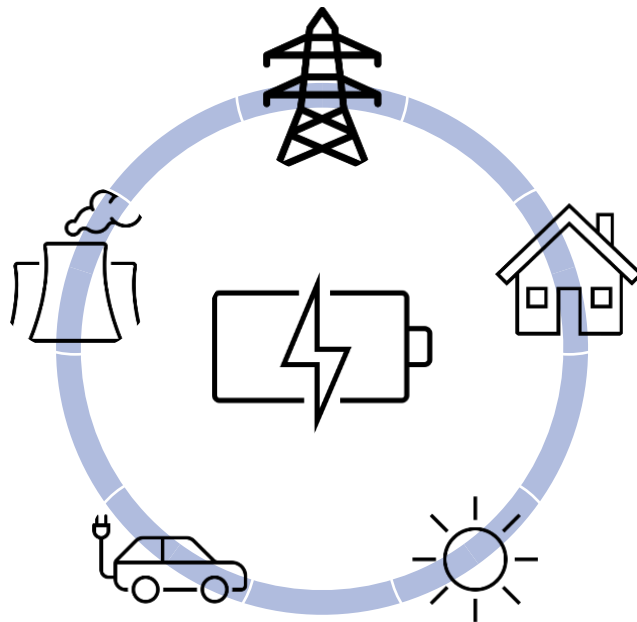


הצעה למפת דרכים לאגירת אנרגיה בישראל

לשם עמידה ביעד האנרגיה המתחדשת



ד"ר נורית גל וברק רשף

יוני 2021

תקציר מנהלים

באוקטובר 2020 החליטה הממשלה¹ להגדיל את יעד האנרגיה המתחדשת בישראל ל-30% מתמהיל הייצור בשנת 2030. יעד זה צפוי להיות מושג בעיקר באמצעות מתקנים פוטו וולטאיים בהספק מצטבר של כ-16,000 מגה וואט, לעומת כ-3000 מגה וואט בלבד המותקנים כיום. כתוצאה מכך, ישראל צפויה להיות בין המדינות המובילות בעולם באחוז האנרגיה הסולארית בתמהיל הייצור.

המשקל המשמעותי של האנרגיה הסולארית ביצור החשמל בישראל צפוי להציב מגוון אתגרים לניהול משק החשמל. בכלל זה, פיתוח הרשת להולכת האנרגיה ממתקני יצור מרוחקים לאזורי הביקוש, עודפי ייצור בשעות הצהריים, קצב מהיר של עליית העומס ביחידות הייצור בגז בשעות שקיעת השמש, והפרעות לתדר. אתגרים אלו מתעצמים על רקע הגידול הצפוי בביקוש, ההחלטה להפסיק את השימוש בפחם ולבסס את ייצור החשמל בישראל על גז ואנרגיה מתחדשת בלבד והגריטה הצפויה של חלק מתחנות חברת החשמל לקראת סוף העשור.

יחד עם זאת, **ירידת המחירים והפיתוח המהיר של טכנולוגיית האגירה בסוללות מצביעים על האפשרות לשלב אגירה במשק החשמל על מנת לאפשר את העמידה ביעד האנרגיה המתחדשת תוך הבטחת אמינות האספקה בעתיד**. בכלל זה, האגירה עשויה לאפשר מענה לעודפי ייצור בצהריים, הקלת הגודש ברשת, תחליף להקמת מתקני ייצור בגז ומענה לייצוב התדר.

מסמך זה מציג הצעה למפת דרכים לשילוב אגירה במשק החשמל בישראל לשם עמידה ביעדי האנרגיה המתחדשת. המסמך סוקר את היישומים העיקריים של אגירת החשמל בישראל ועונה על שאלות היסוד הנוגעות לפיתוח האגירה: **כמה הספק וקיבולת אגירה נדרשים למשק? מתי נדרש יהיה להקים את האגירה, לאורך העשור הקרוב? היכן יש למקם את האגירה? לאיזה מקטע רשת (הולכה או חלוקה) יש לחבר את האגירה? וכיצד יש להסדיר את התנאים הכלכליים על מנת לאפשר את שילוב האגירה?**

המסמך נועד לקדם את הדיון הציבורי והממשלתי בישראל על פיתוח אגירת האנרגיה, על מנת לאפשר את השגת יעדי האנרגיה המתחדשת של ישראל, תוך שמירה על אמינות האספקה².

¹ החלטת ממשלה 465 מיום 25.10.2020

² המסמך הוא פרי יוזמתם של הכותבים ולא מומן על ידי גורם אחר.

אגירה לשם חיבור הספק סולארי נוסף באזורי גודש

הצורך הדחוף ביותר באגירת אנרגיה בישראל כיום הוא במענה לגודש באזורי הזנה של כ- 20-30 תחנות משנה³, בהם קיימים שטחי קרקע או מאגרי מים המאפשרים הקמת מתקנים סולאריים נוספים, כגון עוטף עזה, הערבה, אילת ועמק המעינות. מתקני אגירה יאפשרו להסיט את הזרמת האנרגיה המתחדשת לשעות הערב, באזורים בהם יש גודש בהשנאה ו/או ברשת ההולכה, ובכך לאפשר חיבור הספק משמעותי נוסף של מתקני ייצור סולריים לתשתית הרשת קיימת, כבר בטווח הזמן הקרוב. עם זאת, האגירה איננה מאפשרת לחבר לרשת את מלוא ההספק הסולארי הנדרש לשם עמידה ביעד. לפיכך יש להמשיך ולפתח את רשת ההולכה במקביל להקמת מתקני האגירה.

להערכתנו, הספק האגירה הנדרש במענה לגודש בשנאי תחנות המשנה הוא כ- 2400 3600 מגה וואט לכ- 4~ שעות. הספק אגירה זה יאפשר תוספת הספק סולארי של כ- 120 מגה וואט בכל אחד מ- 20-30 תחמ"שים בהם מתקיים כיום גודש.

מתקני אגירה אלו נכון להקים בעיקר במקטע החלוקה, קרי – בצד המתח הגבוה של התחמ"ש. זאת משום שמרבית המתקנים הסולאריים צפויים להתחבר לרשת החלוקה, דבר שייצור עומס בתחנות המשנה וברשת ההולכה, עקב הצורך להזרים את עודפי האנרגיה דרך שנאי התחמ"ש אל מערכת ההולכה. הקמת האגירה במקטע החלוקה, תקל הן על צוואר הבקבוק העיקרי הקיים בהשנאה בתחמ"שים והן על הגודש ברשת ההולכה. לעומת זאת, חיבור האגירה לרשת המתח העליון, לא יקל על הגודש בשנאי התחמ"ש ולפיכך לא יקטין את הצורך בהקמת תחמ"שים נוספים.

חיבור האגירה במקטע החלוקה, אינו מחייב - מהיבט הנדסי - צמידות פיסית לחצר התחמ"ש, כשם שמתקני ייצור וצריכה המחוברים בחלוקה, אינם צמודים לתחמ"ש. עם זאת, וועדות התכנון עשויות להעדיף קירבה למתקנים קיימים, על מנת למזער את הפגיעה בשימושים אחרים בקרקע.

שילוב אגירה במתקנים פוטו וולטאיים חדשים או קיימים, במתווה שנקבע עד כה על ידי רשות החשמל, "משטחת" את עקום הייצור הסולארי ומאפשרת שליטה בייצור הסולארי, ובכך מקלה את העומס על הרשת ומצמצמת את הצורך באגירה בתחמ"ש (תרשים 5). עם

³ אם זאת, לישראל ידרש בעתיד כושר ייצור נוסף, במענה לתרחישים בהם האגירה איננה נותנת מענה מלא, כגון תרחישים בהם הביקוש ממושך ולא ניתן לקיים מחזור של פריקה וטעינה.

זאת הדרישה לשילוב אגירה חלה כיום על מתקנים פוטו-וולטאיים קטנים⁴ ואיננה חלה על מתקנים אשר קמים על גבי מאגרי מים. הרחבת הדרישה לשילוב אגירה במתקנים אלו תאפשר לצמצם את הצורך בתוספת השנאה ובפיתוח רשת ההולכה.

שהאסדרה שנקבעה למתקנים משולבי אגירה מעודדת הזרמת אנרגיה בכל שעות היום ובכלל זה גם בשעות הצהריים, בהן צפוי גודש בשנאי ההולכה. לכן, יש לתמרץ בנוסף גם הקמת אגירה בשטח המתקנים הפוטו וולטאיים או בחיבור ישיר לצד המתח הגבוה של התחמ"ש אשר תקל על הגודש בשנאים בשעות הצהריים.

אגירה לקליטת עודפי אנרגיה בצהריים

לקראת אמצע העשור, כאשר האנרגיה המתחדשת תגיע ל 20% מתמהיל הייצור, צפויים להיווצר עודפי ייצור בשעות הצהריים במרבית חודשי השנה, למעט הקיץ (תרשים 8). קרי, הייצור הסולארי יעלה על הביקוש הצפוי בשעות הצהריים. כושר האגירה הנדרש לקליטת עודפים אלו, מותנה בהחלטה על היקף קיטום האנרגיה המתחדשת: הגבלת קיטום האנרגיה המתחדשת לכ- 0.1% מהייצור הסולארי⁵, תחייב הקמת כושר אגירה של 5000 מגה וואט לכ- 4 שעות. לעומת זאת, קיטום של 1% מהייצור הסולארי⁶, יאפשר להסתפק בכושר אגירה של כ- 3400 מגה וואט לכ- 4 שעות. כושר האגירה שיידרש במענה לעודפי האנרגיה יתפתח בהדרגה החל מאמצע העשור, ויגיע להיקף משמעותי רק בסוף העשור.

כבר היום, ישנם אילוצי תפעול המביאים לכיבוי יחידות ייצור והתנעה מחודשת שלהן, בשעות אחר הצהריים. הייצור הסולארי צפוי להביא בעתיד לכיבוי והתנעה מחדש של יחידות ייצור קונבנציונאליות בתדירות יומית. מגמה זו צפויה להגדיל את עלויות התפעול והתחזוקה, לקצר את אורך חיי היחידות ואף לפגוע בשרידות המערכת ובאמינות אספקת החשמל בישראל. **ניתן למזער את הפגיעה באמינות האספקה באמצעות הקמת חלק מהאגירה הנדרשת לקליטת עודפי האנרגיה באיזור תחנות הכח. כך, ניתן יהיה למזער את הצורך בהדממה והתנעה מחדש של היחידות.**

מדיניות הפעלת היחידות הפחמיות המוסבות לגז צפויה להשפיע על היקף האגירה שתידרש לקליטת עודפי אנרגיה. יחידות אלו אינן מתאימות למשטר של כיבוי והתנעה יום-

⁴ הדרישה חלה רק על מתקנים שהספק החיבור שלהם לרשת גדול מ 2 מ"ו, קרי – הספק פאנלים של כ 5 מ"ו לפחות.

⁵ שווה ערך לכשעתיים מתוך כ 1700 שעות ייצור בהספק מלא בשנה.

⁶ שווה ערך לכעשרים שעות מתוך כ 1700 שעות ייצור בהספק מלא בשנה.

יומי. לכן, המשך ההפעלה של יחידות אלו בעומס מינימלי יגדיל את עודפי הייצור בשעות הצהריים, ולכן יחייב הגדלה של הספק האגירה הנדרש בכ 1700 מגה וואט.

מתקני אגירה לקליטת עודפי אנרגיה, ניתן להקים הן ברשת החלוקה והן ברשת ההולכה. עם זאת, כפי שהראינו לעיל, למשק ידרשו גם מתקני אגירה בהספק משמעותי במקטע החלוקה, בתחנות המשנה בהן קיים גודש. מתקנים אלו צפויים ממילא לקלוט עודפי אנרגיה בשעות הצהריים על מנת לתת מענה לגודש ברשת. לכן, **הקמת מרבית כושר האגירה בצד מקטע החלוקה, תתן מענה הן לקליטת עודפי הייצור והן לגודש ברשת ובשנאי התחמ"ש.**

אגירה כתחליף לכושר ייצור בשעות הערב

קצב גידול הביקוש בישראל עמד (עד למגפת הקורונה) על כ 2.7% בשנה בממוצע⁷. קצב זה, אם ימשך בשנים הבאות, צפוי להביא את ישראל לגידול מצטבר של כ 30% בצריכת האנרגיה עד לסוף העשור. כפועל יוצא מכך, שיא הביקוש צפוי לגדול בכ- 4500 מגה-וואט עד לשנת 2030.⁸

מתקני אגירת אנרגיה מאפשרים לתת מענה לגידול בשיאי הביקוש בשעות הערב באמצעות אגירת האנרגיה בצהריים ופריקה של האנרגיה בשעות הערב. כך, אותם מתקנים שיוקמו כדי לתת מענה לגודש ברשת בשעות הצהריים ולקליטת עודפי האנרגיה בצהריים, ישמשו גם תחליף להקמת כושר ייצור.

מהבחינה הכלכלית שערכנו עולה כי במחירי האגירה הצפויים באמצע העשור, עלות האגירה צפויה להיות זולה בהשוואה לעלות מתקני ייצור בגז במחזור פתוח ("פיקרים"). מכאן, שיש ערך בהקמת מתקני אגירה כתחנות כח במחזור פתוח, גם לולא היתה האגירה נדרשת לשם קליטת עודפי ייצור בצהריים. כלומר, החל מאמצע העשור האגירה צפויה להיות כדאית גם כתחליף למתקן ייצור בלבד. התועלות הנוספות של מתקני האגירה, מעצימות כדאיות כלכלית זו.⁹

⁷ [מפת דרכים למקטע הייצור במשק החשמל](#), רשות החשמל יוני 2018

⁸ בנוסף, צפויים להיגרט מתקני ייצור בהספק מצטבר של כ- 3400 מ"ו, אולם מתקנים אחרים בהספק דומה נמצאים כבר בתהליך הקמה. ולכן, עיקר הצורך בכושר ייצור נוסף נובע מהגידול בביקוש.

⁹ בטווח הזמן הרחוק, ככל שימשך הגידול בביקוש, יתכן שלישראל ידרש כושר ייצור נוסף והאגירה לבדה לא תתן מענה לעקום הביקוש.

להערכתנו, יידרשו מתקני אגירה בהספק של כ – 103500 מגה וואט במענה לגידול בשיא הביקוש בערב תוך שמירה על קריטריון האמינות המקובל, בעיקר במחצית השנייה של העשור. מתקני אגירה המהווים תחליף לכושר ייצור ניתן להקים בחצר צרכן או בחיבור ישיר לרשת, הן ברשת החלוקה והן ברשת ההולכה. עם זאת, כדי להבטיח ריבוי שימושים באגירה, מומלץ להקים חלק משמעותי מכושר האגירה במקטע החלוקה באזורי הגודש בהם נדרש חיבור מתקנים סולאריים נוספים.

אגירה במענה לגידול בביקוש מול גודש בהולכה באזור המרכז (השבתת תח"כ רדינג)

באזור המרכז, הביקוש עולה על כושר הולכת האנרגיה, והאגירה עשויה לתמוך במערכת ההולכה ולהקל על הגודש ברשת עד להקמת תחנת מיתוג או כושר ייצור.

- א. מגבלת הולכת האנרגיה לאזור המרכז מקבלת כיום מענה באמצעות הפעלת תחנת הכח רדינג בשעות העומס. התחנה נדרשת להיסגר בשל חוק האסבסט והסבירות לאישור תוכנית להקמת כושר ייצור חליפי באזור המרכז היא נמוכה.
- ב. הפעלת תחנת המיתוג 400/161 ק"ו בקרית עתידים (ירקון) צפויה לספק מענה זמני, אך עם עליית הביקוש, לקראת 2026, הביקוש באזור זה יעלה על כושר הולכת האנרגיה אל האזור וייווצר צורך במענה נוסף.
- ג. מתקני אגירה במרחב עתידים - פתח תקווה או בצפון גוש דן עשויים להקל על גודש הולכת האנרגיה אל אזור המרכז.
- ד. עם זאת, אגירה איננה מהווה תחליף מלא לכושר ייצור ו/או הולכה משום שהיא מוגבלת בשעות הפריקה ולכן איננה נותנת מענה לארועים ממושכים, בהם אין אפשרות לקיים מחזורי טעינה ופריקה.

אגירה לוויסות התדר

מתקני אגירה ישמשו בעתיד גם לוויסות התדר במערכת, במענה לתנודתיות וסרוגיות (חוסר הרציפות) של הייצור הסולארי. אולם, מהניתוח עולה כי לצורך זה נדרש הספק אגירה קטן יחסית, בהשוואה לשימושי האגירה האחרים וניתן ליישם אותו באמצעות מתקני אגירה אשר יקומו לשימושים אחרים.

¹⁰ תוספת ההספק הנדרשת נמוכה מהגידול הצפוי בשיא הביקוש לאור היתירות הקיימת בכושר הייצור כיום.

לאור חשיבות ייצוב תדר לשרידות המערכת, מומלץ ליישם יכולת תגובה לתדר בכל מתקן ייצור ובכל מתקן אגירה שיקומו במשק וכן בהסדרים צרכניים.

סיכום והמלצות

טבלה 1 מסכמת את הספק האגירה הנדרש לישראל לפי שימוש על פני העשור הקרוב, את המיקום הרצוי של האגירה ואת אופן החיבור.

טבלה 1 – הספק, מיקום ואופן חיבור נדרש של האגירה לפי שימוש ושנה

יישום אגירה:	חיבור מתקני PV נוספים לרשת הקיימת באזורי גודש	קליטת עודפי אנרגיה בצהרים והסתת עומסים (*)	תחליף לכושר ייצור בשעות הערב	מענה לביקושים בגוש דן (תחנת רדינג)	תמיכה בוויסות תדר	צורך מצרפי שנתי בהנחה של שילוב שימושים
מאפיינים נדרשים:						
2022	1000	0	0	0	500	1000
2024	2400	0	0	0	500	2400
2026	3600	1400	1400	900	700	3600
2028	3600	3500	2500	900	700	3600
2030	3600	5000	3600	900	700	5000
מיקום רצוי	בקרבת תחמי"שים עמוסים	בקרבת תחמי"שים עמוסים ובחצר מחזמי"מים	בקרבת אזורי ביקוש או בחצר צרכן	אזור המרכז	כל הארץ	עדיפות לאזורי גודש ברשת
אופן חיבור רצוי	צד מתח גבוה של התחמש	מתח גבוה/עליון	מתח גבוה/עליון	מתח גבוה/עליון	מתח גבוה/עליון	70% בחלוקה 30% בהולכה (**)
שעות אגירה	~4	~4	~4	~4-6	~0.5	~4-6
טעינה	צהרים	צהרים	צהרים	צהרים	כל היום	צהרים
פריקה	ערב	ערב	ערב	ערב	כל היום	ערב

(*) הספק האגירה הנדרש לקליטת עודפי אנרגיה בצהרים עשוי לפחות אם יתאפשר קיטום של כ- 1% מהאנרגיה המיוצרת. (** מומלץ לתת עדיפות תחילה למתקנים ברשת החלוקה על מנת לתת מענה לחיבור מידי של מתקנים סולאריים נוספים על אף הגודש ברשת.

מהטבלה ניתן לראות כי הצורך הדחוף בישראל באגירת אנרגיה הוא במענה לחיבור מתקנים סולאריים נוספים, באזורים בהם קיים גודש בשנאים וברשת ההולכה. צורך משמעותי נוסף בקליטת עודפי אנרגיה בצהרים ותחליף לכושר ייצור בשעות הערב מסתמן בעיקר במחצית השנייה של העשור.

לאור זאת, מומלץ:

א. לתמרץ בהקדם הקמת מתקני אגירה בהספק מצטבר של כ 2400-3600 מ"ו ל 4 שעות שיאפשרו חיבור מתקנים סולאריים נוספים כבר בטווח הזמן הקרוב. מתקני אגירה אלו יש להקים **במקטע החלוקה, באזורי ההזנה של כ 20-30 תחמי"שים, בהם מזוהה כיום גודש שאינו מאפשר חיבור מתקנים סולאריים פוטנציאליים נוספים** גם בהינתן תוכנית הפיתוח המאושרת. חלק מהמתקנים ישולבו באתרים סולאריים והיתר יוקמו בסמוך לתחמי"ש, או במקרים מסוימים בתחמי"ש עצמה.

ב. לאור הפרדה המבנית בין ניהול המערכת לבין חברת החשמל, וההבנה כי מתקנים אלו יספקו מגוון שרותים עבור מנהל המערכת, יש להסדיר את השליטה של ניהול המערכת במתקני האגירה, אף שהמתקנים יחוברו במקטע החלוקה.

ג. במחצית השניה של העשור נדרשים מתקני אגירה נוספים בהספק של כ 1500 מגה וואט ל 4 שעות שיחוברו לרשת ההולכה. מתקנים אלו יהוו כלי לניהול ושמירה על יציבות ושרידות המערכת ויספקו גם מענה לעודפי ייצור בצהרים ולכושר ייצור בערב.

ד. מקבלי ההחלטות יידרשו לעסוק במספר סוגיות מדיניות על מנת שניתן יהיה לדייק את כושר האגירה הנדרש. בפרט :

(1) מהו הסף הראוי לקטימת עודפי ייצור סולארי? קביעת סף נמוך מ 1% תביא לגידול משמעותי בהיקף האגירה הנדרשת.

(2) מהי מדיניות הפעלת היחידות הפחמיות המוסבות לגז? המשך הפעלה של יחידות אלו בעומס מינימום יביא להגדלת כושר האגירה הנדרש .

(3) מהי מדיניות הפעלה של יצרני החשמל הפרטיים הפועלים בהסדרים בילאטרליים? המשך הפעלת מתקנים אלו בהעמסה עצמית לפי ביקוש הצרכנים יביא להגדלת השימוש באגירה.

מסמך זה מייצג את עמדתנו האישית בלבד והוא מבטא את מיטב ניסיונו והבנתנו המקצועית. אנו מקווים כי מסמך זה יעשיר את הדיון הציבורי באגירת האנרגיה בישראל ויסייע לקידום ההסדרה הכלכלית הנדרשת לשם שילוב האגירה במשק החשמל

ברק רשף¹²

ד"ר נורית גל¹¹

¹¹ ד"ר נורית גל היתה סמנכ"לית הרגולציה של רשות החשמל בשנים 2014-2019, כיום היא יועצת בתחום האנרגיה. עבודת הדוקטורט שלה עוסקת בהשפעת חוסר וודאות על השקעות במשקי חשמל.

¹² ברק רשף היה מנהל מגזר פיתוח מערכת המסירה בחברת החשמל וסמנכ"ל התכנון בחברת ניהול המערכת. כיום הוא יועץ.

תוכן עניינים

2.....	תקציר מנהלים.....
10.....	אגירת אנרגיה כמענה לגודש ברשת.....
18.....	"עקום הברוז" - הצורך באגירת אנרגיה לשם "יישור" עקום העומס.....
25.....	אגירה כתחליף לכושר ייצור.....
28.....	אגירה כמענה לייצוב תדר.....
30.....	נספח א' - עלות האגירה.....
31.....	נספח ב' - הגידול נטו בכושר הייצור על פני העשור.....

אגירת אנרגיה כמענה לגודש ברשת

פיתוח רשת ההולכה הוא אחד האתגרים המרכזיים של ישראל לקראת עמידה ביעד של 30% אנרגיה מתחדשת בשנת 2030. אגירת אנרגיה עשויה להגדיל את הספק המתקנים הסולאריים המחוברים לרשת, באמצעות הסטה של עודפי אנרגיה לשעות בהן הרשת פנויה. פרק זה מציג ניתוח של הצורך באגירה כמענה משלים לפיתוח הרשת.

תוכנית פיתוח הרשת לשם עמידה ביעד 2030

היחידה לתכנון ופיתוח טכנולוגי (תפ"ט) בחברת ניהול המערכת בחנה את ההשקעה שתידרש ברשת החשמל על מנת לחבר את ההספק הסולארי הנדרש לעמידה ביעד¹³. טבלה 2 מפרטת את ההשקעות הנדרשות לפי המלצת תפ"ט, בהשוואה לתוכנית פיתוח הרשת שאושרה על ידי שר האנרגיה ב 2018 :

טבלה 2 – השקעות נדרשות ברשת ליעד 2030

בהשוואה לתוכנית פיתוח הרשת שאושרה ע"י שר האנרגיה ורשות החשמל ב 2018

התוכנית	מספר תחמ"שים	מספר תחמ"גים	קווי 161 [ק"מ]	קווי 400 [ק"מ]
תוכנית מאושרת לפיתוח הרשת 2018-2022	17	1	560	90
השקעות נוספות נדרשות ברשת לעמידה ביעד 30% לפי תפ"ט	96	6	810-1130	470-720

¹³ ניהול המערכת, "הגדלת יעדי הייצור באנרגיה מתחדשת ל- 30% בשנת 2030 – פרק הולכה" 791/180/20 מ 31.3.2021

מהטבלה ניתן לראות כי מספר התחמ"שים ואורך קווי 400 הנדרשים לעמידה ביעד 2030 גבוהים פי 5 ~ בהשוואה לתוכנית הרשת הנוכחית שאושרה על ידי שר האנרגיה בשנת 2018.

פיתוח הרשת עלול להוות גורם מעכב משמעותי בעמידה ביעד האנרגיה המתחדשת. ראשית, הקמת תשתית הרשת הדרושה לקליטת אנרגיה מתחדשת עלולה להמשך 10-15 שנים, מתוך פרק זמן זה נדרשות לעיתים כ 10 שנים על מנת להשיג תוכנית מאושרת להקמת הקווים. גם לאחר השגת התוכנית המאושרת חברת החשמל עשויה להתמודד עם חסמים משמעותיים שיביאו להתארכות משך ההקמה, כגון בניה בלתי חוקית ברצועה מאושרת (דוגמת אשכול שרון באזור טייבה), התנגדות בעלי קרקעות למעבר קווי הולכה בשטחם (דוגמת קווי 400 ק"ו בואדי ערה), חשש תושבים משדות מגנטיים (דוגמת חוצה גוש דן) ועוד¹⁴.

עלות פיתוח הרשת לשם עמידה ביעד 2030

טבלה 3 מפרטת את עלות תוכנית פיתוח הרשת שגובשה על ידי תפ"ט בחלוקה לאזורים. העלויות בטבלה מחושבות לפי התעריף המוכר על ידי רשות החשמל לרכיבי הרשת.

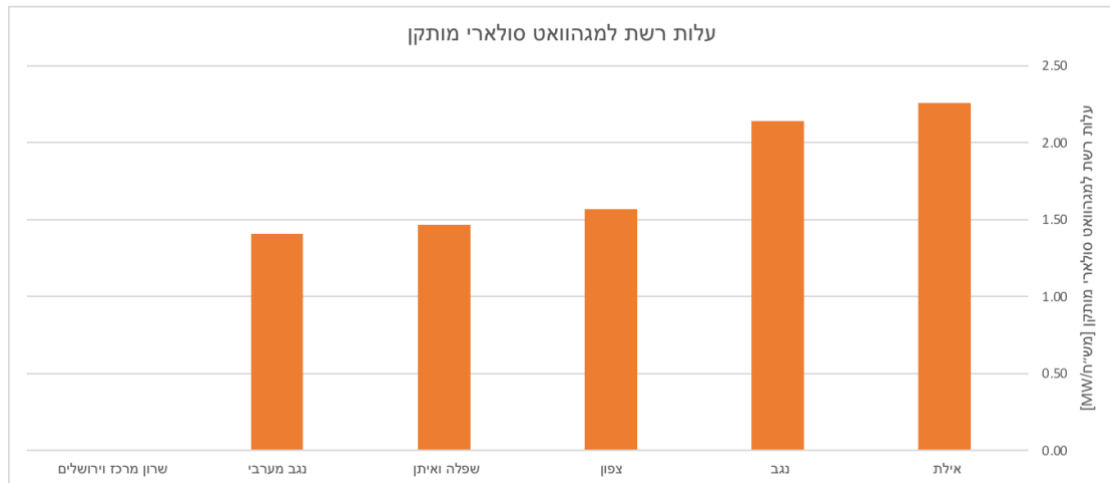
תרשים 1 מסכם את עלות הרשת לכל מגה וואט סולארי. ניתן לראות כי העלות הגבוהה ביותר לחיבור מתקנים סולאריים היא באזור אילת (2.26 מ"ש"ח למגה-וואט סולארי) ובאזור הנגב (2.14 מ"ש"ח למגה-וואט סולארי). בעוד שבאזור השרון המרכז וירושלים לא נדרשות כלל השקעות לפיתוח רשת ההולכה לשם קליטת הספק סולארי נוסף.

טבלה 3 – עלות פיתוח רשת לעמידה ביעד 30% בשנת 2030

עלות ל MW [מ"ש"ח]	הספק סולארי מסף MW	עלות סלולת [מ"ש"ח]	עלות תחזוקה רב שנתית מהוון להיום [מ"ש"ח]	קווי 400		תחמיג 161/400		קווי 161		תחמש		אזור	
				[מ"ש"ח]	ק"מ	[מ"ש"ח]	קמת	[מ"ש"ח]	ק"מ	[מ"ש"ח]	קמת		
1.57	2648	660	252.3	0		0		300	100	360	6	צפון	א
		840		0		0		360	120	480	8		ב
		2400		960	120	450	1	390	130	600	10		ג
0.00	1227	0	0.0	0		0		0		0		שרון מרכז וירושלים	
1.47	1398	1970	84.3	320	40	450	1	360	120	840	14	שפלה ואיתן	
1.41	1783	2020	127.5	400	50	450	1	450	150	720	12	נגב מערבי	א
		360		0		0		120	40	240	4		ב
2.14	3272	6630	378.9	2880	360	900	2	1050	350	1800	30	נגב	
2.26	1261	2730	121.9	1200	150	450	1	360	120	720	12	אילת	
1.6	11589	17610	965									סך הכל	

¹⁴ לדוגמה, תוכנית פינני הבדואים צפונית לקו 31 בקישור

תרשים 1 – עלות פיתוח רשת לכל מגה-וואט סולארי לפי אזור



קיבולת האגירה הנדרשת לחיבור הספק נוסף לתחמ״ש קיים

בחלק מהאזורים בישראל לא ניתן כיום לחבר מתקנים סולאריים נוספים כתוצאה מגודש ברשת, כגון מרחב אילת ואזור עוטף עזה. במספר אזורים מתוכננת הרחבה של מערך ההשנאה ושל רשת ההולכה ובהתאם לכך יתאפשר חיבור מתקנים נוספים. אולם, הספק המתקנים המבקשים להתחבר לרשת גבוה מתוספת הקיבולת. כך לדוגמא, באזור בית שאן תוכנית פיתוח הרשת מאפשרת חיבור של 150 מגה וואט סולארי לעומת כ 70 מגה וואט בלבד המחברים כיום. יחד עם זאת, בקשות נוספות לחיבור 115 מגה וואט קיבלו תשובה שלילית על אף תוכנית הפיתוח.

באזורים בהם קיים גודש, העומס על הרשת בא לידי ביטוי בעיקר בשעות הצהרים, בהן היצור הסולארי מגיע לשיא, ואילו בשעות אחרות העומס על הרשת נמוך משמעותית. השימוש באגירה מאפשר לחבר מתקנים נוספים לרשת ולהסיט את האנרגיה לשעות בהן הרשת פנויה. כך, ניתן להשתמש בתשתית הרשת הקיימת כדי לחבר מתקנים סולאריים נוספים, מבלי להקים תשתית רשת נוספת.

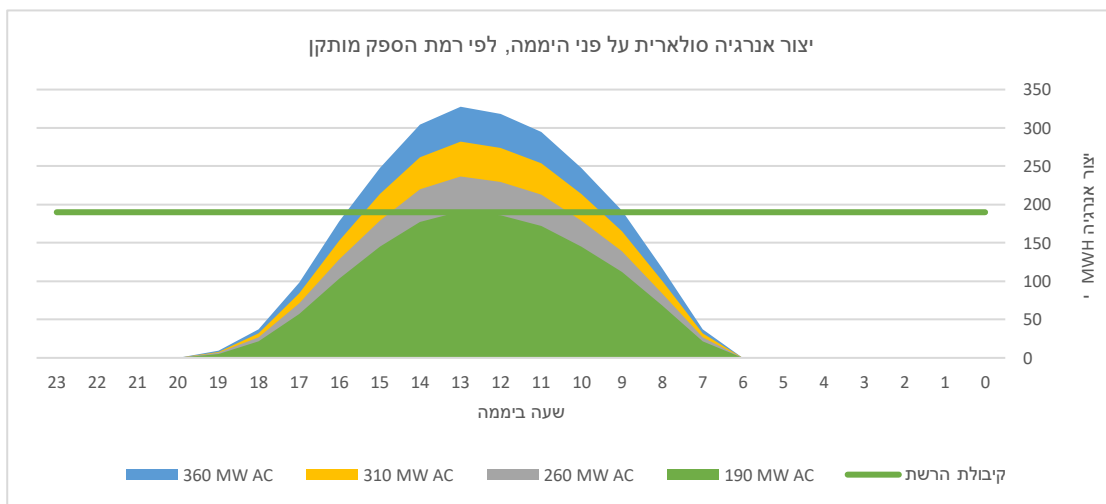
ניתן להעריך את קיבולת האגירה שתידרש להקלת הגודש בכל תחמ״ש באופן הבא:

- א. ניתוח שעתי של יצור האנרגיה הסולארית בהתאם לפרופיל הייצור האופייני לאזור הנדון ובהתאם להספק המותקן המחובר לרשת וההספק הנוסף המבוקש.
- ב. הערכת עודפי הייצור הצפויים בכל שעה בכל אחד מימות השנה, בהתאם לקיבולת הנתונה של הרשת באזור.

ג. חישוב ההספק האגירה וכושר האגירה שידרש על מנת שסך האנרגיה שתיקטם לא תעלה על הסף הרצוי.

תרשים 2 מציג דוגמא לעודפי האנרגיה ביום אופייני בהתאם להספק המותקן במרחב אילת¹⁵ מעבר להספק המחובר היום (190 MWp). מהתרשים ניתן לראות שכאשר תוספת ההספק גדוחה מעט מקיבולת הרשת, מרבית האנרגיה תזרום לרשת בשעות הבוקר ואחר הצהרים ללא אגירה ורק חלק קטן מהאנרגיה ידרש להאגר. ככל שתוספת ההספק המחובר לרשת גדלה, נתח הולך וגדל מהאגירה יידרש להאגר. כלומר, קיבולת האגירה הנדרשת גדלה באופן לא ליניארי עם תוספת ההספק הסולארי.

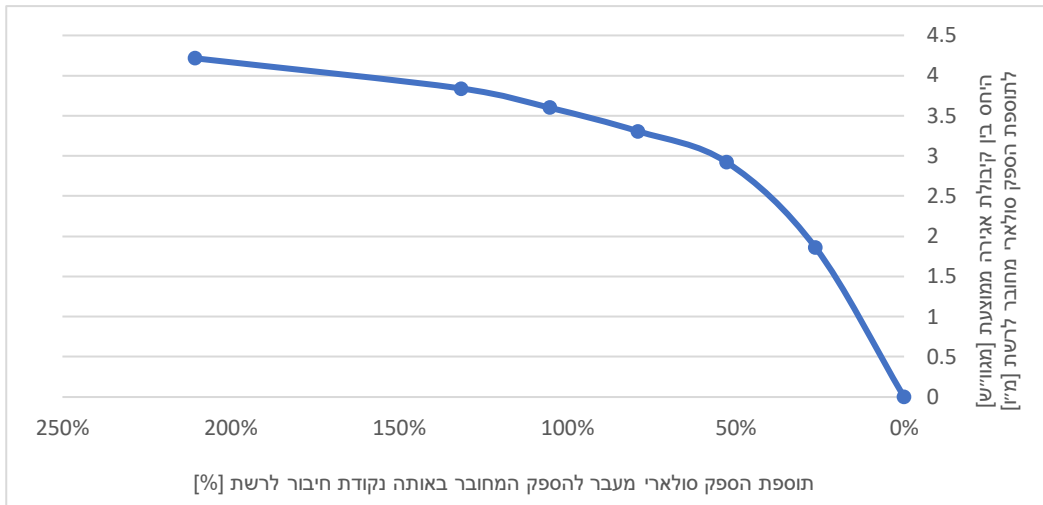
תרשים 2 – עודפי ארגיה במרחב אילת לפי הספק סולארי נוסף



תרשים 3 מציג את כושר האגירה שידרש עבור כל תוספת הספק מעבר ל 190 MWp הקיימים במרחב. ניתן לראות כי הגידול בכושר האגירה הנדרש איננו ליניארי.

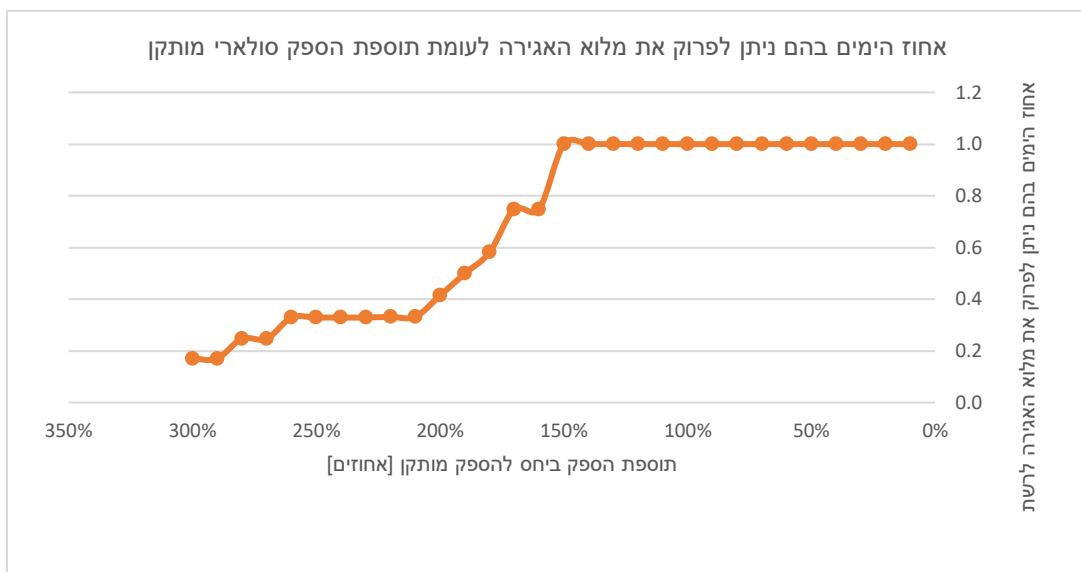
¹⁵ הניתוח בוצע במסגרת העבודה: ד"ר נורית גל, האם אגירת אנרגיה יכולה להוות תחליף לפיתוח הרשת לשם עמידה ביעד 2030?, עבור אילת אילות, מכון השל ו-NZO

תרשים 3 – שעות אגירה נדרשות לפי אחוז תוספת ההספק הסולארי - אילת



תרשים 4 מציג את אחוז הימים בהם קיבולת הרשת תהיה פנויה לפריקת האגירה, כפונקציה של כמות ההספק הנוסף באזור אילת. ניתן לראות כי פתרון האגירה עשוי לתת מענה לדחיית פיתוח הרשת עד לתוספת הספק של 150% מעבר להספק הקיים לכל היותר. בפועל, ייתכן שאילוצים אחרים במרחב שלא נכללו בניתוח זה יגבילו את תוספת ההספק הסולארי לאחר תוספת הספק סולארי קטנה יותר.

תרשים 4 – אחוז ימים בהם ניתן לפרוק אנרגיה מהאגירה לרשת



מימוש של מלוא הפוטנציאל הסולארי במרחב אילת¹⁶ מחייב לפתח את רשת ההולכה ואת קיבולת ההשנאה. לאור זאת, נכון להקים מתקני אגירה בטווח הזמן המידי שיאפשרו חיבור מתקנים סולאריים נוספים לרשת, ובמקביל להשלים את התכנון הסטטוטורי של הרשת ולאשר את הקמתה.

[השימוש באגירה לשם חיבור מתקנים סולאריים נוספים לרשת הקיימת](#)

בישראל מותקנות כיום כ- 200 תחנות משנה (תחמ"שים), מתוכם כ- 50 תחנות משנה משמשות גם לקליטת הספקים משמעותיים של אנרגיה סולארית, בעיקר במרחב אילת והערבה, הנגב, עוטף עזה ועמק המעינות.

הספק ההשנאה האופייני לתחמ"ש הוא 200 מו"א (4 שנאים), וכיום מתאפשר חיבור של מתקנים סולאריים במתח גבוה לתחמ"ש בהספק של 120 מו"א (60%) בלבד. בנוסף מתאפשר חיבור מתקנים סולאריים נוספים במתח נמוך. לפי פרסומי מנהל המערכת, בכ- 20-30 תחמ"שים, הוגשו בקשות לחיבור מתקנים סולאריים נוספים ובקשות אלו נענו בשלילה, בעיקר לאור מגבלת העומס על השנאים. בחלק מהאזורים קיימת בנוסף גם מגבלת גודש ברשת ההולכה.

מהניתוח שבוצע לאזור אילת ניתן להסיק, שגם בתחמ"שים אחרים בהם קיים גודש שאינו מאפשר קליטת אנרגיה סולארית, אגירת אנרגיה בצד המתח הגבוה של התחמ"ש תאפשר להסיט את עודפי האנרגיה לשעות הערב ובכך להתגבר על הגודש בשנאי ובמרבית המקרים גם על הגודש ברשת ההולכה.

הכפלת ההספק המחובר לתחמ"שים אלו תחייב להערכתנו, הספק אגירה של כ- 120 מגה וואט ל- 4 שעות. לפיכך, מענה ל- 30-20 תחמ"שים יחייב 3600-2400 מגה וואט אגירה ל- 4 שעות.

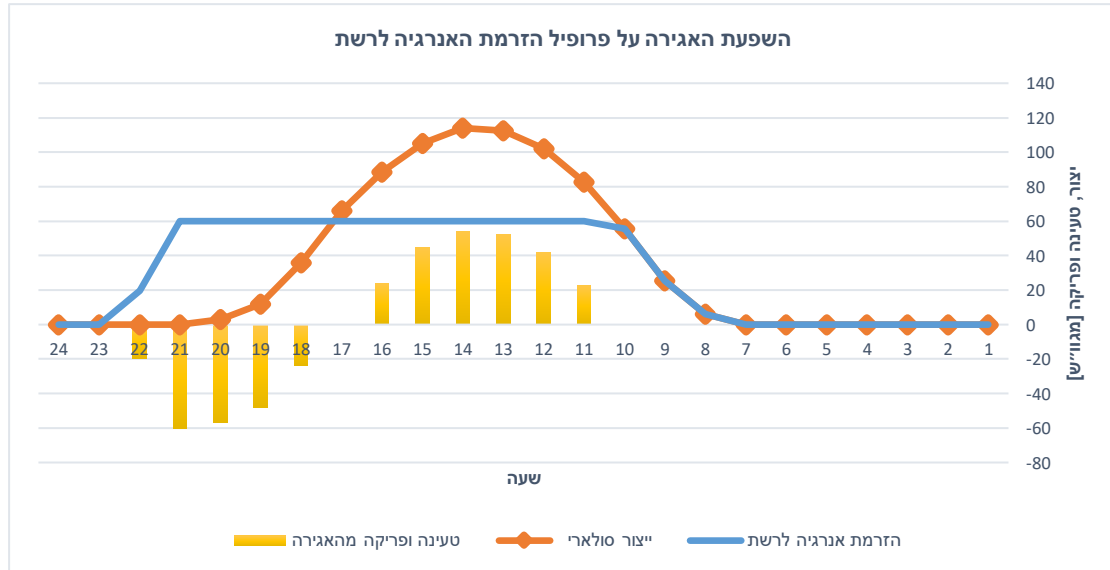
¹⁶ לפי דו"ח תפ"ט, [הגדלת יעדי הייצור באנרגיה מתחדשת ל-30% בשנת 2030 - פרק ייצור](#), מ 9.3.2020, יש במרחב אילת פוטנציאל לכ- 1200 מגה וואט סולארי, מתוכם מומשו עד היום 190 מגה וואט בלבד.

השפעת מתקנים פוטו-וולטאים משולבי אגירה על הצורך באגירה בתחמ"ש

החל משנת 2020, מתקנים פוטו וולטאיים קרקעיים קמים בישראל בשילוב אגירה. תרשים 5 מציג כיצד האגירה המשולבת באתר פוטו וולטאיי משפיעה על הזרמת האנרגיה לרשת. ניתן לראות כי שילוב אגירה במתקן פוטו וולטאי מאפשר להקטין באופן משמעותי את הספק החיבור לרשת של המתקן הפוטו וולטאי (AC) עבור הספק פאנלים נתון (DC) ו"משטח" את זרימת האנרגיה מהמתקן לרשת.

עם זאת, האגירה המשולבת במתקן הפוטו וולטאי איננה נותנת מענה לעומס על התחמ"ש בשעות הצהריים, משום שתנאי ההליך התחרותי מעודדים הזרמת אנרגיה לרשת על פני רוב שעות היום, ובכלל זה גם בשעות הצהריים בהן התחמ"ש עמוס. לכן, נוסף לאגירה המשולבת במתקן, נדרשת אגירה נוספת אשר תתן מענה לגודש ברשת בשעות הצהריים. את האגירה הנוספת ניתן להקים בשטח אתרי היצור הסולארי או בסמוך לתחמ"ש, ובלבד שיוקמו בצד המתח הגבוה של התחמ"ש.

תרשים 5 – הזרמת אנרגיה ממתקן פוטו-וולטאי עם וללא אגירה משולבת



לאור זאת, מומלץ:

- א. לתמרץ הקמת אגירה בהספק מצטבר של כ 2400 מגה וואט/4 שעות בכ- 20-30 תחמ"שים (או בסביבתם) בהם קיים כיום גודש ואשר בקרבתם נמצא פוטנציאל לחיבור מתקנים סולאריים נוספים.
- ב. חלק מכושר האגירה ישולב במתקנים הפוטו וולטאיים והיתר יוקם כאגירה מערכתית סמוך לתחמ"ש.
- ג. האגירה תוקם בצד המתח הגבוה כדי לתת מענה לעומס על השנאי בתחמ"ש.
- ד. מהבחינה ההנדסית, האגירה איננה נדרשת להיות סמוכה פיסיית לתחמ"ש. עם זאת, וועדות התכנון עשויות להעדיף הקמה צמודת גדר לתחמ"ש או לאתר יצור סולארי, משיקולי תכנון.
- ה. למנהל המערכת תתאפשר שליטה במתקן או בסך האנרגיה המחוברת לתחמ"ש, בתיאום עם חברת החשמל אשר אחראית לניהול רשת החלוקה, אף שהאגירה והאנרגיה מחוברים לצד המתח הגבוה.
- ו. רצוי להקים את מתקני האגירה בהדרגה על פני 2-3 השנים הקרובות, בהתאם לקצב הקמת המתקנים הפוטו וולטאיים שיחוברו לתחמ"שים אלו.

”עקום הברווז” - הצורך באגירת אנרגיה לשם ”יישור” עקום העומס

השפעת האנרגיה המתחדשת על עקום העומס נטו

הביקוש לחשמל בישראל מתאפיין בהתנהגות עונתית בהתאם למזג האוויר:

- א. **קיץ** – חודשי הקיץ (יוני עד ספטמבר) מתאפיינים בביקוש גבוה בשעות הצהריים¹⁷, בעיקר כתוצאה מהפעלת מתקני מיזוג אוויר.
- ב. **חורף** - בחודשי החורף (דצמבר – פברואר) הביקוש נמוך בשעות הצהריים וגבוה בשעות הערב¹⁸, בעיקר כתוצאה מהפעלת מתקנים לחימום.
- ג. **עונות המעבר** (אפריל- מאי, אוקטובר-נובמבר) - מתאפיינות בביקוש נמוך יחסית הן בשעות היום והן בשעות הערב, כתוצאה ממזג אוויר נח.

שילוב מתקנים סולאריים בהספק משמעותי במשק החשמל מתאפיין ביצור משמעותי בשעות הצהריים. כתוצאה מכך משתנה הצורך בהעמסה של מתקני יצור קונבנציונאליים. לכן, במשק עתיר מתקנים סולאריים מקובל לבחון גם את **העומס נטו** (עומס הביקוש בניכוי יצור האנרגיה המתחדשת). מאפייני העומס נטו בשנים הבאות:

- א. **קיץ** - חלק משמעותי מהביקוש בשעות הצהריים יקבל מענה באמצעות הייצור הסולארי, ולכן כושר הייצור הקונבנציונאלי שיידרש בשעות הצהריים יפחת משמעותית.
- ב. **חורף** – בשעות הצהריים הביקוש נמוך יחסית ולכן עם הקמת הספק סולארי בהיקף משמעותי עשוי להיווצר עודף כושר ייצור. בערב, שיא הביקוש נותר ללא שינוי, משום ששיא הביקוש מתרחש לאחר שעות הייצור הסולארי. כתוצאה מכך, נדרשת עליה מהירה (Ramp Rate) של הייצור הקונבנציונאלי משעות אחר הצהריים לשעות הערב.
- ג. **עונות מעבר** – הביקוש בשעות הצהריים נמוך יחסית ולכן הספק משמעותי של מתקנים סולאריים צפוי להביא לעודף ייצור.

תרשימים 6-8 מסכמים את השינוי הצפוי במאפייני העומס נטו (הביקוש בניכוי ייצור האנרגיה המתחדשת) משנת 2020 לסוף העשור. כל שורה בתרשים מייצגת חודש וכל עמודה מייצגת שעה. כך – כל משבצת מייצגת את העומס נטו הממוצע הצפוי בשעה וחודש נתונים.

¹⁷ שיא הביקוש בקיץ מתרחש בסביבות השעה 15:00

¹⁸ שיא הביקוש בחורף מתרחש בסביבות השעה 19:00

מהתרשימים ניתן לראות את ההשפעות העיקריות של האנרגיה המתחדשת על עקום העומס של ישראל לקראת סוף העשור:

- א. **הסטת שיא הביקוש (נטו) בחודשי הקיץ משעות הצהרים לשעות הערב ולשעות הבוקר המוקדמות.**
- ב. **עומס נטו שלילי (עודפי ייצור סולארי) בעונות המעבר – במיוחד בחודשים מרץ ואפריל, בעיקר במחצית השניה של העשור.**
- ג. **גידול בשיא הביקוש כתוצאה מהמשך גידול הביקוש**
- ד. **גידול חד בקצב עליית העומס נטו משעות הצהרים לשעות הערב – כיום הפער בין הצהרים לערב עומד על כ 4000 מגה-וואט ואילו בשנת 2030 פער העומסים בין שעות הצהרים לשעות הערב עשוי להגיע ל 14,000 מגה-וואט.**

שינויים אלו מתעצמים על רקע המשך הגידול בביקוש לחשמל. הגידול בביקוש מגדיל את שיא הביקוש בשעות הערב וגידול זה עשוי אף להתעצם יותר כתוצאה משילוב היקף משמעותי של רכבים חשמליים.

לעודפי הייצור בשעות הצהרים השלכות משמעותיות על יעדי משק החשמל:

- א. **קיטום אנרגיה מתחדשת- ללא אגירת אנרגיה, משק החשמל ידרש לקטום את עודפי הייצור בעונת המעבר, כתוצאה מכך תיפגע העמידה ביעד האנרגיה המתחדשת.**
- ב. **פגיעה באמינות האספקה – ללא אגירת אנרגיה, עודפי הייצור בשעות הצהרים יחייבו כיבוי של מתקני ייצור בגז והתנעה מחדש של המתקנים בשעות אחר הצהרים על מנת לתת מענה לשיאי הייצור בערב. מתקנים במחזור משולב אינם מתוכננים למחזור יומי של כיבוי והפעלה ולכן מגמה זו צפויה להגדיל את עלויות התפעול והתחזוקה, לקצר את אורך חיי היחידות ואף לפגוע באמינות אספקת החשמל בישראל.**

תרשים 6 – עומס נטו (ביקוש בניכוי אנרגיה מתחדשת) ממוצע לפי שעה וחודש

2020

(MW 2500 סולארי)

חודש/שעה	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
ינואר	7966	7098	6585	6347	6344	6684	7384	8253	8329	8086	7718	7389	7181	7150	7345	7726	8322	9493	10883	11182	11144	10766	10058	9093
פברואר	7441	6678	6241	6042	6069	6414	7037	7796	7876	7664	7349	7014	6803	6796	6949	7215	7689	8473	9944	10374	10337	9963	9328	8477
מרץ	7206	6487	6068	5870	5884	6211	6624	7360	7412	7192	6881	6581	6359	6293	6442	6731	7165	7896	9098	9767	9789	9498	8909	8102
אפריל	6664	6083	5703	5489	5465	5682	6008	6422	6229	6422	6550	6241	5986	5808	5779	5885	6102	6471	7093	7706	8359	8214	7825	7285
מאי	7144	6727	6416	6244	6195	6233	6212	6682	7318	7485	7490	7381	7268	7305	7406	7527	7710	7920	8275	8400	8487	8414	8079	7671
יוני	8413	7921	7548	7317	7192	7171	7031	7553	7985	8209	8388	8577	8779	9160	9645	10094	10313	10370	10217	9864	9836	9818	9474	9001
יולי	9167	8603	8185	7899	7740	7706	7599	8127	9107	9107	9434	9575	9683	9848	10106	10543	11178	11334	11330	10918	10794	10747	10367	9805
אוגוסט	9359	8814	8399	8115	7944	7910	7847	8187	9097	9187	9941	9956	9991	10084	10233	10515	10741	11005	10898	10892	11019	10844	10482	9936
ספטמבר	8644	8120	7743	7490	7364	7363	7501	7758	8540	9287	9427	9343	9255	9383	9653	9797	9948	10031	9970	10220	10328	10106	9700	9202
אוקטובר	7275	6802	6544	6357	6276	6352	6536	6785	7293	7612	7628	7484	7343	7381	7560	7716	7816	7972	8240	8758	8719	8482	8143	7731
נובמבר	6441	6013	5762	5631	5651	5849	6107	6587	6952	6929	6780	6638	6425	6362	6409	6577	6746	7513	8096	8318	8209	7942	7490	6987
דצמבר	7149	6485	6084	5896	5911	6220	6763	7458	7748	7644	7394	7145	6891	6801	6850	7063	7434	8563	9397	9705	9689	9386	8803	8112

עומס נטו נמוך מ 2000 מ"ו עומס נטו בין 2000 ל 10000 מ"ו עומס נטו גדול מ 10000 מ"ו

תרשים 7 – עומס נטו (ביקוש בניכוי אנרגיה מתחדשת) ממוצע לפי שעה וחודש

2025

(MW 8500 סולארי)

חודש/שעה	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
ינואר	8831	7879	7314	7037	7036	7409	8203	8796	7935	6554	5095	3984	3439	3342	3873	4987	6661	9149	11692	12274	12405	11977	11185	10099
פברואר	8289	7429	6945	6706	6736	7128	7836	8379	7590	6293	4881	3700	3088	3003	3408	4323	5859	7857	10506	11367	11517	11114	10407	9448
מרץ	8028	7216	6742	6521	6543	6914	7378	7975	7277	5833	4347	3164	2440	2249	2726	3687	5065	7097	9473	10681	10889	10585	9924	9029
אפריל	7430	6786	6359	6116	6092	6333	6697	7156	6484	5484	4936	3520	2531	1845	1894	2370	3229	4620	6551	8176	9245	9109	8705	8120
מאי	7938	7485	7127	6943	6905	6905	6905	8171	7464	6235	7304	5044	4181	3837	3923	4406	5285	6552	8129	9100	9363	9296	8942	8509
יוני	9340	8794	8384	8131	8016	8016	8001	7697	6440	5802	5560	5685	6419	7577	8965	10112	11014	11134	10834	10847	10880	10509	9984	9984
יולי	10158	9538	9084	8768	8595	8570	8464	8072	10044	8915	7976	7368	7252	8228	9363	10692	11948	12475	12016	11891	11865	11474	10863	11012
אוגוסט	10383	9327	8808	8833	9012	9327	9789	9137	11023	10167	9448	8491	7971	7630	8525	7973	8525	9257	11274	10371	12129	11963	11603	11012
ספטמבר	9604	9026	8614	8343	8214	8214	8392	8684	10232	9562	9385	8121	7110	6684	6849	6993	7832	8877	9727	10954	11401	11183	10760	10224
אוקטובר	8110	7573	7293	7092	6999	7088	7305	7586	8032	7617	6559	5245	4175	3859	4205	4803	5527	6484	7831	9335	9680	9431	9071	8620
נובמבר	7193	6438	6179	6287	6300	6523	6823	7364	6363	5127	3224	4213	3224	2798	2798	3420	4284	6035	7762	8923	9105	8875	8378	7814
דצמבר	7962	7220	6771	6566	6579	6924	7527	8314	6980	6158	5697	4661	3734	3316	3248	3806	4972	7172	9172	10338	10683	10470	9821	9040

עומס נטו נמוך מ 2000 מ"ו עומס נטו בין 2000 ל 10000 מ"ו עומס נטו גדול מ 10000 מ"ו

תרשים 8 – עומס נטו (ביקוש בניכוי אנרגיה מתחדשת) ממוצע לפי שעה וחודש

2030

(MW 16,000 סולארי)

חודש/שעה	0:00	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00
ינואר	9780	8737	7794	7194	7795	8205	9105	9376	7430	4736	2020	6	-926	-1098	-180	1778	4698	7871	12570	13477	13801	13316	12430	11207
פברואר	9228	8258	7723	7436	7470	7914	8720	9010	7217	4669	1989	-166	-1240	-1419	-726	936	3699	7097	11101	12458	12825	12392	11606	10527
מרץ	8939	8021	7486	7239	7272	7691	8212	8646	7083	4225	1381	-823	-2126	-2465	-1613	121	2584	6119	11680	12107	11790	11049	10056	9045
אפריל	8280	7567	7088	6811	6788	7056	7463	7970	6073	8185	3037	6073	-1495	-2661	-2736	-1730	-133	2433	8664	10213	10092	9677	9045	8120
מאי	8813	8323	7910	7715	7692	7747	8335	9122	7060	4751	2308	581	-204	-141	753	2425	4909	7895	9843	10314	10256	9885	9429	8509
יוני	10361	9756	9305	9030	8930	8923	8754	8436	7328	4360	2774	2033	2064	3194	5117	7580	9795	11674	12111	11876	11943	11646	11064	11064
יולי	11243	10564	10072	9725	9537	9523	9423	11085	10125	8271	6083	4644	4199	4274	5484	7503	10046	12569	13710	13200	13077	13079	12685	12020
אוגוסט	11509	10863	10349	10000	9816	9802	9737	10195	11360	8814	6709	8814	6709	5478	4563	4966	5886	7274	9549	11443	13013	13325	13177	12191
ספטמבר	10663	10026	9576	9288	9159	9172	9387	9720	11284	10706	9296	6668	4590	3519	3557	3692	5315	7462	9363	11720	12566	12360	11924	11352
אוקטובר	9037	8425	7903	7803	7906	8162	8481	8851	5289	7589	5289	2626	2626	-245	288	1391	288	4708	7300	10477	10738	10099	9606	9045
נובמבר	8031	7506	7192	7018	7021	7273	7620	7989	5678	3186	1379	1379	-508	-1375	-1408	-264	1400	4288	7337	10101	9916	9368	8737	8120
דצמבר	8863	8034	7531	7309	7318	7704	8372	9264	6175	8593	3698	1754	45	-750	-952	4	2086	5520	11020	11782	11675	10951	10070	9040

עומס נטו נמוך מ 2000 מ"ו עומס נטו בין 2000 ל 10000 מ"ו עומס נטו גדול מ 10000 מ"ו

תרומת האגירה לשינויים בעקום העומס

שילוב אגירה במשק החשמל עשוי לתת מענה לאתגרי השינוי בעקום העומס במספר אופנים:

- א. **קליטת עודפי האנרגיה בשעות הצהרים בחודשי עונת המעבר ובחודשי החורף** – טעינת האנרגיה למתקן האגירה שקולה להגדלת הביקוש במשק ולכן היא מצמצמת את עודפי האנרגיה. כפועל יוצא מכך, מצטמצם הצורך בקיטום אנרגיה.
- ב. **מענה לשיא הביקוש בשעות הערב** – תחליף להקמת מתקני ייצור בגז – האנרגיה אשר תטען למתקני האגירה בשעות הצהרים תפרק לרשת בשעות הערב ותהווה תחליף להקמת מתקנים במחזור פתוח עבור שעות השיא.
- ג. **צמצום פער העומסים בין שעות הצהרים לשעות הערב** – הגדלת הביקוש בשעות הצהרים כתוצאה מטעינת האגירה ומענה לביקוש בשעות הערב באמצעות פריקת האנרגיה ממתקני האגירה תורמים ל"שיטוח העקומה" ובכך לריסון התנודתיות במערכת, עבודה יציבה יותר של יחידות הייצור, חיסכון בהתנעות והדממות ופעולה בתחומים בהם היחידות נצילות יותר ומגיבות טוב יותר לשינויי תדר.
- ד. **צמצום קצב שינוי העומס בשעות הערב (Ramp Rate)** – הפעלת האגירה המערכתית במשטר טעינה בשעות הצהרים ופריקה בשעות הערב תורמת לצמצום קצב עליית העומס בשעות אלו.

הכדאיות הכלכלית באגירה לעומת קטימת עודפי האנרגיה

קיטום אנרגיה ממתקן פוטו וולטאי שקול, מנקודת הראות של בעל המתקן, לאבדן ההכנסה הצפויה מהזרמת האנרגיה לרשת, לפיכך סביר להניח שבעל המתקן יקבל שיפוי לפי התעריף הקבוע למתקן לכל קוט"ש שייקטם.

חלף האנרגיה שתיקטם, יידרש ייצור סולארי נוסף בשעה אחרת על ידי מתקן סולארי נוסף שיוקם. לשם פשטות הנחנו כי המתקן הסולארי החליפי ייצר אנרגיה בתעריף החצי שעתי SMP. הערכנו כי הקוט"ש ייקטם 200 מתוך 365 ימים בשנה¹⁹, כמו כן הנחנו כי ההפסד העתידי מהוון להיום בריבית היוון של כ 4.8%. תחת הנחות אלו, במחירים הנכחיים של האגירה, קטימת האנרגיה זולה מעלות האגירה שתידרש על מנת למנוע את הקיטום.

¹⁹ הערכה זו מבוססת על חישוב מספר הימים בשנה בהם העומס נטו בשעות הצהרים יהיה שלילי.

עם זאת. קיטום משמעותי של אנרגיה מתחדשת מחייב הקצאת שטחים נוספים על מנת להבטיח עמידה ביעד, תוך פגיעה גוברת בשימושים האלטרנטיביים בשטחים אלו.

לאור זאת, נכון להקים מתקני אגירה ולמזער את קטימת האנרגיה, גם עבור מתקנים קרקעיים בהם תעריף האנרגיה נמוך יחסית. כדאיות זו אף עולה, כאשר מביאים בחשבון את השימושים הנוספים באגירה המפורטים במסמך זה.

הייצור הקונבנציונלי המינימלי הנדרש לתפקוד תקין של משק החשמל

תוכנית ההעמסה של תחנות הכח בישראל נקבעת באופן מרכזי על ידי מנהל המערכת. בקביעת התוכנית מנהל המערכת מתכנן את העמסת המתקנים בהתאם לעומס הביקוש הצפוי. עם זאת, מרבית מתקני הייצור מועמסים באופן חלקי על מנת לתת מענה לשינויים לא צפויים בביקוש. כך לדוגמא, כאשר הביקוש הצפוי בישראל הוא 8000 מגה וואט, מנהל המערכת עשוי להפעיל מתקנים בעלי כושר ייצור מצטבר של 9000 מגה וואט ויותר, כך שהמערכת תוכל להגיב לעלייה או ירידה בעומס. אופן העמסה זה מאפשר מענה גמיש במקרה שבו העומס בפועל יהיה גבוה או נמוך מ 8000 מגה וואט.

לאור זאת, בתכנון המשק לעתיד יש לשקול האם ניתן להפעיל את המשק ללא ייצור בתחנות קונבנציונאליות כלל. כך למשל, בשעות בהן הייצור הסולארי שווה לביקוש, ניתן לכאורה משיקולים סטטיים של אספקת הביקושים, להפעיל את המשק ללא מתקני ייצור קונבנציונאליים. אולם, במצב זה מערך הייצור יוותר ללא יכולת תגובה דינאמית לשינויים בביקוש וללא אינרציה. הקמת מתקני אגירה תאפשר להפעיל בנוסף למתקני הייצור הסולאריים גם מתקני ייצור קונבנציונאליים ובכך תשפר יכולת תגובה דינאמית לשינויים בעומס דבר החיוני ליציבות המערכת. ייתכן כי בעתיד תתפתח טכנולוגיה אמינה שתאפשר למתקני האגירה לספק שירותים אלה, אך בשנים הקרובות נראה כי לצורך תפקוד תקין של המערכת יידרש הספק מינמאלי של יחידות ייצור קונבנציונליות.

הפעלה של מתקני ייצור קונבנציונאליים, תאפשר בנוסף להגביר את אמינות האספקה. תוספת האגירה, מצמצמת את מספר הימים בשנה בהם המתקנים יכובו ויותנעו מחדש ובכך תורמת לשיפור אמינות האספקה.

בהחלטה על ההספק הקונבנציונאלי המינימלי שיופעל בעתיד, יש לתת את הדעת במיוחד ליחידות הפחמיות שיוסבו לגז. יחידות אלו מתוכננות למשטר הפעלה קבוע (must run) ולא ניתן להפעיל ולכבות אותן לעיתים קרובות. אולם, הפעלה הקבועה של היחידות הפחמיות המוסבות לגז תחייב היקפי אגירה גבוהים על-מנת להימנע מקיטום מתקני אנרגיה מתחדשת.

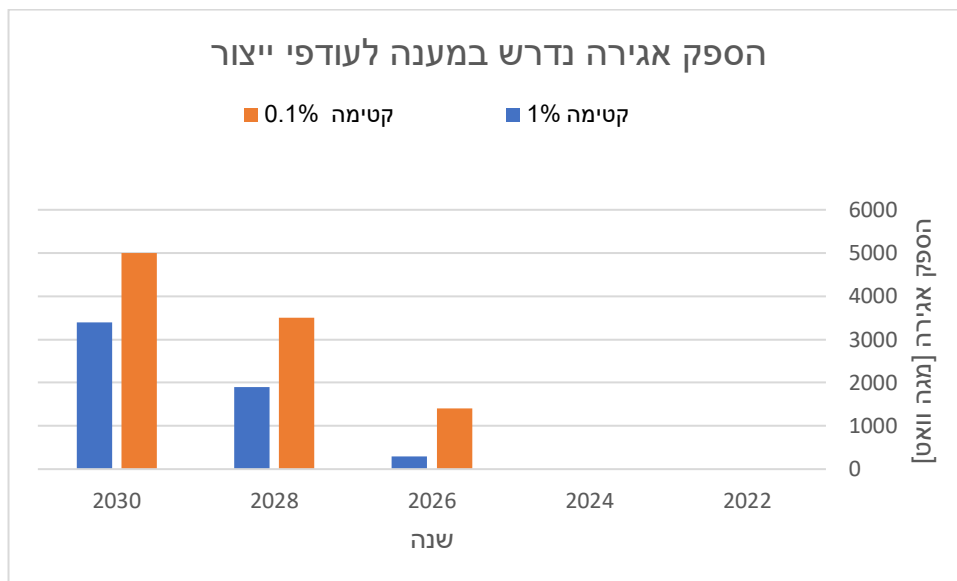
לאור שיקולים אלו, הנחנו כי במשק החשמל יועמסו בכל עת מתקני ייצור קונבנציונאליים בהספק מצטבר של 2000 מגה וואט לפחות²⁰ הנחה זו מביאה להגדלת כושר האגירה הנדרש או לחילופין להגדלת כמות האנרגיה המתחדשת שתיקטם.

קיבולת האגירה הנדרשת למשק לפי שנה במענה לעקום העומס

חישבנו את קיבולת האגירה הנדרשת למשק בכל שנה באופן הבא:

- א. חישבנו את עקום העומס נטו (עומס בניכוי ייצור סולארי) בכל שעה על פני השנים הבאות.
- ב. הנחנו ייצור מינימלי (Must Run) של 2000 מגה וואט.
- ג. חישבנו את הספק וקיבולת האגירה שידרשו בכל שנה על מנת למזער את קיטום האנרגיה לשתי רמות אפשריות: קטימת 1% מהאנרגיה המתחדשת או קטימת 0.1% מהאנרגיה המתחדשת.

תרשים 9 - הספק אגירה נדרש במענה לעודפי ייצור, לפי שנה ואחוז קיטום



²⁰ עומס מינימום של 2000 מגה וואט קונבנציונלי מבטא הערכה ממוצעת, היות שבכל משטר תפעולי נתון, הרכב היחידות שהן must run מתחשב במומנט האנרגיה השקול הנדרש במערכת.

מהניתוח עולה כי הצורך באגירה במענה לעודפי הייצור הסולארי מתחיל להתהוות רק במחצית השניה של העשור, שכן עד לשנת 2026 לא צפויים עודפי אנרגיה משמעותיים בישראל. לקראת שנת 2030 ידרשו בישראל מתקני אגירה בהספק של כ 3400-5000 מגה וואט (עם כ- 4 שעות אגירה) על מנת לתת מענה לעודפי הייצור, בהתאם ליעד קיטום האנרגיה הסולארית שיקבע.

אגירה כתחליף לכושר ייצור

שיא הביקוש גדל בישראל בקצב של כ-2.7% בשנה²¹ (עד לקורונה). בהנחה, שקצב גידול זה יימשך גם בשנים הבאות, הביקוש צפוי לגדול מכ-72 טרוו"ש בשנת 2020 לכ-97 טרוו"ש בסוף העשור.

בהתאמה לכך, גדל גם שיא הביקוש. שיא הביקוש בקיץ מקבל מענה משמעותי מהייצור הסולארי, ולכן שיא הביקוש אליו יש להעמיד כושר ייצור הוא שיא הביקוש בחורף. בשנת 2019, שיא הביקוש בחורף עמד על כ-13,200 מ"ו. בהינתן המשך גידול של כ-2.7%, שיא הביקוש בחורף עשוי להגיע לכ-17,500 מ"ו, קרי גידול של כ-4500 מ"ו על פני העשור.

מענה לשיא הביקוש, תוך עמידה בקריטריון אמינות האספקה, יחייב תוספת כושר ייצור של כ-3500 מ"ו מעבר לכושר הייצור הקיים היום.

תוספת ההספק הצפויה במהלך העשור צפויה לקזז את ההספק שיגרט במהלך אותה תקופה. עד סוף העשור, צפויה גריטה של מתקני ייצור בהספק מצטבר של כ-3400 מ"ו. לצד זאת, יחלו לפעול מתקנים חדשים בהספק מצטבר של כ-3200 מ"ו. ראו פרוט בנספח ב'.

ניתוח כלכלי שבוצע על ידי המשרד להגנת הסביבה²² לאחרונה מראה כי הקמת אגירה צפויה להיות כדאית כלכלית בהשוואה למתקני ייצור במחזור פתוח ("פיקרים").

בפרקים הקודמים הראינו כי הספק האגירה שיידרש כדי לתת מענה לעודפי כושר ייצור עומד על 3400-5000 מ"ו ל-4 שעות. הסף הנמוך של הספק זה דומה להספק הנדרש במענה לכושר הייצור (3500 מ"ו ל-4 שעות). מכאן שמענה האגירה הנדרש ממילא לטיפול בעודפי הייצור בצהרים צפוי לתת מענה גם לתוספת הייצור הנדרשת בשעות הערב.

לשם הזהירות בחנו את הכדאיות הכלכלית של הקמת 4 שעות²³ אגירה בהשוואה להקמת הספק קונבנציונאלי. ניתן לראות כי בעלות של כ-200 דולר לקוט"ש אגירה מתקיים שוויון בין העלות השנתית של האגירה לבין העלות השנתית של ההספק הקונבנציונאלי (טבלה 4) לפי תחזית בלומברג עלות האגירה צפויה לרדת לערך זה בתוך כ-4 שנים בלבד (נספח א').

²¹ רשות החשמל, [מפת הדרכים לפיתוח מקטע הייצור במשק החשמל](#), יוני 2018

²² אגירת אנרגיה כתחליף להקמת תחנות כח פיקריות, הגנת הסביבה יוני 2020

²³ פרופיל העומס שהוצג בתרשימים 6-8 מראה כי שיא הביקוש עשוי להימשך יותר מ-4 שעות במיוחד בחודשי הקיץ. במענה לכך תיידרש יכולת אגירה ממשוכת יותר מ-4 שעות

טבלה 4 – השוואת עלות אגירה (4 שעות) לעלות מתקן במחזור פתוח

Break Even 2024

1 קילוואט במחזור פתוח	4 קוט"ש אגירה	
2800 ש"ח/קילו וואט לפי 850 דולר/קילוואט ²⁴	~2840 ש"ח/ל- 4 קוט"ש לפי 200 דולר/קוט"ש בשנת 2024	עלות הקמה
25 שנים	15 שנים	משך חיים
222 ש"ח/קילו וואט	250 ש"ח/(4 קוט"ש)	עלות הון שנתית בהנחה של ריבית היוון משוקללת 4.8%
120 ש"ח/קילו וואט/שנה	2.5% מעלות ההקמה	עלות תחזוקה שנתית
315 ש"ח/קילו וואט	315 ש"ח/(4 קוט"ש)	סה"כ עלות שנתית

אמנם, השימוש באגירה כרוך באיבוד של כ 10% מהאנרגיה, אולם האיבודים אינם צפויים לייקר את עלות הייצור בהשוואה ליצור במתקן במחזור פתוח:

א. **עלות האיבודים** – בהנחה שהאנרגיה אשר תאגר תיוצר לפי נצילות משקית ממוצעת של כ 7.4 MMBTU/MWh²⁵ וכ- 10% מהאנרגיה יאבד באגירה, האבודים הצפויים הם כ- 0.72 MMBTU/MWh.

²⁴ PJM Cost of New Entry - [Combustion Turbines and Combined-Cycle Plants](#) with June 1, 2022 Online Date

²⁵ רשות החשמל, [מענה לבקשת התייעצות הפסקת השימוש בפחם במשק החשמל בישראל](#), נובמבר 2019

- ב. **עלות נוספת של יצור בפיקר בהשוואה לממוצע היצור המשקי – הנצילות האופיינית למתקנים במחזור פתוח היא כ- 8.5 MMBTU/MWh, כלומר תוספת של כ- 1.1 MMBTU/MWh בהשוואה ליצור המשקי הממוצע.**
- ג. **מכאן, שעלות האיבודים איננה יקרה יותר מאשר העלות העודפת של מתקן במחזור פתוח.**

אגירה במענה לייצוב תדר

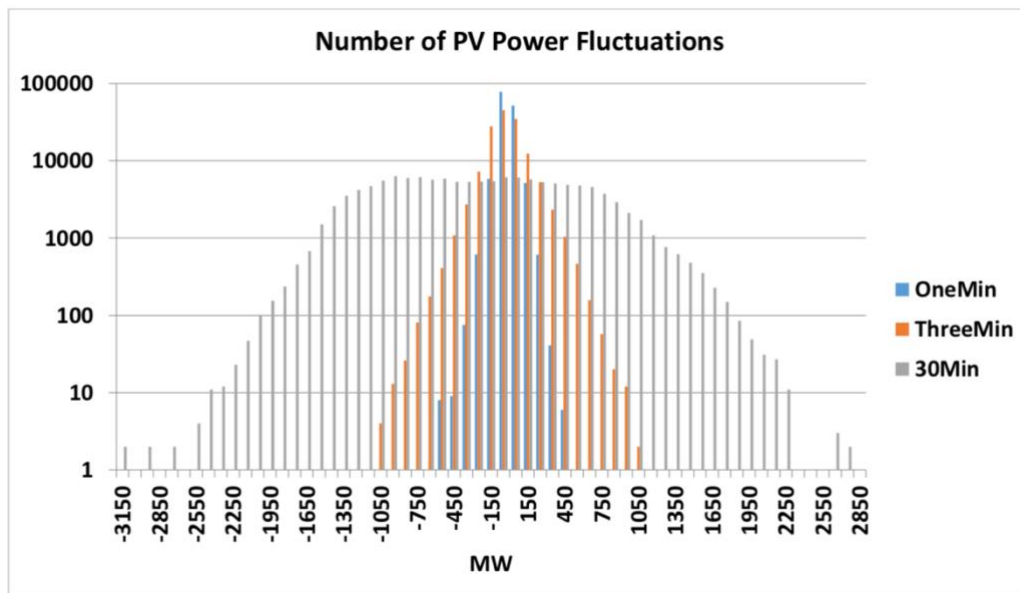
אחת המשימות המרכזיות של מנהל המערכת היא איזון תמידי בין הייצור לביקוש במשק החשמל על מנת להבטיח את יציבות התדר. סטייה של התדר תביא להפעלת מנגנוני אוטומציה (השלת עומסים) ובקרה של יחידות ייצור, וסיכון לכך שתחנות כח יצאו מסנכרון ובמשק תתפתח עלטה, כתלות בחומרת האירוע.

סטייה של התדר עשויה להתרחש בשני אופנים עיקריים:

- א. ירידה מהירה ולא צפויה בייצור החשמל – כתוצאה מהפרעה בייצור סולארי או הפסקה של תחנת כח קונבנציונאלית.
- ב. ירידה מהירה ולא צפויה בביקוש – למשל כתוצאה מפגיעה בקווי רשת באזור ביקוש, שתביא לניתוק פתאומי של צרכנות בהיקף משמעותי.

היחידה לתכנון ופיתוח טכנולוגי (תפ"ט)²⁶ ניתחה את ההפרעות הצפויות למתקנים סולאריים כחלק מההערכות להגדלת היעד ל 30% ייצור סולארי.

תרשים 10 - תנודות צפויות של מתקנים סולאריים, 2030 (מקור: תפ"ט)



²⁶ ניהול המערכת, " הגדלת יעדי הייצור באנרגיה מתחדשת ל- 30% בשנת 2030 – פרק הייצור"

מעבודת תפ"ט עולה, כי התנודה המירבית הצפויה על פני דקה אחת היא כ-700 מגה-וואט, ועל פני 3 דקות תתיכן תנודה של כ-1400 מגה וואט.

מתקני אגירה מספקים תגובה מהירה, אך קצרת טווח לתנודות הייצור של מתקנים סולאריים. פריקת האנרגיה מהאגירה (או לחילופין) הפסקת הטעינה למתקני אגירה, מקנה למנהל המערכת פרק זמן להתנעת מתקנים גמישים במחזור פתוח אשר יתנו מענה לירידה בכושר הייצור הסולארי.

לפיכך, ההספק המירבי שיידרש במענה לייצוב התדר בשנת 2030 הוא 700-1400 מגהוואט לכ- חצי שעה.

כיום משתתפים בייצוב התדר מתקנים קונבנציונאליים המכוונים לשינוי בעומס במענה לתדר (LFC-Load Frequency Control) וכן הסדרים לניהול ביקושים. לקראת סוף העשור, הגידול ביצור הסולארי בשעות הצהריים יביא לצמצום ההעמסה של מתקנים קונבנציונליים. כך, תפחת יכולת התגובה לתדר ויידרש למנהל המערכת יכולת חלופית לייצוב תדר.

מתקני אגירה מהווים פתרון נח לתגובה לתדר משום שהם מתאפיינים במהירות תגובה גבוהה. הספק האגירה הנדרש לשם תגובה לתדר נמוך משמעותית בהשוואה להספק האגירה הנדרש ליתר השימושים שנותחו במסמך זה. לאור זאת, ניתן לתת מענה לתדר באמצעות מתקני אגירה אשר יוקמו לצורך מענה לגודש ברשת או כתחליף להקמת כושר ייצור.

נספח א' – עלות האגירה

תחזית עלות האגירה למתקן utility scale לפי Bloomberg, בהתאם לציטוט רשות החשמל²⁷

סה"כ עלות מערכת (דולר לקוט"ש)	Transformer	Developer margin	Developer overheads	EPC*	Energy Management System	Balance of system	PCS	Battery rack	שנה
278	6.00	18.00	17.00	38.00	14.00	36.00	17.00	131.88	2020
262	6.00	17.00	17.00	37.00	14.00	35.00	16.00	120.17	2021
246	6.00	15.00	17.00	36.00	13.00	34.00	15.00	110.25	2022
229	6.00	14.00	16.00	34.00	12.00	32.00	14.00	101.36	2023
215	6.00	13.00	16.00	33.00	11.00	30.00	13.00	93.09	2024
206	6.00	12.00	16.00	32.00	11.00	30.00	13.00	86.08	2025
193	6.00	11.00	16.00	30.00	10.00	28.00	12.00	80.02	2026
184	6.00	11.00	15.00	29.00	10.00	27.00	11.00	74.62	2027
175	6.00	10.00	15.00	28.00	9.00	26.00	11.00	69.69	2028
169	6.00	10.00	15.00	28.00	9.00	26.00	10.00	65.24	2029
161	6.00	9.00	15.00	27.00	8.00	25.00	10.00	61.24	2030

²⁷ רשות החשמל, הגדלת יעדי ייצור החשמל באנרגיות מתחדשות לשנת 2030, קובץ נלווה: עלות תועלת, 10.8.2030

נספח ב' – הגידול נטו בכושר הייצור על פני העשור

טבלה 5 – השינוי בכושר במשק החשמל עד סוף העשור

סה"כ הספק [מ"ו]	הספק [מ"ו]	יחידת יצור	
(3380)	(1440)	אורות רבין 1-4	גריטת יחידות
	(912)	קיטוריות אשכול	
	(425)	רדינג	
	(600)	טורבינות גז סילוניות	
3145	1320	נתיב האור באורות רבין	תוספת הספק
	340	אגירה שאובה - כוכב הירדן	
	400	צומת	
	186	אתגל	
	230	אלון תבור - פיקר	
	470	מיקרוגנרציה	
	200	ייצור במתקני התפלה	
	(235)	שינוי נטו בכושר הייצור	