחישים השונים, תחת כמויות אגירה משתנות מאפס ועד 250 גוט"ש – ונבחר התמהיל עבורו העלויות המשקיות הנמוכות ביותר.

יש להדגיש כי ישנה תחליפיות מסוימת בין השימוש בהספק הקונבנציונלי לכמות האגירה הנדרשת. בניסיון למלא את מלוא הפער בין הייצור לביקוש באמצעות סוללות, נמצא כי הצורך ב-10%-5 האחורונים של נפח האגירה הוא לשעות ספורות בשנה. ישנה כדאיות כלכלית לוותר על האחוזים האחרונים של האגירה ולהפעיל את היחידות הקונבנציונליות בשעות הללו. בדרך כלל הדבר לא ידרוש תוספת הספק אלא שימוש בהספק הקיים ותוספת העלויות המשתנות בלבד. מטרת האלגוריתם, אם כך, היא למצוא את נקודת האופטימום הזו בה העלות המשקית תהיה מינימלית.

## זז. נתונים והנחות מרכזיות, לרבות הנחות לניתוח הכלכלי

### מחיר הדלק

מחיר הדלק מבוסס על הנחות רשות החשמל שפורסמו במסגרת מסמך 'הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030'<sup>58</sup> וזאת בהתבסס על חוזים קיימים כיום.

טבלה 5: מחירי דלקים

<sup>58</sup> [https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/2030\\_final](https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/2030_final)

מקור	2020	יח'	דלק
רשות החשמל, 2020	4.7	\$/MMBTU	גז
צוות העבודה הבין-משרדי לבחינת חלופות לאורות רבין 1-4	1.11		מקדם LHV (גז)

הניתוח בוצע כאמור על בסיס אותם מחירי גז בדיוק ששימשו את רשות החשמל בבחינת ההשלכות הכלכליות של 30% אנרגיה מתחדשת, אשר בוצעה לבקשת שר האנרגיה.

## עלויות הון, תפעול קבוע ותפעול משתנה - יחידות גז

נתוני עלויות ההון והתפעול הקבוע של יחידות הגז התבססו על הנחות רשות החשמל שפורסמו במסגרת מסמך 'הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030'. בהתאם לכך, הונח כי 35% מהספק הייצור המוסק בגז החדש שיוקם יהיה מסוג מחזור פתוח (פיקריות) ו-65% יהיה מסוג מחז"מ – מתוך כך, 50% בצמוד לאתר קיים ו-50% באתר חדש. הונח כי אורך החיים של תחנות קונבנציונליות הוא 30 שנה.

טבלה 6: עלויות הון – יחידות גז טבעי

סוג יחידה	יח'	ערך
מחז"מ צמוד לאתר קיים	ש/קו"ט מותקן	3,912
מחז"מ באתר חדש	ש/קו"ט מותקן	4,172
מחזור פתוח גמיש	ש/קו"ט מותקן	3,290

טבלה 7: עלויות תפעול קבוע – יחידות גז טבעי

סוג יחידה	יח'	ערך
מחז"מ	ש/קו"ט מותקן	165
מחזור פתוח	ש/קו"ט מותקן	163

נתוני עלויות התפעול המשתנה התבססו גם כן על מסמך רשות החשמל בדבר הגדלת היעדים, בהתבסס על אסדרה 914. אך במקרה זה, הונח כי תמהיל הייצור יעמוד על 85% מחז"מ ו-15% מחזור פתוח, וזאת על בסיס הנחות רשות החשמל שפורסמו במסגרת מסמך "התייעצות לקראת קביעת מדיניות להפחתה עד כדי הפסקה מלאה של השימוש בפחם".

טבלה 8: עלויות תפעול משתנה – יחידות גז טבעי

סוג יחידה	יח'	ערך
מחז"מ	אג"קו"ט"ש	1.03
מחזור פתוח	אג"קו"ט"ש	0.55

המודל מבצע את האופטימיזציה הכלכלית בהתבסס על עלויות ייצור משוקללת של כל טכנולוגיה, הכוללות עלויות הון במנותק מההספק הקיים כבר כיום במערכת. על כן, בחישוב הסופי בוצעה פעולת ניכוי של עלויות ההון והתפעול הקבוע אשר יוחס לתחנות כוח קיימות ואשר צפויות לקום בוודאות גבוהה, על בסיס הנתונים המופיעים בנספח ב' – מצבת תחנות כוח.

## עלויות היצוניות – יחידות גז

העלויות היצוניות חושבו בעבור המזהמים:  $CO_2$ ,  $SO_2$ ,  $NO_x$ , PM, על בסיס נתוני פליטה סגולית ליחידות הייצור בפועל שהתקבלו מאגף תפ"ט, ועל בסיס העלות המשקית של פליטות מזהמים המפורסמות במסגרת 'הספר הירוק' על ידי המשרד להגנת הסביבה<sup>59</sup>. עבור יחידת הגז המשוקללת הונח כאמור פילוח ייצור של 15% מחזור פתוח ו-85% מחז"מ. העלויות היצוניות חושבו בהתאם למקדם העדכון השנתי כפי שמפורסם בספר הירוק.

טבלה 9: מקדמי פליטה סגולית (גרי / קוט"ש)

סוג יחידה	$CO_2$	$NO_x$	$SO_x$	חלקיקים
מחזור פתוח	483	0.452	0.05	0.05
מחז"מ	360	0.220	0.05	0.02

טבלה 10: עלויות היצוניות (2020)

פרמטר	$CO_2$	$NO_x$	$SO_x$	חלקיקים
עלויות היצוניות (ש"טון)	140	118,208	85,381	270,760

טבלה 11: מקדמי עדכון שנתיים לעלויות היצוניות

מקדם עדכון מזהמי אוויר	2020-2030	2030-2040	2040-2050
מקדם עדכון גז"ח	2.10%	1.90%	1.60%
מקדם עדכון מזהמי אוויר	3.39%	3.14%	3.14%

## עלויות PV

### עלויות הון

עלויות ההון למערכות ה-PV התבססו על תחזית עלות מערכת PV שהתקבלה ממשרד האנרגיה לשנים 2020 – 2050:

טבלה 12: תחזית בלומברג לעלויות הון למערכות סולאריות

פרמטר	יח'	2020	2030	2050
Utility	\$/קו"ט	801	551	351
Commercial	\$/קו"ט	1,047	786	597
Residential	\$/קו"ט	1,380	1,053	640

הונח כי העלויות מתאימות לגודל המערכת באופן הבא:

[https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/green\\_book\\_external\\_costs\\_air\\_pollutants\\_greenho<sup>59</sup> use\\_gases](https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/green_book_external_costs_air_pollutants_greenho<sup>59</sup> use_gases)

- Residential <100KW •
- 100KW<Commercial<5 MW •
- 5MW<Utility •

עלות ההון המשוקללת למערכות ה-PV חושבה על בסיס ההנחה כי 30% מההספק יוקם במערכות קרקעיות גדולות בעלויות Utility Scale, והיתרה תוקם בתוך המרחב המבונה. עלויות המערכות בתוך המרחב המבונה משתנות בהתאם לגודל המערכת. עבור חלק מהמתקנים בתוך המרחב המבונה יש גם צורך בתוספת קונסטרוקציה עליה יועמדו הפאנלים (לדוגמה, קירוי חניונים). מסקר שוק שנעשה, עלות הקונסטרוקציה הנדרשת נעה במוצע סביב ה-3,700 ש"ח לקו"ט. יש לציין כי ניתוח זה מחמיר ביחס לניתוח רשות החשמל אשר אינו מתייחס לעלויות קונסטרוקציה כלל.

פילוח העלויות התבסס על פילוח פוטנציאל ההקמה במרחב המבונה בהתאם לתוצאות עבודת 'פוטנציאל ייצור סולארי במרחב המבונה', שפורסמה על ידי המשרד להגנת הסביבה<sup>60</sup>, וזאת תוך ביצוע התאמות המביאות לידי ביטוי את הסברה שהפוטנציאל לא ימומש בכל הזרמים באופן אחיד לאורך השנים. במקום זאת, ראשית ימומש פוטנציאל ההתקנה בזרמים שמקודמים כבר כיום באופן מפורש במסגרות רגולטוריות (תמ"אות/מכרזי רשות) או נפוצים בשוק, ובפרט גגות מסחריים ושטחים מבונים בגודל מסחרי/תעשייתי, בעוד שמימוש הפוטנציאל בזרמים לא נפוצים (גגות קטנים), ואף ניסיוניים (בפרט חזיתות מבנים וקירוי כבישים עירוניים) יתעכב.

בטבלה מטה מרוכזות ההנחות בדבר פילוח עלויות ההקמה בתוך המרחב המבונה לפי זרם, גודל המערכת הרלוונטית לשם תמחור מייצג, ושיעור ההספק שדורש קונסטרוקציה. על בסיס ניתוח זה הונח כי 40% מסך ההספק במרחב המבונה מחויב בתוספת קונסטרוקציה.

טבלה 13: תמהיל עלות משוקלל לפי רכיב

קטגוריה	יח'	2020	2030	2050	גודל מתקן	נדרשת קונסטרוקציה?
גגות קטנים	%	7%	8%	45%	Residential	לא
גגות גדולים	%	12%	13%	2%	Commercial	לא
חזיתות	%	0.4%	0.6%	26%	Residential <sup>61</sup>	לא
שטח מבונה בגודל מסחרי	%	47%	44%	12%	Commercial	כ-75%
שטח מבונה אחר	%	11%	15%	15%	Utility scale	כ-50%
מאגרים	%	23%	20%	0%	Utility	רק על גבי המאגר

יודגש כי הנחות פרטניות בדבר היקפי מימוש של זרמים ספציפיים גובשו אך ורק על מנת לספק אומדן כלכלי לעלות המייצגת של ייצור חשמל במרחב המבונה כפונקציה של גודל המתקן והיקף הקונסטרוקציה הנדרש. ייתכן וברמת הזרם הפרטני, מימוש הפוטנציאל יתקדם באופן מעט שונה בפועל.

60

[https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/potential\\_for\\_solar\\_production\\_on\\_existing\\_structure\\_jan\\_2020](https://www.gov.il/he/departments/publications/reports/potential_for_solar_production_on_existing_structure_jan_2020)

<sup>61</sup> עבור חזיתות בוצעה התאמה נוספת לעלות הקמה בכדי לשקף את היקפי הייצור הנמוכים לכל קו"ט מותקן, לאור הצבת המערכות בזוויות לא אופטימליות ביחס לקרינת השמש.

## עלויות- תפעול קבוע

בהתאם להנחות רשות החשמל שפורסמו במסגרת מסמך 'הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030, הונח כי עלות התפעול הקבוע של PV היא 1.7% מעלות ההון.

## פרמטרים נוספים

הונח אורך חיים של 30 שנה, על בסיס ניתוחי ה-NREL<sup>62</sup>.

טבלה 14: אורך החיים של מערכות PV

2050	2040	2030	2025	2020	פרמטר	קטגוריה
30	30	30	30	30	שנים	אורך חיים

## עלויות ייצור חשמל בטורבינות רוח

### עלויות הון

עלויות ההון התבססו על הנחות רשות החשמל שפורסמו במסגרת מסמך 'הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030 בהתבסס על תחזית בלומברג:

טבלה 15: תחזית עלות ההון למתקני רוח

2050	2040	2030	2025	2020	פרמטר	קטגוריה
3,135	3,385	3,700	4,096	5,083	ש/קו"ט	עלות הון למתקן רוח

## עלויות- תפעול קבוע

בהתאם להנחות רשות החשמל שפורסמו במסגרת מסמך 'הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030, הונח כי עלות התפעול הקבוע של מתקני רוח היא 1.7% מעלות ההון.

## פרמטרים נוספים

הונח כי אורך החיים של מתקני רוח הוא כ-25 שנה, בהתאם להנחות שגובשו עם רשות החשמל במסגרת גיבוש היעד הלאומי להפחתת פליטות גזי חממה. מקדם ההספק למתקני רוח הונח כ-32% עד 2040 ו-34% מ-2040 והלאה.

## עלויות אגירה

### עלויות הון

עלויות ההון לסוללות אגירה התבססו על תחזית עלות לסוללות אגירה שהתקבלה ממשרד האנרגיה:

טבלה 16: תחזית עלות ההון לסוללות אגירה

2050	2040	2030	2025	2020	פרמטר	קטגוריה
136	136	168	213	319	\$/קו"ט	עלות הון לסוללות

<sup>62</sup> <https://atb.nrel.gov/electricity/2020/data.php>

## עלויות- תפעול קבוע

בהתאם להנחות רשות החשמל במסגרת מסמך 'הגדלת ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030, הונח כי עלות התפעול הקבוע של אגירה היא 1.5% מעלות ההון.

## פרמטרים נוספים

אורך חיי הסוללה הונח להיות 23 שנה על בסיס הנחות רשות החשמל במסמך 'הגדלת ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030'. כמו כן, לצורך הניתוח נבחנה נצילות ה-Round-trip של הסוללות. מסקירה שבוצעה עלה כי נצילות הסוללה נעה במנעד שבין 80-98%. נצילות זאת מייצגת את היחס של איבוד אנרגיה בין הטעינה של הסוללות לפריקתן. הונח כי הנצילות היא 93% עד שנת 2040 ומשנת 2040 היא 95%.

נוסף על כך, בחישוב עלות ההון האפקטיבית של הסוללה, הונח כי יכולת העבודה האפקטיבית של הסוללה היא 80% מכמות האנרגיה הנקובה. הנחה זו נובעת מהעובדה כי נהוג לפרוק את הסוללות עד כדי 80% - כלומר להותיר 20% מהאנרגיה בסוללה.

טבלה 17: פרמטרים נוספים לאגירה

קטגוריה	פרמטר	2020	2025	2030	2040	2050
אורך החיים	שנים	20	20	20	20	20
נצילות Round-trip	%	93%	93%	94%	95%	95%
אפקטיביות הסוללה	%	80%	80%	80%	80%	80%

## פרמטרים נוספים

### איבודי הולכה

שיעור איבודי ההולכה המשוקללים חושב על בסיס הנחות רשות החשמל המפורסמות בדוח מצב משק החשמל<sup>63</sup>. איבודי ההולכה המשוקללים למערכות PV הם 1.7% ועבור מתקנים קונבנציונליים ברשת – 7.5%.

שיעור האיבודים המשוקלל לוקח בחשבון את שיעור החדירה של ייצור חשמל באנרגיות מתחדשות בהתאם ליעדים הקיימים והנבחרים: 10% ב-2020, 40% ב-2030 ו-80% ב-2050.

### שיעור היוון

שיעור ההיוון אשר הונח הוא 3% - שיעור היוון חברתי כפי שנקבע על ידי המשרד להגנת הסביבה במסגרת הספר הירוק<sup>64</sup>.

## סיכום ההנחות ששימשו את המודל הכלכלי

להלן רכיבי העלות ששימשו לחישוב המודל הכלכלי ופירוט ההנחות והמקורות למידע:

63

(המשרד להגנת הסביבה, 2020) -

64 [https://www.gov.il/BlobFolder/reports/green\\_book\\_external\\_costs\\_air\\_pollutants\\_greenhouse\\_gases/he/sustainability\\_economy\\_green\\_book\\_external\\_costs\\_air\\_pollution.pdf](https://www.gov.il/BlobFolder/reports/green_book_external_costs_air_pollutants_greenhouse_gases/he/sustainability_economy_green_book_external_costs_air_pollution.pdf)

מקור	2050	2045	2040	2035	2030	2025	2020	שנה		סך ביקוש
המשרד להגני"ס	158.6	143.7	127.8	112.0	95.6	81.6	68.2	TWh/y		
רשות החשמל, מסמך 2030 והנחות מומחים	3,779	3,779	3,779	3,779	3,779	3,779	3,779	NIS/kW	CAPEX	גז
	30	30	30	30	30	30	30	years	Lifespan	
	164	164	164	164	164	164	164	NIS/kW/y	OPEX Fixed	
	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	NIS/MWh	OPEX Variable	
עיבוד נתוני רשות החשמל	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	0.125	NIS/kWh	Fuels total	
הגני"ס – "הספר הירוק"	0.105	0.090	0.077	0.066	0.057	0.048	0.041	NIS/kWh	Externalities - Pollutants	
	0.092	0.085	0.078	0.072	0.065	0.059	0.053	NIS/kWh	Externalities - CO2	
שקלול ע"י נתוני משרד האנרגיה, NREL	3,818	3,994	3,730	3,554	3,466	3,921	4,376	NIS/kW	CAPEX	PV
	30	30	30	30	30	30	30	years	Lifespan	
	65	68	63	60	59	67	74	NIS/kW/y	OPEX Fixed	
	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700	1,700		kwh/kw ratio	
רשות החשמל, מסמך 2030	3,135	3,135	3,135	3,385	3,700	4,096	5,083	NIS/kW	CAPEX	Wind
	25	25	25	25	25	25	25	years	Lifespan	
רשות החשמל, גיבוש היעד הלאומי להפחתת פליטות גזי חממה 2015										
רשות החשמל, מסמך 2030	53	53	53	58	63	70	86	NIS/kW/y	OPEX Fixed	
	2,978	2,978	2,978	2,803	2,803	2,803	2,803		kwh/kw ratio	
תחזית משרד האנרגיה	485	485	485	530	600	761	990	NIS/kWh	CAPEX	Storage
רשות החשמל, מסמך 2030	23	23	23	23	23	23	23	years	Lifespan	
רשות החשמל, מסמך 2030	7	7	7	8	9	11	15	NIS/kWh/y	OPEX Fixed	
המשרד להגני"ס	95%	95%	95%	94%	93%	93%	93%	%	Efficiency	
המשרד להגני"ס	80%	80%	80%	80%	80%	80%	80%	%	DoD	
עיבוד נתוני רשות החשמל, דוח מצב משק החשמל 2018	6%	6%	6%	6%	6%	7%	7%	%	BAU	Grid loss
	3%	3%	4%	5%	5%	6%	7%	%	Abatement	
המשרד להגני"ס	3%	3%	3%	3%	3%	3%	3%	%		WACC



## ז. הצגת תוצאות המודל

לאחר הרצת המודל הטכני, מחושבות העלויות בהתאם להנחות שפורטו לעיל. בחינה של תרחישים רבים, עם ערכי אגירה שונים, מאפשרת לאתר את התמהיל של מקורות סולאריים, אגירה וקונבנציונליים, בעלות המשקית הנמוכה ביותר.

## ממצאי אופטימיזציה כלכלית

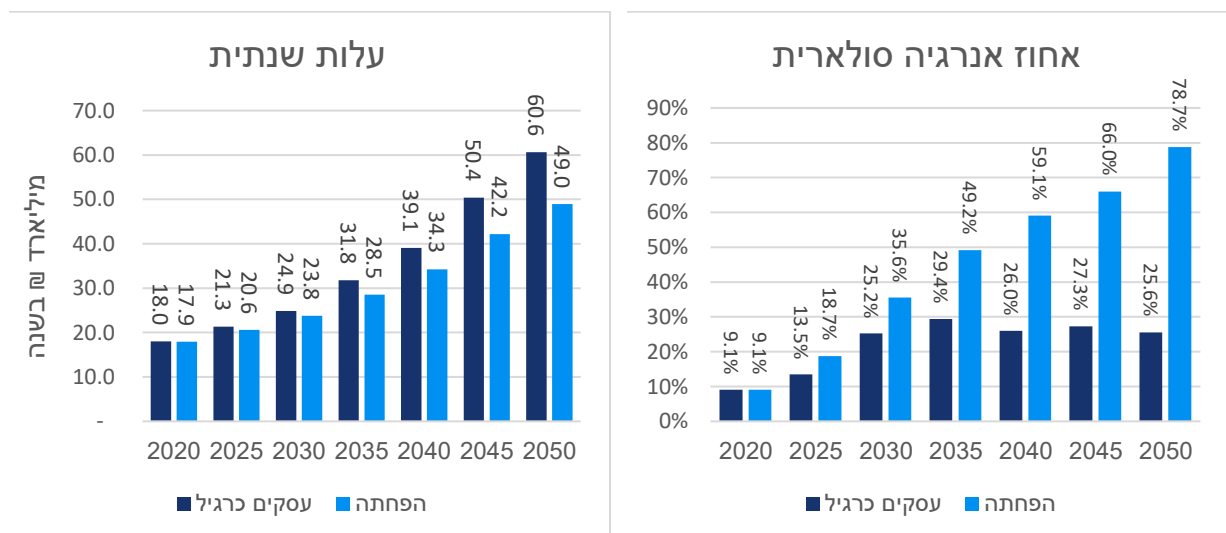
ממצאי האופטימיזציה הכלכלית להלן:

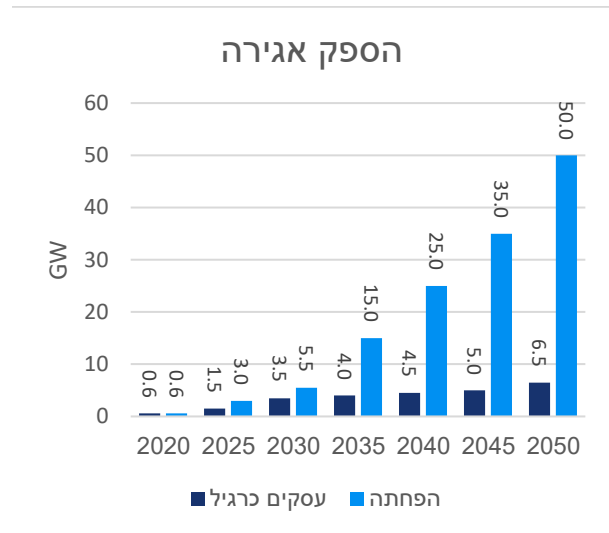
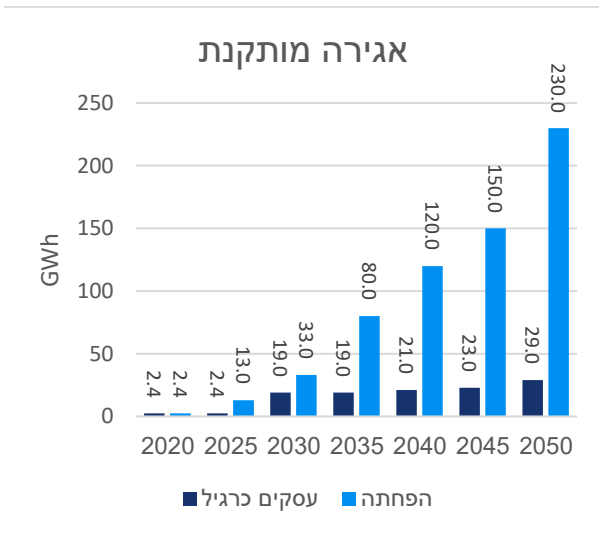
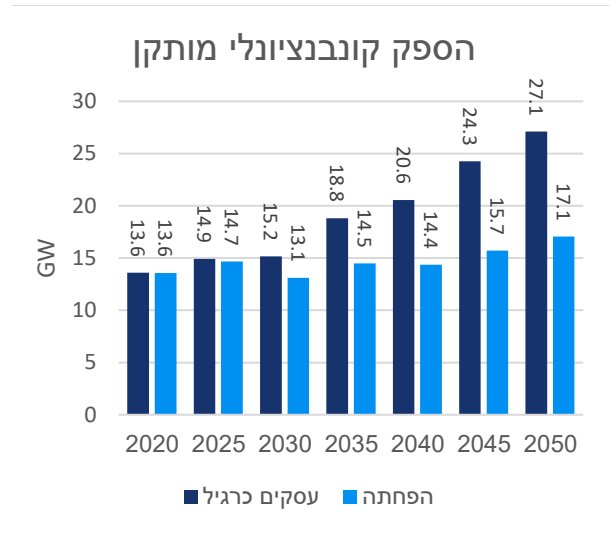
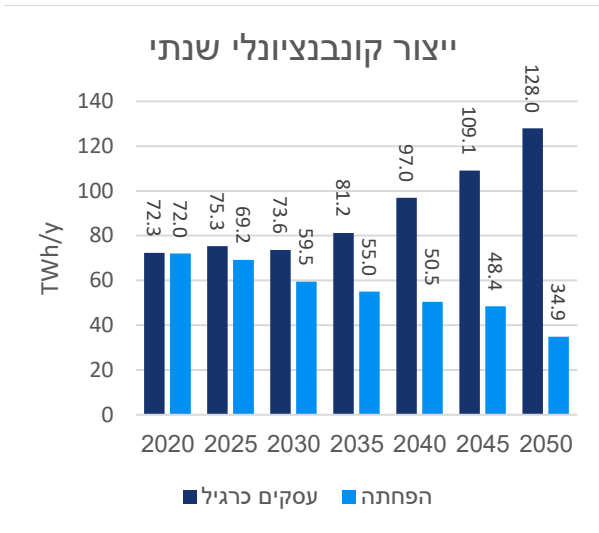
טבלה 19: ריכוז ממצאי האופטימיזציה הכלכלית

שנה	תרחיש	הספק [גו"ט]	קונבנציונלי	הספק סולארי [גו"ט]	הספק רוח [גו"ט]	הספק אגירה [גו"ט]	כמות אגירה [גוט"ש]	עלות שנתית כוללת (מיליארד ₪ / שנה)
2020	עסקים כרגיל	13.6	4.2	0.0	0.6	2.4	18.0	
	הפחתה	13.6	4.2	0.0	0.6	2.4	17.9	
2030	עסקים כרגיל	15.2	17.0	0.7	3.5	19.0	24.9	
	הפחתה	13.1	22.9	0.7	5.5	33.0	23.8	
2040	עסקים כרגיל	20.6	22.9	0.7	4.5	21.0	39.1	
	הפחתה	14.4	45.5	0.7	25.0	120.0	34.3	
2050	עסקים כרגיל	27.1	30.4	0.7	6.5	29.0	60.6	
	הפחתה	17.1	80.2	0.7	50.0	230.0	49.0	

ראו להלן מספר גרפים שיקלו על השוואה בין תרחיש ה"עסקים כרגיל" לתרחיש ההפחתה:

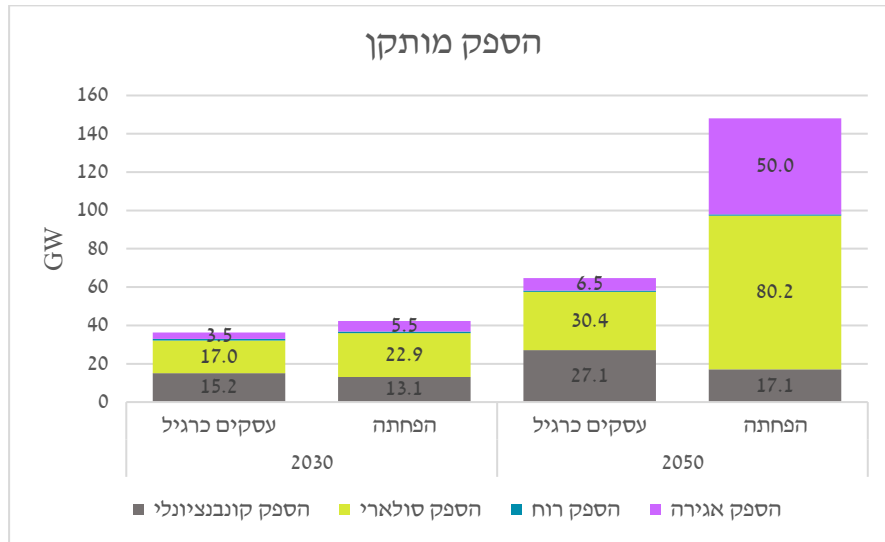
תרשים 25: ריכוז ממצאי האופטימיזציה הכלכלית





## הספק ייצור ואגירה נדרש

בתרשים להלן מוצגות תוצאות המודל עבור תרחיש הבסיס ("עסקים כרגיל") ותרחיש ההפחתה. התרשים מציג את ההספקים המותקנים עבור תחנות הכוח מבוססות גז (מחז"מ וטורבינות במחזור פתוח), ההספק הסולארי המותקן והאגירה.



ההספק המוצג בתרשים הוא בהתאם לשיא הביקוש בשנים שנבחנו, כאשר בפועל יהיה צורך להוסיף על הערכים המוצגים הספק נוסף כרזרבה. כיום, מוגדר כי יש להוסיף על הספק שיא הביקוש השנתי כ-17% כרזרבה למקרה של תקלות ביחידות הייצור או ברשת הארצית.

כך, למשל, בהתייחס לרזרבה של 17% - ההספק הקונבנציונלי הנדרש עומד על כ-15.3 גו"ט בשנת 2030 ועל כ-20 גו"ט בשנת 2050. אך בתרחיש בו 80% מהייצור הוא ממקורות מתחדשים, ובמשק קיימות מערכות אגירה רבות, יש צורך לבחון מחדש את רעיון הרזרבה – האם היחידות הקונבנציונליות יהוו גיבוי לכלל מערך הייצור, או שמא הסוללות תוכלנה לספק חלק מהגיבוי. היות וכך המודל הנוכחי מציג את ההספק ללא תוספת רזרבה. ההספק הקונבנציונלי הנדרש בתרחיש ההפחתה הבולט לעין היות שאינו גדל משמעותית ביחס להספק הקיים כיום, וזאת למרות עלייה משמעותית בביקוש.

יש לציין עוד כי בשנת 2050 ההספק הקונבנציונלי יעמוד ברוב השנה בלא שימוש, ויהווה גיבוי לייצור הסולארי במשך שבועות ספורים בחורף, כאשר עננות כבדה תפחית משמעותית את הייצור הסולארי. כך, ייווצרו בשנת 2050 כ-35 טרה-וואט שעה קונבנציונליים בלבד בתרחיש ההפחתה לעומת כ-70 כיום וכ-128 בתרחיש הבסיס בשנת 2050.

נבחן להלן לעומק את ממצאי המודל:

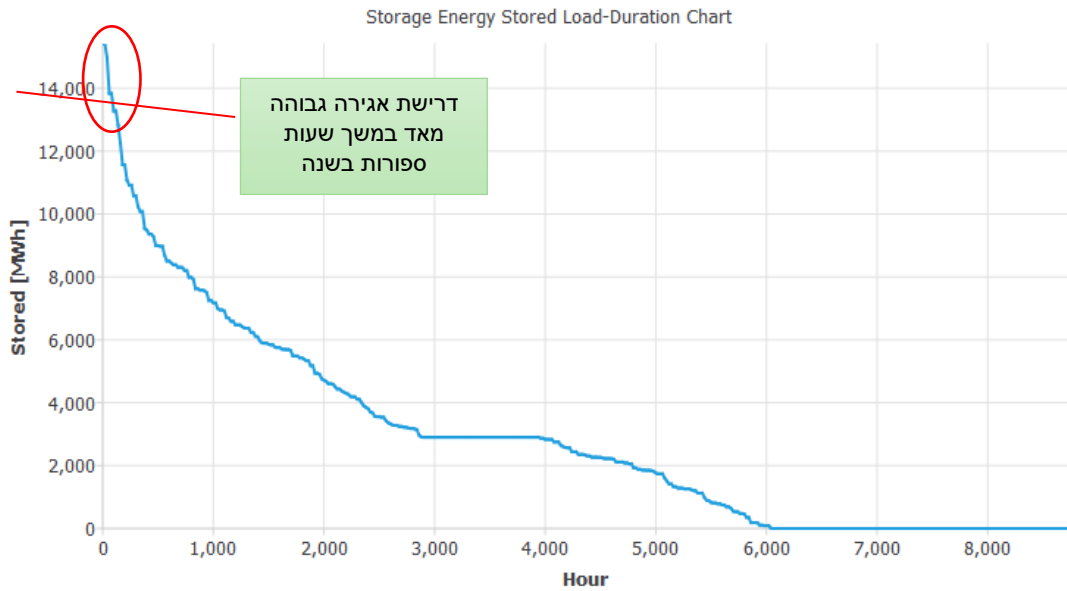
## היקף אגירה נדרשת

המודל שנבחן בעיקרו הוא מודל יומי – דהיינו, הוא מנסה לבצע אופטימיזציה של האגירה הנדרשת בכדי לספק את החשמל המיוצר באותו היום באמצעות המקורות הסולאריים, הרוח האגירה והקונבנציונליים בהתאם לעקומת הביקוש.

בהינתן סך הביקוש השנתי לחשמל, והמקורות הסולאריים והרוח המותקנים, המודל מחשב את מתווה ההפעלה האופטימלי של האגירה בכדי לנצל ככל האפשר את המקורות המתחדשים (להפחית את האנרגיה המושלכת), ולדרוש הספק קונבנציונלי נמוך ככל האפשר, וזאת במסגרת כמות האגירה הנתונה.

באם מוגדרת כמות אגירה אינסופית, המודל ימצא את הכמות המקסימלית הנדרשת לתפעול המשק. אך זהו אינו פתרון יעיל היות ובקצה, נדרשת כמות אגירה גבוהה מאד עבור מספר שעות ספורות בשנה. ראו למשל בתרשים להלן, גרף ההעמסה של מערכת האגירה בתרחיש מוטה אנרגיה סולארית:

תרשים 27: כמות האנרגיה במאגרים בשעות השנה

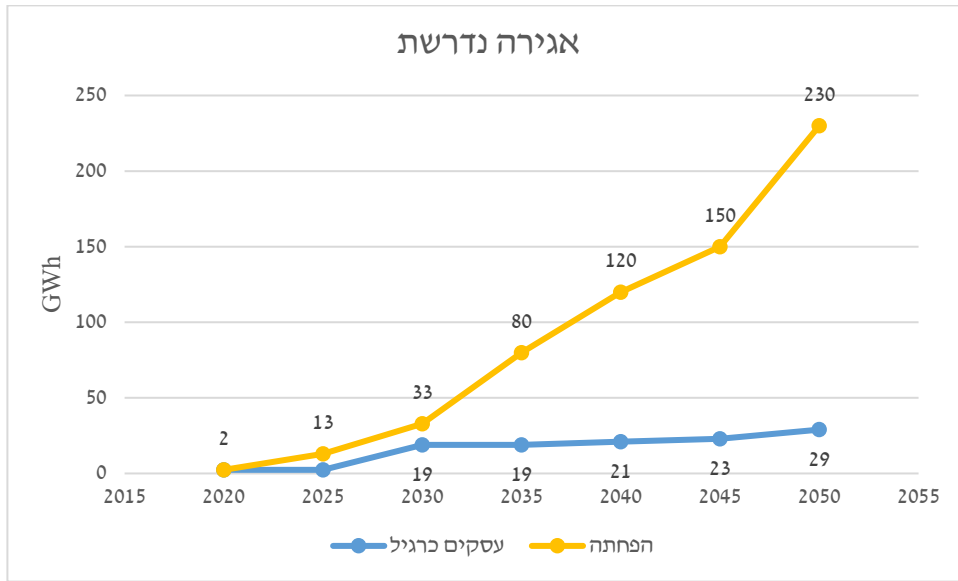


הגרף מציג את כמות האנרגיה במאגרים בשעות השנה (8,760 שעות), מסודרת מהגבוהה לנמוכה.

ניתן לראות כי למשך מספר עשרות שעות בלבד בשנה נדרשת אגירה בין 14,000 מגוט"ש ל-15,000. במקרה זה ניתן לצמצם את האגירה עד 14,000 מגוט"ש, ולספק את האנרגיה ממקורות קונבנציונליים ולתכנן את הביקושים לחשמל באופן מיטבי. בדרך כלל ניתן לספק את האנרגיה ללא הגדלת ההספק הקונבנציונלי המותקן, ולכן בעלות שולית מזערית. כתוצאה מכך השילוב של חיסכון כספי בעלות ההון עבור האגירה עם תוספת העלות השולית של ייצור קונבנציונלית יביא לעלות משקית כוללת נמוכה יותר.

היות שכך, המודל בחן מטריצה של הספקים סולאריים וכמויות אגירה שונות, בחיפוש אחר השילוב בעל העלות המשקית הנמוכה ביותר להשגת יעדי האנרגיה המתחדשת.

המתווה האופטימלי להתקנת מערכות האגירה מוצג להלן:



המודל מוצא כי יש להקים אגירה בקצב הולך וגדל. אם בין השנים 2020-2025 תידרש הקמה של כ-10 גוט"ש בתרחיש ההפחתה, הרי שבין השנים 2045-2050 ידרשו כ-80 גוט"ש חדשים.

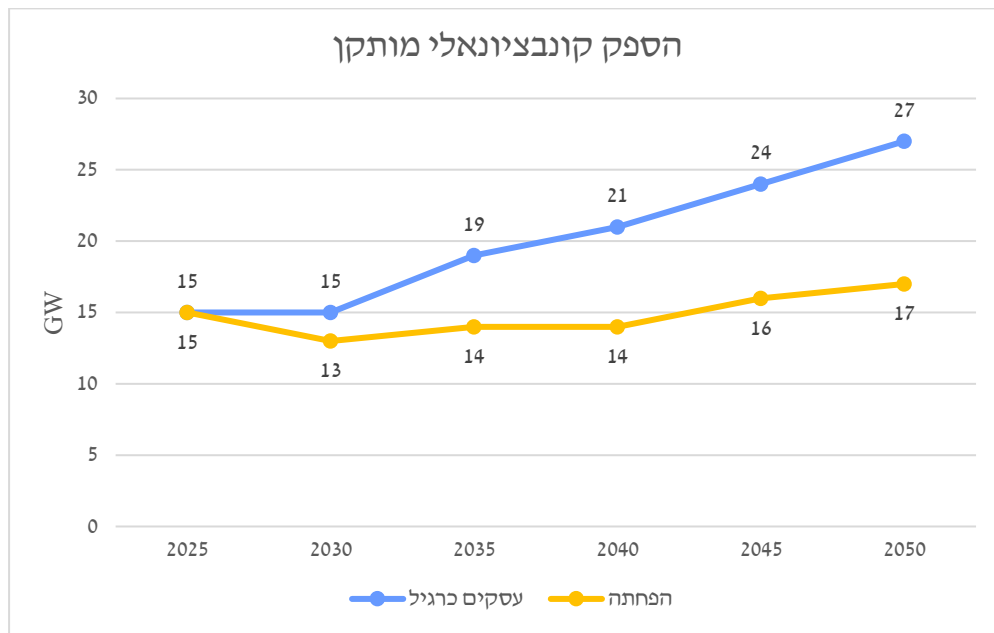
### המגזר הקונבנציונלי

לאחר שהמודל ניצל את האנרגיה ממקורות השמש, הרוח והאגירה, אם עדיין קיים מחסור, הוא יסופק על ידי הפעלת היחידות הקונבנציונליות. ההנחה היא כי ההספק הקונבנציונלי זמין תמיד, ולכן, יש להוסיף עתודה על הערך המתקבל מהמודל. כתוצאה מכך, ניתן לבחון על פני שנה שלמה מהו ההספק המקסימלי הנדרש.

כאמור, גם בתרחיש ההפחתה נדרש הספק קונבנציונלי משמעותי, וזאת בכדי לספק את הביקוש בשבועות ספורים של עננות גבוהה בחורף, אף אם היחידות תעמודנה מושבתות במשך רוב תקופת השנה. יש לציין כי מודל הפעלה כזה, כאשר רוב היחידות הקונבנציונליות אינן בשימוש חלק משמעותי מהשנה, דורש בחינה הנדסית והתארגנות להדממת היחידות ושימורן במצב תקין במשך תקופת ההדממה.

בנוסף לכך, עקומת הפעלת יחידות הייצור הקונבנציונליות המופקת מן המודל, מאפשרת לחשב את סך הייצור הקונבנציונלי במשך השנה, את היקף ניצול היחידות הקונבנציונליות, ואת קצב ההאצה (Ramp-up) הנדרש.

הצורך בהספק קונבנציונלי בשנים שנבחנו מוצג בתרשים להלן:



ההספק המוצג בתרשים הוא כאמור בהתאם לשיא הביקוש בשנים שנבחנו, כאשר בפועל יהיה צורך להוסיף על הערכים המוצגים הספק נוסף כרזרבה.

על פי המודל, בשנת 2050 שיא הביקוש שיסופק על ידי התחנות הקונבנציונליות יהיה 17,100 מגו"ט. כיום, שיא הביקוש עומד על כ- 14,700 מגו"ט וסך ההספק המותקן הוא כ-17,219 מגו"ט. מכאן שעד לשנת 2050 יהיה צורך בהתקנת הספק נוסף בעיקר לצורך תחלופת יחידות הייצור שיצאו משימוש בשלושת העשורים הקרובים.

מעבר להספק הנדרש עצמו, יהיה במהלך שלושת העשורים הקרובים שינוי מהותי באופן התפעול של היחידות הקונבנציונליות. אם כיום כ-90% מייצור החשמל נעשה ביחידות מחז"מ וקיטוריות הפועלות באופן רציף וכמעט ללא הפסקה, הרי שלקראת סוף התקופה היחידות הקיטוריות יצאו משימוש, וטורבינות הגז יופעלו במתווה הפעלה יומי, כאשר בצהריים מלוא הביקוש יסופק על ידי המקורות הסולאריים. בנוסף לכך, ייתכנו תקופות ארוכות בהן מערכות האגירה תוכלנה לספק את הביקוש בערב ובלילה, ולכן היחידות הקונבנציונליות יודממו לאורך זמן. נדגיש כי המודל הכלכלי מתחשב בכך שהיחידות הקונבנציונליות יפעלו בניצול נמוך, וכתוצאה מכך מחיר הקוט"ש הקונבנציונלי יהיה גבוה יחסית, אך לא יוסיף עלויות שיידרשו לצורך ההדממה וההפעלה מחדש של היחידות.

## היקף קיטום סולארי

בישראל, מקור האנרגיה המתחדשת העיקרי הוא השמש. אולם, כפי שהוצג בהרחבה בפרקים הקודמים, יש קושי לנצל חשמל המגיע מהשמש בהספקים גבוהים משום שכל התפוקה הסולארית בארץ מגיעה באותן השעות (וזאת בשונה מאנרגיית רוח, שבסיכום ארצי מתפזרת על פני שעות היממה). בנוסף לעובדה כי הייצור הסולארי אינו מתלכד בדיוק עם עקומת הביקוש, נוצרים עודפים בשעות שיא הייצור בצהריים, וחוסרים לאחר הצהריים

<sup>65</sup> הערכים של הספק קונבנציונלי שהתקבלו באמצעות המודל לא לוקחים בחשבון את דרישות העתודה.

ובלילה. שימוש בסוללות אגירה מאפשר להעביר חלק מהאנרגיה העודפת בצהריים לשימוש בערב ובבוקר למחרת. אך הבעיה העיקרית נובעת מהפער בתפוקה הסולארית בין החורף לקיץ.

בחורף תפוקת המערכות הסולאריות עומדת על כ-40-50% מהתפוקה הנומינלית, ובימים מעוננים במיוחד היא יורדת אף לגבול ה-10%. בכדי לספק את האנרגיה הנדרשת בחורף יש להתקין הספק גבוה מאד של מערכות סולאריות, כך שאף בתפוקה חלקית, הן תוכלנה לספק את האנרגיה הנדרשת. במצב זה בקיץ מופקים עודפי אנרגיה גדולים שאין אפשרות לנצל והם נקטמים (curtailed) – דהיינו מושלכים.

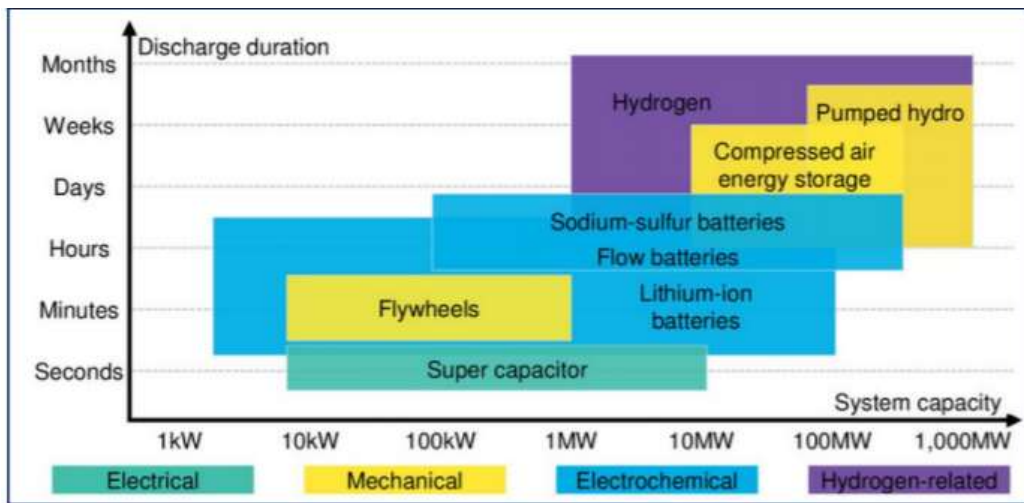
מצב זה גורם לניצול נמוך של המערכות הסולאריות ולכן למחיר משוקלל גבוה לקוט"ש מיוצר. התרחיש האופטימלי, אם כך, משקלל את עלות המערכות הסולאריות, עלות האגירה, ואת עלות הייצור הקונבנציונלי להפקת יתרת הביקוש, באופן שלא יגרום להשלכה מאסיבית של אנרגיה בעונות המעבר (בהן ישנה קרינת שמש גבוהה יחסית, אך הביקוש לחשמל לצורך מיזוג עדין נמוך), ומאידך לא ידרוש ייצור גבוה מידי של חשמל באמצעים קונבנציונליים בחורף.

בתחשיב שנעשה נערכה אופטימיזציה להספק הסולארי להשגת העלות המשקית הנמוכה ביותר. האופטימיזציה כללה מחד הרחבה מסוימת של ההספק הסולארי המותקן בכדי לספק את הביקוש בחורף ללא צורך בהגדלה משמעותית של ההספק קונבנציונלי, אך מאידך אפשרה שמירה על קיטום סביר בעונות המעבר, שלא יגרום לעלייה גבוהה בעלות המשקית.

יש לציין כי עקב מבנה עקומות הייצור והביקוש, אין אפשרות לשימוש בכל האנרגיה, וחלקה יושלך בכל תרחיש. כתוצאה מכך קשה להגיע ל-100% שימוש באנרגיה סולארית, וככל שעוברים את קו ה-90% ומוסיפים הספק סולארי, רוב החשמל הנוצר יושלך ורק מיעוטו ישמש את המשק.

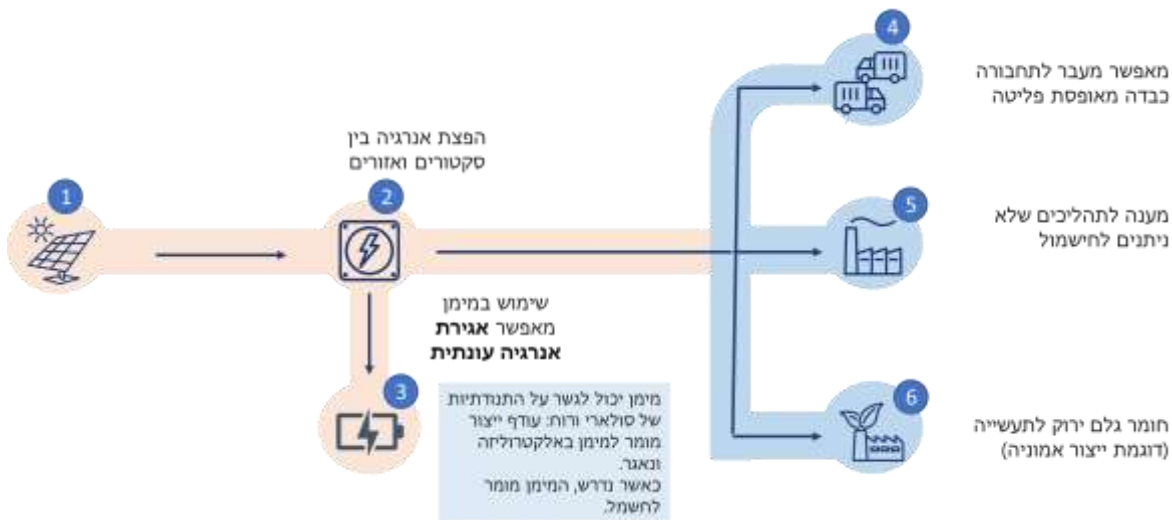
מודל החישוב מתייחס לחשמל המושלך וכן מסוגל לחשב את העלות סולארית המשוקללת הלוקחת בחשבון גם את הרכיב הזה.

הפתרון לבעיה יגיע כאשר תפותח טכנולוגיה לאגירה ארוכת טווח בעלות סבירה שתאפשר להעביר את עודפי הייצור, שבמודל הנוכחי נקטמים, מהאביב לחורף. אולם, טכנולוגיה כזו כיום עדיין אינה כלכלית ולכן המודל אינו מתייחס לאפשרות זו, ועודפי החשמל באביב ובקיץ מושלכים. כיום, הטכנולוגיה המובילה הנמצאת בפיתוח אשר תוכל לספק אגירה עונתית היא מימן, המאפשרת אגירה לטווח הארוך ביותר ובהספק הגבוה ביותר מבין טכנולוגיות האגירה המובילות:



על פי תוצאות המודל, צריך אגירה עונתית של כ-1.5 טרה-וואט שעה, היקף שווה ערך לחצי BCM מימן. נוסף על היתרונות עבור משק החשמל, מימן הוא מקור אנרגיה עתידי אסטרטגי למשק כולו – ומספק פתרון אפשרי לשני אתגרים משמעותיים נוספים במעבר למשק דל פחמן – דלק מאופס פליטות עבור תחבורה כבדה, ותחליף לדלקים פוסיליים בתהליכים הדורשים חום גבוה בתעשייה.

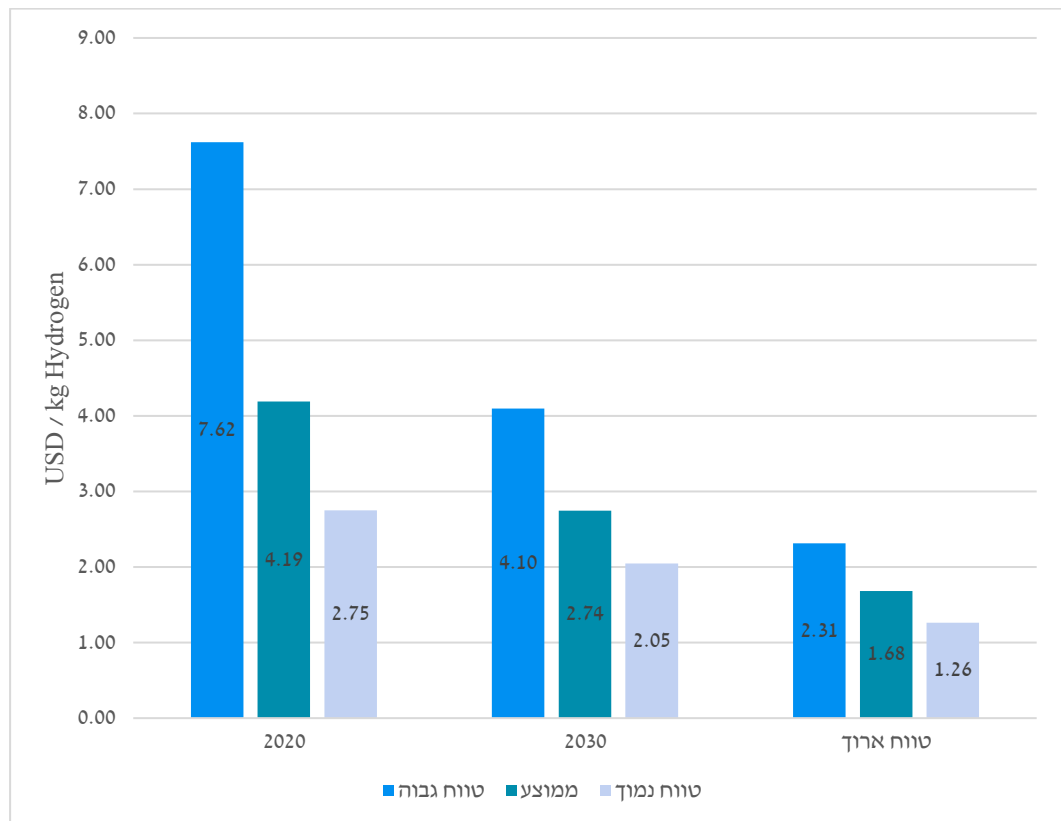
תרשים 31: יתרונות לשימוש במימן



לצד ירידת מחירי אנרגיה מתחדשת בכלל, וייצור סולארי PV בפרט, ירידת המחירים הצפויה כתוצאה מהוזלה של מתקני אלקטרוליזה ושיפור הנצילות האנרגטית של התהליך צפויות להביא לירידת מחירים משמעותית מאוד בעלות המימן כבר בעשור הקרוב:

<sup>66</sup> מקור: בלומברג, 2017, אוחזר מתוך 'אגירה במשק החשמל – מגמות, טכנולוגיות, שימושים וצעדים נדרשים', משרד האנרגיה, 2020.





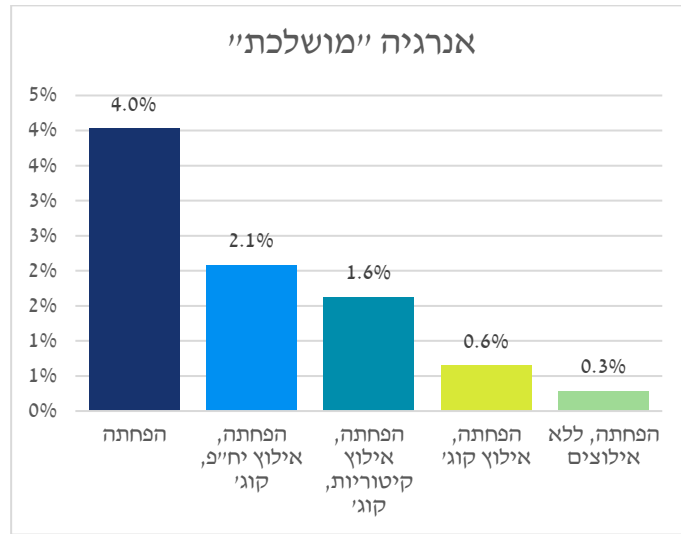
במדינות רבות בעולם, ביניהן הולנד, גרמניה, ואוסטרליה, הושקו לאחרונה תוכניות אסטרטגיות לקידום משק המימן, הכוללות השקעות תקציביות משמעותיות. נוסף על כך, באיחוד האירופי הוקם גוף ייעודי - European Clean Hydrogen Alliance, אשר מטרתו לקדם השקעות של 300-450 מיליארד אירו במימן עד שנת 2030. זאת, לצד השקת אסטרטגיית 40+40 GW alliance של התעשייה האירופית המציבה יעד להקמת 40 גו"ט אלקטרוליזה בתחומי האיחוד + 40 גו"ט אלקטרוליזה במדינות שכנות לשם אספקת מימן ירוק לאיחוד.

### בחינת השפעת מגבלות Must-Run / Must-Take על קיטום סולארי

אחת המגבלות המקשה על האלגוריתם להשיג אחוזים גבוהים של אנרגיה סולארית בתמהיל, היא מגבלת Must-Run / Must-Take, כפי שהוגדר בפרק "הערכות מערך הייצור ל-40% אנרגיה מתחדשת". כפי שהוצג בפרק, המגבלה מאלצת הספק קונבנציונלי מינימלי ובכך גורמת לרמות קיטום (curtailment) משמעותיות של חשמל סולארי.

בכדי לאשש את השפעות הפתרונות שהוצגו מעלה להסרת מגבלות Must-Run / Must-Take, המודל הורץ עבור שנת 2030 בתרחיש הפחתה עם שילובים שונים של אילוצי Must-Run / Must-Take, וזאת על בסיס סיווג היחידות והספקים הרלוונטיים המופיעים בנספח א'. בתרשים הבא מוצגת כמות האנרגיה המושלכת בתרחישים השונים:

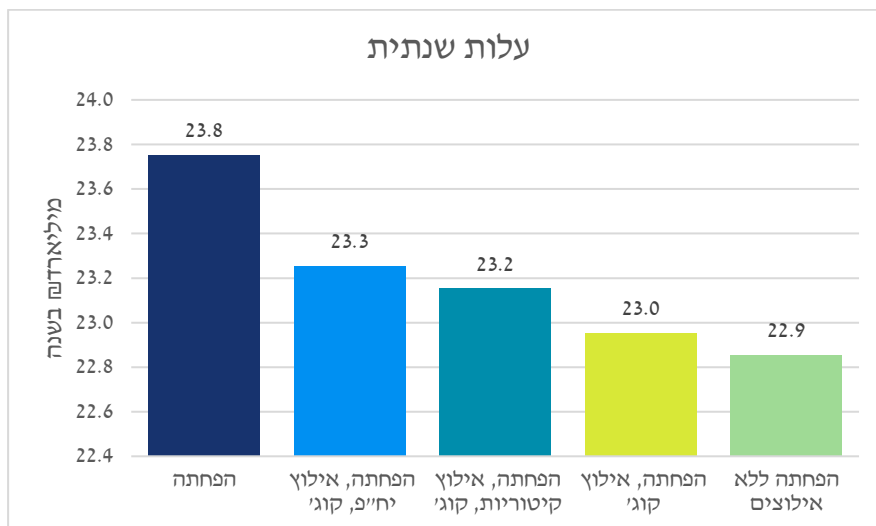
<sup>67</sup> התחזית חושבה על בסיס תחזיות של ה-IEA למחיר ונצילות ממוצעת של אלקטרוליזה בצירוף תחזיות לעלויות הקמה של PV שהתקבלו ממשרד האנרגיה.



בעמודה השמאלית מתוארת כמות האנרגיה המושלכת בתרחיש ההפחתה עם כל המגבלות על ההספק הקונבנציונלי. בעמודה השנייה יושמו רק מגבלות היח"פים בהסכמים בילטרליים ויחידות הקוגנרציה, בעמודה השלישית היחידות הקיטוריות והקוגנרציה, בעמודה הרביעית רק יחידות הקוגנרציה ובעמודה הימנית הוסרו כל המגבלות על ההספק הקונבנציונלי. ניתן לראות כי אם בעמודה השמאלית יהיה צורך להשליך כ-4% מסך הייצור הסולארי, הרי שללא כל מגבלות ההשלכה תוגבל ל-0.3% בלבד.

להשלכת כמויות כאלו של אנרגיה ישנה השלכה על העלות השנתית, משום שיש צורך להגדיל את התקנת המערכות הסולאריות ומערכות האגירה בכדי להשלים את האנרגיה המושלכת. להלן תחשיב העלות השנתית בתרחישים השונים:

תרשים 34 : סך עלות שנתית לפי תרחיש



ניתן לראות כי קיים פער של כמיליארד ש"ח בשנה בעלות משק החשמל בין התרחיש המתחשב בכלל מגבלות ה-Must-Run / Must-Take (העמודה השמאלית), לתרחיש ללא כל מגבלות (העמודה הימנית).

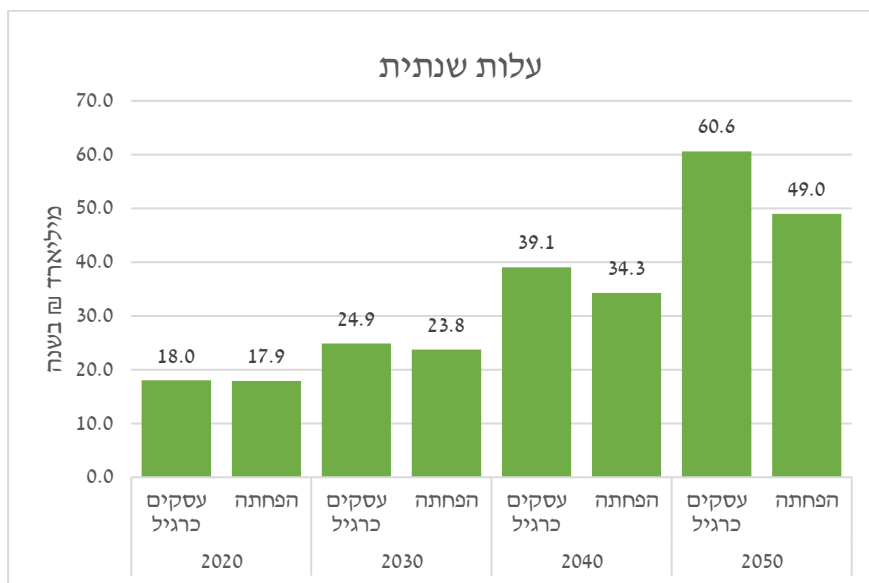
נסכם את ממצאי הבחינה:

1. מתווה מגבלות ה-Must-Run / Must-Take משפיע השפעה משמעותית על האנרגיה המושלכת, אחוז האנרגיה הסולארית בתמהיל ועלות הקוטייש – עד 4% סולאריים בשנת 2030, ולכן יש לבחון את האפשרות לצמצם מגבלות אלו עד כמה שאפשר.
2. ביטול המגבלות רק בעונות המעבר יכול גם הוא לסייע, אם כי התוספת צפויה להיות נמוכה משמעותית מאשר מתווה הפחתה מלא.
3. השפעה זו על משק החשמל – הגדלת כמות האנרגיה הסולארית המושלכת וכתוצאה ישירה מכך את עלויות ייצור החשמל המשקיות, נכונה לא רק לגבי הספק ה-Must-Run / Must-Take הקיים, אלא גם לגבי כל תוספת הספק עתידי בטכנולוגיה כלשהי המאלצת הספק בסיס קבוע.

## תוצאות כלכליות – מערך הייצור

בתרשים הבא ניתן לראות את תוצאות המודל הכלכלי המציג את העלויות המשקיות השנתיות למערך ייצור החשמל בתרחישים השונים:

תרשים 35: סך עלות שנתית, תרחיש "עסקים כרגיל" ותרחיש הפחתה



לעומת תרשים 35 לעיל, בו ההספקים המותקנים בתרחישי ההפחתה היו גבוהים משמעותית מההספקים בתרחיש הבסיס, הרי שבתחשיב הכלכלי העלות המשקית לתרחיש ההפחתה היא נמוכה מהעלות בתרחיש "עסקים כרגיל".

## יח. תוספת העלויות ברשת החלוקה

כפי שצוין בפרק "הערכות רשת החשמל בדגש על רשת החלוקה" מעלה, ניתן להתקין כמות משמעותית של מערכות PV במתח נמוך ומתח גבוה ללא שינויים מהותיים במערך ההגנות, בוויסות המתח ובתשתיות במתח נמוך ובמתח גבוה.

יחד עם זאת, על מנת לנהל את המערכת הארצית עם כמות כל כך גדולה של אנרגיה מתחדשת, יש צורך בתוספת מערכות תקשורת, ומערכות בקרה ושליטה על המתקנים של האנרגיה המתחדשת והאגירה.

בהנחה שהעלויות הנוספות במערכת השליטה והבקרה יהיו ברמת העלויות של מערכות DMS ו-ADMS הקיימות בחברת החשמל (מערכות הדומות למערכת הנדרשת לרשת החלוקה, אשר מוטמעות כיום ברשת ההולכה), נקבל תוספת עלות של כמיליארד ₪ בין השנים 2021 – 2030.

בהתחשב בעובדה שתוכנית הפיתוח של חברת החשמל ברשת החלוקה בשנים 2020-2025 תהיה כ- 7.1 מיליארד ₪<sup>68</sup>, ובהנחה נוספת שבשנים 2025 – 2030 הפיתוח יסתכם לעלות דומה, נקבל שעלות הפיתוח של רשת החלוקה בשנים 2021 – 2030 יהיה כ- 14.2 מיליארד ₪.

לפיכך, תוספת של כ-7% (מיליארד ₪) לתקציב הפיתוח של חברת החשמל בתחום החלוקה נראה סביר, אם ניקח בחשבון שתקציבי הפיתוח של מערכות היצור וההולכה אמורים לרדת בתרחיש ההפחתה ופיתוח רשת החלוקה "האקטיבית".

בנוסף, על מנת לעמוד ביעדים של תרחיש ההפחתה בשנים 2040 ו-2050, יש צורך בהחלפת חלק משנאי החלוקה (הכנסה לתפעול של שנאים עם מחליף דרגות), ובהכנת הרשת להתקנה משמעותית יותר של אנרגיה מתחדשת. ניתן יהיה להעריך את העלויות של השינויים הנ"ל בעוד כ-7-8 שנים, עם ההתפתחויות הטכנולוגיות בתחום רשת החלוקה "האקטיבית".

לסיכום, בעוד שאין צורך בהשקעות עודפות משמעותיות בתשתיות הקלאסיות של רשת החלוקה, ניהול מספר רב של מערכות PV ואגירה מבוזרות תחייב תוספות במערכות מחשוב, תקשורת, בקרה ושליטה של הפיקוח האזורי והארצי.

**המשמעות הכלכלית נאמדת בעלות של כמיליארד ₪ במשך 10 שנים. השקעה זו נדרשת הן בתרחיש "עסקים כרגיל" המניח 30% ייצור באנרגיות מתחדשות, והן בתרחיש ההפחתה המניח 40% אנרגיות מתחדשות ב-2030.**

יש צורך בהכנת דרישות טכניות חדשות להתאמת הרשת בתרחיש ההפחתה לשנים 2040 – 2050.

## יט. תוספת עלויות שליטה ובקרה

בכדי ליצור את היכולות הטכניות הנדרשות לשם שמירה על גמישות הייצור כאשר מערך הייצור מתקני אנרגיה מתחדשת מבוזרים, יש ליצור תוכנות שליטה ובקרה (Dispatchability) גם במתקנים מבוזרים קטנים ובינוניים.

עלותן של מערכות המאפשרות שליטה ובקרה מלאה על מתקן PV נאמדת בכ-300 עד 400 אלף דולר – עלות זניחה ביחס לעלות הקמה של מתקן PV גדול (100-50 מגו"ט), אך עלות כבדה מאוד ביחס לעלות ההקמה של מתקן PV קטן או בינוני.

על כן, מוצע להתקין ממסר תדר דיגיטלי, שעלותו נאמדת בכ-7 עד 10 אלף דולר, על כל מתקן הגדול מ-200 קו"ט. מתקנים הקטנים מהספק זה יחוברו יחדיו כמקבץ של 200 קו"ט לממסר תדר אחד ברמה האזורית / שכונתית. הממסר הדיגיטלי מאפשר ניתוק של המערכת מרשת החשמל כאשר התדר עולה או יורד ביחס לתדר התקין.

<sup>68</sup> חברת החשמל לישראל, דוח תקופתי לשנת 2019

ממסרי התדר יחוברו למערכות השליטה והבקרה עצמן במקבצים של כ- 50 עד 100 מגו"ט. באופן הזה, למרות שהשליטה על כל מערכת בודדת היא בינארית (ניתוק וחיבור בלבד) השליטה על המקבץ כולו, המורכב של מספר רב של מערכות, היא רציפה הלכה למעשה.

הונח כי לא נדרשת תוספת עלות משמעותית ביחס לעלות המתקן עבור מתקני Utility Scale, וזאת לאור הסברה כי כבר בשנים הקרובות מתקנים אלו יותקנו בצירוף ממירים חכמים המייתרים את הצורך בתוספות אלו.

לצורך הניתוח, הונח כי למנהל המערכת יש צורך בשליטה על 90% מסך ההספק הקיים לשם שמירה על גמישות ויציבות מערך הייצור. השליטה תיוצר על פי המדרג הבא: 100% מההספק שאינו PV (רוח וקונבנציונלי) יהיה בשליטת מנהל המערכת, ולאחר מכן מתקני אגירה ו-PV (בעדיפות למתקנים גדולים על פני מתקנים קטנים).

טבלה 20: שיעור ההספק הנשלט מתוך סך ספק הטכנולוגיה, לפי תרחיש

2050		2040		2030		2020		סוג הספק
תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	קונבנציונלי
100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	רוח
89%	82%	88%	82%	85%	82%	62%	62%	אגירה
89%	82%	88%	82%	85%	82%	62%	62%	PV
50%	59%	54%	62%	63%	66%	87%	87%	מתוך כד- utility
21%	32%	28%	38%	37%	34%	13%	13%	מתוך כד- commercial
29%	9%	18%	0%	0%	0%	0%	0%	מתוך כד - residential
90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	90%	<b>סה"כ הספק נשלט</b>

ההספק המותקן המחובר למערכות שליטה ובקרה בתרחישים השונים מפורט בטבלה להלן:

טבלה 21: הספק מחובר למערכות שליטה ובקרה, לפי סוג, תרחיש "עסקים כרגיל" ותרחיש הפחתה, מגו"ט

2050		2040		2030		2020		סוג הספק
תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	
17,055	27,102	14,367	20,559	13,107	15,161	13,555	13,610	קונבנציונלי
740	740	740	740	740	740	27	27	רוח
35,873	14676	21,648	11,595	12,376	9,169	2,275	2284	PV utility

2050		2040		2030		2020		סוג הספק
תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	
14,800	8,037	11,330	7,237	7,140	4,800	333	334	PV commercial
20,442	2,369	7,033	-	-	-	-	-	PV residential
44,317	5,360	21,965	3,700	4,682	2,878	3,71	371	אגירה
<b>133,226</b>	<b>58,285</b>	<b>77,082</b>	<b>43,831</b>	<b>38,045</b>	<b>32,749</b>	<b>16,561</b>	<b>16,626</b>	<b>סה"כ הספק נשלט</b>

מספר ממסרי התדר הנדרשים נאמד בהתבסס על ההנחה כי מתקני PV בגודל residential הם בהספק ממוצע הקטן מ-200 קו"ט, ועל כן יש צורך בממסר תדר לכל 200 קו"ט PV בפלח זה, בעוד שמתקני PV בגודל "commercial" הם בהספק ממוצע של כ-2.6 מגו"ט, ועל כן נדרש ממסר אחד לכל 2.6 מגו"ט במתקנים בפלח זה. הגודל הממוצע של מתקני אגירה הונח כ-5 מגו"ט.

טבלה 22: הספק מחובר למערכות שליטה ובקרה, לפי סוג, תרחיש "עסקים כרגיל" ותרחיש הפחתה, מגו"ט

2050		2040		2030		2020		יח'	סוג הספק
תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל		
116,766	16,009	43,914	3,524	3,682	2,422	202	203	מס'י	מספר מערכות ממסר צפויות
1,298	581	739	430	342	314	190	191	מס'י	מספר מערכות שליטה ובקרה צפויות

ועל כן, העלות השנתית למערכות שליטה ובקרה הן:

טבלה 23: עלות שנתית למערכות שליטה ובקרה, לפי סוג, תרחיש "עסקים כרגיל" ותרחיש הפחתה

2050		2040		2030		2020		יח'	סוג הספק
תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל		
82,609,518	37,003,898	47,038,769	27,354,509	21,781,390	20,008,620	12,122,378	12,169,880	שח/שנה	עלות שנתית מערכות שליטה
180,471,285	24,743,381	67,872,587	5,445,945	5,691,406	3,743,333	312,698	313,126	שח/שנה	עלות שנתית

2050		2040		2030		2020		יח'	סוג הספק
תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל		
									ממסר תדר
0.263	0.062	0.115	0.033	0.027	0.024	0.012	0.012	מיליארד ₪ / שנה	סה"כ עלויות שנתיות

בערך נוכחי עד 2030 מדובר על עלות עודפת למשק של כ-0.02 מיליארד ₪ וכ-0.9 מיליארד ₪ עד 2050 :

טבלה 24: ערך נוכחי נקי

תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	פרמטר
0.18	0.16	ערך נוכחי נקי עד שנת 2030
1.49	0.57	ערך נוכחי נקי עד שנת 2050

### כ. סיכום תוצאות ניתוח כלכלי ליישום היעדים

סך הערך הנוכחי של יישום היעדים עד 2030 נאמד בכ-5.7 מיליארד ₪ תועלת עודפת למשק. הערך הנוכחי של יישום היעדים עד 2050 נאמד בכ-65.32 מיליארד ₪ תועלת עודפת למשק.

טבלה 25: עלות (תועלת) למשק (ענין) מיישום מפת הדרכים, לפי רכיב ותרחיש, מיליארד ₪

ערך נוכחי נקי עד שנת 2050			ערך נוכחי נקי עד שנת 2030			(מיליארד ₪)
תועלת עודפת	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	תועלת עודפת	תרחיש הפחתה	תרחיש עסקים כרגיל	פרמטר
66.24	579.22	645.46	5.73	196.04	201.77	מערך הייצור
-	1	1	-	1	1	השקעות ברשת
-0.93	1.49	0.57	-0.02	0.18	0.16	ניהול ובקרה
65.32	581.71	647.03	5.71	197.22	202.93	סה"כ

כל זאת כולל התייחסות להשלכות הכלכליות על מערך הייצור ועל רשת החלוקה. יש לציין כי ערכים אלו אינם כוללים את החיסכון בהשקעות ברשת הולכת החשמל הצפוי כתוצאה מייצור סמוך לצריכה והפחתת הצורך בפועל בהולכת החשמל.

# הסרת חסמים בפני הטמעת מערכות סולאריות במרחב המבונה



## עיקרי הפרק

**מטרות הפרק:** זיהוי החסמים הכלכליים, רגולטוריים, תכנוניים וסטטוטוריים המהותיים ביותר בפני הטמעת מערכות סולאריות במרחב המבונה וגיבוש אמצעים ופתרונות להסרתם.

**מסקנות עיקריות:** החסמים העיקריים שזוהו הם:

- חסמים כלכליים הנובעים מחוסר וודאות ארוכת-טווח באסדרות הקיימות לגגות קטנים, רגולציה שנקבעה בהתאם לגגות מבנים בלבד, ללא התייחסות לשטחים דואליים (כגון פטור מהיטל השבחה, תעריפי ארנונה ועוד).
- חסמים תכנוניים וסטטוטוריים הקשורים בהיתרי בניה וקביעת מערכות סולאריות כשימושים מותרים בשטחים דואליים.
- חסמים רגולטוריים הקשורים להליכי הרישום והחיבור של מתקנים סולאריים.
- חסמים ייעודיים לרשויות מקומיות.

## כא. הקדמה

מימוש פוטנציאל הייצור הסולארי במרחב המבונה בפועל, מחייב התקנה של מערכות סולאריות על מגוון רחב של מבנים ושטחים – החל ממבנים קיימים מסוגים שונים וכלה בשטחים שונים שיש לקרות אותם. נוסף על הפערים בסוג המבנה/נכס, ישנם פערים משמעותיים במבנה הבעלות. חלק מהנכסים נמצאים בבעלות של משקי בית, חלק בבעלות של גופים מסחריים ותעשייתיים וחלק בבעלות ציבורית. העובדה כי חלק מהנכסים נמצאים בבעלות משותפת, כגון גגות של בנייני דירות, מוסיפה עוד רובד מורכבות. לכל אחד מהנכסים והשטחים הללו, קיימת רגולציה וסטטוטוריקה שונה, אשר יכולה לייצר חסמים שונים למימוש פוטנציאל הייצור הסולארי.

ב-2016, בהתאם להחלטת ממשלה מס' 1403 משנת 2015, הוקם צוות בין-משרדי בראשות מנכ"ל משרד האנרגיה, במטרה לבחון חסמים העומדים בפני הקמת מתקני ייצור באנרגיות מתחדשות, ולגבש המלצות להסרתם. בין החסמים שנבחנו – רישוי מתקנים, קשיים בירוקרטיים, פיתוח טכנולוגיות חדשות ועוד. במקביל לפעילות הצוות, משרד האנרגיה קיים הליך שיתוף ציבור בדבר החסמים והפתרונות האפשריים. בין המלצות הצוות נמנו פטור מארנונה והיטלי השבחה, ביטול הצורך בפתיחת תיק במס הכנסה ועוד.

החסמים נבחנו מחדש, לאחרונה, על ידי צוות של משרד האנרגיה ורשות החשמל וזאת במסגרת היועצות השר עם רשות החשמל בדבר הגדלת היעד לייצור חשמל באנרגיה מתחדשת מ-17% ל-30% בשנת 2030. תהליך זה כלל שיתוף ציבור וסיכום של החסמים העיקריים כמו גם המלצות על שורה של אמצעים פורסמו לשימוע ציבורי.

מטרת עבודה זו היא לבנות על הליך שיתוף הציבור שבוצע על ידי משרד האנרגיה ורשות החשמל, וזאת בשיתוף גורמי מקצוע מענף הסולארי כמו גם רשויות מקומיות וגורמי תכנון, תוך התמקדות בחסמים בפני הקמת מערכות סולאריות בתוך המרחב המבונה. שיתוף הציבור שבוצע על ידי משרד האנרגיה ורשות החשמל היווה בסיס לעבודה זו ובמקרים רבים מסקנות העבודה מחזקות ומוסיפות על המסקנות שפורסמו על ידי רשות החשמל.

## כב. שיטת עבודה

במסגרת עבודה זו, התקבלו מרשות החשמל 300 תגובות מהליך שיתוף הציבור שביצעה, מגופים שונים לרבות חברות אנרגיה מתחדשת, רשויות מקומיות, עמותות, ועוד.

תחילה, סווגו החסמים לפי קטגוריה - חסמים כלכליים, חסמים תכנוניים/סטטוטוריים, וחסמים רגולטוריים. החסמים העיקריים זוהו בהתאם לשני קריטריונים עיקריים: ראשית, מידת החזרתיות של החסם, קרי, מספר התגובות שהצביעו על אותו חסם. כאשר חסמים להם חזרתיות גבוהה יותר הוגדרו כחסמים מהותיים יותר.

הקריטריון השני התבסס על שיעור פוטנציאל התקנה במרחב המבונה בכל סוג מבנה אשר מושפע מאותו חסם, וזאת על בסיס עבודת המשרד להגנת הסביבה ל'בחירת הפוטנציאל לייצור סולארי במרחב המבונה'. עבודה זו בחנה את פוטנציאל הייצור במרחב המבונה של זרמים שונים כגון גגות מבנים, חזיתות מבנים, קירוי חניות, כבישים ועוד. חסמים שזוהו כבעלי השפעה על זרמים בעלי פוטנציאל ייצור רב יותר הוגדרו כחסמים מהותיים יותר.

על בסיס שני הקריטריונים הנ"ל, גובשה רשימת חסמים עיקריים ראשונית, אשר שימשה בסיס לדיון עם אנשי מקצוע ועם גורמים בשוק. בשלב זה, בוצעו דיונים עם גורמים שונים בשוק כגון איגוד חברות לאנרגיה ירוקה,

נתיבי ישראל, נציגי מרכז השלטון המקומי ופורום ה-15, וחברות ניהול פרויקטים והתקנה למערכות. מטרת דיונים אלו הייתה אישור את רשימת החסמים שזוהו, בחינת הסוגיות המהותיות מאחורי כל חסם, בחינת מהות ורמת ההשפעה של כל חסם, זיהוי חסמים נוספים עבור כל זרם במרחב המבונה, ודיון בפתרונות ואמצעי מדיניות מתאימים.

לבסוף, בוצע טיוב לרשימת החסמים העיקריים, תוך הטמעת הערות השוק וגורמי המקצוע לחסמים המהותיים ביותר אשר יש לפתור אותם בשנים הקרובות בכדי לאפשר ניצול מרבי של המרחב המבונה לטובת התקנות מערכות סולאריות.

## כג. חסמים כלכליים

### חסמים כלכליים הנובעים מאסדרות תעריפיות

#### חוסר וודאות ארוכת טווח

הקמת מערכות סולאריות על גגות נעשית במסגרת אסדרות תעריפיות והליכים תחרותיים של רשות החשמל המבוססים על מכסות. האסדרות שמפורסמות נמשכת עד מועד שנקבע או עד תום ניצול המכסה, לפי המוקדם מביניהם, ללא מתן וודאות בדבר מועד פרסום מכסה ו/או מכרז נוספים, ההספק שיורשה להשתתף, וגובה התעריף שיינתן (במקרה של אסדרות).

חוסר וודאות זה מהווה חסם משמעותי במיוחד עבור מספר פלחי שוק:

a. חוסר הוודאות מונע השקעות ארוכות טווח בקידום ופיתוח שווקים חדשים על ידי חברות במשק (דוגמת מאמצים ממוקדים במגזר הביתי).

b. חוסר הוודאות פוגע ביכולת של רשויות מקומיות להשתתף באסדרות תעריפיות ובתהליכים תחרותיים. בשונה מהמגזר העסקי שביכולתו לקבל החלטות עסקיות באופן מהיר, הליך קבלת ההחלטות ברשויות מקומיות כרוך במקרים רבים בהליכים מכרזיים ארוכים, שכירת שירותי ייעוץ לבדיקת היתכנות הפרויקט, סבב אישורים ועוד. משך הזמן והבירוקרטיה הנדרשת, מביאים את הרשות המקומית לכך שאינה מספיקה לגשת לאסדרות תעריפיות אשר קצובות בזמן ולהליכים המכרזיים.

תוכנית רב-שנתית לפרסום הליכים תחרותיים באופן תכוף, תאפשר לרשות להתקדם בהליכי הבדיקה, הרכש והאישור הנדרש, בידיעה שאם לא תספיק לגשת להליך המכרזי הקרוב ישנם מספר הליכים הבאים אחריו בטווח זמן סביר.

**ראשית, המשרד מצטרף להמלצת רשות החשמל לקידום אסדרות ארוכות טווח בתעריפים קבועים אשר יעודכנו אחת לתקופה בהתאם לשינויים במחירי המערכות.**

יחד עם זאת, יודגש כי מידת הוודאות תלויה במידת השקיפות של מנגנון עדכון התעריף, ויש לגבש מנגנון אשר יהיה שקוף וברור לציבור באופן שיאפשר לשוק לחזות את התעריף הצפוי בכל שנה.

**שנית, מוצע לפעול לגיבוש ופרסום תוכנית רב-שנתית אשר תפרוט את האסדרות/מכרזים המתוכננים לשנים הקרובות, באופן שייצר וודאות לרשויות מקומיות וגופים בהם הליכי התכנון ארוכים.**

אמצעי נוסף חשוב אשר יגביר את מידת הוודאות לשוק הוא חיוב התקנת מערכות סולאריות על גגות מבנים חדשים. חיוב זה ייצור וודאות מרבית לענף ההתקנה בדבר הביקוש לשירותיו בכל הקשור לסוגי המבנים שיחויבו בפועל. במסגרת גיבוש מפת הדרכים למשק דל פחמן בתחום ערים ומבנים, הוחלט בשיתוף משרד האנרגיה לחייב מבנים חדשים רבים להיות מאופסי אנרגיה, קרי, ליישם אמצעים מתקדמים להפחתת צריכת האנרגיה של המבנה, ואספקתה באמצעות אנרגיה מתחדשת.

**המשרד מצטרף להמלצת רשות החשמל לבחון הסדרי חקיקה שיחייבו הקמה של מתקני PV על גבי גגות מבנים חדשים כחלק אינטגרלי מהמבנה. יחד עם זאת, יודגש כי יש לעשות זאת באופן שמשלים ומרחיב את החובה ביחס לחובת האיפוס האנרגטי.**

**עוד מומלץ לחייב התקנת מתקנים סולאריים על גבי גגות מבנים ציבוריים גדולים במגזר הציבורי, ובפרט על גבי מוסדות חינוך.**

## **שינויים בגודל ההספק המותר במסגרת האסדרה עלולים להביא לניצול חלקי של הגג**

עד כה, האסדרה עבור גגות קטנים נועדה תחילה לכל המערכות על גגות בהספק של עד 100 קו"ט, כאשר מערכות שבהספק של עד 15 קו"ט קיבלו תעריף של 48 אג' לקוט"ש, ומערכות שבהספק בין 15 קו"ט ל-100 קו"ט קיבלו תעריף של 45 אג' לקוט"ש. ב-2018, האסדרה עודכנה במסגרת הוראת שעה שהגדילה את הספק המתקנים הזכאיים לתעריף (הנמוך) ל-200 קו"ט. עד לפרסום הוראת השעה, חברות וגופים שבראשותם גגות המאפשרים הקמת מתקנים שגודלם חרג מ-100 קו"ט יכלו לנצל רק את שטח הגג הנדרש להקמת מערכת בהספק של 100 קו"ט (ניצול חלקי של הגג), או לנצל גם את יתרת השטח בהליכים תחרותיים או באסדרות אחרות כגון אסדרת ברירת המחדל – בתעריף נמוך משמעותית מהתעריף הניתן באסדרת הגגות (16 אג' לקוט"ש).

הוראת השעה אם כן אפשרה מחד למערכות גדולות יותר לקום במסגרת האסדרה (תהליך המקנה הן וודאות רבה יותר והן תעריף גבוה יותר ביחס להשתתפות בהליך תחרותי), ומאידך עודדה חברות וגופים שתכננו להקים מערכות מונחות גג במסגרת האסדרה, לנצל באופן מלא את שטחי הגג שברשותם. מעדויות שהתקבלו מהשוק שינוי זה הביא להקמת הספק משמעותי של מערכות בתוך המרחב המבנה.

עם זאת, תוקפה של הוראת השעה נקבע עד תום שנת 2020, שכן מטרתה הייתה לסייע בעמידה ביעד לייצור 10% מצריכת החשמל באנרגיה מתחדשת בשנה זו. בינואר 2021, פרסמה רשות החשמל החלטה בדבר קביעת תעריף למתקני ייצור קטנים.

לפי האסדרה החדשה, התעריף שישולם למתקן מה-1.3.2021, ישוקלל בהתאם להספק המתקן המבוקש. התעריף הסופי למתקן משקלל את התעריף עד 15 קו"ט ל-15 קו"ט הראשוניים (48 אג'), את התעריף של עד 100 קו"ט ל-85 קו"ט הבאים (41 אג') ואת התעריף של ההליך התחרותי האחרון למתקני גגות, בתוספת של 4% וללא הצמדה על יתרת ההספק אשר לא יעלה על 630 קו"ט (18.91 אג' על פי תוצאות ההליך התחרותי האחרון המפורסם במועד קבלת ההחלטה)<sup>69</sup>.

<sup>69</sup> (רשות החשמל, 2020) - [https://www.gov.il/BlobFolder/policy/59701/he/Files\\_Hachlatot\\_59701.pdf](https://www.gov.il/BlobFolder/policy/59701/he/Files_Hachlatot_59701.pdf)

הצעד החדש נועד לתת מענה למתקנים מונחי גגות בהספק הגדול מ-100 קו"ט, תוך ניצול יתרון הגודל מבלי לחייבם לגשת למכרז.

יחד עם זאת, על פי העדויות הראשוניות שהתקבלו מהשוק, האסדרה קובעת מדרג תלול לירידת התעריף המשוקלל הניתן למתקנים בהספק שונה באופן שפוגע בכדאיות הכלכלית של מתקנים בהספק העולה על 100 קו"ט, וצפוי לגרום בפועל לכך שינוצלו רק שטחי גגות בהספק הקרוב ל-100 קו"ט.

**על כן, מוצע לבחון מדרג מתון יותר לירידה בתעריף עבור מתקנים מעל 100 קו"ט אשר משמר מחד את היתרון של האסדרה המבטל את הצורך בגישה למכרז, אך שומר על הכדאיות הכלכלית גם עבור מתקנים בהספק הגדול מ-100 קו"ט מאידך.**

סוגיה זו חשובה אף היא עבור רשויות מקומיות, כאשר לפי מרכז השלטון המקומי, קיים פוטנציאל משמעותי לניצול גגות לשם הקמת מתקני PV בהספק הגדול מ-100 קו"ט בנכסי הרשויות.

מאז כתיבת העבודה ובטרם פרסומה, רשות החשמל פרסמה החלטה בעניין תעריף המשך למתקני ייצור חשמל בטכנולוגיה פוטו-וולטאית לצריכה עצמית והעברת עודפים לרשת. ההחלטה כוללת העלאה של התעריף המשוקלל למתקנים הגדולים מ-100 קילוואט, באמצעות הוספת מדרגת תעריף נוספת למתקנים בין 100 ל-300 קילוואט בגובה 24.5 אגורות. נוסף על כך, רשות החשמל האריכה את האסדרה לתקופה של שנתיים לכלל המתקנים בכל סוגי השימוש הדואלי.

## **חוסר כדאיות עסקית להקמת מתקנים על גגות קטנים (מתחת ל-10 קו"ט)**

התעריף לגגות קטנים חל על מערכות עד הספק של 15 קו"ט, אך בפועל מצדיק לרוב הקמה של מערכות הגדולות מכ-10 קו"ט בלבד. חוסר הכדאיות לפלח השוק הקטן מ-10 קו"ט (פלח בו נמצאים בתי מגורים רבים) נובע ממספר סיבות המובאות להלן-

- a. מעבר לעלות הפאנלים הסולאריים עצמם, קיימות עלויות נוספות כגון עלויות משתנות (ביטוח, תחזוקה, בדיקות שונות) ועלויות קבועות (הובלה, רישיון, הגשת הרישום לחח"י ועוד). תקורות אלו הופכות לרכיב מאוד משמעותי ומגדילות באופן ניכר את העלות לקו"ט מותקן ככל שהמתקן קטן.
- b. קיימת מכסה מוגבלת בשוק, והחברות הסולאריות משקיעות בפלחי שוק בהם קל להן יותר לקדם פרויקטים סולאריים (כך למשל, כתוצאה מאי הסכמת דיירים, ריבוי לקוחות קטנים, סוגיות של אסתטיקה ועוד, חברות אינן משקיעות את עיקר המאמצים שלהן בסקטור הביתי). חוסר הרצון של חברות ההתקנה לפעול במגזרים אלו גרם לכך, על פי העדויות מהשוק, שאפילו ירידת המחירים הדרמטית בעלות הפאנלים בשנים האחרונות לא התבטאה בירידת המחיר לצרכן בפלח שוק זה.
- c. במקרים רבים מדובר במשקי בית אשר מקבלים החלטות על פי אופק השקעה קצר ביחס לאופק ההשקעה של המדינה בפרויקטים בעלי חשיבות לאומית. על כן, גם במקרים בהם הקמת המתקן כדאי למשק הלאומי, לעיתים התזרים אינו מייצר החזר השקעה אטרקטיבי מספיק למשק הביתי.

שני אמצעים שהוצעו מעלה, חיוב התקנה של מערכות PV על גבי גגות מבנים חדשים ופרסום אסדרות תעריף ארוכות טווח, יחייבו חברות לפעול בפלח השוק הביתי מחד וייצרו וודאות המעודדת השקעות בפיתוח פלח שוק זה מאידך. כתוצאה מכך, צפוי שהמחירים ירדו לכל הפחות בהתאם לירידת מחיר הפאנלים.

נוסף על כך, מוצע לבחון מנגנון תעריפי ייעודי לגנות בהספק הקטן מ-10 קו"ט במטרה לגשר באופן יצירתי על הפער בין אופק ההשקעה הקצר של משקי בית לבין אופק ההשקעה הארוך בפרויקטים לאומיים, תוך קיצור החזר ההשקעה למשקי בית מבלי לבטל את כדאיות המתקן למשק (לדוגמה, על ידי הגדלת התעריף המשולם בשנים הראשונות על חשבון גובה התעריף המשולם בשנים מאוחרות יותר).

## תעריף האסדרה אינו מתאים לקירוי שטחים בשימושים דואליים

שטחים בהם ניתן לבצע שימוש דואלי ולהתקין מערכות סולאריות (חניונים, בתי עלמין, פארקים, ועוד), מהווים כ-50% מסך הפוטנציאל הטכני שזוהה במסגרת עבודת המשרד להגנת הסביבה לבחינת הפוטנציאל לייצור סולארי במרחב המבונה.

הקמת מערכות סולאריות בשטחים אלו, היא ייחודית מאחר והיא דורשת הקמת סככות (קונסטרוקציה) לקירוי אשר עליהן תותקן המערכת הסולארית. עלויות אלו אינן מגולמות בתעריפים הקיימים היום וכתוצאה מכך (וכתוצאה מחסמים נוספים המתוארים להלן), פוטנציאל חשוב זה נותר כמעט ולא מנוצל בפועל.

### מוצע גם בהקשר זה לפעול בשני מישורים עיקריים:

- לבחון גיבוש אסדרה ייעודית ו/או מכרזים ייעודיים למתקנים המוקמים בשטחים מבונים המחייבים קירוי.
- לבחון הסדר חקיקתי לחיוב קירוי סולארי שטחים מבונים ספציפיים ובפרט בחניונים ובבתי עלמין.

## היעדר פטור קבוע מהיטל השבחה

היטל השבחה הוא מס המוטל על קרקע או נכס שבעליו מעוניינים לשפר את שוויו. היטל השבחה נגבה כיום מתוקף תמ"א 10/ד/10 להקמת מתקני PV.

בשנת 2018, ועדת הפנים והגנת הסביבה של הכנסת אישרה סעיף במסגרת חוק ההסדרים המעניק פטור מהיטל השבחה למערכות סולאריות לצריכה עצמית על גגות עד 7,000 מ"ר (לעומת הפטור הקודם שניתן עד 200 מ"ר). הפטור צפוי להסתיים בתום שנת 2020. היטל השבחה הנגבה ממערכות סולאריות המשמשות לייצור עצמי פוגע בכדאיות הכלכלית של המערכות, וסיום תוקפו של הפטור מציב אי-וודאות רבה עבור השוק.

יתרה מכך, כיום הפטור מהיטל השבחה אינו חל על שטחים מבונים שאין להם גג, ולכן שטחים שניתן להסב לשימושים דואליים ולקרות במערכות סולאריות אינם פטורים מהיטל זה, גם אם המתקנים משמשים לצריכה עצמית.

לאחרונה, במסגרת החלטת הממשלה על הגדלת יעדי האנרגיות המתחדשות ל-30% בשנת 2030, הוארך הפטור מהיטל השבחה עד לשנת 2025. עוד נקבע כי הפטור יינתן גם למתקנים על מאגרי מים, מאגרי קולחין ובריכות דגים. יתר השימושים הדואליים מחויבים בהיטל השבחה.

מוצע לבחון הרחבת הפטור הקיים מהיטל השבחה למערכות שאינם לצרכי רווח גם בשימושים דואליים (כגון קירוי חניונים, בתי עלמין, כבישים ועוד), עד ל-7,000 מ"ר באופן דומה לפטור הקיים היום.

## תעריפי ארנונה לשימושים דואליים

בעבר, כל רשות גבתה תעריפי ארנונה על ניצול שטח לטובת התקנת מערכות סולאריות בהתאם לשיקול דעתה, ובכך מתקנים היו חשופים לתעריפים משתנים, ולעיתים גבוהים משמעותית באופן שפוגע בכדאיות הכלכלית של המתקן. על כן, ועדת הכספים של הכנסת קבעה באמצעות תקנות ההסדרים במשק המדינה (ארנונה כללית ברשויות מקומיות) מתן פטור מתשלום ארנונה למערכות סולאריות על גגות ומערכות קרקעיות עד 200 מ"ר. מערכות שאינן מונחות על גג מבנה אלא על קונסטרוקציה - אינן מוגדרות כמערכות סולאריות על גגות ולכן אינן זוכות לפטור זה. על מערכות המוקמות על גגות ומערכות קרקעיות בעלי שטח רב מכך נקבע מדרג של תעריפים נומינליים שנועדו להסדיר את תשלום הארנונה באופן אחיד ולהבטיח כי תעריפים אלו יהיו נמוכים ויעודדו התקנה של מערכות סולאריות. יחד עם זאת, עבור שימושים דואליים, כלומר כל מערכת שאינה מונחת גג או מערכת קרקעית, כגון חזיתות, קירוי שטחים מבוניים כגון חניות, בתי עלמין ועוד, טרם נקבעו תעריפים כאלו ומתקנים אלו נותרו חשופים לתעריפי ארנונה משתנים כתלות ברשות המקומית.

**מוצע לפעול לתקנון תקנות ההסדרים במשק המדינה (ארנונה כללית ברשויות מקומיות, תשס"ז 2007), לקביעת תעריפי ארנונה אחידים למערכות סולאריות, לרבות מערכות שאינן מוקמות על גגות מבנים.**

**יתרה מכך, יש לפעול להרחבת פטור מתשלום ארנונה למערכות סולאריות בשימושים דואליים (מערכות שאינן על גגות או קרקע) המשמשות לצרכי עצמית עד 200 מ"ר באופן דומה לנקבע בתקנות עבור מערכות על גגות ומערכות קרקעיות.**

## קביעת שומת קרקע למתקנים סולאריים לפי שטח

שומת מקרקעין היא אומדן כספי של שווי זכויות במקרקעין לתאריך נתון. בהתאם לחוק רשות מקרקעי ישראל (תש"ד, 1960), רמ"י אחראית להקצאה וניהול קרקעות המדינה, כאשר מועצת מקרקעי ישראל בראשות שר האוצר קובעת את מחיר חכירת הקרקעות, על בסיס שומת הקרקע שנקבעת בהתאם לכללי השמאי הממשלתי (אגף שומת מקרקעין במשרד המשפטים). בעבר, עבור כל מתקן סולארי נקבעה שומת קרקע פרטנית.

במסגרת החלטת ממשלה 1403 נקבע כי שר האוצר, בתפקידו כיו"ר מועצת מקרקעי ישראל, יביא בפני מועצת מקרקעי ישראל הצעת החלטה לקביעת מחיר אחיד להקצאת קרקע להקמת מתקנים לייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות, בהתחשב בסוג המיזם וייעוד הקרקע ועל פי כללים שייקבעו על ידי השמאי הממשלתי הראשי.

סעיף 7.3.4 להחלטות מועצת מקרקעי ישראל קובע כי בעד הקצאת קרקע למיזם של אנרגיה סולארית, ישולמו דמי חכירה מהוונים מלאים על פי שומה. עם זאת, בהקצאת קרקע שבה התעריף לייצור חשמל נקבע בתהליך תחרותי שביצעה רשות החשמל, ישולם מחיר אחיד לקרקע לתקופת המיזם<sup>70</sup>.

ב-2018, החליטה מועצת מקרקעי ישראל לקבוע מחיר אחיד להקצאת קרקעות למתקנים לייצור באנרגיות מתחדשות. עד לאחרונה, מחיר זה נקבע עבור יח' שטח במונחי דונם קרקע. לאחרונה, רמ"י קבעה מחיר שומת הקרקע למתקנים סולאריים על בסיס מחיר למגווי"ט. כלומר, ככל שהספק המערכת גדול יותר כך היזם ישלם יותר על הקרקע. החלטה זו עלולה ליצור תמריץ שלילי להתייעלות בניצול השטח לטובת התקנת המערכות.

<sup>70</sup> <https://www.mevaker.gov.il/sites/DigitalLibrary/Documents/2020/71A/2020-71A-103-Delek.pdf>



ייתכן וחברות יימנעו מלהתקין יותר הספק ליח' שטח אם הן ידרשו לשלם על כך מחיר שומה גבוה יותר, באופן שפוגע בכדאיות הכלכלית מייצור החשמל.

**מוצע להטיל על רמ"י לקבוע את מחיר שומת הקרקע למתקנים קרקעיים על בסיס מחיר ליח' שטח.**

יתרה מכך נקבע כי על רשות מקרקעי ישראל לבחון הקלות לדו-שימושיות בקרקע לשם עידוד הקמת מתקנים לאנרגיות מתחדשות בכפוף לכל דין. הקלות אלו טרם ניתנו עבור קרקעות דו-שימושיות.

**מוצע לקבוע כי על רשות מקרקעי ישראל לבחון ולהציג תוכנית למתן הקלות בשומת קרקע למתקנים דואליים בהתאם החלטת ממשלה 1403.**

## **כד. חסמים רגולטוריים**

### **הליכי רישום וחיבור מערכות סולאריות**

חברת החשמל אמונה על רישום וחיבור מערכות סולאריות לרשת החשמל, כאשר אמות המידה הנקבעות על ידי רשות החשמל מגדירות לחברת החשמל את תהליך הרישום והחיבור ומשך הזמן הנדרש לצורך החיבור. לפי אמות המידה, המחלק יתחייב לחיבור המתקן או לשילוב המתקן, לרבות שילוב במסגרתו מבוקש להגדיל חיבור, ולהרמת האנרגיה לרשת בתוך 6 חודשים ממועד מתן התשובה, אלא אם מדובר במתקן בחיבור קיים לרשת נמוך (ועל כן יחובר המתקן תוך 90 ימי עבודה ממתן התשובה) או שילוב מתקן בחיבור קיים לרשת מתח גבוה (ועל כן יחובר המתקן תוך 120 ימי עבודה ממתן התשובה)<sup>71</sup>.

חיבור המתקנים לרשת נעשה לאחר ביצוע סקר היתכנות ראשוני הבוחן את יכולת הרשת לקלוט את ההספק שייצר המתקן שאותו מבקשים לחבר.

בפועל, משך זמן רישום וחיבור מערכות סולאריות אורך זמן רב ביחס לאמות המידה, במקרים מסוימים יכול להגיע אף לשנה, ובמצב של בקשות להקמת מערכת סולארית החורגת מגודל החיבור הקיים, משך הטיפול יכול לקחת אף יותר. עם הגדלת יעדי האנרגיות המתחדשות וביזור הייצור במרחב המבונה, חברת החשמל תידרש להתמודד עם מורכבויות ועם השקעת משאבים רבים לטיפול במספר מערכות אשר ילך ויגדל.

בין היתר, אחת הסיבות למשך הטיפול הארוך היא שהמעוניינים בחיבור מערכות סולאריות נדרשו להגיש את כלל המסמכים באופן פיזי לתיבה במחוז, כאשר לעיתים בקשות אלו אבדו ולא הגיעו לגורם הרלוונטי. יתרה מכך, משך המענה לבקשות, בין אם חסרים מסמכים או בין אם מדובר בהמשך טיפול ותיאום מועדי החלפת מונים, אישורי קבלת מכסות ועוד, התארך עד מאוד. לאחרונה, עם השפעות הקורונה, חברת החשמל ביצעה מהלכים משמעותיים שהקלו על חברות להגיש בקשות לחיבור, כגון הגשת בקשות והסכמים במייל אלקטרוני וייעול הטיפול בבקשות. יש לפעול להמשך מצב זה, תוך ייעול ההליכים ומעבר לתהליכים דיגיטליים מתקדמים, גם בתקופות שאינן תלויות בהגבלות קבלת קהל, בכדי להקל על מגישי הבקשות ולייעל את התהליך.

**מוצע לפעול לבחינת ייעול ושכלול הליכים לרישום, חיבור והגדלת גודל החיבור למערכות סולאריות על ידי מעבר להליכים דיגיטליים, זאת באמצעות מערכת אחודה ונוחה המתכללת את כלל התהליך ( One port**

<sup>71</sup> [https://www.gov.il/BlobFolder/policy/d57203\\_35/he/Files\\_Hachlatot\\_57203\\_clear.pdf](https://www.gov.il/BlobFolder/policy/d57203_35/he/Files_Hachlatot_57203_clear.pdf)



call). יש להטיל על חברת החשמל להגיש תוכנית לצמצום זמני החיבור והשוואתם למקובל במדינות המפותחות.

יתרה מכך, על רשות החשמל לבחון מחדש את אמות המידה הקיימות המגדירות את משך הזמן לחיבור המתקנים ולוודא כי אמות המידה עומדות בסטנדרט המקובל במדינות מפותחות. על רשות החשמל לאכוף אמות מידה אלו ולוודא כי חברת החשמל אינה חורגת מהן.

## כה. תכנון וסטטוטוריקה

### חובת היתר בנייה למערכות סולאריות

חוק התכנון והבנייה (תשכ"ה 1965) הגדיר את הצורך בהיתר בנייה כאישור הניתן על ידי הוועדה המקומית לתכנון ובניה לביצוע עבודות בנייה, הריסה, או שינוי בשימושי מקרקעין. קיימת חובה לקבל היתר בעת ביצוע אחת מהעבודות הבאות: הקמה/הריסה של בניין, כל תוספת או שינוי חיצוני לבניין: חנייה, גדר, פרגולה, סככה, תוספת בנייה, שינויים פנימיים שפוגעים בקונסטרוקציה, שינוי בשימושים ביחס להיתר הקיים, הצבת מבנה זמני, כל מבנה כפי שמוגדר בחוק ועוד. זאת למעט מקרים הפטורים מהיתר, כפי שנקבעו במסגרת תקנות התכנון והבנייה (עבודות ומבנים הפטורים מהיתר - תשע"ד 2014).

היתר בנייה, נועד להבטיח בראש ובראשונה כי הבנייה מתוכננת בהתאם לתוכנית המתאר. כמו כן, הוא נועד לוודא התאמה למדיניות הרשות המקומית (בעיקר היבטים של השתלבות במרחב המבונה בתחומי הרשות), עמידה ברגולציה קיימת (ובכלל זה רגולציה בתחומי הבטיחות, כבאות אש, פיקוד העורף, בריאות, סביבה וכדומה). כלומר, מדובר בכלי רגולטורי המתכלל נושאים רבים ומאפשר אסדרה ופיקוח על הבנייה.

היתר הבניה למערכות סולאריות, ניתן על ידי רשות הרישוי של הוועדה המקומית לתכנון ובנייה וקבלת ההיתר מותנית בשורה של דרישות כגון בדיקות ואישור חתום על ידי מהנדס קונסטרוקציה, לרבות צירוף מסמכים וחישובים, מפרט טכני של חלקי המערכת ושרטוטים מפורטים של המבנה והמערכת ביחד, לעיתים דו"ח קרינה ועוד.

## מגבלת הפטור לפי זרם ישיר מהווה חסם למתקנים המחוברים למתח נמוך

בשנת 2018, בוצע תיקון לתקנות התכנון והבנייה (עבודות ומבנים הפטורים מהיתר, תשע"ד 2014), אשר קובעות בין היתר את ההנחיות להקמת מערכות PV. במסגרת תיקון זה, ניתן פטור מהדרישה להיתר בנייה עבור מערכות המוקמות על גגות מבנים, בהספק שאינו עולה על 700 קילו-וואט (זרם ישיר) למבנה.

מגבלה זו נקבעה באופן הנועד להגביל את הפטור מהיתר בנייה למערכות המתחברות למתח נמוך, היות ומערכות במתח גבוה נדרשות לאישורים נוספים כגון סקר היתכנות של חברת החשמל, אישור הרשות הארצית לכבאות ועוד.

אולם, ההספק הנומינלי בפועל (KVA) לפיו נקבע האם המתקן יתחבר במתח גבוה או במתח נמוך, קטן משמעותית מההספק הנומינלי בזרם ישיר. כלומר, קביעת מגבלה במונחי זרם ישיר משמעותה חיוב מתקנים רבים בהיתר בנייה על אף שיחברו במתח נמוך.

המשרד מצטרף להמלצת רשות החשמל כי יש לתקן את תקנות התכנון והבנייה (עבודות ומבנים הפטורים מהיתר, תשע"ד-2014) אשר יקבעו מתן פטור למתקנים מונחי גגות המחוברים לרשת מתח נמוך, בהתאם לגודל החיבור KVA 630.

## תהליך טורי בוועדות התכנון לצורך קבלת פטור למערכת על גג קונסטרוקציה לקירו

לעומת מערכות PV המוקמות על גבי גגות מבנים קיימים, מערכות בשימושים דואליים (קירו שטחים מבונים קיימים להם אין גג), נדרשים להיתר בניה והיות ויש צורך בקונסטרוקציה. לאחר הקמת הקונסטרוקציה, הנחת המערכת הסולארית על גביה פטורה מהיתר. אך בפועל, חברות מעידות כי לעיתים הן מתבקשות על ידי וועדות התכנון לסיים את תהליך הוצאת היתר הבניה לקירו השטח בשימוש דואלי, ורק לאחר מכן לפנות לקבלת פטור מהיתר בניה עבור המערכת. הדרישה לעבודה טורית מייצרת הליך בירוקרטי הארוך הנדרש ובכך מייצר חסם עבור ניצול פוטנציאל מערכות סולאריות בשימושים דואליים.

מוצע לגבש נוהל המחייב את ועדות התכנון לאפשר הגשה במקביל של בקשה להיתר בנייה ובקשת פטור מהיתר להקמת מערכת PV על גבי גג המבנה/קונסטרוקציה המתוכנן.

## משך זמן קבלת ההיתר ארוך ולעיתים משתנה בין ועדות התכנון

מדיווחים שהתקבלו מיזמים, הליך הוצאת היתר בנייה למערכת סולארית אורך זמן רב. כפי שצינה רשות החשמל במסמך 'הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030', לעיתים מדובר בתהליך הכולל דרישות שונות ומשתנות בין רשויות הרישוי, כאשר יזמים מדווחים על פרק זמן של בין 8-18 חודשים.

חוק התכנון והבנייה (תשכ"ה 1965) מגדיר לוחות זמנים קבועים לטיפול בבקשות להיתר בנייה, כאשר כל חריגה מלוחות זמנים אלו מאפשרת למגיש הבקשה לעתור ולהגיש ערר ולעקוף את חובת ההיתר. משך הזמן הארוך שצוין לעיל, נובע מדרישות שונות להשלמות והגשת המסמכים נוספים, ולא תמיד ישנה אחידות בין הרשויות.

מוצע כי מינהל התכנון, רשות החשמל והמשרד להגנת הסביבה יגבשו מסמך הנחיות אשר יגדיר לוועדות התכנון המקומיות בצורה אחידה את הדרישות לבדיקה בהיתרי בנייה למערכות סולאריות בהתאם להיקף המערכת ומיקומה.

## תמ"א 10/ד/10 אינה מאפשרת כיום היתר למערכות PV בכל סוגי השימושים הדואליים

בשנת 2010 אושרה תמ"א 10/ד/10 אשר קובעת את ההנחיות להקמת מתקני PV בכל שטח במדינה, תוך מניעת מפגעים ומזעור הפגיעה בשטחים הפתוחים, באיכות הסביבה והנוף ועוד. התמ"א נועדה ליצור את האפשרות ואת ההוראות למתן היתרים למתקני PV על גגות וחזיתות של מבנים שנבנו כדין, וקביעת מתן היתרים למתקני PV במקרים אחרים כגון מבנים עם ייעוד לתעשייה, מאגרים, חניונים ועוד.

התיקון המוצע לתמ"א 10/ד/10 /2 יאפשר לאשר היתרים למתקני PV בשימוש כפול בייעודי ושימושי קרקע נוספים על הקבוע בתוכנית הראשית: בשטחים כלואים של מחלפים, על גבי מיגון אקוסטי, על קירות תמך, בשטחי מטמנות ובבתי עלמין.

לאחרונה, התיקון המוצע לתמ"א 10/ד/10/2 אושר בהחלטת המועצה הארצית לתכנון ולבנייה. מאז כתיבת העבודה, אך בטרם פרסומה, התמ"א אושרה ביום ה-24.8.2021 בממשלה.

## הגדרת מערכות סולאריות ואגירה כשימושים מותרים

חוק התכנון והבנייה (תשכ"ה 1965), מגדיר מהו שימוש חורג בקרקע או בניין - שימוש בקרקע או בבניין שאינו למטרה שהוגדרה לו בתוכנית בניין עיר או תוכנית המתאר. מטרת התוכניות הללו היא להסדיר את השימושים בקרקע או במבנה, כאשר על כל פעולה במקרקעין ניתן היתר על ידי הוועדה המקומית לתכנון ובנייה ולא ניתן היתר אם מדובר בחריגה מהשימוש שאושר בתוכנית המתאר. במידה ומעוניינים לנצל שטח קרקעי או שטח במבנה לטובת שימוש אחר ממה שהוגדר, ניתן להגיש בקשה לוועדת התכנון והבניה לקבלת היתר לשימוש חורג.

הקמת מערכות סולאריות שלא לצריכה עצמית על גבי מבנה מגורים או מבנה משותף, מוגדרת כשימוש החורג מהשימוש המותר, ונדרש שינוי ייעוד קרקע. באופן דומה, בכבישים ומחלפים, זכות הדרך ניתנה לנתיבי ישראל לצורך פיתוח כבישים, והקמת מערכות סולאריות לצדי הדרך, או קירוי הכביש היא חריגה מייעוד השימוש שהותר. גם עבור מערכות על שימושים דואליים, כגון מאגרים, קיימת סוגיה של חריגה מהשימוש המותר, שכן אינה מהווה מקרה גג.

עד כה, מתקנים בשימושים דואליים, נדרשו להגיש בקשות עם תוכנית מפורטת, ולא נכללה בתמ"א 10/ד/10 התייחסות המאפשרת לתת היתרי בנייה מתוקף התמ"א עבור מתקנים אלו. על כן, תיקון תמ"א 10/ד/10/2, נועד לאשר היתרים למתקני PV בשימוש כפול בייעודי ושימושי קרקע נוספים על הקבוע בתוכנית הראשית. בנוסף, התוכנית תאפשר להקים מתקני אגירת אנרגיה כשימוש מותר בתחומי תוכניות למתקני PV שאושרו בתוכניות ולא כללו את זכויות הבניה הנדרשות לשם הקמתם. יחד עם זאת, התמ"א מתייחסת להיתרים במקום שתוכנית, הכוללת הוראות מפורטות, מתירה הקמת מבנים, תותר הקמת מתקן PV, יש לוודא כי בכל התוכניות המקומות כיום לאזורים המיועדים לפיתוח, ובפרט המרחב הבנוי תתאפשר הקמת מתקן PV.

**יתרה מכך, המשרד מצטרף להמלצת רשות החשמל להטמיע בהוראות כל התוכניות המקודמות את המערכות הסולאריות כשימושים מותרים, בדיוק כפי שקיים עבור העברת קווי תשתית של חשמל ומים. המשרד אף מצטרף להמלצת רשות החשמל להגדרת מתקני אגירה כשימושים מותרים בכלל מתקני ייצור החשמל (אנרגיות מתחדשות וקונבנציונליות), תחנות המיתוג ההשנאה וברשת החשמל.**

כאמור סוגיית הייעוד מהווה חסם משמעותי בפני ניצול שטחים כלואים בין מחלפים לשם התקנת מערכות סולאריות. שטחים אלו מהווים פוטנציאל משמעותי להתקנת מערכות PV קרקעיות, ללא עלויות קונסטרוקציה וללא פגיעה בשטחים פתוחים או במגוון ביולוגי, ונמצאים בידי חברות ממשלתיות.

**יש לבחון הסדר חקיקתי לחיוב התקנת מערכות PV בשטחים כלואים בין מחלפים.**

## כ. חסמים ייחודיים לרשויות מקומיות

רשויות מקומיות אחראיות לנתח לא מבוטל מפוטנציאל הייצור במרחב המבונה, כ-25%-20%, שכן בתחום אחריותן שטחים מבונים רבים, מעבר למבנים ציבוריים (פארקים ומגרשים, כבישים עירוניים, חניות ועוד).

יחד עם זאת, ניצול פוטנציאל הייצור בקרב רשויות מקומיות אינו מנוצל דיו, כתוצאה מחסמים כלכליים ומהיעדר כוח אדם בעל מומחיות רלוונטית.

## קושי תקציבי ומימוני ברשויות מקומיות

רשויות מקומיות מתקשות לקדם מערכות לייצור סולארי בשטחן כתוצאה מכשלים במבנה התקצוב הקיים ומעומס מלוות המוטל על הרשויות. הקשיים התקציביים עליהם מלינים ברשויות המקומיות צפויים להמשיך ולהחריף עם הפיתוח המואץ של בנייה למגורים ופרויקטים שאינם עיקר העשייה של הרשויות, ועל כן, פרויקטים לאנרגיות מתחדשות אינם מקודמים בסדר העדיפויות של הרשות. נוסף על כך, תקופת ההחזר הממוצעת לפרויקט סולארי היא כ-7 שנים<sup>72</sup>, תקופת זמן ארוכה משמעותית ביחס ליכולותיהן הפיננסית של חלק מהרשויות המקומיות. לבסוף, בשל היעדר כוח אדם בעל מומחיות בתחומי האנרגיה ברשויות מקומיות, נוספות עלויות ייעוץ וליווי שונות. שורה של נסיבות אלו יוצרות קשיים תקציביים ומימוניים המונעים מרשויות לנצל את פוטנציאל הייצור הקיים במחוזן.

**המשרד מצטרף להמלצת רשות החשמל לבחון מנגנוני מימון לפרויקטים כגון: מתן ערבות מדינה להחזר ההשקעה, הלוואות מדינה בתנאים מועדפים, מענקים לרשויות, והקמת קרן השקעות או הרחבה של הקרן שהוקמה על ידי מפעל הפיס ומשרד האנרגיה.**

## היעדר מומחיות כוח אדם ברשויות המקומיות

רשויות מקומיות נדרשות להעריך את פוטנציאל הייצור הקיים בשטחן ולבצע סקרי גגות, לבחון את שילוב המתקנים במרחב הבנוי כולל סוגיות שונות למרחב הציבורי כגון אסתטיקה, ביצוע הליכים מכרזיים להתקשרות עם חברות שונות, ללמוד ולפעול לפי הרגולציה הקיימת ולגשת להליכים אסדרתיים או תחרותיים מתאימים. על כן, רשויות מקומיות לעיתים מתמודדות עם היעדר כוח אדם בעל מומחיות בתחום האנרגיה, ובפרט באנרגיות מתחדשות, שידע להתמודד עם הסוגיות שתוארו לעיל.

**מוצע לבחון מתן ייעוץ מקצועי לרשויות מקומיות בהיבטים רלוונטיים כמו סקרי שטחים, אופן שילוב המתקנים במרחב הבנוי, שיפור היכולות להתמודד בהליכים תחרותיים ועוד.**

**עוד מוצע לגבש ולפרסם מאגר אחיד לגגות הגדולים והשטחים הפוטנציאליים לקירוי PV בכל הרשויות.**

## כז. חסמים ייחודיים לגגות משותפים

גגות בתי מגורים משותפים מהווים למעלה מ-35% מפוטנציאל הייצור על גבי גגות המגזר הביתי כיום, וכ-27% מפוטנציאל כלל הגגות. כמו כן, קיים פוטנציאל ייצור לא מבוטל בקרב גגות של מבנים משותפים במגזר העסקי. יחד עם זאת, ניצול פוטנציאל הייצור בשטחי הגגות של מבנים אלו, אינו מנוצל דיו כיום, זאת כתוצאה משורה של חסמים שונים:

1. הצורך בהסכמת כלל הדיירים להתקנת מערכת סולארית על הגג מהווה חסם משמעותי מאוד לזרם הגגות בבתים משותפים שכן התנגדות של דייר אחד מונעת התקנה של המערכת.

<sup>72</sup> מתוך התייחסות מרכז השלטון המקומי בישראל להגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030, 2020

2. היעדר מנגנון מוסדר לחלוקת ההכנסות ממתקן משותף בין הדירות, הגורם לכך שהדיירים נדרשים להגיע להסכמות פנימיות בדבר.
3. חובת פרסילציה רישומית לייחוד יחידת שטח גג לדירה בכדי לנהל את חלוקת ההכנסות ושיוך הייצור לדירה הרלוונטית.

הצורך בהסכמת כלל הדיירים מעוגן בחוק המקרקעין (תשכ"ט 1969) המגדיר כי כל דבר החורג מניהול או שימוש רגיל של הנכס המשותף מחויב בהסכמת כל הדיירים, זאת תוך החרגה של מקרים שונים כגון התקנת מעליות אשר לכך נדרשת הסכמה של שני שלישי מהדיירים. נוסף על כך, החוק מגדיר גם כללים לחלוקה בהוצאות הבניין, ניהול הנכסים המשותפים, קביעת תקנון סטנדרטי לבית משותף ועוד.

ב-27 לדצמבר 2020, אושר תיקון לחוק המקרקעין (תיקון מס' 34 התשפ"א) הקובע כי בבניינים משותפים בו דיירים מעוניינים להקים פאנלים סולאריים על הגג יוכלו לעשות זאת בהסכמה של 66% מדיירי הבניין. כמו כן, לפי התיקון בעל דירה יוכל להקים מערכת סולארית לשימושו הפרטי, בהתחשב בחלקו היחסי בגג וזאת ללא שתידרש הסכמת יתר בעלי הדירות בבניין. גם פחות משני שלישים מדיירי הבניין יכולים כעת להתקין פאנלים סולאריים על הגג, לפי חלקם היחסי בבניין. עם זאת, עליהם לעמוד בתנאים הבאים: ההתקנה תיעשה על שטח בשיעור יחסי שאינו עולה על חלקו של בעל הדירה המתקין ברכוש המשותף; אם כבר מותקן על גג הבית המשותף דוד שמש, מתקן PV או מתקן אגירה המשמש את בעל הדירה המתקין, ינוכה שטחו מהשטח שבו ניתן לבצע את ההתקנה.

הוצאות ההתקנה שבהן יישאו בעלי הדירות יהיו בהתאם לחלקם היחסי של בעלי הדירות שהחליטו על התקנת המתקן ברכוש המשותף, אלא אם החליטו בעלי הדירות על חלוקה בדרך אחרת. על כל בעלי הדירות בבית המשותף לשאת בהוצאות ההפעלה והתחזוקה של המתקן. כלומר, ההכנסות שיתקבלו מהפעלת המתקן ייחשבו כחלק מהרכוש המשותף, אך קודם לכן ישמשו לצורך החזר עלות הקמת המערכת, התחזוקה וההפעלה שלה, לדיירים שהקימו אותה לפי שיעור השתתפותם. לאחר החזר הוצאות ההתקנה, תשמש יתרת ההכנסות את כל בעלי הדירות בהתאם לחלקם היחסי בבית המשותף.

לבסוף, החוק גם מסדיר סוגיות שונות שעלולות לעלות כגון הרחבת קומות לבניין וכדומה.

מכיוון שהחוק נועד לפתור את החסמים העיקריים להקמת מתקנים סולאריים על גבי גגות משותפים, נותר בשלב זה לעקוב אחר השפעתו בפועל בטרם יגובשו המלצות נוספות. יש לציין כי קידום הסדרי חקיקה שיחייבו הקמה של גגות מבנים חדשים עם מערכות סולאריות כחלק אינטגרלי מהבנייה, יסייע גם בסוגיה זו.

## כח. חסמים נוספים

### סירוב חיבור עקב גודש ברשת ההולכה

מגבלת רשת ההולכה, מהווה את אחד החסמים המרכזיים העומדים כיום בפני כניסה מסיבית יותר של אנרגיות מתחדשות, כאשר הרשת לא פותחה במשך שנים רבות.

באזורים מסוימים בארץ קיים עומס ברשת ההולכה. כתוצאה מכך, באזורים אלו לא ניתן לקלוט מתקני אנרגיות מתחדשות חדשים, ומתקנים רבים ברשת החלוקה דווקא נתקלים בסירוב או בעיכובים משמעותיים בחיבור.

יתרה מכך, מאחר והעומס על רשת ההולכה מתרחש בשעות מסוימות ולא נפרס לאורך כל היממה, קיימת האפשרות לחבר מתקנים עם 'מנגנון בקרת הספק' המאפשר לשלוט בכמות הייצור ולעצור את ההזרמה לרשת כאשר הייצור גדול מהצריכה. יחד עם זאת, כיום חברת החשמל דורשת ממתקנים כאלו להתקין ציוד שליטה ובקרה אשר יאפשר לה להיות זו ששולטת בעצמה בייצור החשמל ובאופן יזום לעצור את ההזרמה לרשת, וזאת יצוין באופן העומד בקנה אחד עם המלצות דוח זה.

אולם, דרישה זו של חברת החשמל כיום אינה מלווה במסגרת רגולטורית לרכישת שירותי מערכת אלו מהמתקנים הסולאריים אשר ייתן פיצוי לבעלי המתקנים על ההשקעה הנוספת באופן שהולם את התועלות למשק החשמל מאספקת שירותים אלו.

יש לציין כי עצם ההקמה של קיבולת ייצור ברשת החלוקה העומדת במרכז מפת דרכים זו תימנע המשך הוספת עומסים ברשת ההולכה ותצמצם את הצורך בהשקעות ברשת ההולכה. יתרה מכך, חלק מהפתרונות המוצעים להתמודדות עם האתגרים בניהול הייצור צפויים אף הם לצמצם את הגודש במערכת ההולכה ולהגביר את האפשרות להתקין מערכות במערכת החלוקה על אף גודש זה. בראשם:

- הקמת הספק אגירה משמעותי.
- יישום של פתרונות המאפשרים למנהל המערכת, באמצעות תחנות כוח וירטואליות ורשת חכמה, לנהל את מערכות הייצור והאגירה המבוזרות.
- פרסום אסדרה להשתתפות מערכות PV ואגירה במתן שירותי מערכת.
- ביטול תיעודף ייצור קונבנציונלי באופן אשר יאפשר את הפסקת הייצור מתחנות הכוח בזמני גודש ברשת, ללא חסימת חיבור מתקנים סולאריים.
- הגברת השקיפות בנוגע לחסמי גודש ברשת ההולכה על ידי מיפוי ופרסום אזורים בהם ניתן לקלוט מתקני ייצור חדשים.

## היעדר מודעות ציבורית

חלק מפוטנציאל הייצור הסולארי במרחב המבונה נמצא בידי סקטורים בהם קיים חוסר מודעות, החל מחוסר מודעות בדבר התועלות הרבות מהקמת מערכות סולאריות, דרך פערי ידע בדבר הרגולציה הקיימת ותהליך אישור וחיבור מערכות סולאריות, וכלה בחששות מסוגיות בטיחותיות ובריאותיות דוגמת קרינה מהמערכות הסולאריות ועוד.

המשרד להגנת הסביבה שותף לקביעת רשות החשמל כי קידומם של מערכות סולאריות תלוי בין היתר גם בהעלאת המודעות הציבורית.

**מוצע לפעול בשיתוף פעולה בין-משרדי לגיבוש תוכנית הסברתית המותאמת לצרכי הסקטורים השונים וכוללת פרסום ממוקד, שיתופי פעולה עם הגופים השונים, ימי עיון ועוד.**

## כט. סיכום חסמים עיקריים ופתרונות מוצעים

מס'	חסם	פתרון מוצע	גורם מטפל
1.	יצירת ודאות ארוכת טווח והתאמת מסגרות תעריפיות לפלחי שוק נוספים	<ul style="list-style-type: none"> <li>בחינת מדרג מתון יותר לירידה בתעריף עבור מתקנים מעל 100 קו"ט, אשר משמר את היתרון של האסדרה, מבטל את הצורך בגישה למכרז, אך גם שומר על הכדאיות הכלכלית גם עבור מתקנים בהספק הגדול מ-100 קו"ט. בנוסף, קידום אסדרות ארוכות טווח בתעריפים קבועים אשר יעודכנו אחת לתקופה בהתאם לשינויים במחירי המערכות בהתאם למנגנון עדכון שקוף וברור.</li> <li>פרסום תוכנית רב-שנתית אשר תפרוט את המכרזים המתוכננים לשנים הקרובות.</li> <li>גיבוש הסדר חקיקתי לחיוב התקנת מערכות סולאריות כחלק אינטגרלי בבנייה חדשה.</li> <li>גיבוש אסדרות ו/או הליכים תחרותיים ייעודיים למתקנים המוקמים בשטחים מבונים המחייבים קירוי (חניונים, בתי עלמין, פארקים, ועוד).</li> <li>גיבוש הסדר חקיקתי לחיוב קירוי סולארי בחניונים, מוסדות חינוך, בתי עלמין ושטחים כלואים בין מחלפים.</li> <li>בחינת מנגנון תעריפי ייעודי למתקנים מונחי גגות הקטנים מ-10 קו"ט תוך קיצור החזר השקעה למשקי בית מבלי לבטל את כדאיות המתקן למשק.</li> </ul>	משרד האנרגיה, רשות החשמל, מנהל התכנון
2.	היטל השבחה, ארנונה ושומת קרקע	<ul style="list-style-type: none"> <li>הרחבת הפטור הקיים מהיטל השבחה למערכות שאינן לצרכי רווח גם בשימושים דואליים, עד ל-7,000 מ"ר.</li> <li>תקנון תקנות ההסדרים במשק המדינה (ארנונה כללית ברשויות המקומיות) לקביעת תעריפי ארנונה אחידים למערכות סולאריות, לרבות מערכות שאינן מוקמות על גגות מבנים.</li> <li>הענקת פטור מתשלום ארנונה למערכות סולאריות בשימושים דואליים (מערכות שאינן על גגות או קרקע), המשמשות לצריכה עצמית עד 200 מ"ר.</li> </ul>	ועדת הפנים והגנת הסביבה, משרד האוצר
3.	קיצור ופישוט הליכי רישום וחיבור של חח"י	<ul style="list-style-type: none"> <li>קביעת שומת קרקע למערכות סולאריות לפי שטח המתקן ולא לפי הספקו.</li> <li>על רשות מקרקעי ישראל לבחון ולהציג תוכנית להקלות לדו-שימושיות בקרקע.</li> <li>יצירת ממשק אחוד ליעול הליכי הרישום והחיבור. יש לפעול ליעול ושכלול הליכים לרישום, חיבור, והגדלת גודל החיבור למתקן על ידי מעבר להליכים דיגיטליים.</li> <li>יצירת מערכת אחודה ונוחה המתכללת את כלל התהליך (One port call).</li> <li>בחינת אמות המידה המגדירות את משך הזמן לחיבור המתקנים והתאמתן לסטנדרטים.</li> </ul>	רמ"י, משרד המשפטים, משרד האוצר
4.	חובת היתר בניה וייעוד שימושי קרקע	<ul style="list-style-type: none"> <li>תקנון תקנות התכנון והבנייה (עבודות ומבנים הפטורים מהיתר, תשע"ד-2014) וקביעת פטור למתקנים מונחי גגות המחוברים לרשת מתח נמוך בהתאם לגודל החיבור (KVA 630).</li> <li>להטמיע בהוראות כל התוכניות המקודמות את המערכות הסולאריות ומתקני אגירה כשימושים מותרים</li> </ul>	מנהל התכנון, ות"ל, משרד הפנים, משרד להגנת הסביבה



מס'	חסם	פתרון מוצע	גורם מטפל
		<ul style="list-style-type: none"> <li>גיבוש מסמך הנחיות גנרי מנחה לועדות התכנון המקומיות לבחינת היתר בניה למערכות סולאריות</li> <li>גיבוש נוהל בוועדות התכנון המאפשר הגשה במקביל של בקשה להיתר בנייה ובקשת פטור מהיתר להקמת מערכת PV על גבי גג המבנה / קונסטרוקציה המתוכנן.</li> </ul>	
.5	חסמים ייעודיים ברשויות מקומיות	<ul style="list-style-type: none"> <li>מתן ייעוץ מקצועי לרשויות מקומיות בהיבטים רלוונטיים כמו סקרי שטחים, אופן שילוב המתקנים במרחב הבנוי, שיפור היכולות להתמודד בהליכים תחרותיים ועוד.</li> </ul>	משרד האנרגיה, משרד להגנת הסביבה, המרכז לשלטון מקומי
		<ul style="list-style-type: none"> <li>גיבוש ופרסום מאגר אחיד לגגות הגדולים והשטחים הפוטנציאליים לקירוי PV בכל הרשויות</li> </ul>	מפ"י
		<ul style="list-style-type: none"> <li>בחינת מנגנוני מימון לפרויקטים כגון: מתן ערבות מדינה להחזר ההשקעה, הלוואות מדינה בתנאים מועדפים, הקמת קרן השקעות או הרחבה של הקרן שהוקמה על ידי מפעל הפיס ומשרד האנרגיה ומענקים לרשויות</li> </ul>	משרד האנרגיה, רשות החשמל, משרד האוצר, המרכז לשלטון מקומי
.6	היעדר מודעות ציבורית לאנרגיה מתחדשת	<ul style="list-style-type: none"> <li>גיבוש וקידום תוכנית הסברתית המותאמת לצרכי הסקטורים השונים וכוללת פרסום ממוקד, שיתופי פעולה עם הגופים השונים, ימי עיון ועוד.</li> </ul>	משרד האנרגיה, משרד להגנת הסביבה, משרד הפנים, משרד האוצר



# סיכום ותמצית ההמלצות

במסגרת הסכם פריז התחייבו מדינות העולם, וביניהן ישראל, להגיש לאו"ם עד סוף 2020 תוכניות אסטרטגיות למעבר לכלכלה דלת פחמן עד שנת 2050, ולעדכן את רמת שאפתנות היעדים להפחתת פליטות גזי חממה לשנת 2030.

במסגרת תהליך זה ישראל נדרשת לעדכן את יעדיה למשק החשמל, האחראי לחלק הארי של פליטות גזי חממה ומזהמי אוויר במדינה, באופן העומד בקנה אחד עם יעדים דומים שנקבעו על ידי מדינות מפותחות אחרות.

לאחרונה, ישראל הצטרפה למדינות העולם המפותחות ומתחייבת לאפס פליטות גזי חממה נטו בשנת 2050, כפי שהכריז ראש הממשלה ביום ה-1 בנובמבר 2021, בוועידת האקלים בגלזגו. בכך ישראל מצהירה על מחויבותה לסיים את תלותה במקורות האנרגיה הפוסיליים. משמעות מעבר ישראל לכלכלה מאופסת פליטות היא גמילת ישראל מהתלות בדלקים פוסיליים ומעבר לשימוש באנרגיות מתחדשות ובאגירה. בנוסף, בהסכמי ועידת גלזגו נקבע כי כל המדינות, לרבות ישראל, נדרשות לבחון ולעדכן בתוך שנה את יעדי הפחתת פליטות גזי חממה לשנת 2030 כך שיעמדו בהלימה עם הצורך הגלובאלי להפחתה של 45-50% מפליטות גזי חממה בעשור זה.

ייצור חשמל באנרגיה מתחדשת מהווה נדבך מרכזי להפחתת פליטות גזי חממה. לעומת ישראל, שקבעה יעד ל-30% אנרגיה מתחדשת בלבד בשנת 2030, מדינות רבות כבר קבעו יעדים ארוכי טווח לייצור של 100% חשמל מאנרגיות מתחדשות ב-2050, והעלו בהתאמה את יעדי האנרגיות המתחדשות לשנת 2030 לשיעורים של 50% ואף יותר.

**עדכון היעדים ל-40% אנרגיה מתחדשת ב-2030 ו-80% - 95% בשנת 2050, תניב תועלת משקית של כ-6 מיליארד ₪ (ענ"ף) עד שנת 2030 וכ-65 מיליארד ₪ (ענ"ף) עד שנת 2050.** זאת, ללא כימות תועלות נוספות כמו עלות הקרקע, שיפור הביטחון האנרגטי, אי בניית תשתיות פוסיליות נוספות ועוד.

כתוצאה מכך, **לא יידרש הספק ייצור קונבנציונלי חדש בעשור הקרוב**, כאשר ההספק הנדרש בשנת 2030 בהינתן 40% אנרגיה מתחדשת וכ-5.5 גו"ט של מתקני אגירה נאמד בכ-15 גו"ט בלבד.

ההספק הסולארי הנדרש לשם עמידה ביעד עומד על 22.9 גו"ט בשנת 2030. **ניתן יהיה להתקין מתקני PV בהספק כולל של 22.4 גו"ט במרחב המבונה** במתח נמוך תוך הבטחת הפעולה התקינה של רשת החלוקה, ללא השקעות תוספתיות משמעותיות.

בכך, ישראל יכולה לעמוד ביעדיה מבלי לפגוע בשטחים הפתוחים ובמגוון הביולוגי – יעד אסטרטגי למדינה מהצפופות בעולם המפותח.

אולם, ביסוס הייצור על אנרגיה סולארית יציב בפני מערך הייצור מספר אתגרים - **קיטום משמעותי של הייצור הסולארי, התמודדות עם שינויים חדים בעקום העומס השירי בעקבות הייצור הסולארי וייצוב התדר.** אתגרים אלו ניתנים לפתרון, גם כאשר רוב המערכות מותקנות במתח נמוך, זאת תוך הפיכת רשת החלוקה לרשת חכמה.

**עיקרי ההמלצות ליישום בעשור הקרוב הם :**

4. הקמת מתקני אגירה הנשלטים על ידי מנהל המערכת. ליישום חלופת ההפחתה, יש צורך בהספק האגירה של 5 – 6 גו"ט (כ-33 גו"ט"ש) ב-2030.

5. גיבוש ויישום דרישות שיאפשרו את שליטת מנהל המערכת במתקני אנרגיה מתחדשת ואגירה.
6. גיבוש מסגרת רגולטורית לאספקת שירותים נלווים (ancillary services) על ידי מתקני אגירה ואנרגיה מתחדשת, לרבות על ידי מקורות אנרגיה מבוזרים ו-"תחנות וירטואליות".
7. צמצום התעדוף הקונבנציונאלי המובנה במשק החשמל, ובפרט העברת כל היצרנים במערכת לשיתת העמסה מרכזית כך שמנהל המערכת לא יצטרך לתעדף אותן מעל ייצור באנרגיה מתחדשת.
8. הכנת דרישות טכניות למערכת החלוקה (GRID CODE), באופן שיאפשרו לרשת החלוקה לפעול (במתח גבוה ומתח נמוך) כרשת אקטיבית, בה מותקנים, בנוסף לצרכנים, מערכות רבות של יצור ואגירת האנרגיה.
9. תכנון מראש של רשת החלוקה החדשה כרשת אקטיבית במתח גבוה ומתח נמוך.
10. השקעה במערכת DMS עבור רשת החלוקה, וחיבור מערכות PV ואגירה ברשת למערכת זו באופן המאפשר ניהול מרכזי של המערכות המבוזרות בחבילות של כ-50 עד 100 מגו"ט.
11. הסרת חסמים כלכליים הנובעים מחוסר וודאות ארוכת-טווח באסדרות הקיימות ורגולציה שנקבעה בהתאם לגגות מבנים בלבד ללא התייחסות לשטחים דואליים (כגון פטור מהיטל השבחה, תעריפי ארנונה ועוד).
12. הסרת חסמים תכנוניים וסטטוטוריים הקשורים בהיתרי בנייה וקביעת מערכות סולאריות כשימושים מותרים בשטחים דואליים.
13. הסרת חסמים רגולטוריים הקשורים להליכי הרישום והחיבור של מתקנים סולאריים.
14. הסרת חסמים ייעודיים לגגות משותפים רשויות מקומיות.

## נספח א' – הגדרת תרחישי העבודה

בשלב הראשון הוגדרו תרחישי העבודה (תרחיש עסקים כרגיל ותרחיש הפחתה) אל מולם ייבחנו ההשלכות על מערך הייצור ודינמיות המערכת, צרכי רשת החלוקה, וההשלכות הכלכליות. תרחישים אלו מורכבים בעיקר מצריכת החשמל החזויה ומצבת תחנות הכוח הקונבנציונאליות (קיימות ומתוכננות).

### ל. צריכת החשמל

בעשור האחרון חלה האטה בקצב העלייה בביקוש לחשמל. התמ"ג עלה בקצב מהיר יותר מצריכת החשמל, דבר אשר מצביע על הפחתת העצימות האנרגטית בישראל. בעקבות השינויים הללו והירידה בתחזית הצמיחה של המשק הישראלי חלה גם ירידה בתחזיות הביקוש לחשמל וכתוצאה מכך - בדרישות פיתוח כושר הייצור במשק החשמל.

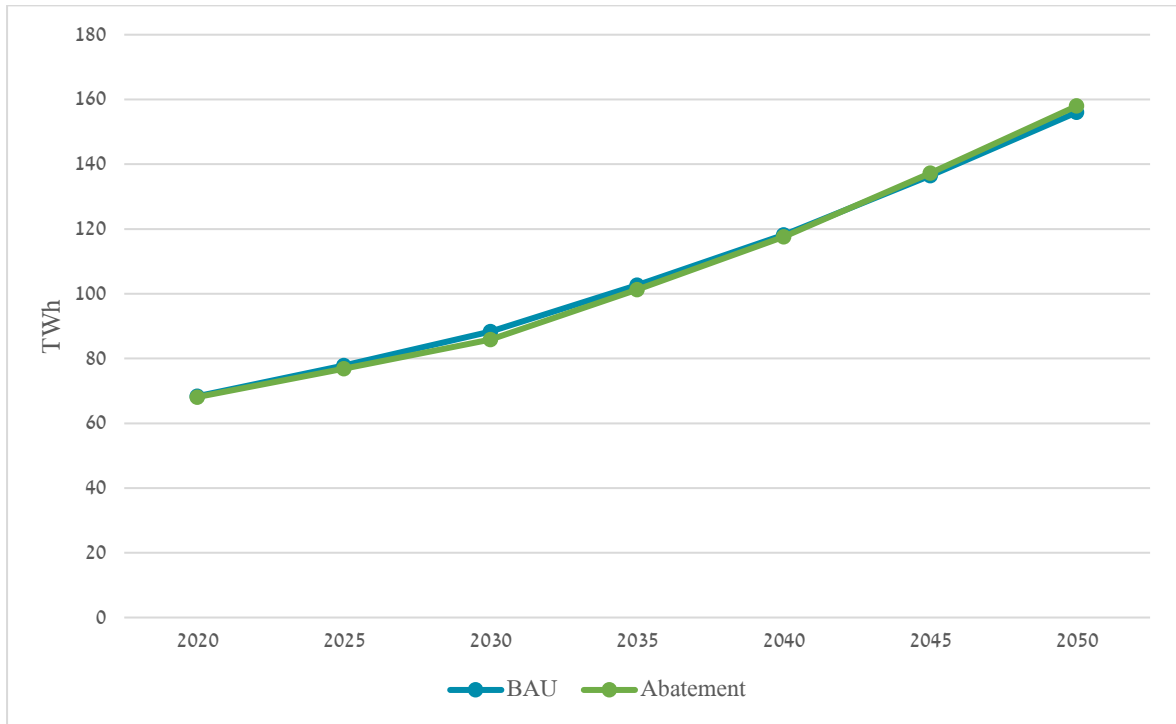
למרות זאת, בניגוד למדינות מפותחות רבות, הגידול המהיר באוכלוסייה צפוי להביא להמשך גידול משמעותי בצריכת החשמל בעשורים הבאים.

תחזיות הצריכה מתבססות על תחזיות שגובשו במסגרת תהליך "ישראל 2050: כלכלה משגשגת בסביבה מקיימת" לשם תמיכה בקביעת יעדי פליטות גזי חממה ויעדים סקטוריאליים נוספים, זאת תוך מידול כלל מגזרי המשק (כולל הרשות הפלסטינית) בהינתן תרחיש "עסקים כרגיל" ובהינתן עמידה ביעדי החזון שהוגדרו לכל אחד ממגזרי הביקוש – מבנים וערים, תעשייה ופסולת, ותחבורה.

בהינתן מימוש החזון התחומי במגזרי המשק, סך צריכת החשמל צפוי לגדול מכ-60 טרה-וואט שעה ב-2015<sup>73</sup> לכ-86 טרה-וואט שעה בשנת 2030 וכ-158 טרה-וואט שעה בשנת 2050, זאת לעומת כ-88 טרה-וואט שעה בשנת 2030 וכ-156 טרה-וואט שעה בשנת 2050 בתרחיש "עסקים כרגיל".

העובדה כי צריכת החשמל בתרחיש ההפחתה דומה בטווח הארוך לצריכת החשמל בתרחיש "עסקים כרגיל" נובע מכך שפעולות החשמול המבוצעות בענף התחבורה והתעשייה מתקזזות עם צמצום צריכת החשמל המושג באמצעות פעולות להתייעלות באנרגיה בתחום הערים והמבנים ובתחום התעשייה.

<sup>73</sup> (למ"ס, 2017)



## לא. מצבת תחנות כוח

מצבת תחנות הכוח הקיימות נבנתה תוך התייחסות ליחידות ייצור קיימות אשר משמשות את חברת החשמל לצורך תכנון המערכת, לרבות ליחידות של חברת החשמל עצמה, יחידות של יצרני חשמל פרטיים (יח"פ) ויחידות קוגנרציה.

התחזיות לשנים עתידיות נבנו תוך התייחסות לתחנות חדשות אשר צפויות לקום בוודאות גבוהה, וגריעת יחידות בהתאם לאורך חייהן. בפרט, הונח כי ימומשו התוכניות לגריטת 4 יחידות הייצור הפחמיות בתחנת הכוח "אורות רבין" בחדרה והקמת הספק ייצור חלופי מסוג מחז"מ H, כמו גם התוכניות להסבת יתרת היחידות הפחמיות לגז עד לשנת 2026.

יודגש כי מצבה זו כאמור מתייחסת לתחנות קיימות ותחנות שתוקמנה בוודאות גבוהה – מצבה אשר על בסיסה ניתן לקבוע האם ומתי תידרש הקמה של יחידות נוספות, על כן היא עומדת בבסיס שני התרחישים – "עסקים כרגיל" והפחתה:

טבלה 26 : מצבת תחנות כוח לפי סוג יחידה

פרמטר	יח'	2020	2030	2040	2050
תחנות פחמיות	מגו"ט	4,840	-	-	-
תחנות כוח פחמיות מוסבות לגז	מגו"ט	-	3,400	2,825	550
מחז"מ	מגו"ט	7,981	10,161	7,323	2,631
טורבינת גז תעשייתית	מגו"ט	1,570	1,570	236	-
טורבינת גז סילונית	מגו"ט	504	504	504	504
מחזור פתוח	מגו"ט	-	832	832	832
ת"כ קיטורית בגז	מגו"ט	1,340	-	-	-
קוגנרציה	מגו"ט	984	984	848	-

פרמטר	יח'	2020	2030	2040	2050
סה"כ הספק קונבנציונאלי תחנות קיימות	מגו"ט	17,219	17,451	12,568	4,517
אגירה שאובה	מגו"ט	300	800	800	800

לפירוט מלא של מצבת תחנות הכוח ניתן לראות נספח ב'

חלק מהספק זה הוא הספק Must-Run – הספק שבשל מגבלות תפעוליות של התחנה אין אפשרות להספיק את ייצורו באופן שוטף. הונח שהיחידות הקיטוריות הגדולות באתרים רוטנברג ואורות רבין, אשר יוסבו מפחם לגז, יופעלו במשטר Must-Run (ברמה טכנית מזערית לפחות – 40% מההספק הנומינלי) בהתאם לזמינותן.

נוסף על כך, בשנים האחרונות הושקעו מאמצים לשילוב המגזר הפרטי בפיתוח מקטע הייצור במטרה לצמצם את שיעור החוב של חברת החשמל ולפתח תנאי תחרות במשק החשמל.

בהחלטת רשות החשמל מדצמבר 2008 (מישיבה 241), אשר הסדירה את תעריפי הזמינות והאנרגיה ליצרנים פרטיים קונבנציונאליים, צוין שההסדר נקבע כהגנת ינוקא לקידום כניסת יצרנים פרטיים מוקדם ככל הניתן, וזאת ככל שסך יצרני החשמל הפרטיים לא יעלה על 20% מההספק המותקן במשק.

האסדרה הובילה ליצירת שני שווקי ייצור, כאשר אחד מהם כולל את מערך הייצור של חברת החשמל ושל היצרנים הפרטיים הפועלים בשיטת הזמינות הקבועה תחת כללי הרגולציה, והשני מתבסס על מכירת חשמל ישירה מיצרן פרטי לצרכן (או למספק) במסגרת הסכם בילטרלי ביניהם. בנוגע ליצרנים, שהשתלבו במסגרת אסדרה זו, יש לציין שמנהל המערכת נדרש לתעדף אותם בתוכנית הקצאת היחידות לתפעול (Unit Commitment) ולהעמיס אותם בהתאם לחוזהם הבילטרליים, גם אם הדבר אינו אופטימלי מבחינת מערכת הייצור. כלומר, **יחידות אלו מהוות יחידות Must-Take**.

בשנת 2014, בהסדרת המשך תעריפית (914) ליצרני חשמל קונבנציונאליים פרטיים מעל 16 מגו"ט, קבעה הרשות כי מנהל המערכת יעמיס את כלל מתקני הייצור במשק על פי עיקרון ההעמסה הכלכלית, דהיינו על פי תוכנית העמסה כלכלית בלתי מפלה, לפי אמת מידה 93 (ב'), כך שסדר ההעמסה ישקף את העלות השולית של המתקנים. יש לציין שהיצרנים שהשתלבו במערכת בהתאם לאסדרה הקודמת נותרו כפופים לכללי האסדרה הקודמת.

ב-2018 הוחלט על ביצוע רפורמה במשק החשמל בישראל שבמסגרתה חלק מתחנות הכוח של חברת החשמל יימכרו ליצרנים פרטיים. באסדרת הרשות בנוגע לאתר הראשון (אלון תבור) שנמכר ליצרן פרטי נקבע שהחשמל שיווצר על ידי היצרן יימכר למנהל המערכת בלבד והיחידות תועמסנה בהתאם להצעות המחיר החצי-שעתי בתוכניות העבודה שלהן שתוגשנה למנהל המערכת. כללים דומים פורסמו עבור האתר השני של חברת החשמל שנמכר ליצרן פרטי (רמת חובב). ניתן להסיק מכאן שגם היצרנים הקונבנציונאליים המשמעותיים שישתלבו במערכת בעתיד יפעלו במסגרת ההעמסה המרכזית ("עיקרון ההעמסה הכלכלית"), בדומה לשווקי חשמל סיטונאיים (Wholesale Market) בחלק ממדינות העולם.

בנוסף, יש לציין שעל פי כללי הרגולציה לגבי מתקני קוגנרציה, שהשתלבו בשוק החשמל בעשור האחרון, מנהל המערכת נדרש לשלבם בתוכנית הקצאת היחידות לתפעול (Unit Commitment) בהתאם לתוכניות העבודה שלהם, גם אם זה סותר את העיקרון של ההעמסה הכלכלית. יחידות אלו מוגדרות גם הן Must-Take.

לסיכום, הספק Must-Run/Must-Take נקבע כדלקמן:

- מנהל המערכת נדרש לתעדף את היצרנים שהשתלבו בהתאם לאסדרה 241 או על פי מכרז ממשלתי (או.פי.סי.) וברשותם הסכמים בילטרליים עם צרכנים (עד גובה ההסכמים);

- מנהל המערכת נדרש לתעדף את היצרנים בשיטת קוגנרציה.

לכן, אין להתעלם מכך שמנהל המערכת יצטרך להתייחס להספק של כל היחידות האלו בתור הספק שמוגדר כ-Must-Take, ולהעמיסן בסדר עדיפות ראשון. לעובדה זו חשיבות מיוחדת בבחינת האתגרים למשק החשמל מהגדלת יעדי הייצור באנרגיה מתחדשת שכן שעות הייצור שלהן עשויות להתנגש בשעות הייצור הסולארי ובכך להקשות על קליטת אנרגיה מתחדשת בפועל.

סך הספק זה עומד כיום על כמעט 5 גו"ט וצפוי לרדת בהדרגה באופן מתון בשני העשורים הקרובים, לפני סגירת מרבית היחידות בין 2040 ל-2050.

טבלה 27: הספק Must-Run / Must-Take

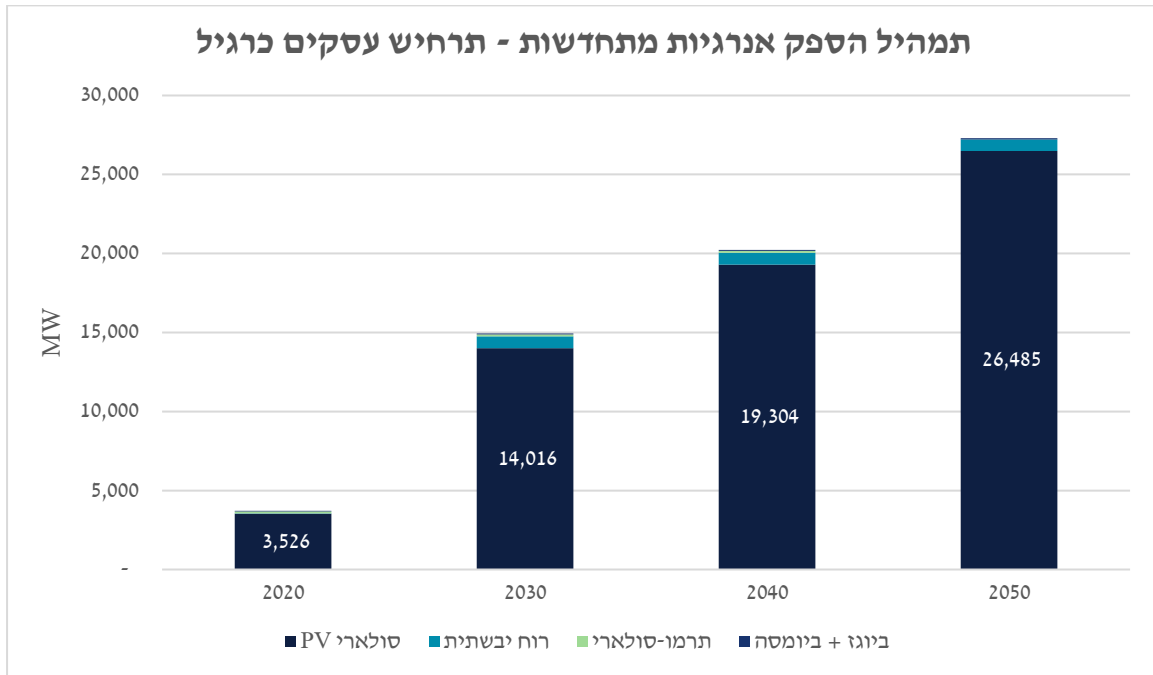
2050	2040	2030	2020	יח'	פרמטר
220	1,130	1,360	1,936	מגו"ט	הספק Must-Run
-	-	1,814	1,814	מגו"ט	הספק Must-Take יח"פ קונבנציונלי
-	848	984	984	מגו"ט	הספק Must-Take יח"פ קוגנרציה
220	1,978	4,158	4,734	מגו"ט	סה"כ הספק Must-Run/Must-Take

## לב. הספק ייצור באנרגיה מתחדשת

בשני התרחישים הונח כי מכסת הרוח הקיימת (740 מגו"ט) תמומש בהתאם לתחזית רשות החשמל עד שנת 2025 ולא תוגדל מעבר לכך. באופן דומה, הונח כי מכסת הביו-גז והביומסה (70 מגו"ט) תנוצל במלואה ולא תוגדל מעבר לכך. הונח כי לא יוקמו מתקני תרמו סולארי מעבר למתקנים הקיימים באשלים (242 מגו"ט סה"כ). יתרת הייצור באנרגיות מתחדשות, הנדרשת לעמידה ביעדי כל תרחיש, תושלם מייצור סולארי PV.

בתרחיש עסקים כרגיל הונח כי המדינה תעמוד ביעד משרד האנרגיה של 30% ייצור באנרגיות מתחדשות מתוך סך הצריכה הצפויה ב-2030, ולאחר מכן בהיעדר יעדים ארוכי טווח, תמשיך לשמור על שיעור ייצור זה מתוך סך הצריכה השנתית עד לשנת 2050.

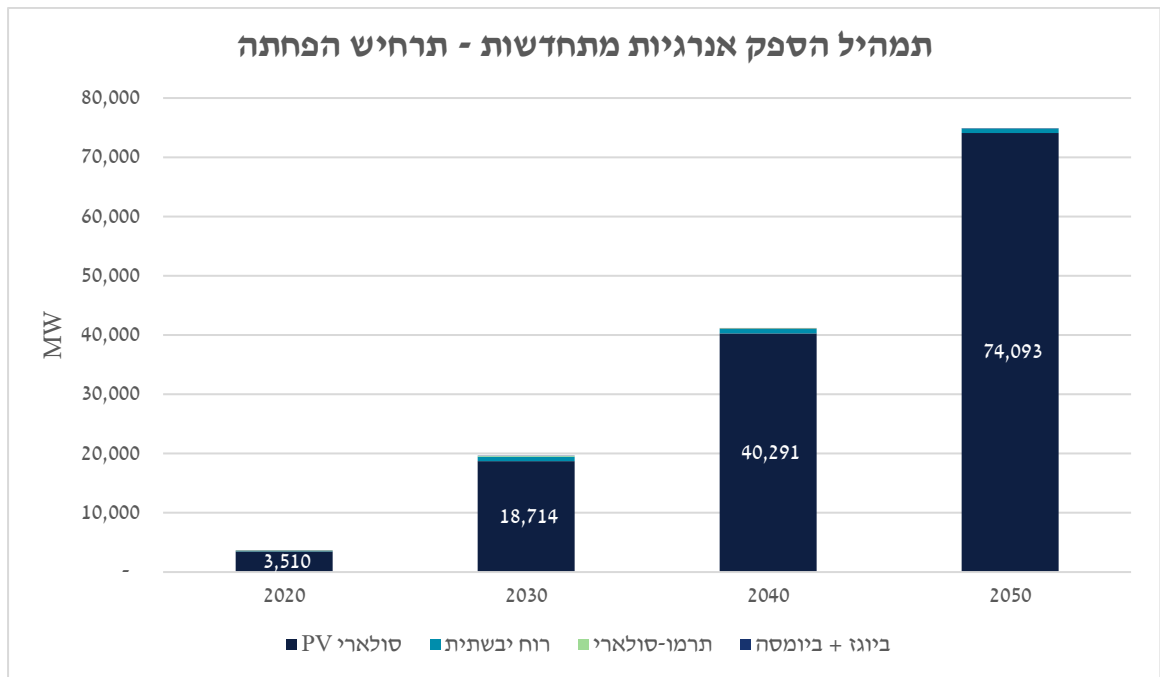
בהתאם לכך, בתרחיש עסקים כרגיל נדרשת הקמה של כ-14 גו"ט PV עד שנת 2030 וכ-26 גו"ט PV עד שנת 2050:



תרחיש ההפחתה מתייחס ליעדים שאפתניים בהרבה, כאשר שיעור הייצור באנרגיה מתחדשת יעמוד על 40% בשנת 2030, 60% בשנת 2040 ובין 80% ל-95% בשנת 2050.

לשם כך תידרש הקמה של כ-19 גו"ט PV כבר בשנת 2030, וכ-74 גו"ט PV בשנת 2050 (בהינתן 80% בלבד, כהנחה שמרנית). יש לציין כי הערכת ההספק זה היא הערכה ראשונית אשר שימשה כבסיס לבחינת האתגרים בקליטת כמויות אלו – כפי שיוצג בעבודה, ההספק האופטימלי גבוה יותר – ובכך תתאפשר קליטה של שיעורים דומים בפועל:

<sup>74</sup> הונח בהתאם לדו"ח מצב משק החשמל 2019 כי שעות הייצור הממוצעות לביוגז וביומסה הן 5,368, לתרמו-סולארי – 3,470 למתקן B ו-2,000 למתקן A. ל-PV – 1,700 MWh/MW. לרוח הונח מקדם הספק של 32% העולה משנת 2030 ל-34%.





## נספח ב' - מצבת תחנות כוח

פירוט יחידות	הספק מותקן	טכנולוגיה	שנת הקמה	שנת הדממה	אסדרה רגולטורית	שיטת העמסה	היקף ייצור שהוא Must-Run /Must-Take
<b>חח"י</b>							
הפעלה ב- Must Run. ז"א של כ-40% מהספק	אורות רבין 1	360	ת"כ פחמית	1982	2022	חח"י	מרכזית
	אורות רבין 2	360	ת"כ פחמית	1981	2022	חח"י	מרכזית
	אורות רבין 3	360	ת"כ פחמית	1983	2022	חח"י	מרכזית
	אורות רבין 4	360	ת"כ פחמית	1984	2022	חח"י	מרכזית
	אורות רבין ב 5	575	ת"כ פחמית שתוסב לגז עם גיבוי בפחם	1995	2045	חח"י	מרכזית
	אורות רבין ב 6	575	ת"כ פחמית שתוסב לגז עם גיבוי בפחם	1996	2046	חח"י	מרכזית
	רוטנברג א 1	575	ת"כ פחמית שתוסב לגז עם גיבוי בפחם	1991	2041	חח"י	מרכזית
	רוטנברג א 2	575	ת"כ פחמית שתוסב לגז עם גיבוי בפחם	1990	2040	חח"י	מרכזית
	רוטנברג ב 3	550	ת"כ פחמית שתוסב לגז עם גיבוי בפחם	2001	2051	חח"י	מרכזית
	רוטנברג ב 4	550	ת"כ פחמית שתוסב לגז עם גיבוי בפחם	2000	2050	חח"י	מרכזית
גזר מחז"מ 30	372	מחז"מ F בגז	2007	2037	חח"י	מרכזית	
גזר מחז"מ 40	372	מחז"מ F בגז	2008	2038	חח"י	מרכזית	
חגית מחז"מ 20	359	מחז"מ F בגז	2007	2037	חח"י	מרכזית	
חגית מחז"מ - חירום	374	מחז"מ F בגז	2013	2043	חח"י	מרכזית	
חיפה מחז"מ 4	374	מחז"מ F בגז	2011	2041	חח"י	מרכזית	
חיפה מחז"מ 3	374	מחז"מ F בגז	2012	2042	חח"י	מרכזית	
צפית מחז"מ	360	מחז"מ F בגז	2012	2042	חח"י	מרכזית	
גנרציה חלופית במקום אורות רבין 1-4	650	מחז"מ H בגז	2022	2052	חח"י	מרכזית	

פירוט יחידות	הספק מותקן	טכנולוגיה	שנת הקמה	שנת הדממה	אסדרה רגולטורית	שיטת העמסה	היקף ייצור שהוא Must-Run /Must-Take
גנרציה חלופית במקום אורות רבין 1-4	650	מחז"מ H בגז	2022	2052	חח"י	מרכזית	
גזר 1	148	טורבינת גז תעשייתית בגז	1999	2039	חח"י	מרכזית	
גזר 2	148	טורבינת גז תעשייתית בגז	1999	2039	חח"י	מרכזית	
גזר 3	148	טורבינת גז תעשייתית בגז	1999	2039	חח"י	מרכזית	
גזר 4	148	טורבינת גז תעשייתית בגז	1999	2039	חח"י	מרכזית	
טג"ת צפית 1	110	טורבינת גז תעשייתית בסולר	1990	2031	חח"י	מרכזית	
טג"ת צפית 2	110	טורבינת גז תעשייתית בסולר	1990	2031	חח"י	מרכזית	
אילת 2	34	טורבינת גז תעשייתית בסולר	1996	2035	חח"י	מרכזית	
עטרות 1	34	טורבינת גז תעשייתית בסולר	1997	2038	חח"י	מרכזית	
עטרות 2	34	טורבינת גז תעשייתית בסולר	1997	2038	חח"י	מרכזית	
אילת 1	15	טורבינת גז סילונית בסולר	1981	*	חח"י	מרכזית	
אילת 3	43	טורבינת גז סילונית בסולר	1980	*	חח"י	מרכזית	
איתן	40	טורבינת גז סילונית בסולר	1973	*	חח"י	מרכזית	
רוטנברג 1	20	טורבינת גז סילונית בסולר	1989	*	חח"י	מרכזית	
רוטנברג 2	20	טורבינת גז סילונית בסולר	1989	*	חח"י	מרכזית	
הר טוב	40	טורבינת גז סילונית בסולר	1972	*	חח"י	מרכזית	
רעננה	11	טורבינת גז סילונית בסולר	1973	*	חח"י	מרכזית	

פירוט יחידות	הספק מותקן	טכנולוגיה	שנת הקמה	שנת הדממה	אסדרה רגולטורית	שיטת העמסה	היקף ייצור שהוא Must-Run /Must-Take
אשכול	10	טורבינת גז סילונית בסולר	1974	*	חח"י	מרכזית	
חיפה 1	40	טורבינת גז סילונית בסולר	1974	*	חח"י	מרכזית	
חיפה 2	40	טורבינת גז סילונית בסולר	1974	*	חח"י	מרכזית	
כינורות 1	40	טורבינת גז סילונית בסולר	1975	*	חח"י	מרכזית	
כינורות 2	40	טורבינת גז סילונית בסולר	1979	*	חח"י	מרכזית	
קיסריה 1	40	טורבינת גז סילונית בסולר	1973	*	חח"י	מרכזית	
קיסריה 2	40	טורבינת גז סילונית בסולר	1973	*	חח"י	מרכזית	
קיסריה 3	50	טורבינת גז סילונית בסולר	1980	*	חח"י	מרכזית	
אורות רבין	15	טורבינת גז סילונית בסולר	1989	*	חח"י	מרכזית	
אשכול ג 6	228	ת"כ קיטורית בגז	1975	2024	חח"י	מרכזית	
אשכול ג 7	228	ת"כ קיטורית בגז	1975	2026	חח"י	מרכזית	
אשכול ד 8	228	ת"כ קיטורית בגז	1977	2028	חח"י	מרכזית	
אשכול ד 9	228	ת"כ קיטורית בגז	1977	2028	חח"י	מרכזית	
רידינג ד 3	214	ת"כ קיטורית בגז	1970	2024	חח"י	מרכזית	
רידינג ד 4	214	ת"כ קיטורית בגז	1970	2024	חח"י	מרכזית	
<b>אתרי חח"י שיימכרו ליח"פ עד 2025</b>							
רמת חובב ט"ג 1	100	טורבינת גז תעשייתית בגז	1989	2036	אסדרה לרמת חובב	מרכזית	
רמת חובב ט"ג 2	100	טורבינת גז תעשייתית בגז	1989	2036	אסדרה לרמת חובב	מרכזית	
רמת חובב ט"ג 6 - חירום	118	טורבינת גז תעשייתית בגז	2009	2050	אסדרה לרמת חובב	מרכזית	
רמת חובב ט"ג 7 - חירום	118	טורבינת גז תעשייתית בגז	2010	2050	אסדרה לרמת חובב	מרכזית	

פירוט יחידות	הספק מותקן	טכנולוגיה	שנת הקמה	שנת הדממה	אסדרה רגולטורית	שיטת העמסה	היקף ייצור שהוא Must-Run /Must-Take
רמת חובב מחז"מ 34	335	מחז"מ E בגז	1999	2036	אסדרה לרמת חובב	מרכזית	
רמת חובב מחז"מ חירום	365	מחז"מ F בגז	2013	2043	אסדרה לרמת חובב	מרכזית	
הגית מחז"מ 34	330	מחז"מ E בגז	2002	2032	תפורסם לקראת המכירה	מרכזית	
הגית מחז"מ 56	330	מחז"מ E בגז	2002	2032	תפורסם לקראת המכירה	מרכזית	
מחז"מ חדש	880	מחז"מ F בגז	2025	2055	תפורסם לקראת המכירה	מרכזית	
אשכול מחז"מ 3 - חירום	393	מחז"מ F בגז	2013	2043	תפורסם לקראת המכירה	מרכזית	
מחז"מ 1 אשכול	377	מחז"מ F בגז	2005	2035	תפורסם לקראת המכירה	מרכזית	
<b>יח"פ</b>							
דוראד 1	429	מחז"מ בגז	2014	2044	241	הסכמים בעיקר + מרכזית	כל היצרנים שהשתלבו במסגרת החלטה 241 רשאים להיכנס להסכמים עם צרכנים ומנהל המערכת חייב להפעילם כ-Must-Take.
דוראד 2	431	מחז"מ בגז	2014	2044	241	הסכמים בעיקר + מרכזית	הונח Must-Take עד לשנת סיום תשלומי הזמינות
נשרים אנרגיה מובילה	74	מחז"מ בגז	2014	2044	241	הסכמים	
או.פי.סי מישור רותם	466	מחז"מ בגז	2013	2043	תנאי המכרז	הסכמים	
איי פיי דלק שורק	140	מחז"מ בגז	2017	2047	241	הסכמים	
דליה 1	457	מחז"מ בגז	2015	2045	241	מרכזית + הסכמי	
דליה 2	455	מחז"מ בגז	2015	2045	241	מרכזית + הסכמי	
איי.פי.אמ. באר טוביה	451	מחז"מ בגז	2020	2052	914	מרכזית	
חב' MRC - תבור מחז"מ אלון תבור	363	מחז"מ בגז	2008	2038	אסדרה לאלון תבור	מרכזית	
חב' MRC - אלון תבור ט"ג 1	110	טורבינת גז תעשייתית בסולר	1991	2035	אסדרה לאלון תבור	מרכזית	
חב' MRC - אלון תבור ט"ג 2	110	טורבינת גז תעשייתית בגז מחזור	1992	2035	אסדרה לאלון תבור	מרכזית	

פירוט יחידות	הספק מותקן	טכנולוגיה	שנת הקמה	שנת הדממה	אסדרה רגולטורית	שיטת העמסה	היקף ייצור שהוא Must-Run /Must-Take
		פתוח בסולר או בגז					
ט"ג חדשות	230	מחזור פתוח בגז	2025	2055	אסדרה לאלון תבור	מרכזית	
מפעלים המלח	230	קוגנרציה	2018	2048	אסדרה לקוגנרציה	ייצור עצמי +הסכמים	Must-Take
או.פי.סי. (נרכש מאנרגיה משולבת)	148	קוגנרציה : מכירה לנייר חדרה (כ- 1/3) ולרשת	2020	2050	אסדרה לקוגנרציה	הסכמים	Must-Take
פז בית זיקוק אשדוד	60	קוגנרציה	2013	2043	אסדרה לקוגנרציה	ייצור עצמי +הסכמים	Must-Take
פז בית זיקוק אשדוד	49	קוגנרציה	2010	2040	אסדרה לקוגנרציה	ייצור עצמי +הסכמים	Must-Take
אשדוד אנרגיה	65	קוגנרציה	2015	2045	אסדרה לקוגנרציה	הסכמים	Must-Take
רמת נגב אנרגיה	126	קוגנרציה	2016	2046	אסדרה לקוגנרציה	הסכמים	Must-Take
איי פיי אלון תבור	73	קוגנרציה	2020	2050	אסדרה לקוגנרציה (211)	הסכמים	Must-Take
איי פיי רמת גבראל	73	קוגנרציה	2020	2050	אסדרה לקוגנרציה (211)	הסכמים	Must-Take
אי.פי.פי דלק אשקלון	87	קוגנרציה	2009	2039	אסדרה לקוגנרציה (211)	הסכמים	Must-Take
אלון מרכזי אנרגיה	73	קוגנרציה	2020	2050	אסדרה לקוגנרציה	הסכמים	Must-Take
אתגל שותפות מוגבלת	206	טורבינות גז במחזור פתוח	2022	2062	914	מרכזית	
או.פי.סי. (רכשה רישיון של צומת אנרגיה)	396	טורבינות גז במחזור פתוח	2022	2062	914	מרכזית	

## נספח ג' - תהליך תכנון הפעלת המערכת

מנהל המערכת מחשב את תוכנית הפעלת המערכת, דהיינו את העיתוי ואת רמת ההעמסה של כל יחידת ייצור ליום או לכמה ימים קדימה במסגרת תהליך האופטימיזציה של הקצאת היחידות לתפעול (Unit Commitment).

המטרה של תהליך זה היא למזער את עלות הייצור הכוללת במערכת בטווח התכנון  $T$ :

$$\text{Min}(TOTAL PRODUCTION COST)$$

$$= \sum_t \sum_{i=1}^N (PRODUCTION COST(x(i, t)) + START UP COST(i, t))$$

כאשר  $x(i, t)$  – הספק של יחידה  $i$  בפרק זמן  $t$ ,

$PRODUCTION COST(x(i, t))$  – עלויות דלק + מרכיב משתנה של עלות תפעול ואחזקה (במקרה הצורך

ניתן לכלול במרכיב זה גם עלות הפליטות) של יחידה  $i$  בפרק זמן  $t$ ,

$START UP COST(i, t)$  – עלות ההתנעה של יחידה  $i$  בפרק זמן  $t$ ,

$N$  – מספר היחידות הזמינות בפרק זמן  $t$ ,

וזאת בכפוף להספקת המאזן בין הביקוש להיצע בכל נקודת זמן:

$$\sum_i U(i, t)x(i, t) = Load(t)$$

כאשר  $U(i, t) = 1$  אם היחידה בפעולה בזמן  $t$  ו-  $U(i, t) = 0$  אם היחידה לא פועלת בזמן  $t$ .

תוך הבטחת עמידה במגבלות שקשורות לכל יחידת ייצור בנפרד, כגון:

- תחום ההעמסה המותר של כל יחידת ייצור (בין הספק מירבי ומזערי)

$$x(i, t) \in \{0, [P_i^{min}, P_i^{max}]\} \quad \forall i, t$$

- הזמן המינימלי שהיחידה צריכה להיות בפעולה לפני הפסקתה (Minimum Up Time)

$$\text{If } u(i, t) = 1 \text{ and } t_i^{up} < t_i^{up, min} \text{ then } u(i, t + 1) = 1$$

והזמן המינימלי שהיחידה צריכה להיות מופסקת לפני הפעלתה מחדש (Minimum Down Time)

$$\text{If } u(i, t) = 0 \text{ and } t_i^{down} < t_i^{down, min} \text{ then } u(i, t + 1) = 0$$

- כדי להימנע מגרימת נזק למכונה, ההעמסה החשמלית של היחידה לא צריכה להשתנות ביותר מערך מסוים

לאורך פרק זמן נתון (Ramp Rate):

בעליית ההספק (Maximum Ramp-up Rate)



$$x(i, t+1) - x(i, t) \leq \Delta P_i^{up, max}$$

ובירידת ההספק (Maximum Ramp-down Rate)



$$x(i, t) - x(i, t+1) \leq \Delta P_i^{down, max}$$

- זמן ההתנעה המינימלי, דהיינו זמן עד לסנכרון היחידה ומסינכרון היחידה עד ההספק התפעולי המינימלי; טיפול מיוחד נדרש בנוגע לתהליך ההתנעה או ההפסקה בשלבים של יחידות ייצור במחזור משולב אשר מורכבות מטורבינות גז ויחידות קיטוריות;
- מגבלות על פליטת מזהמים, כגון SOx, NOx, חלקיקים בשעה מסוימת או בפרק זמן מסוים;
- מחויבות של מנהל המערכת לתעדף חלק מיצרני חשמל, כגון היצרנים עם הסכמים בילטרליים, יצרנים בשיטת קוגנרציה, אנרגיות מתחדשות וכו';

### ובנוסף ישנן דרישות מערכתיות, כגון:

#### דרישות העתודה:

- הפסקה מאולצת בלתי צפויה של יחידת ייצור עשויה לגרום לירידת תדר מסוכנת במערכת אם התגובה המתקנת מצד יתר יחידות הייצור לא תבוא במהירות מספקת. במערכת הייצור בארץ מבדילים בין הסוגים הבאים של עתודה מהירה:
  - "עתודה סובבת מיידית" – יכולת זמינה המסופקת ממתקן ייצור המסונכרן לרשת, אשר יכול לספק אנרגיה תוך 0 עד 30 שניות ממועד קבלת הנחיה ממנהל המערכת;
  - "עתודה סובבת" – יכולת זמינה המסופקת ממתקן ייצור המסונכרן לרשת, אשר יכול לספק אנרגיה תוך 0 עד 5 דקות ממועד קבלת הנחיה ממנהל המערכת;
  - "עתודה מהירה" – יכולת זמינה המסופקת ממתקן ייצור, אשר יכול להשתלב במערכת ולספק אנרגיה תוך 5 עד 10 דקות (לדוגמא טורבינת גז גמישה) ממועד קבלת הנחיה על ידי מנהל המערכת.
- שתי הדרישות המערכתיות הראשונות לגבי "עתודה סובבת מיידית" ו"עתודה סובבת" מוגדרות על ידי מגבלות מסוג:

$$\sum_{i=1} u(i, t) * \gamma [ P_i^{max} - P_i(t) ] \geq R(t)$$

כאשר  $R(t)$  – העתודה הנדרשת בזמן  $t$ ;

- $\gamma$  – המקדם המסמן את התרומה הפוטנציאלית של יחידה  $i$  לעתודה סובבת או לעתודה מיידית בהתאמה. שמירה על עתודה סובבת נועדה להבטיח את יכולת המערכת לייצב את התדר במקרה של הפסקות בלתי צפויות של יחידות הייצור או תקלות במערכת ההולכה. המערכת מגיבה לירידת תדר בעזרת:
- תגובה אינרציאלית שמסופקת על ידי המסה המסתובבת בגנרטורים, אשר בולמת את ירידת התדר במערכת ברגע ההתחלתי לאחר קרות האירוע;

- בקרה ראשונית (**Primary Control**), שהיא בקרה אוטומטית מקומית (ביחידה עצמה) המשנה הספק כנגד כל שינוי בתדר ;
- בקרה משנית (**Secondary Supplemental Control**), שהיא בקרה אוטומטית מרכזית (הנשלטת על ידי מנהל המערכת) המספקת שינוי נוסף של הספק על מנת להחזיר את התדירות ליעדה.



# נספח ד' – דרישות תפ"ט לחיבור מתקני PV

## במתח עליון

להלן תיאור של חלק מהדרישות העיקריות ממתקני PV (כמפורט במסמך שפורסם) באשר להפעלת מערכת הייצור בכלל ואספקת שירותים נלווים בפרט.

### תגובה לשינוי תדר (Frequency Response):

א. מתקן הייצור יהיה בעל יכולת ויסות ראשוני של ההספק המיוצר, בהתאם לדיוק מדידה של  $\pm 0.01$  Hz או פחות. לצורך זה המתקן יצויד בווסת עומס-תדר או ווסת דומה המאפשר תגובה לשינוי התדר.

### ב. במתקנים בהם ההספק המתקן הוא בהתאם להספק הפאנלים:

- בתחום התדרים שבין 47 Hz לבין 50.2 Hz המתקן ייצר הספק זמין מרבי
- בעליית תדר מעל 50.2 Hz המתקן יוריד את ההספק המיוצר בהתאם לנוסחה הבאה:

$$\Delta P = - \frac{P_{available}}{R} \cdot \frac{f - 50.2 \text{ Hz}}{f_{nom}}$$

בתנאי שהתדר נמצא בין הגבולות  $50.2 \text{ Hz} < f < 51.5 \text{ Hz}$

$\Delta P$  - שינוי ההספק בעקבות שינוי התדר,  $f$  - תדר המערכת בפועל,  $f_{nom}$  - תדר נומינלי,

$P_{available}$  - הספק זמין בהתאם לקרינת השמש ומצב המתקן,  $R$  - קבוע וויסות (DROOP).

- ערך של קבוע ויסות ראשוני DROOP ייקבע ל-3% ( $R=0.03$  p.u.) או ערך אחר בין 5% ל-3% שייקבע על ידי מנהל המערכת. הערכים של DROOP וגבולות התדר יהיו ניתנים לכוונון.

### ג. במתקנים בהם ההספק הפאנלים גדול מההספק הנומינלי של המתקן (ההספק הנומינלי של המתקן - על פי גודל חיבור מאושר במגו"ט):

- בתחום התדרים  $(50 + DB1) < f < (50 - DB2)$  המתקן ייצר בהספק המירבי הזמין עד לגודל ההספק הנומינלי של המתקן או בהתאם ל-  $P_{setpoint}$  שייקבע על ידי מנהל המערכת.
- ערך Dead Band (DB1, DB2) נקבע ל- 0 Hz או ערך אחר בין 0 ל- 0.2 Hz שייקבע על ידי מנהל המערכת.
- בעליית תדר מעל 50 Hz המתקן יוריד את ההספק המיוצר.
- בירידת תדר מתחת ל- 50 Hz המתקן יעלה את ההספק המיוצר (בכפוף להספק הזמין).
- בתנאי שההספק נמצא בין הגבולות  $47 \text{ Hz} < f < 51.5 \text{ Hz}$ , המתקן יוריד/יעלה את ההספק בהתאם לנוסחה:

כאשר תדר גבוה מ-  $50 \text{ Hz} + DB1$

$$\Delta P = - \frac{P_{setpoint}}{R_1} \cdot \frac{f - 50 - DB_1}{50}$$

כאשר תדר נמוך מ-  $50 \text{ Hz} - DB2$

$$\Delta P = - \frac{P_{setpoint}}{R_2} \cdot \frac{f - 50 + DB_2}{50}$$

$\Delta P$  - שינוי ההספק בעקבות שינוי התדר,  $f$  - תדר המערכת בפועל,  $R_1, R_2$  - קבועי וויסות (DROOP).

Psetpoint - הספק עבודה של המתקן בנקודת חיבור המתקן. הספק עבודה של המתקן ייקבע על ידי מנהל המערכת בהתאם לנוסחה:

$$P_{\text{setpoint}} = [\text{MIN}(P_{\text{available}} \text{ or } P_{\text{nom}})] \cdot \frac{100 - \text{RP}(\%)}{100}$$

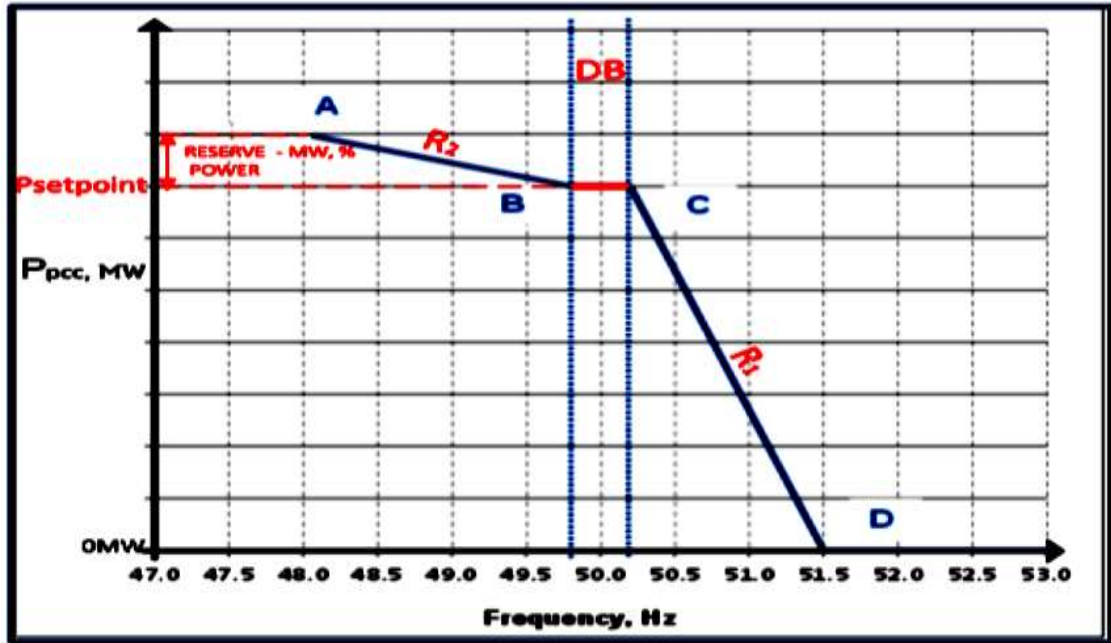
כאשר:  $P_{\text{nom}}$  - הספק נומינלי של המתקן,  $P_{\text{available}}$  - הספק זמין בהתאם לקרינת השמש ומצב המתקן, RP - RESERVE POWER (%) (כפוף להסדרה מסחרית).

6. ערך של קבוע ויסות ראשוני DROOP ייקבע ל-3% (R=0.03 p.u.) או ערך אחר בין 3% ל-5% שייקבע על ידי מנהל המערכת.

7. הערכים של DROOP ו-Dead Band יהיו ניתנים לכוונון.

8. בקרת התדר של המתקן נדרשת לפעול באופן רציף ומידי.

9. המתקן יאפשר ויסות הספק הייצור הפעיל, לכל אורך שעות היממה בהתאם ליכולת המתקן וההספק הזמין, בעזרת קביעת נקודת עבודה Psetpoint למתקן שתיקבע על ידי מנהל המערכת (ראה דוגמא שלהלן)



הערה: רמות ההספק, קבועי ויסות ותדר המסומנים בנקודות A,B,C,D ונקודת העבודה של המתקן (Psetpoint) ייקבעו על ידי מנהל המערכת, הערכים המסומנים בתרשים משמשים לדוגמה בלבד.

### מתקן הייצור יאפשר ויסות הספק אקטיבי רציף על ידי מנהל המערכת בפיקוד מרחוק בשתי צורות:

1. בעזרת הכנסת ערך SET POINT ביחס להספק הנומינלי של המתקן.
2. באמצעות מערכת LFC (Load Frequency Control) מרחוק (Set Point).
  - א. גבולות תפעוליים עליון/תחתון וקצב עלייה/ירידה ישלחו על ידי המתקן למנהל המערכת.
  - ב. גבול עליון – יכולת המתקן הזמינה בכל רגע נתון לוויסות במערכת LFC בהתחשב במגבלות הקרינה.
  - ג. גבול תחתון – הספק מינימלי זמין לוויסות במערכת LFC.
  - ד. המתקן יעביר למנהל המערכת את קצבי העלייה/ירידה. מנהל המערכת יבחר בקצב הרצוי לפי שיקול דעתו.
  - ה. המתקן אמור לקלוט פיקוד לשינוי העמסה לפחות פעם אחת ל-4 שניות.

1. על המתקן להגיב לאות הנשלח בפרק זמן שלא יעלה על 4 שניות.

## נספח ה' – שיטות חיזוי סולארי

באופן כללי, שיטות החיזוי מחולקות לשתי קטגוריות:

- 1. שיטה פיזית: מזינים נתוני מזג אוויר (לדוגמה, טמפרטורה, לחץ, חספוס פני השטח וכו') במודל חיזוי נומרי כדי ליצור תנאי מזג אוויר ספציפיים למקום, אותם ניתן לאחר מכן להמיר לייצור אנרגיה.**
- 2. שיטה סטטיסטית: משתמשים בנתונים היסטוריים ובנתוני זמן אמת לתיקון סטטיסטי של תוצאות שהתקבלו באמצעות שיטה פיזית.**

חיזוי סולארי יכול לכלול גם שימוש באמצעי הדמיה של שמיים (מצלמות דיגיטליות המפיקות תמונות שמיים באיכות גבוהה) ותמונות לוויין (נתונים מרשתות לוויין גיאוסטציוניות) כדי לעקוב ולחזות היווצרות עננים בטווחי זמן שונים.

כשמדובר במתקני PV מבזורים, קשה יותר לחזות את הייצור הסולארי, ולרוב התחזית מדויקת יותר אם היא מבוססת על נתונים שמתקבלים באופן קבוע ממכשירי המדידה עצמם בנקודות זמן הקרובות לזמן אמת, כמו גם על נתונים סטטיים מפורטים (כגון מיקום, מידע על ציוד, כיוון הפנאלים וכו') עבור כל המתקנים באזור המבוקש.

על מנת לחזות ייצור סולארי אזורי, משתמשים גם בשיטת שינוי קנה מידה, שהיא שיטה פחות מפורטת המשתמשת בתת קבוצות מייצגות של מתקני PV.

חיזוי מרכזי של הייצור הסולארי נחשב, בדרך כלל, לגישה המעשית ביותר לצורך הפעלת המערכת. חיזוי מרכזי מנוהל על ידי מפעילי המערכת ומספק את תחזית הייצור המשולבת של כל הייצור הסולארי ברמה ארצית (או באזור המבוקש).

חיזוי מבזור של הייצור הסולארי נעשה ברמה מקומית על ידי מפעיל של כל תחנת PV בנפרד ומספק מידע ברמת התחנה כדי לסייע למפעילי המערכת הארצית או האזורית להעריך את תנאי הגודש הצפויים עקב משטר הפעולה של התחנה.

בהשוואה לחיזוי מבזור, חיזוי מרכזי מאפשר:

- **עקביות רבה יותר בתוצאות עקב שימוש במתודולוגיה אחידה;**
- **הפחתת מידת אי הוודאות ברמה ארצית או אזורית עקב יכולתו של מפעיל המערכת לקבץ את אי הוודאויות הקשורות לכל אחד מהמתקנים;**
- **הפחתת הנטל הכספי על תחנות PV הנובע מהצורך להכין ולהגיש תחזיות אינדיבידואליות.**

עם זאת, שימוש במתודולוגיית חיזוי יחידה לחיזוי מרכזי יכול להגדיל את הסיכון לקיום הטיה מתמדת.

עקב כך, הדרך המקובלת לשפר חיזוי מרכזי היא באמצעות יצירת מערך של תחזיות שחושבו בשיטות שונות או על ידי ספקים שונים של שירותי חיזוי ועל בסיס זה לקבוע את התחזית המומלצת ואת טווח השגיאה המשויך לתחזית.

מפעילי המערכת יכולים לקבל תחזיות ממגוון ספקים חיצוניים הקיימים בשוק העולמי (שהתפתח בקצב מהיר בשנים האחרונות) או ממוסדות מחקר מטאורולוגיים, או שהם יכולים גם לפתח תחזיות משלהם.

בכל מקרה, שילוב תחזיות הייצור הסולארי עם הפעלת המערכת בזמן אמת ידרוש תשתית מתקדמת של טכנולוגיות מידע ותקשורת, סטנדרטיזציה של דרישות הנתונים והסמכה לנתונים הרלוונטיים לתחזית.

שגיאת החיזוי מבטאת את ההבדל בין הייצור הסולארי החזוי לייצור בפועל. שגיאת החיזוי משמשת להערכת ממדי דיוק של התחזית המאפשרים למפעילי המערכת לחזות מידת אי הוודאות בתכנון הפעלת המערכת וגם להשוות בין שיטות חיזוי שונות:

- **שגיאת הטיה (Bias) ממוצעת - מציינת אם המודל נוטה באופן מתמיד להעלות או להוריד את התחזית;**
- **שגיאה מוחלטת ממוצעת - מודדת את הדיוק הממוצע של תחזית מבלי להתייחס לכיוון השגיאה;**
- **שגיאת RMS - מודדת את הדיוק הממוצע של תחזיות מבלי לקחת בחשבון את כיוון השגיאה ומעניקה משקל גדול יחסית לשגיאות גדולות.**

יש לציין שהדיוק של תחזיות הייצור הסולארי עולה, בדרך כלל, כשהחיזוי הוא לפרקי זמן קצרים. עם זאת, תחזיות תכופות יכולות להועיל רק כאשר טווחי הזמן שלהם תואמים את מרווחי הזמן שבהם מפעילי המערכת עוד יכולים לקבל החלטות מעשיות.

לדוגמה, כשהתחזית מתריעה שתוך רבע שעה תתרחש ירידה מהירה בייצור הסולארי, מנהל המערכת יכול להחליט להעביר את תחנת האגירה השאובה ממצב טעינה לפריקה. במקרה זה, התחנה תוכל לספק חלק משמעותי מהעלייה המהירה בעומס השיורי וגם "לשחרר" לרשת את ההספק הסולארי (או הקונבנציונלי) ששימש קודם לכן לטעינה. בהיעדר תחזית, אי אפשר להיערך לתנודות, ולכן תגובת המערכת בזמן האירוע יכולה להיות איטית למדי, מה שעלול לסכן את אמינות המערכת.

לפיכך, חשוב מאוד שהתחזיות יהיו מותאמות לתנאים מקומיים ולצרכים וליכולות הספציפיים של מפעילי המערכת.

## נספח ו' – ניהול צד הביקוש

לצורך יצירת יכולת הצרכנים להגיב לשינויים במחיר החשמל או להשתתף באספקת שירותי ניהול המערכת, לדוגמא באמצעות שינוי הביקוש בתגובה לשינויי תדר ברשת, או להשתתף בתוכניות ניהול הביקוש בהתאם לדרישות מפעילי המערכת, או לספק חשמל באופן מרוכז ממתקני ייצור מבוזרים, מדינות העולם מקדמות הקמת תשתיות מתאימות לכך תחת הכותרת

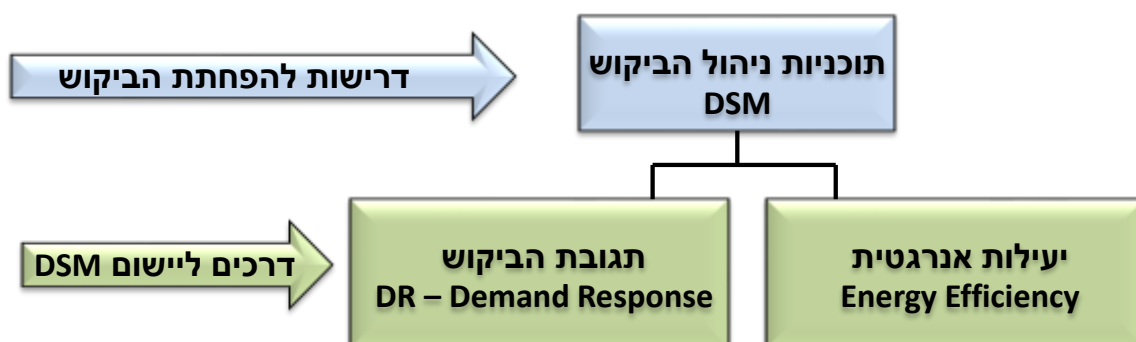
על פי הנציבות הרגולטורית הפדרלית לאנרגיה של ארה"ב (FERC), תגובת הביקוש (Demand Response - DR) מוגדרת כ: "שינויים בשימוש בחשמל בצד הביקוש מדפוסי הצריכה הרגילים כתגובה לשינויים במחיר החשמל לאורך זמן, או לתשלומי תמריץ שנועדו לעודד צריכת חשמל נמוכה יותר בתקופות של מחירים גבוהים בשוק הסיטונאי או כאשר אמינות המערכת נמצאת בסיכון".

ניהול צד הביקוש (Demand Side Management – DSM) מתייחס ליוזמות ולטכנולוגיות המעודדות את הצרכנים לייעל את השימוש שלהם באנרגיה. זהו אחד התחומים הנחקרים ביותר בתחום הגמישות במערכת החשמל, שמטרתו לשפר את הגמישות בצד הצרכני. יישום תוכניות DSM יכול לנוע בין שיפור היעילות האנרגטית בעזרת השימוש בחומרי בידוד טובים יותר ועד מערכות אנרגיה אוטונומיות לחלוטין המגיבות אוטומטית לשינויי היצע וביקוש.

היתרונות של DSM הם כפולים: ראשית, צרכנים יכולים להפחית את חשבונות החשמל שלהם על ידי התאמת העיתוי והיקף השימוש בחשמל, ושנית, מערכת החשמל יכולה להפיק תועלת מהזזת צריכת החשמל משעות בהן צפויים עומסי שיא (או בעיות דינמיות במערכת) לשעות עם עומס נמוך יותר.

חשוב להבין כאן כי ניהול תגובת הביקוש (DR) וצד הביקוש (DSM) אינם אותו דבר, אם כי לעתים קרובות משתמשים בהם כאילו הם מושגים זהים לחלוטין. DSM כולל את השימוש בכל האמצעים להפחתת הביקוש. במילים אחרות, DSM כולל את שתי הדרכים ליישום: תגובת הביקוש (DR) והתייעלות אנרגטית. תרשים 39 יעזור להבין זאת.

תרשים 39: DR – Demand Response היא אחת הדרכים ליישום DSM – Demand Side Management



DSM מקיף תפיסה רחבה יותר של ניהול דרישות אנרגיה, ואילו DR מכוון במיוחד להפחתת הביקוש ברגע הנתון. DSM נועד לסייע באיזון הביקוש וההיצע של חשמל מנקודת מבט של חברות חשמל, מפעילי המערכת וצרכנים, ואילו DR מונע רק על ידי הצד הצרכני. DR מתייחס לתוכניות המעודדות את המשתתפים להפחית

את הביקוש לחשמל לפרק זמן קצר, כך שתגובות הביקוש מופעלות על ידי אותות מחיר משוק החשמל החצי-שעתי או מופעלות על ידי מנהל מערכת החשמל או מפעילי מערכת החלוקה. הפעלות של DR יכולות להימשך בין מספר דקות למספר שעות, תלוי בתוכנית ה-DR, ויכולות לכלול כיבוי של האורות או עמעומם, התאמת רמות מיזוג האויר או הפסקה של תהליך ייצור כלשהו שאינו קריטי בשעות אלה, וכו'. כמו כן, ניתן להשתמש גם במתקני ייצור או אגירת אנרגיה מקומיים כתחליף להפחתת הביקוש. הדבר העיקרי שיש לזכור הוא שמדובר באמצעים זמניים ותגובתיים התורמים לשיפור ביצועי המערכת ולהחלקה אוטומטית של עקום הביקוש, כמו גם לשמירה על אמינות האספקה במקרה של מחסור בכושר הייצור במערכת. לעומת זאת, מושג ניהול צד הביקוש (DSM) כולל כל תוכנית שמעודדת את משתמשי הקצה להיות יעילים יותר בצריכת האנרגיה - לכן DR גם כן נופל תחת קטגוריה זו, אך בנוסף אליו בקטגוריה זו נכללות גם תוכניות ההתייעלות האנרגטית לטווח הארוך, כמו שדרוגי תאורה, שדרוגי אוטומציה בבניין, שיפור מערכות מיזוג אויר וכו'.

תחום ניהול צד הביקוש (DSM) תפס תאוצה עוד בשנות השמונים של המאה הקודמת והביא לשינוי דרסטי בתהליך תכנון המערכת לטווח הארוך. יותר ויותר מדינות מפותחות דרשו מחברות חשמל להכין את תוכניות הפיתוח שלהן בפורמט של תכנון משאבים משולב (Integrated Resource Planning) שמשלב תוכניות ניהול הביקוש (DSM) בתהליך אופטימיזציה של פיתוח המערכת, בשורה אחת עם מתקני ייצור. יישום תוכניות ניהול צד הביקוש, המבוססות על תגובת הביקוש (DR), כבר דרש פיתוח תשתיות מדידה ותקשורת מחד, והתשתית המאפשרת עיבוד נתונים מאידך. מתחילת המאה ה-21 התבררו ההזדמנויות לנצל טכנולוגיות תקשורת אלקטרוניות בכדי להסיר את המגבלות על פיתוח תשתיות הנחוצות להשתתפות פעילה יותר של צד הביקוש במתן שירותי ניהול המערכת. הצורך בכך גבר עוד יותר עם הגברת הקצב של השתלבות אמצעי ייצור מבוזרים במשק החשמל, ובראשם מקורות אנרגיה מתחדשת, שהפכו את צד הביקוש מפאסיבי לפעיל בתחום ייצור החשמל. זה נתן דחיפה לפיתוח רשת חכמה.