

משרד האנרגיה
אגף כלכלה

אגירת אנרגיה

סקירת טכנולוגיות עיקריות לאגירת אנרגיה
והתאמתן לישראל



בשיתוף משרד א. חפץ יעוץ כלכלי וד"ר שוקי וולפוס

מאי 2019

תוכן עניינים

3	תמצית מנהלים
5	1. כללי - אגירת אנרגיה
7	1.1. תועלות מרכזיות משילוב אמצעי אגירה במערכת החשמל
7	1.1.1. שילוב אגירת אנרגיה סולרית ואנרגית רוח
7	1.1.2. הפחתת תנודות ויישור עקומת העומס
10	1.2. ההיבט הכלכלי
12	2. שיטות אגירה עיקריות
12	2.1. אגירה תרמית - Thermal Energy Storage (TES)
14	2.2. אגירה מכנית - Mechanical Energy Storage
14	2.3. אגירה בגז דחוס - Compressed Air Energy Storage (CAES)
17	2.4. אגירה שאובה - Pumped Hydro Storage (PHS)
21	2.4.1. פרויקטים בעולם
23	2.4.2. פרויקטים בישראל
24	2.5. אגירת אנרגיה קינטית (גלגלי תנופה) - Flywheel Energy Storage
26	2.6. אגירה בקבלי על - Supercapacitors Energy Storage
28	2.7. אגירה אלקטרומגנטית בסלילים מוליכי-על - Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)
30	2.8. אגירה במימן - Hydrogen Storage
35	2.9. מצברים - Battery Energy Storage
40	3. סיכום
43	3.1. אגירה תרמית
43	3.2. אגירת אוויר דחוס
43	3.3. אגירה שאובה
44	3.4. גלגלי תנופה
45	3.5. קבלי-על
45	3.6. אגירה במימן
46	3.7. אגירה בסוללות
51	4. אחרית דבר

תקציר מנהלים

משקי האנרגיה והחשמל בעולם ואף בישראל נמצאים בעיצומו של תהליך הצפוי לשנות את מאפייניהם. מקורו של התהליך הינו תופעות סביבתיות כגון ההתחממות הגלובלית, שינויי האקלים ועלייה בהיקף הזיהום הסביבתי בעולם. תופעות אלו מאיימות על איכות החיים של בני האדם וכלל המערכות האקולוגיות.

הצורך לעמוד ביעדי הפחתת פליטת גזי חממה ומהממים והפחתת התלות בדלקים פחמניים הוביל את מובילי הדעה ומקבלי ההחלטות בעולם להכרה כי צמצום השימוש בדלקים אלו והרחבה מסיבית של השימוש באנרגיות נקיות ומתחדשות הינם צעדים הכרחיים לביצוע במסגרת פיתוח משקי האנרגיה והחשמל בהווה ובעתיד. בתקופה האחרונה, מתרכז מאמץ עצום בשיפור ובפיתוח אמצעי ייצור נקיים ו/או המבוססים אנרגיות מתחדשות. ברחבי העולם ניתן לראות "התפוצצות" של פרויקטים כאלו העושים שימוש באנרגיית שמש, רוח, גלים, ביומסה, בידלקים, מימן, גיאותרמיות ומים. רעיונות ופיתוחים חדשים מופיעים בתדירות גבוהה והפיתוח המואץ מוביל לשיפורים טכנולוגיים וירידות מחיר.

מקורות אנרגיות מתחדשות הינם מטבעם תנודתיים ומקשים על ניהול מערכת החשמל הן בצד ההיצע והן בצד הביקוש. כך למשל, חוות רוח יכולה ליהנות מעוצמת רוח מקסימלית ותפוקת ייצור מיטבית דווקא בשעה בה אין דרישה לאנרגיה זו ברשת או כאשר מחיר החשמל למכירה זול מאוד. לפיכך, שילוב מקורות אנרגיה מתחדשת באמצעי הייצור העומדים לרשות הרשת והצרכן עובר דרך אמצעי אגירת אנרגיה. באמצעות שילובם של אמצעי האגירה ניתן לייצר את האנרגיה על פי הזמינות, לאגור אותה ולמכור אותה לרשת על פי הביקוש והמחיר. לחילופין, ניתן לרכוש אנרגיה מהרשת בכדי להגדיל את היקפי השימוש בעת שפל במחיר ובייצור ובמקביל לאגור את האנרגיה העודפת ולמכור חזרה בעת שיא במחיר ובייצור. כך, ניתן לחסוך בהפעלת אמצעי ייצור יקרים ומהממים וניתן יהיה להניב למשק החשמל תועלות בדמות ביזור, יעילות, יציבות ובטחון הרשת. אגירת אנרגיה הכרחית אפוא למשק האנרגיה העתידי ובלעדיה לא יתכן שילוב יעיל של מקורות אנרגיה ורשת החשמל לא תוכל להפוך למודרנית, חכמה, שיתופית ורב-כיוונית.

עולם טכנולוגיות האגירה נמצא בעיצומו של מאמץ גלובלי לפיתוח והטמעה. מחקר אינטנסיבי לאיתור ופיתוח חומרים מיוחדים שישתלבו וישפרו טכנולוגיות אגירה נערך בכל מדינה מתקדמת ובכל מוסד מחקר מוביל. המחקר גם פונה לפיתוח טכנולוגיות אגירה חדשות ושיפור קיימות. חברות הזנק רבות מנסות להציע פתרונות ייחודיים וליישם רעיונות ומדינות רבות משקיעות משאבים עצומים בפרויקטים שיובילו לצבירת ידע, זכויות יוצרים ומקומות עבודה חדשים וכתוצאה מכך להובלה עולמית בתחום שיכול להוות קטר צמיחה לאומי לעשרות שנים קדימה. ראויה לציון במיוחד היא אוסטרליה שמתקיימים בה כיום 40 פרויקטים בבניה של אגירת אנרגיה אשר משכו אליה השקעות בהיקף של כ-8.8 מיליארד דולר אוסטרלי (כ-6.1 מיליארד דולר ארה"ב). בחודש מרץ השנה חצתה אוסטרליה את רף 20,000 המשרות בתחום אגירת האנרגיה והיא מתכננת מכפלות של מספר זה לעשורים הבאים. הפרויקטים שאוסטרליה מובילה מרכזים אליהם עניין מכל העולם והיא כבר הפכה בפועל לחלוצה עולמית ומעצמה של הטמעת חדשנות בתחום.

קיימות טכנולוגיות רבות לאגירת אנרגיה. הסקירה שכאן מתמקדת באלו המתאימות ביותר לאנרגיות נקיות ומתחדשות, להחלקת קו העומס ולשיפור איכות החשמל. נסקרו על קצה המזלג מספר טכנולוגיות אגירה עיקריות: אגירה תרמית, אגירה באוויר דחוס, אגירה שאובה, אגירה בגלגלי תנופה, בקבלי-על, בסלילים מוליכי-על, במימן ובמצברים. בכל אחת מהטכנולוגיות תיאורנו את החוזקות והחולשות, את רמת הבשלות והפיתוח, את ייעודן העיקרי ואת התאמתן לישראל.

דרגת ההתאמה של טכנולוגיה מסוימת לצורך נתון יכולה להיקבע באופן וודאי רק לאחר בחירת מיקום ספציפי להתקנה והגדרת הצרכים המדויקים הנדרשים מהטכנולוגיה.

לפחות בשלוש מתוך הטכנולוגיות שנסקרו יש לדעתנו צורך במחקר המשך ובצלילה לעומק הטכנולוגי-כלכלי: אגירה שאובה, אגירה במימן ואגירה במצברים.

אגירה שאובה - כבר קיימת בישראל עם ארבע התקנות בשלבי פיתוח שונים. לקידום טכנולוגיות אגירה שאובה נדרשים אתרים מיוחדים בעלי תנאים גיאולוגיים, סביבתיים ופוליטיים המאפשרים הקמת מאגרים. מבחינת הטכנולוגיה, אם ישנם תנאים מתאימים להקמת אתרים נוספים, הדבר אפשרי. השאלה היא כלכלית ותיבחן על סמך התוצאות ששיגו המתקנים הקיימים. יש להעמיק בנתוני האמת של הפרויקטים המותקנים בארץ, לחשב את עלות ההקמה, התפעול השוטף ועלות הפקת האנרגיה השוטפת כדי להעריך כדאיות. מומלץ גם להשוות לפרויקטים בעולם כדי להבין איפה הצלחנו והיכן ניתן לשפר.

במימן - מאגרי הגז של ישראל הופכים אותה למתאימה מאוד לכלכלת מימן. גם היכולת לתת מענה בכל סקלה לאגירת אנרגיה אטרקטיבית מאוד מבחינת המדינה. לא נדרשים מגה-פרויקטים על מנת להגיע להישגים בינלאומיים חשובים. יש לחקור את מצב הטכנולוגיה בעולם ברמות האנרגיה השונות מהצרכן הפרטי דרך התחבורה ועד לרמת הרשת. מומלץ להעריך את העלויות של ההקמה, התפעול והייצור בארץ על סמך יצור בגז טבעי ובאלקטרוליזה ולבנות מודלים של כלכלת מימן ברמות אנרגיה ורמות צרכן שונות על פי התנאים שבישראל.

במצברים - יש בישראל מחקרים מתקדמים ביותר והטכנולוגיה יכולה להתאים בכל מקום בו הסוללות אינן מפגע סביבתי והן מתחרות במחיר בפתרונות אחרים. המודולריות של סוללות לבנית בנק סוללות מותאם צרכים היא תכונה אטרקטיבית ליישום בארץ. מומלץ לעקוב מקרוב אחרי הפרויקטים הגדולים של טסלה באוסטרליה ופרויקטים אחרים ברמות שונות ברחבי העולם. חשוב להגיע אל המספרים שמאחורי ההודעות לתקשורת ולנתח את יעילות המצברים לאחר זמן ולאחר מחזורי טעינה-פריקה רבים.

בכל שיטות האגירה הנוספות שנסקרו מומלץ להמשיך במעקב אחר ההתפתחויות שכן התחום דינמי מאוד. רעיונות וחומרים חדשים מופיעים בתדירות גבוהה ופיתוחים שנראו מבטיחים על פניהם נעלמים מהנוף. מומלץ להשקיע במחקר ופיתוח וברעיונות חדשים העשויים ליצור בארץ מקומות עבודה חדשים והכנסות מתמלוגים.

בדומה לעולמות ההייטק והטכנולוגיות האחרות, ישראל יכולה להיות מרכז ידע ומובילה בחדשנות גם בתחום אגירת האנרגיה ולהיטיב עם המדינה ואזרחיה ועם האנושות כולה.

1. כללי - אגירת אנרגיה

אגירת אנרגיה מוגדרת ככליאה של אנרגיה שהופקה באמצעי ייצור או כתוצאה מתהליכי טבע לשימוש בזמן מאוחר יותר. מתקן אשר קיימות לו יכולות אחסון אנרגיה נקרא בד"כ אוגר אנרגיה (Accumulator) או סוללה (Battery). טכנולוגיות אגירה הינן חיוניות לשם קידום משקי האנרגיה והתחבורה כמו גם קידום מאמצי השמירה של הסביבה והפחתת פליטות מזהמים. בהיבטים אלו, היקפי השימוש באנרגיות מתחדשות צפויים להמשיך ולצמוח בשנים הקרובות בין השאר הודות להתפתחות הטכנולוגית של אמצעי האגירה וזאת מכיוון שהתפתחותם מסייעת להעלות את שיעור הנצילות האנרגטית של מתקני הייצור לאורך שעות היממה. כמו כן, טכנולוגיות אגירה מאפשרות הוזלת צרכי האנרגיה של המשק שמקורו בייצור חשמל קונבנציונלי היות והן מפחיתות את הצורך בהקמת אמצעי ייצור המיועדים לספק מענה בשעות שיא ביקוש.

השימוש הרווח בטכנולוגיות אגירת אנרגיה מתקדמות הינו ביישומים קטנים יחסית כדוגמת מחשבים נישאים, טלפונים חכמים, שתלים רפואיים ואמצעים טכנולוגיים אחרים בהם הנושא בעל החשיבות המכרעת הוא כמות האנרגיה האגורה. לעיתים, אפילו העלות הופכת משנית ביחס לצפיפות האנרגיה האפשרית. במקרים אלו צפיפות גבוהה של אנרגיה אגורה משמעותה משקל ו/או נפח מצומצמים, ניידות גבוהה יותר ומשך שימוש ארוך יותר בין טעינות. לעיתים קרובות אלו הפרמטרים שמאפשרים את עצם קיומה של הטכנולוגיה הניידת המסוימת.

בטווח ערכי אנרגיה גבוהים יותר נדרשות טכנולוגיות אגירה ייחודיות בעלות מאפיינים שונים מאלו המאפיינות את פתרונות האגירה ביישומים קטנים וניידים. יישומים כאלו מביאים, בין היתר לתועלות המתבטאות ביישור עקומת העומס (Load Leveling), אגירת אנרגיה שמקורה בשמש וברוח, ואגירה לצרכי תחבורה בכלל והנעת רכבים בפרט.

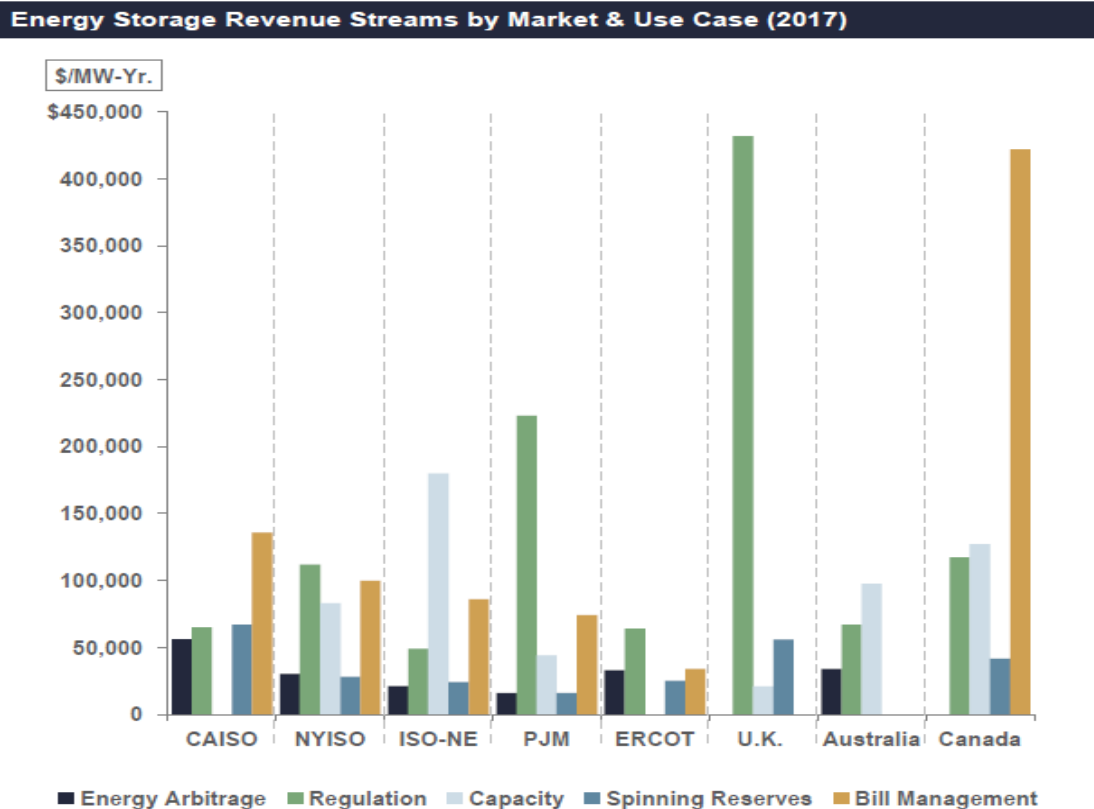
לפתרונות אגירת אנרגיה שהוזכרו לעיל תפקיד מרכזי בעמידה ביעדי הפחתת השימוש בדלקים פוסיליים. בשונה מטכנולוגיות אגירת אנרגיה בטווחי אנרגיה נמוכים, הפרמטרים החשובים באגירה במערכות גדולות הינם העלות עבור יחידת אנרגיה (למשל עלות לקוט"ש), עלויות תפעול, היעילות של מחזור אנרגיה, וזמן החיים של רכיבים קריטיים במערכת. המשתמשים ובעלי העניין מעוניינים בדבר"כ בתקופות הפעלה של הרכיבים העיקריים בפרקי זמן של 25 שנה ומעלה. כמו-כן, פרמטרים מרכזיים להערכה של טכנולוגיות אגירה נוגעים להיבטים של בטיחות ואיכות סביבה.

אמצעי האגירה צפויים לשפר את יכולות ניהול מערכת החשמל במשק היות ובעיה מרכזית של רשת חשמל גדולה הינה התאמת רמת האנרגיה ברשת לצרכים אשר עוברים שינויים גדולים מאד בטווחי זמן יומיים, שבועיים ועונתיים. נוסף על כך, איכות החשמל מהווה גם היא בעיה הבאה לידי ביטוי בתופעות טרנזיאנטיות והפרעות קצרות אשר גוררות אי-יציבות ובעיות נוספות ברשת. כדי להתגבר על הבעיות הללו נדרשות טכנולוגיות אגירה מתקדמות ומערכות בקרה חכמות השולטות ומשלבות במהירות וביעילות בין אמצעי הייצור, ההולכה וההפצה וכמובן האגירה. כאמור, הפקטורים העיקריים במדידה הכמותית והאיכותית של ניהול המערכת ורשת החשמל כוללים עלות, אמינות, יעילות, זמן חיים, בטיחות ואיכות סביבה.

איור 1 מציג הערכה של הכנסות מאגירת אנרגיה הנובעות מפרויקטים קיימים במדינות נבחרות (CAISO, NYISO, ISO-NE, PJM, ERCOT) הם גופי ייצור, הולכה, הפצה וניהול מערכות חשמל באזורים שונים בארה"ב). ניתן לראות כי ההכנסות מאגירה הן רב-ערוציות. ניתן כמובן לייצר הכנסות מהאגירה עצמה, כלומר מיכולת הקיבול והאחסון של האנרגיה. כמו-כן ניתן לייצר הכנסות מניצול פערי המחירים בין קניה למכירה של האנרגיה, מעתודות אנרגיה המייצבות תדר ומונעות הפרעות, מניהול ורגולציה וממודל המניה והחיוב. עוד ניתן לראות באיור 1 כי מקור ההכנסה

העיקרי הוא תלוי מקום והתקנות ספציפיות. בקנדה, למשל, ההכנסה העיקרית מגיעה דווקא מניהול החיובים והמניה ובבריטניה דווקא הרגולציה מהווה מקור הכנסה עיקרי. אנו למדים מכך שאופק ההכנסות מטכנולוגיות אגירת אנרגיה הוא רחב ומגוון הרבה יותר מאשר קניית ומכירת האנרגיה.

איור 1. הכנסות מאגירת אנרגיה הנובעות מפרויקטים קיימים במדינות נבחרות



מקור: Lazard and Enovation Partners, Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis

בסקירה זו יפורטו טכנולוגיות ושיטות האגירה הרווחות והמקובלות כיום לצד ההתפתחויות של הטכנולוגיות ושיטות האגירה הצפויות להוביל בעתיד את התחום ובהן:

- **אגירה שאובה -** שיטת אגירה הנמצאת בשימוש נפוץ ומטרתה להקטין תנודות ארוכות טווח בצריכה הינה אגירה שאובה על בסיס מאגרי מים הנמצאים בגובה והמים מועלים אליהם בזמנים של שפל בצריכה כאשר מחיר החשמל נמוך באופן יחסית. אולם, טכנולוגיות האגירה השאובה אפשרית רק במקומות מסוימים מאד בהם התנאים הגיאולוגיים תומכים בה.
- **אגירת אוויר דחוס -** אוויר דחוס הוא מרכיב חיוני במרבית תהליכי הייצור בתעשייה. אגירת אוויר דחוס בסקלה גדולה מציבה דרישות קשות למיקום ולכן למרות שהטכנולוגיה נידונה במקומות רבים, ניתן למצוא מעט מאד התקנות שלה בעת הזו.
- **אגירה מכנית בגלגלי תנופה -** טכנולוגיה העשויה לשפר את יכולת ההתמודדות על טרנזיאנטים והפרעות ברשת החשמל. אגירה מכנית בגלגלי תנופה גדולים היא טכנולוגיה מתפתחת המתמודדת היטב עם ההפרעות קצרות המועד ברשת. משרד האנרגיה האמריקאי העריך כי גלגלי תנופה בהספקים של 100 מגה-וואט יספיקו כדי לנטרל כ-90% מההפרעות ברשת במדינה בסדר גודל של קליפורניה.

• **טכנולוגיית אגירה בקבלי על** - טכנולוגיה העשויה לשפר את יכולת ההתמודדות על טרנזיאנטים והפרעות ברשת החשמל. טכנולוגיית אגירה בקבלי-על לצורך טיפול בהפרעות ברשת מתפתחת והולכת וכבר מגיעה להתקנים בהספקים של כ-5 מגה וואט. לאחרונה החל גם פיתוח מסחרי של אגירה בסלילים מוליכי-על הצפוי להתמודד עם גלגלי התנופה באיכות ובמחיר.

גישות נוספות נמצאות בפיתוח מתמיד ובכללן מערכות אלקטרוכימיות (מצברים) בהספק גבוה. כאן, היחס בין כמות האנרגיה האגורה למחיר הוא פרמטר בעל חשיבות עיקרית. בניגוד לשימושים של סוללות ומצברים ביישומים קטנים, הגודל והמשקל כאן הם בדרי"כ פחות חשובים.

1.1. תועלות מרכזיות משילוב אמצעי אגירה במערכת החשמל

1.1.1. שילוב אגירת אנרגיה סולרית ואנרגית רוח

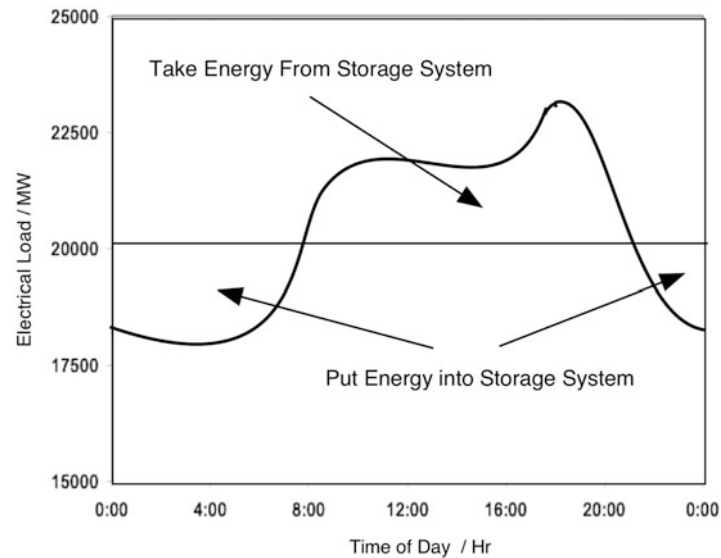
מקורות ייצור של אנרגיות שמש ורוח נחשבים בדרי"כ למקורות אשר יכולים לספק צרכים משתנים מקומיים וכן לספק אנרגיה אל הרשת. ואולם, תפוקת האנרגיה ממקורות אלו לא ממש תואמת את התלות בזמן של צריכת האנרגיה ברשת.

כך למשל, שעות השיא של קרינת השמש מתאימה רק באופן גס לשעות העבודה בתעשייה ומקורות הרוח מסונכרנים עוד פחות עם עקומת הצריכה. לפיכך, נדרשים מנגנונים ואמצעים של אגירת אנרגיה כדי לסייע באינטגרציה של מקורות אנרגיה מתחדשת אלו עם הרשת. תנודות קצרות מועד בתפוקת האנרגיה, כמו ענן החולף מעל לוחות סולאריים או נפילה רגעית במהירות הרוח, הן פחות קריטיות בסוג כזה של יישום. ביישום מסוג כזה, כמו התאמה בין הייצור לצריכה ברשת גדולה, מצברים זולים יחסית, שאינם מעניינים ביישומי סקלה קטנה בגלל גודלם או משקלם, יכולים להיות מעניינים ולהציג יתרונות.

1.1.2. הפחתת תנודות ויישור עקומת העומס

הזכרנו כאן את השונות בזמן של כושר הייצור של אנרגיות מתחדשות כדוגמת אנרגית שמש או רוח. התלות בזמן אינה מאפיינת רק את אמצעי הייצור אלא גם, ואולי בעיקר את הצריכה. עקומת העומס המייצגת את צריכת האנרגיה הינה עקומה התלויה חזק בזמן ומציגה שונות בטווח זמן תוך-יומי, שבועי ועונתי.

איור 2. שונות תוך יומית של עקומת העומס. הקו האופקי מייצג ממוצע צריכה והחיצים מצביעים על אזורים בהם כדאי להשתמש באגירת אנרגיה



איור 2 מציג דוגמא לשינויים תוך יומיים בעקומת העומסⁱ. באיור מוצגת באופן סכמתי שונות תוך יומית של עקומת העומס. הקו האופקי מייצג ממוצע צריכה והחיצים מצביעים על אזורים בהם כדאי להשתמש באגירת אנרגיה.

העומס מורכב מהצריכה בסקטור המגורים, המסחרי והתעשייתי ואלו עושים שימוש באמצעי צריכה שונים המשתנים בזמן בהתאם לשינוי בתנאים. למשל, תאורה תלויה בשעות האור ושעות העבודה, מיזוג תלוי בטמפרטורה וכו'. הקו האופקי באיור מציג ממוצע צריכה והאזורים שמעליו ומתחתיו הם אזורים שיכולים להסתייע באמצעי אגירת אנרגיה במטרה לשטח ככל האפשר את עקומת העומס ולהביאה למצב אידאלי של צריכה קבועה המסופקת על ידי ייצור קבוע. כך למשל, בשעות בהן הצריכה נמוכה מהממוצע, נשתמש בחשמל כדי למלא את מאגרי האנרגיה שלנו ואילו בשעות בהן הצריכה גבוהה מהממוצע, נשתמש באנרגיה האגורה ונזריק אותה לרשת במטרה להשלים את החסר. ברור מאליה שכל מחזור אנרגיה הכולל טעינה ופריקה של המאגר הוא בעל נצילות שאינה אידאלית ואף רחוקה מכך. לפיכך, הכדאיות של השימוש באנרגיה אגורה לצרכי יישור עקומת העומס תלויה במחיר החשמל בשעות העומס והשפל, באמצעי הייצור הזמינים, במקום, בעלות ההקמה והתפעול של טכנולוגית האגירה וביעילותה.

בכתב העת "פאזה" של חברת החשמל, התפרסמו נתוני עקומת העומס בשני קיבוצים דומים הנמצאים בעמק בית שאן ולהם פרופיל צריכה דומהⁱⁱ.

איור 3. עקומת העומס בקיבוץ בעמק בית שאן בו אין אמצעי אגירת אנרגיה



איור 3 מציג את עקומת העומס באחד הקיבוצים אשר אין בו מערכת אגירת אנרגיה המשולבת ברשת. ניתן לראות כי השונות בצריכה בין שעות השפל לשעות השיא מגיעה ל-70% ומעלה. כמו-כן נראה כי שיא הצריכה מתקבל בשעות הצהריים בהן תעריף החשמל מקסימלי.

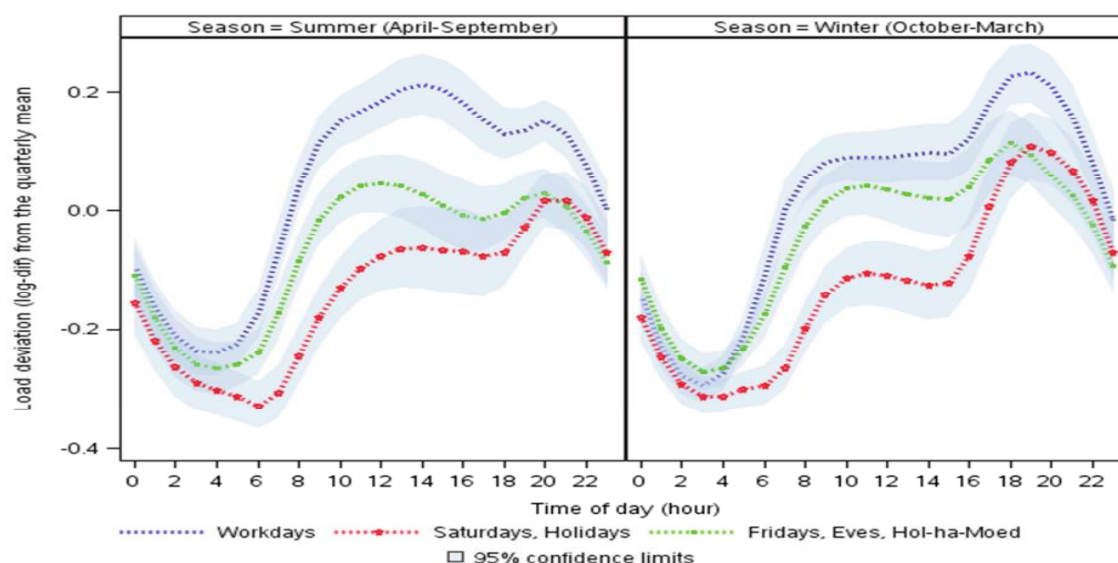
איור 4. עקומת העומס בקיבוץ בעמק בית שאן בו מותקנת אגירת אנרגיה תרמית



מנגד, בקיבוץ אחר בעמק הותקנה מערכת אגירה תרמית מסוג אגירת חום וקור. עקומת העומס עבור קיבוץ זה מתוארת באיור 4 וכאן רואים בבירור שהעקומה השתטחה באופן משמעותי. השונות בין השיא לשפל ירדה אל מתחת 40% ומשכי השהייה בנקודות השיא והשפל ירדו גם הם. הנתונים המובאים במאמר אינם מתייחסים לעלויות הכרוכות בשילוב האגירה התרמית, לעילות הכוללת של המהלך ולכדאיותו הכלכלית, אך היכולת הטכנולוגית מודגמת כאן בבירור. בעזרת טכנולוגיות אגירת אנרגיה, ניתן לשטח את עקומת העומס ולשפר את ההתאמה בין כושר הייצור ועלותו לבין הצריכה.

השונות השעתית של העומס בתלות בימי השבוע מודגמת היטב באיור 5 להלן הלקוח מתוך דו"ח של בנק ישראל מסוף שנת 2017, המנסה לחזות את התפלגות ביקושי השיא העתידייםⁱⁱⁱ. המחקר משתמש בנתוני הייצור הזמינים לבנק שהתקבלו מרשות החשמל והוא התבצע תחת ההנחה שהייצור והצריכה תואמים זה את זה. הקו הכחול מייצג את ימי העבודה בשבוע, האדום שבתות וחגים והירוק ימי שישי, ערבי חג וחול המועד. בחלקו השמאלי של איור 5 מוצגים הנתונים בעונת הקיץ ובימין אלו של החורף. למעט השעות הקטנות של הלילה בחורף, הצריכה גבוהה יותר באופן משמעותי לאורך כל יום העבודה לעומת ימי המנוחה. שיא הצריכה בקיץ מתרחש בערך בשעה 14:00 ובימי המנוחה שיא הצריכה נדחה לשעות מאוחרות יותר, בסביבות 20:00. בימי שישי וערבי חג, ניתן לראות את שני השיאים, האחד ככל הנראה נגרם בשל קיומם של עבודה ומסחר חלקיים והשני, מקביל ליום המנוחה ומשקף את הצריכה הביתית. ניתן גם לראות שכמעט לאורך כל סופי השבוע, עקומת הצריכה כולה נמצאת מתחת לממוצע המתואר כקו האפס. מנקודת מבטו בדו"ח הנוכחי, ברור שסופי השבוע טובנים בחובם אפשרות לניצול כושר הייצור לצורך אגירת אנרגיה שתשמש אח"כ בשעות השיא בימי העבודה. ברור גם שניצול כושר הייצור העודף בסופי שבוע לטובת אגירת אנרגיה מחייב מאגרים מסיביים ומבוזרים המסוגלים לקלוט אנרגיה גבוהה כל כך.

איור 5. הפרופילים השעתיים של ייצור החשמל על פי ימות השבוע. מקור: בנק ישראל ^{iv}



ראינו אם כך, כיצד טכנולוגיות אגירת אנרגיה יכולות להיות החיץ שמאפשר התאמה טובה יותר בין עקומות כושר הייצור לבין עקומות העומס. סקלת האנרגיה משתרעת על פני טווח עצום. בצריכה ביתית, האגירה יכולה לשרת לצורך שיטוח עקומת העומס של הצרכן כך שיהנה מתעריפים נוחים יותר. צרכנים גדולים יותר בתעשייה ומסחר יכולים לשטח את העקומות, לשפר את איכות החשמל ולבצע אופטימיזציה של העלות. בהתקני ייצור מבוססי אנרגיות מתחדשות האגירה תשמש ליישור עקומת הייצור והאספקה לרשת וברשתות גדולות יותר האגירה תשמש לחיסכון בהפעלת אמצעי הייצור היקרים המשמשים בשעות השיא ולניצול אלו הזולים בשעות שפל הצריכה לטעינת המאגרים. בבחינה נכונה של טכנולוגית אגירה המותאמת לכל סקלה ושימוש, ניתן עקרונית להשיג חיסכון משמעותי מהרמה הפרטית ועד הלאומית.

1.2. ההיבט הכלכלי

שילוב אמצעי אגירת אנרגיה במשק החשמל צפוי להיות בשנים הקרובות חיוני ואף הכרחי להשגת תועלות בדמות ביטחון אנרגטי, הבטחת כושר הייצור והבטחת הפיתוח העתידי של המשק. באמצעות תועלות המושגות בזכות האגירה כל תא משקי מסוגל ליצור מלאי ולאגור חומרי גלם המבטיחים את המשך פעולתו לפרק הזמן שהוחלט עליו, גם אם נותקה לרגע שרשרת האספקה. המאגר הוא חיץ (buffer) המאפשר פעולה רציפה וחלקה ומנטרל תנודות בעלות תדר גבוה. בבית, בתא המשפחתי, אנו שומרים במזווה ובמקרר פריטים המאפשרים את קיום התא למשך זמן מה גם אם כל החנויות הקמעוניות תיסגרנה למשך זמן זה. בעסק ובמפעל, ניצור מאגר של חומרי גלם המבטיחים פעולה חלקה וברמה המשקית לאומית, ניצור מאגרים המאפשרים את פעולת המשק בעתות שגרה וחרום.

אנרגיה היא בסיסית הרבה יותר מחומרי גלם. ללא אנרגיה, דבר לא יכול להתקיים. אלא שכאן תמונת האגירה היא אחרת ואנו מאצילים סמכויות אגירה. רובנו איננו "אוגרים חשמל" בבית ואיננו מצטיידים במכלים של דלק. כולנו סומכים על יצרני ומשווקי האנרגיה ומניחים שנמצאים בידם המאגרים הנחוצים לצורך פעולה רציפה, חלקה וטובה בכל עת. במקומות בהם איננו יכולים לסמוך על ספקי האנרגיה, נצטייד גם ברמה הביתית. כך למשל, ההפרעות ברשת החשמל מאלצות אותנו להצטייד במערכות אל-פסק וגנרטורים למערכות קריטיות בבית או בעסק.

כאשר מדובר על אגירה שאינה לצורכי הישרדות והבטחת פעילות אלא לטובת התייעלות, שיפור ורווח, הגורם הכלכלי הופך להיות חשוב ביותר ויכול לקבוע אם נאגור דבר מה או נותר עליו ואם כן, באיזו שיטה.

אגירת אנרגיה שבאה להתמודד עם יישור עקומת העומס עושה זאת בפועל ע"י הגדלת הצריכה בשעות השפל והגדלת הייצור בשעות השיא. בשעות השפל נרכוש חשמל בתעריף זול מחברת החשמל ונטען באמצעותו את מאגר האנרגיה שלנו. בשעות השיא נפרוק את האנרגיה האגורה מהמאגר, נייצר באמצעותה חשמל ונמכור אותה חזרה לרשת בתעריף גבוה. כדי לבחון אם התהליך כדאי עלינו להתייחס ליעילות הכללית של מחזור הטעינה והפריקה, אבדני אנרגיה שוטפים במאגר, עלויות תפעול ועלויות תחזוקה. על כל אלו נצטרך להוסיף את עלויות ההקמה והמימון כשהם מחולקים על פני משך החיים של הטכנולוגיה. החשבון פשוט:

מחיר האנרגיה בשפל + עלויות ואבדנים > מחיר המכירה לרשת

העיקרון אמנם פשוט וטריוויאלי, לקנות בזול ולמכור ביוקר. אלא שחישוב העלויות הכרוכות בהפעלת טכנולוגית אגירה מסוימת הוא מסובך ביותר בעיקר משום שבכל התקנה ישנם פרמטרים מיוחדים לה ומשום שרובן המכריע של הטכנולוגיות עדיין אינן בשלות מספיק כדי לדעת מראש באופן מדויק מה תהיינה עלויות ההקמה, התחזוקה, האחסון וההפקה השוטפים.

המצב פשוט יותר כאשר מדובר באגירת אנרגיה ממקורות מתחדשים. כאן למעשה האיבר הימני במשוואה הפשוטה שכתבנו הינו "אפס" היות והחוזה מייצרת ממילא את האנרגיה הנאגרת. אם נניח שאנו מפעילים חוות טורבינות רוח וברגע מסוים החווה מייצרת אנרגיה אך אין דרישה ברשת והיא איננה מעוניינת לרכוש מאתנו את האנרגיה, האפשרויות שעומדות בפנינו הן לאגור או "לזרוק". אם החלטנו לאגור, אזי כאשר יש דרישה לאנרגיה מהרשת, מחירה הרגעי של האנרגיה אינו שיקול לקניה אלא למכירה בלבד שכן החווה שלנו מייצרת עבור עצמה את האנרגיה. לפיכך במקרה של מקור אנרגיות מתחדשות משולב עם אגירה, נוכל למכור בכל רגע בו מחיר המכירה גבוה מעלויות האגירה.

ההבדל המשמעותי הזה בין אגירה מבוססת אנרגיה מהרשת לבין אגירה מבוססת אנרגיה מתחדשת יוצר שונות גדולה במסקנות המתפרסמות על ידי חוקרים וסוקרים. ניתן לראות כתבות המציגות אגירת אנרגיה כ"משנה המשחק" (Game Changer) אשר ישנה את פני משק החשמל וכתוצאה מכך את אופן התפתחות האנושות.^v ניתן גם לראות כתבות המטילות ספק בעצם הכדאיות הכלכלית אשר מבטא הרעיון של אנרגיות מתחדשות ואגירה.^{vi}

בראיה רחבה יותר, הלאומית, ההיבט הכלכלי מקבל מימד נוסף. אוסטרליה היא אחת המדינות החלוצות והפעילות ביותר בתחום האנרגיות המתחדשות והאגירה. בדו"ח מהשנה שעברה (2018), מועצת האקלים האוסטרלי מתארת 40 (!) פרויקטים רחבי היקף של אנרגיה מתחדשת הנמצאים בעת הזו בהקמה.^{vii} הדוח צפה תוספת של 13,000 מקומות עבודה באוסטרליה בעקבות הפרויקטים הללו ואכן, בפרסום מתאריך 15/4/19, אינדקס האנרגיות המתחדשות של אוסטרליה הוציא הודעה כי לראשונה נחצה באוסטרליה קו ה-20,000 העובדים בתעשיית האנרגיות המתחדשות.^{viii} בדו"ח נכתב גם כי פרויקטים אלו הביאו לאוסטרליה 8.8 מיליארד דולר אוסטרלי בהשקעות וכי ארנסט ויאנג (E&Y) בנו מודל האומד תוספת של 28,000 משרות אשר יכולות להיווצר בתחום האוסטרליה יכולה להגיע ל-50% ייצור באנרגיות מתחדשות עד שנת 2030. לעוצמה הזו תהיה השפעה מרחיקת לכת על המשק האוסטרלי. הגידול במקורות אנרגיה מתחדשים צפוי להוזיל את האנרגיה ולגלגל חלק מההוצאה הזו על כל התעשייה.

ישראל, הידועה בחלוציות והיצירתיות שלה, עתידה לממש גם היא מדיניות של האצה מסיבית של פרויקטים משמעותיים בתחום האנרגיות המתחדשות והאגירה. רעיונות, המצאות ופיתוחים ישראלים חדשים צפויים להוות מקור הכנסה למדינה וקטר צמיחה מקביל לתעשיית ההייטק. בהמשך נתאר חלק מהפרויקטים באוסטרליה בהקשר לטכנולוגיות הספציפיות הנסקרות.

2. שיטות אגירה עיקריות

בפרקים הבאים יתוארו בתמצית שיטות אגירה עיקריות ורמות האנרגיה בהן קיים פוטנציאל טכנו - כלכלי בשילובן במשק האנרגיה.

2.1. אגירה תרמית - Thermal Energy Storage (TES)

מאפייני צריכת האנרגיה במשק משתנים על פני השנים. להמחשה, בדו"ח בנק ישראל שפורסם לפני מספר שנים ניתן למצוא הצגה של מגמות ברורות לפיהן לאורך השנים עולה בהתמדה חלקם של משקי הבית והמסחר בצריכת החשמל ואילו חלקה של התעשייה הכבדה בצריכה יורד^{ix}. כך, בשנת 2015 עמד חלקם של משקי הבית, השירותים והמסחר על 65% מכלל צריכת החשמל. במגזרים אלו עיקר הצריכה הינה עבור אמצעי תאורה ולחימום/קירור. לסטר בראון בספרו "Mobilizing to save civilization"^x משתמש בנתונים של Earth Policy Institute^{xi} המראים כי צריכת האנרגיה הכללית לתאורה בעולם בשנת 2005 עמדה על כ-19% מסך הצריכה והיא צפויה לרדת בכ-70% ל-7% בעקבות החלפה לתאורת LED ותאורה מתקדמת אחרת. נובע מכך שעיקרה של הצריכה למגורים, שירותים ומסחר מיועד למיזוג אוויר, חימום או קירור. צריכת אנרגיה זו למטרת מיזוג מסופקת בעיקרה בעולם ע"י גז וחשמל ובארץ החשמל עדיין דומיננטי. ניתן ליעל ולהקטין צריכת אנרגיה זו בכמה אופנים. למשל, באמצעות הקטנת זרימת החום בין הסביבה לחלל הממוזג דרך שיפור הבידוד התרמי. אפשרות נוספת היא שימוש באגירת חום/תרמית. האמצעים לאגירת חום כוללים מכלי מים או תערובת קרח מרוסק דמוי "ברד" (Slush), מסות של לבנים או סלעים המחוממים וניתנים לגישה באמצעות מחליפי חום, מאגרי מים תת-קרקעיים הלכודים בין שכבות בלתי חדירות, חומרים כימיים מיוחדים בעלי אנרגיה כמוסה האגורה במעברי פאזה בהם^{xii} ועוד. המקור לאנרגיה האגורה באמצעים אלו יכול להיות משאבות חום העושות שימוש בחשמל זול בשעות השפל ותורמות ליישור עקומות העומס, ממפעלים המשלבים חום ואנרגיה אחרת (combined heat and power plants – CHP), חום המיוצר באנרגיות מתחדשות וחום עודף הנוצר בתהליכים שונים (בעיקר בתעשייה).

כאשר מדברים על אגירה תרמית, מבדילים בין שתי גישות: חום "גלוי" וחום "כמוס". חום כמוס הוא חום המשתחרר כאשר חומר עובר מעבר פאזה. למשל, במעבר בין נוזל למוצק, גז לנוזל או במעברים מבניים פנימיים ללא שינויי מצב צבירה. מחקר נרחב מתרחש בעולם במטרה לאתר ולשפר חומרים מסוג זה, CPM – Change Phase Materials, ולהתאימם לאגירת אנרגיה. סקירה של חומרי CPM והתאמתם לאגירת חום פסיבית בבניינים מובאת במאמר משנת 2013^{xiii}. בדוח זה אין בכוונתנו להעמיק בנושא.

חום גלוי הוא מונח אינטואיטיבי. זהו חום ש-"מרגישים" אותו. אם ניקח חומר כלשהו ונחמם אותו, נסיף לו אנרגיה חום התלויה בקיבול החום שלו, בכמות החומר ובהפרש הטמפרטורה שיצרנו בינו לבין הסביבה:

$$q = \rho C_p V \Delta T$$

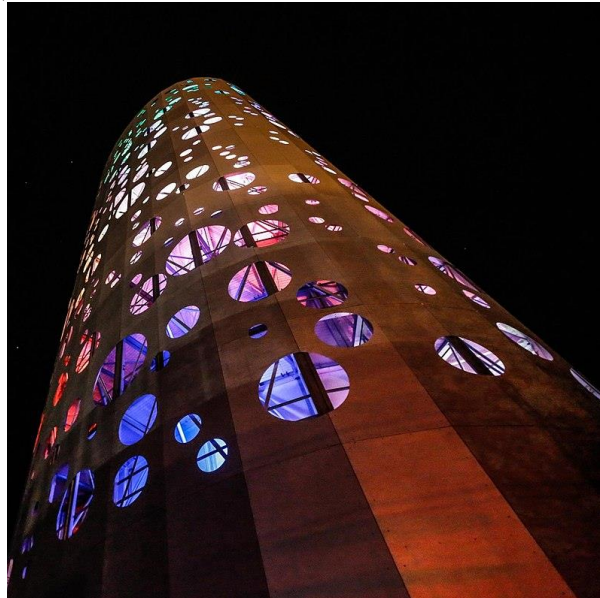
כאשר q היא האנרגיה החומנית, ΔT הוא הפרש הטמפרטורות, C_p , קיבול החום, V , נפח החומר המחומם ו- ρ , צפיפות החומר. קל לראות מכאן כי כדי לאגור אנרגיה גבוהה נדרשת כמות רבה של

חומר בעל קיבול חום גבוה והפרש טמפרטורות גדול ככל האפשר. כמות גבוהה של חומר משמעה עלות גבוהה אלא אם מדובר על חומר זמין וזול כמו מים. לבד מיתרונות הזמינות והעלות, למים גם קיבול חום גבוה מעל כל החומרים השימושיים^{xiv}, מעל $4000 \text{ J/Kg}^{\circ}\text{K}$. מנגד, תחום הטמפרטורות האפשרי לעבודה עם מים הוא $5^{\circ}\text{C} - 95^{\circ}\text{C}$, התחום שבין הקיפאון לרתיחה. לא זו בלבד שזהו תחום מצומצם, איכות האנרגיה המתקבלת תלויה ישירות בטמפרטורה והיא עולה ככל שטמפרטורת האגירה עולה. לפיכך, כאשר רוצים לעבוד בטמפרטורות גבוהות ולהעלות את איכות האנרגיה המתקבלת, עוברים לחומרים כמו לבנים, חימר וסלעים. אלו אמנם בעלי קיבול חום קטן פי 4 ויותר מזה של המים אך צפיפותם גבוהה מזו של המים וגם הם זמינים וזולים.

בתמונה 5 נראה מגדל אגירת החום בבולזנו שבהרי טירול בצפון איטליה^{xv}. המגדל נחנך ב-2017 והחל לפעול בשנה שעברה (2018). מדובר על מגדל בגובה 43 מ' עם נפח אגירה של 5800 מ"ק של מים בטמפ' של 95°C , קרוב לרתיחה. סך האנרגיה האגורה במגדל היא 220 MWh (מגה-וואט-שעה) והיא מתקבלת מתוך שריפת פסולת תעשייתית במשרפה סמוכה. אנרגיה זו צפויה לשרת כ-1500 משקי בית בעיירה בה הופעל המגדל. המגדל עצמו הוא אטרקציה ארכיטקטונית כאשר הוא משובץ בחלונות שקופים עם תאורת לד צבעונית היוצרת בלילה מופע ייחודי של בועות צבעוניות (תמונה 6).

חשבון פשוט מראה כי צפיפות האנרגיה האגורה המקסימלית בדוגמא זו היא כ-130 קילו-ג'אול לק"ג. הנתונים על יעילות ההתקן אינם מפורסמים וגם אם נניח לצורך העניין כי היעילות היא 100% הרי שמדובר עדיין כאן על צפיפות אגירה נמוכה בכשלושה סדרי גודל מצפיפות האנרגיה של גז טבעי (כ-54 מגה-ג'אול לק"ג), דלק נוזלי (כ-46 מגה-ג'אול לק"ג), או מימן (120-140 מגה-ג'אול לק"ג)! יתר-על-כן, ככל שאנו שואבים אנרגיה מהמאגר התרמי וטמפרטורת המים בו מתקררת, כך איכותה של האנרגיה הנותרת במאגר פוחתת ויכולתה לבצע עבודה יורדת.

תמונה 6. מגדל אגירת אנרגיה תרמית אוגר מים חמים הנמצא בבולזנו, איטליה. קרדיט: "Brtelby08"^{xvi}



אין באמור כאן כדי לפסול את השימוש באגירה תרמית במים אלא כדי לומר שיש לבחון את כדאיותה באופן נקודתי. בדוגמא של בולזנו, הכדאיות ברורה. מגדל האגירה נסמך על מקור אנרגיה קיים ממילא, משרפה סמוכה, אשר מייצר חום עודף שהיה מתבזבז לריק ללא אגירתו. ההשקעה בהפיכת מגדל האגירה למבנה אטרקטיבי, משכה אליו התעניינות מכל העולם, הוא מובא כדוגמא

בויקיפדיה^{xvii}, תורם ערך ליחסי הציבור של החברה שבנתה אותו ומעלה את המודעות לנושאי אנרגיה, חיסכון ואיכות הסביבה. לדעתנו, גם בארץ כדאי לאתר וליזום פרויקטים בהם מצטרפות כמה תועלות רב-תחומיות לכדי פרויקט רב-ערך. מקורות אנרגיה זמינים בעלי אנרגיה עודפת בשעות השיא (למשל אתר שריפת פסולת כמו חירייה, אתרי אנרגיה סולרית, רוח) בשילוב עם אטרקציה תיירותית מיוחדת ותוכנית חינוכית להעלאת המודעות לחסכון והתייעלות, לאנרגיות מתחדשות ואי-תלות אנרגטית נראים על פניו כפרויקטים כדאיים, תורמים ומעניינים.

הזכרנו גם אגירה בחומרים כמו לבנים ובטון, שם קיבול החום נמוך יותר אך הצפיפות גבוהה יותר ואיכות האנרגיה גבוהה יותר מכיוון שניתן לאגור את החום בטמפרטורות גבוהות יותר. בישיבת פורום מוסד שמואל נאמן בטכניון בנושא אגירת אנרגיה^{xviii}, הציג אבי ברנמילר פיתוח של חברת "ברנמילר אנרגיה" הישראלית לאגירה בחומרים בטוניים בטמפר' של 550°C. לדבריו, מקור החום יכול להיות כל אמצעי ייצור חום (שמש, חשמל, חום עודף בתהליך) ואילו הפקת האנרגיה במאגר מתרחשת באמצעות הזרמת מים דרך המסה האוגרת ושימוש בקיטור הנוצר מהם. באתר החברה מופיעים כמה פרויקטים בארץ ובעולם האמורים להיות מותקנים השנה^{xix} אך כתבות שהתפרסמו לאחרונה מלמדות כי החברה נמצאת בקשיים^{xx}. בכל מקרה, גם אגירה תרמית בלבנים ובבטון מציגה צפיפות אנרגיה והספק בינונית עד נמוכה ויתרונה במקום בו ממילא קיים ייצור חום.

כדאי גם להמשיך לעקוב ולתמוך במחקר המכוון לפיתוח חומרים מסוג CPM המציגים יתרונות באגירה תרמית על בסיס חום כמוס ויכולים לשמש כאגירה במבנים, בשילוב בקירות המבנה ואזורים אחרים בו. המחקר הישראלי חדשני ופורץ דרך והפוטנציאל הכלכלי של פריצת דרך בתחום גדול.

2.2. אגירה מכנית - Mechanical Energy Storage

כאשר מפעילים כוח על חומר, ניתן להעלות את רמת האנרגיה שלו בשני אופנים: את רמת האנרגיה הפוטנציאלית שלו או את האנרגיה הקינטית שלו. במידה שנוכל להחזיר מאוחר יותר את החומר לרמת האנרגיה המקורית שלו ולקבל בחזרה את חלקה של האנרגיה שהושקעה, הרי שמדובר באגירת אנרגיה. נתאר להלן חלק מטכנולוגית האגירה המכנית המתקבלות בעקבות שינויים באנרגיה הפוטנציאלית והקינטית.

2.3. אגירה בגז דחוס - Compressed Air Energy Storage (CAES)

אחת הדרכים לקבלת שינוי הדיר באנרגיה הפוטנציאלית של חומר הינה בדחיסה והרפיה של החומר בתחום האלסטי. במוצקים, הדחיסה מוגבלת בעיקר לשימוש בקפיצים. בגז, הרעיון נראה טבעי ופשוט. כל מי שניפח אי פעם גלגל אופניים או כדור משחק, חווה את מחזור האגירה. דחיסת הגז אל הגלגל דורשת עבודה וכוח שהולך וגדל ככל שהלחץ בגלגל עולה. אם אח"כ נפתח את השסתום, האוויר הדחוס "בורח" ומבצע עבודה (שורק, רוח...).

הבסיס להבנת האגירה בגז דחוס הוא משוואת הגז האידאלי:

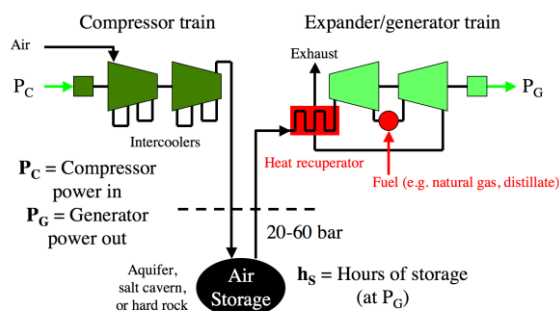
$$PV = nRT$$

כאשר P הוא לחץ, V - נפח, n - מספר המולים (כמות הגז), R - קבוע הגזים, T - הטמפרטורה. בדוגמת הגלגל שהבאנו, כאשר אנחנו מנפחים אותו, אנו שומרים על נפח קבוע ומעלים את כמות האוויר, את הלחץ ואת הטמפרטורה. כדי לבחון את סדר גודל האנרגיה האגורה באוויר דחוס, נתייחס לקוב אחד של אוויר בלחץ אטמוספרי אותו אנו דוחסים למיכל של 5 ליטר בלחץ של 200 אטמוספרות שם האנרגיה הפוטנציאלית של הגז תהיה כ-530 קילו-ג'אול. מיכל פלדה שיכול לעמוד בלחץ כזה שוקל בערך 5 ק"ג וכמחצית מכך אם יהיה עשוי מסיבי פחמן וחומרים מרוכבים. יעילות השימוש

באנרגיה האגורה לצרכי עשיית העבודה המבוקשת תהיה תלויה במהירות התהליך ובמנוע עליו נעשית העבודה. הערכים הפרקטיים המקובלים עבור אנרגיה זמינה באוויר דחוס הם של 40-100 קילו-ג'אול לק"ג. דומה מאד לערכים שראינו באגירה תרמית במים. ניתן כמובן לאחסן גז דחוס בחללים תת-קרקעיים בתנאי שהם אטומים. דוגמאות אפשריות לחללים כאלו הם מערות מלח גדולות, בארות נפט שנוצלו ואינן בשימוש או אקוויפר תת-קרקעי של מים. חללים כאלו יוצרים תנאים קרובים לתהליך אדיאבטי, כלומר אין מעבר חום בין הגז לסביבה הקרובה היות שקירות המבנה מבודדים. מכיוון שכך, אם מחזור האגירה נעשה מהר, טמפרטורת הגז תעלה מאד בזמן דחיסתו ונקבל קירור חזק בזמן שחרורו. כך, למשל, דחיסה מהירה של גז ללחץ של 70 אטמוספרות יכולה להוביל לעליית טמפרטורה של כ-700 מעלות! ^{xxi} לפיכך, נדרשים אמצעי החלפת חום המוטמעים במאגר כדי להתמודד עם הבעיה ואלו מורידים את היעילות הכללית של המערכת. בנוסף, הדוגמאות הללו לחללים אטומים בטבע אינן נמצאות בשפע, אם בכלל, בישראל.

למרות צפיפות האנרגיה והיעילות הנמוכות יחסית של האגירה בגז דחוס, שיטה זו והאגירה השאובה שנתאר בהמשך הן אמצעי אגירה המסוגלים לתת פתרון לאחסון בקנה מידה בינוני עד גדול (מאות מגה עד ג'יגה וואטים למשך שעות), לספק צרכים בסקלה של מפעלים גדולים ולסייע ביישור עקומת העומס. עיקרון הפעולה של מאגר גז דחוס בסקלה גדולה מתואר באיור 6 הלקוח מתוך דו"ח של אוניברסיטת פרינסטון בנושא אגירה בגז דחוס לשימוש בצמוד לטורבינות רוח ^{xxii}. בשלב הדחיסה (האגירה), משתמשים בייצור העודף ברשת החשמל על מנת לדחוס אוויר אל תוך מאגר בעזרת שרשרת של מדחסים בטמפרטורת הסביבה. מערך של מצננים מלווה את התהליך על מנת למנוע את התחממות הגז במהלך הדחיסה אל הלחץ הרצוי P_c וכדי ליעל את התהליך ולצמצם את המאמצים התרמיים על קירות המאגר. האוויר הדחוס נשמר במאגר במשך H_s שעות וכשהאנרגיה האגורה נדרשת ברשת, האוויר משוחרר אל הגנרטור בלחץ P_g כאשר בדרכו הוא מעורב עם גז טבעי או דלק אחר המוצת כדי להתגבר על ירידת הטמפרטורה של הגז בתהליך התפשטותו וכדי ליעל את התהליך כולו. בסופו של תהליך הטורבינה מייצרת חשמל המוזרק אל הרשת והמאגר מתדלדל עד לטעינתו מחדש באוויר דחוס.

איור 7. תיאור סכמתי של תהליך אגירת אנרגיה באוויר דחוס. מתוך הדו"ח של Succar & Williams^{xxiii}.



מתוך התיאור לעיל, ברור כי מגרעות עיקריות של שיטת האגירה באוויר דחוס הן התלות בחללים גיאולוגיים המתאימים לאגירת גז דחוס והחלפת החום הכפולה הנדרשת במהלך הדחיסה והשחרור. מספר חברות הזנק ניסו לאחרונה להתמודד עם הבעיות הללו ולממש פתרונות מקוריים. חברת LightSail Energy גייסה מעל 70 מיליון דולר ממשקיעים עוצמתיים כמו פיטר תיל וביל גייטס במטרה לפתח התקן אגירת אנרגיה באוויר דחוס שאינו תלוי בחללים תת-קרקעיים טבעיים. החברה ניסתה לפתח אחסון במכלים מיוחדים יחד עם תהליך דחיסה חדשני איזותרמי. בשנת 2016 היה אמור לצאת אל הפועל ניסוי פיילוט בנובה-סקוטיה בו אנרגיה עודפת מטורבינת רוח הייתה נאגרת במכלי אוויר דחוס של החברה ומשמשת לייצור חשמל לפי הדרישה. הניסוי לא התממש ובשנה שעברה (2018) החברה הפסיקה את פעולתה^{xxiv}.

SustainX היא חברת הזנק נוספת אשר נוסדה בשנת 2007 במטרה ליצור מאגרי גז דחוס עיליים. החברה גייסה כ-30 מיליון דולר, חלק מההשקעה הגיע מג'נרל אלקטריק. על פי פרסום משרד האנרגיה האמריקאי^{xxv}, הייתה אמורה להשלים פרויקט הדגמה לאגירה של 1.5 מגה-וואט ל"שעות רבות" בסוף שנת 2013. עלות פרויקט הדגמה זה היה כ-13 מיליון דולר, כ-5.5 מתוכם במימון משרד האנרגיה האמריקאי. בשנת 2014 התמזגה עם General Compression אשר גייסה בעצמה כ-70 מיליון דולר. כיום, גורלן של שתי החברות אינו ידוע וככל הנראה הפסיקו לפעול. בחיפוש לצורך דו"ח זה לא נמצא אפילו אתר אינטרנט פעיל.

חברת הזנק חדשה יחסית היא Apex-CAES שנוסדה בשנת 2011 ופועלת בטקסס. באתר החברה אין מידע על רעיון מיוחד אותו מנסה החברה ליישם או על היקף ההשקעות שגייסה אך מצוין שהיא נסמכת על סימנס ועל המדחסים שלה^{xxvi}. החברה מנסה לבנות התקן אגירה באוויר דחוס משולב גז טבעי בהספק של 317 מגה-וואט-שעה ועם סך אנרגיה אגורה של כ-30 ג'יגה-וואט (כ-8 שעות אספקה בהספק מלא). אגירה מרשימה זו מתקבלת על פני שטח של כ-250 דונם. ההתקן צפוי להיות מוכן לפעולה בקיץ 2020 והוא יותקן ברשת חשמל במתח עליון של 345kV של חברת Ercot North Zone באזור: Tennessee Colony, Anderson County, Texas. Hydrostor היא חברת הזנק קנדית שנוסדה בשנת 2010 ואשר מנסה להתגבר על המגבלות המסורתיות בעזרת מכלים המוטמנים בקרקע בתוספת לחץ הידרוסטטי של מאגר מים השומר על לחץ קבוע של האוויר הדחוס. בנוסף, החום הנשאב מהגז בעת דחיסתו נשמר במאגר תרמי ומוזרק מאוחר יותר לגז בעת שחרורו כך שאין צורך בשילוב של גז טבעי או דלק כלשהו והתהליך נקי לחלוטין מבחינת איכות הסביבה. לטענת החברה, ניתן בשיטה זו לאגור מאות מגה-וואט למשך שעות רבות עד יממה ומחיר ההתקן לקוט"ש מתחרה בכל שיטת אגירה אחרת. הדברים אמנם נשמעים מעניינים מאד, אך נכון להיום החברה הייתה ועודה מעורבת בפרויקטים קטנים המיועדים להדגמה. בפברואר השנה (2109) פרסמה החברה הודעה לעיתונות בה תיארה פרויקט אגירה של 5 מגה-וואט במימון 9 מיליון דולר של הממשלה האוסטרלית אשר יותקן באזור אד לאייד באוסטרליה במכרה אבץ^{xxvii}. ההתקן יתחבר לרשת האוסטרלית National Electricity Market.

חברת Augwind היא חברת הזנק ישראלית אשר קיבלה בשנת 2013 השקעה מ"קפיטל נייצ'ר". החברה מפתחת מכלי אגירה תת-קרקעיים אלסטיים בלחץ ונפח גבוה אשר מתעתדים לשפר את יחס העלות/תועלת של הטכנולוגיה^{xxviii}. לשם כך משתמשת החברה גם בתכונות הגיאומכניות של הקרקע לקבלת אגירה בנפחים גדולים יחסית ובעלויות נמוכות יותר. תמונה 8 מציגה מיכל אלסטי של אוגוינד לפני הטמנתו. על פי מצגת החברה משנת 2018, התבצעו התקנות ניסיוניות בחברות כמו "שלם פתרונות אריזה", מחלבות שטראוס יטבתה ו"איזי יוגב טכנולוגיות". בתעשיות אלו נעשה שימוש באוויר הדחוס עצמו ולא ברור מתוך המצגת האם האוויר הדחוס משמש גם ליצירת

חשמל. החברה מדווחת על חיסכון בעלויות החשמל בחברות בהן הותקנו המכלים בסדר גודל של 25-40%.

תמונה 8. מיכל אגירת אוויר דחוס של חברת אוגווינד. מקור: מצגת החברה (2018) xxix



לסיכום, אגירת אנרגיה באוויר דחוס מציגה צפיפות אנרגיה נמוכה אך היא בין השיטות היחידות המאפשרות אגירה בסקלה של מפעל או רשת ואספקה לפרקי זמן ממושכים של שעות. האגירה המסורתית נסמכת על חללים גדולים טבעיים ותנאים גיאולוגיים שאינם מצויים בשפע בארץ וכן עושה שימוש בשריפת גז טבעי/דלק בעת שחרור הגז ולפיכך מעניינת פחות לשימוש בישראל. הטכנולוגיות החדשות שמנסות להתגבר על החסרונות הנ"ל עדין בחיתוליהן ולא הוכחו ככדאיות בסקלות אנרגיות גבוהות. אלא אם יופיע רעיון מעניין ומבטיח חדש, מומלץ בשלב זה לעקוב אחר ההתקדמות בתחום בעולם.

2.4. אגירה שאובה - Pumped Hydro Storage (PHS)

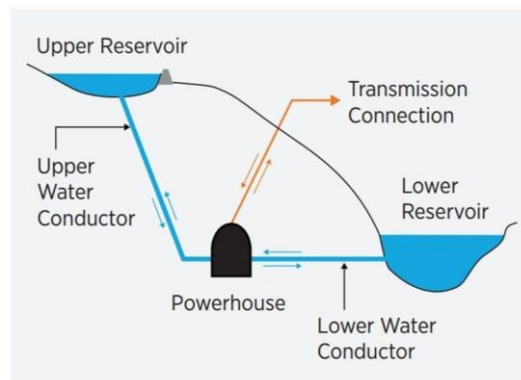
שיטה אחרת לאגירת אנרגיה מכנית נסמכת על אנרגיה פוטנציאלית של כבידה במקום על התכונות האלסטיות של מוצקים או גזים. כבר במאה ה-17 נעשה שימוש באגירת אנרגיה כבידה לצרכי הפעלה מכנית בשעוני הקוקייה שהומצאו אז. משקולת שהורמה לגובה עליון, עשתה עבודה כשצנחה לאיטה למטה והפעילה את השעון ואת הקוקייה. בדומה לכך, ניתן להעלות כל מסה לגובה נתון ולהעלות את האנרגיה הפוטנציאלית שלה. אנרגיה זו יכולה לבצע עבודה כאשר המסה תרד חזרה ועבודה זו תהיה תלויה בהפרש הגבהים ובמסה:

$$\Delta W = mg\Delta h$$

כאשר מדובר במאגר מים בגובה, ניתן לנצל את המים היורדים מהמאגר לגובה נמוך יותר לצורך הפעלת טורבינה ויצור חשמל בתחנות הידרו-אלקטריות. במספר ארצות - כמו נורבגיה, שווייץ, ארה"ב – בהן קיימים מאגרי מים טבעיים בגובה רב, תחנות כוח הידרו-אלקטריות מהוות מקור חשוב לייצור חשמל. יתרון חשוב של השימוש במים להפעלת הטורבינה הוא היכולת לשלוט בזרימת המים על פי הצורך. התגובה אינה מיידיית ובדר"כ עומדת על מספר דקות ולפיכך יכולה להתאים לשינויים בצריכה שמשכם ארוך. מנגד, חיסרון משמעותי של מאגרי מים בגובה הוא שטח הנדליין שהם תופסים, העלות העצומה של בניית סכרים, ההשפעה הסביבתית והמשמעותיות החברתיות-פוליטיות. צורה נוספת של הפקת אנרגיה בעזרת כוח הכבידה מתבססת על שינויים בגובה הים בעתות גאות ושפל, תופעה הנגזרת כתוצאה מכוח המשיכה של הירח xxx. השפעות הגאות והשפל בארץ הן קטנות למדי ולכן לא נתעכב על שיטה זו במסגרת הנוכחית.

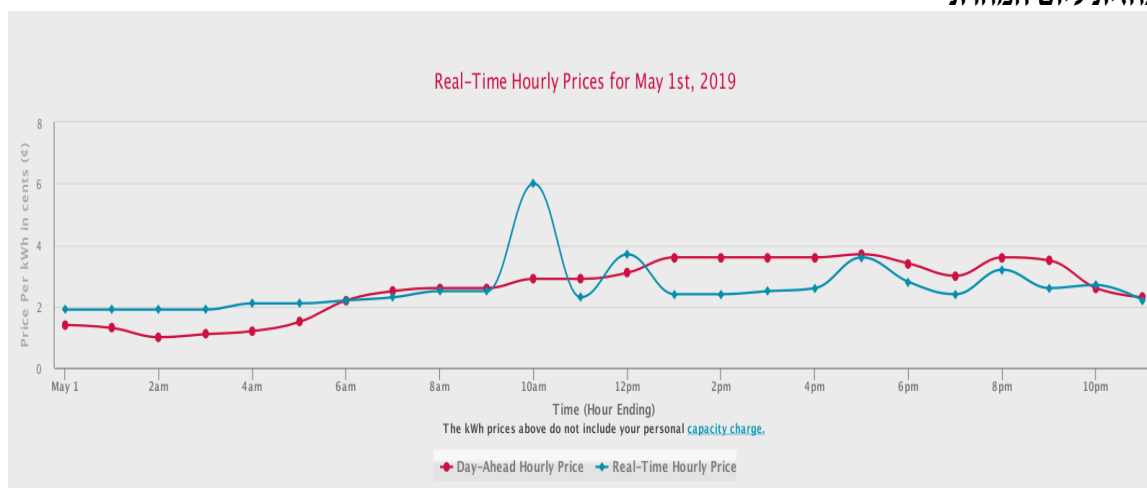
השילוב של אגירת מים במאגרים וייצור חשמל מהם נקרא אגירה שאובה (pumped-hydro storage). עיקרון השיטה מוצג באופן סכמתי באיור 9 ובבסיסו שני מאגרי מים הנמצאים בשני גבהים שונים. המאגרים יכולים להיות טבעיים או מלאכותיים, על פני השטח או תת-קרקעיים, גלויים או נסתרים. המים הנמצאים במאגר העליון מוזרמים דרך טורבינה ומייצרים חשמל בנפילתם, בדומה לתחנת כוח הידרואלקטרית רגילה. אלא שבמערכת אגירה שאובה ניתן גם להפוך את הכיוון ולשאוב את המים חזרה מהמאגר התחתון לעליון בתהליך "טעינה" בו מושקעת אנרגיה חשמלית לשם כך. כלומר, מערך האגירה משולב ברשת החשמל באופן דו-כיווני והשיטה מיועדת בראש ובראשונה ליישור עקומת העומס. בעת שפל בצריכה ועודף ייצור ברשת, החשמל הזול משמש לטעינת המאגר כלומר, לשאיבת מים מהמאגר התחתון לעליון. בעת צריכת שיא ומחסור בייצור, הכיוון מתהפך ומים מהמאגר העליון מופלים אל התחתון תוך שהם מייצרים חשמל הנמכר במחירי שיא בגלל שיא הביקוש.

איור 9. תיאור סכמתי של מערך אנרגיה שאובה עם מאגר עליון ותחתון ותחנת כוח לשאיבת מים וייצור חשמל



פער המחירים בין החשמל בשעות השיא לשפל מהווה לפיכך את ההצדקה הכלכלית לאגירה שאובה במאגרי מים. כדי שתהיה הצדקה כזו, פער המחירים צריך להיות גדול יותר מההפסדים במחזור האגירה השאובה הנובעים מיעילות השאיבה, הטורבינות, אידוי טבעי של מים ואבדני אנרגיה נוספים בדרך. מקובל להעריך את היעילות הכללית של מחזור האנרגיה באגירה שאובה בכ-70%^{xxxi}. איור 10 מציג את מחירי החשמל השעתיים בארה"ב ביום אקראי שבחרנו בזמן הכנת דוח זה, בתאריך 1/5/19 השנה. הנתונים לקוחים מאתר האינטרנט של חברת ComED^{xxxii}. הקו התכלת מציג נתוני זמן אמת המשקפים את המחיר בסוף השעה והקו האדום את תחזית המחיר השעתי ליום המחרת. המחירים נקובים בסנטים אמריקאים לקו"ש. ברור שהמחירים תלויים בסוג הלקוח ובהסכם שיש לו מול חברת האנרגיה אבל לצורך הדיון כאן, נתייחס לשינויים היחסיים במחיר על פני היממה ונניח שיחס זה דומה עבור כל הלקוחות ובכל החברות.

איור 10. מחירי החשמל השעתיים בארה"ב בתאריך 1/5/19. קו תכלת – מחירי זמן אמת. קו אדום – מחירי תחזית ליום המחרת



ניתן לראות כי מחירי התחזית ליממה הבאה רציפים יותר מאשר נתוני זמן אמת והשינויים בהם פחות בולטים. ניתן גם לראות כי בשעה 10:00 בבוקר מחיר החשמל זינק ל-0.06\$/kWh, יותר מפי 3 מחירו בשעת השפל של היממה. אילו היינו רואים תמונה דומה בשעות נוספות ביממה, קרוב לוודאי שניתן היה לפסוק בהחלטיות שאגירה שאובה היא כלכלית. מכיוון שבשאר שעות היממה הפער קטן יותר, בחנו את הנתונים מעט יותר בעזרת הטבלה שכאן. העמודה האמצעית מציגה את מחיר החשמל בזמן אמת ובימנית חישבנו את הרווח השעתי הגולמי אילו היינו קונים את החשמל במחיר של 2.1 סנטים לקו"ש לצורך שאיבת המים מהמאגר התחתון לעליון ומוכרים אותו לרשת במחיר האמת הנקוב. ניתן לראות מתוך הטבלה כי רק בחמש שעות במהלך היממה מתקיים התנאי בו הרווח הפוטנציאלי גדול מיעילות תהליך האגירה (בהנחה כי היעילות עומדת על 70% כלומר, כ-30% מהחשמל הנרכש אינו חוזר כאנרגיה בתום מעגל האגירה השאובה). בשאר 19 שעות היממה, אילו היינו מייצרים חשמל מהמים שנאגרו במחיר של 2.1 סנט לקו"ש, היינו מפסידים כסף. בדוגמא היומית המסוימת שכאן, ישנן 8 שעות בהם מחיר החשמל מתאים למחיר השפל שנקבנו בו עד כדי 0.1 סנט ולכן שעות אלו יתאימו לשאיבה ולמילוי המאגר העליון. נותרנו עם 11 שעות ביממה בהן אין שימוש במאגר אלא אם פעולתו בהפסד. כמו-כן, שעות השפל הן רציפות וניתן להפעיל ברציפות את תהליך השאיבה. בתהליך הייצור, שעות השיא אינן רציפות ונראה כאילו כדאי להפעיל את הטורבינות לפרקי זמן קצרים בלבד בהם מחירי השיא קיימים. כאן נכנסת לתמונה שאלת זמן התגובה של תחנת הכוח, האם כדאי להפעיל ולכבות טורבינות לפרקי זמן קצרים כאלה ובתוך כמה זמן יכולה התחנה להיכנס לפעולה ולתת תפוקה מכסימלית. ברור מאילו שיש לחזור על התרגיל שעשינו במספר ימים רב ולהגיע להבנה של תמונת ההפעלה הכדאית של תחנת האנרגיה השאובה בתנאים הספציפיים לתחנה, למיקומה ולרשת החשמל אליה היא מחוברת. ברור גם שיש לקחת בחשבון את עלויות ההקמה, האידוי והתחזוקה השוטפת של התחנה כדי לקבל תמונה ברורה יותר של הכדאיות הכלכלית של התחנה.

טבלה 1. מחירי החשמל השעתיים בזמן אמת ברשת ComEd בתאריך 1/5/19. בעמודה הימנית חישוב הרווח הגולמי במכירה לרשת במחיר השעתי הנקוב מול קניה במחיר 2.1 סנט לקוט"ש

Time (Hour Ending)	Time Hourly Price (\$/Sell Price/Buy Price)	
12:00 AM	1.9	-10%
1:00 AM	1.9	-10%
2:00 AM	1.9	-10%
3:00 AM	1.9	-10%
4:00 AM	2.1	0%
5:00 AM	2.1	0%
6:00 AM	2.2	5%
7:00 AM	2.3	10%
8:00 AM	2.5	19%
9:00 AM	2.5	19%
10:00 AM	6	186%
11:00 AM	2.3	10%
12:00 PM	3.7	76%
1:00 PM	2.4	14%
2:00 PM	2.4	14%
3:00 PM	2.5	19%
4:00 PM	2.6	24%
5:00 PM	3.6	71%
6:00 PM	2.8	33%
7:00 PM	2.4	14%
8:00 PM	3.2	52%
9:00 PM	2.6	24%
10:00 PM	2.7	29%
11:00 PM	2.2	5%

לצורך השוואה עם שיטות האגירה האחרות, נתייחס גם כאן לצפיפות האנרגיה האגורה. ברור שהאנרגיה האגורה תלויה בהפרשי הגבהים שבין המאגרים ובמהירות בה ניתן להזרים את המים דרך הטורבינות. לא ניכנס לפרטים הללו כאן אלא נתבונן רק בתוצאה הסופית ונניח שהמאגר כולו משמש לצורך תפוקת החשמל של תחנת הכוח של ההתקן. לצורך העניין נזניח את משקל הטורבינות, הצנרת, הסכרים והמבנים ונחשב את צפיפות האנרגיה בעזרת חלוקה של האנרגיה המיוצרת במשקל המים במאגר. ברור כי אם נכלול בחשבון גם את המסות שהזנחנו, צפיפות האנרגיה תקטן עוד יותר.

בדוגמא ראשונה נתבונן בתחנת האגירה השאובה המתוכננת בגרמניה Atdorf Pumped Storage Plant שתהא מסוגלת ליצור אנרגיה כללית של 13GWh במאגר שנפחו 9 מיליון קוב מים^{xxxiii}. חלוקה של האנרגיה במסה נותנת לנו כ-5kJ/kg, סדר גודל פחות מצפיפות האנרגיה באגירה באוויר דחוס וסדרי גודל רבים פחות מזו האגורה בדלקים או במימן. כדוגמא שניה נתבונן בתחנת אנרגיה שאובה הקרובה לליבנו, כאן בארץ. תחנת האגירה השאובה בגלבוע צפויה להתחיל לפעול בחודשים הקרובים והיא תייצר חשמל בהספק 300 מגה-וואט שעה למשך 8 שעות בעזרת מאגרי מים עילי ותחתית כל אחד בנפח 2.5 מיליון קוב. החישוב כאן נותן כ-3.5kJ/kg, פחות מצפיפות האנרגיה בפרויקט הגרמני אבל דומה.

2.4.1. פרויקטים בעולם

נכון לשנת 2018, על פי דוח "הרשות הלאומית לכוח הידרואלקטרי" National Hydropower Association – NHA^{xxxiv}, בארה"ב קיימות 42 תחנות כוח מבוססות אגירה שאובה בעלות קיבולת אגירה כללית העולה על 21 ג'יגה-וואט. בין תחנות האגירה גדולות נזכיר את התחנה ב- Bath County – Virginia^{xxxv} בה 6 טורבינות מייצרות כ-6 ג'יגה-וואט חשמל מתוך מאגר עליון ותחתון התופסים שטח של כ-3500 דונם. התחנה הוותיקה מכולם היא התחנה בנהר הרוקי, מילפורד, קונטיקט, אשר נבנתה בשנת 1929 ונתנה תפוקה של 29 מגה-וואט. היום משמשת התחנה כמרכז שיגור של מדינת קונטיקט. דו"ח ה-NHA מציין כי נכון לסוף 2017 הרשות הפדרלית לאנרגיה (Federal Energy Regulatory Commission-FERC) הנפיקה אישורים ראשוניים ל-34 תחנות אגירה שאובה בארה"ב בתפוקה כוללת של כ-10 ג'יגה-וואט וכי 11 פרויקטים נוספים בתפוקה של כ-7 ג'יגה-וואט ממתינים לאישור ה-FERC. בסה"כ פועלים או ממתינים לפעולה כ-270 בארה"ב בתפוקה כוללת של מעל 127 ג'יגה-וואט מתוך סך תפוקת החשמל בארה"ב העומדת על כ-4 טרה-וואט.

רשימת תחנות מכל העולם העולות בתפוקתן על 1 ג'יגה-וואט מובאת בטבלה 2 שלהלן ולקוחה מתוך אתר ויקיפדיה^{xxxvi}:

Capacity (MW)	Country	Station
3,003	United States	Bath County Pumped Storage Station
2,448	China	Huizhou Pumped Storage Power Station
2,400	China	Guangdong Pumped Storage Power Station
1,932	Japan	Okutataragi Pumped Storage Power Station
1,872	United States	Ludington Pumped Storage Power Plant
1,836	China	Tianhuangping Pumped Storage Power Station
1,800	Australia	Tumut-3
1,800	France	Grand'Maison Dam
1,772	Spain	La Muela II Pumped Storage Power Station
1,728	United Kingdom	Dinorwig Power Station
1,652	United States	Raccoon Mountain Pumped-Storage Plant
1,602	Taiwan	Mingtian Pumped Storage Hydro Power Plant
1,600	Japan	Okukiyotsu Pumped Storage Power Station (1 & 2)
1,566	United States	Castaic Power Plant
1,500	China	Liyang Pumped Storage Power Station
1,500	Japan	Okumino Pumped Storage Power Station
1,480	Switzerland	Linth-Limmern Pumped Storage Station
1,455	Bulgaria	Chaira Hydropower Cascade
1,450	India	Sardar Sarovar Dam
1,332	South Africa	Ingula Pumped Storage Scheme
1,317	Italy	Entracque Power Plant
1,296	Luxembourg	Vianden Pumped Storage Plant
1,280	Japan	Okawachi Pumped Storage Power Station
1,280	China	Qingyuan Pumped Storage Power Station

1,280	Japan	Shin Takasegawa Pumped Storage Station
1,243	Spain	Presa de Aldeadávila
1,224	China	Hohhot Pumped Storage Power Station
1,206	Japan	Okuyoshino Pumped Storage Power Station
1,200	China	Bailianhe Pumped Storage Power Station
1,200	China	Baoquan Pumped Storage Power Station
1,200	China	Heimifeng Pumped Storage Power Station
1,200	United States	Helms Pumped Storage Plant
1,200	China	Hongping Pumped Storage Power Station
1,200	Japan	Kazunogawa Pumped Storage Power Station
1,200	Japan	Matanoagawa Dam
1,200	Japan	Omarugawa Pumped Storage Power Station
1,200	China	Pushihe Pumped Storage Power Station
1,200	Japan	Tamahara Pumped Storage Power Station
1,200	China	Tongbai Pumped Storage Power Station
1,200	China	Xianyou Pumped Storage Power Station
1,200	China	Xilongchi Pumped Storage Power Station
1,200	Russia	Zagorsk Pumped Storage Station
1,164	Belgium	Coo-Trois-Ponts Hydroelectric Power Station
1,160	United States	Blenheim-Gilboa Hydroelectric Power Station
1,125	Japan	Okuyahagi Pumped Storage Power Station
1,125	Japan	Shintoyone Pumped Storage Power Station
1,095	United States	Rocky Mountain Hydroelectric Plant
1,080	United States	Northfield Mountain
1,071	United States	Muddy Run Pumped Storage Facility
1,065	United States	Bad Creek Hydroelectric Station
1,060	Germany	Goldisthal Pumped Storage Station
1,050	Japan	Imaichi Pumped Storage Plant
1,045	Germany	Markersbach Pumped Storage Power Plant
1,040	Iran	Siah Bishe Pumped Storage Power Plant
1,026	Austria	Malta-Reisseck Power Plant Group
1,016	Italy	Roncovalgrande Hydroelectric Plant
1,008	Taiwan	Minhu Pumped Storage Hydro Power Station
1,000	South Africa	Drakensberg Pumped Storage Scheme
1,000	Italy	Edolo Pumped Storage Plant
1,000	Italy	Presenzano Hydroelectric Plant
1,000	Japan	Shimogo Pumped Storage Power Station
1,000	China	Tai'an Pumped Storage Power Station
1,000	China	Xiangshuijian Pumped Storage Power Station
1,000	South Korea	Yangyang Pumped Storage Power Station
1,000	China	Yixing Pumped Storage Power Station
1,000	China	Zhanghewan Pumped Storage Power Station

תחנות אגירה שאובה בבניה:

Station	Country	Capacity (MW)	Expected Completion
Fengning Pumped Storage Power Station	China	3,600	2019-2021
Kannagawa Hydropower Plant	Japan	2,820	2020
Dniester Pumped Storage Power Station	Ukraine	2,268	2019-?
Jixi Pumped Storage Power Station	China	1,800	2019
Huanggou Pumped Storage Power Station	China	1,200	2019
Upper Cisokan Pumped Storage Power Plant	Indonesia	1,040	2019
Kaniv Pumped Storage Power Station [uk]	Ukraine	1,000	2019-?
Tehri Pumped Storage Power Station	India	1,000	2020

2.4.2. פרויקטים בישראל

בארץ אושרה מכסה לאגירה שאובה בסך 800 מגה-וואט. מכסה זו חולקה בין ארבעה פרויקטים:

אגירה שאובה גלבע - הוקם פרויקט של 300 מגה וואט הצפוי לפעול בחודשים הקרובים. שני מאגרים, כל אחד מהם בקיבולת של כ-2.5 מיליון קוב נמצאים בהפרש גבהים של כ-500 מ' ביניהם. בין המאגרים יחבר צינור פלדה בקוטר של כ-5 מטרים ובאורך של כ-2,100 מטר שיעבור במנהרה שתיחצב. תחנת כח בהספק 300 מגה-וואט תכלול שתי טורבינות הידרו-אלקטריות ותהיה תת קרקעית בבטן ההר בסמוך למאגר התחתון. לפרויקט נדרשים כ-2.4 מ"ק מים למילוי ראשוני של המאגרים וכ-600 אלף מ"ק כל שנה לפיצוי על התאיידות המים. מקור המים למילוי ראשוני ולהשלמות השנתיות הינו מאגר רשפים הקיים הסמוך למאגר התחתון

אגירה שאובה כוכב הירדן - מקודם פרויקט של 340 מגה וואט הסוגר את המכסה. צפוי לפעול במהלך שנת 2021

אגירה שאובה מנרה - תחילה תוכנן 220 מגה וואט אולם בסופו של דבר מדובר על 156 מגה וואט. הפרויקט מתוכנן להתחיל לפעול בשנת 2023 אולם נתקל בקשיים בסגירה הפיננסית.

אגירה שאובה נשר - תוכנן פרויקט בהיקף של 200 מגה וואט אולם הוא בוטל בשל התנגדות העירייה. כעת נעשים ניסיונות להחיות את הפרויקט (156 מגה וואט) אולם לא נראה שיצא לפועל. בתחילת 2017 החליטה רשות החשמל שלא להגדיל את מכסת ייצור החשמל מאנרגיה שאובה, בין השאר בגלל שהן יקרות מתחנות פיקריות, המותאמות להפעלה לטווח קצר, ובגלל האפשרות לכניסת טכנולוגיות אגירת אנרגיה אחרות יעילות יותר.

לסיכום, נראה שאגירה שאובה היא טכנולוגיה מוכחת ובשלה היודעת לתת מענה ברמות אגירה גבוהות למערכות בסקלה רשתית. מנגד, הסקירה הראשונית שנערכה כאן והמידע מתוך הפרויקטים בארץ, מראים כי הטכנולוגיה נמצאת על הקו העדין של כדאיות כלכלית. בעולם, במקומות בהם קיימים מקומות טבעיים לאגירה שאובה וישנם שטחים ומים בשפע, דומה שהטכנולוגיה חצתה את קו הכדאיות הכלכלית. פרויקטים אדירי ממדים נמצאים בשימוש פעיל

ורבים אחרים נמצאים בשלבים שונים של בניה או תכנון. בארץ, התנאים והממדים אחרים והכדאיות הכלכלית אינה מובטחת.

לדעתנו יש להעמיק בנושא ולבחון את העלויות בפועל של ההקמה והתפעול של הפרויקטים בארץ יחד עם שיקולים של ביזור אמצעי ייצור ופיזור סיכונים, השפעה על הסביבה ובטיחות בטרם יוחלט על הפסקה או המשך פיתוח אגירה שאובה בארץ.

2.5. אגירת אנרגיה קינטית (גלגלי תנופה) - Flywheel Energy Storage

הזכרנו לעיל את היכולת להקנות לגוף אנרגיה קינטית, לאגור אותה כתנועה ולהשתמש בה מאוחר יותר על פי הצורך. מן הסתם, תנועה קווית אינה מעשית שכן אנו מעוניינים באנרגיה במקום מסוים ואין זה פרקטי לשגר גוף במהירות גבוהה הרחק מאתנו. תנועה במקום קבוע עם אנרגיה קינטית גבוהה היא, לפיכך, תנועה סיבובית. כאשר גוף בעל מסה מסתובב סביב צירו במהירות זוויתית, ω , הוא רוכש אנרגיה קינטית E_K , בשיעור:

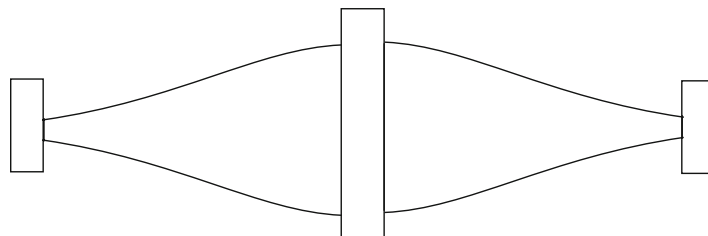
$$E_K = \frac{1}{2} I \omega^2$$

כאשר I הוא מומנט האינרציה של הגוף המורכב מאינטגרל של מכפלת המסה בריבוע המרחק מציר הסיבוב:

$$I = \int \rho(x) r^2 dx$$

ברור מתוך כך שכדי לקבל אנרגיה קינטית גבוהה עלינו לסובב מסה גדולה במהירות זוויתית גבוהה ככל האפשר כשהיא מרוכזת רחוק ככל האפשר מציר הסיבוב. אלא שאז נכנס לתמונה הכוח הפועל על מסה מסתובבת ששיעורו $m r \omega^2$ כלומר, ככל שהמסה רחוקה יותר מציר הסיבוב הכוח הפועל עליה גדול יותר. אם נרחיק את המסה עוד ועוד ונעלה את מהירות הסיבוב, נגיע בסופו של דבר לקצה גבול היכולת המכנית של החומר לעמוד במאמצים והמסה תיקרע לגזרים. זו הסיבה לכך שהמסה המסתובבת בגלגלי תנופה מתוכננת בצורה המתוארת באופן סכמתי באיור 11. כדי ליצור התפלגות מאמץ אחידה על פי הדיסקה המסתובבת, מקטינים את עובייה ככל שמתרחקים מציר הסיבוב באופן שמפצה על עליית הכוח. נועלת את הדיסקה ברדיוס החיצוני שלה טבעת בעלת חוזק מכני גבוה השומרת על המערך מפני התפרקות.

איור 11. תיאור סכמתי של פרופיל הדיסקה המסתובבת בגלגל תנופה



דיסקה המסתובבת במהירות מאבדת אנרגיה מעצם קיומו של כוח החיכוך. לפיכך, נדרשת הקטנת החיכוך כדי לשפר את יעילותם של גלגלי תנופה. ניתן לעשות זאת בשני אופנים: האחד, ליצור סביבת וואקום בה גלגל התנופה מסתובב כמעט ללא התנגדות והשני, להשתמש במסבים מגנטיים (מגנטיים קבועים, אלקטרומגנטיים או מוליכי-על) כך שגלגל התנופה מרחף. בעזרת שיטות אלו גלגלי

תנופה מודרניים מגיעים למהירויות סיבוב של מעל 15,000 סל"ד עם אנרגיה אגורה מסדר גודל של מגה-וואטים ^{xxxvii}. רמת האנרגיה הזו עשויה להטעות מעט משום שזו אנרגיה הזמינה לזמן קצר מאוד, מסדר גודל של שניות כך שאם נתרגם אותה להספק בקו"ש מדובר על קילו-וואט שעה בודדים עד עשרות אחדות. כך למשל, גלגל תנופה מסחרי מתוצרת "פילר" Piller, מספק 2.5 מגה-וואט במשך 8 שניות כלומר, כ-5kWh ^{xxxviii}.

לגלגלי תנופה זמן תגובה מהיר עם צפיפות אנרגיה נמוכה יחסית ולפיכך הם מתאימים בעיקר לטיפול בבעיות טרנזיאנטיות. הם מתאימים בעיקר לסקלה של מפעל בו נדרשים תיקונים להפרעות במתח או בתדר שמשכן קצר מאוד, בדרכי פחות משניה. גלגל התנופה נותן פתרון מצוין וידידותי לסביבה ולכן קיימות בשוק מערכות מסחריות, כדוגמת זו של פילר שהזכרנו, המתחרות במערכות אל פסק גדולות המבוססות מצברים. עם זאת, יש לזכור שגלגל תנופה היוצא מאיזון עלול להיות מסוכן מבחינה בטיחותית ולכן מערכות גלגל תנופה גדולות מפוצלות לכמה גלגלי תנופה קטנים יותר כשהאנרגיה מחולקת ביניהם.

אגירה בסקלת הרשת דורשת מערכות גדולות הרבה יותר. בשנת 2011 חברת Beacon Power הפעילה מערכת בת 200 גלגלי תנופה המספקת יחד 20MW במשך 15 דקות (5MWh) בעיר Stephentown, NY. מערכת נוספת בהספק דומה הפעילה החברה בשנת 2014 ב-Hazel, PA. תמונה 12 למעלה מציגה את מערך גלגלי התנופה בהייזל. למטה בתמונה נראה מיכל המכיל גלגל תנופה אחד מתוך ה-200 שבמערך ^{xxxix}. הפרויקטים הללו מתקיימים בתמיכת משרד האנרגיה האמריקאי הצופה כי מערכות של 100MW יוכלו להתמודד עם הרוב המכריע של הפרעות הרשת במדינה כמו קליפורניה ^{xl}.

תמונה 12. למעלה: מערך אגירה בגלגלי תנופה בהספק 20 מגה-וואט (15 דק') בהייזל פנסילבניה. למטה: מיכל גלגל תנופה אחד מתוך 200 הנמצאים במערך.



2.6. אגירה בקבלי על - Supercapacitors Energy Storage

קבלי-על, הנקראים גם אולטרה-קבלים או קבלי שכבה כפולה, הם קבלים המתאפיינים בקיבול גבוה מאוד ביחס לקבלים אלקטרוליטיים 'רגילים' ובצפיפות הספק גבוהה^{xli}. הקיבול הגבוה מושג באמצעות שימוש בחומרים פורוסיבים מאוד ברמה המיקרוסקופית כך ששטח הפנים האפקטיבי של החומר גדול בסדרי גודל מחומרים המשמשים בקבלים רגילים. מכיוון שהקיבול קשור באופן ישיר לשטח הפנים של הקבל, ברור כי גם הקיבול גדל בהתאם. קיבול אפייני של קבלי-על יכול להיות פי 100 ויותר מזה של קבלים אלקטרוליטיים. בהשוואה לסוללות, ניתן לפרוק ולטעון אותם במהירות גבוהה הרבה יותר (הספק גבוה) והם עמידים במספר גבוה בהרבה של מחזורי טעינה ופריקה (זמן חיים) מאשר סוללות. צפיפות ההספק של קבלי-על נמוכה מזו של קבלים אלקטרוליטיים והיא עומדת על כ-1-10 kW/kg אך צפיפות האנרגיה הגבוהה שלהם, 15-30 kJ/kg הופכת אותם לאטרקטיביים לעומת קבלים אלקטרוליטיים^{xlii}.

קבל הטעון למתח מסוים נושא אנרגיה בשיעור הפרופורציוני לריבוע המתח ולקיבולו:

$$E = \frac{1}{2} CV^2$$

החיסרון הגדול של קבלי-על הוא המתח הנמוך שלהם, כ-2.2 וולט. נראה מהמשוואה כאן כי המתח הנמוך משמעותו סך אנרגיה כולל נמוך יחסית בקבל. כמו-כן, הזכרנו בהקדמה כי אנרגיה במתח נמוך היא איכותית פחות בגלל יכולתה לעשות עבודה פחותה. בנוסף על כך, כדי לקבל מתחי עבודה ואנרגיות שימושיות, יש ליצור "בנק" קבלים – מערך מרובה קבלים וגדול ממדים ובו יש לייצב את המתח ולאזן את הקבלים.

כאשר אנו משווים את צפיפות האנרגיה של קבלי-על לזו של שיטות האגירה המסיביות של אוויר דחוס או אגירה שאובה, אין יתרון לקבלי-על וברור שניסיון לאגור בקבלים סך אנרגיה המתאים ליישומי יישור קו יהפוך את ההתקן ליקר ומסובך בצורה בלתי מתקבלת על הדעת. לפיכך, יתרונם של קבלי העל למטרות אגירת אנרגיה מגיע מההספק הגבוה יחסית שלהם כלומר, היכולת לטעון ולפרוק מהר ולתת תגובה מהירה על פי דרישה. קבלי העל מתחרים אפוא, בתחום יישומי האגירה המיועדים לטיפול בתופעות טרנזיאנטיות ושיפור איכות החשמל.

אי-האחידות של הקבלים בבנק קבלי-על גדול, הצורך לייצבם ולאזנם והחשש מ-"מוות אלים" של קבלים בודדים בתוך בנק קבלים גדול, הגבילו עד כה את השימוש בקבלי-על למערכות טיפול בטרנזיאנטים (SRT – Sag Ride Through) בעלות הספקים נמוכים יחסית. חברת יונירום הישראלית, עקבה במשך שנים רבות אחרי התפתחות הייצור של טכנולוגיית קבלי-על ושילבה קבלים כאלו במערכות SRT של חברת הענק Eaton.

תמונה 13. מערכת SRT מתוצרת Eaton בהספק 275kVA (מודל 9395) על בסיס קבלי-על



תמונה 14. "בנק" קבלי-על המשמש כאמצעי אגירה במערכת 9395 של איטון/יונירום



למיטב ידיעתנו, חברת יונירום ביצעה את ההתקנה הראשונה בעולם של מערכת SRT על בסיס קבלי-על בהספק גדול מ-1MVA. מדובר על התקנה במגדל העמק ב-Tower Semiconductors. בחברות מוליכים למחצה באזורים הנקיים, מערכות מבוססות מצברים אינן באות בחשבון בגלל פוטנציאל הזיהום שלהן. לפיכך התקינה יונירום מספר מערכות של איטון 9395 בהספק 275kVA כל אחת (תמונה 13) כאשר לכל מערכת מוצמדים מערכי קבלי-על האוגרים את האנרגיה הנחוצה לאספקה במשך 3 שניות (תמונה 14). משך זמן זה מספיק לצורך תיקון הפרעות ברשת החשמל. בעקבות ההצלחה של ההתקנה בארץ, איטון העולמית משווקת היום באופן מסחרי את הפתרון המבוסס קבלי-על^{xliv}.

לסיכום, אגירה בקבלי-על היא טכנולוגיה בהתפתחות המתאימה בעיקר לטיפול בהפרעות ברשת ושיפור איכות החשמל. ההתקדמות המבטיחה בייצור הקבלים ובאיכותם מצביעה על מגמה ברורה של התפשטות הטכנולוגיה להספקים גדלים והיא מהווה תחרות משמעותית למצברים בתחום הטיפול בהפרעות. לקוחות הנמנעים משימוש במצברים בגלל התחזוקה והבעייתיות הסביבתית של השימוש במצברים, מגלים בהדרגה את אפשרות האגירה בקבלי-על ונפתחים

לשימוש בטכנולוגיה. אין ספק שנראה בשנים הקרובות צמיחה משמעותית של הטכנולוגיה ומומלץ לעקוב אחר התפתחות זו ולהשקיע ביזמות בתחום שהיא בעלת פוטנציאל משמעותי לרעיונות חדשים, יצירת מקומות עבודה בארץ והכנסה למדינה מתמלוגים אפשריים.

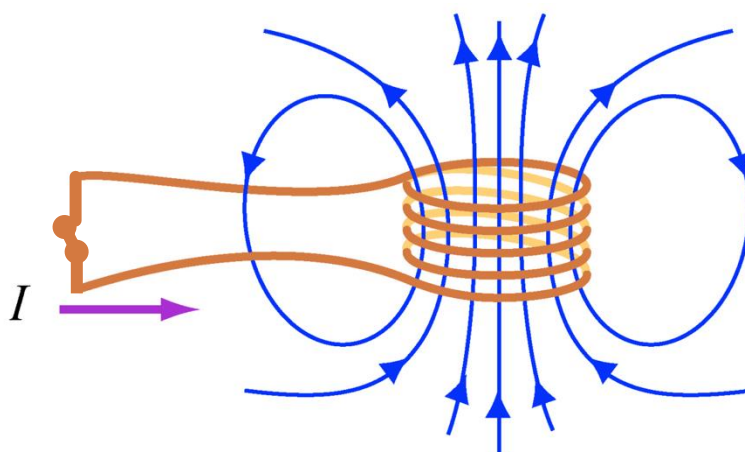
2.7.2. אגירה אלקטרומגנטית בסלילים מוליכי-על - Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)

SMES היא טכנולוגית אגירת אנרגיה בסלילים מוליכי-על הנמצאת בשלבי פיתוח. איור 15 מתאר סליל הנושא זרם וכתוצאה מכך נוצר שדה מגנטי במרחב המתואר באיור ע"י קווי השדה הדמיוניים בצבע כחול. סליל הנושא זרם אוגר אנרגיה בעזרת השדה המגנטי הנוצר במרחב שסביבו:

$$E = \frac{1}{2} LI^2$$

כאשר L היא השראות הסליל והיא תלויה בגיאומטריה שלו, I הוא הזרם בסליל.

איור 15. סליל נושא זרם I היוצר במרחב שדה מגנטי



בסלילים העשויים ממוליכים רגילים כמו נחושת, אם נסגור את המתג ונניח לזרם להסתובב סביב עצמו בסליל, התנגדות המוליך תגרום לדעיכה של הזרם. בסלילים גדולים בהם קיימת אנרגיה מגנטית רבה, מדובר על מאות ואלפי קילומטרים של חוט מלופף ולכן גם התנגדות יחסית גדולה הגורמת לדעיכה כמעט מיידית של הזרם והאנרגיה שבו הופכת לחום. לפיכך, לא ניתן באופן מעשי לאגור אנרגיה בסלילים מוליכים קונבנציונליים ללא הפסדים כבדים.

התמונה משתנה כאשר מדובר במוליכי-על. חומרים אלו מציגים התנגדות אפס כלומר הזרם החשמלי עובר דרכם מבלי שייוצר מתח וללא כל הפסדים! סליל מוליך-על הנושא זרם והדקיו סגורים, יישא זרם זה לעד מבלי לאבד אנרגיה. הסליל משמש אפוא כמאגר אנרגיה אותו ניתן לפרוק ולטעון באמצעות פתיחת הדקי הסליל וחיבורם אל העומס או מקור טעינה בהתאמה.

לסליל מוליך-על צפיפות אנרגיה דומה עד מעט נמוכה מזו של קבלי-על ($1-5 \text{ kJ/kg}$). היתרון הגדול של SMES נובע מהתגובה המהירה שלו שאין לה מתחרים וביכולת לקבל את האנרגיה במתח גבוה כרצוננו. המפתח לכך הוא משוואת המתח-זרם בסלילים:

$$V = -L \frac{dI}{dt}$$

כלומר, המתח המופעל על הסליל קובע את קצב עליית או ירידת הזרם דהיינו את קצב הוצאת האנרגיה מהסליל. אין כל מגבלה תיאורטית על קצב זה והמגבלות הן מעשיות: יכולת העמידה של המפסק הפותח וסוגר את הסליל במתח גבוה ויכולתו של הבידוד בין הכריכות לעמוד במתח המתפתח. ככל שמדובר במפסקים מהירים שעלותם סבירה, המתח בו ניתן לעבוד באגירת SMES באופן מעשי היום עומד על כמה אלפי וולט. אף טכנולוגית אגירה אחרת אינה יכולה לעבוד במתחים כאלו באופן ישיר ללא המרות והשנאות. בגלל האפשרות למתחים גבוהים, האנרגיה המתקבלת מ-SMES היא איכותית. מהירות המפסקים מאפשרת גם היא את הוצאת האנרגיה במהירות שיא ולפיכך ה-SMES מתאים ביותר לתיקון הפרעות שמשכן קצר.

מנגד, מחירם הגבוה של מוליכי-על מאפשר מערכות אגירה למשכי זמן של כשנייה אחת. זמן זה אומנם מספיק כדי לטפל בהפרעות הרשת אך סך האנרגיה האגורה נופל מטכנולוגיות מתחרות. מוליכי-על נתגלו בתחילת המאה שעברה אך הם הצריכו קירור לטמפרטורות הקרובות לאפס המוחלט כדי לקבל מוליכות-על. מערכות הקירור היו יקרות, מסורבלות ומוגבלות ביכולת הקירור ולפיכך מערכות SMES היו רק דבר שנידון בעולם המדעי כאפשרות היפותטית. בשנת 1987 נתגלו מוליכי-על "בטמפרטורות גבוהות" המאפשרות עבודה בטמפרטורות של חנקן נוזלי (77 מעלות קלווין). התגלית קידמה את כל עולם מוליכות העל ופתחה את האפשרות למימוש טכנולוגית ה-SMES.

המעבדה למוליכות-על בבר-אילן בתמיכת משרד האנרגיה וחברת החשמל העמידה בשנת 1997 אב-טיפוס ראשון של SMES על בסיס חוטים מוליכי-על "בטמפרטורות גבוהות" המקוררים בחנקן נוזלי.^{xlvi,xlv,xliv} האנרגיה האגורה הייתה מזערית אך ההיתכנות הוכחה. בשנת 2000 הוציאה חברת American Superconductors מערכת SMES על בסיס מוליכי-על בטמפרטורות נמוכות^{xlvi} אך העלות הגבוהה הכשילה את המשך הפיתוח.

חברת החשמל היפנית Chubu Electric יזמה פרויקט SEMS מתוך הבנה של הצורך בשיפור איכות החשמל. המטרה הייתה להדגים עבודה בתנאי אמת ולפיכך נבחר אתר התקנה בחברת Sharp ובו מומש התקן SMES בהספק של 10MVA למשך שניה אחת.^{xlvi} ההתקן עשוי מוליכי-על בטמפרטורות נמוכות ומקורר ל-4 מעלות מעל האפס המוחלט בעזרת הליום נוזלי. חברת "מיוסמס" היא חברת הזנק ישראלית שקמה במטרה לממש את טכנולוגית ה-SMES על בסיס חוטים מוליכי-על מתקדמים וזולים יותר ועם קירור בהולכה, ללא נוזלים קריאוגניים. חברת החשמל היפנית הביעה עניין רב בפיתוח של מיוסמס והיא מבקשת להתקין אצלה לניסויים את האב-טיפוס שהחברה מפתחת. תמונה 16 נלקחה בעת ביקור של אנשי בר-אילן ומיוסמס בחצר המפעל של שארפ בו מותקנת המערכת של Chubu Electric.

תמונה 16. אנשי Chubu Electric (מימין), מיוסמס (שמאל) ובר-אילן (ימין מאחור) בביקור בהתקן SMES של Chubu המותקן במפעל Sharp



לסיכום, SMES היא טכנולוגיה צעירה מאד בפיתוח ראשוני המתאימה בעיקר לטיפול בהפרעות ברשת ושיפור איכות החשמל. ייחודה בתגובה המהירה מאד וביכולתה לספק את האנרגיה ישירות במתחים גבוהים ללא תחרות. הטכנולוגיה מיועדת להספקים גבוהים בזמן קצר מאד לתיקון הפרעות בסקלת מפעל או רשת.

ל-SMES יתרון מיוחד ומעניין מאד. החוטים מוליכי-על איתם מפתחת מיוסמס את האב-טיפוס שלה יכולים להיות מקוררים גם באמצעות מימן נוזלי להשגת המצב הרצוי של מוליכות-על. הדבר מאפשר פתרון כולל לכל סקלות זמני האגירה. ה-SMES מגיב במהירות והספק שיא להבטחת איכות חשמל מיטבית. באם ההפרעות נמשכות זמן רב יותר או שנדרשת אספקה מסיבית אל או מהרשת, מאגר המימן יפעל כתחנת ייצור חשמל או הפקת מימן בהתאם לצורך. מומלץ לעקוב אחר התפתחות זו ולהשקיע ביזמות בתחום שהיא בעלת פוטנציאל משמעותי לרעיונות חדשים, יצירת מקומות עבודה בארץ והכנסה למדינה מתמלוגים אפשריים. (גילוי נאות: ד"ר שוקי וולפוס, שותף בהכנת דו"ח זה, הוא חוקר בכיר במעבדה למוליכות-על בבר-אילן ועוסק באופן שוטף במחקר ופיתוח של מערכות SMES הכולל גם שיתוף פעולה עם חברת מיוסמס)

2.8. אגירה במימן - Hydrogen Storage

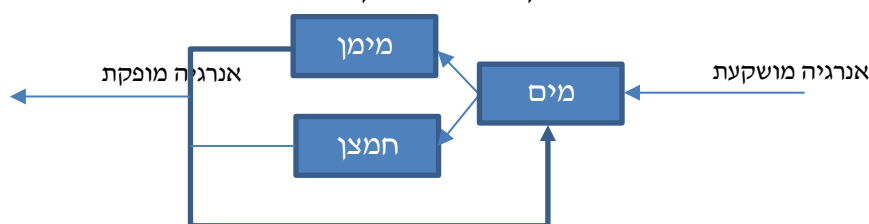
מימן הוא נשא אנרגיה חשוב ביותר. כאשר הוא משמש כדלק, המימן יכול להוות תחליף לדלק מאובנים, פחם, גז טבעי וגזרותיהם. המימן הוא מקור אנרגיה נקי, אמין, מחירו סביר ויש לו יתרון עצום בכך שתוצר הבעירה שלו הוא מים במקום פחמן חד- או דו-חמצני הנחשבים לגזי חממה. אין כל ספק שהמימן ימלא תפקיד מפתח בעולם האנרגטי העתידי.

ניתן להשתמש במימן בקלות רבה. כפי שנראה להלן, קל מאד להסב מנועי בעירה קיימים או טורבינות למנועי בעירה מבוססים מימן כאשר נדרש להעלות מעט את לחץ גז המימן. המימן יכול גם לשמש בתאי דלק כדי ליצור חשמל באופן ישיר כאשר גם כאן תוצר הלוואי של התהליך הוא מים. בנוסף ניתן לערבבו עם הגז הטבעי לצורך הפקת חום וחשמל. היעילות האנרגטית של תא דלק מבוסס מימן היא כ-60% בעוד שזו של מנוע בעירה פנימית היא כ-34%. כמו-כן, כאשר משתמשים

במימן בטמפרטורות גבוהות ניתן לקבל ממנו חשמל ובנוסף להשתמש בחום העודף למטרות חימום. בדרך זו ניתן לקבל יעילות אנרגטית של עד 80%. כשם שדלק נוזלי יכול לשמש בכל סקלה של יישומים מהפרטי, דרך המפעלי, אל הרשתי והלאומי, כך יכול גם המימן לתפקד ביעילות רבה בכל סקלה. יתר-על-כן, בעוד שאת הדלק הנוזלי המוכר לנו ניתן לייצר אך ורק במקומות מרכזיים כמו בתי זיקוק, המימן יכול להיות מיוצר בכל סקלה, אפילו אצל הצרכן הפרטי ואפילו באותו המקום והזמן בו הוא נדרש. בהמשך נתאר את תהליכי הייצור המאפשרים זאת.

התכונות האטרקטיביות הללו של המימן הולידו את המושג "כלכלת מימן" ^{xlix} "hydrogen economy" אותו מנסים לקדם גורמים רבים ברחבי העולם. בכלכלת מימן, המימן משמש חומר הדלק העיקרי בעולם. הוא מגיב עם חמצן ליצירת מים וניתן בתהליך של אלקטרוליזה לפרק את המים וליצור מחדש מימן.

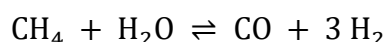
איור 17. מעגל סגור של כלכלת מימן מבוססת אלקטרוליזה



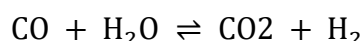
איור 17 מציג כלכלת מימן חלקית המבוססת על מעגל סגור בו אף אחד מהמרכיבים הכימיים אינו נוצר או נהרס אבל מתקבלת זרימה נטו של אנרגיה מצד לצד. החלק המרכזי שבאיור בו מופיעים המים ומרכיביהם הוא למעשה חיץ. זהו מאגר האנרגיה המשמש בזמן ובכמות הנחוצים ליישום. אפילו יישום חלקי כזה של כלכלת מימן יכול להועיל מאד בהפחתת זיהומי סביבה (למשל בכלי רכב) ולפיכך הנושא מושך עניין רב.

כאשר מסתכלים על סקלה גדולה יותר, המימן מעניין ביותר בגלל צפיפות האנרגיה העצומה שבו. קילוגרם אחד של מימן מכיל 120-140 מגה-ג'אול, פי 3-4 מדלק נוזלי רגיל או גז טבעי ובשלושה סדרי גודל יותר משיטות האגירה שתיארנו לעיל! ברור כי עבור שימוש בסקלה גבוהה, עלינו לצאת מהמעגל הסגור שתואר באיור 15 ולדאוג למאגרי מימן בדומה לכל שיטת אגירה אחרת. לשם כך יש לייצר מימן מראש ולאחסנו. את המימן המיוצר ניתן להוליך בצינורות או במכלים.

השיטה המקובלת ביותר בעולם והזולה ביותר לייצור מימן היא בעזרת גז טבעי, בעיקר מתאן. כ-95% מהמימן בעולם מיוצר מגז טבעי בשיטה הנקראת Steam Methane Reforming (SMR).¹ בשיטה זו, אדי מים בטמפרטורה ולחץ גבוהים ובנוכחות קטליזטור מתכתי כמו ניקל, מגיבים עם גז המתאן לקבלת מימן ופחמן חד חמצני (מימן אפור):



כדי להיפטר מהפחמן החד-חמצני ולמקסם את הפקת המימן, ממשיכים עם תהליך שנקרא water-gas shift:

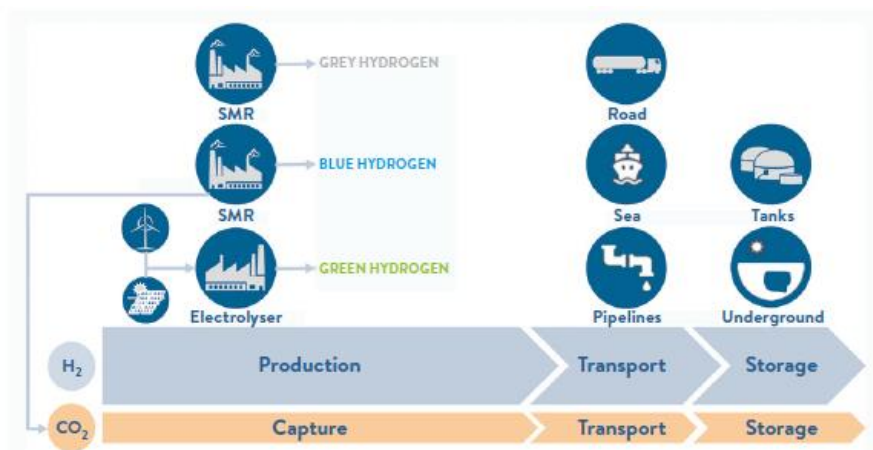


הכיוון הרצוי של הריאקציות הנ"ל נקבע בעזרת הטמפרטורה. זו נקבעת כך שהאנרגיה החופשית של גיבס שלילית והתוצר הוא מימן. את הפחמן הדו-חמצני ניתן ללכוד ולסלק או לאחסן (CCS) ומתקבל מימן נקי (מימן כחול). באופן דומה ניתן ליישם שיטה זו גם על גז ביו-מתאן המופק מחומר אורגני.

השיטה השנייה המובילה ליצור מימן היא באלקטרוליזה. כ-4% מהמימן בעולם מיוצר היום כך. בשיטה זו מפעילים מתח חשמלי על אלקטרודות במים. כאשר המתח עולה מעל תחום היציבות התרמודינמית של המים, מתפרקים אלו למרכיביהם והמימן והחמצן מצטברים בצורה גזית על יד האלקטרודות המתאימות. שני הגזים הללו בעלי ערך כלכלי גבוה וקל לתכנן מערך האוסף אותם בנפרד. בטמפרטורה של 25°C, נדרש מתח של 1.23 וולט כדי להתחיל לפרק את המים. מוסיפים גם מעט מלח למים כדי להגדיל את המוליכות שלהם.

המימן המופק באלקטרוליזה (מימן ירוק) נקי יותר ביחס להפקה מגז, היות ואינו יוצר פחמן, והתהליך יכול להתבצע בכל מקום ובכל גודל. ניתן לבזר את ההפקה ליחידות קטנות בסמוך למקום השימוש בו ובכך לבטל כמעט לחלוטין את הצורך בשינוע ובמתקני אחסון גדולים. כשמסתכלים על כלכלת הדלקים של היום, מדובר על פוטנציאל חיסכון עצום. באיור 18 מוצגת שרשרת הערך של המימן באופן הכללי ביותר ותוך הנחה שהמימן מיוצר במקומות מיועדים לכך ומשונע לאזורי חלוקה ואחסון. ההשפעה של כלכלת מימן צפויה להיות בתחומי הייצור, ההובלה, התחבורה והאחסון ועל מערך התשתיות הלאומי.

איור 18. שרשרת הערך של המימן



מקור: Centre for Energy Economics Research (CEER)

הטענה כנגד השימוש במימן המופק באלקטרוליזה הוא עלותו הגבוהה כך שבפועל נדרשת יותר אנרגיה להפקת המימן מאשר זו המתקבלת בשימוש בו. אכן, מקובל לומר כי נדרשים כ-50kWh להפקת קילוגרם אחד של מימן^{li} כלומר, כ-180MJ בעוד שניתן להפיק מאותו קילוגרם מקסימום של כ-110MJ. על פניו נראה שהכדאיות מוטלת בספק אלא שכאן בא לעזרת המימן שילוב גדל והולך של הפקת חשמל מאנרגיות מתחדשות (כדוגמת תאים פוטו-וולטאים, טורבינות רוח וביומסה) יכולת התגובה המהירה ושטחי האחסון הקטנים ככל שנרצה. אם באגירה שאובה או אגירת אוויר דחוס נדרשים שטחי ענק וזמני תגובה יחסית ארוכים, ניתן להשתמש במימן מיידיית בזמנים בהן הפעלת ההתקן היא רווחית על פי הדוגמה שראינו באיור 11. לא נדרשים שטחים גדולים וכל מפעל, או אדם פרטי יוכל לייצר את המימן הנדרש עבורו בשעות השפל של תעריף החשמל. התקני ייצור

אנרגיה מתחדשת ברוח או שמש יכולים להפנות אנרגיה עודפת שלא משתלם למכור אותה לרשת, לייצור מימן. בתמונה 19 מוצג תא דלק מימני להרכבה עצמית הנמכר באמאזון^{lii} וממחיש את היותה של הטכנולוגיה זמינה בכל סקלה. התא, מתוצרת חברת TDM, בעל ממדים של 8x8x6 ס"מ. בזרימה של 5 מ"ל לדקה הוא מפיק מתח של 3.8 וולט ומתאים להטענת אייפד.

תמונה 19. תא דלק מימני להרכבה עצמית הנמכר באמאזון

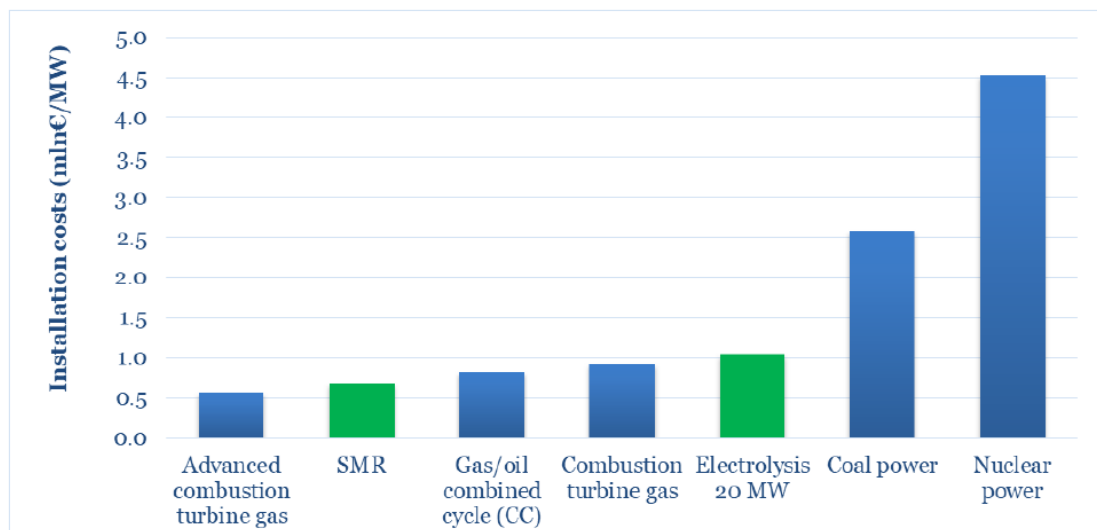


בעבודה^{liii} משנת 2005, העריכו המחקרים כי 100,000 מכונות המונעות בתאי דלק מימניים, צורכות בשנה כ-40,000 טון. כמעט 15 שנים חלפו והשנה מפרסם משרד האנרגיה האמריקאי את נתוני הצריכה בפועל של מכונות מסחריות המונעות בתאי דלק מימניים^{liv}. הונדה וטויוטה מציגות מכונות הצורכות קילוגרם אחד של מימן לנסיעה משולבת עירונית ובין-עירונית של 66 מייל (כ-105 ק"מ). בהנחה שרכב ממוצע נוסע כ-15,000 ק"מ בשנה, הצריכה השנתית של רכב עומדת על כ-150 ק"ג מימן ו-100,000 מכונות תצרכנה 15,000 טון בשנה, פחות מ-40% מההערכה שנעשתה בשנת 2005. מכיוון שהטכנולוגיה עדיין בשלבי התחלתה, ניתן לצפות לשיפורים משמעותיים נוספים בעתיד הקרוב והרחוק.

David Doty ערך תחזית של מחיר ההקמה של מפעל לייצור מימן בתפוקות שונות ועבור מחירי גז טבעי שונים^{lv}. אינטרפולציה מתוך הנתונים שחישב ושימוש במחיר גז טבעי נכון להיום, מדובר על עלות הקמת מפעל של כ-50 מיליון דולר אשר יפיק כ-100 טון מימן ביום. עלות הפקת המימן בתנאים אלו תהיה כ-1 דולר לק"ג. מפעלי ייצור גדולים יותר ייעלו עוד את התהליך ויוזילו את מחיר המימן המופק. כדי להמחיש את המשמעות של מחיר מימן של 1 דולר לק"ג, נזכר בתחשיב שערכנו בו הערכנו את הצריכה השנתית של מכונות מונעת במימן בכ-150 ק"ג. כלומר, עלות הפקת המימן למכונית תעמוד על כ-\$150 לשנה!.

יחד עם זאת אם משווים את ההשקעה הנדרשת פר 1 מגה-ואט מותקן לייצור חשמל הרי שניתן לראות כי טכנולוגיה זו הינה ברת תחרות לתחנות הפוסיליות המשמשות לייצור חשמל. באיור 20 ניתן לראות כי אפילו מימן המיוצר בשיטה היקרה ביותר, אלקטרוליזה, מתחקה בקלות רבה בתחנות פחמיות וגרעיניות ודומה מאוד בעלויות לטורבינות גז. המימן "האפור" כבר תחרותי כמעט עם כל אמצעי הייצור.

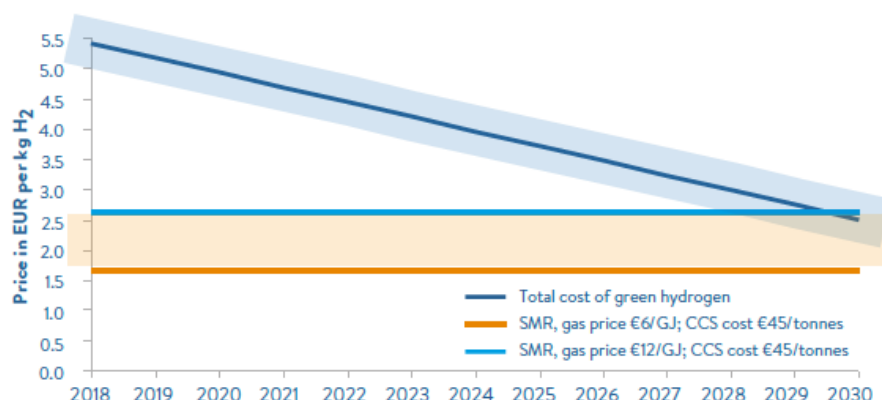
איור 20: עלויות התקנה של אמצעי ייצור אנרגיה שונים (מיליוני אירו /MW):



מקור: Centre for Energy Economics Research (CEER)

העלות הכוללת כיום של קילוגרם אחד של מימן ירוק (קרי, שימוש בתפיסה ואחסון של פחמן בתהליכי ייצור המימן) הינה כ-5-6 אירו לק"ג מימן וזאת כתלות במחיר הגז הטבעי. הצפי הוא כי עד שנת 2030 תרד עלות זו לטווח תחרותי של 2-3 אירו לק"ג מימן כפועל יוצא מהתייעלות בהליכי הייצור, גידול בקיבולת והפחתת עלויות ייצור. הקו הכחול העליון באיור 21 מציג את תחזית המחיר העתידית לייצור מימן תוך שהוא מביא בחשבון את תחום מחירי הגז הטבעי החזוי.

איור 21. תחזית להתפתחות עלות מימן ירוק עד לשנת 2030:



מקור: World Energy Council

ברור כי יש להעמיק במחקר, להתאים את המחירים למחירים הנוכחיים ולתנאים בארץ, להגדיר את הפוטנציאל בכמות לשימוש שנתי בארץ, ולכלול במחיר המימן את הוצאות ההקמה, האחסון, השינוע, המימון והתפעול כדי להגיע למסקנות ברורות.

לסיכום, המימן הוא מקור אנרגיה טבעי, בלתי מתכלה, נקי וידידותי והוא מחזיק בשיא צפיפות האנרגיה אל מול כל מקור אחר קונבנציונלי. עיקר ייצורו מתוך גז טבעי ומכיוון שיששראל עשירה בגז טבעי, נראה על פניו כי מתאים מאד לבדוק את האפשרות ליצור בארץ מפעל מימן לצורך ייצור אנרגיה נקיה. יתרון נוסף של המימן הוא היכולת לייצרו ולהשתמש בו בכל סקלה החל במכשירים אלקטרוניים ביתיים ועד מאגר אנרגיה לרשת החשמל. ניתן לשלב אגירה במימן גם יחד עם תחנות ייצור באנרגיות מתחדשות וניתן גם להשתמש בו לתחבורה. המימן גם מגיב בזמנים קצרים וארוכים ולכן יכול להתאים ליישומי יישור קו העומס כמו גם לתיקון תופעות טרנזיאנטיות ושיפור איכות החשמל. אין ספק שהמימן יתפוס חלק חשוב במשק האנרגיה העתידי בעולם והמלצתנו להעמיק בחקר הנושא ולהיערך בהתאם.

2.9 מצברים - Battery Energy Storage

סוללות ומצברים הם תחום רחב ביותר הדורש מחקר עומק בפני עצמו. סוללות בעיקרון הן תא אלקטרוכימי הממיר אנרגיה כימית לחשמלית ולהיפך (בסוללות נטענות). באופן עקרוני ואידאלי, כל עוד הדקי הסוללה פתוחים והמעגל החשמלי פתוח, הסוללה משמשת כמאגר אנרגיה. אנרגיה זו עוברת לשימוש כאשר אנחנו מחברים עומס לסוללה. בפועל, סוללות מאבדות אנרגיה גם כאשר אינן מחוברות לעומס בגלל זליגת זרם פנימית וחיצונית ותפוקתן ויעילותן הולכות ופוחות לאחר מחזורי טעינה ופריקה. סוללות ומצברים מצטיינים בצפיפות האנרגיה הגבוהה שלהם – 100 עד 1000 קילו-ג'אול לקילוגרם – תלוי בסוג הסוללה ובכל מקרה הרבה יותר מכל שיטות האגירה האחרות שסקרנו כאן, למעט מימן. סוגים רבים ומגוונים של סוללות וטכנולוגיות סוללות קיימים, לכל אחד הביצועים והמאפיינים המיוחדים שלו^{lvi}. בסקירה זו נתמקד באגירה לצרכי הרשת. כפי שצינו בהקדמה, כאשר אנחנו עוברים לאגירה בסקלה גדולה כמו יישור עקומת העומס, אחסון אנרגיה מתחדשת או תחבורה, הפרמטרים החשובים הופכים להיות העלות ליחידת אנרגיה, למשל לקו"ש, היעילות של מחזור אנרגיה, ההוצאות התפעוליות, אורך החיים של הטכנולוגיה, ההשפעה על הסביבה והבטיחות.

מצברי עופרת הם קלים יחסית לייצור, בעלי תגובה יחסית מהירה וזמן חיים טוב. זו הסיבה שהם משמשים מזה עשרות שנים כמצברים למכוניות. מחירם הנמוך ליחידת אנרגיה הופך אותם לאטרקטיביים וקבוצות של מצברי עופרת תומכים גם במערכי הפקת אנרגיה שמש. למצברי עופרת צפיפות אנרגיה טיפוסית מסדר גודל של 100kJ/kg ועלותן כ-100\$ לקו"ש.

קבוצת הסוללות הצומחת ביותר אשר מתאימה גם לאגירת אנרגיות מתחדשות היא סוללות יוני-ליתיום Lithium ion^{lvii}. לסוללות אלו יעילות טעינה גבוהה ופריקה ספונטנית נמוכה. הצמיחה המהירה שלהן מובילה גם לנפילה מהירה במחירן והן יכולות להתאים גם לצרכן הפרטי וגם לסקלת רשת. גם כאן, השונויות בין סוגי סוללות הליתיום עצומה והמבחר רב. במכשירים ניידים משתמשים בעיקר בליתיום קובלט המציע צפיפות אנרגיה גבוהה אך מלווה בסיכון בטיחותי. ליתיום-ברזל, ליתיום-מנגן חמצני או ליתיום-ניקל-מנגן-קובלט-חמצן מציעים צפיפות אנרגיה פחותה עם בטיחות מוגברת. סוללות ליתיום קלות וקומפקטיות יותר ממצברי העופרת ועומק הפריקה שלהן עמוק יותר אך הן יקרות הרבה יותר.

קבוצה נוספת של סוללות/מצברים הן "סוללות זרימה" (flow batteries)^{lviii}. סוללות אלו מכילות שתי תמיסות אלקטרוליטיות במכלים נפרדים. הזרם החשמלי מתקבל כאשר מטען עובר בין התמיסות דרך ממברנה. לסוללות זרימה עומק פריקה גבוה מאד כלומר, ניתן להשתמש ביותר מהאנרגיה האגורה בהן. גם אורך החיים שלהן ארוך הרבה יותר מסוללות אחרות ומספר מחזורי

הטעינה-פריקה שלהן גבוהה מ-10,000. מנגד, היעילות של מחזור מלא נמוכה יחסית, קיימת סכנת דליפה של חומרים כימיים, נדרשים חיישנים לניטור וניהול ורכיבים מסוימים עדיין יקרים מדי^{lix}. קצרה היריעה לתאר כל סוללה וסוללה במסגרת הסקירה הנוכחית. טבלת השוואה טובה נמצאת באתר ויקיפדיה ואנו מעתיקים צילום שלה כאן^{lx}. לכל יישום ולכל נקודת התקנה ספציפית יש להגדיר היטב את הצרכים ואת התנאים הרצויים והאפשריים ולבחון את סוגי הסוללות והמצברים שבאים בחשבון.

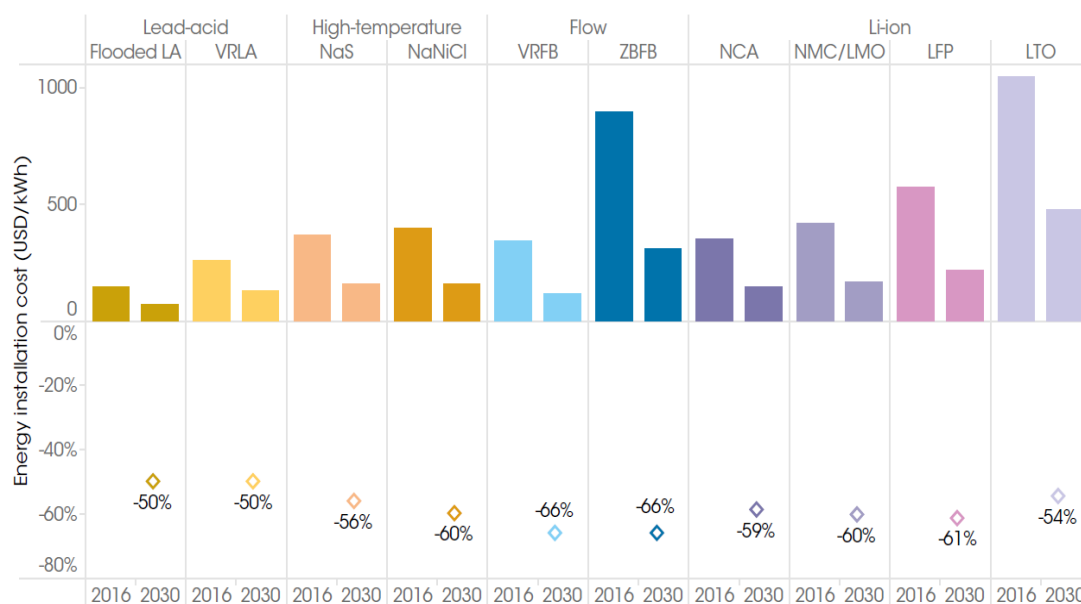
טבלה מצומצמת יותר מובאת כאן ומתייחסת לשלוש משפחות הסוללות שהצגנו לעיל. הנתונים מתוך דו"ח של הסוכנות הבינלאומית לאנרגיות מתחדשות IRENA – International Renewable Energy Agency^{lxi}. נתוני הביצועים מתייחסים לשנת 2016.

סוג הסוללה	עומק פריקה	יעילות מחזור מלא	מחזורי טעינה/פריקה
ליתיום	90-95%	92-96%	1,000-10,000
זרימה	100%~	70%	+10,000
עופרת	50%	80-82%	1,500

טבלה 4: השוואת פרמטרים עיקריים בין סוללות ליתיום, זרימה ועופרת. מקור: IRENA^{lxii}

בדומה לטכנולוגיות אחרות של אנרגיות מתחדשות עלות ההשקעה של הסוללות נמצאת בתוואי ירידה חדה ואומדני גופים שונים הינם לירידה של 50%-60% בעלות עד שנת 2030. איור 22 מציג את הירידה החזויה במחירים למשפחות שונות של סוללות. שיא הירידה בעלויות, 66%, צפוי להיות בסוללות זרימה אך גם בכל שאר הסוגים הירידה החזויה מרשימה.

איור 22. שינויים חזויים במחירי הסוללות עד לשנת 2030:



Note: LA = lead-acid; VRLA = valve-regulated lead-acid; NaS = sodium sulphur; NaNiCl = sodium nickel chloride; VRFB = vanadium redox flow battery; ZBFB = zinc bromine flow battery; NCA = nickel cobalt aluminium; NMC/LMO = nickel manganese cobalt oxide/lithium manganese oxide; LFP = lithium iron phosphate; LTO = lithium titanate.

מקור: IRENA

יתרון גדול של הסוללות הוא המודולריות שלהן המאפשרת בניה של "בנק סוללות" המתאים לכל קנה מידה, החל מסוללה אחת לשימוש ביתי ועד אלפי סוללות המחוברות יחד כמו בפרויקט של טסלה-נאון באוסטרליה שיתואר להלן. המשמעות של מודולריות זו היא שהסוללות יכולות לצמוח

יד ביד עם תחנות אנרגיה מתחדשות כמו רוח או שמש ולהפכן באופן אפקטיבי לתחנות הניתנות לשליטה על ידי מנהל הרשת היכול לשלבן ברשת על פי הצורך.

כאמור, הפרויקט הגדול והמרתק ביותר של אגירת אנרגיה בסוללות מבוסס על הסוללות של טסלה הנקראות Powerpack^{lxiii}. מדובר על מודולים של 16 סוללות יוני-ליתיום המבוקרות בעזרת אלקטרוניקה וממירי DC. טסלה חברה לחברת Neoen הצרפתית אשר הקימה חוות אנרגית רוח בדרום אוסטרליה ואל החווה הצמידה בנק סוללות הגדול בעולם האוגר 100MW בהספק מקסימלי של 129MWh. בנק סוללות זה מוצג בתמונה 23. טסלה התחייבה להקים את בנק הסוללות בתוך 100 ימים ועמדה ביעד בהצלחה. כחודשיים לאחר ההתקנה, עמד ההתקן המשולב במבחן אמת כאשר נרשמה הפרעת רשת משמעותית והסוללות הגיבו בתוך 140msec והבטיחו אספקה. הפרסומים מדברים על חיסכון משמעותי לרשת בעקבות יכולות תיקון התדר שמציגות הסוללות^{lxiv}. נתונים כלכליים שהתגלו מאוחר יותר מתוך דוחות של נאון הראו כי טסלה-נאון חתמו חוזה עם ממשלת אוסטרליה בו התחייבו לשמור אנרגיה בסוללות למטרות תיקון הפרעות תדר וחלק אחר של האנרגיה הן מוכרות לרשת. החוזה שנחתם אפשר לטסלה-נאון להשיג הכנסות נאות ביותר בשנת הפעילות הראשונה של ההתקן^{lxv}. הסוללות עצמן נרכשו מטסלה במחיר של 56 מיליון אירו.

הצלחת הפרויקט ויחסי הציבור שהשיג הביאו את הממשלה האוסטרלית להחלטה על פרויקטים נוספים לאגירה בסוללות של טסלה. מעניין ביותר יהיה לעקוב אחרי ביצועי אתר האגירה ככל שהזמן חולף והסוללות "מזדקנות".

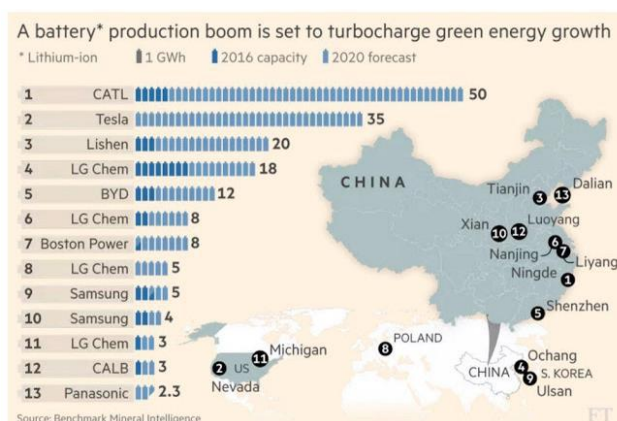
תמונה 23. צילום בנק הסוללות של טסלה באתר חוות הרוח בדרום אוסטרליה. מקור: Eniday^{lxvi}



כפי שראינו באיור 22 מחירי סוללות הליתיום ירדו בחדות בשנים האחרונות וצפויים להמשיך ולרדת בשנים הקרובות.

מכיוון שסוללות הליתיום משמשות באופן נרחב את תעשיית הרכב, צפוי ייצור מוגבר של סוללות אלה בעתיד, בעיקר בסין, כפי שניתן לראות בתחזית להלן המוצגת באיור 24. הנתונים הקיימים באיור הם משנת 2016 כאשר כל מלבן כחול קטן מייצג אנרגיה אגורה בסך גיגה-וואט-שעה. התחזית באיור היא לשנת 2020.

איור 24: תחזית להתפתחות מתקני ייצור הבטריות עד לשנת 2020:



איור 25. צילום טבלת השוואה בין טכנולוגיות סוללות. מתוך אתר ויקיפדיה lxvii

Cell chemistry	Also known as	Electrode		Recharge-able	Commercial-ized	Voltage			Energy density		Specific power	Cost [†]	Discharge efficiency	Self-discharge rate	Shelf life
		Anode	Cathode			Cutoff	Nominal	100% SOC	by mass	by volume					
											year	V	V	V	MJ/kg (Wh/kg)
Lead-acid	SLA VRLA	Lead	Lead dioxide	Yes	1881 ^[1]	1.75 ^[2]	2.1 ^[2]	2.23–2.32 ^[2]	0.11–0.14 (30–40) ^[2]	0.22–0.27 (60–75) ^[2]	180 ^[2]	6.61–17.01 (59–151) ^[2]	50–92 ^[2]	3–20 ^[2]	
Zinc-carbon	Carbon-zinc	Zinc	Manganese (IV) oxide	No	1898 ^[3]	0.75–0.9 ^[3]	1.5 ^[3]		0.13 (36) ^[3]	0.33 (92) ^[3]	10–27 ^[3]	3.02 (331) ^[3]	50–60 ^[3]	0.32 ^[3]	3–5 ^[4]
Zinc-air	PR		Oxygen	No	1932 ^[5]	0.9 ^[5]	1.45–1.65 ^[5]		1.59 (442) ^[5]	6.02 (1,673) ^[5]	100 ^[5]	2.65 (378) ^[5]	60–70 ^[5]	0.17 ^[5]	3 ^[5]
Mercury oxide-zinc	Mercuric oxide Mercury cell		Mercuric oxide	No	1942–1996 ^{[6][7]}	0.9 ^[8]	1.35 ^[8]		0.36–0.44 (99–123) ^[8]	1.1–1.8 (300–500) ^[8]					2 ^[6]
Alkaline	Zn/MnO ₂ LR		Manganese (IV) oxide	No	1949 ^[9]	0.9 ^[10]	1.5 ^[11]	1.6 ^[10]	0.31–0.68 (85–190) ^[12]	0.90–1.56 (250–434) ^[12]	50 ^[12]	0.47 (2117) ^[12]	45–85 ^[12]	0.17 ^[12]	5–10 ^[4]
Rechargeable alkaline	RAM			Yes	1992 ^[13]	0.9 ^[14]	1.57 ^[14]	1.6 ^[14]						<1 ^[13]	
Silver-oxide	SR		Silver oxide	No	1960 ^[15]	1.2 ^[16]	1.55 ^[16]	1.6 ^[17]	0.47 (130) ^[17]	1.8 (500) ^[17]					
Nickel-zinc	NiZn			Yes	2009 ^[13]	0.9 ^[13]	1.65 ^[13]	1.85 ^[13]						13 ^[13]	
Nickel-iron	NiFe	Iron	Nickel oxide hydroxide	Yes	1901 ^[18]	0.75 ^[19]	1.2 ^[19]	1.65 ^[19]	0.07–0.09 (19–25) ^[20]	0.45 (125) ^[21]	100	4.02–5.36 (186–249) ^[1]	20–30	30–50 ^{[22][23][24]}	
Nickel-cadmium	NiCd NiCad	Cadmium		Yes	c. 1960 ^[25]	0.9–1.05 ^[26]	1.2 ^[27]	1.3 ^[26]	0.11 (30) ^[27]	0.36 (100) ^[27]	150–200 ^[28]		10 ^[13]		
Nickel-hydrogen	NiH ₂ Ni-H ₂	Hydrogen		Yes	1975 ^[29]	1.0 ^[30]	1.55 ^[28]		0.16–0.23 (45–65) ^[28]	0.22 (60) ^[31]	150–200 ^[28]			5 ^[31]	
Nickel-metal hydride	NiMH Ni-MH	Metal hydride		Yes	1990 ^[1]	0.9–1.05 ^[26]	1.2 ^[11]	1.3 ^[26]	0.36 (100) ^[11]	1.44 (401) ^[32]	250–1000	3.22 (311) ^[1]		30 ^[33]	
Low self-discharge nickel-metal hydride	LSD NiMH			Yes	2005 ^[34]	0.9–1.05 ^[26]	1.2	1.3 ^[26]	0.34 (95) ^[35]	1.27 (353) ^[36]	250–1000			0.42 ^[33]	
Lithium-manganese dioxide	Lithium Li-MnO ₂ CR Li-Mn	Lithium	Manganese dioxide	No	1976 ^[37]	2 ^[38]	3 ^[11]		0.54–1.19 (150–330) ^[39]	1.1–2.6 (300–710) ^[39]	250–400 ^[39]			1	5–10 ^[39]
Lithium-carbon monofluoride	Li-(CF) _x BR		Carbon monofluoride	No	1976 ^[37]	2 ^[40]	3 ^[40]		0.94–2.81 (260–780) ^[39]	1.58–5.32 (440–1,478) ^[39]	50–80 ^[39]			0.2–0.3 ^[41]	15 ^[39]
Lithium-iron disulfide	Li-FeS ₂ FR		Iron disulfide	No	1989 ^[42]	0.9 ^[42]	1.5 ^[42]	1.8 ^[42]	1.07 (297) ^[42]	2.1 (580) ^[43]					
Lithium-titanate	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂		Lithium manganese oxide or Lithium nickel manganese cobalt oxide	Yes	2008 ^[44]	1.6–1.8 ^[45]	2.3–2.4 ^[45]	2.8 ^[45]	0.22–0.40 (60–110)	0.64 (177)	3,000–5,100 ^[46]	0.48 (2088) ^[46]	85 ^[46]	2–5 ^[46]	10–20 ^[46]
Lithium cobalt oxide	LiCoO ₂ ICR LCO Li-cobalt ^[47]	Graphite [‡]	Lithium cobalt oxide	Yes	1991 ^[48]	2.5 ^[49]	3.7 ^[50]	4.2 ^[49]	0.70 (195) ^[50]	2.0 (560) ^[50]		2.68 (373) ^[1]			
Lithium iron phosphate	LiFePO ₄ IFR LFP Li-phosphate ^[47]		Lithium iron phosphate	Yes	1996 ^[51]	2 ^[49]	3.2 ^[50]	3.65 ^[49]	0.32–0.47 (90–130) ^[50]	1.20 (333) ^[50]	200 ^[52]		4.5		
Lithium manganese oxide	LiMn ₂ O ₄ IMR LMO		Lithium manganese oxide	Yes	1999 ^[1]	2.5 ^[53]	3.9 ^[50]	4.2 ^[53]	0.54 (145) ^[50]	1.5 (420) ^[50]		2.68 (373) ^[1]			

3. סיכום

בדו"ח זה סקרנו סקירה ראשונית של טכנולוגיות אגירת האנרגיה הנמצאות היום בשוק בשלבים שונים של פיתוח. חלקן טכנולוגיות ותיקות ובשלות בנות עשרות שנים וחלקן בשלבי מחקר ופיתוח והוכחת היתכנות.

השונויות בין הטכנולוגיות עצומה והמגוון רחב ביותר. כל טכנולוגיה נחלקת גם היא לאפשרויות מימוש רבות אשר גם הן נבדלות באופן ניכר זו מזו. פרמטרים רבים צריכים להיבחן ואין כל אפשרות להכריז על טכנולוגיה מנצחת באופן מוחלט. לכל התקנה ולכל צורך ספציפי, יש לבחור את הפתרון המתאים ביותר באופן נקודתי.

בסקירה הנוכחית תיארנו שבע טכנולוגיות אגירה ראשיות, כל אחת מהן יכולה להכיל תת-טכנולוגיות ואופני מימוש שונים. ניתן לחלק את טכנולוגיות האגירה באופן ראשוני על פי ייעודה העיקרי ואנו מבדילים בין שניים עיקריים: החלקת עקומת העומס ושיפור איכות החשמל. לצורך שיטוח עקומת העומס נדרשת כמות רבה של אנרגיה אגורה, זמן האספקה צריך להיות מסדר גודל של שעות וזמן התגובה צריך להיות מסדר גודל של שניות. טכנולוגיות האגירה הבאות בחשבון במקרה זה הן: אגירה תרמית, אגירה מכנית באוויר דחוס, אגירה שאובה ומימן. באשר לשיפור איכות החשמל, מדובר בתופעות טרנזיאנטיות מהירות אותן צריך לבטל במהירות הגבוהה מהתופעה עצמה. לשם כך מספיקה כמות אנרגיה אגורה נמוכה הרבה יותר אך הספק גבוה מאד וזמן תגובה מהיר ביותר, מסדר גודל של מילי-שניות. זמן האספקה הנדרש הוא מסדר גודל של שניה, עד שאמצעי אגירה אחרים יכנסו לפעולה. הטכנולוגיות המתאימות לדרישות של שיפור איכות החשמל הן: גלגלי תנופה, קבלי-על, סלילים מוליכי-על ומימן. **דרגת ההתאמה של טכנולוגיה מסוימת לצורך נתון יכולה להיקבע באופן וודאי רק לאחר בחירת מיקום ספציפי להתקנה והגדרת הצרכים המדויקים.**

להלן הפרמטרים העיקריים המגדירים את צרכי ההתקנה ואותם יש לבחון אל מול כל טכנולוגיה בעלת התאמה אפשרית ראשונית:

צפיפות אנרגיה – כמה אנרגיה ליחידת משקל או נפח ניתן לאגור בטכנולוגיה מסוימת. פרמטר זה בשילוב עם כמות האנרגיה הנדרשת קובע את ממדי התקן האגירה ולפיכך יכול להוות חסם לשימוש בו. לדוגמא, לאגירה שאובה צפיפות אנרגיה נמוכה מסדר גודל של קילו-ג'אולים לקילוגרם. מכיוון שהצורך הוא בכמות אנרגיה גבוהה שתספיק לשעות של אספקה, הרי שמדובר בהתקנים עצומים הדורשים שטח נדל"ן ענק. לפיכך, אגירה שאובה כנראה שאינה הפתרון המיטבי ליישור עקומת העומס אצל הצרכן הפרטי או המפעלי.

הספק או צפיפות הספק – פרמטר הקובע את היכולת להשתמש במהירות באנרגיה האגורה. הספק גבוה משמעו שאנו יכולים לפרוק את האנרגיה האגורה במהירות רבה כלומר לשרת צרכנים הדורשים הספק גבוה. צפיפות ההספק משמעה כמה משקל/נפח נדרש בהתקן עבור יחידת הספק. למשל, עבור שיפור איכות החשמל נדרש הספק גבוה מאד כדי להשתמש באנרגיה האגורה במשכי הזמן הקצרים הנדרשים. צפיפות ההספק תקבע את גודל ההתקן. במצברים, הספק גבוה הולך בדרכ"ע עם הפסדי אנרגיה פנימיים גבוהים שכן העלאת זרם הפריקה/טעינה גוררת מפל מתח והפסדים על ההתנגדות הפנימית.

איכות אנרגיה – היכולת לבצע עבודה בעזרת האנרגיה האגורה. קל להבין זאת אם נסתכל על מאגר מים עצום כאשר המים יוצאים ממנו מהמוני ברזים מטפטפים טיפה אחר טיפה. כמעט שאין ביכולתנו לבצע עבודה (לסובב מנוע) עם המים הללו. אנו זקוקים ללחץ גבוה ומהירות זרימה משמעותית כדי לתרגם ביעילות את האנרגיה לעבודה. כך באגירה תרמית, טמפרטורה גבוהה

משמעה אנרגיה איכותית, באגירה מכנית לחץ גבוה ובאגירה חשמלית מתח גבוה הם אלו הקובעים את איכות האנרגיה.

זמן אספקה – משך זמן בו יוכל התקן האגירה לספק את ההספק הנדרש, באיכות הנדרשת.
עומק פריקה – העובדה שהתקן מסוים אוגר סך אנרגיה מסוים אינה מעידה על היכולת להשתמש בכל האנרגיה. כל טכנולוגיה או התקן ספציפי משתמשים בחלק מהאנרגיה האגורה, אם בגלל מגבלות הטכנולוגיה ואם משום שבשלב מסוים של הפריקה האנרגיה הנותרת כבר אינה איכותית. למשל, במצברי ליתיום ככל שנפרק פריקה עמוקה יותר את המצבר כך יתקצרו חייו ולכן לכל סוג מצבר יוגדר עומק פריקה אופטימלי. עומק הפריקה בשילוב עם האנרגיה האגורה נותן לנו את סך האנרגיה העומדת לרשות הצרכן. עומק הפריקה משליך גם על צפיפות האנרגיה המעשית של הטכנולוגיה.

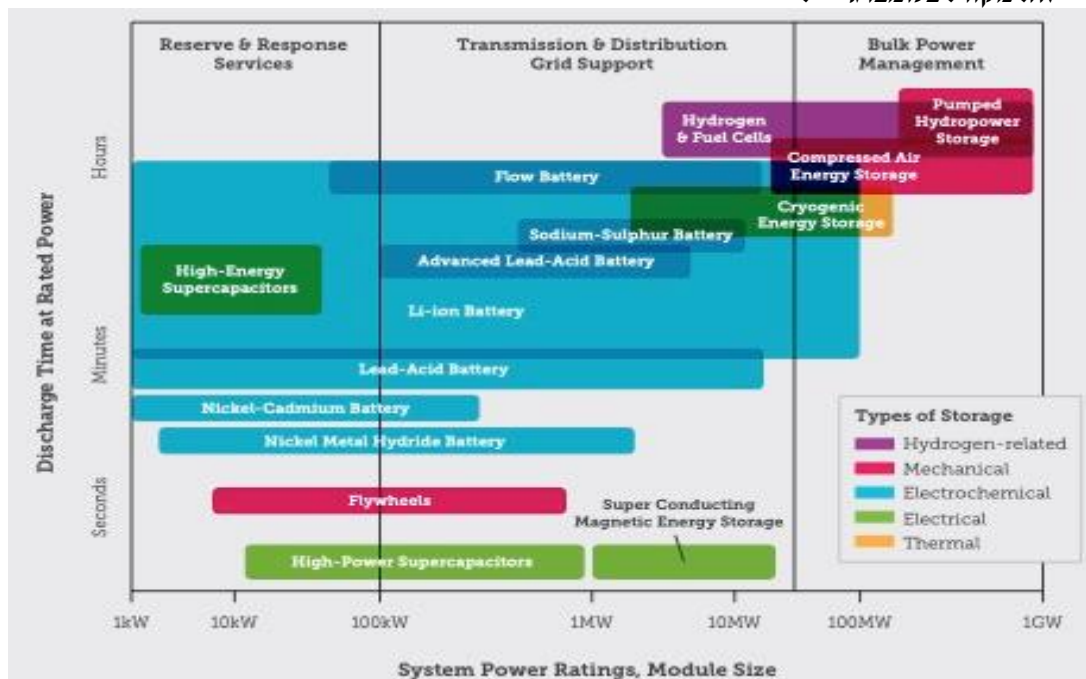
זמן חיים – משך חיי ההתקן והתחזוקה הנדרשת בו הם פרמטרים חשובים מאין כמותם, במיוחד כאשר מדובר בהתקנים גדולים מאוד. ביישומים המתאימים לרמה המשקית, נדרש בדרך כלל זמן חיים של התקן מסדר גודל של 30-50 שנה עם תחזוקה במרווחי זמן גדולים ככל האפשר, רצוי שנים. בהתקנים ברמה מפעלית ופרטית נדרוש זמן חיים ותחזוקה של שנים אחדות לפחות. בטכנולוגיות כמו מצברים, בהן יש ירידה של הביצועים בתלות במספר מחזורי הטעינה והפריקה, זמן החיים הופך להיות פרמטר קריטי והוא משפיע גם על איכות הסביבה.

יעילות – כאשר מביאים בחשבון את סך האנרגיה המושקעת בתהליך האגירה את מול האנרגיה הניתנת לשימוש בצד הצרכן, את איכותה של האנרגיה המנוצלת ואת התלות בזמן לאורך חיי הטכנולוגיה, נוכל להגדיר יעילות כללית של ההתקן והטכנולוגיה.

עלות – בחישוב הכדאיות של טכנולוגיה או התקן ספציפי יש להביא את כל העלויות כולן. עלות הרכישה, המימון, ההובלה, ההתקנה, ההפעלה השוטפת, התחזוקה וכל עלות אחרת. את העלות הכוללת יש להשוות אל מול סך התפוקות של הטכנולוגיה במישור הכלכלי, הביטחוני, הביטחון האנרגטי והחברתי מדיני.

איור 26 מתאר באופן סכמתי ביותר את הטכנולוגיות השונות כאשר בציר האופקי מופיע תחום ההספק הנקוב אותו ניתן לקבל מטכנולוגיה מסוימת ובציר האנכי משך הזמן האופייני לקבלת הספק זה. האיור מתוך מצגת של בלומברג ואין להתייחס למספרים הנקובים כאל מספרים מוחלטים אלא רק לשונויות הגבוהה (למשל, הראנו כי אגירה במימן יכולה להתאים גם לזמנים קצרים יותר מתחום הזמנים המופיע באיור זה). האיור מדגים כיצד לכל טכנולוגיה תחום במרחב ההספק וזמן האספקה בו היא יכולה לתת מענה וכי בכל תחום מבוקש ניתן למצוא כמה טכנולוגיות מתחרות. להלן נסכם בקצרה לכל טכנולוגיה שסקרנו את הפרמטרים העיקריים.

איור 26. תחומים אופייניים של הספק נקוב בשיטות אגירה שונות אל מול הזמן האופייני לקבלת הספק זה. מקור: בלומברג^{lxviii}.



הטבלה הבאה מציגה את הטכנולוגיות השונות, עם טווח קיבולת האחסון לכל טכנולוגיה, ספקים נבחרים, וכן אורך חיים משוער. יצוין שאורך החיים בפועל תלוי במידה רבה בתת-טכנולוגיה, תכיפות ניצול האנרגיה, פקטורים הנדסיים וכד'.

3.1. אגירה תרמית

העיקרון: חום גלוי או כמוס נאגר בחומר ומשמש אח"כ לייצר עבודה. בסקירה כאן התייחסנו לחום גלוי במים או חומרים בטוניים.

יעוד עיקרי: יישור עקומת עומס ברמת מפעל או תחנת ייצור באנרגיות מתחדשות

צפיפות אנרגיה: סדר גודל של 100kJ/kg . צפיפות בינונית עד נמוכה

הספק: בינוני

זמן אספקה: שעות

יעילות: נמוכה עד בינונית

יתרונות: 1. ניצול חום זמין או חום עודף. למשל במפעלי תעשייה בהם נוצר ממילא חום אשר אחרת הולך לאיבוד, בתחנת ייצור סולרית 2. ניתן להוסיף ערך מתחומים נוספים כמו תיירות, חינוך. **בשללות טכנולוגית:** חום גלוי – ישנן התקנות בעולם ובארץ וכן פיתוח של רעיונות חדשים ושיפור קיימים. חום כמוס – מחקר ופיתוח של חומרים חדשים ושל רעיונות והתקנים בסקלות של בתים, מבנים ומעלה.

התאמה לישראל: כאשר יש מקור חום זמין, מתאים ברמת הספק של מפעל או בתחנת ייצור אנרגיה סולרית. ישנן כמה התקנות בארץ ומתקיים מחקר ופיתוח לאיתור חומרים משופרים לאגירת חום כמוס ולשיפור טכנולוגיות חום כמוס. ברמת הספק גבוהה יותר, יכולה להיות התאמה אם ניתן להביא ערך נוסף ולהפיק תועלות נוספות. למשל, ליצור אטרקציה תיירותית ואתר חינוכי סביב אתר האגירה.

המלצות: המשך מעקב אחר התקדמות הטכנולוגיה בעולם ובארץ. השקעה במו"פ לחומרים חדשים ורעיונות יישום חדשניים אשר יכולים ליצור מקומות עבודה חדשים ולייצר הכנסות מתמלוגים.

3.2. אגירת אוויר דחוס

העיקרון: דחיסה ואחסון של אוויר בלחץ גבוה. בזמן השחרור האוויר מבצע עבודה ומספק אנרגיה. האחסון באתרים בעלי מבנה טבעי מתאים או במכלים עיליים או תת-קרקעיים בשיטות שונות.

יעוד עיקרי: יישור עקומת עומס ברמת מפעל, תחנת ייצור באנרגיות מתחדשות, או ברמת רשת.

צפיפות אנרגיה: סדר גודל של $40\text{--}100\text{kJ/kg}$. צפיפות בינונית עד נמוכה

הספק: בינוני עד גבוה.

זמן אספקה: שעות.

יעילות: נמוכה.

יתרונות: 1. האוויר זמין ופשוט 2. הטכנולוגיה פשוטה בעיקרה.

בשללות טכנולוגית: אגירת אוויר דחוס באתרי טבע סלעיים קימת ומוכחת. אגירה במכלים מיוחדים, עיליים או תת-קרקעיים נמצאת תחת מחקר ופיתוח וכמה חברות הזנק מבצעות התקנות. **התאמה לישראל:** ברמת הרשת, תיתכן התאמה רק אם נמצא אתר טבעי מתאים מבחינה גיאולוגית ובו תיתכן גם כדאיות כלכלית. ברמת המפעל או תחנת ייצור קטנה, יש כבר התקנות של חברת אוגווינד ונראה שיש כדאיות במקום שבו יש שימוש גם לאוויר הדחוס עצמו.

המלצות: המשך מעקב אחר התקדמות הטכנולוגיה בעולם ובארץ. בדיקה עם אנשי מקצוע של אפשרויות לאתרים בארץ בקנה מידה רשתי. בחינה של ההתקנות המפעליות בארץ ובעולם לחישוב הכדאיות הכלכלית על פי נתוני אמת. השקעות במחקר ופיתוח של טכנולוגיות ורעיונות.

3.3. אגירה שאובה

העיקרון : העלאת מים למאגר עילי בעזרת טורבינות בחשמל זול. הפלתם למאגר תחתי והפקת חשמל בטורבינות בעת חשמל יקר.

יעוד עיקרי : יישור עקומת עומס ברמה רשתית.

צפיפות אנרגיה : סדר גודל של 5kJ/kg . צפיפות נמוכה

הספק : גבוה

זמן אספקה : שעות

יעילות : נמוכה עד בינונית

יתרונות : אפשרות לאגירת כמות אנרגיה רבה מאד בתלות בגודל המאגר והפרשי הגובה

בשלות טכנולוגית : הטכנולוגיה בשלה ומותקנת בעשרות ומאות נקודות ברחבי העולם עם רמות אנרגיה גבוהות ביותר.

התאמה לישראל : בישראל יש ארבע התקנות בשלבי פיתוח שונים. נדרשים אתרים מיוחדים בעלי תנאים גיאולוגיים, סביבתיים ופוליטיים המאפשרים הקמת מאגרים. מבחינת הטכנולוגיה, אם ישנם תנאים מתאימים להקמת אתרים נוספים, הדבר אפשרי. השאלה היא כלכלית ותיבחן על סמך התוצאות ששיגו המתקנים הקיימים.

המלצות : מחקר עומק של הטכנולוגיה והבנת התנאים בהם יש יתרון מובהק לאגירה שאובה. ניתוח דקדקני של התוצאות בהתקנות הקיימות והמתוכננות, איתור הנקודות החלשות והצבעה על אפשרויות לשיפור במתקנים הבאים.

3.4. גלגלי תנופה

העיקרון : דיסקה בעלת מסה כבדה סובבת סביב ציר הסימטריה במהירות זוויתית גבוהה וצוברת אנרגיה קינטית. האנרגיה נרכשת מהרשת ומוחזרת אליה על פי צורך

יעוד עיקרי : תיקון הפרעות ברמת צרכן רגיש הדורש הספק מסדר גודל של מגה וואטים בודדים

צפיפות אנרגיה : סדר גודל של $10\text{--}30\text{kJ/kg}$. צפיפות נמוכה

הספק : בינוני עד גבוה

זמן אספקה : שניות

יעילות : גבוהה

יתרונות : 1. נכון להיום הטכנולוגיה מחזיקה בשיא ההספק להפרעות רשת

בשלות טכנולוגית : הטכנולוגיה בשלה ונמצאת בצמיחה עם מאמץ להגדלת ההספק ופרויקטי חלוץ בעולם לבחינת ההתאמה לרמה רשתית.

התאמה לישראל : הטכנולוגיה מתאימה ברמת הצרכן הרגיש. יש התקנות רבות בארץ ושיווק של מערכות מסחריות.

המלצות : המשך מעקב אחר התקדמות הטכנולוגיה בעולם ובארץ.

3.5. קבלי-על

העיקרון: מטען חשמלי נאגר בקבלים מיוחדים בעלי קיבול עצום. הקבל נפרק ומספק את האנרגיה שבו על פי הצורך

יעוד עיקרי: תיקון הפרעות ברשת ושיפור איכות החשמל ברמת הצרכן הרגיש. תחליף למערכות SRT מבוססות מצברים.

צפיפות אנרגיה: סדר גודל של 15-30kJ/kg. צפיפות בינונית עבור התקנים המיועדים לתגובה מהירה

הספק: בינוני עד גבוה

זמן אספקה: שניות

יעילות: גבוהה

יתרונות: 1. אין המרת אנרגיה. האגירה באנרגיה חשמלית 2. ללא סכנה בטיחותית כמו בגלגלי תנופה או מצברים.

בשלות טכנולוגית: מערכות מבוססות קבלי-על ברמות אנרגיה של מגה וואטים מתחילות רק עכשיו להיכנס לשוק. הטכנולוגיה מבשילה בהדרגה ונמצאת בצמיחה.

התאמה לישראל: מתאים בכל מקום בו מערכות SRT מבוססות גלגלי תנופה או מצברים אינן מותרות או אינן רצויות. יש התקנות מסחריות ראשוניות בארץ שהן חלוצות בעולם.

המלצות: המשך מעקב אחר התקדמות הטכנולוגיה בעולם ובארץ. השקעה במו"פ לקבלי-על חדשים ושיפורים בטכנולוגית האגירה וההמרה.

3.6. סלילים מוליכי על

העיקרון: זרם חשמלי זורם ללא התנגדות וללא הפסדים בסליל מוליך-על שהדקיו סגורים. הסליל נפתח ונסגר בעזרת מתגים מהירים לקבלת אנרגיה מהרשת או להזרקת אנרגיה אליה

יעוד עיקרי: תיקון הפרעות ברשת ושיפור איכות החשמל ברמת הצרכן הרגיש. תחליף למערכות SRT מבוססות מצברים, גלגלי תנופה או קבלי-על.

צפיפות אנרגיה: סדר גודל של 10kJ/kg. צפיפות נמוכה.

הספק: גבוה מאוד

זמן אספקה: שניות

יעילות: גבוהה

יתרונות: 1. אין המרת אנרגיה. האגירה באנרגיה חשמלית 2. אין "הזדקנות" של הסליל, ירידה בביצועיו או הגבלה על מספר מחזורי הטעינה-פריקה 3. אפשרות למיתוג ישיר למתח גבוה ללא השנאה, אנרגיה איכותית.

בשלות טכנולוגית: טכנולוגיה בפיתוח. קיימים אבי טיפוס שאינם מסחריים ובישראל מפתחים אב-טיפוס ראשון מסחרי

התאמה לישראל: מתאים בכל מקום בו מערכות SRT מבוססות גלגלי תנופה או מצברים אינן מותרות או אינן רצויות. אפשרות לשילוב עתידי עם אגירת אנרגיה במימן.

המלצות: המשך מעקב אחר התקדמות הטכנולוגיה בעולם ובארץ. השקעה במו"פ לחוטים מוליכי-על משופרים ושיפורים בטכנולוגית האגירה וההמרה.

3.7. אגירה במימן

העיקרון : ייצור מימן מגז טבעי או באלקטרוליזה ושימוש להפקת אנרגיה באמצעות תאי דלק או מנועים וטורבינות שעברו התאמה.

יעוד עיקרי : יישור עקומת העומס. יכול לתת מענה לכל סוגי הלקוחות, מהפרטי ועד לרמה הרשתית.

צפיפות אנרגיה : סדר גודל של 120-140 MJ/kg. צפיפות גבוהה ביותר. יותר מכל אמצעי אגירה אחר

הספק : גבוה

זמן אספקה : דקות עד שעות וימים

יעילות : גבוהה

יתרונות : 1. אנרגיה נקיה וזמינה 2. אפשרות לבנות כלכלת אנרגיה מבוססת מימן כאלטרנטיבה לדלק פחמני.

בשלות טכנולוגית : בשלבי פיתוח. ישנם יישומים בעולם והתחום נמצא תחת מחקר ופיתוח מואץ. **התאמה לישראל :** מאגרי הגז של ישראל הופכים אותה למתאימה מאד לכלכלת מימן. גם היכולת לתת מענה בכל סקלה לאגירת אנרגיה אטרקטיבית מאד מבחינת המדינה. לא נדרשים מגה-פרויקטים על מנת להגיע להישגים בינלאומיים חשובים.

המלצות : מעקב עומק אחר הטכנולוגיה ויישומיה בארץ ובעולם. השקעות במטרה להפוך למעצמה מובילה בנושא ואפשרות למימוש פוטנציאל הגז של המדינה וביזור האמצעים האנרגטיים שלה.

3.8. אגירה בסוללות

העיקרון : תא אלקטרוכימי הממיר אנרגיה כימית לחשמלית.

יעוד עיקרי : משפחות הסוללות כל כך רבות ומגוונות כך שקיימות סוללות שיכולות לתת מענה לכל סוג יישום ולכל גודל לקוח

צפיפות אנרגיה : גבוהה

הספק : נמוך עד גבוה

זמן אספקה : דקות עד שעות

יעילות : נמוכה עד בינונית

יתרונות : 1. מודולריות גבוהה. ניתן עקרונית לבנות בנק סוללות לכל רמת אנרגיה נדרשת 2. פיתוח מואץ ותחרות גבוהה שהביאו לירידת מחיר בעשור האחרון.

בשלות טכנולוגית : הטכנולוגיה בשלה וגם נמצאת בפיתוח מואץ עם סוגים חדשים של סוללות. ישנם יישומים בעולם והתחום נמצא תחת מחקר ופיתוח אינטנסיבי.

התאמה לישראל : יש מחקרים מתקדמים ביותר בארץ והטכנולוגיה יכולה להתאים בכל מקום בו הסוללות אינן מפגע סביבתי והן מתחרות במחיר בפתרונות אחרים.

המלצות : מעקב עומק אחר הטכנולוגיה ויישומיה בארץ ובעולם. השקעות במטרה לממש את כושר ההמצאה והיצרניות הישראלית בתחום. בחינה מדוקדקת של פרויקטים בעולם לאגירה בסוללות בסקלת רשת והתאמתם לארץ.

בטבלה 3 כאן ריכזנו את הפרטים החשובים לכל טכנולוגית אגירה.

תרמית	אוויר דחוס	אגירה שאובה	גלגלי תנופה	קבלי-על	סלילים מוליכי-על	מימן	מצברים
חימום/קירור, יישור עקומת עומס	לחץ אוויר, יישור עקומת עומס	יישור עקומת עומס	תיקון הפרעות, שיפור איכות	תיקון הפרעות, שיפור איכות	תיקון הפרעות, שיפור איכות	יישור עומס, תיקון הפרעות	יישור עומס, תיקון הפרעות
נמוכה	נמוכה	נמוכה	נמוכה	נמוכה	נמוכה	גבוהה מאד	גבוהה
נמוכה	נמוכה	בינונית	גבוהה	גבוהה	גבוהה	בינונית-גבוהה	בינונית
פרטי, מפעל	מפעל, רשת	רשת	מפעל, (רשת?)	מפעל	מפעל, (רשת?)	פרטי, מפעל, רשת	פרטי, מפעל, (רשת?)
ניצול חום ממפעלים סמוכים, ידידותי לסביבה	שימוש באוויר, פשטות יחסית	יכולת אגירה גבוהה מאד	תגובה מהירה, טכנולוגיה מסחרית	ידידותי לסביבה	תגובה מהירה ביותר, מתח גבוה	צפיפות אנרגיה גבוהה ביותר, אפשרות ייצור בכל סקלה, ידידותי לסביבה	צפיפות אנרגיה גבוהה, מחיר
יעילות נמוכה, איכות אנרגיה נמוכה	תנאי טבע מיוחדים, הטמנה תת-קרקעית, שריפת דלקים	תנאי טבע מיוחדים, כדאיות כלכלית מוטלת בספק	בטיחות	מתח נמוך	מחיר		מפגע סביבתי, מתח נמוך יחסית
בשלה	בפיתוח	בשלה	בצמיחה	בצמיחה	בפיתוח	בפיתוח	בצמיחה ופיתוח
כאשר יש ערך מוסף (תיירות, חינוך, חום זמין)	חלקית. במפעלים ספציפיים	במקומות מסוימים מאד	מתאים ברמת מפעל	מתאים ברמת מפעל	מתאים ברמת מפעל או רשת	מתאים מאד	מתאים
מעקב	מעקב, השקעות ממשלתיות	מחקר עומק	מעקב	מעקב, השקעות ממשלתיות	מעקב, השקעות ממשלתיות	מחקר עומק	מחקר עומק

טבלה 3. ריכוז הפרמטרים העיקריים לטכנולוגיות האגירה שנסקרו

צורת ריכוז אחרת של הנתונים מובאת בטבלאות הבאות המתייחסות כל אחת לסוג הצרכן. אנו מבדילים כאן בין הצרכן הפרטי לזה התעשייתי ובעולם הייצור והחלוקה בין תחנת ייצור על בסיס אנרגיות מתחדשות לבין רשת החשמל. בכל אחת מהטבלאות שלהן אנו מביאים את תמצית היתרונות והחסרונות עם ההתאמה לצרכן של הטכנולוגיה:

יתרונות וחסרונות – צרכן פרטי

<u>טכנולוגיה</u>	<u>התאמה</u>	<u>יתרונות</u>	<u>חסרונות</u>
תרמית	התאמה אפשרית בחום כמוס, אגירת קור/חום	ניצול ייצור שאינו כדאי למכירה לרשת, הקטנת צריכה	עלויות, יעילות נמוכה
אוויר דחוס	לא מתאים		
אגירה שאובה	לא מתאים		
מימן	מתאים	אפשרות ניהול אנרגיה עצמי	עלויות התקנה, אחסון
מצברים	מתאים	מודולריות גבוהה	החלפה, איכות סביבה, זמן חיים, תפעול
גלגלי תנופה, קבלי-על, מוליכי-על	לא מתאים		

יתרונות וחסרונות – צרכן תעשייתי

<u>טכנולוגיה</u>	<u>התאמה</u>	<u>יתרונות</u>	<u>חסרונות</u>
תרמית	התאמה אפשרית	ניצול חום עודף, הקטנת צריכה, יישור עומסים	עלויות, יעילות נמוכה
אוויר דחוס	התאמה אפשרית	ניצול אוויר למטרות כפולות, יישור עומס, חיסכון	עלויות, יעילות נמוכה, דרישות מבניות
אגירה שאובה בדר"כ לא מתאים			
מימן	מתאים	אפשרות ניהול אנרגיה עצמי, חיסכון, אנרגיה נקיה	עלויות התקנה, אחסון, תלות אפשרית בכלכלה חיצונית
מצברים	מתאים	מודולריות גבוהה	החלפה, איכות סביבה, זמן חיים, תפעול
גלגלי תנופה, קבלי-על, מוליכי-על	מתאים לצרכן רגיש	טכנולוגיה מסחרית, תגובה מהירה	שטח נדלן גדול

יתרונות וחסרונות – אנרגיות מתחדשות

<u>טכנולוגיה</u>	<u>התאמה</u>	<u>יתרונות</u>	<u>חסרונות</u>
תרמית	מתאים בעיקר לסולאר	ניצול ישיר של חום	עלויות, יעילות נמוכה
אוויר דחוס	התאמה אפשרית תלוית פרמטרים ספציפיים	טכנולוגיה בשלה	עלויות, יעילות נמוכה, דרישות מבניות
אגירה שאובה	התאמה אפשרית תלוית פרמטרים ספציפיים	טכנולוגיה בשלה, אנרגיה גבוהה, זמן אספקה	עלויות, יעילות נמוכה, דרישות מבניות מגבילות

עלויות התקנה, אחסון, תלות אפשרית בכלכלה חיצונית	יעילות, חיסכון, אנרגיה נקיה, פתרון לכל סקלת אספקה	מתאים	מימן
החלפה, איכות סביבה, זמן חיים, תפעול	מודולריות גבוהה, טכנולוגיה בפיתוח מואץ	מתאים	מצברים
התאמה מוגבלת כהשלמה לאגירה לזמן ארוך			גלגלי תנופה, קבלי-על, מוליכי-על

יתרונות וחסרונות – רשת החשמל

טכנולוגיה	התאמה	יתרונות	חסרונות
תרמית	התאמה חלקית	ניצול חום עודף, הקטנת צריכה, יישור עומסים	עלויות, יעילות נמוכה, כיסוי חלק קטן מהדרישות
אוויר דחוס	התאמה אפשרית	טכנולוגיה בשלה, יישור עומס, חיסכון	עלויות, יעילות נמוכה, דרישות מבניות, כיסוי חלק קטן מהדרישות
אגירה שאובה	מתאים	טכנולוגיה בשלה, רמות אנרגיה והספק על פי דרישה, אספקה לזמן ארוך	עלויות, יעילות נמוכה, דרישות מבניות קשות, שטחים גדולים
מימן	מתאים	יעילות, חיסכון, אנרגיה נקיה, פתרון לכל סקלת אנרגיה, הספק וזמן	עלויות התקנה, אחסון, תלות בכלכלה חיצונית
מצברים	התאמה אפשרית חלקית	מודולריות גבוהה, טכנולוגיה בפיתוח מואץ	החלפה, איכות סביבה, זמן חיים, תפעול
גלגלי תנופה, קבלי-על, מוליכי-על	מתאים	תגובה מהירה, אפשרות לתמחור ע"פ איכות	שטח נדלן, טכנולוגיות בפיתוח

כפי שצוין לעיל, הפרויקט הגדול ביותר שנעשה עד כה בתחום האגירה הושלם בחודש בדצמבר 2017. בפרק זמן של פחות מ-100 ימים השלימה חברת טסלה הקמה של מתקני אגירה מבוססי סוללות ליתיום יון בדרום אוסטרליה.

בכך הצליחה ממשלת אוסטרליה להתמודד עם משבר תשתיתי של 50 שנה שהביא להפסקות חשמל נרחבות ברחבי המדינה, עזיבה של תושבים והיוותרות של 1.7 מיליון תושבים ללא חשמל. כתוצאה מכך, השלטון המקומי חיפש פתרון בר-קיימא שיסייע לפתרון מצב החירום. חברת טסלה יחד עם Neoen, נבחרו לעבוד על פרויקט זה. טסלה הקימה בפרויקט מתקן אגירה בהספק מותקן של מעל 100 MW. מתקן זה שירת אמצעי ייצור חשמל באנרגיה מתחדשות שממוקמים בסמוך למתקן האגירה והצליחו לספק מענה ואף תחליף הולם לתחנת כוח פחמית שחדלה לפעול בסמוך למועד ההפעלה של מתקן האגירה. בכך, הצליחה טסלה ושותפותיה להקים רשת ייצור ואגירה של חשמל בקנה מידה לאומי ויחס אפס פליטות לייצור. בקישורים להלן מופיעים נתונים ראשוניים אודות ביצועי תחנת האגירה כפי שנמדדו על ידי הרגולטור באוסטרליה.

https://www.aemo.com.au/-/media/Files/Media_Centre/2018/Initial-operation-of-the-Hornsedale-Power-Reserve.pdf

<https://www.stuff.co.nz/world/australia/100204232/teslas-enormous-battery-in-australia-just-weeks-old-is-already-responding-to-outages-in-record-time>

4. אחרית דבר

נפלה בחלקנו הזכות לחיות בעיצומה של מהפכה טכנולוגית הצפויה להשפיע על משק האנרגיה הגלובלי בפרט ועל האנושות בכלל. ההתחממות הגלובלית, בין אם נגרמה בידי האדם ובין אם לאו, יצרה לחץ כבד על מנהיגי העולם אשר קיבלו החלטות מרחיקות לכת על צמצום השימוש בדלקים מזהמים והרחבה מדורגת ועקבית של השימוש במקורות אנרגיה נקיים ובאנרגיות מתחדשות. ההכרה כי איכות הסביבה של כולנו חשובה לאיכות חיינו בהווה ובעתיד לא פחות מכלכלה חופשית ותחרותית, הובילה להחלטות קשות אשר ביצוען יארך זמן רב ויושקעו בהן מאמצים ומשאבים עצומים.

המעבר לאנרגיות נקיות ומתחדשות מתרחש בד בבד עם התקדמות טכנולוגית אדירה בתחומי החומרים, האינטרנט, תקשורת, תחבורה, אלקטרוניקה, ביג דאטה ועוד. כל אלו מאלצים שינוי תפיסה משמעותיים גם ברשתות החשמל. מרשתות ריכוזיות בעלות כיוון זרימה מוגדר מהיצרן לצרכן, עברנו למודל מבוזר בו הצרכן והיצרן אינם מזוהים חד-ערכית והזרימה היא דו כיוונית. רשתות חכמות מחברות ומעבירות אנרגיה ביניהן והאפשרויות למניה וחיוב קיבלו גמישות חסרת תקדים. אך טבעי שמקורות אנרגיה מתחדשות בכל סקלה ישולבו ברשתות העתידיות ושיתוף אנרגיה יהיה כמו שיתוף של משאבים אחרים. בדומה למחשוב ענן, רשת החשמל תהא גם היא רשת ענן.

היכולת של מקורות אנרגיה מתחדשות להשתלב ברשת החשמל תלויה במידה רבה באפשרויות האגירה. **דרגת ההתאמה של טכנולוגיה מסוימת לצורך נתון יכולה להיקבע באופן ודאי רק לאחר בחירת מיקום ספציפי להתקנה והגדרת הצרכים המדויקים הנדרשים מהטכנולוגיה.**

מכיוון שגם עקומת הצריכה וגם כושר הייצור תלויים בזמן ועוברים תנודות תוך-יומיות, שבועיות ועונתיות, נדרש אמצעי אגירה שישמש חיץ בין מקור האנרגיה המתחדשת לבין הרשת ויבטיח זרימה אופטימלית מבחינה טכנולוגית וכלכלית. מכאן שטכנולוגיות אגירת אנרגיה הן קריטיות להתפתחות משק האנרגיה העתידית. בדו"ח זה סקרנו על קצה המזלג מספר טכנולוגיות אגירה עיקריות, תיארנו את החוזקות והחולשות שלהן, את רמת הבשלות והפיתוח, את ייעודן העיקרי ואת התאמתן לישראל. **לפחות בשלוש מתוך הטכנולוגיות שנסקרו יש לדעתנו צורך במחקר המשך ובצליחה לעומק הטכנולוגי-כלכלי: אגירה שאובה, אגירה במימן ואגירה במצברים. באגירה שאובה, יש להעמיק בנתוני האמת של הפרויקטים המותקנים בארץ, לחשב את עלות ההקמה, התפעול השוטף ועלות הפקת האנרגיה השוטפת כדי להעריך כדאיות. מומלץ גם להשוות לפרויקטים בעולם כדי להבין איפה הצלחנו והיכן ניתן לשפר.**

במימן, יש לחקור את מצב הטכנולוגיה בעולם ברמות האנרגיה השונות מהצרכן הפרטי דרך התחבורה ועד לרמה הרשתית. מומלץ להעריך את עלויות ההקמה, התפעול והייצור בארץ על סמך יצור בגז טבעי ובאלקטרוליזה ולבנות מודלים של כלכלת מימן בסקלות שונות בתנאים שבישראל.

במצברים, מומלץ לעקוב מקרוב אחרי הפרויקטים הגדולים של טסלה ופרויקטים אחרים ברמות שונות. חשוב להגיע אל המספרים שמאחורי ההודעות לתקשורת ולנתח את יעילות המצברים לאחר זמן ולאחר מחזורי טעינה-פריקה רבים.

בכל שיטות האגירה שנסקרו מומלץ להמשיך במעקב אחר ההתפתחויות שכן התחום דינמי מאד. רעיונות וחומרים חדשים מופיעים בתדירות גבוהה ופיתוחים שנראו מבטיחים על פניהם נעלמים

מהנוף. מומלץ להשקיע במחקר ופיתוח וברעיונות חדשים העשויים ליצור בארץ מקומות עבודה חדשים והכנסות מתמלוגים.

בדומה לעולמות ההייטק והטכנולוגיות האחרות, ישראל יכולה להיות מרכז ידע ומובילה בחדשנות גם בתחום אגירת האנרגיה ולהיטיב עם המדינה ואזרחיה ועם האנושות כולה.

REFERENCES

- ⁱ Robert Alan Huggins, *Energy Storage*, vol. 406 (New York: Springer, 2010).
- ⁱⁱ אוגוסט no. איל ביזי, "הפקת עקומות עומס יומיות ככלי לניהול אנרגיה של מיתקני החשמל", *פאזה* and יאן לרוי (2013).
- ⁱⁱⁱ . טניה סוחוי, "תחזית ארוכת טווח לגבי התפלגותם של ביקושי השיא השנתיים לחשמל", *בנק ישראל*, 2017.
- ^{iv} . סוחוי.
- ^v Norhtvolt, "Energy Storage Systems, the Key Enablers of the Renewable Energy Future," n.d., <https://northvolt.com/energy-storage-systems-the-key-enablers-of-the-renewable-energy-future/>.
- ^{vi} , יונתן דובי, "האנרגיה אולי ירוקה, אבל בטוח יקרה", *גלובס*, 2019, <https://www.globes.co.il/news/article.aspx?did=1001280704>.
- ^{vii} A Stock et al., "Fully Charged: Renewables and Storage Powering Australia," 2018.
- ^{viii} Greenmarkets, "Renewable Energy Index - March 2019," 2019, <http://greenmarkets.com.au/news-events/renewable-energy-index-march-2019>.
- ^{ix} . סוחוי. "תחזית ארוכת טווח לגבי התפלגותם של ביקושי השיא השנתיים לחשמל".
- ^x Lester R. Brown, *Plan B 4.0: Mobilizing to Save Civilization* (New York: W.W. Norton & Company, 2009). Brown.
- ^{xi} Earth Policy Institute, "Climate, Energy, and Transportation," n.d., <http://www.earth-policy.org/>. Earth Policy Institute.
- ^{xii} Rami M Saeed et al., "Preparation and Thermal Performance of Methyl Palmitate and Lauric Acid Eutectic Mixture as Phase Change Material (PCM)," *Journal of Energy Storage* 13 (2017): 418–424. Saeed et al.
- ^{xiii} Nelson Soares et al., "Review of Passive PCM Latent Heat Thermal Energy Storage Systems towards Buildings' Energy Efficiency," *Energy and Buildings* 59 (2013): 82–103. Soares et al.
- ^{xiv} "Specific Heat of Common Substances," n.d., https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html. "Specific Heat of Common Substances."
- ^{xv} AG Atzwanger, "Heat Storage Bolzano," n.d., <http://www.atzwanger.net/en/references/projekt/heat-storage-bolzano/>. Atzwanger.
- ^{xvi} "Bartleby08 [CC BY-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0)]," n.d., https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Waermespeicher_alperia_bozen_2017.jpg. "Bartleby08 [CC BY-SA 4.0 (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0)]."
- ^{xvii} "Thermal Energy Storage," Wikipeddia, n.d., https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_energy_storage. "Thermal Energy Storage."
- ^{xviii} and גרשון גרוסמן (מוסד שמואל נאמן, 2015).
- ^{xix} Brenmiller, "Brenmiller Energy," n.d., <https://www.bren-energy.com/>.
- ^{xx} "כלכליסט", ברנמילר, "חזי שטרליכט", n.d., <https://www.calcalist.co.il/markets/articles/0,7340,L-3756222,00.html>.
- ^{xxi} Huggins, *Energy Storage*. Huggins.
- ^{xxii} Samir Succar and Robert H Williams, "Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, and Applications for Wind Power," *Princeton Environmental Institute Report* 8 (2008): 81. Succar and Williams.
- ^{xxiii} Succar and Williams, "Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, and Applications for Wind Power."
- ^{xxiv} Richard Woodbary, "Province Likely to Lose \$2M in Failed Energy-Storage Project," *CBC News*, 2018, <https://www.cbc.ca/news/canada/nova-scotia/province-likely-to-lose-2m-in-failed-energy-storage-project-1.4584189>. Woodbary.
- ^{xxv} Department of Energy US, "Demonstrating a Modular, Market-Ready Energy Storage System That Uses Compressed Air as a Storage Medium" (American Recovery and Reinvestment Act (ARRA), 2012), <https://www.energy.gov/sites/prod/files/SustainX.pdf>. US.
- ^{xxvi} "Apex-CAES Technology Overview," n.d., <http://www.apexcaes.com/technology-overview>. "Apex-CAES Technology Overview."
- ^{xxvii} "Hydrostor Announces Australia's First Compressed Air Energy Storage Facility, Advances Global Pipeline of Utility-Scale Projects," 2019, <https://www.hydrostor.ca/press/Hydrostor-Angas-Project-Press-Release>. "Hydrostor Announces Australia's First Compressed Air Energy Storage Facility, Advances Global Pipeline of Utility-Scale Projects."
- ^{xxviii} "AUGWIND," n.d., <http://aug-wind.com/solution/>. "AUGWIND."
- ^{xxix} AUGWIND, "2018", *אוגווינד - אגירת אוויר דחוס*.

-
- xxx Wikipedia, “Tidal Power,” n.d., https://en.wikipedia.org/wiki/Tidal_power. Wikipedia.
- xxxi JK Kaldellis and D Zafirakis, “Optimum Energy Storage Techniques for the Improvement of Renewable Energy Sources-Based Electricity Generation Economic Efficiency,” *Energy* 32, no. 12 (2007): 2295–2305; Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca, and Jean Perron, “Energy Storage Systems—Characteristics and Comparisons,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, no. 5 (2008): 1221–1250. Kaldellis and Zafirakis, “Optimum Energy Storage Techniques for the Improvement of Renewable Energy Sources-Based Electricity Generation Economic Efficiency”; Ibrahim, Ilinca, and Perron, “Energy Storage Systems—Characteristics and Comparisons.”
- xxxii “ComEd Real Time Hourly Pricing for Electricity,” n.d., <https://hourlypricing.comed.com/live-prices/>. “ComEd Real Time Hourly Pricing for Electricity.”
- xxxiii Frederik Geth et al., “An Overview of Large-Scale Stationary Electricity Storage Plants in Europe: Current Status and New Developments,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (2015): 1212–1227. Geth et al.
- xxxiv National Hydropower Association, “National Hydropower Association,” n.d., <https://www.hydro.org/>. National Hydropower Association.
- xxxv Dominion Energy, “Bath County Pumped Storage Station,” n.d., <https://www.dominionenergy.com/company/making-energy/renewable-generation/water/bath-county-pumped-storage-station#>. Dominion Energy.
- xxxvi Wikipedia, “List of Pumped-Storage Hydroelectric Power Stations,” n.d., https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_pumped-storage_hydroelectric_power_stations. Wikipedia.
- xxxvii David Wenzhong Gao, *Energy Storage for Sustainable Microgrid* (Academic Press, 2015). Gao.
- xxxviii Piller, “Operating Manual UNIBLOCK UBT+ UPS 2500kVA / 2250kW 22500V / 50Hz with 21MJ POWERBRIDGE,” n.d. Piller.
- xxxix Power Beacon, “20 MW Flywheel Energy Storage Plant,” (n.d.). Beacon.
- xl Huggins, *Energy Storage*. Huggins.
- xli Wikipedia, “Supercapacitors,” n.d., <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>. Wikipedia.
- xliv Ander González et al., “Review on Supercapacitors: Technologies and Materials,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58 (2016): 1189–1206. González et al.
- xlvi Inc Eaton, “Eaton Supercapacitor Back up Power Solution,” n.d. Eaton.
- A Friedman et al., “Design of a Laminated-Steel Magnetic Core for Use in a HT-SMES,” *Journal of Materials Processing Technology* 161, no. 1–2 (2005): 28–32.
- A Friedman et al., “Superconducting Magnetic Energy Storage Device Operating at Liquid Nitrogen Temperatures,” *Cryogenics* 39, no. 1 (1999): 53–58.
- xlvi A Friedman et al., “HT-SMES Operating at Liquid Nitrogen Temperatures for Electric Power Quality Improvement Demonstrating,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 13, no. 2 (2003): 1875–1878; Friedman et al., “Superconducting Magnetic Energy Storage Device Operating at Liquid Nitrogen Temperatures.” Friedman et al., “HT-SMES Operating at Liquid Nitrogen Temperatures for Electric Power Quality Improvement Demonstrating”; Friedman et al., “Superconducting Magnetic Energy Storage Device Operating at Liquid Nitrogen Temperatures.”
- xlvi AM Wolsky, “The Status and Prospects for Flywheels and SMES That Incorporate HTS,” *Physica C: Superconductivity* 372 (2002): 1495–1499. Wolsky.
- xlvi T Katagiri et al., “Field Test Result of 10MVA/20MJ SMES for Load Fluctuation Compensation,” *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* 19, no. 3 (2009): 1993–1998. Katagiri et al.
- xlvi Wikipedia, “Hydrogen Economy,” n.d., https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy. Wikipedia.
- ^l Wikipedia, “Steam Reforming,” n.d., https://en.wikipedia.org/wiki/Steam_reforming. Wikipedia.
- ^{li} Wikipedia, “Hydrogen Economy.” Wikipedia.
- ^{lii} Amazon, “Hydrogen Fuel Cell Kit,” n.d., <https://www.amazon.com/Hydrogen-Fuel-Cell-Kit/dp/B000UH76N2>. Amazon.
- ^{liii} A Gutowska et al., “Kay, B. Schmid, W. Shaw, M. Gutowski, T. Autrey,” *Angew. Chem. Int. Ed* 44 (2005): 3578–3582. Gutowska et al.
- ^{liv} US, Department of Energy, “Compare Fuel Cell Vehicles,” 2019, https://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_sbs.shtml. US, Department of Energy.
- ^{lv} F David Doty, “A Realistic Look at Hydrogen Price Projections,” *Doty Scientific, Inc. Technical Report*, 2004. Doty.
- ^{lvi} “List of Battery Types,” n.d., https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_battery_types.

-
- lvii Wikipedia, "Lithium-Ion Battery," n.d., https://en.wikipedia.org/wiki/Lithium-ion_battery.
- lviii Wikipedia, "Flow Battery," n.d., https://en.wikipedia.org/wiki/Flow_battery.
- lix P Ralon et al., "Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030," *International Renewable Energy Agency: Abu Dhabi, United Arab Emirates*, 2017.
- lx Wikipedia, "Comparison of Commercial Battery Types," n.d., https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_commercial_battery_types.
- lxi IRENA, "International Renewable Energy Agency," n.d., <https://www.irena.org/>.
- lxii IRENA.
- lxiii Tesla, "Powerpack," n.d., https://www.tesla.com/en_AU/powerpack.
- lxiv Mike Brown, "Tesla's Battery Has Already Saved South Australia a Huge Amount of Money," n.d., <https://www.inverse.com/article/51515-tesla-s-battery-has-already-saved-south-australia-a-huge-amount-of-money>.
- lxv Giles Parkinson, "Revealed: True Cost of Tesla Big Battery, and Its Government Contract," <https://reneweconomy.com.au/revealed-true-cost-of-tesla-big-battery-and-its-government-contract-66888/>, Renew Economy, n.d.
- lxvi RP Siegl, "Tesla's Giant Battery Project in Australia," n.d., https://www.eniday.com/en/technology_en/tesla-giant-battery-australia/.
- lxvii Wikipedia, "Comparison of Commercial Battery Types."
- lxviii Michael Liebreich, "NEW INVESTMENT IN CLEAN ENERGY," (2015).