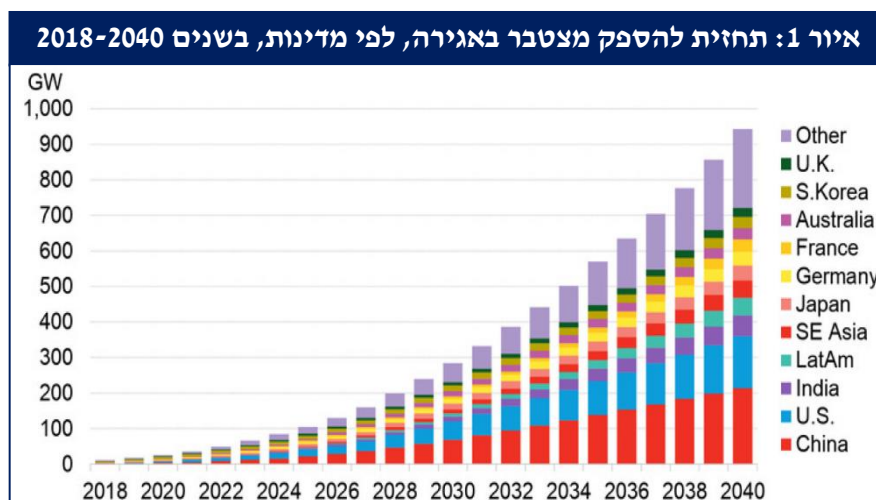




אגירה במשק החשמל – מגמות, טכנולוגיות, שימושים וצעדים נדרשים

(מחבר: אלכסנדר קליינר, יחידת המדען הראשי, אוגוסט, 2020)

אגירה במשק החשמל קיימת מזה זמן רב, אם כי בשנים האחרונות הצורך בה גדל משמעותית. השאיפה להפחתת פליטות גזי החממה על ידי מעבר לאנרגיות מתחדשות, שלרוב אינן זמינות לאורך כל היממה, והרצון לעבור לתחבורה מבוססת חשמל מחזקים את הצורך באגירה. בעוד שמרבית האגירה הקיימת כיום הנה אגירה שאובה, כ-96% מסך הספק של 176 גיגה-וואט לשנת 2017, בשני העשורים הקרובים משקלה צפוי לרדת, ואגירה באמצעים אחרים, מודולריים, כמו סוללות, תלך ותגדל. איור 1 שלהלן מציג תחזית של בלומברג להספק המצטבר של מתקני אגירה במשק החשמל, ללא אגירה שאובה וללא סקטור התחבורה, עד שנת 2040, לפי מדינות העולם.¹ מהאיור נראה כי בעוד שכיום היקף האגירה הוא כמעט אפסי, עד שנת 2040 ההספק המצטבר יגיע לכ-1,000 גיגה-וואט, כאשר ארה"ב ומדינות אסיה, בראשם סין, יובילו את המגמה.



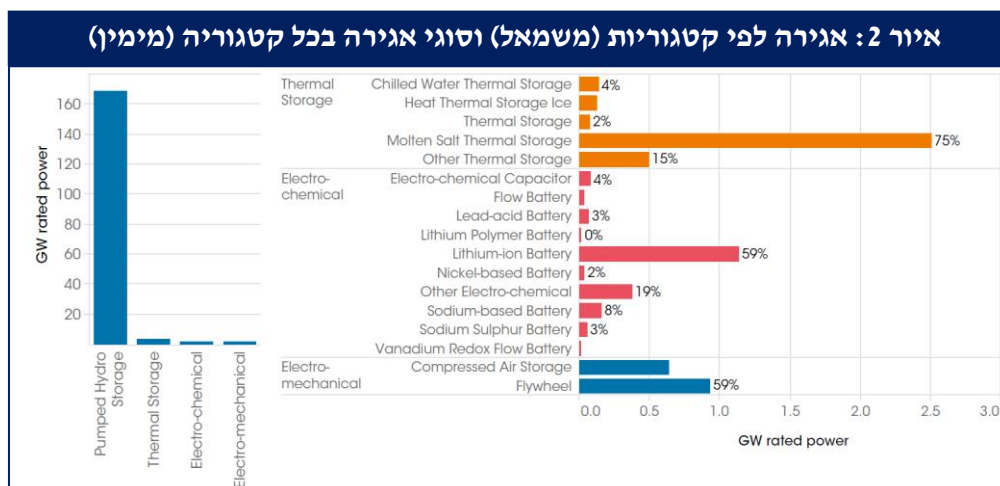
מקור: Bloomberg, 2018

איור 2 שלהלן מתאר את סוגי אמצעי האגירה הקיימים כיום, לפי ארבע קטגוריות מרכזיות, ותתי קטגוריות. מהאיור נראה כי אגירה שאובה מהווה כ-96% מסך ההספק, אגירה תרמית (חום) מהווה כ-1.9%, אגירה אלקטרו-כימית (סוללות) מהווה 1.1% ואגירה אלקטרו-מכנית מהווה 0.9%². עוד נראה

¹ התחזית נבנתה על בסיס צרכי האגירה עד שנת 2040, ולכן היא ניטרלית לטכנולוגיה.

² קטגוריה שאיננה מופיעה באיור 1 היא אגירה כימית הכוללת את המימן. השימוש במימן לאגירה איננו משמעותי כיום, אם כי ישנו פוטנציאל ממשי בעתיד, ולכן ישנה התייחסות למימן בהמשך העבודה.

כי באגירה תרמית עיקר האגירה, כ-75%, היא באמצעות מלח מותך. אגירה אלקטרו-מכנית כוללת בעיקר גלגלי תנופה ואוויר דחוס, ואילו אגירה אלקטרו-כימית כוללת בעיקר סוללות מסוג ליתיום-יון, כ-59% מסך ההספק לקטגוריה זו.³ נספח 1 מתאר בהרחבה את הטכנולוגיות ומאפייניהם הכלכליים והטכניים.



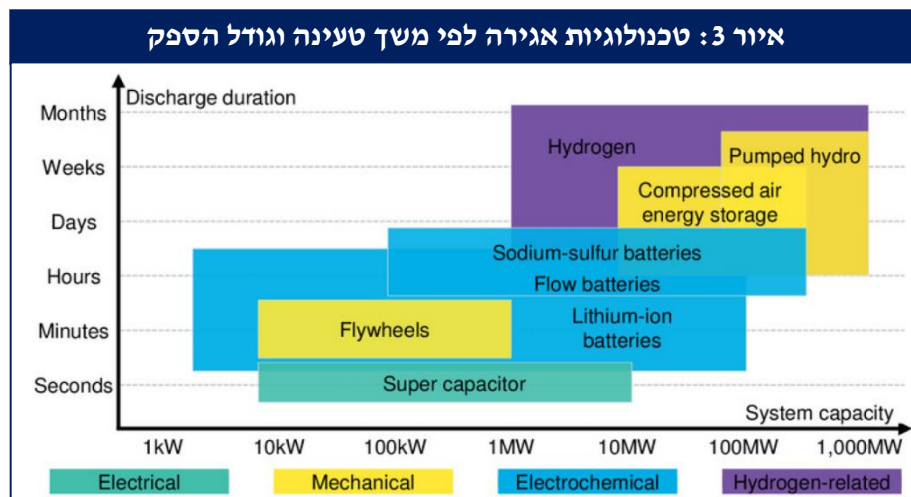
מקור: IRENA, 2017⁴

איור 3 שלהלן מציג את עיקר הטכנולוגיות מאיור 2 לפי מאפייני משך הטעינה וההספק. מהאיור ניתן לראות כי אגירה שאובה, אגירה של מימן ואגירה של אוויר דחוס מאפשרים הספק גבוה, מאות מגה וואטים, ומשך אגירה ארוך, ימים, ואף חודשים עבור מימן. אגירה באמצעות סוללות זרימה וסוללות סודיום-גופרית מאפשרים הספק בינוני, עשרות מגה, למשך שעות או ימים, ואילו סוללות ליתיום-יון יכולות לתת הספק של ק"ו בודדים ועד עשרות מגה וואט, לפרק זמן של דקות עד שעות.⁵ אחריהן ניתן לראות את גלגלי תנופה, המאפשרים אגירה לטווחי זמן קצרים, ולבסוף, ניתן לראות את קבלי העל המאפשרים אגירה בהספק גבוה, לשניות עד דקות.

³ סוללות ליתיום-יון הפכו לנפוצות במיוחד לאור השימוש ההולך וגובר ברכבים חשמליים. עלות סוללות אלו ירדה בכ-85% בעשור האחרון, ועד שנת 2030 ישנו צפי לירידה נוספת בגובה של כ-60%.

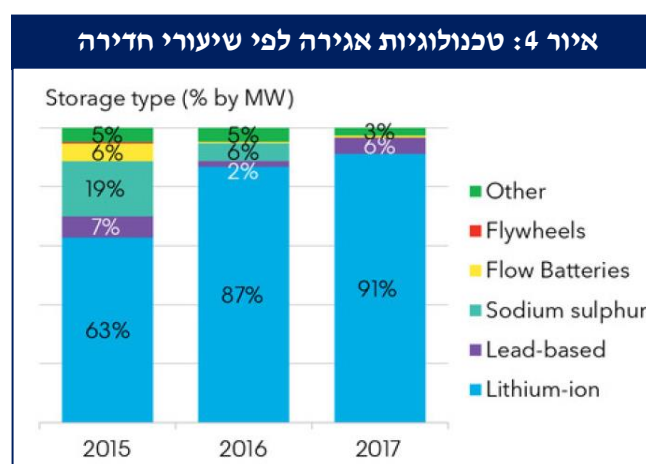
⁴ IRENA, 2017, Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030.

⁵ ישנן חברות שמתכננות להקים מתקנים חדשים בטכנולוגיית ליתיום-יון בהספקים של מאות מגה וואט.



מקור: בלומברג, 2017

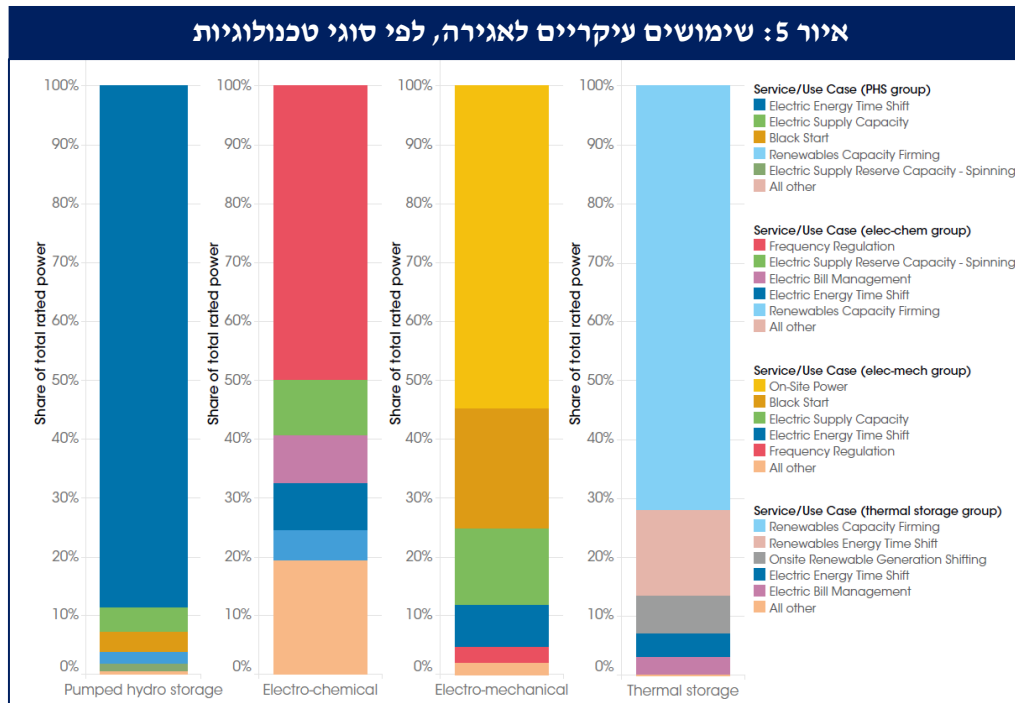
איור 4 שלהלן מציג את הטכנולוגיות שתוארו קודם לכן, פרט לאגירה שאובה, מימן ואוויר דחוס, לפי שיעור החדירה שלהם בשנים 2015-2017 (כ- % מסך פרויקטי אגירה מסחריים לאותם השנים, לפי הספק). מהאיור ניתן לראות כי בעוד שבשנת 2015 סוללות ליתיום-יון היו כ-63%, סוללות עופרת-חומצה היו כ-7%, וסוללות סודיום-גופרית היו כ-19%, בשנת 2017 סוללות ליתיום-יון כבר היו כ-91%. כלומר, בשל ירידת המחירים המשמעותית של סוללות הליתיום, הביקוש לסוללות אלו רק הולך וגובר בשנים האחרונות.



מקור: בלומברג, 2019

לאחר שסקרנו את סוגי הטכנולוגיות העיקריות, נתאר להלן את השימושים העיקריים לאגירה. איור 5 שלהלן מציג את השימושים בפועל בשנת 2017, לפי ארבעת קטגוריות האגירה שהצגנו בתחילת המסמך,

בהתאם לחלוקה שנעשתה על ידי IRENA. מהאיור עולה כי השימוש באגירה שאובה נעשה בעיקר לאגירת אנרגיה בשעות שפל ולשחרור האנרגיה בשעות שיא ביקוש (Electric Energy Time Shift). לעומת זאת, השימוש באגירה אלקטרו-כימית נעשה בעיקר לייצוב תדר (Frequency Regulation), ואילו השימוש באגירה אלקטרו-מכנית נעשה בעיקר לאספקת חשמל נוספת באתר הצריכה (On-site Power). לבסוף, השימוש באגירה תרמית נעשה בעיקר לאיזון אספקת החשמל ממקורות מתחדשים.



מקור: IRENA, 2017

להלן תיאור קצר של כלל השימושים המופיעים באיור 5:

- **Electric Energy Time Shift** - אגירת אנרגיה בשעות בהם מחיר החשמל זול (שפל) ושחרור האנרגיה בשעות בהם מחיר החשמל יקר (שיא).
- **Electric Supply Capacity** - שימוש באגירה כתחליף להקמת תחנות כוח פיקריות.
- **Black Start** - הפעלה ראשונית של תחנות כוח בעת נפילת רשת החשמל באמצעות מקור חשמל שאיננו תלוי רשת (למשל סוללה או גנרטור).
- **Renewables Capacity Firming** - איזון אספקת החשמל ממקורות מתחדשים, למשל, למקרים בהם אספקת החשמל קטנה בשל מעבר עננים מעל שדה הסולארי.
- **Electric Supply Reserve Capacity – Spinning** (עתודה סובבת) - גיבוי לייצור החשמל באמצעות מקור אנרגיה הפועל בהספק חלקי, ואשר יכול לעלות את תפוקתו במהירות. אגירה יכולה לשמש כגיבוי, ובשונה מתחנת כוח, היא איננה נדרשת לפעול בטרם ההפעלה,

מפני שאספקת החשמל ממנה יכולה להתחיל באופן מידי (באופן דומה, ניתן להשתמש באגירה גם להחלפה של עתודה שאינה סובבת).

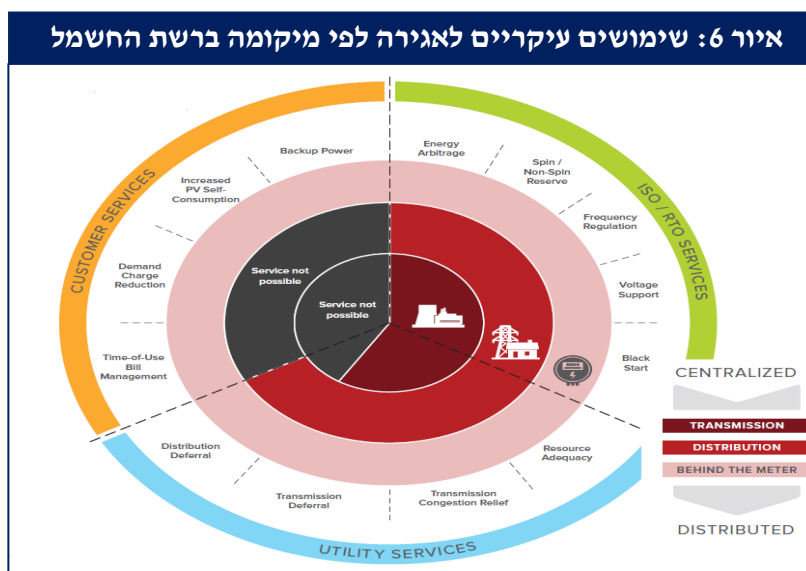
- Frequency Regulation – במקרים בהם הביקוש לחשמל גדול מההיצע או להפך, עלולות להיווצר הפרעות בתדר, מה שיכול להביא לשיבושים באספקת החשמל. שימוש באגירה מאפשר לקלוט את החשמל העודף או להזרים חשמל נוסף בתוך שניות ואף פחות מזה בחלק מהמקרים, על מנת להבטיח כי התדר יישאר יציב (באופן דומה, ניתן להשתמש באגירה לייצוב מתח).
- Electric Bill Management – שימוש באגירה לצמצום חשבון החשמל של צרכנים סופיים. למשל במקרים בהם חל תשלום נוסף על צריכה מעל סף מסוים או ישנו תעריף משתנה לפי שעות עומס וזמן.
- On-site Power – שימוש באגירה באתר הצריכה להקטנת גודל החיבור לרשת החשמל. לדוגמא, שימוש באגירה לשם הקטנת החיבור הנדרש להקמת עמדות טעינה אולטרה מהירות לרכבים חשמליים.
- Renewables Energy Time Shift – אחסון אנרגיה עודפת המתקבלת בייצור ממקורות אנרגיה מתחדשים בשעות בהם הביקוש איננו גבוה, ושימוש בה בשעות ביקוש.

מלבד אלו, ישנם עוד מספר שימושים חשובים שאינם מופעים מפורשות באיור 5, אך שראוי לציין:

- Transmission and Distribution Deferral/Congestion Relief – דחיית הקמת קווי הולכה וחלוקה על ידי שילוב מתקני אגירה. באמצעות אגירת חשמל במוקדי הצריכה ו/או לאחר קו החשמל, ניתן להוליד פחות חשמל בשעות שיא, ועל די כך להקל על העמסת הרשת.
- Electric Transportation – שימוש באגירה לשם העברת סקטור התחבורה הקלה והכבדה לחשמל. מלבד זאת, בשעות בהם הרכבים אינם בשימוש, הסוללות יכולות לשמש לצרכי משק החשמל, כגון ייצוב תדר, מתח, ועוד (V2G – Vehicle to Grid).
- Micro Grids – במקומות בהם אין תשתית חשמל קיימת, למשל במדינות מתפתחות, או במדינות בהן קיים קושי בהעברת קווי חשמל לאזורים מרוחקים, ניתן לשלב אנרגיה מתחדשת ואגירה בחצר הצרכן, כמערכת אוטונומית המייצרת ומספקת חשמל לעצמה, ללא חובה בחיבור לרשת החשמל.
- Power Reliability – פגיעה באמצעי ייצור החשמל, כמו גם בתשתית אספקת הדלקים, ובתשתית הולכת החשמל, יכולה להסב נזק רב למשק, ולהביא לשיתוק מערכות קריטיות. עד לא מזמן משק החשמל בישראל נשען על פחם, הניתן לאגירה בקלות יחסית. בעשור האחרון שיעור הפחם בייצור החשמל הולך וקטן, ומנגד שיעור הגז הטבעי רק גדל, וצפוי להוות כ-70% מתמחיל הדלקים עד שנת 2030. כמו כן, מפני שסקטור התחבורה מתועד לעבור לחשמל, הרי שרגישות המשק לשיבושים במערכת החשמל רק תעלה עם השנים.

מסיבות אלו, ישנה חשיבות בשימוש בפתרונות המסוגלים לתת מענה ברמה המקומית. למשל, אגירת חשמל באמצעות סוללות בשילוב מקור יצור אנרגיה מתחדשת, כמו פאנל פוטו-וולטאי, תסייע באופן משמעותי בהגדלת היתירות, גם אם חלקית, לעת חרום. כלומר, כל עוד הייצור הוא מקומי, למשל על גג המבנה, הרי שגם אם ישנה פגיעה בתחנות כוח ובקווי החשמל, אספקת החשמל לבתים תמשיך להתקיים, גם אם באופן מינימלי, ברוב ימות השנה.

על מנת לבחון את הישימות והכדאיות של השימושים שתוארו לעיל, יש לסווגם לפי מיקומם במשק החשמל וכן לבחור את טכנולוגיית האגירה הרצויה. ניתן לסווג את השימושים בצורה גסה בשלושה מקטעים עיקריים: 1. רשת ההולכה; 2. רשת החלוקה; 3. חצר הצרכן (לאחר המונה). את השחקנים במשק החשמל ניתן לסווג בצורה גסה באופן הבא: 1. מנהל מערכת; 2. יצרני וספקי חשמל; 3. צרכנים. איור 6 שלהלן מתאר חלוקה דומה לשחקנים ולמקטעי החשמל שנעשתה על ידי מכון המחקר RMI⁶ עבור 13 שימושים אפשריים לאגירה.⁷ מהאיור עולה כי ככל שהאגירה ממוקמת קרוב יותר לצרכן (מאחורי המונה), כך מגוון השירותים שהאגירה יכולה לתת עולה. כך למשל, ייצוב תדר הנו שירות שיכול להיעשות במקום הצריכה, ברשת החלוקה ואף ברשת ההולכה. כמו כן, שימוש באגירה כגיבוי לתקלה ביצור החשמל המרכזי או לנפילת קו מתח רצוי שיעשה בקרבת הצרכן, שכן הוא מאפשר לנטרל את החוליה החלשה ביותר.



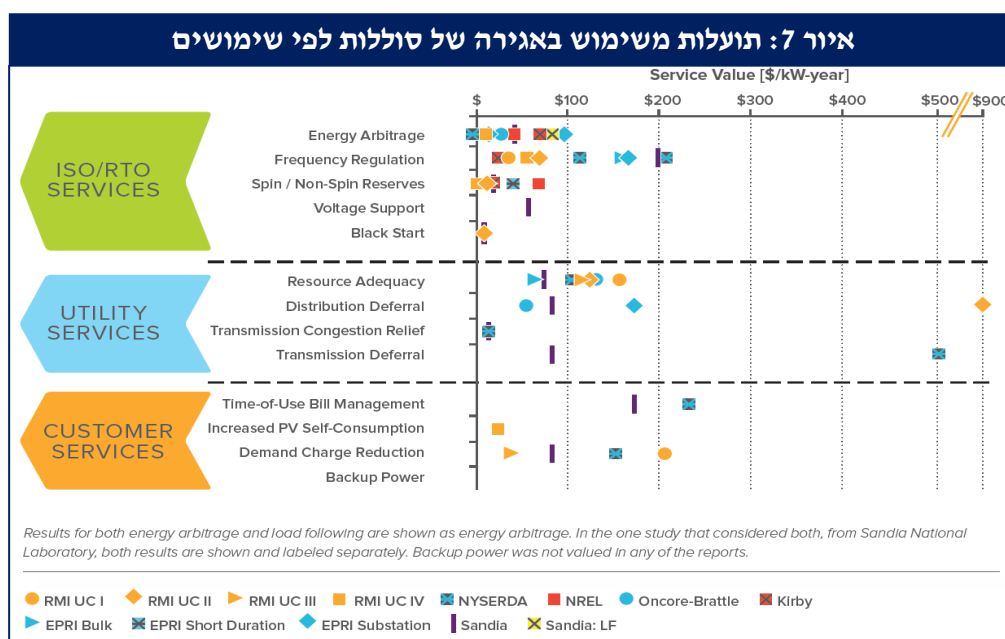
מקור: RMI, 2017⁸

⁶ Rocky Mountain Institute

⁷ שמות השימושים המופיעים באיור 14 שונים בחלקם מאלו שתוארו קודם לכן, אם כי השימושים עצמם הם די זהים.

⁸ RMI, 2017 The Economics of Battery Storage.

לאחר סיווג האגירה לפי המיקום המתאים ברשת החשמל, ובהינתן מאפייני האגירה, ניתן לחשב את התועלת המשקית משימוש באגירה לשירותים השונים למשק החשמל. איור 7 שלהלן מתאר סקירה שנעשתה על ידי RMI לעבודות שבחרו לחשב את הערך משימוש בסוללות במשק החשמל במונחי ק"ו לשנה, בהתאם לסוגי השימושים שתוארו קודם לכן. מהתרשים ניתן לראות כי התועלת נעה מעשרות עד מאות דולר, כאשר התועלת הגבוהה ביותר שנמדדה הייתה בדחיית הקמת קווי חלוקה והולכה, אם כי ישנו מספר מועט של עבודות שניסו לחשב ערכים אלו. עוד עולה מהתרשים כי קיימת שונות רבה בין התועלות מהשימושים השונים, ואף קיימת שונות בחישוב של תועלות משימושים דומים, גם במקרים בהם החישוב נעשה באותו אזור גיאוגרפי. חישובי תועלת במשק החשמל נחשבים למורכבים במיוחד, דורשים הנחות רבות, וכוללים לעיתים עשרות אם לא מאות משתנים דינמיים המשפיעים ומושפעים אחד מהשני, ומשום כך ישנו שוני בין התוצאות.

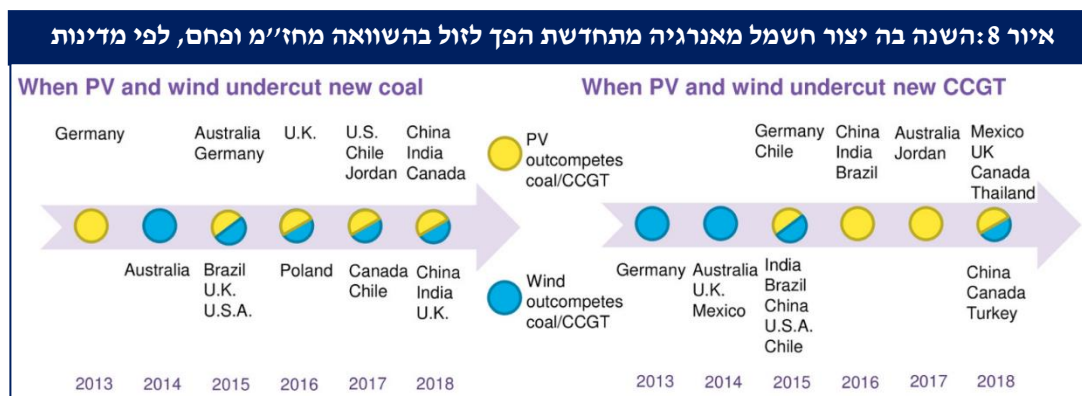


מקור: RMI, 2017

מפני שהשימוש המשמעותי ביותר לאגירה בישראל הנו בשילוב עם אנרגיה מתחדשת לצורך הסטת עומסי שעות שיא/ הגדלת השימוש באנרגיה נקייה/ דחיית הקמת תחנות כוח קונבנציונאליות, נחשב להלן את הכדאיות שבהקמת מתקני אגירה למול האלטרנטיבות.

יצור חשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות, בייחוד על ידי רוח ושמש, הפך בשנים האחרונות לאמצעי הייצור הזול ביותר במקומות רבים בעולם, כפי שעולה מאיור 8 שלהלן, וכפי שנראה במכרזים האחרונים לייצור חשמל סולארי בישראל. יחד עם זאת, האפשרות לשלב רוח ושמש בהיקפים משמעותיים מוגבלת נוכח אופי יצור החשמל המתחדש, המשתנה כתלות במזג האוויר ושעות היום. ייצור חשמל באמצעות השמש מתאפשר במהלך היום (בימים שמשיים), אך לקראת שעות הערב ישנה נפילה חדה, המצריכה הפעלת תחנות כוח קונבנציונליות. תחנות אלו יקרות במיוחד בשל משטר

ההפעלה המצומצם שלהן ויעילותן הנמוכה. על מנת להקטין את השימוש בתחנות אלו, ניתן להשתמש באמצעי אגירה ולהעביר חשמל סולארי משעות היום לשעות הערב. בסקירה מטה נתאר את עלויות האגירה כיום ותחזיות עד 2030, עבור סוללות מסוג ליתיום-יון, בשילוב עם ייצור סולארי, ונשווה זאת לעלויות הייצור באמצעים קונבנציונליים על ידי גז טבעי. יש לציין כי כבר היום ישנן מספר לא מועט של טכנולוגיות אגירה, ויתכן כי בעתיד הלא רחוק יתווספו טכנולוגיות נוספות. בחישוב זה בחרנו להתייחס לאגירה באמצעות סוללות מסוג ליתיום-יון, בשל הבשלות הטכנולוגית הגבוהה שלהן, בשל הצפי לשימוש הולך וגובר בהן נוכח חדירת הרכבים החשמליים, ובשל ירידת המחירים הקיימת והצפויה.



מקור: בלומברג, 2019

טבלה 1 שלהלן מתארת תחזית לעלות המשוקללת לייצור חשמל סולארי + אגירה באמצעות סוללות ליתיום-יון עם 4 שעות אגירה, בשנים 2020-2030. הנחת המוצא היא שסך החשמל הסולארי המיוצר גבוה מגודל החיבור לרשת, כך שחלקו מופנה לרשת, עד למגבלת הרשת, והשאר מופנה לסוללה, כאשר הספק הסוללה שווה לגודל החיבור לרשת. ייחס dc/ac למול גודל החיבור לרשת) עבור 4 שעות אגירה הנו 2.6. שילוב הסוללה מאפשר לאגור חשמל סולארי לשעות הערב, מה שמביא לשימוש יעיל יותר במשאב הרשת. החישוב מניח יעילות של 90% בסוללה, DOD של 85%, דרגציה של 1% (שנתי), ואורך חיים של כ- 6,000 מחזורי טעינה מלאים (כ-16 שנים על בסיס יומי). יצור החשמל השנתי מתבסס על 1,700 שעות שמש, כאשר מחירי היצור הסולארי ומחירי הסוללה מבוססים על אומדני ותחזיות בלומברג.

טבלה 1 : עלות לקוט"ש סולארי משולב אגירה, לפי משך אגירה, ושנת הקמת המתקן

שנת הקמת המתקן											
30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	
0.16	0.16	0.17	0.17	0.18	0.18	0.19	0.20	0.21	0.22	0.23	עלות לקוט"ש - סולארי + סוללה עם 4 שעות

מהטבלה ניתן לראות כי העלות המשוקללת לייצור חשמל סולארי + אגירה עומדת על 23 אג' לקוט"ש בשנת 2020 במתקן של 4 שעות. כאמור, אומדן זה משקלל את הייצור הסולארי המוזרם לרשת ואת זה הטוען את הסוללה, בנוסף לעלות הסוללה עצמה. בשנת 2030 ניתן לראות כי המחיר יורד ל-16 אגורות לקוט"ש, הנובע בעיקר מהצפי לירידה בעלויות הסוללות.

טבלה 2 שלהלן מציגה את עלות יצור החשמל באמצעות טורבינה במחזור פתוח (פיקר), כפונקציה של מחיר ליחידת חום, החל מ-4 ועד ל-7 דולר, ושל ה-Capacity Factor, החל מ-1% (פחות מ-100 שעות שנתיות) ועד 20% (כ-1,750 שעות שנתיות). מהטבלה ניתן לראות כי במחיר של 5 דולר ליחידת חום ו-CF של 17.5% (1,500 שעות), העלות לקוט"ש עומדת על כ-47 אג', ואילו ב-CF של 2.5%, העלות לקוט"ש הנה כ-1.9 ש"ח (באותו מחיר יחידת חום). כלומר, פיקר הפועל בממוצע כ-4 שעות ביום (כ-15% CF), הנו יקר מעלות חשמל סולארי + אגירה ל-4 שעות, העומדת על 23 אג' בשנת 2020 ואשר צפויה לרדת ל-16 אג' לקוט"ש ב-2030. יש להדגיש כי השוואה זו נעשית בהנחה ואין חסם רשתי או קרקעי, וכי ניתן לשלב ייצור סולארי נוסף ללא מגבלת רשת.

טבלה 2: רגישות עלות קוט"ש בפיקר כפונקציה של מחיר גז טבעי ו-CF

מחיר ליחידת חום (דולר)							
7.0	6.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	
4.49	4.47	4.45	4.43	4.41	4.39	4.37	1.0%
1.98	1.96	1.94	1.92	1.90	1.88	1.86	2.5%
1.15	1.13	1.10	1.08	1.06	1.04	1.02	5.0%
0.87	0.85	0.83	0.81	0.78	0.76	0.74	7.5%
0.73	0.71	0.69	0.67	0.65	0.62	0.60	10.0%
0.64	0.62	0.60	0.58	0.56	0.54	0.52	12.5%
0.59	0.57	0.55	0.53	0.51	0.48	0.46	15.0%
0.55	0.53	0.51	0.49	0.47	0.44	0.42	17.5%
0.52	0.50	0.48	0.46	0.44	0.42	0.39	20%

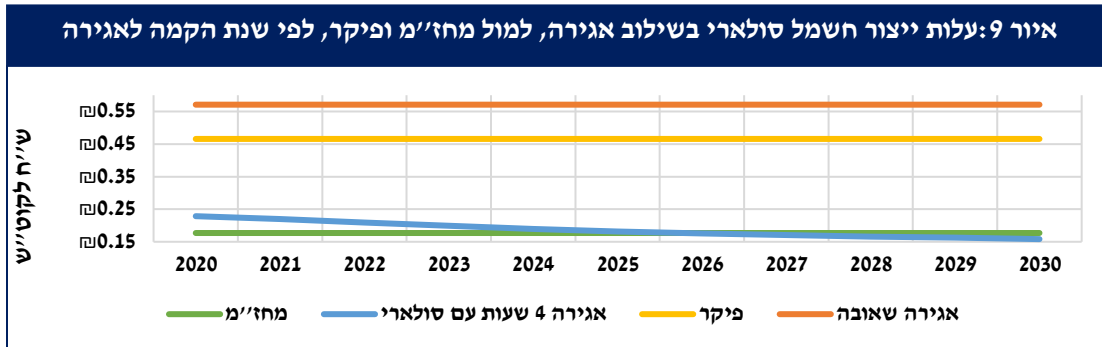
טבלה 3 שלהלן מציגה את עלות יצור החשמל באמצעות טורבינה במחזור משולב (מחז"מ) כפונקציה של המחיר ליחידת חום, החל מ-4 ועד ל-7 דולר, ושל ה-Capacity Factor, החל מ-50% (כ-4,400 שעות

שנתיות) ועד 90% (כ- 7,900 שעות שנתיות). מהטבלה ניתן לראות כי במחיר של 5 דולר ליחידת חום, עלות לקוט"ש הנה בין 20 ל-25 אגורות, כתלות ב-CF. לשם ההשוואה, וכפי שהוצג קודם לכן, עלות חשמל סולארי + אגירה ל-4 שעות, עומדת על 23 אג' בשנת 2020 וצפויה לרדת ל-16 אג' לקוט"ש ב-2030. כלומר, עלות יצור סולארי משולב אגירה כבר מתקררת לעלות הייצור במחז"מ. יש לציין כי לא מדובר בהשוואה של "תפוחים לתפוחים" היות ומתקן האגירה עם הייצור הסולארי מוגבל ל-4 שעות אגירה. כלומר, בשעות הערב ניתן יהיה לספק לכל היותר 4 שעות חשמל עם מתקן האגירה, ואילו עם מתקן מחזור משולב בגז טבעי ניתן לספק חשמל למשך שעות רב יותר, כמעט ללא מגבלה.

טבלה 3 : רגישות עלות קוט"ש במחז"מ כפונקציה של מחיר גז טבעי ו-CF

<u>מחיר ליחידת חום (דולר)</u>							Capacity Factor
7.0	6.5	6.0	5.5	5.0	4.5	4.0	
0.30	0.29	0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	
0.29	0.28	0.27	0.25	0.24	0.23	0.21	
0.29	0.27	0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	
0.28	0.27	0.25	0.24	0.23	0.21	0.20	
0.28	0.26	0.25	0.23	0.22	0.21	0.19	
0.27	0.26	0.24	0.23	0.21	0.20	0.19	
0.27	0.25	0.24	0.22	0.21	0.20	0.18	
0.26	0.25	0.23	0.22	0.21	0.19	0.18	
0.26	0.25	0.23	0.22	0.20	0.19	0.18	

איור 9 שלהלן מציג את העלות המשוקללת לייצור חשמל סולארי + בשנים 2020 – 2030 וכן עלות אגירה שאובה, למול העלות לייצור חשמל באמצעות טורבינת גז במחזור משולב וטורבינת גז במחזור פתוח, בהנחת מחיר קבוע של 5 דולר ליחידת חום בשנים 2020-2030 ו-CF טיפוסי של 80%-17.5%, עבור מחז"מ ופיקר, בהתאמה. מאיור ניתן לראות כאמור כי אגירה למשך 4 שעות זולה כבר היום מפיקר ומאגירה שאובה, ויקרה בכ-5 אג' לקוט"ש בייחס למחז"מ. עם השנים ניתן לראות את ירידת עלות החשמל הסולארי בשילוב אגירה (בשל ירידת מחירי הסוללות), ולהצטמצמות הפער בייחס למחז"מ, עד שהשימוש באגירה בשילוב סולארי הופך לזול יותר.



לאור ירידת העלויות הצפויה, הנראית כאמור באיור 9, ולאור השירותים הרבים אותם האגירה יכולה לספק, בייחוד בעת המעבר להיקפים משמעותיים של אנרגיה מתחדשת, יש להתחיל לפעול כבר כיום לשילוב אמצעי אגירה, הן באמצעות מתן תמריצים והן באמצעות יצירת בסיס רגולטורי מתאים. מבדיקה ראשונית עולה כי יעד המתחדשות הקודם לשנת 2030, העומד על 17%, אינו מצריך שילוב משמעותי של אגירה, אך יחד עם זאת, היעד עליו הצהיר שר האנרגיה לאחרונה, 30%, מצריך כמות משמעותית של אגירה, וגבוה מכך ביעד ל-2050, אשר יהיה גבוה משמעותית מ-30%. יש להדגיש כי על אף הבחינה הטכנו-כלכלית שהתמקדה קודם לכן בסוללות, הנייר אינו מתעדפף טכנולוגיה אחת על פני האחרת, ומה שיקבע באילו טכנולוגיות נשתמש זה העלות והמאפיינים הטכניים של כל אחד מהאמצעים, בהתאמה לאופי השירות אותו אנו מעוניינים לקבל.

להלן רשימת צעדים אפשריים לשילוב אמצעי אגירה במשק החשמל, בטווח הקצר ובטווח הארוך יותר:

1. יש לאפשר שימוש באמצעי אגירה למתן שירותי מערכת (ייצוב תדר, מתח) וכן לעתודה סובבת ולא סובבת. פתיחה של מגוון שירותים יאפשר יצירת זרם הכנסות מגוון שהיפוך את האגירה לכדאית יותר (Value Stacking).
2. יש לבחון דחייה של שדרוגים ברשת החשמל, הולכה וחלוקה, באמצעות שילוב אמצעי אגירה. לשם כך, יש להעריך את סך ההשקעה הדרושה ברשת החשמל, בפרק הזמן הקרוב והרחוק, כתלות באמצעי הייצור, ולהשוות זאת לעלות שילוב אמצעי אגירה.
3. יש לבחון שימוש במתקני אגירה כחלופה להקמת תחנות כוח פוסיליות, בייחוד פיקריות, תוך התייחסות למאפיינים הייחודיים של האגירה.
4. יש לבחון עדכון תעריף החשמל בהתאם למחיר יצור החשמל הרגעי ועלות הולכת החשמל, ובתאם לכך לבחון מעבר לתעריפי עומס-זמן באופן מחייב לכלל המשק. צעד זה יאפשר את הגדלת הכדאיות שבשימוש באמצעי אגירה, ויקטין עד מאוד את הצורך במתן תמריצים כספיים ייעודיים.
5. יש לקבוע יעדים לשילוב אמצעי אגירה, כתלות ביעדי המתחדשות לשנת 2030 ולשנת 2050. יעדים אלו יתנו אופק ויאפשרו לשחקנים השונים במשק החשמל להיערך כראוי.
6. יש לפעול לבחינת הצורך בהליכי רישוי ותכנון מקלים/מזורזים לשילוב אמצעי אגירה.
7. יש לפרסם הנחיות ולאפשר שילוב של רכבים חשמליים במשק החשמל לצורך אספקת שירותי מערכת (Vehicle to Grid V2G).

8. יש להגדיר כללים למחזור אמצעי אגירה (כגון סוללות) ולאמצעי הבטיחות הנדרשים בהקמת מתקני אגירה, בייחוד באזורים בקרבת אוכלוסייה.
9. יש להתחיל בפיילוטים לשילוב אמצעי אגירה במשק החשמל בשני מסלולים: 1. מסלול חדשנות – מסלול זה יאפשר בחינת שימוש באמצעי אגירה חדשניים, עם דגש לטכנולוגיות עם פוטנציאל להוזלת עלויות ולהגדלת נפח שעות אגירה (אגירה לימים עד שבועות). 2. מסלול לבחינת שירותים חדשניים – מסלול זה יאפשר לבצע פיילוטים לאמצעי אגירה מסחריים בשירותים שעד כה לא נעשו בהיקף משמעותי עם אגירה, כגון ייצוב תדר, מתח, דחיית השקעות רשת.
10. יש לדאוג למנגנון מתמרץ לשילוב מתקני אגירה עם פאנלים סולאריים באזורי מגורים, לשם הגדלת יתירות אספקת החשמל, וכחלופה לאמצעים אחרים בהם המדינה נוקטת לאספקת ביטחון אנרגטי.

נספח 1 – סוגי טכנולוגיות אגירה

להלן תיאור של עיקרי טכנולוגיות אגירה נפוצות בעולם:

- **אגירה שאובה** – טכנולוגיה זו מנצלת הפרשי גבהים בין שני מאגרי מים, עליון ותחתון, לשם יצירת אנרגיה. בשעות בהם מחיר החשמל זול מתבצעת שאיבת מים מהמאגר התחתון למאגר העליון, ובשעות בהם נדרש חשמל, המים משוחררים מהמאגר העליון. עוצמת נפילת המים מאפשרת את ייצור החשמל באמצעות הפעלת טורבינה הנמצאת בתחתית המאגר. איור 1 שלהלן מתאר באופן גרפי את השימוש בטכנולוגיה.

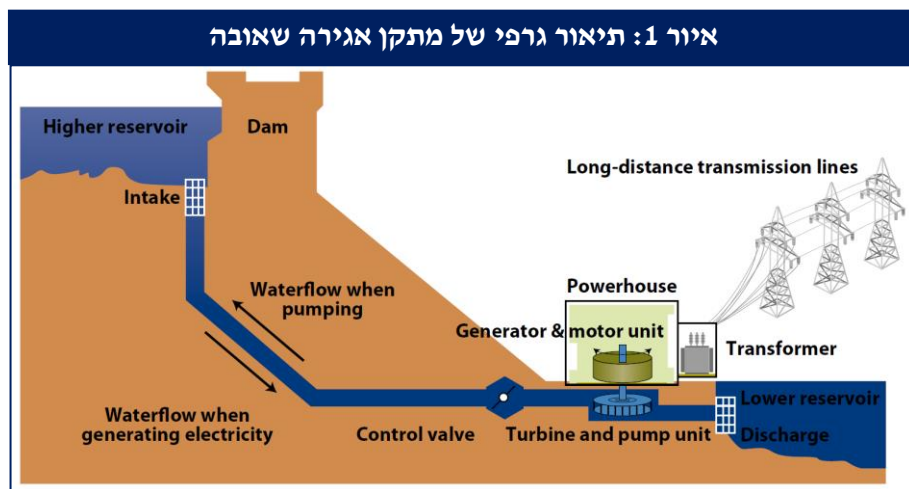
יתרונות – טכנולוגיה בשלה, שיעור פריקה עצמי נמוך מאוד, עלות האנרגיה נמוכה (קוט"ש), אורך חיים ארוך, מתאפשרת אגירה לשעות רבות וניתן לעבוד בהספק גבוה מאוד.

חסרונות הטכנולוגיה – השימוש מוגבל לאתרים עם מאפיינים ייחודיים, פגיעה בטבע, זמן ההקמה ארוך וצפיפות האנרגיה קטנה.

יעילות- 70-85%⁹.

אורך חיים - 30 עד 60 שנים.

עלות הקמה ממוצעת לשנת 2016 לקוט"ש – 25 דולר (טווח - 10-100 דולר).¹⁰



מקור: IRENA, 2017

⁹ הכוונה ל- Round Trip Efficiency. האומדנים של יעילות, אורך חיים, ועלות מבוססים על הערכות של IRENA. BLOOMBERG ו- ATKEARNEY.

¹⁰ עלות ההקמה מהווה אינדיקציה ראשונית בלבד, ואינה מעידה בהכרח על עלות השימוש בטכנולוגיה (LCOE), שכן זו תלויה, בין היתר, במשך ואופי ההפעלה, עלויות תפעול ותחזוקה, וכו'. הערה זו רלוונטית לכלל הטכנולוגיות הנסקרות במסמך זה.

- **אוויר דחוס** – בטכנולוגיה זו דוחסים אוויר לתוך מאגר תת קרקעי, כגון נקרות מלח, ובעת הצורך מוציאים את האוויר מהמאגר, מחממים אותו, ומניעים באמצעותו טורבינה לייצור חשמל.¹¹ חימום האוויר יכול להיעשות באמצעות שריפת דלק או באמצעות שימוש חוזר בחום הנוצר בעת דחיסת האוויר למאגר. איור 2 שלהלן מתאר באופן גרפי את השימוש בטכנולוגיה בשתי הגרסאות.

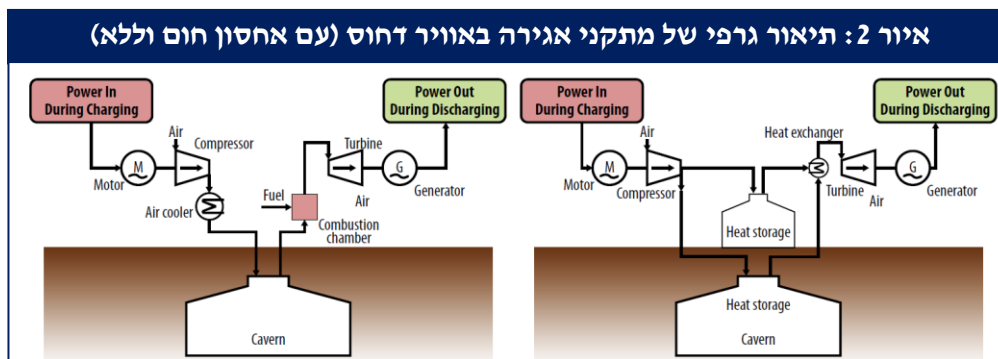
יתרונות הטכנולוגיה – עלות האנרגיה נמוכה (קוט"ש), משך חיים ארוך, מתאפשרת אגירה לשעות רבות וניתן לעבוד בהספק גבוה מאוד.

חסרונות הטכנולוגיה – השימוש מוגבל לאתרים עם מאפיינים ייחודיים, הטכנולוגיה לא נפוצה מספיק, היעילות לא גבוהה וצפיפות האנרגיה קטנה.

יעילות – 40-75%.

אורך חיים – 20 עד 40 שנים.

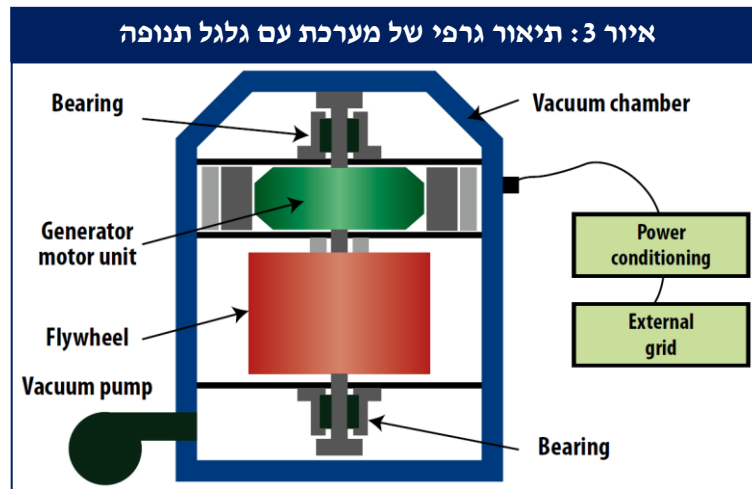
עלות הקמה ממוצעת לשנת 2016 לקוט"ש – 53 דולר (טווח – 80-10 דולר).



מקור: IRENA, 2017

- **גלגלי תנופה** – בטכנולוגיה זו מסובבים גלגל תנופה במהירות גבוהה (30 עד 50 אלף סיבובים בדקה) באמצעות חשמל (בד"כ בזמנים בהם מחיר החשמל אינו גבוה). הגלגל נמצא בתוך מיכל וואקום על מסבים מגנטיים עם חיכוך נמוך מאוד, כך שהגלגל ממשיך להסתובב גם לאחר שהפסקו את השימוש בחשמל. כאשר אנו מעוניינים לספק את החשמל האגור, אנו משתמשים באנרגיה הסיבובית של הגלגל להפעלת גנרטור, מה שמאט את הגלגל עד לעצירה מוחלטת. איור 3 שלהלן מתאר באופן גרפי מערכת עם גלגל תנופה.

¹¹ ישנן חלופות נוספות לנקרות מלח, כגון דחיסת אוויר לבלונים מתחת לפני הים או הקרקע.



מקור: IRENA, 2017

יתרונות הטכנולוגיה – יכולת טעינה מהירה מאוד, משך חיים ארוך, תלות קטנה בין ההספק וכמות האנרגיה, צפיפות הספק גבוהה ומודולריות.

חסרונות הטכנולוגיה – צפיפות אנרגיה קטנה בייחס לסוללות, שיעור פריקה עצמי גבוה, עלות הקמה גבוהה בייחס לסוללות, החלפת מסבים ותחזוקתם מורכבת/יקרה.

יעילות – 70-95%.

אורך חיים – מאה אלף עד מיליון מחזורי טעינה.

עלות הקמה ממוצעת לשנת 2016 לקוט"ש – 3,000 דולר (טווח – 1,500 – 6,000 דולר).

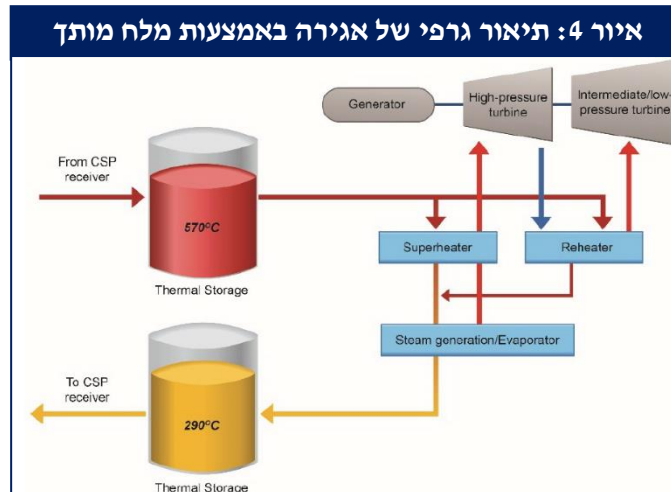
- **מלח מותך** – טכנולוגיה זו עושה שימוש בתמיסת מלח (כגון תמיסת סודיום ואשלגן) לשם אגירת חום בתחנות כוח תרמו-סולאריות. תמיסת המלח עוברת בצינורות הנמצאים על גבי מראות פרבוליות, המרכזות את השמש למוקד הפרבולה, ומשם התמיסה ממשיכה לתוך מאגר אטום שומר חום (ניתן לחשוב גם על סכמה אחרת, למשל עם מגדל חום). בשעת הצורך משתמשים בתמיסת המלח לחימום נוזל, ההופך לקיטור שמניע את הטורבינה. איור 4 שלהלן מתאר באופן גרפי את השימוש בטכנולוגיה.

יתרונות – טכנולוגיה בשלה, מתאפשרת אגירה בהיקפים גדולים ומשך חיי הפרויקט ארוך.

חסרונות – הטכנולוגיה מוגבלת בשל השילוב עם אנרגיה תרמו – סולארית.

יעילות – 80-90%.

אורך חיים – 30 שנים.



מקור: 12 ATKearney, 2018

- **מימן** – בטכנולוגיה זו אוגרים מימן במכלים, בנקרות מלח ואף במאגרי גז טבעי ריקים ומשתמשים בו בעת הצורך כדלק ליצירת חשמל. את המימן אפשר לייצר באמצעות אלקטרוליזר המפצל מים למימן וחמצן או בדרכים אחרות, למשל באמצעות רפורמציה של קיטור ומתאן (המרכיב העיקרי בגז טבעי). לאחר שיש לנו מימן ניתן להכניסו לתוך תא דלק (תא אלקטרו כימי אשר ממיר אנרגיה כימית לזרם חשמלי), בשילוב עם חמצן, לשם יצירת החשמל. איור 5 שלהלן מתאר באופן גרפי את השימוש בטכנולוגיה.

יתרונות – מתאפשרת אגירה לשעות רבות, ניתן לעבוד בהספק גבוה מאוד וצפיפות אנרגיה גבוהה מאוד.

חסרונות – יעילות לא גבוהה, עלות ההקמה גבוהה ובטיחות.

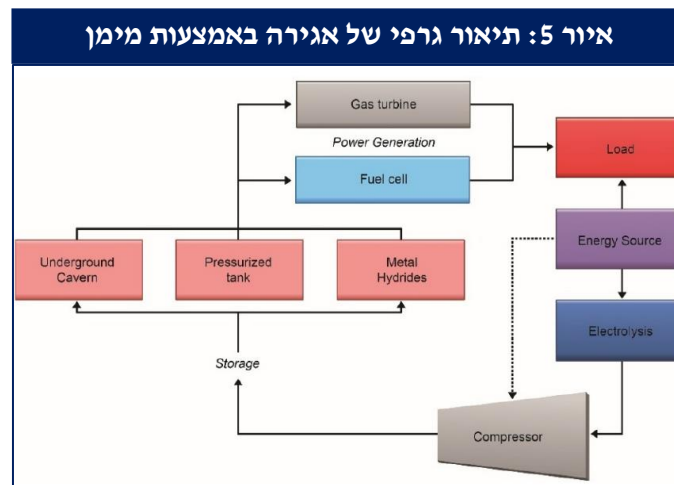
יעילות – אלקטרוליזר (75%) ותא דלק (65%). בשילוב - 48% בממוצע.

אורך חיים – 30-5 שנים.

עלות – השימוש במימן לאגירה רלוונטי לטווח של ימים לכל הפחות, היות ועבור תקופה קצרה של שעות ניתן להסתמך על פתרונות אחרים, זולים יותר, כגון סוללות. בבחינה שנעשתה על ידי בלומברג לשילוב PV עם מימן בבית מלון מנותק רשת (off grid) הצורך כ-5,500 קוט"ש בממוצע ליום, נמצא כי מערכת שתוכל לאגור חשמל למשך שבוע שלם תעלה כ-53 סנט לקוט"ש, ואילו מערכת דומה המבוססת על סוללות ליטיום-יון תעלה כ-1.91 דולר לקוט"ש. כמו כן, באם היינו בונים מערכת היכולה לספק אגירה ליום אחד, עלות המערכת עם המימן הייתה יורדת רק מעט (האלקטרוליזר ותא הדלק היו נשארים בגודל דומה), ואילו עלות

¹² ATKearney Energy Transition Institute, 2018, Electricity Storage Gaining Momentum.

המערכת עם הסוללות הייתה יורדת משמעותית, בשל הקטנת כמות הסוללות. כלומר, השימוש במימן רלוונטי, כאמור, לתקופות ארוכות יחסית.



מקור : ATKearney, 2018

- סוללות ליתיום-יון – סוללה טיפוסית מורכבת משני לוחות (אלקטרודות), האחד חיובי (קטודה) והשני שלילי (אנודה). הקטודה עשויה מליטיום והאנודה עשויה לרוב מגרפיט. בין הלוחות ישנה תמיסה (אלקטרוליט) דרכה עוברים יונים. בעת טעינת הסוללה ממקור חשמל חיצוני נוצר תהליך של חמצון בקטודה המביא לשחרור של יונים. היונים עוברים דרך התמיסה ונקלטים באנודה העוברת תהליך של חיזור. במקביל לתהליך החמצון-חיזור, עוברים אלקטרונים באמצעות מעגל חיצוני מהקטודה לאנודה. בתהליך הפריקה של הסוללה מתרחש תהליך הפוך – מעבר יונים ואלקטרונים מהאנודה לקטודה. איור 6 שלהלן מתאר באופן גרפי את המבנה ואופן הפעולה של תא אלקטרו-כימי.

התרכובות הכימיות של הסוללה נגזרת מהצרכים הנדרשים בשימוש בסוללה. לעיתים הצורך העיקרי הוא בצפיפות גבוהה של הספק או של אנרגיה, משך טעינה, בטיחות, אורך חיים, ולפעמים הדגש הוא בעיקר במזעור עלויות. בסוללות לרכבים נעשה שימוש בעיקר בסוללות מסוג NMC ו-NCA, ואילו בסוללות לשימושים נייחים (stationary storage) נעשה שימוש בסוללות מסוג LFP.¹³ סוללות מסוג NMC הן בעלות צפיפות אנרגיה גבוהה מאוד ולכן יכולות להיות טובות לרכבים חשמליים, היכן שיש מגבלת מקום ומשקל, ואילו סוללות מסוג LFP הן בעלות צפיפות אנרגיה פחות גבוהה, אך העלות שלהם היא קטנה יותר, מה שעושה אותן מתאימות יותר לשימושים נייחים.

¹³ NMC - Lithium nickel manganese cobalt oxide ; NCA - Lithium nickel cobalt aluminum ; LFP - Lithium iron phosphate.

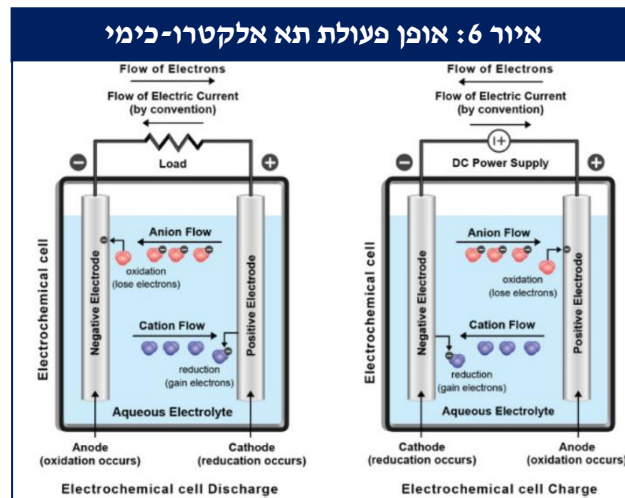
יתרונות – ירידת מחירים ניכרת בשל השימוש בסוללות לרכבים חשמליים, צפיפות אנרגיה גבוהה מאוד, מודולריות, יעילות גבוהה, זמן תגובה.

חסרונות – אי וודאות בשיעור הדגרדציה, אורך חיים בינוני, צורך במחזור, גמישות מוגבלת בבחירת גודל הספק בייחס למשך אגירה, סיכונים בהתחממות הסוללה.

יעילות – 85-98%.

אורך חיים – 1,000 עד 10,000 מחזורי טעינה.

עלות הקמה ממוצעת לשנת 2016 לסוללה מסוג NMC לקוט"ש – 450 דולר (טווח – 200 – 800 דולר).



מקור: ATKearney, 2018

- סוללות עופרת-חומצה – סוללות אלו הן מהוותיקות ביותר ונמצאות בשימוש מסחרי בעולם למעלה מ-100 שנים. הסוללות כוללות אנודה המבוססת על עופרת, קטודה המבוססת על תחמוצת עופרת, ואלקטרוליט המבוסס על חומצה גופרתית. עקרון הפעולה דומה לזה שתואר קודם לכן.

יתרונות – עלות נמוכה בייחס לסוללות נטענות אחרות, טכנולוגיה מוכרת, אופן המחזור ברור ועובד, זמן תגובה.

חסרונות – מספר נמוך של מחזורי טעינה, צפיפות אנרגיה נמוכה, כבדות משקל, אינן מגיבות טוב לפריקה מלאה לאורך זמן, מגבלת שימוש במקומות מסוימים בשל ריכוז העופרת.

יעילות – 70-90%.

אורך חיים – 250-2,500 מחזורי טעינה.

עלות הקמה ממוצעת לשנת 2016 לקוט"ש – 180 דולר (טווח – 105 – 475 דולר).

- סוללות סודיום-גופרית – סוללות סודיום מבוססות על אנודה של סודיום מותך וקטודה של גופרית מותכת. בסוללות אלו הקטודה והאנודה נמצאות במצב צבירה של נוזל, ולכן הסוללות צריכות להימצא בטמפרטורה גבוהה מאוד של 300 עד 350 מעלות סלציוס. סוללות אלו יכולות להתאים לשימושים מסחריים, אך לא לשימושים ביתיים.

יתרונות – צפיפות אנרגיה גבוהה ביחס לסוללות עופרת וזרימה, 99% מהחומרים בשימוש בסוללה יכולים להיות ממוחזרים, שיעור פריקה עצמי נמוך, יכולת פריקת אנרגיה למשך שעות רבות וזמן תגובה.

חסרונות – לא מתאים לשימושים שאינם מסחריים, עלות התפעול גבוהה בשל הצורך בטמפרטורה גבוהה מאוד להפעלת הסוללה.

יעילות – 80-90%.

אורך חיים – 5,000 - 10,000 מחזורי טעינה.

עלות הקמה ממוצעת לשנת 2016 (קוט"ש) – 400 דולר (טווח – 735 – 263 דולר).

סוללות זרימה – סוללות אלו בעלות מבנה ייחודי ושונה ביחס לסוללות שתיארנו קודם לכן. בסוללות זרימה יש שני מכלי אלקטרוליט אשר מתחברים באופן חיצוני לאלקטרודות של הסוללה, כלומר הם אינם נמצאים בתוך מארז הסוללה (בסוללות שהוצגו קודם לכן כל רכיבי הסוללה (אלקטרודה ותמיסה) נמצאו בתוך מארז סגור ואטום). המבנה הייחודי של הסוללה מאפשר לנתק את התלות בין הספק הסוללה, המוגדר על ידי מספר התאים בסוללה וגודל האלקטרודות, לבין כמות האנרגיה המוגדרת על ידי הנפח והריכוז של האלקטרוליט. סוללות הזרימה הנפוצות ביותר כיום הן סוללות העשויות מוונדיום וסוללות העשויות מאבץ-ברום. איור 7 שלהלן מתאר באופן גרפי סוללת זרימה.

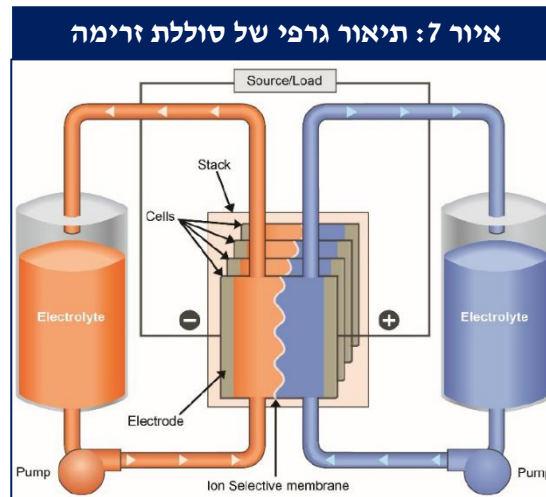
יתרונות – אי תלות בין כמות האנרגיה וגודל ההספק, מודולריות, מחזורי טעינה רבים, יכולת פריקת אנרגיה למשך שעות רבות וזמן תגובה.

חסרונות – סוללות מורכבת ביחס לסוללות קונבנציונליות, טכנולוגיה בשלבי פיתוח, עלויות התחזוקה יכולות להיות גבוהות בשל כמות החלקים בסוללה.

יעילות – 60-85%.

אורך חיים – 12,000 – 14,000 מחזורי טעינה.

עלות הקמה ממוצעת לסוללת זרימה מסוג וונדיום לשנת 2016 לקוט"ש – 380 דולר (טווח – 1,100 - 315 דולר).



מקור: ATKearney, 2018

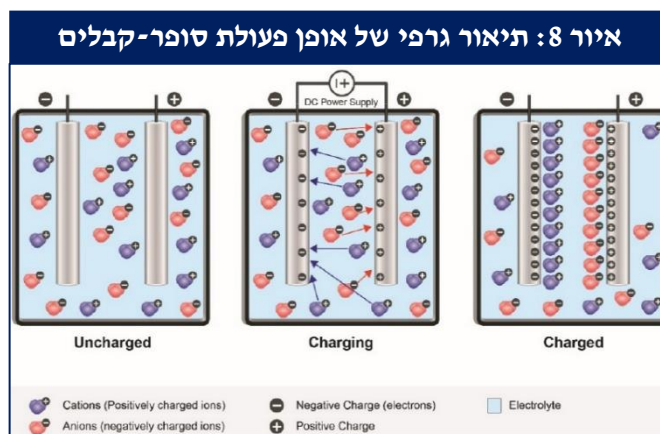
- קבלי על – הקבל מורכב משתי אלקטרודות המופרדות באמצעות חומר שאיננו מוליך חשמל. בזמן טעינת הקבל אלקטרודה אחת נטענת במטען חיובי ואלקטרודה אחרת נטענת במטען שלילי. המטענים נמשכים זה לזה, וכל עוד הם מופרדים הם מאחסנים אנרגיה חשמלית פוטנציאלית. כאשר רוצים להשתמש באנרגיה, מחברים בין האלקטרודות ומקבלים זרם חשמלי. יכולת האגירה של הקבל נקבעת בייחס לגודל האלקטרודות ובייחס הפוך למרחק בין האלקטרודות. כלומר, ככל ששטח הפנים של האלקטרודות גדול יותר וככל שהמרחק ביניהם גדול יותר, כך האנרגיה האגורה יכולה להיות גבוהה יותר. איור 8 שלהלן מתאר באופן גרפי הטכנולוגיה.

יתרונות: יעילות, הספק גבוהה מאוד, מודולרי, אורך חיים וזמן תגובה.

חסרונות: צפיפות אנרגיה קטנה, שיעור פריקה עצמי גבוה ועלות גבוהה.

יעילות – 80-98%.

אורך חיים – 10,000 – 100,000 מחזורי טעינה.



מקור: ATKearney, 2018