



אגירת אנרגיה מתחדשת כתחליף לתחנות כוח פיקריות

יוני 2020



כתיבה ועריכה מקצועית:

ד"ר גיל פרואקטור, ד"ר רותי קירו, המשרד להגנת הסביבה

רון קמרה, אברי שכטר, עומר תמיר, אקוטריידרס

ד"ר שחר דולב, אינג' אמנון פורטוגלי, פורום ישראלי לאנרגיה

ד"ר דן וינשטוק



תוכן העניינים

4	סיכום בכותרות	
5	תקציר מנהלים	
10	מבוא	1.
10	רקע	1.1
13	אגירת אנרגיה	2
13	מבוא	2.1
15	אגירה כפתרון לגמישות הרשת	2.2
18	סוגיית משך ההפעלה של היחידות הפיקריות	2.3
20	פירוט שירותי המערכת הניתנים על ידי סוללות	2.4
23	סקירת טכנולוגיות אגירה	2.5
25	מדיניות "ללא חרטה" (No Regret)	2.6
26	ניתוח כלכלי – החלפת טורבינות פיקריות בסוללות	3
27	הנחות כלליות לצורך הניתוח הכלכלי	3.1
28	המשך הקמת פיקריות	3.2
31	בחינת חלופות להקמת פיקריות	3.3
38	סיכום ומסקנות הניתוח הכלכלי	3.4
41	תועלות כלכליות נוספות שלא תומחרו	3.5
41	מסקנות והמלצות	4
43	נספח א' – תועלות דינמיות ותועלות נוספות משילוב אגירה שאובה	4.1
48	נספח ב' – שימוש במערכת אגירה בסוללות לצורך "התנעה שחורה"	4.2
49	נספח ג' – יעדי מתחדשות במדינות OECD נבחרות	4.3

סיכום בכותרות

מעבר לייצור חשמל מבוסס אנרגיות מתחדשות, כגון שמש ורוח, הוא הבסיס לאסטרטגייה העולמית להפחתת פליטת מזהמי אוויר וגזי חממה ולהתמודדות עם משבר האקלים. מאחר שאנרגיות שמש ורוח הן תנודתיות באופיין, מהירות הרוח ועוצמת קרינת השמש משתנות עם הזמן, יש צורך במכלול פתרונות טכנולוגיים משלימים לשמירה על היציבות והאמינות של מערכות חשמל בעולם.

תחנות כוח "גמישות" הפועלות במחזור פתוח (להלן: "פיקריות") מסוגלות לספק חלק משירותי ייצוב מערכת החשמל, ולכן עד לאחרונה המשיכו להקימן ברחבי העולם. אולם תחנות כוח אלו מאופיינות בחוסר יעילות אנרגטית, בזיהום אוויר גבוה, בעלויות גבוהות והן עדיין איטיות מאוד בהשוואה לטכנולוגיות אגירה. בשנים האחרונות הושקעו מאות מיליארדי דולרים בפיתוח ומסחור טכנולוגיות אגירת אנרגיה בדגש על סוללות, מה שהביא לידי קפיצת מדרגה בביצועים וצניחה בעלויות של סוללות. שינויים דרמטיים אלו מאפשרים להחליף פיקריות ולעבור למשק חשמל מבוסס אנרגיות מתחדשות. כיום מותקנים כ-2 GW של סוללות במדינות שונות, לרבות קוריאה, גרמניה, ארה"ב וסין, וקצב ההתקנות גדל אקספוננציאלית כך שב-2030 הוא צפוי להגיע ל-100-175 GW. סוללה עם מתקן סולארי שיטעין אותה עולה היום כמו תחנה פיקרית, אך סוללה חוסכת עלויות זיהום למשק בהיקף של כ-9 אג' לקוט"ש. ב-2025 תעדוף סוללות יחסוך למשק כ-19 אג' לקוט"ש וב-2030 כ-26 אג' לקוט"ש.

בניגוד למגמה להקמת סוללות בשילוב אנרגיה מתחדשת שצוברת תאוצה בעולם, בישראל עדיין מיושמת מדיניות המקדמת הקמת אלפי מגה-ואט של תחנות כוח פיקריות חדשות ברחבי הארץ בהיקף של 2000-4000 מגה-ואט¹ ובעלות משקית הנאמדת במיליארדי שקלים. המדיניות הנוכחית לקידום תחנות כוח פיקריות הייתה נכונה לעשור הקודם, אך לנוכח התפתחות טכנולוגיות האגירה והאנרגיה המתחדשת והירידה המהירה בעלויות האגירה, יש צורך בשינוי המדיניות. נוסף על כך אורך החיים של תחנת כוח הוא כ-30 שנים, ולכן המשך המדיניות להקמת פיקריות חדשות יקבע הלכה למעשה את התלות של ישראל בתחנות גזיות מזהמות ויקרות לעשרות שנים.

עבודה זו מציגה ניתוח טכני-כלכלי הן ברמת הטכנולוגיה, הן ברמת המשק כולו, של החלפת התוכניות להקמת פיקריות חדשות בהקמת סוללות בשילוב מתקני אנרגיה סולארית ייעודית. נבחנה גם חלופה להטעין את הסוללות באמצעות העלאת העומס במחז"מים קיימים ומתוכננים.

ביצועי הסוללות ביחס לפיקריות מהירים ויעילים יותר, עלותן נמוכה יותר והן מסוגלות לספק שירותי מערכת נוספים, כגון אגירת עודפי ייצור של אנרגיות מתחדשות, עתודה סובבת וייצוב מתח וכך לחסוך עלויות משמעותיות נוספות, אך אלו לא כומתו בעבודה זו. סך העלות המשקית הנחסכת מהקמת סוללות עם מתקנים סולאריים ייעודיים במקום הקמת פיקריות חדשות נאמדת ב-9 מיליארד ₪ (מהוון), והסוללות יתרמו לשיפור באמינות אספקת החשמל ויפחיתו זיהום אוויר וגזי חממה. החיסכון הישיר למשק החשמל נאמד ב-300 מיליון ₪ ב-2025 וב-900 מיליון ₪ ב-2030.

¹ הערכה על בסיס תחזית רשות החשמל לסך ההספק הקונבנציונלי הנדרש עד 2030, המפורסמת במפת הדרכים למשק החשמל, 2018 ועל בסיס הערכות שגובשו יחד עם רשות החשמל. להרחבה ראה פרק 1.1.1.

עבודה זו מצביעה על נחיתותן הטכנית-תפעולית והכלכלית-סביבתית של תחנות כוח פיקריות לעומת סוללות. בעקבות זאת המשרד להגנת הסביבה סבור כי יש לעצור את קידומן של תחנות כוח פיקריות חדשות ובמקום זאת להקים סוללות לאגירת אנרגיה בשילוב מתקנים סולאריים. על מנת ליישם שינוי מדיניות זה יש לגבש גולציה אשר תאפשר ליזמים להתחרות באספקת שירותי המערכת השונים, ולתמרץ פיתוח מואץ של שוק היזמות הפרטי בתחום האגירה. המשרד סבור גם כי יש לבחון את המדיניות הקיימת להקמת תחנות כוח גזיות חדשות בכלל, לנוכח הצורך האסטרטגי של ישראל להתמודד עם משבר האקלים ולעבור לכלכלה מאופסת פליטות.

תקציר מנהלים

מבוא - העבודה ומטרותיה

מעבר לייצור חשמל מבוסס אנרגיות מתחדשות, כגון שמש ורוח, הינו הבסיס לאסטרטגיה העולמית להפחתת פליטת מזהמי אוויר וגזי חממה ולהתמודדות עם משבר האקלים. מדינות OECD רבות כבר קבעו יעדים ארוכי טווח של 100% ייצור חשמל מאנרגיות מתחדשות ב-2050, והעלו בהתאמה את יעדי המתחדשות לשנת 2030 לשיעורים של 50% ואף יותר (פירוט בנספח ג'). מאחר שאנרגיות שמש ורוח הן תנודתיות באופיין, מהירות הרוח ועוצמת קרינת השמש משתנות עם הזמן, יש צורך במכלול פתרונות טכנולוגיים משלימים לשמירה על היציבות והאמינות של מערכות חשמל בעולם. צורך זה נעשה ממשי ככל שהחלק היחסי של אנרגיות מתחדשות מסך ייצור החשמל עולה לשיעורים של עשרות אחוזים ויותר.

תחנות כוח "גמישות" הפועלות במחזור פתוח (להלן: "פיקריות") מסוגלות לספק חלק משירותי ייצוב מערכת החשמל, ולכן עד לאחרונה המשיכו להקימן ברחבי העולם. אולם תחנות כוח אלו מאופיינות בחוסר יעילות אנרגטית, בזיהום אוויר גבוה, בעלויות גבוהות והן עדיין איטיות מאוד בהשוואה לטכנולוגיות אגירה. בעשור שחלף הושקע מאמץ עולמי רב בפיתוח ומסחור טכנולוגיות חלופיות של ממירים סולאריים ואגירת אנרגיה, בעיקר באמצעות סוללות אשר כבר היום מסוגלות להחליף את כל השירותים שהצדיקו בעבר הקמת תחנות כוח פיקריות. יתרה מזאת, נתונים מהעולם מצביעים על כך שכבר היום סוללות אגירה הנטענות מחשמל סולארי או מחז"מים עולות פחות מפיקריות². כאן בישראל פרסמה רשות החשמל כבר ב-2018 כי סוללות בהיקף אגירה של 4 שעות יכולות להחליף הספק קונבנציונלי וכי יש להן עדיפות כלכלית לייצוב תדר⁴. אגף תפ"ט בחברת החשמל פרסם כבר ב-2017⁵ כי "הנתח המשמעותי ביותר מההוצאות הנמנעות למשק החשמל משילוב מתקני אגירה טמון בחיסכון מדחיית השקעות באמצעי ייצור קונבנציונליים, ובעיקר אלה המיועדים להספקת עומסי שיא (פיקרים - peakers)". נציין כי נוסף על התועלות הישירות של סוללות למערכת החשמל ישנן תועלות משקיות גדולות מהפחתת זיהום אוויר וגזי חממה, על ידי החלפת פיקריות בסוללות.

² משרד האנרגיה, 2020 וכן בלומברג, 2020

³ בלומברג NEF 2020, 1H 2020 LCOE Update

⁴ רשות החשמל. (יוני 2018). מפת דרכים לפיתוח מקטע הייצור במשק החשמל 2018-2030. – עמ' 14, 57-58

⁵ חברת החשמל. (יולי 2017). שילוב תחנות אגירה שאובה בתוכניות הפיתוח של מערכת ייצור החשמל.

מטרתה העיקרית של עבודה זו היא לבחון מבחינה טכנית, ניהולית וכלכלית האם סוללות אגירה בשילוב אנרגיה סולארית עדיפות מהקמה והפעלה של תחנות כוח פיקריות, ואף מייטרות אותן. בשלב הראשון בחנו את יכולתן הטכנית-מערכתית של סוללות להחליף את כל שירותי המערכת שמסופקים כיום על ידי פיקריות ובדקנו אם סוללות יכולות לספק שירותים נוספים מעבר לכך. לאחר מכן השווינו את העלויות הפרטניות והכוללות למשק בין חלופת הפיקרית אל מול חלופת סוללות עם הספק סולארי ייעודי וגם חלופה שבה הסוללות נטענות על ידי מחז"מים קיימים במשק.

תוצאה 1. סוללות מסוגלות להחליף תחנות כוח פיקריות וגם שירותי מערכת נוספים

מעבודה זו עולה כי סוללות יכולות לספק את שירותי המערכת שהצדיקו בעבר הקמת תחנות כוח פיקריות, כמפורט להלן:

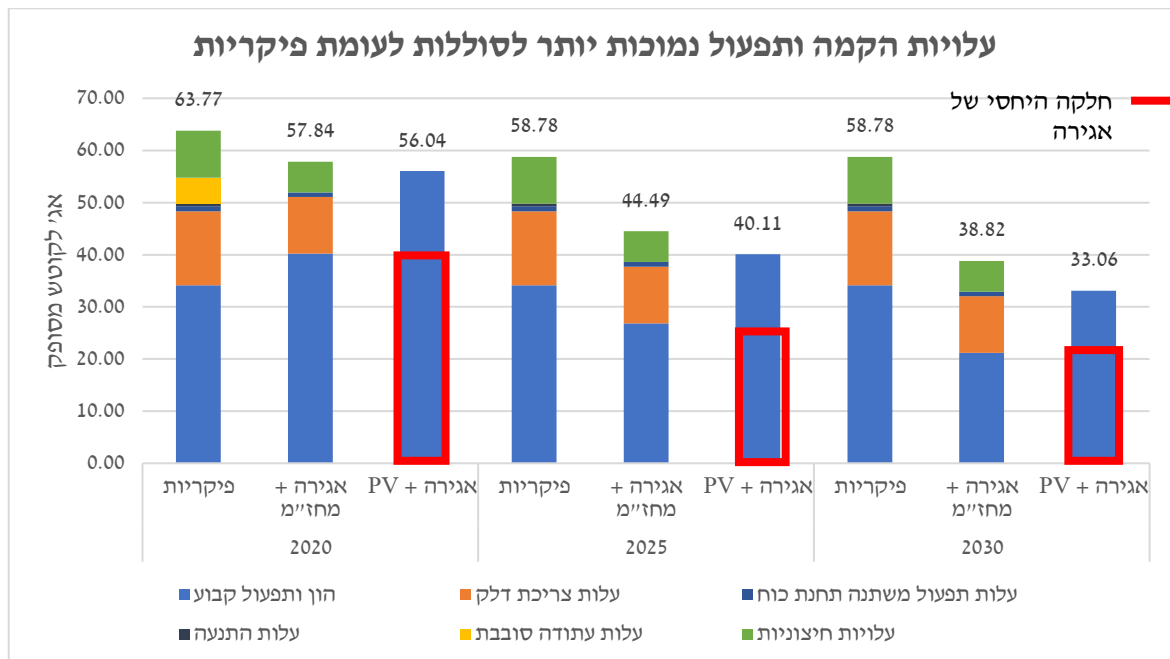
- **גילוח פסגה:** סוללות יכולות לספק חשמל לרשת בשעות השיא ביום;
 - **שיטוח עקומת העומס השיורי:** אחרי הצהריים, כשהתפוקה הסולארית יורדת ובד בבד הביקוש עולה לקראת שיא הערב, העומס השיורי עולה במהירות ויחידות הייצור מתקשות לעמוד בקצב הנדרש. סוללות תוכלנה לפרוק בשלב זה אנרגיה לרשת ולהשלים את הפער;
 - **טיפול בתנודתיות של התפוקה הסולארית:** בתנאי מזג-אוויר משתנים, סוללות תוכלנה לספוג עודפים ולהשלים חוסרים, וכך לתרום ליישור עקומת העומס השיורי בעקבות התנודות בתפוקה הסולארית;
 - **תחליף להפעלות מרובות של מחז"מ"ים:** שימוש בסוללות לספיגת התנודות בביקוש ויישור עקומת העומס השיורי יפחיתו את הצורך בהפעלה מרובה של מחז"מ"ים. כמו כן טורבינות גז סובלות מירידה בנצילות עם הפחתת העומס. גם נצילותן יורדת בעת עלייה או ירידה בעומס. שימוש בסוללות יאפשר ליחידות המחז"מ לפעול ברציפות ולהשיג נצילות גבוהה, שמשמעותה מחיר מינימלי לקוט"ש מיוצר ופליטות מופחתות. ביצועי הסוללות עדיפים מאלה של פיקרים, בין השאר בזכות יכולתן של סוללות להיכנס לפעולה ולהזרים חשמל לרשת בשברירי שנייה בהספק מלא או חלקי לפי הצורך. לעומתן, פיקרים מגיבים באיטיות רבה בטווח של 10-30 דקות, כלומר בכ-3 סדרי גודל לאט יותר מסוללות.
- נוסף על כך, סוללות מסוגלות לספק שירותים חשובים אשר פיקריות אינן מיועדות לספק:
- **ייצוב תדר ותרומה לעתודה סובבת:** יכולת הסוללה להיכנס לפעולה בתוך שברירי שנייה מאפשרת לה להוסיף הספק לרשת אם התדר יורד מתחת לסף הנדרש, או להגדיל את העומס במצב אגירה אם התדר עולה מעל הסף. יכולת זו תאפשר לצמצם את היקף העתודה הסובבת מהיחידות הפוסיליות ולחסוך כסף רב ופליטת מזהמים מיותרת.
 - **ייצוב מתח ותיקון מקדם הספק:** סוללות בשילוב ממירים חכמים מסוגלות להזרים או לספוג הספק ריאקטיבי אל הרשת וממנה, כדי לשמור על המתח בטווח המותר וגם לשלוט על מקדם ההספק במוצא. שירותים אלה יכולים לחסוך השקעה בקבלים ולייעל את תפקוד מערכת ההולכה.

- הפחתת עומס ברשת ההולכה: אגירת עודפי ייצור סולארי בשעות הצהריים תוריד עומס מקווי הולכה ומשנאים רבים. באופן זה היא תאפשר להגדיל את ההספק הסולארי שניתן לקלוט, תמנע השלכת עודפי ייצור (curtailment) ותאפשר לדחות השקעות בשרדוג הרשת.

תוצאה 2. הקמת סוללות במקום פיקריות חדשות תחסוך מיליארדים למשק ותוזיל את החשמל

כבר היום, העלות המשקית להקים ולתפעל סוללות נמוכה בכ-8 אג' לקוט"ש מעלות הקמה ותפעול של פיקרית (יצוין שעלות זו כוללת כ-9 אג' לקוט"ש עלויות בריאותיות משקיות מזיהום אוויר). הפער בעלויות לטובת הסוללות גדל עם הזמן, כמפורט בתרשים 1 להלן:

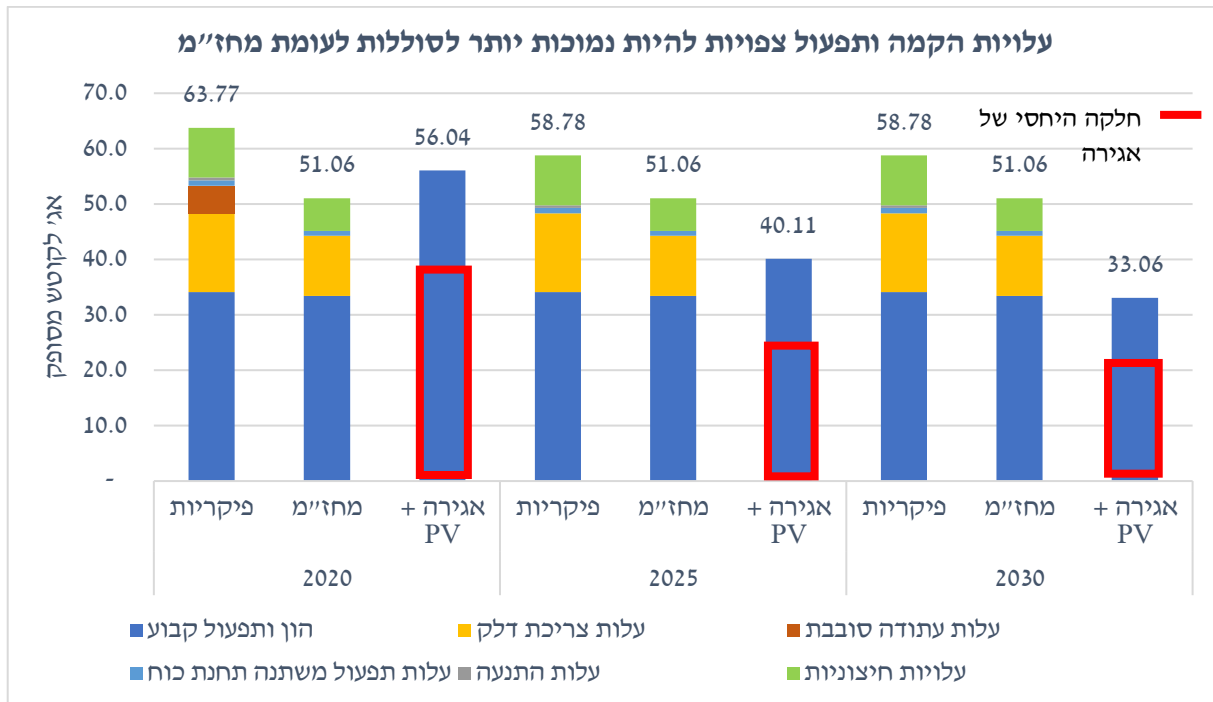
תרשים 1: תוצאות מרכזיות החלפת פיקריות בסוללות אגירה⁶



יתרה מכך, בהתייחסות לעלות הייצור המשוקללת, ב-2025 העלות המשקית להקים ולתפעל סוללות המוזנות ממתקני PV תהיה נמוכה יותר בכ-11 אג' לקוט"ש מהעלות הקמה ותפעול של מחז"מ, כאשר הפער גדל עם הזמן:

תרשים 2: השוואת עלויות תפעול והקמה

⁶ עלות עתודה סובבת מתייחסת לעלויות דלקים בלבד של עתודה סובבת קונבנציונלית הצפויה להיחסך בזכות הקמת סוללות אגירה. למען קלות ההצגה והשוואה, מאחר שמוצגת השוואה בין עלויות החלופות השונות, עלות העתודה הסובבת מוצגת כעלות של חלופת הפיקריות, ולא כתועלת של חלופות האגירה. יצוין עוד כי עלות זו מושתתת רק על עלויות 2020 היות שעלויות אלו ייחסכו על ידי הסוללות הראשונות שיוקמו בלבד.



החיסכון המשקי הכללי הצפוי מהחלטה שלא להקים כ-4000 מגה-ואט פיקריות ובמקומן להקים סוללות בשילוב הספק סולארי זהה, נאמד ב-9 מיליארד ₪ (מהוון). משק החשמל⁷ צפוי לחסוך כ-300 מיליון ₪ כבר ב-2025 וכ-900 מיליון ₪ ב-2030. היקף חיסכון זה שווה להפחתה של כ-0.4 אג"ל לקוט"ש (1% מהתעריף) נצרך ב-2025 וכ-1 אג"ל לקוט"ש (2.5% מהתעריף) ב-2030⁸. אומדן זה אינו כולל תועלות משקיות נוספות משימוש מושכל בסוללות לשירותי מערכת שונים, כגון חיסכון בייצוב מתח ותיקון מקדם ההספק, והפחתת העומס על רשת ההולכה באמצעות קליטת מתחדשות בשעות השפל ביום. להמחשה, החיסכון המשקי בעקבות החלפת הקמת יחידה פיקרית בגודל ממוצע של 110 MW בהקמת סוללות עם הספק סולארי זהה, נאמד ב-250-420 מיליון ₪.

מסקנות והמלצות למדיניות משק החשמל

משבר האקלים מחייב את ישראל, כמו את שאר העולם, לפעול לדה-קרבונזציה של משק החשמל באמצעות הגדלה מתמשכת של שיעורי הייצור באנרגיות מתחדשות, וצמצום הייצור בתחנות כוח פוסיליות מבוססות פחם וגז טבעי. עבודה זו בוחנת חלופות לטכנולוגיה מבוססת גז טבעי, שהיא מזהמת ולא יעילה ולכן המגמה העולמית היא להחליפה.

⁷ בניגוד לניתוח המשקי המוצג בדוח זה, הניתוח לתועלת ישירה למשק החשמל אינו מנכה את הכנסות המדינה מתמלוגי הגז שכן הם מגולמים בעלויות למשק החשמל, וכן אינו מביא בחשבון עלויות חיצוניות.

⁸ בהתייחסות לתעריף החשמל הנוכחי (44.84 אג"ל לקוט"ש) כפי שמפורסם על ידי חברת החשמל. תחזית צריכת החשמל התבססה על תרחיש מדיניות מיושמת שגובש במסגרת המערך הלאומי למעקב ודיווח אחר פליטות גזי חממה, בהנחת גידול של כ-2.7% בצריכה השנתית, לפי הנחות רשות החשמל.

העבודה ממחישה את נחיתותן הטכנית-תפעולית והכלכלית-סביבתית של תחנות כוח פיקריות לעומת סוללות. כבר כיום סוללות זולות יותר למשק מפיקריות והפער לטובתן יגדל במהירות במהלך העשור הזה. עקב כך החיסכון למשק מהקמת סוללות במקום פיקריות צפוי להצטבר למיליארדי שקלים אם יפסיקו לחלוטין הקמת תחנות כוח פיקריות חדשות.

המדיניות הנוכחית לקידום תחנות כוח פיקריות הייתה נכונה לעשור הקודם, אך לנוכח התפתחות טכנולוגיות האגירה והאנרגיה המתחדשת והירידה המהירה בעלויות האגירה יש צורך בשינוי המדיניות. נוסף על כך אורך החיים של תחנת כוח הוא כ-30 שנים, ולכן המשך המדיניות להקמת פיקריות חדשות יקבע הלכה למעשה את התלות של ישראל בתחנות גזיות מזהמות ויקרות לעשרות שנים.

לנוכח המסקנות הללו, המשרד להגנת הסביבה סבור כי יש לעצור את קידומן של תחנות כוח פיקריות חדשות, ובמקום זאת להקים סוללות לאגירת אנרגיה בשילוב מתקנים סולאריים. על מנת ליישם שינוי מדיניות זה יש לגבש רגולציה אשר תאפשר פיתוח מואץ של שוק היזמות הפרטי בתחום אגירת האנרגיה. לצורך כך אנו ממליצים לאפיין מבחינה טכנית ותפעולית את כלל שירותי המערכת (לדוגמה: ייצוב תדר, עתודה סובבת) הנדרשים ליציבות ושמידות של מערכת החשמל. על בסיס אפיון זה יהיה אפשר לגבש אסדרות/מכרזים תחרותיים לשירותים השונים באופן שימקסם את התועלת המשקית המתקבלת. כאן המקום לציין שכל אסדרה חייבת לתמחר את עלויות מזהמי האוויר וגזי החממה כחלק אינהרנטי מהתועלת המשקית.

1. מבוא

1.1 רקע

בעתיד הקרוב יושפע משק החשמל הישראלי מכמה מגמות שידרשו גמישות שונה במקטע הייצור:

1. הפחתת השימוש בפחם ואף הפסקת השימוש ביחידות הפחמיות יקטינו את הגמישות ברשת, מכיוון שהיחידות הקיטוריות גמישות יותר מיחידות מסוג מחזור משולב (מחז"מ) הפועלות על גז טבעי, שיחליפו אותן.
2. עם הגדלת נתח ייצור החשמל באמצעות מקורות אנרגיה מתחדשים אשר זמינותם משתנה כתלות במזג האוויר (שמש ורוח), מתעורר הצורך באמצעי ייצור גמישים, המסוגלים להיכנס לפעולה ולהתאים במהירות את הספק הייצור שלהם לדרישות המעקב אחר שינויי העומס.
3. בד בבד, הגדלת הייצור ממקורות מתחדשים תקטין את ההספק הפוסילי ברשת, וכך שוב תקטן הגמישות ברשת.

מתוך הבנה כי מגמות אלו יילכו ויתגברו בשנים הבאות, מתכוון משרד האנרגיה לשפר את היכולת הדינמית של מקטע הייצור באמצעות הקמת טורבינות פיקריות גמישות.

משרד האנרגיה מקדם טורבינות אלו באמצעות יצרני חשמל פרטיים (יח"פים) במסגרת החלטת ממשלה 2592, וכבר כיום יש תוכניות להקמת מתקנים אלו שנידונות בוועדות התכנון ובוות"ל, ברחבי הארץ ובשטחים הקרובים יחסית למקומות יישוב – ליד קריית-גת, ליד ראש העין, ליד פתח תקוה, באלון תבור, ועוד. על כן חשוב לקדם במהירות פתרונות חלופיים, שייתנו מענה לגמישות הנדרשת במקטע הייצור מחד גיסא, ויצמצמו פגיעה בסביבה ובבריאות הציבור מאידך גיסא.

הצורך באמצעי ייצור בעלי יכולות דינמיות משופרות הוא הכרחי, אך שימוש בטורבינות פיקריות כמענה לצורך זה אינו מקובל מהסיבות המתוארות בהמשך. יתרה מכך, הצורך למשק לא הוגדר באופן מעמיק – ובפרט התפתחות הצרכים בעקבות הגדלת החדירה של אנרגיות מתחדשות. זאת ועוד; לא נעשתה בחינה מסודרת של חלופות העונות על צרכים אלו - בהתייחסות להתפתחויות הטכנולוגיות מרחיקות הלכת של השנים האחרונות - לשם זיהוי החלופה המיטבית מבחינת עלויות ותועלות משקיות. רשות החשמל מקדמת את החלופה המוכרת והישנה.

1.1.1 תחזית הקמת פיקריות

גיבוש תחזית זו התבסס על כמה משתנים מרכזיים:

1. מכסות נותרות שטרם מומשו במסגרת אסדרה 914 של רשות החשמל - מתקני ייצור חשמל חדשים הצפויים לקום במסגרת אסדרות קיימות של רשות החשמל, בהתאם לצפי רשות החשמל. על פי דוח מצב משק החשמל לשנת 2018 שפרסמה רשות החשמל, נותרו כ-MW 649 שטרם נוצלו במסגרת אסדרה 914 וצפויים לקום ב-2022. הונח כי יתרת המכסה שטרם מומשה תקום כהספק פיקריות.
2. ההספק הקונבנציונלי נדרש בהתאם למפת הדרכים של רשות החשמל - תוספת להספק הנדרש בהינתן שיא צריכת החשמל הצפוי עד שנת 2030. זאת בתוספת הרזרבה הנדרשת מעל השיא, על מנת להבטיח את היכולת לספק את שיא הצריכה גם במקרה של תקלות בתחנות

כוח. על פי תחזיות רשות החשמל, עד 2030 נדרש הספק קונבנציונלי של 6,700 MW. הספק זה יהיה מבוסס גז טבעי בלבד :

טבלה 1: תחזית תוספת הספק קונבנציונלי נדרש למשק עד 2030

שנה	יח'	ערך	הערות
2020	MW	-	
2021	MW	-	
2022	MW	1,200	תוקם תחנת כוח מסוג מחז"מ, בעקבות גריטת אורות רבין
2023	MW	-	
2024	MW	1,000	בעקבות גריטת אשכול (פיקריות) - היתר הפליטה צפוי להסתיים ב-2023, ולאחר מכן ייתכן שיפעלו עד 2028 לכל המאוחר בהיקף הפעלה מוגבל
2025	MW	900	
2026	MW	300	
2027	MW	800	
2028	MW	900	
2029	MW	600	
2030	MW	1,000	גריטת הספק רמת חובב
סה"כ תוספת הספק	MW	6,700	

במסגרת העבודה, הונח בעצה אחת עם רשות החשמל כי מתוך תוספת ההספק הנדרשת עד 2030, 40% מהתוספת הנדרשת יוקמו כיחידות מחז"מ ו-60% יוקמו כיחידות מחזור פתוח. זאת למעט 1,200 MW הצפויים לקום ב-2022 כהספק חלופי לאורות רבין, אשר צפויים להיות מסוג מחזור משולב :

טבלה 2: תחזית צפויה של תוספת הספק פיקריות

שנה	יח'	ערך
2020	MW	-
2021	MW	-
2022	MW	649
2023	MW	-
2024	MW	600
2025	MW	540
2026	MW	180
2027	MW	480
2028	MW	540
2029	MW	360
2030	MW	600
סה"כ תוספת הספק פיקריות עד 2030	MW	3,949

הטבלה לעיל מראה כי עד שנת 2030 צפויות לקום תחנות מסוג פיקר בהספק כולל של כ-4,000 MW, מתוך כך 2,700 MW – כ-70% – בין השנים 2025-2030.

1.1.2 מגבלות של יחידות פיקריות

הטורבינות הפיקריות הן בעלות נצילות נמוכה ובשל כך צריכת הגז שלהן גבוהה, עלויות הייצור גבוהות וזיהום האוויר גבוה מאשר יחידות מחז"מ. להלן הגורמים לנצילות הנמוכה:

1. הדרישה הטכנית מהטורבינות הפיקריות היא כי יעמדו במצב מוכן לפעולה רוב שעות השנה, ובעת הצורך ייכנסו לפעולה במהירות, יאיצו במהירות להספק הדרוש, ויאפשרו כיבוי בתוך זמן קצר. דרישות אלו גוררות אילוצים המקטינים את יעילות הטורבינות ומגדילים את הפליטות הסגוליות (פליטה לקוט"ש חשמל מיוצר) הן של מזהמים הן של גזי חממה, הגבוהות ממילא ביחס לייצור חשמל במחז"מ:

טבלה 3: פליטות מזהמים וגזי חממה לקוט"ש מיוצר

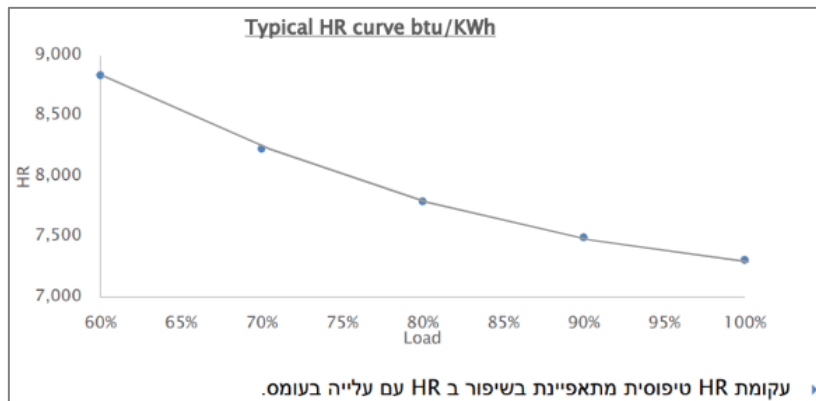
מזהם	יח'	מחז"מ F	מחזור פתוח
SO ₂	גרי' / קוט"ש מיוצר	0.004	0.050
NO _x	גרי' / קוט"ש מיוצר	0.140	0.366
PM _{2.5}	גרי' / קוט"ש מיוצר	0.020	0.050
CO ₂	גרי' / קוט"ש מיוצר	358	498

2. עקב משטר ההפעלה של מאות שעות ספורות בשנה, המרכיב העיקרי בעלויות הייצור הוא עלות הרכישה והתחזוקה, כך שנוצר תמריץ לשימוש בטכנולוגיה פשוטה וזולה, בדרך כלל נגזרת של מנועי סילון, שמשגיח יעילות נמוכה. לדוגמה, הטורבינות הסילוניות ברשת הישראלית מגיעות לנצילות של 25%-27%, ואילו טורבינות מודרניות יעילות עשויות להגיע לנצילות של 41%.

3. משטר ההפעלה מאלץ את הטורבינות לפעול רוב הזמן במצב של התנעה, התחממות, האצה או האטה, ואילו היעילות המרבית של טורבינות גז מגיעה בשלב של פעולה קבועה, בטמפרטורת העבודה ובהספק הנומינלי. עקב כך הטורבינות נמצאות רוב זמן פעולתן בשלבים שצריכת הדלקים ורמת הפליטות גבוהות. את ההפסדים בשלבי ההתנעה וההאצה קשה להעריך, אך הפיקריות, ביחס לשעות הפעולה שלהן, פועלות זמן רב בתפוקה חלקית. בתרשים להלן ניתן לראות כי בתפוקה חלקית צריכת הדלק עולה בכ-20% על הצריכה בתפוקה נומינלית (מ-7,400 קוט"ש לכ-8,900⁹).

תרשים 3: עקומת צריכת הגז של טורבינה (HR) ביחידות של btu/קוט"ש כפונקציה של העומס. מקור: רשות החשמל, ריכוז חומרים לקראת מכירת "אלון תבור"

⁹ רשות החשמל. (2019). מכירת תחנת הכוח אלון תבור - נספח - א מבנה הצעה בשוק האנרגיה ועקומת ההיצע של חשמל



4. חלק מיחידות הייצור מונעות בסולר, שלו פליטות מזהמים וגזי חממה גבוהות יותר מגז טבעי. בגלל גורמים אלה העלות השולית של ייצור קוט"ש בטורבינה פיקרית גבוהה פי 2 מייצור בטורבינות מחז"מ.¹⁰ נוסף על מגבלות אלו, שתוצאותיהן מחיר וזיהום גבוהים לקוט"ש מיוצר, לטורבינות הפיקריות חסרונות נוספים:

- **גמישות הפעלה:** לא תורם ליציבות תדר.
- **גמישות תכנונית:** היות שטורבינות פיקריות פולטות לסביבה מזהמים ודורשות אחסון של חומרים מסוכנים, יש מגבלות רבות על אתרים מתאימים להתקנתן, סוגיה הגורמת לעיתים התנגדות ציבורית והליכי תכנון והקמה ארוכים. לעומתן, מערכות אגירה אינן פולטות מזהמים לסביבה ואינן דורשות חומרים מסוכנים, ואפשר להתקינן סמוך למקומות יישוב.
- **זמני הקמה:** הקמת טורבינת גז היא פרויקט תשתית מורכב הנמשך זמן רב מהזמנת היחידה ועד להתקנה ולהפעלה – לעיתים יש תור בהזמנת הטורבינה מהספק, הליכי הסטטוטוריקה ארוכים עקב התנגדות התושבים באזור ויכולים להימשך שנים, ועוד כשנה של הקמה. סוללות אגירה לעומת זאת ניתן להתקינן בתוך חודשים ספורים לאחר הכנת השטח. ידוע המקרה של אילון מאסק, הבעלים של "טסלה", שהתערב כי יוכל להקים מתקן של סוללות טסלה בדרום אוסטרליה בתוך 100 ימים, ואכן כך היה.

לנוכח נתונים ומגבלות אלה יש צורך בבחינה אמיתית של חלופות ראויות לתחנות הפיקריות. בעבודה זו יפורטו היתרונות של אגירה בסוללות, ותיבחן השאלה אם ניתן להחליף את היחידות הפיקריות הנדרשות למשק החשמל ביחידות אגירה.

2 אגירת אנרגיה

2.1 מבוא

עם התפתחות תחום הסוללות למכשירי אלקטרוניקה ומכוניות חשמליות בשנתיים האחרונות, מחירי מערכות אגירה מבוססי תאי ליתיום יורדים בתלילות, בזמן שהביצועים משתפרים בהתמדה.

¹⁰ על פי השוואת העלות השולית של הפעלת טורבינות מחז"מ מול פיקריות

התפתחויות אלו הביאו תנופה עצומה בתחום הסוללות לאגירת אנרגיה. מערכות אגירה ברמת הרשת (Utility Scale) או צמודות לשדות סולאריים, מותקנות ברחבי העולם במחירים נמוכים מאוד. להלן כמה דוגמאות מהעת האחרונה:

- סוללת ענק בדרום אוסטרליה של 100MW שהותקנה ע"י חברת "טסלה" בסוף 2017, מגבה את התנודתיות של חוות הרוח הסמוכות. המערכת חסכה \$9M בעלויות מערכת כבר בששת חודשי הפעילות הראשונים¹¹ (CleanTechnica, 2018).
- חברת האנרגיה 8minute Solar חתמה בשנת 2019 על חוזה עם עיריית לוס אנג'לס להקמת מערכת סולארית קרקעית של 400MWp בצירוף מערך אגירה של 100MW¹². (Solar Power World, 2019)
- בפלורידה יוחלפו עד שנת 2021 שתי טורבינות ישנות בסוללה של 409 MW בצמוד לשדה סולארי של 149 MW (FPL, 2019)¹³.

כאמור, לצורך התאמת הרשת לעתיד מוטה מקורות אנרגיה מתחדשים, מקודם הפתרון של טורבינות פיקריות, המאפשרות התנעה בתוך דקות ספורות וקצב עלייה וירידה מרשימים. אולם ביצועים אלו פחותים מהיכולות של סוללות אגירה, המסוגלות להיכנס לפעולה, להזרים חשמל לרשת בתוך שברירי שנייה ולהגיע מייד לתפוקה מלאה.

נוסף על יכולת התגובה המהירה, הסוללות, בסיוע ממירים 'חכמים', יכולות לספק שירותים נלווים לרשת, כגון ייצוב תדר ומתח, החלפת רזרבה סובבת, תיקון מקדם הספק, ועוד. להלן כמה דוגמאות¹⁴:

- מחקר הדגמה להפחתת העומס בקווי הולכה באמצעות אחסון סוללות של 4 MW/40 MWh הראה כי NYISO יכול לחסוך עד 2.03 מיליון דולר בעלויות דלק ולהפחית כמעט 400 שעות עומס (IEEE, 2017).
- מחקר שנערך במדינת ניו יורק העריך כי ייחסכו יותר מ-22 מיליארד דולר אם המדינה תפרוס כ-11,500 MW של אחסון אנרגיה במקום פתרונות רשת מסורתיים עד שנת 2025 (NYSERDA, 2018).

¹¹ Cleantechnica: מתוך אתר <https://cleantechnica.com/2018/09/27/1st-year-income-from-tesla-battery-in-south-australia-equals-1/3-of-its-cost/>

¹² solar power world: מתוך אתר <https://www.solarpowerworldonline.com/2019/09/8minute-solar-energy-los-angeles-solar-storage/>

¹³ <http://newsroom.fpl.com/2019-03-28-FPL-announces-plan-to-build-the-worlds-largest-solar-powered-battery-and-drive-accelerated-retirement-of-fossil-fuel-generation>

¹⁴ Utility Scale Batteries (IRENA 2019) : מתוך https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf

- PJM פרסה מערכות אגירה לייצוב תדר וצמצום הייצור מדלקים פוסיליים ואספקת שירותים נלווים. PJM מעריכים כי יושג צמצום של 10%-20% ברכש יכולת לייצוב תדר וחסכון של 25-50 מיליון דולר (HDR, 2017).
- בשנת 2014 התקינה Aquion Energy מערכת אגירה של 1 MWh כחלק ממיקרו-גרید סולארית בהוואי. המערכת צפויה להפחית את השימוש בדלקים בשיעור של 97% (ESA, 2014).
- במרטיניק, מערכת אגירה של 2 MWh תייצב את ההספק המזון לרשת מחוה סולארית ברמה של 40% מההספק המותקן של המערכת. השילוב מאפשר לסווג את החוה כצפויה ואמינה, ללא צורך בגיבוי נוסף לפיצוי על התנדטיות של המקורות המתחדשים (DOE Global Energy Storage Database, 2019).

המשמעות היא כי מאגרי סוללות מותאמים טוב יותר לעתיד מוטה מקורות מתחדשים, והקמה של טורבינות גז פיקריות כיום תותיר את המשק ללא מענה מתאים לדרישות הרשת העתידית.

2.2 אגירה כפתרון לגמישות הרשת

במחצית השנייה של 2017 פרסמה חברת החשמל דוח של אגף תפ"ט ובו ניתוח מקיף של צורכי האגירה בהיקף תעשייתי במשק החשמל בישראל, כתלות בתרחישים שונים לגבי תחזית הביקוש, היקף אנרגיה מתחדשת במערכת, עלות הקמה של מתקני אגירה וכו'.

ממצאי העבודה מראים במפורש שמלבד תחנות האגירה שאובה שכבר אושרו להקמה, יש צורך וכדאיות בהקמת אמצעי אגירה בהיקף של אלפי מגה-ואט אף אם מניחים שנתח האנרגיות המתחדשות בייצור החשמל בטווח הארוך לא יעלה על 17%-22% (ז"א הרבה מתחת להיקפים המתוכננים של אנרגיות מתחדשות במדינות המפותחות).

סימולציה של פעולת המערכת ואופטימיזציה ארוכת טווח של פיתוח המערכת מראות כי :

- ציטוט מהדוח: "הנתח המשמעותי ביותר מההוצאות הנמנעות למשק החשמל משילוב מתקני אגירה טמון בחיסכון מדחיית השקעות באמצעי ייצור קונבנציונליים, ובעיקר אלה המיועדים להספקת עומסי שיא (פיקרים-peakers)".
 - הגדלת היקף הייצור באמצעות אנרגיות מתחדשות מגדילה את כדאיות השילוב של מתקני האגירה במערכת. ציטוט מהדוח: "ככל שיעלה חלקן של האנרגיה הסולארית ואנרגיית רוח בהספק הכולל של המערכת, יתעורר הצורך בהרחבת השירותים הנלווים הנדרשים להבטחת איזון בין היצע וביקוש בזמן אמת..."
- בהתאם לנ"ל, בעבודה זו הונחה הנחה שמרנית, שעם הגדלת הנתח של אנרגיות מתחדשות יועלו הדרישות לעתודה הסובבת לכ-800 מגה-ואט לקראת 2025, לכ-1,000 מגה-ואט לקראת 2035 ולכ-1,200 מגה-ואט לקראת 2045."

- בשל תגובתם המהירה לאירועי תדר, למתקני אגירה יתרון משמעותי לעומת יתר אמצעי הייצור בכל הקשור לביצועים דינמיים של המערכת. מחברי הדוח מציינים שהניסיון של הפעלת מערכות החשמל בחו"ל מראה, שמידת תרומתם של מתקני אגירה לשמירה על יציבות התדר עולה במידה ניכרת על חלקם היחסי בכושר הייצור הכולל במערכת. יש לציין כי לסוללות אף מהירות תגובה גבוהה יותר מאשר לאגירה שאובה, ולכן הן משמשות חלופה טובה יותר לתגובה לאירועי תדר. יצוין שבשנתיים שחלפו מפרסום הדוח חלו התפתחויות משמעותיות, המשליכות על עתידם של משקי החשמל בעולם בכלל ושל משק החשמל בישראל בפרט:

- בעקבות המגמות החמורות המתבהרות בהקשר לשינויי אקלים, רוב מדינות העולם העלו מאוד את רף היעדים להיקף ההשתלבות של מקורות אנרגיה מתחדשים במשקי חשמל.
- עלויות הייצור הסגוליות (לקוט"ש) באמצעות אנרגיה סולארית ואנרגיית רוח נמצאות במגמת ירידה תלולה מתמדת, והגיעו לנקודת שבירת שוויון אפילו מול היחידות הקונבנציונליות הנצילות ביותר.
- עלויות אגירת אנרגיה באמצעות סוללות מצברים ירדו ירידה ניכרת ונמצאות במגמת ירידה תלולה.
- מערכות אגירה בסוללות בהיקף גדול (מאות מגה-ואט-שעה ואף יותר מגיגה-ואט-שעה) מותקנות ברחבי העולם.

כבר עתה ברור שכל המגמות הללו יחד עשויות לשנות את תמונת משק החשמל העתידי בישראל מקצה לקצה: הקמה בהיקף נרחב של כושר ייצור באמצעות אנרגיה סולארית (ואולי גם רוח), המלווה בהקמת מתקני אגירה שיאפשרו **אחסון יעיל ולא יקר** של האנרגיה בשעות זמינותה ויתרמו להספקת העומס השיורי (Residual Load) ביתר שעות היממה.

תמונת מצב זו תאופיין בנתח גבוה של מקורות מתחדשים בייצור החשמל הכולל – **הרבה מעבר ל-22%-17%, ז"א הרבה מעבר למה שהונח בדוח תפ"ט.**

על כן עם התממשות המגמות לעיל, יתרונות רבים של מתקני אגירה אשר מצאו ביטוי בדוח העידו על כדאיות השתלבותם בתוכנית הפיתוח במסגרת תהליך האופטימיזציה, **תוך דחיית השקעות ביחידות פיקריות**. כמו כן יבוא לידי ביטוי במלוא העוצמה היתרון העיקרי שלהם מול היחידות הקונבנציונליות – יכולת **אחסון עודפי אנרגיה** ממקורות מתחדשים בעת זמינותם.

בהתאם לנ"ל, שהתייחס לאגירה שאובה הנחותה מסוללות אגירה, בהתחשב במגמות ההתפתחות הטכנולוגית של סוללות האגירה ובמגמה העולמית של הרחבת השימוש באנרגיות מתחדשות, נראה כי **אין כל הצדקה להקמת טורבינות פיקריות, ואף פיקריות גמישות. יש לתכנן במקומן מערכות אגירה מתאימות** (אם כי בחינה מדוקדקת של הטענה תדרוש הרצת סימולציה מלאה בחח"י).

אף אם יחידות פיקריות לא יותקנו **במקום** אמצעי אגירה אלא **נוסף** עליהם, ההשקעות הקבועות בהקמתן ותפעולן צפויות להפוך למיותרות מבחינת המערכת ויפלו כנטל על כתפי הציבור. זאת משום שהרוב המכריע של תפקידיהן יבוצע טוב יותר ובעלות נמוכה יותר על ידי יחידות אחרות, ובעיקר על ידי מתקני אגירה.

בנוגע לדרישות הדינמיות ממערכת הייצור העתידית, פרק 5 בדוח תפ"ט (ראו נספח א') מתאר את היכולות המרשימות שמתקני אגירה שאובה מסוגלים להקנות למנהל המערכת לצורך הבטחת יציבות ושמידות המערכת בשגרה ובעת התרחשות תופעות מעבר. יש לציין שברוב הפרמטרים הדינמיים, ובפרט מהירות התגובה לשינויי תדר, היכולות של סוללות מצברים עולות על אלה של אגירה שאובה. אם מתקן אגירה שאובה במצב סובב ריקס (Spinning in Air) בדרך כלל אינו יכול לתרום לעתודה סובבת במשך השניות הראשונות, כפי שמצוין בדוח, מתקני אגירה מבוססי סוללות מצברים מגיבים כמעט מיידי גם במצב ללא עומס.

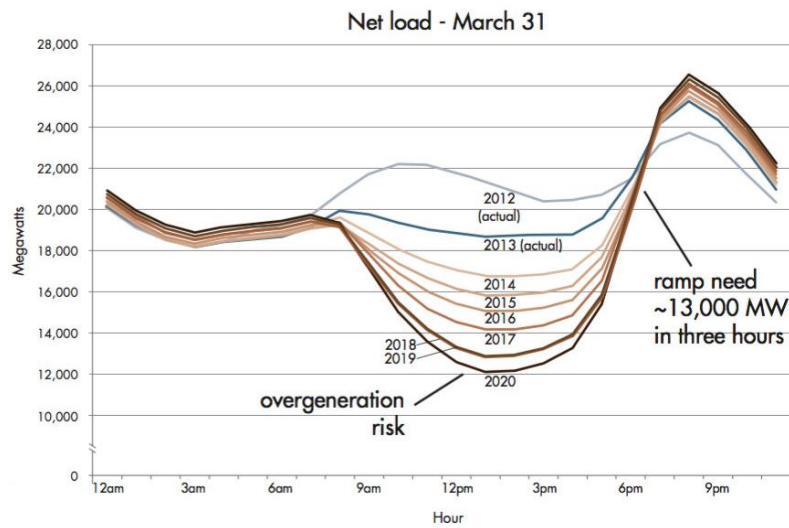
מחברי הדוח מציינים את היכולת של מתקני אגירה שאובה עם גנרטורים סינכרוניים לתרום להספקת שירותי "התנעה שחורה", כדי להעלות את המערכת במצבי עלטה. עוד הם מציינים שבמקרה של מתקנים בעלי מהירות משתנה הספקת שירות זה בעייתית, בשל הצורך לספק חשמל למערכות אלקטרוניות שלהן ממקורות חיצוניים. גם בהקשר לסוללות מצברים היו ויכוחים לגבי יכולתן לספק "התנעה שחורה", אך בשנים האחרונות הייתה התקדמות בנושא. דוגמה לכך ניתן לראות בנספח ב'.

יש לציין שבמערכת מתוכננת היטב, יחידות פיקריות אינן מיועדות ואינן מתאימות לתפקיד של שמירה על יציבות המערכת. היחידות הללו אכן יכולות להגיב במהירות לשינויי תדר, אך זאת רק בזמן שהן פועלות ומייצרות חשמל. אולם הפעלתן לפרקי זמן ארוכים אינה מוצדקת מהיבט כלכלי וסביבתי גם יחד. לעומת זאת היתרון הגדול של מתקני אגירה, כגון סוללות מצברים, גלום דווקא ביכולתם להגיב במהירות לשינויי תדר.

הדוח מצייין שהגמישות המרבית בהפעלה, האופיינית למתקני אגירה שאובה, תורמת לשיטוח פרופיל ההעמסה של היחידות הקונבנציונליות ומאפשרת לצמצם את מספר התנעותיהן והפסקותיהן, תוך כדי השגת חיסכון בהוצאות דלק ובעלות תחזוקתן. הדבר מתבטא ביתר שאת במערכות שלהן נתח משמעותי של אנרגיות מתחדשות, הגורמות לשינויי העמסה תכופים של יחידות קונבנציונליות.

אפשר להסביר זאת בעזרת התמונה של עקומת "הברווז" המפורסם, שפרסמה California ISO (California ISO, 2016) לתרחישים שבהם האנרגיה הסולארית תופסת נתח גדל והולך בסך הייצור (ראו להלן). מבחינת הפעלת המערכת, אלה התקופות הקשות יותר:

- שעות הבוקר, כאשר השמש עולה והעומס השיורי (המסופק ע"י יחידות קונבנציונליות) יורד.
- שעות שקיעת השמש, כאשר העומס השיורי עולה בקצב מהיר במיוחד בשל ירידה בייצור הסולארי, המלווה בעליית הביקוש לחשמל לקראת שיא העומס בשעות הערב.



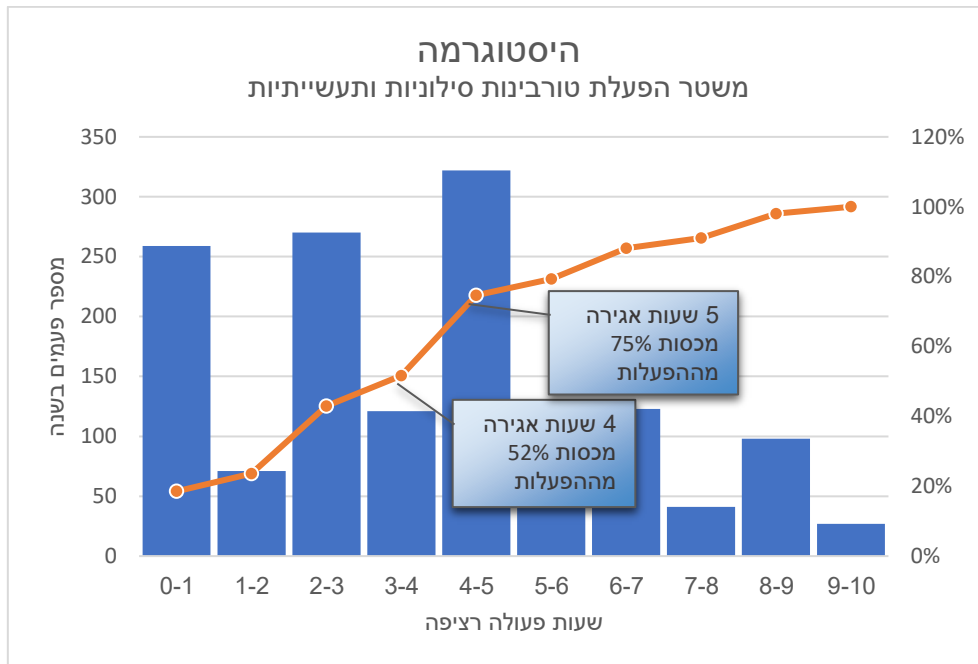
תרשים 4: "עקומת הברווז" שהציגה Cal-ISO. עם הגדלת רכיב האנרגיה הסולארית נוצרים אתגרים חדשים בתפעול רשת החשמל, והם ניתנים לפתרון אופטימלי באמצעות מערכות אגירה. מקור: CAISO

כמובן, בתקופות הקשות הללו, כאשר מנהל המערכת נאלץ לבצע הפסקות והתנעות רבות של יחידות קונבנציונליות, יש חשיבות רבה לגמישותן התפעולית. צורך זה, ככל הנראה, עמד ביסוד ההחלטה לקדם הקמה של יחידות פיקריות גמישות בהיקף גדול. אולם דווקא בתקופות אלו היתרון של מתקני אגירה על יחידות פיקריות בא לידי ביטוי במלוא העוצמה: נוסף על יכולתן להעלות או להוריד את ההספק הנדרש בקצב המהיר ביותר מבין כל אמצעי הייצור במערכת, הן מסוגלות לפעול במצב אגירת אנרגיה בשעות שהעומס השיורי נמוך. ע"י כך הן יכולות לשטח את העקומה, לצמצם את הצורך בהפעלות/הפסקות של יחידות ייצור קונבנציונליות ולאפשר להן לפעול קרוב יותר לרמות ההעמסה האופטימליות, תוך שיפור נצילותן, צמצום מספר ועלות התנעתן והוצאות תחזוקתן.

על כן גם מבחינת הגמישות התפעולית של המערכת, הקמת מתקני אגירה עדיפה הרבה יותר מהקמת טורבינות פיקריות.

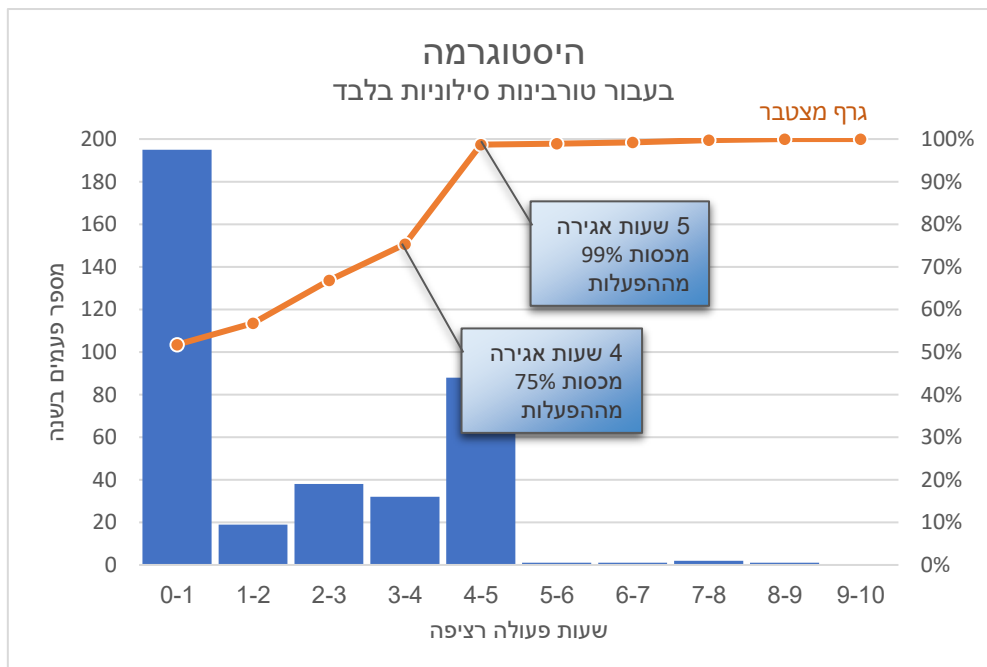
2.3 סוגיית משך ההפעלה של היחידות הפיקריות

כדי לבחון את היקף שעות האגירה הנדרשות לתת מענה לצורכי המערכת, באופן דומה לטורבינות הפיקריות כיום, נבדוק להלן את מתווה שעות ההפעלה של היחידות הפיקריות. לצורך הבדיקה נבחן את משטר ההפעלה של יחידות הייצור מבוססות טורבינות גז סילוניות וטורבינות תעשייתיות (במחזור פתוח) בשנת 2018, עפ"י דיווחי מנהל המערכת המפורסמים מעת לעת באתר רשות החשמל.



תרשים 5: מספר ההפעלות של טורבינות סילוניות ותעשייתיות בשנת 2018, לפי מספר שעות פעולה רציפה

תרשים 4 לעיל מציג היסטוגרמה המונה את מספר ההפעלות של הטורבינות, בפירוט לפי מספר שעות פעולה רציפה. ניתן לראות כי ב-52% מהמקרים הופעלו הטורבינות עד 4 שעות ברצף, ואילו ב-75% מהמקרים הן הופעלו עד 5 שעות.



תרשים 6: מספר ההפעלות של טורבינות סילוניות בלבד

בתרשים 3 לעיל ניתן לראות כי אם בוחנים את משטר ההפעלה של הטורבינות הסילוניות בלבד, הרי ב-75% מהמקרים הן הופעלו עד 4 שעות רצופות, ואילו ב-99% מהמקרים הן הופעלו עד 5 שעות.

ניתוח זה מדגים כי סוללות אגירה של 4-5 שעות (בתפוקה מלאה) יכולות להחליף את מרבית ההתנעות של הפיקריות בתנאי הפעולה של המשק הישראלי.

ראוי להדגיש כי עם כניסה משמעותית יותר של מקורות מתחדשים לרשת, ובפרט אנרגיה סולארית, "עקומת הברווז" תחריף, יגדל הצורך בהאצות קצרות ובקצבי טיפוס (ramp-up) גבוהים, יידרשו יותר התנעות והפעלה לפרקי זמן קצרים של הטורבינות הפיקריות, וכך יתקבל מתווה המתאים עוד יותר למענה באמצעות סוללות.

נוסף על כך, לפי מפת הדרכים לתכנון מקטע הייצור במשק החשמל אשר פרסמה רשות החשמל, סוללות בעלות יכולת אגירה של כ-4 שעות, קרי סוללות הפועלות 4 שעות בהספק מלא, יכולות להוות תחליף להספק קונבנציונלי.

מן האמור לעיל ניתן להסיק כי צורכי הרשת, המתווים את אופן ההפעלה של היחידות הפיקריות, אינם מונעים משימוש בסוללות אגירה כחלופה לטורבינות פיקריות.

2.4 פירוט שירותי המערכת הניתנים על ידי סוללות

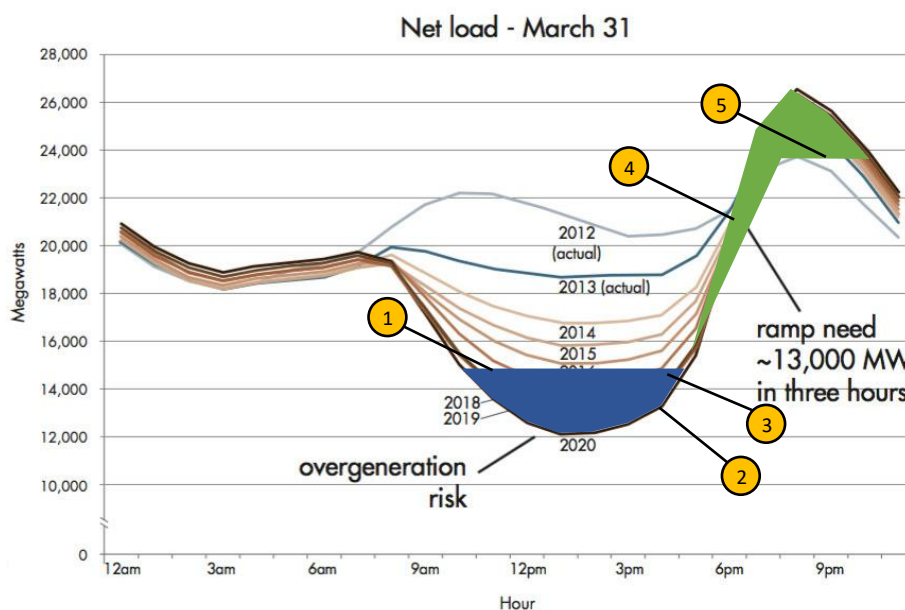
מערכות אגירה בסוללות מסוגלות לספק שירותי מערכת שונים (Ancillary Services) מעבר לטורבינות פיקריות. בפרק זה יתוארו השירותים העיקריים שהסוללות יכולות לספק, חלקם מתומחרים כיום, וחלקם עדיין לא.

שירות	תיאור
"גילוח פסגה"	אספקת ביקוש לרשת בשעות השיא, חלופה לטורבינות הפיקריות. דורש יכולת להיכנס לפעולה ולסיים בפרקי זמן קצרים. לעיתים רחוקות נדרשת פעולה לאורך זמן, מעבר ליכולת אגירה של 4 שעות. שירות זה נדון באריכות בפרקים הקודמים וניתן כיום בדרך כלל על ידי טורבינות פיקריות.
שיטוח עקומת העומס השירוי	אגירת אנרגיה בשעות העומס השירוי הנמוך וייצור בשעות העלייה המהירה של עקומת העומס השירוי ובשיאו. במשק חשמל מוטה אנרגיה סולארית, התפוקה הגבוהה של המערכות הסולאריות בצוהריים גורמת לשתי בעיות מרכזיות: א. ייצור-יתר (overgeneration) – ליחידות הפוסיליות בדרך כלל יש הספק מינימלי לייצור, כ-50%-30% מההספק הנומינלי. התפוקה הסולארית עלולה לדחוק את היחידות הפוסיליות אל מתחת לערך מינימלי זה ואף לאפס. היות שלא ניתן להוריד את הספק היחידות הפוסיליות אל מתחת לערך המינימום, יהיה צורך להשליך את עודף החשמל הסולארי. סוללות האגירה מסוגלות לקבל ולאגור את עודף הייצור. סוגיה זו עדיין אינה רלוונטית למשק החשמל הישראלי עקב

<p>השיעור הנמוך של אנרגיה מתחדשת, אך בעתיד הקרוב מנהל המערכת יידרש לבעיה זו.</p> <p>ב. קצב עלייה (ramp up) גבוה – אחרי הצוהריים, כאשר התפוקה הסולארית יורדת ובד בבד הביקוש עולה לקראת שיא הערב, העומס השיורי עולה במהירות ויחידות הייצור מתקשות לעמוד בקצב הנדרש. סוללות תוכלנה לפרוק בשלב זה אנרגיה לרשת ולהשלים את הפער. שירות זה הוא תחליף לפעולת הפיקריות הפועלות כהספק "גשר" עד להאצת יחידות המחז"מ.</p> <p>יתרה מכך, טורבינות גז, ובפרט מחז"מ (הכוללות רכיב קיטורי) לא מתפקדות היטב במשטר הפעלה הכולל שינויי הספק תכופים – נצילותן נפגעת, עלויות התחזוקה עולות, אורך חייהן מתקצר והפליטות גוברות. יישור עקומת העומס השיורי יאפשר ליחידות מחז"מ לפעול ביעילות רבה יותר, תוך שיפור נצילותן והפחתת פליטות המזהמים.</p> <p>שירות זה אמורות לתת כיום טורבינות פיקריות, אך הן אינן מסוגלות לקבל את עודפי הייצור במקרה של ייצור-יתר.</p>	
<p>בתנאי מזג-אוויר משתנים יוכלו סוללות לספוג עודפי ייצור מחד גיסא, ולהשלים חוסרים מאידך גיסא, יתרמו ליישור עקומת העומס השיורי בעקבות התנודות בתפוקה הסולארית, ובעקבות זאת יצמצמו את דרישות העתודה הסובבת ועתודה מהירה מיתר היחידות במערכת.</p> <p>שירות זה אמורות לתת כיום טורבינות פיקריות, אף שאינן מספקות פתרון אופטימלי.</p>	<p>טיפול בתנודתיות של התפוקה הסולארית</p>
<p>יכולת הסוללה להיכנס לפעולה בתוך שברירי שנייה מאפשרת לה להוסיף הספק לרשת אם התדר יורד מתחת לערכו המקובל, או להגדיל את העומס במצב אגירה אם התדר עולה מעבר לערכו המקובל. יכולת זו מאפשרת לצמצם את הדרישות לגבי עתודה סובבת מהיחידות הפוסיליות וכך לחסוך כסף רב ופליטת מזהמים מיותרת.</p> <p>שירות זה ניתן כיום באמצעות עתודה סובבת והסדרי השלת תדר.</p>	<p>ייצוב תדר ותרומה לעתודה סובבת</p>
<p>בעיה הנגרמת בעיקר ברשת החלוקה כאשר העומס הסולארי גבוה, ויש תנודות וחרגיגות של מתח הרשת לאורך קו החלוקה. סוללות, בסיוע ממירים חכמים, מסוגלות להזריק או לספוג הספק ריאקטיבי אל הרשת וממנה כדי לשמור על המתח בטווח המותר.</p> <p>שירות זה ניתן כיום חלקית באמצעות קבלים ומייצבי מתח בשנאי החלוקה.</p>	<p>ייצוב מתח</p>
<p>היות שהסוללות משתמשות בממיר (Inverter) אלקטרוני להמרת הזרם היישר לזרם חילופין, יש אפשרות לשלוט על מקדם ההספק במוצא בגבולות הנדרשים.</p>	<p>יכולת תיקון מקדם הספק</p>

שירות זה ניתן כיום באמצעות התקנת בנק קבלים מתאים.	
<p>הפחתת עומס ברשת ההולכה</p> <p>כאשר בשעות הצהריים מערכות סולאריות רבות מייצרות חשמל, קווי ההולכה והשנאים עמוסים ועלולים להגיע לגבול היכולת. במקרה כזה ניתן לאגור את עודפי החשמל הסולארי בסוללות לפני הכניסה לשנאי או לקו ההולכה העמוס ולפרוק אותם מאוחר יותר, כאשר מערכת ההולכה מאפשרת זאת.</p> <p>במקרים מסוימים, ההפחתה בעומס על הקווים מאפשרת לדחות שדרוג של הרשתות ולייעל את השימוש בתשתיות. במקרים אחרים הפחתת העומס מאפשרת להקים מערכות סולאריות, שללא אגירה לא היו מוקמות עקב מעבר מגבלות היכולת של מערכת ההולכה.</p> <p>שירות זה אינו יכול להיות מסופק ללא מערכות אגירה, וכיום מחייב שדרוג הרשת.</p>	
<p>הגדלת נצילות מחז"מים</p> <p>טורבינות גז סובלות מירידה בנצילות עם הפחתת העומס. כמו כן נצילותן יורדת בעת עלייה או ירידה בעומס. שימוש בסוללות לספיגת התנודות בביקוש ויישור עקומת העומס השיורי יאפשר ליחידות המחז"מ לפעול ברציפות ולהשיג נצילות גבוהה, שמשמעותה מחיר מינימלי לקוט"ש מיוצר ופליטות מופחתות.</p>	
<p>שיפור איכות החשמל</p> <p>הסוללות מאפשרות להגן על הצרכנים מפני נפילות, נחשולי זרם, או עיוותים הרמוניים.</p>	

נביט בתרשים 4 להלן המציג את שירותי המערכת שיחידת אגירה תוכל לספק בתרחיש מוטה אנרגיה סולארית כפי שמבוטא ב"עקומת הברווז":



תרשים 7: עקומת הברווז עם אגירה, מגלמת יתרונות רבים של מערכת האגירה

השירותים המוצגים בגרף הם אלה :

1. ביטול סכנת ייצור היתר: הסוללות יאספו את עודפי החשמל הסולארי בזמן שהיחידות הפוסיליות מייצרות בתפוקה מינימלית.
2. שיטוח עקומת העומס השיורי: יחידות האגירה קולטות את החשמל בשעות העומס השיורי הנמוך ומשחררות אותו בחזרה לרשת בשעות העומס הגבוה.
3. הגדלת נצילות מחז"מים: יישור עקומת העומס השיורי מאפשרת ליחידות הפוסיליות לפעול בתפוקה קבועה, ולכן בנצילות גבוהה ופליטות נמוכות.
4. שיטוח עקומת העומס השיורי: בשעת העלייה המהירה בביקוש (ramp up), הסוללות משחררות אנרגיה לרשת וממתנות את הדרישה להאצה של היחידות הפוסיליות.
5. גילוח פסגה: מערכת האגירה משחררת אנרגיה בשעת שיא הביקוש וכך מאפשרת ליחידות הפוסיליות לפעול בעומס נמוך ובתפוקה קבועה, להגדלת הנצילות ולצמצום הפליטות.

2.5 סקירת טכנולוגיות אגירה

ישנן כמה קטגוריות עיקריות לטכנולוגיות לאגירת אנרגיה: אגירה מכאנית, תרמית ואלקטרו-כימית. **באגירה מכאנית** משתמשים בתכונות פיזיקליות כדי לאגור אנרגיה, דוגמת גלגל תנופה המסתובב בריק (למשל החברה הישראלית צ'אקרה-טק), העלאת מים לגובה רב והפלתם בעת הצורך במתקני אגירה שאובה, או מכל שבו נאגרת האנרגיה באוויר דחוס.

באגירה תרמית משתמשים באנרגיה לחימום תווך השומר על הטמפרטורה לאורך זמן ומאפשר ניצול החום בעת הצורך (למשל חברת ברנמילר אנרג'י).

אך התחום הפעיל ביותר הוא האגירה האלקטרו-כימית, שבו יש שתי טכנולוגיות עיקריות: סוללות נטענות וסוללות זרימה.

בסוללות זרימה שני נוזלים זורמים משני צידי ממברנה המאפשרת החלפת יונים בין הנוזלים, וכך מאפשרת לטעון ולפרוק את האנרגיה הנאגרת בנוזלים. לסוללות אלו יכולת אגירת כמויות גדולות של אנרגיה, התלויה רק בנפח מאגרי הנוזלים, אך הספקי הטעינה והפריקה שלהן נמוכים יחסית ולכן הן אינן מתאימות למתווה ההפעלה של הפיקריות.

הסוללות הנפוצות ביותר כיום, משעונים וטלפונים סלולריים, דרך מחשבים ניידים, מכונות חשמליות, ועד למאגרי ענק, הן **הסוללות הנטענות**, ובפרט אלו המבוססות על טכנולוגיית **יוני ליתיום** (Lithium-Ion). בסוללות אלו יונים של ליתיום עוברים מקתודת קובלט לעבר אנודת גרפיט בזמן הטעינה, ומהאנודה בחזרה לקתודה בעת הפריקה. לסוללות אלו **צפיפות אנרגיה גבוהה**, הן נפחית והן משקלית, הן מסוגלות לעבור **מחזורי טעינה ופריקה רבים**, מסוגלות להגיע ל**זרמי טעינה ופריקה גבוהים**, דורשות **תחזוקה פשוטה** ובעלות **פריקה עצמית נמוכה**, שמשמעותה כי ניתן לאגור בהן חשמל לזמן ארוך יחסית בלי לסבול מאובדן אנרגיה בפריקה עצמית. אולם סוללות אלו **יקרות** למדי, סובלות **מהזדקנות**, דהיינו ירידה בביצועים לאורך זמן ועם מספר מחזורי הטעינה, והן רגישות לטמפרטורה, לפגיעה פיזית, או לטעינת יתר ופריקת יתר ויכולות **לעלות באש**.

בניסיון למזער את החסרונות של סוללות הליתיום, חוקרים בוחנים תרכובות שונות של סוללות, כגון ליתיום-ברזל-פוספט או ליתיום-תחמוצת-מנגן. כמו כן נבחנות טכנולוגיות המבוססות על יוני נתרן או סוללות עופרת מתקדמות. אך הרוב המוחלט של הסוללות המסחריות מבוסס על טכנולוגיית ליתיום-תחמוצת-קובלט (LCO).

תא הליתיום הבסיסי מסוגל לספק חשמל במתח של 3.7 וולט. מערכת האגירה כוללת תאים רבים המאורגנים במודולים. כדי לספק חשמל במתח הרשת, וכן כדי להמיר את הזרם היישר מהסוללות לזרם חילופין, המערכת כוללת ממיר (Inverter). סוללות ליתיום מגיעות לביצועים טובים כל עוד הן נשמרות בטמפי' של 25°C, לכן המערכת כוללת מיזוג אוויר אינטגרלי ובקרת טמפרטורה. המערכת כוללת גם רכיב ניהול המבקר את הטעינה והפריקה של המודולים, עוקב אחר הטמפרטורה במודולים, ושולט על הממיר לאספקת שירותי מערכת שונים (ראו בהמשך).

ניתן להעלות את מתח העבודה של מערכות אגירה עד למתח גבוה של אלפי וולט, וכך להגדיל את כמות האנרגיה הנאגרת, באמצעות חיבור בטור של תאים (מודולים רבים). מערכות האגירה המקובלות מספקות 4 שעות עבודה בהספק מלא. לדוגמה, מערכת בהספק יציאה של 50 מגה-ואט אוגרת 200 מגה-ואט-שעה של אנרגיה. מערכת כזו יכולה לפעול בהספק מלא 4 שעות רצופות, או זמן ממושך יותר בהספק חלקי.

מערכות האגירה נהנות ממהירות תגובה גבוהה. הן מסוגלות לשלוט על ההספק ביציאה בקצב מהיר ביותר (עד אלפיות השנייה) וכך להגיב במהירות לצורכי הרשת.

למערכות האגירה **נצילות קבועה**. טורבינת גז פועלת בנצילות המרבית בעבודה בהספק נומינלי. בפעולה בעומס חלקי הנצילות של טורבינת הגז עלולה להצטמצם אף ב-40% ביחס לנצילות האופטימלית. סוללת אגירה לעומת זאת מסוגלת לאגור אנרגיה מהרשת ולפרוק אותה בחזרה בנצילות קבועה ללא תלות בהספק.

אולם בצד היתרונות הרבים של מערכות האגירה מבוססות סוללות ליתיום, למערכות אלו יש גם כמה חסרונות:

פריקה עצמית. סוללות ליתיום סובלות מפריקה עצמית, משמע, סוללה שעומדת ללא פעילות מאבדת חלק מהאנרגיה האגורה. אובדן זה תלוי במשתנים רבים, כגון עומק הטעינה (סוללה טעונה במלואה מתפרקת מהר יותר מסוללה הטעונה חלקית), טמפרטורה (בטמפרטורה גבוהה הסוללה תתפרק מהר יותר) וגיל (סוללות שעברו מחזורי טעינה רבים יתפרקו מהר יותר). סוללות ליתיום עלולות לאבד עד 15% מהאנרגיה האגורה,¹⁵ אם כי עם התקדמות הטכנולוגיה אובדן זה הולך ומצטמצם. כדי לצמצם את איבוד האנרגיה בפריקה עצמית משתמשים בסוללות ליתיום לאגירה לטווח קצר, של שעות ספורות, ולא לטווח ארוך.

עומק הטעינה והפריקה. סוללות ליתיום נפגעות כאשר הן נפרקות במלואן. על כן לשמירה על אורך חיים ממושך נהוג לפרוק אותן עד כדי 80%, זאת אומרת, להותיר 20% מהאנרגיה בסוללה. משמעות הדבר היא כי יכולת העבודה האפקטיבית של סוללת ליתיום הינה כ-80% מכמות האנרגיה הנקובה.

כמות אנרגיה מוגבלת. מעצם טבען, מערכות אגירה כוללות כמות מוגבלת של אנרגיה. בהשוואה ליחידות המופעלות בגז, שבשבילן (כל עוד רשת הגז תקינה) יש אספקה בלתי מוגבלת של אנרגיה ראשונית, לסוללות זמן פעולה מוגבל. היחס המקובל כיום הוא 1:4, דהיינו יכולת פעולה של 4 שעות בהספק מלא. כפי שיוצג בהמשך, במאפייני התפעול של היחידות הפיקריות, כמות אנרגיה זו מספיקה לרוב ההפעלות של היחידות הפיקריות בארץ.

אורך חיים. סוללות הליתיום כיום מסוגלות לעמוד בכ-5,500 מחזורי טעינה, המייצגים אורך חיים של 15 שנים (לפי הפעלה אחת ביום). משטר ההפעלה של הפיקריות אינו דורש הפעלה יום-יומית – הפיקריות בישראל הופעלו בממוצע כ-50 פעמים בלבד לאורך שנת 2018¹⁶. במשטר הפעלה זה אורך החיים של הסוללות יעמוד על 80-100 שנים (!). אולם אם יחידות האגירה תופעלנה במשטר הממקסם את יתרוניתיהן (ייצוב תדר, שיטוח עקומת העומס השיורי, ועוד), תידרש הפעלה אחת ביום, שתוריד את אורך החיים לערכים המקובלים.

יש לציין כי שוק סוללות הליתיום נמצא בתנופת פיתוח מואצת, והמגבלות הטכנולוגיות שפורטו לעיל – פריקה עצמית, עומק הטעינה, ואורך החיים – מצטמצמות בהתמדה. כך למשל יצרני סוללות מפרטים כרגע אורך חיים של 20-25 שנים, או עומק טעינה עד 95%. עם ההתקדמות הטכנולוגית הפער בין תפעול מערכת אגירה לטורבינה גדל והולך לטובת מערכות האגירה.

2.6 מדיניות "ללא חרטה" (No Regret)

נהוג לשקול צעדי מדיניות בקריטריון "ללא חרטה" – כיצד עליי לפעול כך שגם אם אכשל, לא אתחרט על מעשיי ולא אגרום לבזבוז מיותר של כספי הציבור. עד היום היה נהוג לראות בהקמת יחידות ייצור במשק החשמל פעולה "ללא חרטה": גם אם הוקמו יחידות ייצור מעבר לנדרש, לא נתחרט על כך היות שבמקרה הגרוע הקדמנו השקעה שגם כך היינו נאלצים להשקיע בעוד כמה שנים.

אולם בראייה של עתיד שבו הספקים גדולים יוזרמו למשק ממקורות אנרגיה מתחדשים, וכאשר סוללות תוכלנה לספק את צורכי הגמישות של רשת באמינות גבוהה ובזול, ייתכן שנקים תחנות כוח פוסיליות שיעמדו בעתיד כאבן שאין לה הופכין ויבזבוזו כספי ציבור.

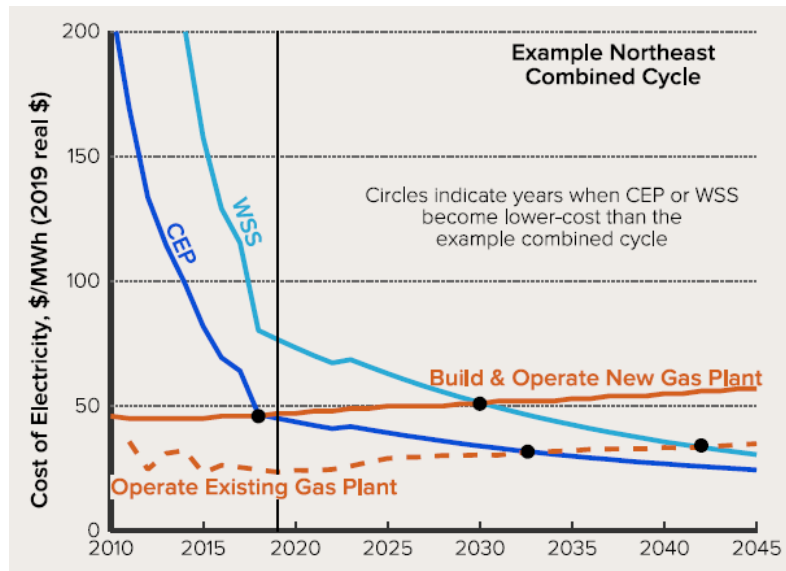
מכון הרי הרוקי (Rocky Mountain Institute) פרסם לאחרונה דוח¹⁷ המראה כי בארה"ב לא כדאי כיום להתקין טורבינות גז (אף לא מחז"מ!) אל מול "חלופת אנרגיה נקייה" הכוללת מתחדשות + התייעלות + ניהול ביקושים + אגירה. ומשנת 2033 תהיה עלות החלופה הנקייה נמוכה אף מעלות

¹⁶ עפ"י דיווחי מנהל המערכת המפורסמים באתר רשות החשמל

¹⁷ The Growing Market for Clean Energy Portfolios, Rocky Mountain Institute (2019)

התפעול של טורבינות הגז, וכך תהיה כדאיות כלכלית להשביט יחידות גזיות קיימות ולהתקין במקומן חלופות נקיות.

יש לציין כי בנייתו של RMI לא הובאו בחשבון העלויות החיצוניות של ייצור חשמל מגז. התחשבות בעלויות אלו הייתה מטה את המאזן אף יותר לכיוון החלופה הנקייה.



תרשים 8: חלופת אנרגיה נקייה (CEP) זולה כיום מהתקנת יחידה גזית חדשה, ומשנת 2033 תהיה זולה אף מעלות התפעול של היחידות הגזיות וכך תהיה עדיפות להשביט יחידות אלו ולהקים חלופות נקיות. מקור: *The Growing Market for Clean Energy Portfolios, 2019*

מסתמן אפוא שהתקנת יחידות גזיות כלשהן כיום יקרה מהחלופה הנקייה, וטומנת בחובה סיכון ממשי שבטווח של עשור הן תושבתנה ללא יכולת להחזיר את עלות ההשקעה.

מכאן שיש לראות בהקמת מערכת אגירה פעולה ללא חרטה – בכל מקרה בעתיד נזדקק לאגירת חשמל בכמויות גדולות. עם זאת ייתכן שנצטער דווקא על הקמת יחידות פיקריות מיותרות.

3 ניתוח כלכלי - החלפת טורבינות פיקריות בסוללות

בעבודה זו נבחנה הכדאיות הכלכלית לשימוש באגירה בסוללות כחלופה להקמה ותפעול של יחידות מחזור פתוח (פיקריות).

מבין השירותים אשר הוצגו לעיל יש כמה שירותים שמסופקים כיום על ידי התחנות הפיקריות:

- גילוח פסגה
- שיטוח עקומת העומס השיורי
- הגדלת נצילות מחז"מים

Error! Reference source not found. שירותים אלה מתומחרים במסגרת הניתוח הכלכלי שבפרק 3.3. השירותים האחרים, אשר אינם מסופקים כיום על ידי הפיקריות, הוערכו ותומחרו בנפרד בפרק 3.5.

בחינת הכדאיות הכלכלית נעשתה בהתייחסות לשני התרחישים האלה:

1. תרחיש שבו הסוללה נטענת בחשמל ממתקני PV ייעודיים שיוקמו לאספקת חשמל זה.
2. תרחיש שבו הסוללה נטענת בחשמל אשר יוצר במחז"מ קיים – כלומר אספקת החשמל הנאגר בסוללות מגיעה מתחנות כוח חלופיות קיימות ברשת, זאת בשעות השפל כשיש עודף קיבולת ייצור במשק.

כל תרחיש נבחן בהשוואה לחלופה הקיימת של הקמה וייצור ביחידות מחזור פתוח (פיקריות).

הבחינה הכלכלית נעשתה בהתייחסות לעלות הייצור המשוקללת (- Levelized Cost of Electricity LCOE) אשר הוערכה על בסיס מתודולוגיה שפורסמה ב-U.S. Energy Information Administration (EIA) (EIA, 2013). הערכת עלות הייצור המשוקללת מתייחסת לפרמטרים האלה:

- עלויות הקמה ותפעול קבוע של התחנות
- עלויות תפעול משתנות ועלויות דלק נצרך בתחנות
- עלות התנעת יחידות מחזור פתוח¹⁹
- עלויות חיצוניות ופליטות מזהמים עקב שריפת דלקים בתחנות

הניתוח נעשה לכל חלופה מנקודת מבט משקית. בהתאם לשיטה המשקית להערכת עלויות ותועלות, נעשה הניתוח בניכוי העברות כלכליות בתוך המשק ובפרט מיסים והיטלים על דלקים, מצד אחד, ותוך כדי הפנמת עלויות חיצוניות מצד אחר.

3.1 הנחות כלליות לצורך הניתוח כלכלי

לצורך הניתוח נעשה שימוש בפרמטרים הכלליים האלה:

טבלה 4: פרמטרים כלליים

מקור	ערך	יח'	פרמטר
המשרד להגני"ס, אגף כלכלה וטכנולוגיה (שיעור היוון חברתי)	3.0%	%	ריבית היוון (%)
עיבוד נתוני בנק ישראל, 2018	3.6	NIS / USD	שער הדולר
	8760	שעות	כמות שעות בשנה

¹⁸ https://www.eia.gov/renewable/workshop/gencosts/pdf/methodology_supplement.pdf

¹⁹ במסגרת ניתוח החלופה של אגירה המושכת חשמל ממחז"מ, כהנחה שמרנית, לא הובאה בחשבון עלות התנעת המחז"מ. זאת בהנחה שהחשמל שיוזן לסוללה הוא חשמל ממחז"מ עובד (על כן מעלה את יעילות המחז"מ). מאחר שניתן להזין לסוללה חשמל מהמחז"מ בכל שלב ביום שבו הסוללה לא פורקת, אם בלילה אין מחז"מ עובד שניתן למשוך ממנו את החשמל, הסוללה תטעין בבוקר.

	365	ימים	מספר ימים בשנה
--	-----	------	----------------

טבלה 5: מחירי דלקים

מקור	2030	2025	2020	יח'	דלק
מחיר לחי"י ממוצע 2018, דוח משק החשמל, רשות החשמל	6.09	6.09	6.09	\$ / MMBTU	גז טבעי
צוות העבודה הבין-משרדי לבחינת חלופות לאורות רבין 4-1	1.11	1.11	1.11		מקדם LHV (גז טבעי)

טבלה 6: הכנסות המדינה מגז טבעי

מקור	ערך	יח'	דלק
צוות העבודה הבין-משרדי לבחינת חלופות לאורות רבין 4-1	35%	%	גז טבעי (שיעור הכנסות המדינה - בלו, היטל)

3.2 המשך הקמת פיקריות

3.2.1 עלויות הון ותפעול קבוע

נתוני עלויות ההון והתפעול הקבוע התבססו על הנתונים שפורסמו במסגרת אסדרה 914. אורך החיים של תחנת מחזור פתוח הוא 30 שנה.

טבלה 7: נתוני עלויות הון ותפעול קבוע מחזור פתוח

מקור	מחזור פתוח	יח'	פרמטר
אסדרה 914	45	\$/KW	עלות תפעול קבועה
צוות העבודה הבין-משרדי לבחינת חלופות לאורות רבין 4-1	71	NIS/KW	עלות קבועה - הולכת גז
אסדרה 914	2,867	NIS/KW	עלות הון (הקמת יחידה)

מעלות הייצור המשוקללת נוכתה הצריכה העצמית של היחידות ואיבודי ההולכה, בהתאם לנתוני רשות החשמל.

טבלה 8: הנחות לגבי יחידות קונבנציונליות

מקור	מחזור פתוח	יח'	פרמטר
צוות העבודה הבין-משרדי לבחינת חלופות לאורות רבין 1-4	1.5%	%	צריכה עצמית
איבודי הולכה למתקנים המחוברים לרשת ההולכה, דוח משק החשמל, רשות החשמל 2018	6%	%	איבודי הולכה

לצורך חישוב עלות הייצור המשוקללת לתחנות כוח פיקריות, הונח כי היחידות יעבדו כ-1,200 שעות בשנה²⁰.

טבלה 9: עלויות הון ותפעול קבוע לקוט"ש מחזור פתוח

מקור	ערך	יח'	פרמטר
עיבוד נתוני אסדרה 914, רשות החשמל	14,627	אג"/KW	עלות הון בפריסה שנתית
	23,287	אג"/KW	עלות תפעול קבוע שנתית
	1,200	KWH/KW	סך שעות ייצור שנתיות
	31.59	אג"/קוט"ש מיוצר	סך עלות הון ותפעול קבוע שנתית לקוט"ש מיוצר
	34.12	אג"/קוט"ש מסופק נטו	סך עלות הון ותפעול קבוע שנתית לקוט"ש מסופק

3.2.2 עלויות ייצור משתנה

עלויות הייצור המשתנה מתייחסות לעלויות דלקים ותפעול משתנה.

עלות הדלקים המשקית התבססה על נתוני מחיר ממוצע לחח"י לשנת 2018 לפי דוח משק החשמל, תוך ניכוי הכנסות המדינה. עלות הייצור המשתנה נטו חושבה בהתייחסות לצריכה העצמית של יחידת מחזור פתוח ונכדו איבודי ההולכה כפי שהוסבר לעיל.

טבלה 10: חישוב עלות ייצור משתנה

מקור	ערך	יח'	פרמטר
עיבוד נתוני מחיר לחח"י ממוצע 2018, דוח משק החשמל, רשות החשמל	53.9	NIS/MWH Fuel	עלות צריכת דלק
	13.15	אג"/קוט"ש מיוצר ברוטו	עלות צריכת דלק לקוט"ש מיוצר
	14.20	אג"/קוט"ש מסופק נטו	עלות צריכת דלק לקוט"ש מסופק
צוות העבודה הבין-משרדי לבחינת חלופות לאורות רבין 1-4	0.90	אג"/קוט"ש מיוצר ברוטו	עלות תפעול משתנה לקוט"ש מיוצר
	0.97	אג"/קוט"ש מסופק נטו	עלות תפעול משתנה לקוט"ש מסופק
	15.17	אג"/קוט"ש מסופק נטו	עלות ייצור משתנה לקוט"ש מסופק

3.2.3 עלויות חיצוניות

העלויות החיצוניות חושבו בעבור המזהמים: CO_2 , SO_2 , NO_x , $PM_{2.5}$, על בסיס נתוני פליטה סגולית ליחידות הייצור שהתקבלו ונתוני עלות משקית של פליטות המזהמים שהתקבלו מהמשרד להגנת הסביבה.

טבלה 11: פליטות סגוליות לקוטי"ש מיוצר במחזור פתוח

מקור	מחזור פתוח	יח'	מזהם
המשרד להגנת הסביבה	0.050	גרי / קוטי"ש מיוצר	SO_2
	0.366	גרי / קוטי"ש מיוצר	NO_x
	0.050	גרי / קוטי"ש מיוצר	$PM_{2.5}$
	498	גרי / קוטי"ש מיוצר	CO_2

טבלה 12: נתוני עלות למזהם

מקור	מ' לטונה	יח'	פרמטר
המשרד להגנת הסביבה	46,260	NIS / tonne	SO_2
	26,791	NIS / tonne	NO_x
	92,623	NIS / tonne	$PM_{2.5}$
	131	NIS / tonne	CO_2

טבלה 13: סך עלות חיצונית למחזור פתוח

מחזור פתוח	יח'	סוג המזהם
0.0023	ש"ח/קוטי"ש מיוצר ברוטו	SO_2
0.0098	ש"ח/קוטי"ש מיוצר ברוטו	NO_x
0.0046	ש"ח/קוטי"ש מיוצר ברוטו	$PM_{2.5}$
0.0652	ש"ח/קוטי"ש מיוצר ברוטו	CO_2
0.082	ש"ח/קוטי"ש מיוצר ברוטו	עלות חיצונית למחזור פתוח
0.083	ש"ח/קוטי"ש מיוצר נטו	עלות חיצונית למחזור פתוח
0.090	ש"ח/קוטי"ש מסופק נטו	עלות חיצונית למחזור פתוח

3.2.4 עלות התנעת יחידת מחזור פתוח

זמן התנעה של יחידת מחזור פתוח הוא קצר יחסית, וכך מתאפשר השימוש בהן כמענה לשיאי ביקוש, שינויים בלתי צפויים, מצבי חירום ועוד. ככל ששיעור הייצור באנרגיות מתחדשות תגבר והתנודתיות במערכת החשמל תגדל, יידרשו יותר התנעות של יחידות מחזור פתוח. מאחר שקשה להעריך את הגידול הצפוי במספר ההתנעות, הניתוח מתייחס למספר ההתנעות כיום – כ-2 התנעות ביום – וזאת כהנחה שמרנית.

עלות ההתנעה במסגרת הניתוח חושבה לפי תעריפי התנעות²¹ של מחזור פתוח המונע בגו טבעי. הונח כי מאחר שמדובר בכ-2 התנעות ביום, ההתנעה הנחסכת היא התנעה קרה (הנעת יחידה לאחר שהייתה מופסקת למשך 3 עד 12 שעות); ייתכן שבעתיד, עם גידול מספר ההתנעות, ייחסכו גם הנעות חמות (הנעת יחידה לאחר שהייתה מופסקת עד 3 שעות).

טבלה 14: חישוב עלות התנעה ליחידת מחזור פתוח מונע גו טבעי

פרמטר	יח'	ערך
מספר התנעות ליום ליחידה	התנעות/יום/יח'	2
מספר התנעות צפוי בשנה	התנעות/שנה	730
עלות התנעה קרה ²²	ש/התנעה	15,592
עלות התנעה קרה בפריסה שנתית	ש/התנעה	795
סה"כ עלות התנעה שנתית	ש	580,695
סה"כ עלות התנעה שנתית	אג' /KW	528
סך שעות ייצור שנתיות	KWH/KW	1,200
סך עלות התנעה שנתית	אג' /קוט"ש מיוצר	0.44
עלות התנעה שנתית לקוט"ש מסופק	אג' /קוט"ש מסופק נטו	0.50

3.2.5 סיכום עלות ייצור משוקללת לתחנה "פיקרית"

טבלה 15: טבלת סיכום עלות ייצור משוקללת במחזור פתוח

פרמטר	יח'	ערך
עלות ייצור משתנה	אג' /קוט"ש מסופק נטו	15.17
עלות הון ותפעול קבוע שנתית	אג' /קוט"ש מסופק נטו	34.12
עלות חיזונית למחזור פתוח	אג' /קוט"ש מסופק נטו	8.98
עלות התנעה למחזור פתוח	אג' /קוט"ש מסופק נטו	0.50
עלות ייצור מחזור פתוח עם עלות חיזונית	אג' /קוט"ש	58.78

3.3 בחינת חלופות להקמת פיקריות

3.3.1 תרחיש א' – שימוש בסוללות הנטענות מחשמל שיוצר ב-PV

בתרחיש זה הונח כי החשמל שנאגר בסוללות הוא חשמל שיוצר במתקני PV ייעודיים שהוקמו לצורך אספקת החשמל לסוללות.

²¹ לוח תעריף 3-6.5:

²² עלות ההתנעה הקרה חושבה לפי נוסחת התעריף המצוינת בלוח תעריף 3-6.5, תוך כדי שימוש בערכים המצוינים במסמך זה לפרמטרים המשמשים לרכיבים אחרים של הניתוח הכלכלי (מחיר הגו הטבעי, שער חליפין וכו'). לצורך הניתוח הונח כי גודל היחידה הממוצע הוא MW 110 בהתאם לאסדרה 914 וכי מספר השנים מהקמת המתקן הן 15 – אמצע אורך חיי המתקן.

במסגרת הניתוח נעשתה הערכה של עלות ההון של הסוללות והערכה של עלות משיכת החשמל אשר יוצר מ-PV.

3.3.1.1 עלויות הון אגירה

כצעד ראשון חושבה עלות הייצור המשוקללת של חשמל שיסופק מהסוללות, בהתייחסות לעלויות ההון של הסוללות.

טבלה 16: עלויות אגירה מקומית

2030	2025	2020	י"ח	עלויות אגירה מקומית
168	213	319	\$ / KWh	עלות אגירה מקומית (סוללה) ²³

לצורך הניתוח חושבה עלות ההון האפקטיבית של הסוללות, אשר מביאה בחשבון שיעור דגדציה שנתי בהספק הסוללה של כ-0.5%, כלומר, בכל שנה סך ההספק האפקטיבי של הסוללה יורד בכ-0.5%.

כפי שהוצג בפרק 2.2, מערכות האגירה המקובלות מספקות 4 שעות עבודה בהספק מלא. סוללות הליתיום כיום מסוגלות לעמוד בכ-5,500 מחזורי טעינה, המייצגים אורך חיים של כ-15 שנים (משטר הפעלה של פעם ביום). כמו כן לצורך הניתוח נלקחה נצילות ה-Round-trip של הסוללות, אשר נאמדת ב-85%. המשמעות היא שיש 15% של איבוד אנרגיה בין הטעינה של הסוללות לפריקתן. בעקבות זאת שעות העבודה השנתיות האפקטיביות יעמדו על כ-1,240 שעות בשנה, או קוט"ש אפקטיביים לכל קילו-ואט אגירה מותקן.

נוסף על כך, בחישוב עלות ההון האפקטיבית של הסוללה, הונח כי יכולת העבודה האפקטיבית של הסוללה היא 80% מכמות האנרגיה הנקובה. הנחה זו נובעת, כפי שהוזכר בפרק 7, מהעובדה כי נהוג לפרוק את הסוללות עד כדי 80% - כלומר להותיר 20% מהאנרגיה בסוללה.

טבלה 17: סיכום הנחות מאפייני סוללה

מאפיינים של אגירה מקומית			
NREL,2019	4.0	KWH/KW	מספר שעות אגירה דרושות
	15	שנים	אורך חיים של סוללה נורמטיבית
	85%	%	נצילות Round-trip של סוללה
	80%	%	יכולת העבודה האפקטיבית של סוללה

טבלה 18: עלות ההון האפקטיבית לסוללות

²³ (משרד האנרגיה, 2020)



מקור	2030	2025	2020	יח'	פרמטר
משרד האנרגיה	872	1,105	1,655	\$/KW	עלות אגירה מקומית
	73	93	139	\$/KW/yr	עלות אגירה מקומית בפריסה שנתית
	1,241	1,241	1,241	KWH/KW	סך שעות הפעלה שנתיות לסוללה
	21	27	40	אג' לקוט"ש	סך עלות ייצור משוקללת סוללות

3.3.1.2 עלויות ייצור PV

בעבור משיכת החשמל ממתקני PV נעשה שימוש בתחזית עלות מערכת PV שהתקבלה ממשרד האנרגיה. העלות שנבחרה כעלות מייצגת היא עלות מתקנים מסחריים גדולים, בהנחה שחלק מהמתקנים שיקומו צפויים להיות יקרים יותר מאחר שהם יוקמו על גגות קטנים, וחלק מהמתקנים יהיו זולים יותר כי הם יהיו מתקנים קרקעיים גדולים. היות שמדובר במתקנים שנועדו להחליף תחנות פיקריות, סביר שבשנים הראשונות יהיו אלה דווקא מתקנים גדולים, עקב האתגר שבניהול מספר רב של מתקנים מבוזרים, ועל כן מדובר בהנחה שמרנית. כמו כן הונח כי עלות תפעול מתקני PV היא כ-1.5% מעלות המתקן, בהתאם להנחות משרד האנרגיה.

נוסף על כך, מעלות הייצור לקוט"ש שיוצר ב-PV נוכו איבודי הולכה של 1.7%, זאת על בסיס הנחות רשות החשמל לאיבודי הולכה ממתקני PV, כפי שמפורסם בדוח מצב משק החשמל לשנת 2018²⁴.

טבלה 19: עלות ייצור משוקללת מ-PV

2030	2025	2020	יח'	פרמטר
45	50	60	\$/KW/yr	עלות הון PV בפריסה שנתית
12	13	16	\$/KW/yr	עלות תפעול קבוע PV
57	63	76	\$/KW/yr	סך עלויות PV בפריסה שנתית
11.7	13.1	15.6	אג' קוט"ש מיוצר	סך עלות ייצור משוקללת PV
11.9	13.3	15.9	אג' קוט"ש מסופק	סך עלות ייצור משוקללת PV

ניתן לראות בטבלה הבאה את סך העלות לאגירה בסוללות המושכות חשמל ממתקני PV ייעודיים:

טבלה 20: סך עלות אגירה בסוללות המושכות חשמל מ-PV

2030	2025	2020	יח'	פרמטר
33.06	40.11	56.04	אג' לקוט"ש	סך עלות אגירה בסוללות המושכות חשמל מ-PV

²⁴ רשות החשמל, 2019: https://pua.gov.il/Publications/PressReleases/Pages/doch_mashek_2018.aspx

3.3.2 תרחיש ב' – שימוש בסוללות המוזנות מחשמל שיוצר במחז"מ

בתרחיש זה הונח כי במקום אספקת החשמל בפיקריות ייעשה שימוש בסוללות שנטענות מחשמל שיוצר בהספק הקונבנציונלי הקיים החלופי – תחנות כוח מסוג מחז"מ.

3.3.2.1 עלויות הון אגירה

בדומה לתרחיש א' גם כאן חושבה עלות האגירה בהתייחסות לעלות ההון האפקטיבית של הסוללות.

טבלה 21: עלות ההון האפקטיבית לסוללות

2030	2025	2020	יח'	פרמטר
872	1,105	1,655	\$/KWh	עלות אגירה מקומית
73	93	139	\$/KW/yr	עלות אגירה מקומית בפריסה שנתית
1,241	1,241	1,241	KWH/KW	סך שעות הפעלה שנתיות לסוללה
21	27	40	אג' קוט"ש	סך עלות ייצור משוקללת סוללות

3.3.2.2 עלויות ייצור משתנה מחז"מ

עלות הייצור המשתנה במחז"מ חושבה באופן דומה לעלות הייצור המשתנה של מחזור פתוח, בהתייחסות לעלות הדלקים ועלות התפעול המשתנה. עלויות אלו התייחסו למאפיינים של מחז"מ לרבות עלות התפעול המשתנה והצריכה העצמית:

טבלה 22: מאפייני יחידת מחז"מ

מקור	מחז"מ F	יח'	פרמטר
צוות העבודה הבין-משרדי	2.2	\$/MWh	עלות תפעול משתנה
לבחינת חלופות לאורות רבין 1-4	2.5%	%	צריכה עצמית

כניסת הסוללות אל מערך הייצור תורמת ליישור עקומת העומס השיוירי. טורבינות גז, ובפרט מחז"מ, לא מתפקדות היטב במשטר הפעלה הכולל שינויי הספק תכופים. בעקבות כניסת הסוללות ויישור עקומת העומס השיוירי, מתאפשר שיפור בנצילות תחנות הכוח מסוג מחז"מ.

במסגרת הניתוח חושבה אפוא נצילות המייצגת מעבר מעומס מינימלי לעומס של 60%. מאחר שהסוללה מושכת חשמל שיוצר בנצילות גבוהה מהנצילות שהיחידה עובדת בה, הפער מייצג את שיפור הנצילות ביתר היחידה. כלומר נצילות זאת מייצגת את המעבר המשוקלל של כלל היחידה לעבודה בנצילות גבוהה יותר. לבסוף חושבה עלות הייצור לקוט"ש מסופק, קרי נוכח איבודי ההולכה של 6%, בהתאם להנחות רשות החשמל.

טבלה 23: נתוני נצילות מחז"מ לפי עומס

מקור	מחז"מ F	נצילות לפי שיעור עומס (רשות החשמל)
רשות	44%	40%
החשמל	49%	50%

	50%	60%
	53%	70%
	54%	80%
	55%	90%
	56%	100%

טבלה 24: חישוב נצילות מייצגת מחז"מ במעבר מעומס מינימלי לעומס גבוה

פרמטר	יח'	עומס	נצילות (%)
עומס מינימלי מחז"מ F	%	40%	44%
עומס גבוה מחז"מ F	%	60%	50%
נצילות מייצגת מעבר לעומס גבוה	%	54%	

טבלה 25: חישוב עלות ייצור משתנה למחז"מ

פרמטר	יח'	ערך
עלות צריכת דלק	NIS/MWH Fuel	53.9
עלות צריכת דלק	א"ג/קוט"ש מיוצר ברוטו	9.98
עלות צריכת דלק	א"ג/קוט"ש מסופק נטו	10.89
עלות תפעול משתנה	א"ג/קוט"ש מיוצר	0.79
עלות תפעול משתנה	א"ג/קוט"ש מסופק נטו	0.86
עלות ייצור משתנה מחז"מ ללא עלות חיצונית	א"ג/קוט"ש מסופק נטו	11.76

3.3.2.3 עלויות חיצוניות

העלויות החיצוניות למחז"מ חושבו באופן זהה לעלויות החיצוניות מתחנות מחזור פתוח, תוך התייחסות לנתוני הפליטה הסגולית של יחידת מחז"מ F אשר התקבלו מהמשרד להגנת הסביבה.

טבלה 26: פליטות סגוליות לקוט"ש מיוצר מחז"מ

מזהם	יח'	מחזור פתוח	מקור
SO ₂	גר' / קוט"ש מיוצר	0.004	המשרד להגנת הסביבה
NO _x	גר' / קוט"ש מיוצר	0.140	המשרד להגנת הסביבה
PM _{2.5}	גר' / קוט"ש מיוצר	0.020	המשרד להגנת הסביבה
CO ₂	גר' / קוט"ש מיוצר	358	המשרד להגנת הסביבה

טבלה 27: חישוב עלויות חיצוניות למחזור פתוח

סוג מזהם	יח'	מחז"מ
SO ₂	ש"ח/קוט"ש מיוצר ברוטו	0.0002

0.0038	ש"ח/קוט"ש מיוצר ברוטו	NOx
0.0019	ש"ח/קוט"ש מיוצר ברוטו	PM2.5
0.0469	ש"ח/קוט"ש מיוצר ברוטו	CO2
0.053	ש"ח/קוט"ש מיוצר ברוטו	עלות חיצונית למחז"מ
0.054	ש"ח/קוט"ש מיוצר נטו	עלות חיצונית למחז"מ
0.059	ש"ח/קוט"ש מסופק נטו	עלות חיצונית למחז"מ

מטר	יחידות	ערך
יות חיצוניות מחז"מ	א"ג/קוט"ש מסופק נטו	5.89
ת ייצור משתנה מחז"מ עם עלויות חיצוניות	א"ג/קוט"ש מסופק נטו	17.65

לסיכום ניתן לראות בטבלה מטה את העלות המשוקללת לאגירה בסוללות המוזנות ממחז"מ:

טבלה 28: סיכום עלות משוקללת לאגירה בסוללות המוזנות ממחז"מ

מטר	ערך	2020	2025	2030
עלות אגירה בסוללות המוזנות ממחז"מ	אג' לקוט"ש	58	44	39

3.3.2.4 טיפול בתנדטיות התפוקה הסולרית וייצוב תדר בתנאי מזג אוויר משתנים, סוללות יתרמו ליישור עקומת העומס השיורי בעקבות התנדודות בתפוקה הסולארית ועקב כך יצמצמו את דרישות העתודה הסובבת. נוסף על כך יכולת הסוללה להיכנס לפעולה בתוך שניות מאפשרת לה להגיב לאירועי תדר ולצמצם עוד את הדרישות לגבי עתודה סובבת. מהירות התגובה הנדרשת באירוע תדר היא שניות ספורות לכל היותר – יתרון בולט של סוללות לעומת היחידות הפועלות בגז.

במפת הדרכים למקטע הייצור מציינת רשות החשמל כי כבר במחירים של היום, עלות KW סוללות זמין של תגובה לתדר, עומדת על כ-386 אג' לעומת 433 אג' ל-KW של עתודה סובבת. כלומר לסוללות יש עדיפות כלכלית לעומת עתודה סובבת כיוון, שהתגובה המהירה שלהן מונעת מהתדר להידרדר למצבי קיצון.²⁵

בעדכון השנתי לתעריף החשמל מפורטים תעריפי ניהול המערכת, כלומר העלויות המוכרות של השירותים המערכתיים לרבות השירותים לאיזון המערכת. לפי העדכון השנתי לתעריף החשמל לשנת 2019, עתודה סובבת של כ-600 MW מוערכת ב-205 מיליון ₪ לשנה זו.²⁶ מהם כ-53 מיליון ₪ לדלקים

²⁵מפת הדרכים לתכנון מקטע הייצור במשק החשמל 2018-2030:

<https://pua.gov.il/publications/pressreleases/documents/%D7%9E%D7%A4%D7%AA%20%D7%93%D7%A8%D7%9B%D7%99%D7%9D%20%D7%9C%D7%AA%D7%9B%D7%A0%D7%95%D7%9F%20%D7%9E%D7%A7%D7%98%D7%A2%20%D7%94%D7%99%D7%A6%D7%95%D7%A8%20%D7%91%D7%9E%D7%A9%D7%A7%20%D7%94%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C%202018-2030.pdf>

²⁶https://pua.gov.il/decisions/documents/1317_7_553_24_12_!8.pdf

והיתרה להון ותפעול קבוע. הונח כי עלות העתודה הסובבת שתיחסך היא רק עלות הדלקים, שכן עלות ההון הנחסכת כבר הובאה בחשבון. בניכוי שיעור הכנסות המדינה (בהנחה השמרנית שמדובר בגז טבעי), העלות המשקית של דלקים אלה נאמדת בכ-35 מיליון ₪ בשנה.

במסגרת הניתוח הונח כי כמחצית מכמות העתודה הסובבת הנדרשת – כ-300 MW - צפויה להיות מסופקת על ידי מתקני אגירה שאובה מתוכננים, ועל כן עלות הדלקים שתיוותר לאחר הקמת האגירה השאובה מוערכת ב-17 מיליון ₪ לעתודה סובבת קונבנציונלית של 300 MW.

סוללות אגירה יכולות להחליף את העתודה הסובבת הנדרשת ביחס של 1:1 ולחסוך את עלות הדלקים שנותרה. עלות נחסכת זו שווה לכמעט 5 אגורות לקוט"ש ל-300 ה-MW הראשונים של סוללות האגירה שיוקמו:

טבלה 29: חישוב עלות עתודה סובבת לקוט"ש

פרמטר	יח'	ערך
כמות עתודה סובבת נדרשת במשק	MW	600
סה"כ עלות שנתית לעתודה סובבת	מיליוני ש"ח	34.45
סך השתתפות בעתודה סובבת	%	50%
הספק נחסך לטובת עתודה סובבת	MW	300
עלות עתודה סובבת נחסכת מאגירה	מיליוני ש"ח	17.23
עלות עתודה סובבת ל-MW מותקן	NIS / MW	57,417
עלות עתודה סובבת ל-MW מותקן	אג"/קוט"ש	4.63

3.3.3 עלויות הון ותפעול קבוע - לצורך השוואה בלבד.

לצורך ההשוואה בין עלות אגירה בסוללות לבין עלות המשקית מהקמה ותפעול של מחז"ם, חושבה גם עלות ההון והתפעול הקבוע – אשר לא נכללה בתרחיש הנ"ל המניח כי הסוללות מוזנות מחז"מים הקיימים ברשת.

נתוני עלויות ההון והתפעול הקבוע התבססו על הנתונים שפורסמו במסגרת אסדרה 914. אורך החיים של תחנת מחז"ם הוא 30 שנה. הונח כי תיחסך הקמת מחז"ם מסוג H.

טבלה 30: נתוני עלויות הון ותפעול קבוע מחזור פתוח

פרמטר	יח'	מחזור פתוח	מקור
עלות תפעול קבועה	\$/KW	25.9	אסדרה 914
עלות קבועה - הולכת גז	NIS/KW	71	צוות העבודה הבין-משרדי לבחינת חלופות לאורות רבין 1-4
עלות הון (הקמת יחידה)	NIS/KW	4,230	אסדרה 914

טבלה 31: עלויות הון ותפעול קבוע לקוט"ש מחזור פתוח

מקור	ערך	יח'	פרמטר
עיבוד נתוני אסדרה רשות, 914 החשמל	21,579	אג"ק/KW	עלות הון בפריסה שנתית
	16,416	אג"ק/KW	עלות תפעול קבוע שנתית
	1,241	KWH/KW	סך שעות ייצור שנתיות
	30.62	אג"ק/קוט"ש מיוצר	סך עלות הון ותפעול קבוע שנתית לקוט"ש מיוצר
	33.41	אג"ק/קוט"ש מסופק נטו	סך עלות הון ותפעול קבוע שנתית לקוט"ש מסופק

3.4 סיכום ומסקנות - הניתוח הכלכלי

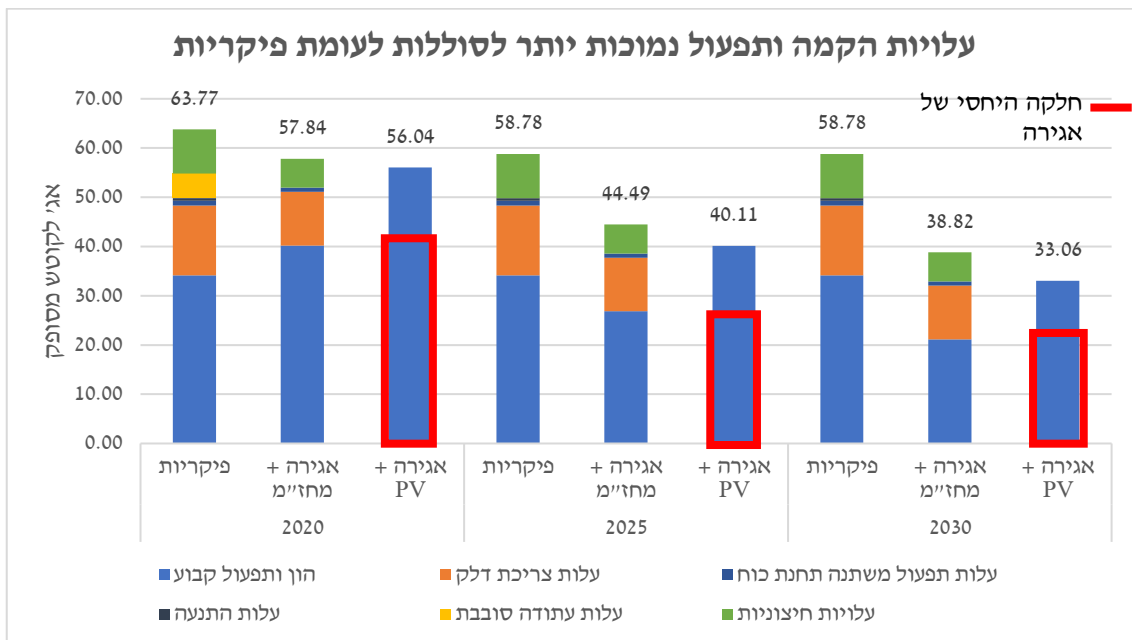
ניתן לראות מתוצאות הניתוח, שהספק של 4 שעות אגירה (בהספק מלא) בשילוב מתקן סולארי ייעודי להטענה שלו, כבר כיום כדאי כלכלית יותר מהקמה והפעלה של תחנת כוח פיקרית. קביעה זו נכונה גם אם הסוללות ייטענו על ידי תחנות כוח מחז"מיות יעילות הפועלות על גז טבעי בשעות השפל, שבהן יש עודף כושר ייצור במשק. זאת כאשר רשות החשמל מתכננת להקים בתקופה של 2025-2030 כ-40% מסך תוספת ההספק הקונבנציונלי הנדרש לקום עד 2030:

טבלה 32: סיכום עלות לקוט"ש מסופק לכל חלופה

פרמטר	יח'	2020	2025	2030
עלות ייצור משוקללת מחזור פתוח	אג"ק/קוט"ש	63.77	58.78	58.78
עלות ייצור משוקללת תרחיש א' - סוללות בתוספת PV ייעודי	אג"ק/קוט"ש	56.04	40.11	33.06
עלות ייצור משוקללת תרחיש ב' - סוללות המוזנות ממחז"מ	אג"ק/קוט"ש	57.84	44.49	38.82

ניתן לראות כי עיקר התועלות הן מחיסכון בעלויות ההון, תפעול קבוע ודלק ביח' הקונבנציונליות:

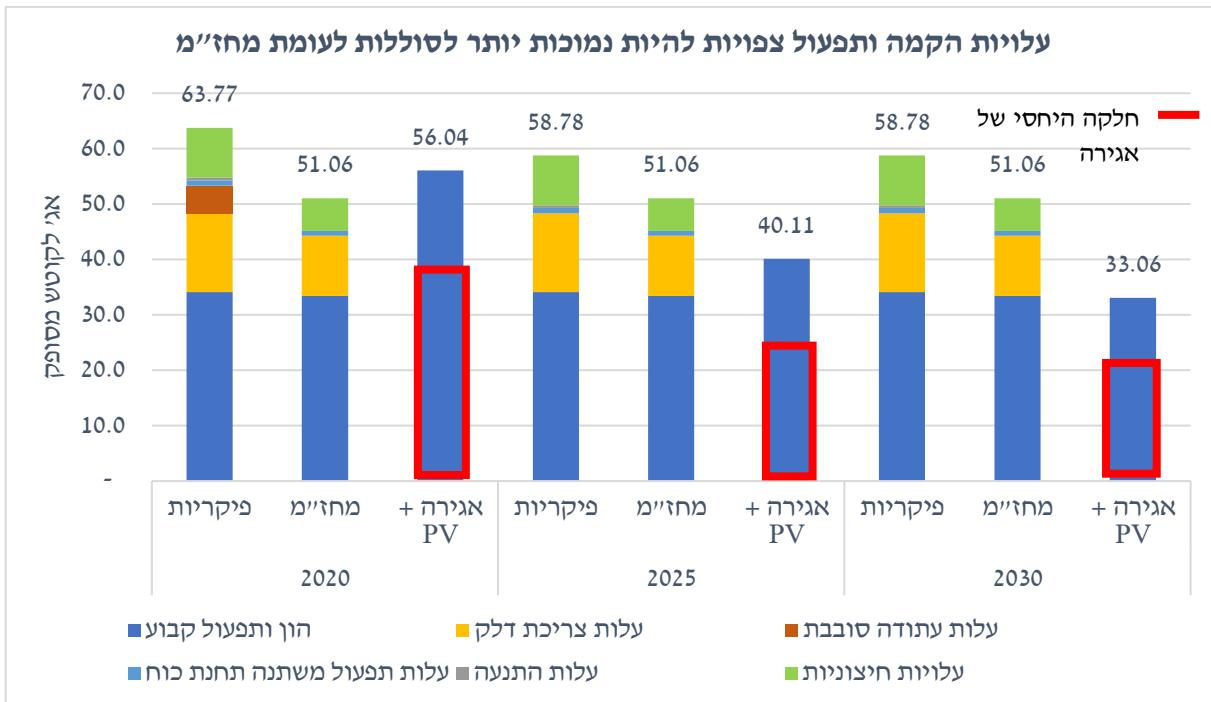
תרשים 9: עלויות הקמה ותפעול נמוכות יותר לסוללות לעומת פיקריות²⁷



יתרה מכך, בהתייחסות לעלות הייצור המשוקללת, ב-2025 העלות המשקית להקים ולתפעל סוללות המוזנות ממתקני PV תהיה נמוכה יותר בכ-11 אג' לקוט"ש מהעלות הקמה ותפעול של מחז"מ.

תרשים 10: השוואת עלויות תפעול והקמה

²⁷ עלות עתודה סובבת מתייחסת לעלויות דלקים בלבד של עתודה סובבת קונבנציונלית. עלות זו צפויה להיחסך בזכות הקמת סוללות אגירה. למען קלות ההצגה וההשוואה, מאחר שמוצגת השוואה בין עלויות החלופות השונות, עלות העתודה הסובבת מוצגת כעלות של חלופת הפיקריות, ולא כתועלת של חלופות האגירה. יצוין עוד כי עלות זו מושתתת רק על עלויות 2020, היות שעלויות אלו ייחסכו על ידי הסוללות הראשונות שיוקמו בלבד.



יש לציין שנוסף על תועלות שתומחרו מעלה, יש תועלות נוספות המפורטות בפרק 3.5 ומראות כי לאגירה בסוללות כדאיות כלכלית גדולה אף יותר.

בהתאם לכך, ביטול הקמתן של הפיקריות המתוכננות והחלפתן בחלופה הזולה ביותר – בהתאם לשנתן הקמתן - תביא לידי תועלת משקית מהוונת של כ-9,087 מיליון ₪.

התועלת המשקית המהוונת שנגזרת מכך בעבור כל החלפת יחידת פיקר סטנדרטית של כ-110 MW בסוללות, בתוספת PV ייעודי, נעה בין 250 ל-420 מיליון ₪. החלפת אותה היחידה בסוללות המוונות ממחז"מ תביא לידי תועלת משקית מהוונת של כ-221-325 מיליון ₪:

טבלה 33: תועלת מהוונת מהחלפת יחידה סטנדרטית

2030	2025	2020	יח'	פרמטר
419	304	250	מיליון ₪	תועלת מהוונת מחלופת סוללות בתוספת PV ייעודי
325	233	221	מיליון ₪	תועלת מהוונת מחלופת סוללות המוונות ממחז"מ

התועלת הישירה למשק החשמל²⁸ נאמדת ב-300 מיליון ₪ ב-2025 וב-900 מיליון ₪ ב-2030, הצפויה לחסוך כ-0.4 אג' לקוט"ש נצרך ב-2025 וכ-1 אג' לקוט"ש נצרך ב-2030, קרי הפחתה של כ-1% בתעריף החשמל ב-2025 וכ-2.5% ב-2030²⁹.

3.5 תועלות כלכליות נוספות שלא תומחרו

3.5.1 ייצוב מתח ותיקון מקדם הספק

חריגות במתח עלולות להיווצר ברשת החלוקה כאשר מערכות PV המחוברות לאורך קו החלוקה מעלות את מתח הרשת לאורך הקו. סוללות, בסיוע ממירים חכמים, מסוגלות להזריק או לספוג הספק ריאקטיבי אל הרשת וממנה כדי לשמור על המתח בטווח המותר ולשלוט במקדם ההספק. כיום, ייצוב המתח ושליטה במקדם ההספק מתאפיינים בעיקר בהוספת קבלים ובשימוש בבנק קבלים. שימוש בסוללות לצורך ייצוב המתח ותיקון מקדם ההספק מייתרים את התקנתם.

3.5.2 הפחתת עומס ברשת ההולכה

אגירת עודפי החשמל הסולארי בסוללות לפני כניסה לשנאי או לקו הולכה עמוס ופריקה בשלב מאוחר יותר, כאשר מערכת ההולכה מאפשרת זאת, מביאה לידי הפחתה בעומס על הרשתות. במקרים מסוימים ההפחתה בעומס על הקווים מאפשרת לדחות את שדרוג הרשתות. במקרים אחרים הפחתת העומס מאפשרת להקים מערכות סולאריות, שהקמתן ללא אגירה הייתה עוברת את מגבלות היכולת של מערכת ההולכה, וכך לייעל את השימוש בתשתיות הקיימות. לפי הדוח התקופתי של חברת החשמל לשנת 2018, בין השנים 2019-2023 צפויה השקעה של כ-7.5 מיליארד ₪ בפיתוח רשת ההולכה³⁰. דחיית שדרוג הרשתות וייעול השימוש בתשתית הקיימת בזכות מתקני האגירה יכולה לחסוך חלק מהשקעה משמעותית זו.

4 מסקנות והמלצות

על פי הניתוח שנעשה לעיל לסוללות אגירה יתרונות רבים: מחירן נמוך מטורבינות גז, פליטת המזהמים נמוכה (אם בכלל), והן מאפשרות לספק שורה של שירותים נלווים באופן מיטבי וכך מפחיתות את העלות הכוללת של תפעול הרשת. הקמת טורבינות פיקריות בתנאים אלה היא יקרה, בזבזנית בצריכת האנרגיה ומזהמת - הן בפליטות מזהמי אוויר, הן בפליטות גזי חממה. כמו כן

²⁸ בניגוד לניתוח המשקי המוצג בדוח זה, הניתוח לתועלת ישירה למשק החשמל אינו מנכה את הכנסות המדינה מתמלוגי הגז, שכן הם מגולמים בעלויות למשק החשמל, וכמו כן אינו מביא בחשבון עלויות הייצוא.

²⁹ בהתייחסות לתעריף החשמל הנוכחי כפי שמפורסם על ידי חברת החשמל. תחזית צריכת החשמל התבססה על תרחיש מדיניות מיושמת שגובש במסגרת המערך הלאומי למעקב ודיווח אחר פליטות גזי חממה, בהנחת גידול של כ-2.7% בצריכה השנתית, לפי הנחות רשות החשמל.

³⁰ דוח תקופתי לשנת 2018, חברת החשמל לישראל:

https://www.iec.co.il/investors/DocLib1/meshulav1218_nagish.pdf

ההיבטים הסביבתיים השליליים של הטורבינות מעוררים התנגדות ציבורית עזה לתחנות כוח הסמוכות למקומות מגורים, ומתחייבת היערכות של גורמי התכנון והממשלה בהתאם.

נוסף על האמור לעיל, הקמת טורבינות פיקריות כיום וקיומן כ"הון שקוע" למשך שלושת העשורים הבאים תקבע את התלות של ישראל בתשתיות מבוססות דלקים פוסיליים ותקשה בעתיד על המעבר לכלכלה דלת פחמן, כמתחייב מהתהליכים העולמיים למאבק בשינויי אקלים. אפשרות אחרת תהיה לנטוש את היחידות הללו בעוד 10-15 שנים לטובת מערכות אגירה יעילות וזולות, ולהותיר את עלות הקמתן כנטל מיותר על ציבור צרכני החשמל.

בסיכום הממצאים ניתן לומר בוודאות כי כבר כיום יש עדיפות בכל התחומים לסוללות אגירה על פני טורבינת גז פיקרית: הסוללות זולות יותר, בעלות השפעה סביבתית נמוכה, גמישות יותר בהפעלה, בהיבטים התכנוניים ובזמן ההקמה, ומסוגלות לספק שירותים נוספים לרשת ללא תוספת עלות. היות שטכנולוגיית הסוללות מוסיפה להשתפר במהירות, אפשר להניח כי עד למועד הקמת הפרויקט יודגשו היתרונות של מערכות האגירה על טורבינה פיקרית אף יותר.

עקב יתרונותיהן הרבים של סוללות האגירה והשירותים שהן מסוגלות לספק לרשת החשמל, עליהן להוות נדבך מרכזי בתכנון משק החשמל העתידי בישראל. יש לתמוך את השירותים השונים הניתנים על ידי הסוללות ולאפשר להן להתחרות במכרזים להשגת העלות הנמוכה ביותר.

לאור זאת המלצותינו הן כדלקמן:

1. **לעצור את ההליכים התכנוניים של טורבינות הגז הפיקריות** [לפחות לשלוש השנים הבאות], לזמן שיספיק להקמת מערכות אגירה ובחינת התועלות שהן מספקות לרשת. בזמן זה תמשיך המדינה באיתור השטחים הדרושים. אם לאחר תקופה זו יחליטו בכל זאת להמשיך ולבנות טורבינות גז פיקריות, יתאפשר המשך תהליכי התכנון.
2. **לקדם במהירות את אסדרת מערכות PV עם אגירה.**
3. יש לעדכן את האסדרה **ולאפשר ליזמים לספק חשמל בהתאם לדרישות מנהל המערכת לייצוב תדר ול"גילוח הפסגה"**, וזאת תמורת תעריף הדומה לתעריף היחידות הפיקריות, ובכלל זה תעריף זמינות והשתתפות בעתודה סובבת.
4. כמו כן יש להציג **במהירות האפשרית אסדרה למערכת אגירה הצמודה ליחידות ייצור מחז"מ**, שתאפשר לקלוט את עודפי הייצור בשעות העומס השיורי הנמוך, למתן את התנודתיות בתפעול הטורבינות, ולספק אנרגיה בשעות השיא.
5. לאחר הפעלת מערכות האגירה למשך שנה לפחות, יש לעשות הערכה מחדש של האפשרות להחליף את היחידות הפיקריות המתוכננות באגירה – בצמוד למערכת PV או למחז"מ – ובהתאם לממצאי ההערכה לבטל כליל את הליכי תכנון היחידות הפיקריות, או מנגד להמשיך בהקמתן.
6. יש לבחון בעבור כל אחד משירותי המערכת הנדרשים את החלופות הטובות ביותר בראייה כלכלית-סביבתית ככל שיפותחו חלופות נוספות.

אין חשש כי במשך התקופה האמורה ייוותר המשק ללא יכולת מספקת בשעות השיא, היות שכיום יש עודף יכולת ייצור בהיקף של 32%, הרבה מעבר לקריטריון הרזרבה של 20% שקבע שר הארגיה. על



כן היכולת המותקנת כיום תוכל לספק את צורכי המשק בשנים הבאות, זמן שיידרש כדי להקים מתקני אגירת אנרגיה.

4.1 נספח א' – תועלות דינמיות ותועלות נוספות משילוב אגירה שאובה

להלן הפרק "תועלות דינמיות ותועלות נוספות משילוב אגירה שאובה במערכת" מדוח תפ"ט.

5. תועלות דינמיות ותועלות נוספות משילוב אגירה שאובה במערכת

משק החשמל מהווה מערכת הנדסית מורכבת מאוד, שבה חייב להישמר באופן רציף המאזן בין הייצור והצריכה על מנת לשמור על תדר ויציבות המערכת. לצורך זה נדרש למצוא מענה הולם למספר סוגיות מורכבות הקשורות לבקרה ותפעול של המערכת אשר נפרסות לפרקי זמן שונים, החל ממיקרו שניות ועד מספר שעות ואפילו ימים.

בטווח זמן הקצר מאוד, בעיית יציבות המערכת מטופלת באמצעות התגובה הראשונית של המערכת ובקרת עומס-תדר.

בטווח הביניים מתבצעות פעולות הרגולציה והעמסת היחידות (Dispatch) במטרה לשמור על האיזון בין ההיצע והביקוש ועל תדירות המערכת.

בטווח הארוך יותר, האתגר הוא להבטיח קיום משאבי ייצור בהיקף הנדרש להתמודדות עם אי וודאות הטמונה בהשתנות הצריכה על ציר הזמן ועם הטבע האקראי של תקלות ביחידות הייצור, או, במקרה של אנרגיות מתחדשות, גם עם הזמינות האקראית של מקור האנרגיה עצמו.

תגובה אינרציאלית

תגובה זו מסופקת על ידי המסה המסתובבת בגנרטורים, אשר בולמת את ירידת התדר במערכת ברגע ההתחלתי לאחר קרות האירוע.

בקרה ראשונית: בקרה אוטומטית מקומית (ביחידה עצמה) המשנה הספק כנגד כל שינוי בתדר;

בקרה משנית: בקרה אוטומטית מרכזית (הנשלטת ע"י מנהל המערכת) המספקת שינוי נוסף של הספק על מנת להחזיר את התדירות ליעדה.

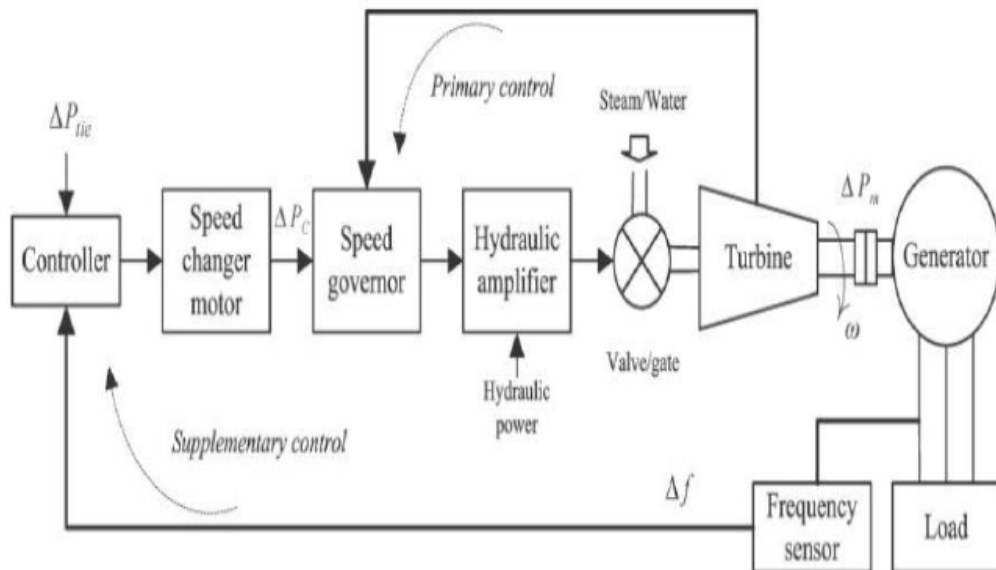
באזור 5.1 ניתן לראות את התיאור הסכמתי של גנרטור סינכרוני עם יכולת בקרת תדר ראשונית ומשנית.

המשרד להגנת הסביבה



الوزارة لحماية البيئة
Israel Ministry of Environmental Protection

איור 5.1: מנגנון בקרת תדר



תגובת ה"Governor", בקרה ראשונית

היות והתדר ברשת החשמל הינו יחסי למהירות הסיבוב של הגנרטורים, הבעיה של בקרת התדר עשויה להיות מתורגמת ישירות לבעיה של בקרת מהירות הגנרטור. תגובת היחידות בשניות הראשונות לאחר קרות האירוע, נוצרת באמצעות פעולת מנגנון הבקרה הראשונית (Primary Control). ביחידות הקיטוריות, לדוגמא, ה"Speed Governor", בתגובה לשינוי מהירות הרוטור של הגנרטור, משנה את הזרמת הקיטור לטורבינה על מנת לבלום את שינוי התדר במערכת, כפי שמתואר באיור 5.1.

בקרה משנית

בנוסף לבקרת התדר הראשונית, גנרטורים סינכרוניים גדולים מצוידים גם במנגנון של בקרת תדר משנית (Secondary or Supplementary Control), כפי שמתואר באיור 5.1. הבקרה המשנית יוצרת משוב המתרגם באמצעות בקר דינמי (Controller) את סטית התדר לאות בקרה (ΔPC) המשמש, בנוסף לבקרה הראשונית, להחזרת התדר לערך הנדרש.

בקרת חירום: כשפעולת הבקרה המשנית אינה מספיקה לייצוב התדר, מתקיימת התערבות של מפעיל המערכת לצורך הכנסת שינויים בהעמסת היחידות (Dispatch) והקצאת היחידות לתפעול (Unit Commitment) על מנת להחזיר את העתודות הנדרשות לפעולה תקינה של הבקרה המשנית. גם צד הביקוש משתתף בתהליך בקרת התדר באמצעות מנגנון השלת חלק מעומסים במקרה של סטיות תדר

משמעותיות. כמובן, צד הביקוש תורם באופן טבעי לבקרת התדר בגלל הרגישות של חלק מהעומסים, כגון מנועים חשמליים, לשינויים בתדר.

יציבות מערכת החשמל מושגת על ידי יחידות הייצור החוזרות למצב שיווי משקל בסנכרון עם המערכת כולה לאחר התרחשות האירוע. לפיכך, יציבות המערכת מושפעת ע"י כל היחידות המסונכרות לרשת ומערכות הבקרה שלהן.

לרוב, טכנולוגיות רוח ושמשי אינן מספקות תגובה אינרציאלית. לכן, ככל שחלקן של הטכנולוגיות האלו בתמהיל הייצור הכולל יעלה, יגדלו גם הדרישות לתגובה אינרציאלית מצד יתר הגנראטורים במערכת. מתקני אגירה שאובה עם מהירות קבועה יתרמו לתגובה אינרציאלית של המערכת באמצעות הגנראטורים הסינכרוניים המסתובבים שלהם. המתקנים עם מהירות משתנה יתרמו לתגובה אינרציאלית דרך ממירים אלקטרוניים.

ככל שעולה היקף האנרגיות המתחדשות המשתתפות בכל רגע נתון בהספקת העומס, מספר היחידות הקונבנציונליות שבפעולה יורד ויחד אתו יורדת יכולת התגובה של המערכת באמצעות מנגנוני הבקרה הראשונית והמשנית. מתקני אגירה שאובה עם מהירות קבועה מתבססים על גנרטורים סינכרוניים קונבנציונליים עם מאפיינים דומים, מהיבט היציבות, לאלו של היחידות הקונבנציונליות. לפיכך, למתקני אגירה שאובה עם מהירות קבועה קיימת יכולת לתרום לבקרה ראשונית (במשך שניות ראשונות לאחר קרות האירוע) וגם לבקרה משנית אם הם נמצאים במצב ייצור בהעמסה חלקית. כמו כן, במצב שאיבה, קיימת אפשרות תיאורטית לנתק את המתקן מהרשת ולהוריד את העומס בהיקף של הספק שאיבה מלא. במציאות משתדלים למתן את הפעולה ולבצע ניתוק במשק פרק זמן מסוים. מתקני אגירה שאובה עם מהירות משתנה, הנעזרים בממירים אלקטרוניים, יכולים להיות מתוכננים לביצועים דינמיים משופרים להתמודדות יעילה יותר עם הפרעות במערכת. מתקנים עם מהירות משתנה יכולים להשתתף בבקרת תדר ראשונית ומשנית גם במצב שאיבה, הודות ליכולתם לשנות את הספק השאיבה בתחום הספקים מסוים.

הקטנת מספר התנועות ושינויי העמסה של יחידות קונבנציונליות

הגמישות המירבית בהפעלה, האופיינית למתקני אגירה שאובה, תורמת לשיטוח פרופיל ההעמסה של היחידות הקונבנציונליות ומאפשרת לצמצם את מספר התנועותיהן והפסקותיהן, תוך השגת חיסכון בהוצאות דלק ובעלות תחזוקתן. הדבר מתבטא ביתר שאת במערכות עם נתח משמעותי של אנרגיות מתחדשות הגורמות לשינויי העמסה תכופים של יחידות קונבנציונליות.



תרומה למערכת במקרה של עלטה כללית

במקרים נדירים של עלטה כללית, העלאת המערכת מתחילה מיחידות ייצור עם יכולת התנעה עצמית ("התנעה שחורה"). יחידת אגירה שאובה עם מהירות קבועה מהווה מועמד מצוין להספקת שירותי "התנעה שחורה" ולזירוז העלאת העומס במערכת, תוך השגת חיסכון ענק למשק מצמצום עלות האנרגיה הבלתי מסופקת. במקרה של יחידות עם מהירות משתנה, הספקת שירות זה הינה בעייתית יותר בשל הצורך לספק חשמל למערכות אלקטרוניות שלהן ממקורות חיצוניים.

שמירה על רמות המתח במערכת

קיימת חשיבות רבה לשמור על תחום צר, ככל הניתן, של הסטיות ברמות המתח מהערכים המקובלים על מנת להבטיח פעולה תקינה של ציוד חשמלי אצל צרכני חשמל. מתחי המערכת מבוקרים על ידי הספקת הספק ראקטיבי מהגנראטורים או מהתקני מערכת אחרים, כגון סוללות קבלים, קבלים סינכרוניים, VAR סטטיים וכו'. מתקני אגירה שאובה עם מהירות קבועה מבוססים על גנראטורים סינכרוניים קונבנציונליים עם יכולות תמיכה בבקרת המתח דומות לאלו של יחידות ייצור קונבנציונליות מאותו גודל. יש לציין את היכולת הפוטנציאלית של מתקן אגירה שאובה לתרום לויסות מתח בזמן פעולתו כקומפנסטור סינכרוני במצב Spinning-in-air ללא הספקת הספק ראקטיבי. מתקני אגירה שאובה עם מהירות משתנה, הודות למערכת ממירים אלקטרוניים, יכולים להיות מתוכננים להספקת התמיכה לויסות מתח מעבר ליכולות של גנראטורים קונבנציונליים באותו גודל.

פליטות מזהמים

ההשפעה של אגירה שאובה על היקף הפליטות במערכת הייצור תלויה, מצד אחד, בסוג יחידות הייצור המשמשות לשאיבה ומאיךך – בסוג הייצור הקונבנציונלי הנמנע בעקבות ייצור החשמל באמצעות אגירה שאובה. לפיכך, במערכות בהן העומס הבסיסי מסופק ע"י יחידות בפחם ואילו עומסי שיא ע"י יחידות בגז אין לצפות לצמצום היקף הפליטות בעקבות פעולת אגירה שאובה. לעומת זאת, במערכת הישראלית, בטווח הארוך, החלק הגדול של שאיבה צפוי להתבסס על יחידות בגז, אשר יהפוך לדלק שולי במערכת הן לצורך השאיבה והן בזמן הייצור באמצעות אגירה שאובה. כפי שהוזכר בפרקים הקודמים, תרומתה של אגירה שאובה לעתודה הסובבת מאפשרת להעמיס בצורה יעילה יותר את היחידות הגזיות, לצמצם את צריכת הדלק במערכת וכתוצאה מכך - את היקף הפליטות. תרומה זו יכולה להתבטא ביתר שאת כשאגירה שאובה נמצאת במצב סובב ריקם (spinning-in-air). כמו כן, אגירה שאובה מאפשרת לצמצם את מספר ההתנעות של יחידות ייצור ולתרום, כתוצאה מכך, להפחתה מסוימת בפליטות.

במערכת עם נתח גבוה של אנרגיות מתחדשות, אגירה שאובה מאפשרת לנצל כל ייצור עודף באמצעות אנרגיה סולרית ואנרגיות רוח לצורך השאיבה ולתרום, כתוצאה מכך להפחתת פליטות המערכת. יש לציין שקיום אגירה שאובה מקנה למערכת גמישות תפעולית מוגברת ומאפשרת להגדיל את הנתח של אנרגיות מתחדשות בייצור חשמל תוך הפחתת פליטות בטווח הארוך.

4.2 נספח ב' – שימוש במערכת אגירה בסוללות לצורך "התנעה שחורה"

דיווח על שימוש במערכת אגירה בסוללות לצורך "התנעה שחורה" של הרשת:

[California battery's black start capability hailed as 'major accomplishment in the energy industry'](#)

Published: 17 May 2017, 15:27

By: Andy Colthorpe



Image: Imperial Irrigation District Facebook page.

A utility in Southern California has successfully demonstrated the use of a battery energy storage system to provide a 'black start', firing up a combined cycle gas turbine from an idle state.

..... The 33MW / 20MWh lithium-ion battery energy storage system (BESS), which in its everyday use provides grid stability and helps smooth the output from local renewable power sources, was used on 10 May to kick-start an IID 44MW combined cycle natural gas turbine, located at El Centro Generating Station in Imperial Valley, California.

.... "The battery energy storage system did not only provide startup power, but converted it, allowing the generator to achieve synchronisation. To our knowledge, this is the first time in history that a battery energy storage system black-started a generator in an operational situation,"

4.3 נספח ג' – יעדי מתחדשות במדינות OECD נבחרות

מדינה	יעד
אוסטריה	100% מסך צריכת החשמל יסופקו על ידי מקורות אנרגיה מתחדשת עד 2030. ³¹
דנמרק	100% מסך צריכת החשמל יסופקו על ידי מקורות אנרגיה מתחדשת עד 2030. ³²
שבדיה	100% מתמהיל הייצור יתבססו על אנרגיות מתחדשות עד 2040. ³³
גרמניה	100% מתמהיל הייצור יתבססו על אנרגיות מתחדשות עד 2050. ³⁴
פורטוגל	100% מתמהיל הייצור יתבססו על אנרגיות מתחדשות עד 2050. ³⁵
ספרד	100% מתמהיל הייצור יתבססו על מקורות אנרגיה מתחדשת עד 2050. ³⁶ עדכון היעד לשנת 2030 ל-74% ייצור מבוסס מקורות אנרגיה מתחדשת.
הולנד	כמעט 100% מאספקת האנרגיה יהיו ממקורות אנרגיה מתחדשת עד 2050. ³⁷
קליפורניה	100% מתמהיל הייצור יתבססו על אנרגיות מתחדשות עד 2045. ³⁸

³¹(Federal Ministry Republic of Austria, 2018)
³²(Ministry of Foreign Affairs of Denmark, 2018)
³³(European Commission, 2019)
³⁴(Energy Transition, 2018)
³⁵(Government of Portugal, 2019)
³⁶(The Guardian, 2018)
³⁷(Government of the Netherlands, 2018)
³⁸(California Energy Commission, 2018)

.LCOE Update 2020 .(2020) .Bloomberg NEF

SB-100 California Renewables Portfolio .(2018 10) .California Energy Commission
California . אוחר מתוך . *Standard Program: emissions of greenhouse gases*
Legislative Information:
https://leginfo.legislature.ca.gov/faces/billTextClient.xhtml?bill_id=201720180
SB100

What the duck curve tells us about managing a green grid .(2016) .California ISO
California ISO: מתוך
http://www.caiso.com/Documents/FlexibleResourcesHelpRenewables_FastFacts.pdf

1st Year Income From @Tesla Battery In South Australia .(2018 09 27) .CleanTechnica
CleanTechnica: מתוך אוחר . *Equals 1/3 Of Its Cost*
<https://cleantechnica.com/2018/09/27/1st-year-income-from-tesla-battery-in-south-australia-equals-%E2%85%93-of-its-cost>

Levelized Cost of Electricity and Levelized Avoided Cost of Electricity .(2013 07) .EIA
EIA: מתוך אוחר . *Methodology Supplement*
https://www.eia.gov/renewable/workshop/gencosts/pdf/methodology_supplement.pdf

Energy Transition - The *Renewable Energy Act* .(2018) .Energy Transition
Global Energiewende Wiki: <http://wiki.energytransition.org/the-book/policies-for-clean-energy/renewable-energy-act-ee>

Summary of the Commission assessment of the draft .(2019) .European Commission
European Commission: אוחר מתוך . *National Energy and Climate Plan 2021-2030*
https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/necp_factsheet_final.pdf

Austrian Climate and Energy Strategy .(2018 09) .Federal Ministry Republic of Austria
Federal Ministry Republic of Austria: מתוך אוחר
https://www.bmlrt.gv.at/dam/jcr:8548da5d-0258-4ffe-ad4f-e5b50a9669c5/Bericht_inkl.Visuals_engl_barrierefrei.pdf

FPL announces plan to build the world's largest solar-powered battery and drive accelerated retirement of fossil fuel generation .(2019) .FPL
FPL Newsroom: אוחר מתוך
<http://newsroom.fpl.com/2019-03-28-FPL-announces-plan-to-build-the->

worlds-largest-solar-powered-battery-and-drive-accelerated-retirement-of-fossil-fuel-generation

Government of Portugal (2019 06). *Roadmap for Carbon Neutrality 2050*. אוחזר מתוך Government of Portugal: <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=aa27c4c9-dac3-47c3-96ae-4ca86183635d>

Government of the Netherlands (2018). *Central government encourages sustainable energy*. אוחזר מתוך Government of the Netherlands: <https://www.government.nl/topics/renewable-energy/central-government-encourages-sustainable-energy#timeline-minor-event-093723784-1736063542>

IEA (2019 12). *Installed capacity of utility-scale battery storage systems in the New Policies Scenario, 2020-2040*. אוחזר מתוך IEA: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-capacity-of-utility-scale-battery-storage-systems-in-the-new-policies-scenario-2020-2040>

International Renewable Energy Agency (2019). *Innovation landscape brief: Utility-scale batteries*. אוחזר מתוך IRENA: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Sep/IRENA_Utility-scale-batteries_2019.pdf

IRENA (2017 10). *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030*. אוחזר מתוך IRENA: <https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>

Ministry of Foreign Affairs of Denmark (2018 07). *New Ambitious Danish Energy Agreement Secured*. אוחזר מתוך Ministry of Foreign Affairs of Denmark: <https://investindk.com/insights/new-ambitious-danish-energy-agreement>

NREL (2019). *Cost Projections for Utility-Scale Battery Storage*. אוחזר מתוך NREL: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/73222.pdf>

Solar Power World (2019 09 10). *minute Solar Energy approved to build 400-MW solar+storage project for City of Los Angeles*. אוחזר מתוך Solar Power World: <https://www.solarpowerworldonline.com/2019/09/8minute-solar-energy-los-angeles-solar-storage>

Rocky Mountain Institute (2019). *The Growing Market for Clean Energy Portfolios*. אוחזר מתוך Rocky Mountain Institute: <https://rmi.org/insight/clean-energy-portfolios-pipelines-and-plants>

The Guardian (2018 11). *Spain plans switch to 100% renewable electricity by 2050*. אוחזר מתוך The Guardian: <https://www.theguardian.com/environment/2018/nov/13/spain-plans-switch-100-renewable-electricity-2050>

חברת החשמל. (יולי 2017). שילוב תחנות אגירה שאובה בתוכניות הפיתוח של מערכת ייצור החשמל.
 אוחזר מתוך חברת החשמל:

<https://www.iec.co.il/pv/Documents/Hagira04092017.pdf>

חברת החשמל לישראל בע"מ. (2019). דו"ח תקופתי לשנת 2018. אוחזר מתוך חברת החשמל:
https://www.iec.co.il/investors/DocLib1/meshulav1218_nagish.pdf

רשות החשמל. (2014). הסדרה 914 - הסדרת המשך תעריפית ליצרני חשמל קונבנציונליים פרטיים
 מעל 16 מגה ואת למספקים פרטיים. אוחזר מתוך רשות החשמל:

<https://pua.gov.il/hearings/documents/%D7%94%D7%97%D7%9C%D7%98%D7%94%20914%20%D7%9E%D7%AA%D7%95%D7%A7%D7%A0%D7%AA%20-%20%D7%A7%D7%95%D7%91%D7%A5%20%D7%A0%D7%A7%D7%99.pdf>

רשות החשמל. (יוני 2018). מפת דרכים לפיתוח מקטע הייצור במשק החשמל 2018-2030. אוחזר
 מתוך רשות החשמל:

<https://pua.gov.il/publications/pressreleases/documents/%D7%9E%D7%A4%D7%AA%20%D7%93%D7%A8%D7%9B%D7%99%D7%9D%20%D7%9C%D7%AA%D7%9B%D7%A0%D7%95%D7%9F%20%D7%9E%D7%A7%D7%98%D7%A2%20%D7%94%D7%99%D7%A6%D7%95%D7%A8%20%D7%91%D7%9E%D7%A9%D7%A7%20%D7%94%D7%97%D7%A9>

רשות החשמל. (2019). דו"ח מצב משק החשמל 2018. אוחזר מתוך רשות החשמל:
https://pua.gov.il/Publications/PressReleases/Pages/doch_mashek_2018.aspx

רשות החשמל. (2019). מכירת תחנת הכוח אלון תבור - נספח - א מבנה הצעה בשוק האנרגיה ועקומת
 ההיצע של חשמל. אוחזר מתוך רשות החשמל:

<https://pua.gov.il/publications/pressreleases/documents/%D7%A0%D7%A1%D7%A4%D7%97%20-%20%D7%90%20%D7%9E%D7%91%D7%A0%D7%94%20%D7%94%D7%A6%D7%A2%D7%94%20%D7%91%D7%A9%D7%95%D7%A7%20%D7%94%D7%90%D7%A0%D7%A8%D7%92%D7%99%D7%94%20%D7%95%D7%A2%D7%A7%D7%95%D7%9E%D7>