

מהפכת המימן – אסטרטגיות לאומיות ושינויים גאופוליטיים

חיה ארז ^[1] ונדיה צימרמן ^[2] *

^[1] חיה ארז – משרד עו"ד

^[2] מנכ"לית, Lexidale (חברה המתמחה במחקרים השוואתיים
ובייעוץ בתחום של מדיניות, משפט ואסדרה)

hayalegal@gmail.com *

tnadia@lexidale.com **



חברת הזנק ברישית ייצרה לראשונה בעולם דגם של "יאכטה מעופפת" שמייצרת מימן ירוק מאנרגיית רוח תוך כדי תנועה. "הרכיב הסודי" הוא אלגוריתם שמנתב את היאכטה במסלול עם תנאי רוח מיטביים בכל חלון זמן, והיעד השאפתני שהוצב הוא לבנות כלי שיט שייצר 250,000 ליטר מימן ירוק לשעה ויותר | באדיבות

DRIFT Energy

תקציר

התנאים המרכזיים לעמידה ביעדים הנדרשים של הפחתת פליטות גזי חממה כוללים ייעול השימוש באנרגיה וכן מעבר לשימוש בחשמל המיוצר מאנרגיה ממקורות מתחדשים. בחלק מהמגזרים, בעיקר באלה שהחשמול בהם מאתגר, קשה לבצע את השינוי. הפתרון המסתמן עבורם עשוי להיות טמון במימן דל-פחמן, ובעיקר במימן הירוק, שכן כנשא אנרגיה יש לו יכולת לשמש חוליה מקשרת בינם לבין הייצור ההולך וגדל של חשמל ממקורות מתחדשים. הגם שהשימוש במימן תופס תאוצה ברחבי העולם, קיימים חסמים מסוגים שונים המעכבים את קצב המעבר לכלכלת מימן. בחודשים האחרונים סקרנו את המסע העולמי להתגברות על החסמים האלה. מניתוח התפתחות שוק המימן במדינות שונות עולה כי לצורך קידומו של שוק זה נדרשים מספר תנאים בסיסיים. התנאי הראשון הוא גיבוש אסטרטגיה לאומית לקידום כלכלת מימן, שמגדילה את רמת הוודאות בשוק. אסטרטגיה כזו מגדירה, בין היתר, אילו מגזרים מתוכננים לעבור לשימוש במימן, ומהם סדרי העדיפויות והיעדים המגזריים. תנאי שני הוא יצירת שיתופי פעולה בין-לאומיים לצורך יבוא ויצוא של מימן. תנאי שלישי, שישלים את התמונה הכוללת, הוא תוכנית השקעות ותמריצים לטווח הקרוב והרחוק, שמעודדת השקעות של השוק הפרטי בפיתוחים טכנולוגיים. במאמר זה נציג מספר צעדים מרכזיים שמדינות שונות בעולם נקטו בשנים האחרונות לשם פיתוח שוק המימן, במטרה לעורר את השיח גם בישראל, שטרם גיבשה אסטרטגיה ארוכת-טווח בנושא.

מילות מפתח: אנירת מימן · טכנולוגיות לייצור מימן · יבוא ויצוא של מימן · כלכלת מימן · מימן דל-פחמן · מימן ירוק · שינוע מימן

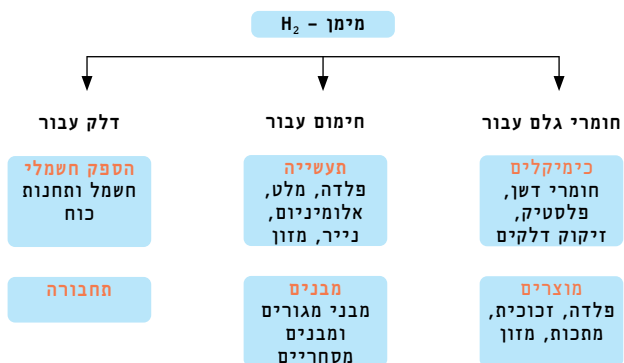


לאוויר גזי חממה. לדוגמה, מכונית המונעת במימן פולטת לאוויר רק אדי מים. עם זאת, אם המימן אינו מופק מאנרגיה ממקורות מתחדשים, גזי חממה יכולים להיפלט לאוויר בעת הפקתו. לפיכך, מקובל להבחין בין סוגי מימן שונים בהתאם למקורות שהופקו מהם (ראו **טבלה 1**). מקור ההפקה וצורת ההפקה משליכים על כמות פליטות הפחמן, וקיים רצון ברור מצד המדינות לעודד ייצור של מימן דל-פחמן (ירוק שמקורו באנרגיה ממקורות מתחדשים, וכחול שמקורו בגז מחצבים). עם זאת, המחלוקת העזה בשאלה אם מימן כחול ייחשב מקור לאנרגיה נקייה או לא, גרמה למספר מדינות לבחור בשיטת סיווג שונה של מימן, שמביאה לידי ביטוי את סך פליטות הפחמן במעגל חייו של המימן (להבדיל מסיווג על בסיס מקור ההפקה בלבד). למשל, זיכוי המס למתקני הפקת מימן דל-פחמן שאושר בארה"ב במסגרת ה-US Inflation Reduction Act באוגוסט 2022, ונחשב תמריץ משמעותי לקידום מיזמי מימן בארה"ב, מחשב את גובה הזיכוי (שעשוי להגיע עד 3 דולר לק"ג מימן) לפי רמת פליטת הפחמן במחזור חייו המימן. גם הצעת חקיקה חדשה, שפרסמה הנציבות האירופית, מציעה מינוח לסיווג מימן בהתאם לסך פליטות הפחמן במחזור חייו ^[10].

גלי התערורות והחסמים לפיתוח כלכלת מימן
היעדר מקורות אנרגיה עצמאיים הפך את יפן לחלוצה, כשניסתה לסמן את המימן כפתרון להשגת ביטחון בתחום האנרגיה כבר בשנות ה-40 של המאה ה-20 ^[17]. ספק המימן הראשון במדינה –

תפקידו המרכזי של המימן במאבק במשבר האקלים
למימן צפוי להיות תפקיד מרכזי בחברה העתידית, שתתבסס על 100% אנרגיה ממקורות מתחדשים, כנשא אנרגיה שמאפשר הפחתת פליטות גזי חממה במגזרים קשים לחשמול ^[18]. אומנם חוקרים דוחים עמדות הצופות שהמימן יהיה הגורם הגדול ביותר בשוק האנרגיה, אך בר-זמנית דוחים עמדות שמחשיבות אותו גורם שולי ויקר מדי, ומזהירות מפני חוסר יעילותו לנוכח איבוד האנרגיה המתרחש בעת תהליך הפקתו ממים והמרתו בחזרה לאנרגיה. המונח כלכלת מימן נטבע כבר בשנות ה-70 על-ידי John Bockris, אך בספרות האקדמית אין עדיין הסכמה על הגדרתו. במאמר זה נשתמש במונח "כלכלת מימן" כמתאר את כלל השימושים בשלבי הייצור, הצריכה, השינוע, השיווק וההפצה של מימן, לרבות המגזרים התלויים בו וההשפעות העסקיות, הכלכליות והסביבתיות שלו. בספרות נהוג להתייחס לשלושה שלבים במעבר לכלכלת מימן ^[18]. בשלב הראשון המימן המופק מדלקי מחצבים (ונצרך בכמויות גדולות על-ידי התעשיות הכימיות והפטרוכימיות) יוחלף במימן דל-פחמן. בשלב השני ייכנסו לשימוש כלי רכב מונעי מימן (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV), ובעיקר כלי רכב כבדים לנסיעות ארוכות, ולאחר מכן יחל המימן לשמש מקור אנרגיה למבני מגורים ומסחר. בשלב האחרון השימוש במימן לייצור חשמל יספק פתרון לתנודתיות באספקת אנרגיה ממקורות מתחדשים. **איור 1** מרכז את השימושים הפוטנציאליים במימן דל-פחמן במדינות המתועשות. יתרונו של המימן הוא בכך שבעת השימוש בו לא נפלטים

איור 1. שימושים פוטנציאליים במימן דל-פחמן במדינות המתועשות מעובד מתוך: BloombergNEF.



ולמעבר לאנרגיית מימן^[13]. ההשקעה הממשלתית בפרויקטים של מימן מעניקה למשקיעים הפרטיים ודאות ביחס להשקעתם. מטרתו של מאמר זה היא לפרוס יריעה רחבה של דרכי פעולה של מדינות ברחבי העולם להתמודדות עם פיתוח כלכלת המימן, לרבות שיתופי פעולה בין-לאומיים, עידוד השקעות ומתן תמריצים לקידום טכנולוגיות לייצור מימן, ובעיקר מימן ירוק. סקירה זו מבוססת בעיקר על מסמכי מדיניות רשמיים במגוון מדינות ופרסומים שוטפים לגבי התפתחויות בשוק המימן. מטרתה לעודד שיח סביב כלכלת מימן גם בישראל, שטרם אימצה מדיניות כוללת בנושא. מדינות רבות אימצו אסטרטגיית פעולה בהתאם לצורכיהן ולתנאים הכלכליים והחברתיים שלהן, והגיעה גם שעתה של ישראל לבחון את אסטרטגיית הפעולה הרצויה לשם הפקת מרב התועלת הסביבתית, הכלכלית והחברתית, שעשויה לצמוח מפיתוח כלכלת מימן.

אסטרטגיות לאומיות לפיתוח שוק המימן

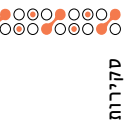
מחקרי שוק מראים, שכדי שכלכלת המימן תוכל לממש את ההבטחה הגדולה בתהליך שינוי מקורות האנרגיה, המימן צריך לתפוס נפח של לפחות 15% מתמהיל הדלקים העולמי עד לשנת

"תעשיית מימן אוסקה" – קם בשנת 1958, אך התהליך לא האיץ כמצופה. מאז שנות ה-70 של המאה הקודמת עבר שוק המימן גלים של התערורות ודעיכה, בהתאם לתנודתיות המחירים בשוק הנפט: האמרת מחירי הנפט הביאה לעידוד שוק המימן, והתייצבות זמנית של מחירי הנפט הובילה בתורה להאטה בשוק המימן – וחוזר חלילה. גל ההתעניינות הנוכחי בשימושי המימן שונה. הוא מאופיין במחויבות מוגברת של מדינות למעבר לכלכלת מימן. מחויבות זו נוצרה בעקבות שתי תובנות עיקריות: האחת, שמשבר האקלים הוא עובדה קיימת, שלא ניתן עוד לחמוק מהשלכותיה על החיים על כדור הארץ, והשנייה, שהמעבר לכלכלת מימן חיוני להשגת יעדי הסכם פריז לניטרליות פחמנית. כך, ההתעניינות המחודשת שהחלה כבר בתחילת המאה ה-21, לובתה בחשש מהסיכונים בעקבות שינוי האקלים, והתמקדה בטכנולוגיות ללכידה, לשימוש ולאחסון של פחמן (CCUS), בהפקת מימן מאנרגיה ממקורות מתחדשים ושימוש במימן בתחבורה. יפן הקצתה אז 4.5 מיליארד ין לתוכנית ארוכת-טווח לסחר בין-לאומי במימן, שיהיה מבוסס על אנרגיה ממקורות מתחדשים; הנציבות האירופית בשיתוף ממשלת קוויבק הקצתה כ-33 מיליון דולר קנדי לחקירת פתרונות אחסון ושימוש במימן. באותה התקופה נחשפו בתערוכות של יצרניות רכב גדולות רבות מכוניות שמנועות במימן ומצוידות בתאי דלק שיוצרו בטכנולוגיות חדשות.

אלא שהרצון להאיץ את מהפכת המימן נתקל באתגרים קריטיים, ועיקרם מחירם הגבוה של המימן הירוק והמימן הכחול, הקשיים בהיתכנות להרחבת הייצור שלהם בכמויות הנדרשות לתעשייה ומחסור בתשתיות כמו תחנות תדלוק לרכבי מימן. לאתגרים הללו מתלוות בעיות של בטיחות השימוש במימן, מחסור בפתרונות לשינוע ולאחסון של מימן, חסמי אסדרה רבים ועוד. השילוב של הדחיפות מול הקושי בהתגברות על החסמים שבדרך הוביל לתובנה שתנאי סף לפריצת שוק המימן הוא מעורבות ומחויבות ממשלתית, שיספקו ודאות לגבי מגמות השוק בטווח הארוך, בד בבד עם שיתוף פעולה הדוק בין המגזרים הציבורי והפרטי. לנוכח העובדה כי כיום העלויות לייצור מימן דל-פחמן גבוהות מאוד, המעורבות הממשלתית חיונית לשם עידוד השקעות פרטיות בייצור מימן ירוק

טבלה 1. סיווג מימן בהתאם למקור ההפקה

מקור הפקה	מימן דל-פחמן		מימן עם מדריך פחמן גבוה	
	מימן ירוק	מימן ורוד	מימן כחול	מימן חום
מקור הפקה	אנרגיה ממקורות מתחדשים	אנרגיה גרעינית	גז מחצבים	פחם
תהליך הפקה	אלקטרוליזת מים (פירוק מים למימן ולחמצן באמצעות זרם חשמלי), הפקה מפסולת ועוד	אלקטרוליזה באמצעות אנרגיה מתחנות כוח גרעיניות	התמרת גז מחצבים בשילוב טכנולוגיות ללכידה, לשימוש ולאחסון של פחמן (CCUS – Carbon Capture, Utilization and Storage)	תהליך גזיפיקציה



2050^[4]. נראה כי מדינות שונות עושות כיום מאמצים ניכרים כדי להתקרב אל היעד הרצוי. הנכונות להתחייב לשינוי מקורות האנרגיה משתקפת בגל של פרסום אסטרטגיות לאומיות ארוכות-טווח למעבר לכלכלת מימן, כחלק מהשאיפה להגיע לניטרליות אקלימית עד לשנת 2050. מגמה זו, שהחלה רק בשנים האחרונות, עולה מפרסומים מדינתיים ומדיווחים שוטפים העוסקים בהתפתחות שוק המימן. עד כה כ-20 מדינות הכריזו על אסטרטגיות מימן, ובהן גרמניה, צרפת, ספרד, בריטניה, פורטוגל, נורווגיה, פינלנד, יפן, דרום קוריא, סין, הולנד ועוד. מדינות נוספות פרסמו, כשלב מקדים לפרסום אסטרטגיה, מפות דרכים לקידום כלכלת מימן. כיום נראה כי היבשת היחידה שצפויה להתקרב אל היעד הרצוי של מימן בתמהיל מקורות האנרגיה שלה היא אירופה, שעל פי התחזיות^[4], המימן יתפוס בה נתח של 11% מתערובת הדלקים בשנת 2050. נראה כי התוכנית השאפתנית של האיחוד האירופי להגדלת שימושי המימן (REPowerEU) נובעת גם מהחשש של אירופה מאיבוד ההובלה הנוכחית בשוק המימן לטובת סין, כפי שקרה בשוק הלוחות הסולריים, שכן סין, יצרנית המימן הגדולה בעולם, מייצרת כיום מימן בעיקר מפחם (כ-62% מהמימן בסין מיוצר מפחם ו-3% בלבד מאנרגיה ממקורות מתחדשים), אך הציבה כיעד לטווח הארוך הפיכת מימן מאנרגיה ממקורות מתחדשים למקור המימן העיקרי שלה. הנחישות האירופית גברה עוד יותר בעקבות המלחמה באוקראינה ורצונם של מקבלי ההחלטות באירופה להשתחרר מהתלות ביבוא דלקים מרוסיה. האסטרטגיות הלאומיות נבדלות הן בדגשים ובסדרי העדיפויות שהן קובעות לגבי שימושי המימן שיוטמנו במדינה, הן מבחינת היקף ההשקעות המתוכנן לקידומן. **טבלה 2** מציגה דגשים ויעדים שקבעו מדינות שונות באסטרטגיות הלאומיות שלהן, ולצידן מדגם של

על קצה המזלג

- * כדי לצמצם פליטות גזי חממה ממגזר האנרגיה נעשה מאמץ עולמי לפיתוח מקורות אנרגיה מתחדשים.
- * אנרגיית המימן צפויה להיות חלק משמעותי מכל תמהיל אנרגיה עתידי בשל יתרונותיה: השימוש בה אינו פולט גזי חממה ומזהמי אוויר; אפשר לאגור אותה וכך לתמוך במקורות הפופולריים של אנרגיה מהשמש ומהרוח, שאינם מופקים באופן סדיר לאורך היממה או עונות השנה; השינוע שלה יעיל.
- * המעבר לכלכלה המבוססת על אנרגיה נקייה מחייב אסטרטגיה ארוכת-טווח להטמעה של כלכלת מימן. מדינות ייעשו ליצרניות או ליבואניות של אנרגיית מימן, דבר שצפוי לעצב מחדש את מפת שיתופי הפעולה הבין-לאומיים.
- * בישראל שוקדים משרדי הממשלה על גיבוש מדיניות בתחום אנרגיית המימן כחלק מסל האנרגיה החלופית לדלקי מחצבים.

המערכת



רכבת הנוסעים מונעת המימן הראשונה בעולם. הרכבת נכנסה לשימוש בגרמניה בשנת 2018.

טבלה 2. דוגמאות לאסטרטגיות לאומיות ולשיתופי פעולה לפיתוח כלכלת מימן

מדינה	עיקרי האסטרטגיה	שיתופי פעולה בין-לאומיים
גרמניה	מתמקדת במגזרים קשים לחשמול , ראשית בתעשיות הכימיה והפלדה, ולאחר מכן בתחבורה כבדה, בתעבורה ימית ואווירית, ובקידום תשתיות ליבוא מימן במטרה שיבוא דלקי מחצבים למדינה יוחלף ביבוא גז ירוק מבוסס מימן כבר בשנת 2028	הצהרת כוונות לכינון "ברית מימן" עם קנדה ליבוא מימן לגרמניה (אוגוסט 2022); התחייבות לחיבור בין צרכני מימן לתעשיות הפקת מימן מפסולת באזור המזרח התיכון וצפון אפריקה (יוני 2022); כוחות משימה משותפים עם אוסטרליה (יוני 2022) ועם הודו (מאי 2022) למינוף יבוא מימן לגרמניה; הסכם בין גרמניה ונורווגיה לבדיקת היתכנות של קידום מהיר של יצוא מימן לגרמניה (מרץ 2022); חממה משותפת לאוסטרליה ולגרמניה לתמיכה בפרויקטים בתחום המימן (מרץ 2022); שיתוף פעולה בין גרמניה, דנמרק, בלגיה והולנד לייצור מימן ירוק בים הצפוני (מאי 2022)
הולנד	האסטרטגיה ממרץ 2022 מתבססת על היתרונות הייחודיים של המדינה: פיתוח הנמלים כשער ליבוא מימן לאירופה וצומת לשינוע שלו ביבשת, ייצור מימן מאנרגיית רוח בים, שימוש במימן ירוק בתעשיות זיקוק הדלקים והפלדה ושינוע מימן שמתבסס על תשתית הולכת הגז הטבעי	מזכר הבנות עם קנדה לשיתוף פעולה, שמקדם את הולנד כשער ליבוא מימן לאירופה על-ידי יצירת מסדרונות ליצוא וליבוא של מימן (אוקטובר 2021); מזכר הבנות לקידום משותף של מחקר ושימוש במימן ירוק עם איחוד האמירויות (מרץ 2022)
יפן	מדישה את הצורך בהבטחת מקורות אספקת מימן זולים מחו"ל, ומציבה בעדיפות גבוהה את השימוש במימן במגזר התחבורה (הוצב יעד של 800,000 כלי רכב מונעי מימן ו-900 תחנות תדלוק עד שנת 2030) ואת שילובו במערכות אספקת חשמל; בתעשייה – שימוש במימן יוכנס רק במפעלים חדשים; האסטרטגיה היפנית קבעה יעד לייצור של 300,000 טונות מימן בשנה, והוזלת מחירו באופן משמעותי	מזכר הבנות לשיתוף פעולה עם איחוד האמירויות לפיתוח משותף של שרשרת אספקת מימן בין-לאומית (אפריל 2021); הסכם שיתוף פעולה עם רוסיה בקידום ייצור מימן ואמוניה ירוקים (ספטמבר 2021); הסכם עם אוסטרליה ליצוא מימן ואמוניה ירוקים (ינואר 2022); שיתוף הודית-יפנית בתחום האנרגיה הנקייה (מרץ 2022); מזכר לשיתוף פעולה בין יפן ואינדונזיה לפיתוח וליישום של טכנולוגיות מימן (ינואר 2022)
דרום קוריאה	עידוד תעשיית הפלדה והכימיקלים להתבסס על מימן נקי, קידום טכנולוגיות מימן בתחבורה ועידוד תחנות כוח לשלב מימן בתערובות הדלק (יעד של 30% מימן בתוך תערובת הדלקים של כל תחנות הכוח הגזיות במדינה ו-20% אמוניה ביותר ממחצית מתחנות הכוח הפחמיות עד 2035); ביוני 2022 הוקמה שותפות להקמת תחנת כוח מבוססת תאי דלק מימן; מאחר שמתוך צריכה מתוכננת של 28 מיליון טונות מימן בדרום קוריאה ב-2050, 60% צפויים להגיע מיבוא, הממשלה מתכוונת להשקיע ב-40 מסלולי יבוא לאספקת מימן	הסכם עם קטאר להרחבת שרשרת אספקת מימן ולפיתוח טכנולוגיות מימן (אוקטובר 2021) והסכמים עם איחוד האמירויות (ינואר 2022); מזכר הבנות בין איחוד חברות הגז הקוריאני וחברות בטקסס לפיתוח אמצעי אחסון גדולים למימן נוזלי (מאי 2022)
בריטניה	האסטרטגיה לביטחון בתחום האנרגיה של ממשלת בריטניה מאפריל 2022 הכפילה את היעד לייצור מימן דל-פחמן עד 2030 מ-5GW ל-10GW (כאשר לפחות מחציתו מימן ירוק); מתקנים לייצור 1GW מימן מתוכננים להיות בשלב ייצור או בנייה כבר בשנת 2025; נקבע יעד לפתח מודלים עסקיים לשינוע ולאחסון של מימן ולקביעת הליכי רישוי למימן עד 2025	
האיחוד האירופי	תוכנית REPowerEU ממאי 2022 מבקשת להאיץ את הגידול בשימוש במימן עם הצבת יעד צריכה של 20 מיליון טונות מימן בשנה עד 2030 (פי 4 מהיעד הקודם), שמתוכו 10 מיליון טונות יהיו מימן מיובא וכ-5 מיליון טונות ייוצרו באירופה; כדי לקדם את יבוא המימן הירוק נקבעו שלושה מסדרונות יבוא – מהמזרח התיכון, מהים הצפוני, וכשיתאפשר – מאוקראינה; התוכנית מתייחסת להשקעות במחקר ולהשלמת מסגרת האסדרה, לרבות יזרה הליכי רישוי לפרויקטים חדשים בתחום המימן; התוכנית הגדילה את היקף המימון למחקרים בתחום המימן לכ-200 מיליון דולר; ההערכה היא שתירדש השקעה של 34–49 מיליארד דולר בתשתיות מימן; רובה תושקע בצנרת לשינוע המימן (28–38 מיליארד דולר), 6–11 מיליארד דולר יושקעו בתשתיות אחסון מימן	
סין	במרץ 2022 פרסמה סין תוכנית אסטרטגית לפיתוח תעשיית אנרגיית המימן עד 2035, שממשיכה להציב את שוק רכבי המימן בראש סדר העדיפויות, לפני בחינה של חלופות לשימוש בדלקי מחצבים בתעשייה	דגש על מעורבות פעילה בשיתופי פעולה בין-לאומיים



גאופוליטיות חדשות ושינויים עתידיים ביחסי הכוחות בין המדינות (טבלה 3). דו"ח שפרסמה לאחרונה הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה ממקורות מתחדשים (IRENA) מנתח את ההשפעה של פיתוח שוק מימן גלובלי על הגאופוליטיקה בגלל שינוי בזהות ספקיות האנרגיה בעולם^[15]. הצפי הוא שהלחץ החזק באירופה ובמזרח אסיה למצוא מקורות ליבוא מימן ישנה את יחסי התלות הקיימים בין מדינות. מדינות התלויות כיום ביבוא מקורות אנרגיה, ושמחזיקות בכושר ייצור גבוה של מימן ואנרגיה ממקורות מתחדשים (כמו צ'ילה, מרוקו ונמיביה), עשויות לשפר במידה רבה את מעמדן הגאואסטרטגי כיצרניות מימן. לעומת זאת, יצואניות של נפט וגז ימשיכו לספוג ירידות גדולות בהכנסות. עם זאת, יצואניות נפט שיצליחו להשתלב כיצואניות מימן (כמו אוסטרליה ומדינות המפרץ הפרסי), אומנם יושפעו מכך שמדובר בשוק תחרותי בהרבה משוק הנפט, אך יוכלו עדיין לשמר את מעמדן ואף למנף את התשתיות הקיימות שלהן

שיתופי פעולה בין-לאומיים שנחתמו לאחרונה. זוהי רשימה חלקית בלבד, שגובשה כדי להמחיש את עוצמת ההתגייסות הבין-לאומית לקידום מחקר ופיתוח לשם הוזלת מימן דל-פחמן, ולצורך הבטחת ייצור מימן וסחר בו בהיקף שיענה על הביקושים הגוברים שנובעים מהיעדים השאפתניים שהוצבו. הטבלה ממחישה את ההבדלים בדגשים בין המדינות. למשל, מדינות האיחוד האירופי נותנות את הדגש על החלפת מימן אפור או חום במימן דל-פחמן בתעשייה, לעומת מדינות אסיה (כמו יפן וסין), שמקדמות במרץ את השימוש במימן בתחבורה. מדגם של שיתופי הפעולה ממחיש שיצרניות המימן כבר ממצבות עצמן בעמדת כוח אסטרטגית.

שינוי יחסי כוחות – יבואניות ויצואניות מימן בעולם

מעקב אחר המרוץ למימן חושף כי מלבד יתרונו כאמצעי להפחתת פליטות מזהמות, פיתוח שוק המימן טומן בחובו גם הזדמנויות



חברת גנסל הישראלית השיקה לאחרונה מערכת לטעינת כלי רכב חשמליים ללא תלות בחיבור לרשת החשמל (EVOX). הטכנולוגיה שפיתחה החברה מבוססת על תא דלק מימן | באדיבות חברת גנסל

המרוץ לפיתוחים טכנולוגיים לייצור מימן

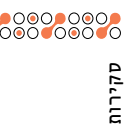
נוסף על ההזדמנויות הגאופוליטיות, פיתוח שוק המימן יוצר גם הזדמנויות טכנולוגיות חדשות, ומדינות משקיעות משאבים ניכרים במטרה למצב עצמן כמובילות בתחום ייצור המימן. לפי דו"ח IRENA שלעיל, כיום יפן שולטת במחקר תאי הדלק, עם 40% מהפטנטים בתחום, ואירופה מובילה במחקר על ייצור מימן, בעיקר אלקטרוליזרים וטכנולוגיות אחסון^[15]. עלות האלקטרוליזרים, שבאמצעותם מופק המימן ממים, וקצב הייצור שלהם – הם חסמים משמעותיים להאצת השימוש במימן ירוק. ואכן, בחודשים האחרונים גואים פרסומים על שיפור בטכנולוגיות האלקטרוליזה ועל טכנולוגיות חדשניות אחרות לייצור מימן הנמצאות בשלבים שונים של פיתוח. לדוגמה, במחקר באסטוניה נבחנת בניית הליבה של האלקטרוליזרים מחומרים ננו-קרמיים^[22]; חברת Graforce הגרמנית נמצאת בפיתוח מתקדם של טכנולוגיית אלקטרוליזה, שמייצרת מימן ממתאן ומשפכים^[8]. באוסטרליה פורסם שאוניברסיטת Wollongong משפרת את

ליצוא אנרגיה, וכן למנף את כוח העבודה המיומן בטיפול בדלקים ואת קשרי הסחר באנרגיה. חלק מהמדינות כבר זיהו את הפוטנציאל הטמון במדבריות שלהן, והן משקיעות הון עתק בפרויקטים שאפתניים לייצור מימן ירוק. לדוגמה, סקר שערכה חברת סימנס מצביע על כך שעשרות מיזמי ירוק המקודמים באזור המזרח התיכון ובאפריקה עשויים להפוך את האזור למוקדה (hotspot) לאנרגיה מקיימת, בתנאי שיגויסו השקעות הון גדולות, יאומצו מסגרות מדיניות ברורות, ויתקיים שיתוף פעולה בין הממשלות, התעשייה והגורמים הפיננסיים^[21]. יבואניות המימן, לצד ניסיון להפיק את המרב מיכולת הפקת המימן שלהן, חייבות להשקיע בשיתופי מימן בין-לאומיים עם יצרניות המימן.

הסדר הגאופוליטי החדש מעלה שאלות מרתקות. לדוגמה, יש הצופים שדווקא מדינות הנפט (שכאמור מבקשות להפוך ליצרניות מימן) יביאו את הבשורה להובלת המעבר הגלובלי לאנרגיה ממקורות מתחדשים, כאשר יחליטו לצמצם את יצוא הנפט והגז בהתאם לאינטרסים הכלכליים שלהן^[19].

טבלה 3. מדגם של אסטרטגיות במדינות הפועלות במרוץ למצב עצמן כיצואניות מימן

מדינה	עיקרי האסטרטגיה / המדיניות	סטטוס נוכחי
צ'ילה	פרסמה אסטרטגיית מימן (2020), עם דגש על מימן ירוק ועם יעד קיבולת אלקטרוליזרים של 5GW עד 2025 ו-25GW עד 2030; נקבע יעד לייצר את המימן הזול בעולם עד 2030 ולהיות בין שלוש יצואניות המימן הגדולות ביותר עד 2040; על פי הערכה, היקף יצוא המימן ונגזרותיו יעמוד ב-2030 על 30 מיליארד דולר	יבואנית אנרגיה (65%)
מרוקו	פרסמה מפת דרכים למימן (2021), שהציבה כיעד עד 2030 ייצור לשוק מימן מקומי של 4TWh וייצור ליצוא של 10TWh, כולם מאנרגיה ממקורות מתחדשים בקיבולת של 6GW	יבואנית אנרגיה (91%)
נמיביה	הוקמה מועצה לאומית ומונה נציב מיוחד למימן ירוק; קיימות תוכניות להקמת מפעלים ללהבי טורבינות רוח, פלדה ירוקה ואמוניה	יבואנית אנרגיה (74%)
אוסטרליה	ייצור מימן כחול (מוגדר מעל 90% לכידת פחמן) לצד מימן ירוק; נקבע יעד להיות בין שלוש היצואניות הגדולות לשווקים האסיאתיים עד 2030; הושקעו מעל מיליארד דולר לקידום תעשיית המימן המקומית; יש תשעה פרויקטים גדולים לייצור מימן ירוק הנמצאים בשלבים מתקדמים של תכנון והקמה; נחתמו עסקאות עם שוקי יצוא פוטנציאליים כמו גרמניה, יפן וסינגפור	יצואנית אנרגיה
איחוד האמירויות	מפת דרכים (2021) שלצד ההכרזה ב-COP26 על אימוץ יעד של אפס פליטות נטו, מגדירה כיעד לתפוס 25% מנתח השוק כיצואנית מימן כחול וירוק עד 2030; קיימים כבר יותר משבעה פרויקטים בהליך הקמה על-ידי חברות נפט, השקעות ממשלתיות ומשקיעים פרטיים; סוכמו שותפויות עם יפן, מלזיה ודרום קוריאה, מזכר הבנות עם הולנד (2022), קנדה (2021), אוסטרליה (2022) ובריטניה (2022)	יצואנית אנרגיה
קנדה	הציבה כיעד אסטרטגי הובלה גלובלית כיצואנית דלקים נקיים והפיכה לאחת משלוש היצרניות הגדולות בעולם של מימן נקי ב-2050; לא מגבילה עצמה לייצור מימן ירוק, אך מזכירה את הצורך בכך שאחוז גבוה מייצור החשמל מאנרגיה יהיה ממקורות מתחדשים, ושהדגש העיקרי הוא על אנרגיה הידרו-אלקטרית	יצואנית אנרגיה
ערב הסעודית	הכריזה כבר ביולי 2020 על פרויקט של 5 מיליארד דולר שיוקם בעיר העתידית Neom לייצור מימן ואמוניה ירוקים ושיתחיל לפעול ב-2025; חברת הנפט הלאומית, ארמקו, ביצעה כבר בספטמבר 2020 משלוח ראשון של אמוניה כחולה ליפן; לפי פרסומים מאפריל 2022, גיבוש האסטרטגיה נמצא בשלבים אחרונים. נקבע יעד השקעות בסך של 36 מיליארד דולר עד 2030. יעד זה עולה בקנה אחד עם ההצהרה על כוונה להפוך ליצואנית המימן הגדולה בעולם	יצואנית אנרגיה





אוטובוס מונע מימן – תערוכת אקספו, דובאי, מרץ 2022. לשימוש בתאי דלק מימן בתחבורה יש יתרון על פני שימוש בסוללות, בעיקר בכלי רכב שדורשים סוללות גדולות מאוד, כגון משאיות ואוטובוסים. זמן התדלוק של כלי רכב מונעי מימן קצר (כמו רכבי בנדזין), וטווח הנסיעה לתדלוק בודד ארוך יחסית | צילום: נדיה צימרמן

לאחרונה גם דיווחה החברה על השקעה של מערכת EVOX לטעינת כלי רכב חשמליים ללא תלות בחיבור לרשת החשמל באמצעות טכנולוגיה של ג'נסל, המבוססת על תאי הדלק [2]. מחקר ישראלי אחר, באוניברסיטת תל אביב, גילה מוטנט של אצה מיקרוסקופית שמאפשר לייצר מימן ירוק כתוצר לוואי של תהליך הפוטוסינתזה בסדרי גודל המתאימים לייצור תעשייתי [9].

אלא שישראל נמצאת מאחור בהשוואה למדינות רבות וטרם גיבשה את "החוליה החסרה" לפריצה, תוכנית לאומית ארוכת-טווח לפיתוח שוק המימן. מוסד שמואל נאמן פרסם בתחילת שנת 2021 מסמך המלצות על הצעדים שראוי לנקוט כדי להשתלב בשוק המימן העולמי, ובהם גם פיתוח אסדרה ייעודית למימן, בחינת מקומה של ישראל בסחר הבין-לאומי במימן ופיתוח החדשנות הטכנולוגית [3].

למרות זאת, מפת הדרכים למשק אנרגיה דל-פחמן עד שנת 2050 של משרד האנרגיה, ששימשה בסיס להחלטת ממשלה מספר 171 על מעבר לכלכלה דלת-פחמן, מסתפקת באמירה כי יעדים ביחס לטכנולוגיות מימן יעודכנו בעתיד, כיוון ש"טכנולוגיות מימן נקי עדיין בשלבי פיתוח וניסוי ראשוניים בעולם" [1]. בהקשר זה טבעי לתהות כיצד מפת דרכים הצופה פני עתיד כוללת רק טכנולוגיות מוכרות ומסחריות, בעוד שאל טכנולוגיות עתידיות מרכזיות, שאמורות להיות נדבך מרכזי במעבר לאנרגיה ממקורות מתחדשים – אין התייחסות כלל. עם זאת, למיטב ידיעתנו, משרד האנרגיה והמשרד להגנת הסביבה מכינים בימים אלה של תוכנית אסטרטגית לפיתוח כלכלת המימן, שתוצריה טרם פורסמו לציבור.

סיכום

המעבר לכלכלת מימן הגיע, ככל הנראה, לנקודת אל-חזור, לאור היקף ההשקעות העצום של מדינות רבות בפיתוח טכנולוגיות מימן, ההיקף הגדל של חתימה על שיתופי פעולה בין המדינות והיקף הפרויקטים

היעילות האנרגטית של תא האלקטרוליזה ל-98%, הודות לשימוש בהולכה קפילרית (capillary-fed electrolysis cell) שמאפשרת פעילות של האלקטרודות ללא יצירת בועות. הצלחת הפרויקט עשויה להוזיל את מחיר המימן הירוק ביותר מ-50%, עד למחיר של פחות מ-1.5 דולר לק"ג [12].

החברה הקליפורנית NewHydrogen עדכנה ביולי 2022 על התקדמות במחקר שהצליח לשפר משמעותית את טכנולוגיית האלקטרוליזרים מסוג PEM (Proton Exchange Membrane) באמצעות זרז חדש, שלא מבוסס על מתכת יקרה [14]. באוסטרליה החל בשנת 2022 פרויקט ענק שיפיק מימן מהלחות שבאוויר, ובכך יוביל להוזלה משמעותית במחיר המימן הירוק, שעלות המים היא מרכיב ניכר במחירו [6]. בדרום קוריאה מתוכנן ייצור מימן מאנרגיה גרעינית [11], והכרזות אחרות משרות על ייצור מימן מפסולת. למשל, Boson Energy, חברת טכנולוגיה מלוקסמבורג, הודיעה שבקרוב תוכל לייצר מימן מפסולת שלא ניתנת למחזור, עם פליטות אנרגיה שליליות, באפס עלות או פחות (כשתזרים ההכנסות יכסה את הוצאות ייצור המימן) [7].

במאי 2022 הודיעה אוניברסיטת צפון קרוליינה (NCSU) על שימוש בפוטוקטליסט (זרז המשופעל על-ידי אור), שניתן לשימוש חוזר, ומשפר משמעותית את הליך הפקת המימן מנחלים. הטכנולוגיה מוזילה את הייצור, מכיוון שהיא מקטינה את היקף השימוש ברודים – אחת מהמתכות היקרות והנדירות מקבוצת הפלטינה. לפי הדיווח, בניסויים שבוצעו שוחררו תוך שלוש שעות ובעזרת השמש בלבד 99% ממולקולות המימן שבנוזל [20].

כל הטכנולוגיות הללו הן "טעימה על קצה המזלג" של פריצות דרך שמתפרסמות חדשות לבקרים. התחזיות צופות גידול מהיר בייצור ובמכירות של אלקטרוליזרים, והצפי הוא שיותר מ-60% מהביקוש יגיע מסין, מצד מפעלים ממשלתיים שצריכים לעמוד ביעדים הלאומיים להפחתת הפליטות. העלייה בהיצע צפויה להוביל לירידה מהירה במחירי אלקטרוליזרים, כך שעל פי תחזית שפרסמה BloombergNEF לשנת 2022, עד 2030 מימן ירוק מאנרגיה ממקורות מתחדשים יהיה זול ממימן כחול שמיצור מגז מחצבים [5].

הזווית הישראלית

האם ישראל יכולה להציב את עצמה לצד המדינות המובילות בקידום טכנולוגיות מימן? השוק הפרטי בישראל כבר החל לזהות את הפוטנציאל. חברת ג'נסל הישראלית, לדוגמה, הצליחה לפתח זרז לתאי דלק שאינו משתמש במתכות אצילות כמו פלטינה, מה שמוזיל את עלויות ייצור המימן. לאחרונה הודיעה החברה על פריצת דרך בפרויקט משותף עם TDK היפנית, שאמורה להוזיל גם את שינוע המימן, ולעיתים אף לייצר אותו, באמצעות טכנולוגיה נקיה מפליטות לייצור אמוניה ישירות ממים, בלחץ ובטמפרטורה נמוכים מאוד ביחס לתהליכי ייצור אמוניה הידועים כיום [16].



המלצות לקריאה נוספת

דו"ח הסוקר בהרחבה את שימושי המימן הקיימים ואת הפוטנציאל הגלום בפיתוח כלכלת המימן בישראל.

גרוסמן ג ושפירא נ. 2021. שילוב מימן במשק האנרגיה – סיכום והמלצות דיון פורום אנרגיה 49. חיפה: מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית.

מאמר הדן בעתיד כלכלת המימן ובשימושים הצפויים במימן ירוק בטווח הקצר והארוך.

Oliveira AM, Beswick RR, and Yan Y. 2021. A green hydrogen economy for a renewable energy society. *Current Opinion in Chemical Engineering* 33: 100701.

שמתקדמים לשלבי ביצוע. נראה כי מלבד יתרונו המשמעותי של שוק המימן בהפחתת פליטות גזי חממה, הפיתוח שלו טומן בחובו גם מגוון הזדמנויות גאופוליטיות וטכנולוגיות. מסתמן שגם האוניברסיטאות והשוק הפרטי בישראל מתחילים לזהות את הפוטנציאל הטמון בפיתוחים טכנולוגיים בשוק המימן, אך עם זאת, טרם התגבשה בישראל תוכנית לאומית ארוכת-טווח לפיתוח שוק המימן. כל הסימנים מצביעים על כך שהגיעה העת להאיץ את התהליך, בטרם ישראל תחמיץ את ההזדמנויות הקיימות בשוק זה.

מקורות

ראו באתר כתב העת.

הלכה למעשה

כפי שצוין במאמר, הקהילה האירופית מתמודדת כיום עם בעיה חמורה של אספקת אנרגיה בשל המלחמה בין רוסיה לאוקראינה והתלות הגדולה בגז הרוסי. רשת הולכת הגז האירופית עוברת התאמה לשינוע מימן בתוך היבשת וכן ממדינות אפריקה, שבהשקעה אירופית ייצרו מימן ירוק. אירופה משקיעה כספי ענק בהקמת 'עמקי מימן' שמתקיימים בהם ייצור מימן, שינועו, אחסונו ושימוש בו. עמק המימן הראשון הוקם בצפון הולנד. מדינות אירופה, והולנד ביניהן, רותמות רוח וגלים כמקור מתחדש לאנרגיה, ו"כובשות" את הים כפלטפורמה לייצור מימן ירוק בקרבת החוף בעזרת טכנולוגיית האלקטרוליזה המתקדמת. תעשיית התפלת המים הישראלית, שלה ניסיון רב בפיתוח בטכנולוגיה זו, יכולה לתרום רבות בתחום. זוהי רק דוגמה אחת לעניין שמגלה המשק ההולנדי בחברות ישראליות בשל חדשנותן הטכנולוגית, והוא משמש יעד עבור חברות ישראליות המבקשות להרחיב את פעילותן באירופה. למשל, טכנולוגיות ישראליות של איתור דליפות גז יכולות לתרום לאחסון בטוח של מימן ירוק, שחלק ממנו נעשה בממגורות מלח ובשדות הגז

המתרוקנים בצפון אירופה. שגרירות הולנד בישראל פועלת באופן עקבי ונמרץ לפיתוח שיתופי פעולה בין המדינות. הולנד חתמה לאחרונה על הסכם עם חברת נתיבי הגז הטבעי לישראל לפיתוח תשתיות הולכת המימן של ישראל. השגרירות מקיימת פעילויות להעברת ידע הולנדי לישראל, למשל באמצעות קורסים ומיני סימפוזיונים מקוונים בהשתתפות מאות ישראלים. בקיץ שעבר ארגנו בית ספר קיץ לתכנון עמקי מימן, ובמאי השנה הובלנו משלחת ישראלית לסיור בהולנד – בנמלים העיקריים (שצפוי להם תפקיד מרכזי בהובלה של מימן ירוק מיצואניות מימן לאירופה), בחברות Shell ו-Gasunie וכן בתחנת תדלוק מימנית. העוסקים בנושא או אלה המעוניינים ללמוד את התחום, מוזמנים לפנות אלינו, למרכז החדשנות ישראל-הולנד (www.idic.org.il).

ד"ר רחלי קרייסברג,

נספחת לחדשנות בשגרירות הולנד בישראל. פועלת מטעם משרד הכלכלה ומדיניות האקלים ההולנדי לפיתוח שיתוף פעולה בין הולנד לישראל