



ועדת ההיגוי של האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים להתמודדות עם משבר האקלים

נייר עמדה מספר 3 | אפריל 2023

דלק מימן

חברי הוועדה: יו"ר פרופ' דן יקר, פרופ' צבי בן-אברהם, פרופ' נעמה גורן-ענבר,
פרופ' יוסף ג'בארין, פרופ' נדב דוידוביץ', פרופ' יואב יאיר, פרופ' יוסי לוי,
פרופ' שלומית פז, פרופ' טליה פישר, פרופ' דניאל רוזנפלד, פרופ' איתן ששינסקי

המסמך הוכן על בסיס סקירה של פרופ' דוד כאהן
והערות של ד"ר אהוד גלון וד"ר רחלי קרייסברג

לעמוד הוועדה באתר האקדמיה

<https://www.academy.ac.il/News/NewsItem.aspx?nodeId=837&id=2134>

דלק מימן

תקציר

פליטת גזי חממה שמקורה בפעילות האדם גורמת לשינויי אקלים אשר ישפיעו על חיינו בעתיד. יש הסכמה בין-לאומית רחבה שיש להקטין את הפליטות, ועל ישראל להשתתף במאמץ העולמי בנושא זה.

אחד הפתרונות הוא אנרגייה סולרית. לאחרונה פורסמה הערכת סוכנות האנרגייה הבין-לאומית (IEA) שלפיה תפוקת האנרגייה הסולרית תעבור את זו של הגז עד 2026 ואת זו של הפחם – ב-2027. ישראל צריכה להשתלב בתנופה זו כמו גם בקידום המרכיבים המשלימים של אגירה וניהול של משק אנרגייה נקייה. הוועדה שמינתה האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים קוראת לפיתוח השימוש במימן בשילוב עם אנרגייה סולרית (מימן ירוק), הן כחלק מהמאמץ להפחתת הפליטות בישראל והן כהמשך לתרומתה הייחודית של ישראל למאמץ העולמי בתחום זה (הכולל צפי לגידול פי שישה מהמצב הקיים בייצור אלקטרוליזרים לייצור מימן עד 2025 IEA); לשם כך יש לקדם את ההיכרות של הציבור ושל מקבלי החלטות עם הנושא ואת המיזמים שיאפשרו את יישום השימוש במימן.

גיבוש אסטרטגיה לאומית בנושא כרוך בזיהוי ובמיפוי של המגזרים ושל היישומים המתאימים לשימוש במימן, בתמיכה במחקר אקדמי ובפיתוח תעשייתי, בקידום שיתופי פעולה אזוריים ובין-לאומיים ובעידוד השקעות בתחום. נייר העמדה המוצג כאן נועד לתרום לקידום תהליך זה באמצעות הצגת הרקע להבנת הנושא, המחשה של פיתוח ארוך טווח המנצל את היתרונות הייחודיים של ישראל, והמלצה לקידום מידי של פרויקט מימן ירוק בהיקף חצי-תעשייתי שיבחן את השילוב של שימוש במימן עם מקורות אנרגייה סולרית ויוכל להוות בסיס לקבלת החלטות.



דלק מימן

חלק א. הקדמה

סקירת הידע בנושא הפקת מימן לאגירה ושימוש בו כמקור לאנרגייה מעלה כמה נקודות עיקריות:

הצורך במימן

השימוש במימן נועד לסייע במאמצי הפחתת הפליטה של CO₂ וזיהום נוסף שמקורו בשימוש במקורות אנרגייה פוסיליים וכן להפחתת הסיכונים ממשבר האקלים. מימן מצוין רבות כ"דלק העתיד" לייצור חשמל, לתחבורה כבדה וליישומים תעשייתיים מתאימים (כגון ייצור פלדה ומלט). הצלחה ביישומים אלה יכולה לשמש בסיס ל"כלכלת מימן", שהיא חזון לתשתית תעשייתית שבה המימן, חופשי מפחמן, משמש מוליך אנרגייה דומיננטי (כבר ב-1870 ניבא ז'ול ורן ש"המים יהיו הפחם של העתיד").

במסגרת המגמה להוצאת פחמן לסוגיו מתשתיות האנרגייה גבר מאוד בשנים האחרונות העניין של גופים שונים בפוטנציאל השימוש במימן במשק האנרגייה, ובהם התעשייה, ממשלות ובעלי עניין אחרים. אסטרטגיות לאומיות לשימוש במימן החלו להתפתח ביפן ב-2017 והופיעו מאז גם בקנדה הדרומית, בניו זילנד, באוסטרליה, בהולנד, בנורווגיה, בפורטוגל ובגרמניה, וב-2020 פרסם ה-EC אסטרטגיית מימן לאיחוד האירופי. על פי פרסומים אלה, מחיר השימוש במימן צפוי לרדת במהירות. לדוגמה, מחירי האלקטרוליזרים, שהם חצי מעלות השימוש במימן, ירדו ב-60% בעשר השנים האחרונות, וצפויים לרדת ב-50% נוספים עד 2030 והיו תחרותיים במשק האנרגייה לפחות במקומות שבהם אנרגייה מתחדשת (כגון אנרגייה סולרית) מצויה בשפע (ACER 2021).

כמו ייצור חשמל שדורש מקור אנרגייה והולכה של אלקטרונים, גם ייצור מימן דורש מקור אנרגייה ויכולת הובלה (במקרה זה של פרוטונים). נושא ההובלה של נשאי אנרגייה הוא מאבני הנגף העיקריות של אנרגיות "ירוקות" מסוג זה (לעומת דלק פוסילי שהוא מקור אנרגייה שניתן כיום להובלה פשוטה יחסית, למשל בצנרת ובמכליות).

הפקת מימן

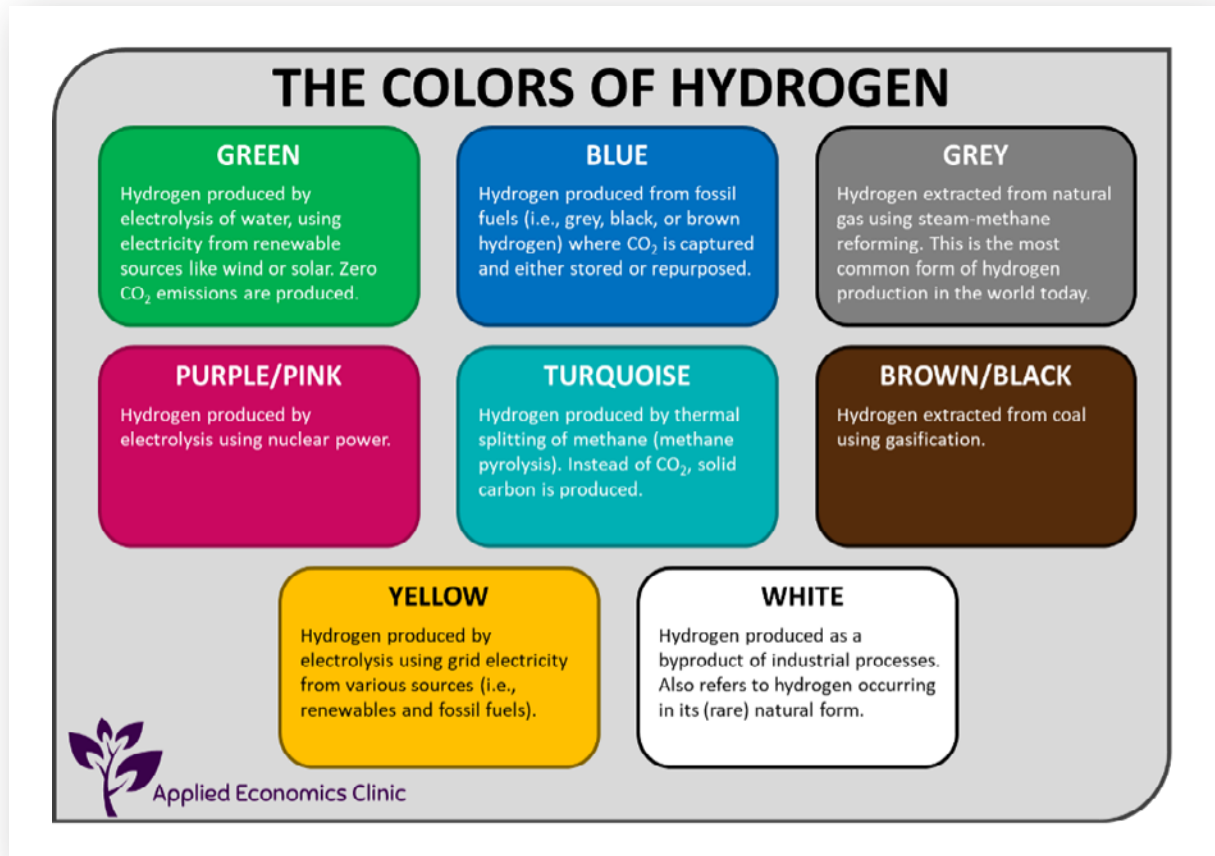
הפקת מימן "שחור" ו"אפור" מבוססת על שימוש בתרכובות פחם אגב פליטת דו-תחמוצת הפחמן. מימן "כחול" מופק גם הוא בעזרת דלק פוסילי או גז טבעי, אך נעשה בלכידת הפחמן (CO₂) בתהליכים המכונים Carbon capture & storage. מוכרים גם גוונים אחרים של מימן, כמו למשל מימן "טורקיז", המבוסס על הפקת מימן ממתאן בתהליך פירוליזה אגב ייצור פחמן מוצק (ראו לדוגמה להלן איור 1).

מימן שמופק דרך אלקטרוליזה מוגדר "ירוק" רק אם האנרגייה החשמלית שמשמשת לאלקטרוליזה המים היא ירוקה (אנרגייה סולרית, הידרואלקטרית). בתנאים מתאימים ניתן להפיק באמצעות אנרגייה גרעינית מימן "ורוד".



דלק מימן

- יעילות ייצור חשמל משתנה לפי מקורות הייצור ולפי התקדמות הטכנולוגיה: שיעורה של יעילות ההפקה מדלקים פוסיליים בתחנות כוח כמו בישראל היא כיום 25%–40% (אף כי ניתן להגיע ליותר בתחנות גזיות או בשימוש בחום הנמוך שנותר, במערכת משולבת). להשוואה, יעילות הפקת חשמל מרוח מגיעה עד כ-45% אך למעשה יכולה לרדת ל-15% בגלל שונות ברוחות. בהפקת מימן באלקטרוליזה יעילותה של המרת אנרגייה של חשמל למימן מגיעה ל-80% במערכות המתקדמות ביותר היום. בהפקת החשמל באמצעות תאי דלק היעילות כיום יורדת לכ-60%. כלומר, כיום יעילות ההחזר שכוללת גם את ייצור המימן וגם את הפקת החשמל היא כ-50%, אך מערכות חדשות המצויות קעת בשלבי מסחור צפויות להעלות את היעילות לכ-70% בעתיד הנראה לעין.
- כיום ייצור מימן ירוק יקר לפחות פי 2.5–5 משימוש בדלק פוסילי, ויעילותו לעומת מקורות אנרגייה אחרים רבה יותר אך אינה בהכרח מיטבית בשלב זה, לעומת חלק מחלופות אחרות (ראו לעיל ובטבלה 1 להלן נתונים על שיעורי יעילות במעגל השלם של הפקת המימן וניצולו בהפקת אנרגייה). ב-2030 עלות ייצור מימן ירוק צפויה להשתוות לזו של מימן אפור או כחול (דוח מקינזי).
- אשר לייצור מימן, יש כיום תחשיבים שונים להיקפי הייצור בעתיד הקרוב: קצב צריכת אנרגייה בעולם כיום הוא כ-18 TW (מתוך זה כ-11% חשמל). הפקת כל סוגי המימן בעולם היום שוות ערך לכ-0.3 TW (מחושב מייצור שנתי עולמי [2020] של 90 Mt של מימן). הסוכנות הבינלאומית לאנרגייה, IEA, מפרסמת תחזיות לייצור 40 GW ב-2030 של מימן ירוק, תלוי בהחלטות מדיניות הדרושות לקידום התחום ולמימונו.



איור 1. צבעי המימן לפי הדרכים להפקתו, כולל "מימן ירוק" שאינו כרוך בפליטת פחמן דו-חמצני ודרכים חלופיות עם דרגות שונות של פליטות פחמן דו-חמצני (מקור האיור: <https://aeclinic.org/aec-blog/2021/6/24/the-colors-of-hydrogen>)

דלק מימן

גורם חשוב שנוטים להתעלם ממנו הוא הצורך במים כמקור לייצור דלק מימן מאלקטרוליזה של מים: תאורטית ייצור 1 ק"ג מימן דורש 9 ק"ג מים; מעשית, יחידת אלקטרוליזה חדישה דורשת 11 ק"ג מים אחרי התפלה ומגיעה ל-20 ק"ג מים רגילים לק"ג מימן. לפיכך צריכת המים ליכולת ייצור (front plate) של 1GW יכולה להיות כמו צריכת מים שוטפת של עיר בת כ-70,000 תושבים. לכן במרבית המקרים מקום הייצור צריך להיות קרוב לים. עם זאת שימוש ישיר במים באלקטרוליזה מקצר את אורך החיים של מרכיבים במערכות הטכנולוגיות, כגון השימוש באלקטרודות ובמיוחד בממברנות מתקדמות. לפיכך רצוי להשתמש במים שפירים או מותפלים שמוסיפים 0.3%-1% למחיר של מימן ירוק, לפי התחזיות לירידת מחירו.

עלות הממברנות גבוהה כיום, אך צפויה לרדת עם התקדמות המחקר בתחום בארץ ובעולם. כבר יש חברות ישראליות מסחריות המתמחות באלקטרוליזה (למשל H2Pro, המשתמשת בשיטת "E-TAC", שאמורה לעבוד בלי ממברנה).

שימושי מימן

במימן שהופק ניתן להשתמש כדלק וניתן להפיק ממנו חום באמצעות שרפה לשימוש ישיר בתעשייה, או אנרגייה חשמלית באמצעות תאי דלק, וכן כחומר מחזר בתהליכי ייצור, כגון תעשיית מתכות שונות.

מקובל לראות במימן דלק מסוכן, אך נראה שאינו מסוכן מדלק רגיל, ואולי אף פחות ממנו. למשל: המימן אינו רעיל, הפסולת מהפקת חשמל ממימן היא מים, והיות שהוא גז קל הוא "מתפנה" במהירות לאטמוספירה (בניגוד לדוגמה לדלק פוסילי כבד ודליק).

יש חשיבות למציאת השימושים המתאימים לדלק זה:

באמצעות שרפה ניתן לנצל חום לתעשייה הכבדה ישירות ולנצל את המימן כחומר מחזר בתהליך עצמו (כמו בתעשיית הפלדה ומתכות אחרות). לדוגמה, בתעשיית הפלדה מימן יכול לשמש לייצור החשמל, החום הדרוש לחיזור בתהליך ייצור הפלדה ולהחלפת ה- CO_2 והפחם. כך גם בתהליך ייצור אמוניה (NH_3) לדשן, בהספקת חום ומימן לתהליך עצמו, ובעתיד גם בתעשיית המלט, שאחראית לכ-5% מפליטות ה- CO_2 בעולם.

הפקת חשמל ממימן נעשית בעזרת תאי דלק מסוגים שונים התלויים באלקטרודות ובממברנות מתאימות. חלק מהאלקטרודות דורשות שימוש במתכות נדירות (למשל פלדיום). בתאי דלק השימוש במימן יעיל יחסית לדלק פוסילי על בסיס משקל (פי שלושה בקירוב על בסיס אנרגייה לקילוגרם), אבל קילוגרם מימן דורש נפח גדול לאחסון או השקעה בקירור או בדחיסה. השימוש במימן כדלק למנועים דורש נפחים גדולים (וכיום גם מכלים כבדים) ואפשרות תדלוק מותאמת. לכן השימוש בו אינו מתאים כיום לתעופה מסחרית, אך יעיל לאמצעי תעבורה למרחקים ארוכים בעלי יכולת תדלוק, כמו אוניות ומשאיות. לעומת מצבר (סוללה), שדורש טעינה בחשמל כדי לספק אנרגייה, תא דלק צריך לצורך זה את הספקת ה"דלק" שלו (מימן). כללית, קל לאגור אנרגייה כימית בדלק יותר מאשר בסוללה, או בכל צורה אחרת (מלבד גרעינית), בגלל יחס גבוה של אנרגייה למשקל בדלק.



דלק מימן

אגירת מימן

אגירת מימן אינה פשוטה והיא דורשת תהליכים וחומרים מתאימים, דחיסה, מכלי אגירה וצנרת להובלה העשויים מחומרים מיוחדים. עם זאת יש פיתוחים חדשניים לשימוש בחומרים מורכבים קלים וחזקים לחלק ממטרות אלו. כמו כן נעשים מאמצים להסב צנרת להולכת גז טבעי לצנרת אשר יכולה להוליך מימן או תערובת של מימן וגז טבעי.

חידושים נוספים בתחום עשויים לשפר את הקשר לחברות התפלה בייצור מימן ירוק בעזרת אנרגייה סולרית המיוצרת offshore.

אקדמיה

למחקר האקדמי בכלל, וכן לזה שבישראל, תפקיד קריטי בקידום הפקת המימן והשימוש בו, בכמה תחומים, כגון פיתוח אלקטרודות להפקת המימן, פיתוח ממברנות מתקדמות להפקתו, פיתוח תאי דלק יעילים להפקת החשמל ממימן ופיתוח חומרים מתאימים לאחסון ולהובלה של מימן.

אוניברסיטת בר-אילן מונתה לאחרונה מטעם משרד האנרגיה לרכז את פעילות המחקר בתחום האנרגייה המתחדשת בישראל שכולל את המחקר בתאי דלק, ובתחום הממברנות מונו גם אוניברסיטאות תל אביב והטכניון – מכון טכנולוגי לישראל. בעקבות מחקרים אלה חוקרים בטכניון לדוגמה פיתחו דור חדש של אלקטרוליזת מים להפרדת מימן (מחמצן) יעילה, והוקמה חברת "H2Pro" למסחור הרעיון.

מוסד שמואל נאמן לחקר מדיניות לאומית הפיק לאחרונה (גרוסמן ושפירא, 2021) מסמך המלצות לשילוב מימן במשק האנרגיה.

מחקר ופיתוח תעשייתי

חברת "סונול" מקימה בימים אלו את תחנת התדלוק המימנית (האפורה) הראשונה אשר תשרת כמה משאיות מימן שנקנו לאחרונה. חברת "ג'נסל" מקדמת שימוש במשאיות על בסיס תאי דלק.

"סדום ירוק", שמתוכננת ב"כימיקלים לישראל" (כי"ל) להספקת אנרגייה ירוקה, מבוססת על שדה של תאי שמש והפקת מימן לאגירת אנרגייה ולהספקתה למפעלי ים המלח.

חברת "דוראל אנרגיה" פועלת בשיתוף עם "אילת אילות" ומחלבת "יוטבתה" להקמת עמק מימן.

משרד הביטחון, באמצעות מפא"ת, מקדם את הפארק שמש-מימן כפרויקט חלוצי חצי-תעשייתי כדי לבחון ולהדגים תהליכים כגון: הפקת מימן מאלקטרוליזה בשימוש באנרגייה סולרית (פוטו-וולטאית); שיטות לאגירת מימן; שימוש במימן להפקת אנרגייה בעזרת תאי דלק ממגוון טכנולוגיות; שילוב ברשתות אנרגייה (חיבור לרשת מקומי וכללי) (ראו פירוט בהמשך).

לאחרונה נחתם חוזה בין חברת נתיבי הגז הטבעי לישראל להולנד לפיתוח הולכת מימן בישראל.



דלק מימן

Table 1 | Future costs projections for LDES technologies

Storage method	Technology	Discharge power cost ^a (US\$ kW ⁻¹)	Charge power cost (US\$ kW ⁻¹)	Weighted power cost (US\$ kW ⁻¹)	Energy capacity cost ^b (US\$ kWh ⁻¹)	Charge efficiency (%)	Discharge efficiency (%)	Round-trip efficiency (%)
Mechanical	Pumped hydro storage ^{29,30}	600–2,000	–	600–2,000	20+ ^c	–	–	70–85
	Compressed air energy storage ^{21,29,31}	600–1,150	–	600–1,150	1–30+ ^c	–	–	42–67
Chemical	Power-H ₂ -power (Brayton cycle) ^{11,32–34}	700–1,100	220–1,400	920–2,500	1–15+ ^d	51–77	35–40	18–31
	Power-H ₂ -power (combined cycle) ^{11,32–34}	900–1,100	220–1,400	1,120–2,500	1–15+ ^d	51–77	50–55	26–42
	Power-H ₂ -power (fuel cell) ^{11,21,32–34}	220–2,000	220–1,400	440–3,400	1–15+ ^d	51–77	40–60	20–46
	Power-syngas-power (Brayton cycle) ^{11,32–34}	700–1,100	600–1,700	1,300–2,800	1–5+ ^d	49–65	35–40	17–26
	Power-syngas-power (combined cycle) ^{11,32–34}	900–1,100	600–1,700	1,500–2,800	1–5+ ^d	49–65	50–55	25–36
	Power-syngas-power (fuel cell) ^{11,21,32–34}	220–2,000	600–1,700	820–3,700	1–5+ ^d	49–65	40–60	20–39
Electrochemical	Aqueous sulfur flow batteries ¹⁶	500–2,000	–	500–2,000	10–20	–	–	60–75
	Vanadium redox flow batteries ¹⁶	270–600	–	270–600	40–200	–	–	65–80
Thermal	Multijunction photovoltaic thermal storage ¹⁹	250–350	–	250–350	8–36	–	–	40–55
	Reciprocating heat pump energy storage ³⁵	400–900	–	400–900	15–25	–	–	52–72
	Firebrick resistance-heated (Brayton cycle) ^{11,20,34}	700–1,100	30–50	730–1,150	5–10	98	35–40	34–39
	Firebrick resistance-heated (combined cycle) ^{11,20,34}	900–1,100	30–50	930–1,150	5–10	98	50–55	49–54

^aThe values quoted for some technologies include the cost of the charging component as well (for example, pumped hydro storage). ^bThe energy capacity capital cost is denoted in units of storage medium and not kWh of electricity. ^cThe full energy capacity cost range is subject to geological and geographic constraints. ^dThe lower end of the energy capacity cost range is subject to geological and geographic constraints.

טבלה 1. הערכה השוואתית של תחזית העלויות והיעילות של טכנולוגיות שונות לאגירת אנרגיה מתחדשת (מקור הטבלה: <https://www.nature.com/nenergy>)

דלק מימן

"תופעות לוואי"

מימן אינו גז חממה כשלעצמו (אינו קולט בתחום האינפרא-אדום כמו פחמן דו-חמצני). כמו כן זמן השהייה של מימן באטמוספירה קצר (שנה-שנתיים, לעומת פחמן דו-חמצני, שיכול לשהות באטמוספירה שלוש מאות עד אלף שנים). עם זאת למימן השפעה עקיפה על האקלים, וההערכה היא שפוטנציאל החימום הגלובלי שלו (GWP) גדול בערך פי 5.8 מזה של פחמן דו-חמצני (כאשר משווים את אותה המסה של שני הגזים) בטווח זמן של מאה שנים (ולאחרונה קיימות גם הערכות גבוהות יותר). כלומר, למימן כדלק יש לא רק יתרונות אלא גם חסרונות: הפקתו והובלתו כרוכות במידה זו או אחרת בדליפתו לאטמוספירה. לכך תהיה השפעה שלילית על האקלים, ויעילותו כמרכיב אנרגטי "ירוק" אפוא תיפגם. לדוגמה: התגובות הכימיות של המימן באטמוספירה עם הרדיקל "OH" גורמות להארכת החיים של המתאן ולכן לעלייה בריכוזו כמו גם בריכוז האוזון, שניהם גזי חממה בעלי פוטנציאל חימום רב, אך זמן חייהם באטמוספירה קצר לעומת פחמן דו-חמצני (12 שנים למתאן ושבועות אחדים לאוזון). לתהליכים אלה השפעה נוספת על ריכוז אדי המים בסטרטוספירה, שגם לה יש חלק בהתחממות.

חוסר שליטה מספיקה בדליפות מימן יכול אפוא להביא לעלייה בריכוזם באטמוספירה של גזי חממה חזקים ולהגביר את ההתחממות. עם זאת בדוח ממשלתי שנערך באנגליה ניתנה הערכה שדליפת מימן של 1% עד 10% (טווח רחב מאוד) תקטין את יעילות השימוש במימן להפחתת פליטות מדלקים פוסיליים רק ב-0.4%-4%. כמו כן לשימוש במימן והסיכון לדליפות יש אתגרים בתחום ההובלה, בהשפיעו על חומרים המשמשים הן להובלה והן לאגירה, שהם נושא למחקר בפני עצמם אך עדיין לא נפתרו.

לשימוש במימן סיכונים כמו בכל דלק אחר, וקיים צורך באסדרה מתאימה.

תחזית

השימוש במימן בעולם מתרחב במהירות ומציע שימושים ויתרונות חשובים למשק האנרגייה ולסביבה. על ישראל להשתלב במגמות אלה, לקבל עליה תפקיד מוביל בקידום התחום ולהביא לשילוב השימוש במימן ירוק במשק האנרגייה שבה. לשם כך יש לתמוך במחקר ופיתוח אקדמי ויישומי, שיקדם את הידע בדבר היכולת והתנאים ליישום "כלכלת מימן", ירבה את היתרונות הכלכליים למשק האנרגייה בארץ ויקדם את תרומתנו הייחודית למאבק במשבר האקלים בעולם.

דלק מימן

חלק ב. דוגמה לתרחיש ייחודי לישראל המומלץ לבדיקה ולפיתוח

המצב בארץ כנקודת התחלה

בארץ קיים פוטנציאל גדול לייצור חשמל סולרי (ירוק) שיכול לשמש להפקת מימן ירוק, בזכות קרינת השמש הרבה ושטחי המדבר הנרחבים. בארץ המרחקים קטנים ואינם אמורים להגביל בנושא הובלת המימן. הובלת חשמל מעל הקרקע אינה יקרה במיוחד. יש פיתוחים להובלת מתח "DC" שטובה לטווחים של עד כ-3500 ק"מ, והיום גם משמשת למרחקים הרלוונטיים לישראל, דבר שיכול לייעל את התחום עם שילוב טכנולוגיה זו בארץ בעתיד.

קיימות צורות אגירת אנרגיה אחרות בישראל, כמו בשיטה ההידרואלקטרית בגלבו (באמצעות שאיבת מים למאגר גבוה). לשיטה זו מגבלות רבות בארץ, כמו הבדלים טופוגרפיים ואיתור שטחים מתאימים, אם כי ייתכן שהפוטנציאל עדיין לא מוצה.

בארץ קיימים יישומים ששימוש בדלק מימן מתאים להם (ראה לעיל): תעשיות פלדה, דשן ומלט ותחבורת משאיות (אילת-ים-המלח, אילת-אשדוד-חיפה ועוד). ניתן להרחיב ייצור חשמל בתאי דלק לסקאלה תעשייתית, על בסיס האלקטרודות הפשוטות יותר הקיימות בשוק זה זמן-מה.

שילוב ייחודי של ייצור מימן עם מפעלי ההתפלה ועם ייצור חשמל סולרי בנגב – המסלול המוצע

- ◀ הקמת שדות סולריים לייצור חשמל בהיקף מתאים בדרום.
- ◀ הובלת החשמל למפעל אלקטרוליזה שיוקם ליד מפעלי ההתפלה הקיימים, כגון בפלמחים, ואחרים.
- ◀ אגירת חלק מהחשמל (במצברים או באמצעים אחרים) כדי לאפשר פעילות רציפה של מפעל המימן.
- ◀ שימוש בחלק מהמים המותפלים לייצור מימן.
- ◀ הקמת מפעל תאי דלק לייצור חשמל כמרכיב בניצול האנרגיה ממימן.

שימוש במימן מתאים:

- (1) לאגירת אנרגיה ולהספקתה למפעל ההתפלה כהשלמה לאנרגיה סולרית;
- (2) להספקת חשמל לרשת הארצית;
- (3) להספקת דלק מימן לתובלה ולתעשייה מתאימות (כגון פלדה ומלט).

דוגמה: המחשה כמותית על בסיס הקמת מפעל מימן ליד מתקן ההתפלה בפלמחים

- ◀ צריכת המים: הכמות הדרושה להפקת המימן תצרוך כ-0.13% מתפוקת המים היומית של פלמחים:
- הפעלת מפעל פלמחים דורשת תחנת כוח בעלת הספק של כ-40MW חשמל או כ-1 GWh הספקה של אנרגיה חשמלית ליום.

דלק מימן

– ניתן להפיק אנרגייה זו מכ- $4 \cdot 10^4$ (40,000) ק"ג מימן ליום: 1 ק"ג מימן מכיל כ-33 קילווט/שעה (kWh) אנרגייה, והשימוש במימן כדלק לתאי דלק יכול לספק כ-25 kWh. לכן $4 \cdot 10^4$ (40,000) ק"ג מימן ליום יספק 1 GWh.

– מאחר שלייצור 1 ק"ג מימן דרושים כ-10 ק"ג מים מותפלים, יידרשו לצורך זה כ- $4 \cdot 10^5$ ק"ג ביום, שהם כ-0.13% מתפוקת המים המותפלים במפעל כיום (כ-300,000 מטר מעוקב, או כ- $3 \cdot 10^8$ ק"ג).

– להפקת 1 ק"ג מימן באלקטרוליזה של מים דרושים כיום כ-50 kWh אנרגייה חשמלית (לכן כשאפשר, מוטב להשתמש ישירות בחשמל ירוק, שמופק מקרינת השמש, או בסוללות, נוסף על שימושו כדרך לאגירה, לוויסות ההספקה ולעוד שימושים אחרים).

◀ **הספקה של אנרגייה סולרית: דרוש שדה בגודל של כ-1500 דונם (1.5 ק"מ²) לפי השיקולים המקובלים:**
– השדה מקבל עד כ-1 ג'יגהווט (GW) קרינת שמש (ביום בהיר בצוהריים), בהתחשב ביעילות ההמרה של תאי שמש (באיכות של תאים מסחריים) בת כ-20% ובעוצמת שמש ממוצעת של כ-20%, בהתחשב ביום/לילה, בחורף/קיץ ובעננים.

– לכן לפי ממוצע על 24 שעות ביעילות המרה כוללת של 4% (כלומר $0.2 \cdot 0.2 \cdot 24$) ניתן לקבל עד 1.5 ג'יגהווט/שעה אנרגייה ביום, שהיא הצריכה היומית של הפקת המימן שתאפשר את הפעלת מפעל ההתפלה בפלמחים, הדורש 1 ג'יגהוואט/שעה ביום.

◀ נוסף על זה, להפעלת המערכת הזאת דרושים גם מערכת אגירה חלקית של החשמל הסולרי שמגיע למפעל להפעלה רציפה של המפעל (מצברים או בדומה להם; הטכנולוגיה קיימת), הובלת החשמל מהשדה הסולרי למפעל בפלמחים (הטכנולוגיה קיימת) ומפעל תאי דלק לייצור חשמל מהמימן בהיקף הנ"ל (הטכנולוגיה קיימת).

סיכום מימן-שמש-התפלה

◀ 1500 דונם שדה סולרי (1.5 קמ"ר בלבד) מאפשרים הפעלת מפעל התפלה מהגדולים בעולם עם אפס זיהום תפעולי, אשר ישתמש בכ-0.13% מהמים המותפלים ויוכל לספק חלק מתפוקתו לרשת החשמל או לשימושים אחרים.

◀ שדות סולריים גדולים יותר וניצול רב יותר של פוטנציאל ההתפלה בארץ (יותר מ-0.13% הנ"ל) יכולים להביא לידי ייצור דלק מימן לשימושים בתחבורה ובתעשייה ולאגירה בהיקפים גדולים בהרבה ולזמן בלתי מוגבל.

◀ אומנם הפקת המימן והמים המותפלים דורשת אנרגייה (סולרית לפי ההצעה כאן), אך המימן הוא נשא אנרגייה יעיל ונקי (גם יותר ממצברים) לאגירת דלק ואנרגייה, שיכול להיות זמין בכל עת ולמטרות שונות, ושילובו בתעשיית ההתפלה הגדולה עשוי להיות ייחודי ויעיל במיוחד בארץ.

◀ היבטי המימון של מיזם כזה חורגים מתחום עיסוקו של מסמך זה וכרוכים בהשקעה דומה לזו של מרכזי מחקר לאומיים, שיכולה להתחלק בין המפעל לממשלה.

דלק מימן

חלק ג. מיזם ייחודי לבדיקת היתכנות מפעלי מימן-אנרגייה-סולרית-התפלה בארץ

מטרתו של "פארק השמש-מימן" היא הקמת תשתית רחבה לחיבור אנרגיית השמש כמקור עיקרי לאנרגייה עם הפקת מימן כפתרון מיטבי לאגירת אנרגייה. הפארק ישרת את התעשיות, את מוסדות המחקר וגורמים נוספים בעלי עניין בארץ ובעולם. הפארק המתוכנן יהיה "ארגז חול" ומחקר חלוץ (פיילוט) ויהווה בסיס לחיבור בין הטכנולוגיות השונות עבור צרכנים ויעדי אנרגייה מגוונים, החל ממקור אנרגייה עצמאי קטן למתקן ייעודי וכלה בתשתית אנרגית כוללת ליישוב, לאזור ועוד.

הפארק המתוכנן יכול אפשרות תכלול (אינטגרציה) של טכנולוגיות שמש (סולריות) מגוונות בכללן; ייצור טכנולוגיות סולריות ייחודיות המבוססות על פתרונות חדשניים של חברות הזנק (סטרט אפ) בתחום הסולרי לצד מתן אפשרות לבדיקת היתכנות של חברות גדולות בתחום הסולרי שירצו לבחון פתרונות שונים לאנרגייה מתחדשת ובכללן אגירה מבוססת מימן.

בתחום המימן הפארק יכול מגוון רחב של תשתיות פיתוח, בדיקה והדגמה. טכנולוגיות המימן המרכזיות יהיו אלקטרוליזרים מסוגים שונים: PEM, SOE, AEC, AEM; הפקת אנרגייה מתאי דלק מסוגים שונים: PEM, SOFC, AFC, AMFC. להובלת המימן ולאחסונו יהיה חלק נכבד במו"פ של התשתיות בפארק. הובלת המימן, שהיא אתגר גדול בשל המורכבות שבה, תפותח סביב יכולות חדשות בתחום הצנרת והבקרה המבוססת על מתכת, על פלסטיק ועל השילוב ביניהם, בתפוקות ובלחצים עם טכנולוגיות שליטה ובקרה מתקדמות שהופכות להיות נגישות בשנים האחרונות. לפיתוח יכולות אחסון המימן, שהוא כיום אתגר טכנולוגי קריטי, יהיה חלק גדול ביותר בפעילות המו"פ של הפארק לתת מענה בנושא ולהדגים טכנולוגיות שונות. חוקרי הפארק והחוקרים באקדמיה יפתחו פתרונות המבוססים על אחסון ועל שינוע בלחצים שונים ובכמויות שונות של גז, נוזל ומוצק, אחסון במכלים שונים ואחסון כימי של חומרים שונים שמהם יופק מימן בתהליכים חדישים ומתקדמים.

מלבד השימוש בטכנולוגיות קיימות של שמש ומימן הפארק מתוכנן לאפשר פיתוח והדגמה של רשתות אנרגייה ומערכות בקרה בהיקפים שונים – מקילוואטים דרך ג'יגהוואטים ואף יותר, על פי דרישה. הפארק יאפשר גם פיתוח יכולות משלימות כגון חקלאות אגרו-וולטאית (בשיתוף משרד החקלאות), בנייה ירוקה ומודולרית וסולרית למגורים ולתעשייה. הפארק יוכל להתרחב ולשמש גם לפיתוח יכולות ייצור מוצרי דלק ותעשייה כימית סינתטית הזקוקה למימן לצד לכידת פחמן דו-חמצני לטובת הפקת מוצרים שונים.

כמו כן בשל היותו מתחם ייעודי שבו אפשרות לבידול, למידול ולתכלול, הפארק יאפשר הדגמות לטובת בחינת רגולציה בשיתוף פעולה עם גורמי רגולציה בארץ ובעולם, אגב בחינת היבטי יעילות ופרמטרים אנרגטיים שונים.

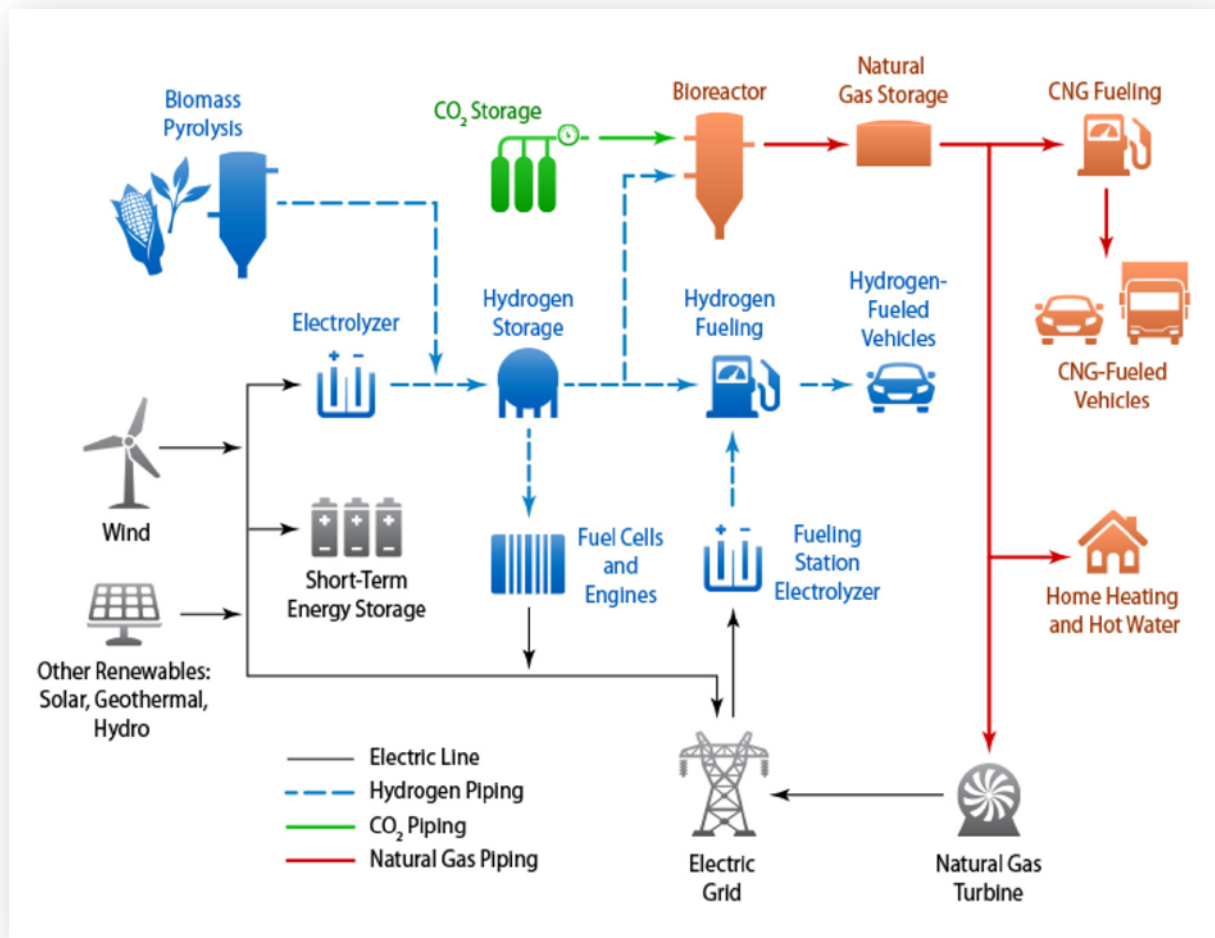
פארקי מימן ופארקי אנרגייה מסוגים שונים ובהיקפים שונים הוקמו ומוקמים בעולם. כאמור, מטרתם של הפארקים לקדם פתרונות קיימות ואנרגייה מתחדשת. פארק שמש-מימן זה יהיה ייחודי בשל השילוב של אנרגייה סולרית עם מימן ובשל מיקומו הקרוב יחסית למקורות מים מותפלים (ראה לעיל). הפארק ישמש גם בסיס לפיתוח הפוטנציאל לשיתוף פעולה אזורי ויתרום לקידום הקיימות והאנרגייה המתחדשת במזרח התיכון כולו אגב ניצול מיטבי של קשר עם פארקים באירופה, בארצות הברית ובמקומות נוספים.

דלק מימן

קידום פרויקט הפארק שמש-מימן יוכל לשמש אבן בוחן ליישומים בקנה מידה לאומי הייחודיים לישראל, כמתואר כאן. הן הפארק שמש-מימן והן היישום מימן-התפלה יהיו מסגרת חסרת תקדים לקידום המחקר בכל ההיבטים הקשורים ב"כלכלת מימן" וסייעו בטיפוח המחקר בתחומים ספציפיים בעזרה תקציבים ייחודיים, מלגות וגיוס חוקרים.

שורה תחתונה

פארק "שמש-מימן" הוא מיזם לאומי, המתאים לקידום במסגרת "פורום תל"מ" (פורום לאומי שהקימה האקדמיה הלאומית הישראלית למדעים לקידום יוזמות בין-משרדיות גדולות, בתקציבים של מאות מיליוני שקלים).



איור 2. תיאור התשתיות הטכנולוגיות והשילוב ביניהן בפארק המימן (מתוך דוח: NREL2022)

דלק מימן

חלק ד. שיתופי פעולה לאומיים, אזוריים ובין-לאומיים

קידום השימוש במימן יוצר צורך בשיתופי פעולה בכל הרמות האפשריות ואף מאפשר אותם. הדבר נובע מהתבונה המרכזית בנושא המימן שבשל מורכבות התחום על כל ממדיו (הכוללים ייצור, הובלה, אחסון, שימושים, כלכלה, רגולציה, בטיחות, תשתיות ומצב גאופוליטי כמו הסכמים ומצב ביטחוני) יש צורך בשיתוף פעולה רחב – מהרמה הפנים-ארגונית, בין גופים באזור גאוגרפי נתון, ועד הרמה של גופים באזורים גאוגרפיים שונים ובין-לאומיים. תבונה זו הביאה בשנים האחרונות להתפתחות מהירה של שיתופי פעולה בין-מוסדיים ובין מדינות ברחבי העולם (ראו סקירה של ארז וצימרמן, "אקולוגיה וסביבה", 13(3) [2022]). בזירה הבין-לאומית הקרובה אלינו חלו שינויים גאופוליטיים כמו הסכמי אברהם, הסכמים עם האיחוד האירופי ועם מדינות צפון אפריקה, וננקטו יוזמות בין-לאומיות דוגמת אלה שנדונו בוועידת האקלים בשארם א-שיח' בנובמבר 2022, המאפשרות לזרז את כניסתה של ישראל לתחום המימן. שותפויות של ישראל ביוזמות שכאלה באגן הים התיכון המזרחי, בשיתוף מדינות צפון אפריקה, ובמיוחד במשולש ירדן-ישראל-מצרים (עקבה-אילת-טאבה) המתאים למפעלי מימן-אנרגיה-סולרית-התפלה בהיקף בין-לאומי, יכולות לתרום להפיכתה של ישראל לשחקן מוביל בתחום המימן.

מאחר שמדובר בצורך לתכנון ארוך טווח ובהשקעות בהיקף גדול, דרושים מעורבות ממשלתית ושיתוף פעולה של המגזר הפרטי בתכנון הפרויקטים ובמימוןם ובהסרת חסמים רגולטוריים למימושם וליישומם. דוגמה לכך הוא הפרויקט של מפא"ת שנדון לעיל, הדורש שיתוף פעולה בין התעשייה לאקדמיה בתמיכה ובמימון ממשלתיים (כגון דרך תל"מ). מקורות מימון אפשריים נוספים הם, בין היתר, רשות החדשנות, פרויקטים דו-צדדיים ומשותפים עם מדינות שונות וכן מימון פרויקטים של האיחוד האירופי במסגרת הקולות הקוראים שלו (Horizon Europe). יוזמות כאלה צריכות לכלול את כל שרשרת הערך של מימן ולהתמקד בפיתוח ובהקמה של עמקי מימן אזוריים כגון אלה שמוקמים בדרום אוסטרליה, ביפן, בדרום-אפריקה ובגרמניה (ראו גם דוח NREL 2022).

ממבחר הסיבות שנמנו במסמך זה ניכר שעל ישראל להשתלב בכלכלת המימן העולמית ולהיות ממוביליה (ראו סקירה בנושא של גרוסמן ושפירא, מוסד שמואל נאמן). ישראל הייתה מאז ומתמיד ארץ מעבר. תחילה בין מסופוטמיה לבין מצרים ובהמשך במסגרת אימפריות עצומות דוגמת האימפריה הרומית והאימפריה העות'מאנית. בתקופת המנדט הבריטי הובל נפט לעבר אירופה ממדינות המפרץ דרך מה שלימים היו לירדן ולישראל. גם בימינו ישראל יכולה לשמש גשר בין מדינות המפרץ לבין אירופה.