

תיבה ז'-2: השוואה כלכלית בין טכנולוגיות מרכזיות לאגירת אנרגיה

- שימוש בחשמל מאנרגיה סולרית ורוח בשיעור ניכר מסך ייצור החשמל יחייב אגירת אנרגיה. בבחינת ההיקף הנדרש של יכולת האגירה יהיה צורך להביא בחשבון גם את השונות בייצור בין ימים שונים בשל שינויים במזג האוויר.
- בהשוואה בין שתי טכנולוגיות אגירה – סוללות ליתיום ומימן – אגירה באמצעות מימן יקרה יותר, אך לפי ההערכות הקיימות מחירה היחסי צפוי לרדת.
- ההשפעות הסביבתיות המזיקות של טכנולוגיית האגירה באמצעות סוללות ליתיום גדולות מאלה של מימן.

שימוש באנרגיות מתחדשות הוא כלי מרכזי לצמצום פליטות גזי החממה במדינות רבות, ובהן ישראל, בהתאם ליעדים שקיבלו על עצמם. בשנת 2021 ייצור החשמל בישראל באמצעות אנרגיות אלו עמד על כ-7%¹ מסך ייצור החשמל, וכ-95%² מתוכם יוצרו באמצעים סולריים. השוואת התפלגות הצריכה של אנרגיות מתחדשות להתפלגות ייצורן השעתי מגלה חפיפה חלקית בלבד בין השיא בשעות הייצור לשיא בשימוש. כיוון שייצור אנרגיה סולרית הוא תלוי שמש, מעבר לאנרגיות מתחדשות בהיקף נרחב יחייב התמודדות עם הסוגיה של ייצור אנרגיה עודפת בשעות היום לשם שימוש בשעות הלילה – כלומר אגירת אנרגיה. שיפורים טכנולוגיים רבים והעלאת המודעות האקלימית הביאו לעלייה חדה של הביקוש לכלי אגירה שונים בשווקים הפרטי והציבורי כאחד. במסמך זה נתמקד בשתי דרכי אגירה הצוברות תאוצה רבה: סוללת ליתיום-יון (אגירה כימית) ומימן (אגירה בדלקים).

סוללת ליתיום-יון היא כלי אלקטרו-כימי לאגירת אנרגיה, שבו יוני ליתיום עוברים מאלקטרודה שלילית לחיובית ולהפך. היתרונות הבולטים של השימוש באמצעי זה הם צפיפות אנרגטית גבוהה, מספר מחזורי פריקה/טעינה גבוה ואיבוד נמוך של הקיבולת במהלך המיחזור; נוסף על כך סוללה זו יכולה להיטען ולפרוק אנרגיה באופן ישיר, ואין צורך בתהליכי ביניים, הנדרשים באמצעי אגירה אחרים. לאחר פריצת דרך משמעותית, שהניעה את חברת "סוני" היפנית, לראשונה ב-1991, לשווק כלי זה באופן מסחרי, גדל השימוש בליתיום-יון ברציפות; זאת במקביל לשיפורים טכנולוגיים, אשר הורידו את עלותן בשלושת העשורים האחרונים בכ-98%. לשם השוואה, בשנת 2000 היקף שוק הסוללות העולמי הוערך בכ-3-5 מיליארד דולרים³, ומחירו של קילואט-שעה הוערך בכ-2,200 דולרים, ואילו כיום שוק זה נאמד בכ-41 מיליארד דולרים⁴, והמחיר של קילואט-שעה הוא 140 דולרים. תחום מרכזי שאליו נכנסו הסוללות בשנים האחרונות הוא תעשיית הרכב.

הפקת מימן אפשרית במספר דרכים, שונות זו מזו ברמות הזיהום ובעלויות. הדרך הנקייה ביותר להפיק מימן, ובה נתמקד, היא מימן "ירוק", המופק ממים. בדרך זו המימן מיוצר באמצעות חשמל מאנרגיות מתחדשות לשם אלקטרוליזה (הפרדה חשמלית): בה מפרידים את המים למימן וחמצן; את המימן שהופרד בתהליך אפשר להמיר חזרה לחשמל באמצעות טכנולוגיות שונות של תאי דלק. היקף השימוש הגלובלי במימן נאמד בכ-330 שט"ן (שווה ערך לטון נפט)⁵, וסך מכירות המימן ב-2018 הוערך בכ-115 מיליארד דולרים. אולם כ-95% מהייצור הוא בטכנולוגיות מזהמות, ושאינו מופק מאנרגיה מתחדשת.⁶

¹ חישובי בנק ישראל על בסיס נתוני חברת החשמל.

² הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה.

³ C. Pillot, March 2017

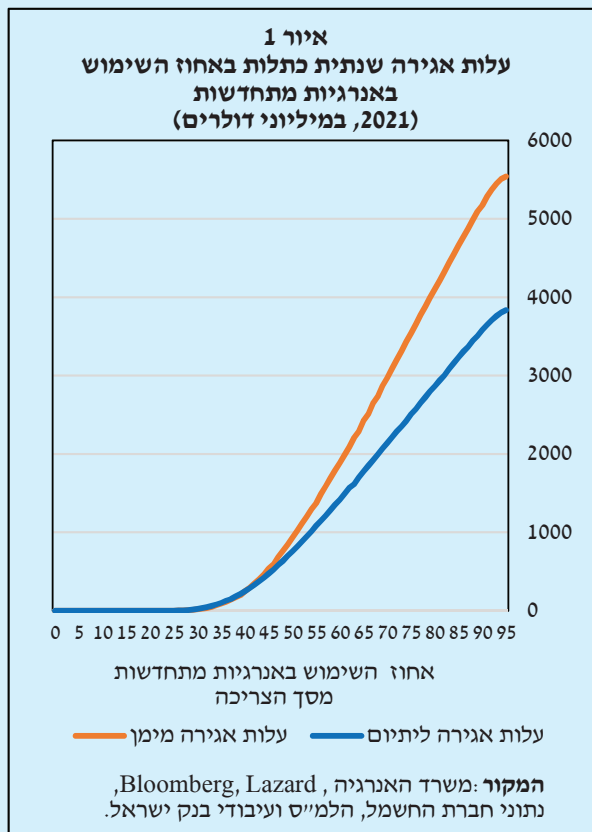
⁴ בשנים שבין 2000 ל-2016 גדל השוק גדל באופן לינארי, ומ-2016 עד היום התעשייה הכפילה את עצמה.

⁵ IRENA, Sep 2018

⁶ IRENA, Sep 2019

כדי להשוות כלכלית בין מקורות אנרגיה שונים יש לקבוע יחידת מידה משותפת, המביאה בחשבון את השונויות במאפייניהם – באופן פעולתם, במחזור החיים שלהם, באנרגיה שביכולתם לספק ועוד; בספרות מקובל להשתמש בעלות הנקראת "עלות אנרגיה/אגירה מנורמלת" (Levelized cost of energy/storage), המוגדרת כסך ההשקעה הכספית במקור האנרגיה ליחידת אנרגיה המופקת ממנו.⁷

היקף צריכת החשמל היומית בישראל בשנת 2021 היה כ-207 אלף מגה-וואט-שעה; על בסיס התפלגות הצריכה השעתית בכל יום נערכה סימולציה לגבי כל אחד מכלי האגירה, ובה חושבו עלויות האגירה לצד הגדלת קיבולת הייצור



של אנרגיות מתחדשות כתלות באחוז השימוש בהן מסך הצריכה השנתית. מסימולציות אלו עולה כי השוואתן של שיטות האגירה מתחילה להיות רלוונטית כאשר השימוש באנרגיות מתחדשות מסך הצריכה הוא מעל 23%, וכי אגירה בעלויות משמעותיות מבחינה כלכלית נדרשת החל מ-40% בערך (איור 1).⁸ נתון משמעותי נוסף העולה מסימולציות אלו הוא הפער בין התרחישים בסך האנרגיה המתחדשת שנצטרך לייצר כאשר נדרשת אגירה. פער זה נובע מהבזבוז שבתהליך – מאובדן האנרגיה הכרוך בהמרת החשמל למימן וחזרה לחשמל בעת השימוש. הכמויות הדרושות של אנרגיות מתחדשות מצביעות גם על היקף ההיערכות הכרוכה בהקמת תשתיות הייצור.⁹ בטכנולוגיות הקיימות אובדן האנרגיה מוערך בכ-55%-75% מהאנרגיה המושקעת במימן. משמע שכדי להשתמש ב-1 קילואט-שעה שנאגר בשעות היום יש לייצר כ-2.5 קילואט-שעה; לעומת זאת בסוללות הליתיום-יון אובדן האנרגיה מוערך כ-5%-15% בלבד.¹⁰ ואולם צפוי שהטכנולוגיה בתחום המימן תתקדם, וכך יצטמצם הפער המחושב בתרחישים המוצגים כאן.¹¹

לוח 1 מציג השוואת עלויות לגבי תרחישי האגירה באמצעות מימן ובאמצעות סוללות ליתיום-יון, בדמותו מצב שבו המשק משתמש בכ-50% אנרגיות מתחדשות מסך הצריכה השנתית של האנרגיה ברמתה בשנת

2021.¹² כן מניחה ההשוואה אגירה תוך-יומית בלבד, ובמילים אחרות: בתרחישים אלו על סך האנרגיה

7

$$LCOS = \frac{\text{Total life time cost of Storage}}{\text{Total life time output}}, LCOE = \frac{\text{Total life time cost of production}}{\text{Total life time output}}$$

⁸ בהתחשב בשונויות הרבה בין ימים שונים ביכולת הייצור של אנרגיות מתחדשות בשל תנאי מזג האוויר, הסף האפקטיבי נמוך יותר, ותלוי גם במידת היתירות של מקורות האנרגיה האחרים.

⁹ הקמת התשתיות מתייחסת הן לאמצעי הייצור של האנרגיה המתחדשת והן להולכתה.

¹⁰ בניתוחים בהמשך מסמך זה נעשה שימוש ביעילות (האנרגיה המנוצלת מתוך האנרגיה המושקעת) של 40%-85% עבור מימן וליתיום, בהתאמה, משום שערכים אלו הם הנפוצים ביותר בספרות, בפרט בIEA. ראו ערך: (World energy council, 2020), ו-(IEA, June 2019)

¹¹ כתלות במספר משתנים כגון קצב השיפור הטכנולוגי של סוללות הליתיום-יון, ההיצע של מחצב הליתיום ושל מתכות שונות המעורבות בייצור הסוללה ושיפור היעילות של טכנולוגיית המימן בקצב מהיר מזה של שיפור טכנולוגיית הליתיום-יון.

¹² ככל שהביקוש לחשמל יגדל, כך הצורך באגירה יהיה רלוונטי בשיעור נמוך יותר של אנרגיות מתחדשות מסך השימוש.

המתחדשת המיוצרת בשעות היום לספק גם תחליף לביקוש בשעות הלילה.¹³ מהניתוח ניתן לראות כי בסך הכול, כשהטכנולוגיות והעלויות הן אלה הקיימות כיום, יש לאגירת אנרגיה בעזרת סוללות ליתיום-יון יתרון כלכלי על פני שימוש במימן בתרחישים המוצגים לעיל: עלות האגירה באמצעות מימן ירוק נאמדת בכ-930 מיליון דולרים בשנה, וזו של שימוש בסוללות בכ-757 מיליון; תוצאה זו משקפת בעיקר את העובדה כי טכנולוגיית האגירה באמצעות מימן בזבזנית יותר, ולכן מחייבת בניית כושר ייצור והפקה של יותר אנרגיה מתחדשת בשעות היום, מה שמביא ליותר שימוש ישיר באנרגיה מתחדשת, ולכן – לפחות אגירה ביחס לשימוש בליתיום.¹⁴ למרות זאת, השפעת ה"בזבז" היא הדומיננטית, ולכן השימוש במימן יקר יותר.

הבדל נוסף הוא כי שלגבי סוללות הליתיום-יון כלי האגירה הוא גם המוצר עצמו, ואילו לגבי מימן ייצורו ואחסונו הם שלבים נפרדים. לאחסון מימן ישנן דרכים שונות, כגון: דחיסתו למכליות; שמירתו במערות תת-קרקעיות ייעודיות;

לוח 1: השוואת עלויות האגירה של אנרגיה מתחדשת - עבור כמות זהה ל-50% מסך הצריכה בשנת 2021 (יחידות אנרגיה ב-TWh)

תרחיש מימן	תרחיש סוללות	
74		סה"כ צריכת חשמל שנתית בשנת 2021
37		סה"כ צריכת חשמל מאנרגיה מתחדשת שנתית
44	38	סה"כ ייצור חשמל באנרגיה מתחדשת שנתית ¹
12	7.3	סה"כ אנרגיה מתחדשת שנתית המיועדת לאגירה ²
40%	85%	יעילות אמצעי האגירה ³
4.8	6.2	סה"כ צריכת חשמל שנתית מאמצעי אגירה ⁴
194	122	עלות אגירה מנורמלת (דולר למגה וואט שעה) ⁵
931	757	עלות אגירה שנתית כוללת (מיליוני ₪) ⁶

1. צריכת החשמל מאנרגיה מתחדשת שווה לסך ייצור החשמל באנרגיה מתחדשת פחות האנרגיה שאובדת בתהליך האגירה.
2. ייצור האנרגיה שמוקצה לאמצעי אגירה ברוטו.
3. יעילות משמעותה סך האנרגיה המנוצלת (output) חלקי סך האנרגיה שנאגרה (input).
4. כמות האנרגיה שמשמשת לייצור חשמל מתוך האנרגיה האגורה.
5. בהנחה שהעלויות המנורמלות של שני אמצעי האגירה הן קבועות (בלתי תלויות בכמות הייצור) - מתוך הערכות Lazard ו-Bloomberg. כולל את עלות ייצור האנרגיה שאבדה בתהליך האגירה.
6. העלות היא מכפלה של כמות האנרגיה הנצרכת מאגירה בעלות האגירה המנורמלת. מקור: Lazard, Bloomberg ועיבודי בנק ישראל.

¹³ ניתוח זה לא בחנו תרחישי אגירה ארוכי טווח, אף על פי שהדבר בהחלט אפשרי.

¹⁴ זאת משום שבשני המצבים סך הביקוש של הצרכנים במשק הוא אותו סך, וכן גם בייצור האנרגיה ממקורות פוסיליים. כך, למשל, לצורך אגירה באמצעות מימן אמנם יש לבנות יותר כושר ייצור של אנרגיות מתחדשות, אך כיוון שמקורות אלה זמינים גם בשעות היום, ניתן להפחית את השימוש באנרגיה פוסילית בשעות האור ולהגדילו בשעות הלילה, ובכך להקטין את הצורך בצריכת אנרגיה אגורה ממקורות מתחדשים בשעות הלילה.

הפיכתו לנוזל וספיגתו בחומרים כימיים אחרים – למשל אמוניה. בניתוח זה ההנחה היא שנעשה שימוש במכליות, אשר בהן המימן נמצא במצב גזי ודחוס.¹⁵ עלות אחסון המימן בצורה זו מוערכת בכ-0.19 דולר לק"ג.¹⁶ למרות היתרון הכלכלי של הסוללות בתרחישים דלעיל, ישנן תחזיות אשר לפיהן עד שנת 2050 עלות ייצור המימן תרד מאוד – עד לכ-50 דולרים למגה-וואט-שעה. זאת הודות לשיפורים טכנולוגיים ולסכומים גדולים המושקעים במחקר ופיתוח בתחום.¹⁷ לגבי סוללות נושא זה מורכב יותר: אמנם גם לגביהן נחזית ירידת מחירים כתוצאה משיפור טכנולוגי (אף כי מתונה יותר מאשר ביחס למימן), אך מאחר שהסוללות מופקות בחלקן מליתיום, המגיע ממחצבים, וכמותו מוגבלת, קשה לשלול את האפשרות שללא פריצת דרך טכנולוגית משמעותית בתחום הסוללות, יחד עם גידול הביקוש בעולם,¹⁸ המחירים דווקא יעלו. בהקשר הסביבתי חשוב לציין שייצור סוללות הליתיום-יון כרוך בזיהום, ונכון להיום מיחזור הסוללות אינו כדאי ליצרניות ומתנהל בהיקפים נמוכים יחסית. משמעות הדבר היא שחלק ניכר מסוללות אלו נטמן כיום בקרקע ומהווה זיהום נוסף.¹⁹ לסוגיה זו יהיה צורך לתת מענה בעתיד, באמצעות כלי מדיניות שיביאו להפנמת עלויות ההטמנה וייצרו כדאיות למחזור את הסוללות.²⁰ סקירה זו מציגה תרחישים נפרדים, אך ייתכן שהפתרון האופטימלי יתקבל משילוב של שני אמצעי האגירה יחד. זאת במיוחד בזכות היתרונות הכלכליים הנוכחיים של הסוללות לאגירה תוך-יומית לצד יכולתו של המימן לאגור אנרגיה גם לטווחי זמן ארוכים יותר.

ביבליוגרפיה

Bloomberg (March 30, 2020). Hydrogen Economy Outlook.

Department for Business, eENERGY & Industrial Strategy UK (Aug 2021). Hydrogen Production Costs 2021. London, UK: OGL.

iea hydrogen (Dec 2017). Global trends and outlook for hydrogen. Retrieved from <https://www.ieahydrogen.org/case-studies/?limit=20&q=global%20outlook%20and%20trends>

IEA (June 2019). The future of hydrogen. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>

IRENA (2018). Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. Abu Dhabi.

IRENA (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. Abu Dhabi.

LAZARD (Oct 2021). LAZARD'S LEVELIZED COST OF HYDROGEN ANALYSIS—VERSION 2.0.

LAZARD (Oct 2021). LAZARD'S LEVELIZED COST OF STORAGE ANALYSIS—VERSION 7.0.

PILLOT, C. (Sep 2017). The rechargeable Battery Market and Main Trends 2016-2025. Portugal: AVICENNE ENERGY.

World energy council (2020). Five steps to energy storage. London-UK.

¹⁵ פתרון הדחיסה נבחר לניתוח זה משום שהוא נפוץ יחסית, פשוט טכנולוגית ומיועד לאגירה לטווח קצר. עם זאת ישנם בישראל מאגרים תת-קרקעיים שבהם ניתן לאחסן מימן; פתרון הספיגה בכימיקלים אחרים נפוץ בעיקר כחלק מאחסון המימן בהעברה ממקום למקום.

¹⁶ לפירוט הערכות ראו: Bloomberg Hydrogen Economy Outlook.

¹⁷ Hydrogen Economy Outlook-Bloomberg.

¹⁸ בין היתר, עקב הגידול באגירת אנרגיות ירוקות ורכבים טולי פליטה.

¹⁹ החישובים לא כוללים עלות זו.

²⁰ עוד בנושא במסמך "צמצום טביעת הרגל האקלימית של ענף התחבורה בישראל", שכתבו יוסי מרגוניסקי וליאור גאלו מחטיבת המחקר, כחלק מ"לקט ניתוחי מדיניות וסוגיות מחקריות".