



אנרגיה וסביבה

שילוב מימן במשק האנרגיה סיכום והמלצות דיון פורום אנרגיה 49

פרופ' גרשון גרוסמן
נעמה שפירא



תכנון
ארוך טווח

תעשייה
וחדשנות

תשתיות
פיזיות

בריאות

הון
אנושי

השכלה
גבוהה

חברה

חינוך

כלכלה

מדע
וטכנולוגיה

אפריל
2021

אודות מוסד שמואל נאמן

מוסד שמואל נאמן הוקם בטכניון בשנת 1978 ביוזמת מר שמואל (ס) נאמן והוא פועל להטמעת חזונו לקידומה המדעי-טכנולוגי, כלכלי וחברתי של מדינת ישראל.

מוסד שמואל נאמן הוא מכון מחקר המתמקד בהתווית מדיניות לאומית בנושאי מדע וטכנולוגיה, תעשייה, חינוך והשכלה גבוהה, תשתיות פיסיות, סביבה ואנרגיה ובנושאים נוספים בעלי חשיבות לחוסנה הלאומי של ישראל בהם המוסד תורם תרומה ייחודית. במוסד מבוצעים מחקרי מדיניות וסקירות, שמסקנותיהם והמלצותיהם משמשים את מקבלי ההחלטות במשק על רבדיו השונים. מחקרי המדיניות נעשים בידי צוותים נבחרים מהאקדמיה, מהטכניון ומוסדות אחרים ומהתעשייה. לצוותים נבחרים האנשים המתאימים, בעלי כישורים והישגים מוכרים במקצועם. במקרים רבים העבודה נעשית תוך שיתוף פעולה עם משרדים ממשלתיים ובמקרים אחרים היוזמה באה ממוסד שמואל נאמן וללא שיתוף ישיר של משרד ממשלתי. בנושאי התוויית מדיניות לאומית שעניינה מדע, טכנולוגיה והשכלה גבוהה נחשב מוסד שמואל נאמן כמוסד למחקרי מדיניות המוביל בישראל.

עד כה ביצע מוסד שמואל נאמן מאות מחקרי מדיניות וסקירות המשמשים מקבלי החלטות ואנשי מקצוע בממשל. סקירת הפרויקטים השונים שבוצעו במוסד מוצגת באתר האינטרנט של המוסד. בנוסף מסייע מוסד שמואל נאמן בפרויקטים לאומיים דוגמת המאגדים של משרד התמ"ס - מגנ"ט בתחומים: ננוטכנולוגיות, תקשורת, אופטיקה, רפואה, כימיה, אנרגיה, איכות סביבה ופרויקטים אחרים בעלי חשיבות חברתית לאומית. מוסד שמואל נאמן מארגן גם ימי עיון מקיפים בתחומי העניין אותם הוא מוביל.

יו"ר מוסד שמואל נאמן הוא פרופ' זאב תדמור וכמנכ"ל מכהן פרופ' עירד יבנה.



כתובת המוסד: מוסד שמואל נאמן, קרית הטכניון, חיפה 32000

טלפון: 04-8292329, פקס: 04-8231889

כתובת דוא"ל: info@neaman.org.il

כתובת אתר האינטרנט: www.neaman.org.il

מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית



שילוב מימן במשק האנרגיה

סיכום והמלצות דיון
פורום האנרגיה של מוסד שמואל נאמן
מיום 12/01/2021

נערך על ידי:
פרופ' גרשון גרוסמן
נעמה שפירא

אפריל, 2021

אין לשכפל כל חלק מפרסום זה ללא רשות מראש ובכתב ממוסד שמואל נאמן, מלבד לצורך ציטוט של קטעים קצרים במאמרי סקירה ופרסומים דומים תוך ציון מפורש של המקור.

הדעות והמסקנות המובאות בפרסום זה הן על דעת המחבר/ים ואינן משקפות בהכרח את דעת מוסד שמואל נאמן.

רשימת משתתפי הפורום

פרופ' אילון אופירה – ראש צוות אנרגיה וסביבה, מוסד שמואל נאמן
פרופ' אלבז ליאור – המחלקה לכימיה, הפקולטה למדעים מדויקים, אוניברסיטת בר אילן
מר ברם עמיחי – סמנכ"ל תפעול והנדסה, חברת סונול
מר גולד אלון – יועץ כלכלה וסחר של שגרירות פינלנד בישראל
פרופ' גרדר גדעון – הפקולטה להנדסה כימית, הטכניון
פרופ' גרוסמן גרשון – ראש פורום אנרגיה, מוסד שמואל נאמן
גב' דווידסון סוניה – מנכ"לית ומייסדת, H₂ Energy Now
ד"ר דולב שחר – יחידת המדען הראשי, משרד האנרגיה
גב' ויסמן מורן – סמנכ"לית פיתוח עסקי, חברת סונול
ד"ר ולד שלמה – המדען הראשי לשעבר, משרד התשתיות, האנרגיה והמים
מר זיו אסא – מייסד ומנכ"ל NrgStorEdge
מר יהושע נחום – מנהל תחום כלכלה, מינהל הדלק והגז, משרד האנרגיה
גב' ישי-זמיר רותם – אגף תחבורה, המשרד להגנת הסביבה
מר ליבס עידן – צוות אנרגיה וסביבה, מוסד שמואל נאמן
ד"ר פורטונה גלעד – עמית מחקר בכיר, מוסד שמואל נאמן
ד"ר פרידמן גדעון – מ"מ המדען הראשי וראש אגף מחקר ופיתוח, משרד האנרגיה
עו"ד פרנס איתן – מנכ"ל איגוד חברות אנרגיה ירוקה לישראל
מר צוקר דניאל – ראש תחום שוק מקומי, התוכנית הלאומית לתחליפי דלקים ותחבורה חכמה, משרד רוח"מ
מר קליינר אלכסנדר – מנהל תחום פרויקטים, יחידת המדען הראשי, משרד האנרגיה
ד"ר קרייסברג רחלי – נספחית לחדשנות ומנהלת מרכז ישראל-הולנד לחדשנות, שגרירות הולנד בישראל
פרופ' רוטשילד אבנר – הפקולטה למדע והנדסה של חומרים, הטכניון
מר רז דין – איגוד חברות אנרגיה ירוקה לישראל
מר רשף רמי – מנכ"ל חברת ג'נסל
מר שביט יוסי – ראש יחידת הסייבר בתעשייה, המשרד להגנת הסביבה
מר שלגי אסי – OSEG ltd
גב' שפירא נעמה – צוות אנרגיה וסביבה, מוסד שמואל נאמן

הבעת תודה

המחברים מודים למרצים על המידע שהציגו ולכלל משתתפי הפורום על תרומתם לדין הפתוח.

תוכן העניינים

3.....	רשימת משתתפי הפורום.....
4.....	תוכן העניינים.....
5.....	תקציר מנהלים.....
7.....	1. הקדמה.....
8.....	2. רקע.....
9.....	3. מידע בנושא: שילוב מימן במשק האנרגיה.....
17.....	4. דיון.....
26.....	5. סיכום והמלצות.....
27.....	נספח 1: תוכנית פורום האנרגיה.....

מימן הינו היסוד הנפוץ בטבע, אך כמעט שאינו קיים בטבע בצורתו הטהורה. ניתן להפיק מימן ממים בתהליך אלקטרוליזה באמצעות חשמל. בנוסף, ניתן להפיק מימן גם מחומרים אורגניים כגון גז טבעי ופחם באמצעות מספר שיטות של פרום (Reforming) וגזפיקציה. נהוג לסווג את המימן למספר סוגים בהתאם לחומרי הגלם ותוצרי תהליך הייצור – מימן חום ומימן אפור מיוצרים מדלקים פוסיליים וכרוכים בפליטות גזי חממה, לשם ייצור מימן כחול מוסיפים תהליך לתפיסת גזי החממה ואילו המימן הירוק מיוצר מלכתחילה ללא פליטות באמצעות חשמל מאנרגיות מתחדשות

מימן הוא תכליתי. הטכנולוגיות הקיימות כבר היום מאפשרות להשתמש במימן כדי לייצר, לאגור, ולהשתמש באנרגיה בדרכים שונות. שינוע המימן יכול להעשות כגז בצינורות, בצורה נוזלית באמצעות ספינות, או באמצעות פתרונות כימיים (למשל, אמוניה או DME). ניתן לצרוך את המימן כאמצעי לייצור חשמל או כדלק למכוניות, משאיות, ספינות ומטוסים.

השימוש במימן יכול לסייע בהתמודדות עם אתגרי אנרגיה קריטיים שונים. הוא מציע דרכים להפחתת פליטות פחמן ממגוון תחומים - כולל הובלה ארוכת טווח, כימיקלים, וייצור ברזל ופלדה - בהם קשה להמעיט בפליטות משמעותיות. השימוש במימן יכול לסייע בשיפור איכות האוויר, שיפור הגישה לאנרגיה במקומות מבודדים ומרוחקים, שיפור אמינות רשת החשמל וחיזוק ביטחון האנרגיה.

מימן מאפשר למעשה אגירת אנרגיה והוא מסתמן כאחת האפשרויות המבטיחות לאגירת אנרגיה מתחדשת לטווח ארוך של ימים, שבועות ואפילו חודשים. לפיכך, מימן מאפשר חדירה נרחבת של אנרגיות מתחדשות, בעיקר אנרגיה סולרית ואנרגיית רוח, שהזמינות שלהן לא תמיד תואמת את הביקוש.

עם זאת, הפקת מימן הינו תהליך הדורש השקעת אנרגיה ולעיתים יעילות התהליך אינה מספקת; זאת לצד סוגיות של בטיחות שיש לתת עליהן את הדעת. מימן גם דורש אנרגיה רבה יותר לאחסון ושינוע ביחס לדלקים פוסיליים. נכון להיום, עלויות הפקה של מימן ירוק, אליו יש לשאוף, הינן גבוהות מהפקת מימן באמצעות דלקים פוסיליים ונדרשת השקעה ראשונית גבוהה בתשתיות. לאור התחזיות שכ-18-20% ממשק האנרגיה העולמי בשנת 2050 יהיה מבוסס על מימן, מושקעים כבר היום סכומים אדירים בכלכלת המימן בכל העולם.

השימוש המרכזי של מימן בעולם כיום הינו כחומר גלם בתעשייה לייצור דשנים וכימיקלים – 55% מהמימן משמש בייצור אמוניה, 25% בזיקוק נפט ו-10% בייצור מתנול. עם זאת, מימן כנשא אנרגיה הינו אלמנט חשוב בסל הפתרונות המוצעים לצורך השגת היעד של הגבלת ההתחממות הגלובלית. ואכן, בשנתיים האחרונות מדינות שונות ברחבי העולם מפרסמות אסטרטגיות לשילוב מימן במשק האנרגיה שלהן לצרכי תחבורה, דה-קרבוניזציה של תעשייה, מיזוג מבנים, ותמיכה בהחדרה של אנרגיות מתחדשות, וכן מיישמות תוכניות לתמיכה בשילוב מימן באמצעות קביעת יעדים, תמריצים או שילוב ביניהם.

זהו הזמן הנכון לנצל את הפוטנציאל של מימן למלא תפקיד מפתח בעתיד אנרגיה נקי, בטוח ובמחיר סביר. הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה (IEA) הפיקה דו"ח ציון-דרך כדי לנתח את מצבה הנוכחי של טכנולוגיית המימן ולהציע הנחיות לפיתוחה העתידי. הדו"ח מגלה כי מימן נקי נהנה כרגע ממומנטום פוליטי ועסקי חסר תקדים,

כאשר מספר התוכניות והפרויקטים ברחבי העולם מתרחב במהירות. מסקנת הדו"ח היא שזה הזמן להגדיל את היצע הטכנולוגיות ולהוזיל את העלויות כדי לאפשר שימוש נרחב במימן. ההמלצות הפרגמטיות הניתנות לממשלות ולתעשייה יאפשרו לנצל את המומנטום הגובר הזה במלואו.

כדי שמדינת ישראל תוכל להשתלב במאמץ העולמי להגבלת ההתחממות הגלובלית ולהנות תוך כדי כך גם מתועלות כלכליות וסביבתיות, המליצו משתתפי הפורום על מספר צעדים שראוי לנקוט.

המלצות:

1. **מפת דרכים לשילוב מימן במשק הישראלי** – יש לבחון את הנושא בצורה ביקורתית בהתאם לתנאים הייחודיים של ישראל. בחינת הנושא צריכה לכלול התייחסות למגוון נושאים ובהם: חומרי הגלם לייצור, טכנולוגיות הפקה (הבשלות, היעילות והכלכליות שלהן), פתרונות שינוע ואחסון, יישומים רלוונטיים לישראל והחלק הראוי למימן בתמהיל הדלקים העתידי, תוך השוואת המימן לפתרונות חלופיים. בהתאם לממצאי הבדיקה ניתן יהיה לגבש אסטרטגיה לשילוב מיטבי של מימן במשק האנרגיה הישראלי.
2. **פיתוח רגולציה יעודית למימן** – העדרה של רגולציה יעודית והתייחסות למימן דרך הפריזמה של חומר מסוכן בלבד, מהווים צוואר בקבוק לפיתוח ויישום טכנולוגיות מימן בישראל. נדרשת רגולציה מתאימה לכל השלבים: ייצור, שינוע, אחסון ושימוש, הן בתחום התחבורה (גם לתחנות התדלוק וגם לרכבים), והן בתחום אגירת האנרגיה.
3. **מקומה של ישראל בסחר הבין-לאומי במימן** – מומלץ לבדוק את האפשרות של ישראל לעסוק בהובלת מימן באזורנו (דרך נמלי הים), ובמיוחד, לבדוק שיתוף פעולה אפשרי של ישראל כמדינת MENA עם מדינות באירופה או במזרח התיכון, בפרויקטים של ייצור אנרגיה ירוקה.
4. **פיתוח החדשנות הישראלית בתחום המימן** – פיתוח המו"פ בתחום המימן יכול לסייע ביישום הנושא בשוק הישראלי לצד פוטנציאל לתועלות כלכליות משמעותיות. רשות החדשנות, בהיותה גורם מרכזי במו"פ, ומשרד האנרגיה, צריכים להוות שחקני מפתח בתהליך. ניתן לקדם את התחום באמצעות פעולות שונות שיכולות להיות מיושמות במקביל:
 - תמיכה במחקר אקדמי בתחום, עם דגש על קונסורציומים אקדמיים עם מטרות רלוונטיות לתעשייה, בדומה לאלו הקיימים באיחוד האירופי, בארה"ב ובמזרח.
 - משיכת חברות זרות בתחום המימן להקמת מרכזי מו"פ בישראל, לפיתוח טכנולוגי משותף.
 - לאפשר הפעלת פרויקטים ניסיוניים של חברות סטארט-אפ ישראליות עם חברות גלובליות.
 - פיתוח שיתופי פעולה דו-ורב-צדדיים (למשל, באמצעות מימון מהאיחוד האירופי).
 - עידוד סטארט-אפים ישראלים להשתתפות במאצים ובתחרויות בין-לאומיים בתחום המימן.
 - הפצת מידע עדכני בנושא, כולל מיפוי תעשיית המימן הישראלית וסימון כיווני פיתוח אפשריים.

מוסד שמואל נאמן למחקר מדיניות לאומית, במסגרת פעילותו בתחום האנרגיה, מקיים מפגשי "פורום אנרגיה" המוקדשים לדיון בנושאים בעלי חשיבות לאומית בתחום. בפורום האנרגיה מתקיים דיון ממוקד בנושאים מוגדרים, בהשתתפות צוות מומחים המוזמנים לפי הנושא. המטרה היא להתרכז בשאלות רלוונטיות ומוגדרות, לתאם בין הגורמים ולהגיע להמלצות על דרכי פעולה לקידום הנושא, שניתן להציגן בפני מקבלי החלטות.

המפגש הדין בנושא: "שילוב מימן במשק האנרגיה", התקיים ב-12 לינואר 2021 באופן מקוון. השתתפו בו מומחים בתחום מהיבטיו השונים, וכן נציגים של הממסד הציבורי. המשתתפים בפורום, שנבחרו בקפידה הודות למומחיותם, מהווים, ללא ספק, קבוצה ייחודית ובעלת ידע מקצועי ראשון במעלה בתחום.

בחלקו הראשון של המפגש הציגו חלק מהמשתתפים מצגות בנושא הדיון על היבטיו השונים. מצגות המשתתפים אשר אושרו על ידם לפרסום נמצאות באתר מוסד שמואל נאמן: <http://neaman.org.il/Energy-Forum-Meetings>. בחלק השני התקיים דיון פתוח על המידע שהוצג ועל המסקנות האופרטיביות שיש להפיק ממנו. בפני משתתפי הדיון עמדו מספר שאלות, שהוכנו מראש, כמפורט בתוכנית הפורום (נספח 1). תמצית הדיונים מסוכמת בדו"ח להלן, וכמו בדיונים הקודמים, הוא יוגש למקבלי ההחלטות במטרה להביא אל סדר היום את מכלול השיקולים והפעולות הנדרשות על מנת לבחון את האפשרויות השונות לשילוב מימן במשק האנרגיה הישראלי.

מימן הינו היסוד הנפוץ בטבע, אך כמעט שאינו קיים בטבע בצורתו הטהורה. ניתן להפיק מימן ממים בתהליך אלקטרוליזה באמצעות חשמל. בנוסף, ניתן להפיק מימן גם מחומרים אורגניים כגון גז טבעי ופחם באמצעות מספר שיטות של פרום (Reforming) וגזיפיקציה. נהוג לסווג את המימן למספר סוגים בהתאם לחומרי הגלם ותוצרי תהליך הייצור – מימן חום ומימן אפור מיוצרים מדלקים פוסיליים וכרוכים בפליטות גזי חממה, לשם ייצור מימן כחול מוסיפים תהליך לתפיסת גזי החממה ואילו המימן הירוק מיוצר מלכתחילה ללא פליטות באמצעות חשמל מאנרגיות מתחדשות (ראה פירוט בפרק 3).

מימן הוא תכליתי. הטכנולוגיות הקיימות כבר היום מאפשרות להשתמש במימן כדי לייצר, לאגור, ולהשתמש באנרגיה בדרכים שונות. שינוע המימן יכול להעשות כגז בצינורות, בצורה נזלית באמצעות ספינות, או באמצעות פתרונות כימיים (למשל, אמוניה או DME). ניתן לצרוך את המימן כאמצעי לייצור חשמל או כדלק למכוניות, משאיות, ספינות ומטוסים.

השימוש במימן יכול לסייע בהתמודדות עם אתגרי אנרגיה קריטיים שונים. הוא מציע דרכים להפחתת פליטות פחמן ממגוון תחומים - כולל הובלה ארוכת טווח, כימיקלים, וייצור ברזל ופלדה - בהם קשה להמעיט בפליטות משמעותיות. השימוש במימן יכול לסייע בשיפור איכות האוויר, שיפור הגישה לאנרגיה במקומות מבודדים ומרוחקים, שיפור אמינות רשת החשמל וחיזוק ביטחון האנרגיה.

מימן מאפשר למעשה אגירת אנרגיה והוא מסתמן כאחת האפשרויות המבטיחות לאגירת אנרגיה מתחדשת לטווח ארוך של ימים, שבועות ואפילו חודשים. לפיכך, מימן מאפשר חדירה נרחבת של אנרגיות מתחדשות, בעיקר אנרגיה סולרית ואנרגיית רוח, שהזמינות שלהן לא תמיד תואמת את הביקוש.

עם זאת, הפקת מימן הינו תהליך הדורש השקעת אנרגיה ולעיתים יעילות התהליך אינה מספקת; זאת לצד סוגיות של בטיחות שיש לתת עליהן את הדעת. מימן גם דורש אנרגיה רבה יותר לאחסון ושינוע ביחס לדלקים פוסיליים. נכון להיום, עלויות הפקה של מימן ירוק, אליו יש לשאוף, הינן גבוהות מהפקת מימן באמצעות דלקים פוסיליים ונדרשת השקעה ראשונית גבוהה בתשתיות. לאור התחזיות שכ-20%-18 ממשק האנרגיה העולמי בשנת 2050 יהיה מבוסס על מימן, מושקעים כבר היום סכומים אדירים בכלכלת המימן בכל העולם.

השימוש המרכזי של מימן בעולם כיום הינו כחומר גלם בתעשייה לייצור דשנים וכימיקלים – 55% מהמימן משמש בייצור אמוניה, 25% בזיקוק נפט ו-10% בייצור מתנול. עם זאת, מימן כנשא אנרגיה הינו אלמנט חשוב בסל הפתרונות המוצעים לצורך השגת היעד של הגבלת ההתחממות הגלובלית. ואכן, בשנתיים האחרונות מדינות שונות ברחבי העולם מפרסמות אסטרטגיות לשילוב מימן במשק האנרגיה שלהן לצרכי תחבורה, דה-קרבוניזציה של תעשייה, מיזוג מבנים, ותמיכה בהחדרה של אנרגיות מתחדשות, וכן מיישמות תוכניות לתמיכה בשילוב מימן באמצעות קביעת יעדים, תמריצים או שילוב ביניהם.

3. מידע בנושא: שילוב מימן במשק האנרגיה

בחלק זה של הדו"ח ניתנת תמצית המידע שהוצג על ידי חלק מן המשתתפים, כל אחד לפי בחירתו ומומחיותו. קבצי המצגות שהוכנו על ידי הדוברים מוצגים, כאמור, באתר מוסד שמואל נאמן (<http://neaman.org.il/Energy-Forum-Meetings>). מטבע הדברים, קיימת חפיפה מסוימת בין הדוברים השונים, אולם עורכי הדו"ח החליטו להביאם כאן כפי שהוצגו ובאותו הסדר (ראה תוכנית הפורום בנספח 1). מידע זה חשוב ומהווה בחלקו בסיס לדיון הפתוח שהתקיים לאחר מכן, כפי שמובא בפרק 4.

נעמה שפירא ועידן ליבס – צוות אנרגיה וסביבה, מוסד שמואל נאמן

שילוב מימן במשק האנרגיה הישראלי – סקירת רקע

מימן הינו היסוד הנפוץ בטבע, אך כמעט שלא קיים בצורתו הטהורה. הפקת מימן דורשת השקעת אנרגיה ולכן המימן נחשב כמקור אנרגיה שניוני. ניתן להפיק מימן מחומרים אורגניים כמו גז טבעי, פחם ונפט באמצעות מספר שיטות של פרום (Steam Methane Reforming (SMR), Partial Oxidation (POX), AutoThermal Reforming (ATR) או גזיפיקציה. ניתן גם להפיק מימן ממים באמצעות אלקטרוליזה בתהליכים שונים (Alkaline Electrolyzers (AWE), Polymer Electrolyte Membrane (PEM), Solid Oxide Electrolyser (SOEC)).

מימן נחשב דלק נקי אך הפקתו עשויה להיות מלווה בפליטות של גזי חממה. נהוג לסווג את המימן למספר סוגים בהתאם לחומרי הגלם ותוצרי תהליך הייצור:

- **מימן חום** – הפקה מפחם הכרוכה בפליטות גבוהות של פחמן דו-חמצני
- **מימן אפור** – הפקה ממתאן (המרכיב העיקרי בגז הטבעי) הכרוכה בפליטות נמוכות יותר של פחמן דו-חמצני, וכן מימן שהוא תוצר לוואי של תהליכים תעשייתיים
- **מימן כחול** – מימן שהופק מדלקים פוסיליים, אך שלתהליך ההפקה נוסף גם תהליך של תפיסת הפחמן והטמנתו/אחסונו (Carbon Capture and Storage (CCS)) המונע מגזי החממה להפלט לאטמוספירה
- **מימן ירוק** – מימן שהופק ממים (תוצר הלוואי של התהליך הינו חמצן ולא פחמן דו-חמצני), אך רק כאשר ההפקה נעשית באמצעות חשמל מאנרגיה מתחדשת (למשל, סולרי או רוח)

כיום, כ-75% מייצור המימן הייעודי בעולם (70 מיליון טונות) הינו מגז טבעי, 23% מפחם, ופחות מ-0.1% מיוצר באמצעות אלקטרוליזה; עם זאת מרבית הפרויקטים החדשים שמוקמים בשנתיים האחרונות מתבססים על טכנולוגיה זו. עלות ההפקה של מימן באמצעות אנרגיות מתחדשות היתה ב-2018 גבוהה מהפקה מדלקים פוסיליים (3-8 דולר לעומת 1-3 דולר לק"ג מימן, בהתאמה)¹ אך התחזיות הן שעד 2050 מחירי המימן הירוק בחלקים נרחבים של העולם ירדו אל מתחת ל-2 דולר לק"ג².

¹ IEA (2019). *The Future of Hydrogen*, IEA, Paris.

² BNEF (2020). *Hydrogen Economy Outlook*.

השימוש המרכזי של מימן בעולם כיום הינו כחומר גלם בתעשייה לייצור דשנים וכימיקלים – 55% מהמימן משמש בייצור אמוניה, 25% בזיקוק נפט ו-10% בייצור מתנול³. השימוש במימן כנשא אנרגיה הינו לצרכי תחבורה בלבד ומהווה 0.002% מהשימוש העולמי במימן. נכון לשנת 2020 יש בעולם כ-20 אלף רכבים המונעים במימן – רכבים פרטיים, אוטובוסים ומשאיות, ולאחרונה גם רכבות⁴.

עם זאת, מימן הינו אלמנט חשוב בסל הפתרונות המוצעים לצורך השגת היעד של הגבלת ההתחממות הגלובלית לעלייה של 1.5 מעלות בלבד⁵. ואכן, בשנתיים האחרונות מדינות שונות ברחבי העולם מפרסמות אסטרטגיות לשילוב מימן במשק האנרגיה שלהן לצרכי תחבורה, דה-קרבניזציה של תעשייה, מיזוג מבנים, ותמיכה בהחדרה של אנרגיות מתחדשות, וכן מיישמות תוכניות לתמיכה בשילוב מימן באמצעות קביעת יעדים, תמריצים או שילוב ביניהם⁶.

התועלות משילוב מימן במשק האנרגיה: הפחתת פליטות **גזי חממה** (מימן כחול או ירוק); מאפשר **אגירת אנרגיה**; מאפשר חדירה נרחבת של **אנרגיות מתחדשות**; **שיפור הגישה** לאנרגיה גם במקומות מבודדים ומרוחקים; שיפור **אמינות** רשת החשמל; הגברת **הביטחון האנרגטי**; שימוש במגזרים שבהם יש **קושי לדה-קרבניזציה** (למשל, תחבורה כבדה, אוניות ומטוסים).

החסרונות או החסמים לשילוב מימן הינם: הפקת מימן הינו תהליך הדורש **השקעת אנרגיה**; דרושה **אנרגיה רבה יותר לאחסון ושינוע** של מימן ביחס לאחסון ושינוע של דלקים פוסיליים; הפקת מימן מדלקים פוסיליים כרוכה ב**פליטות גזי חממה**; הפקת מימן באמצעות אלקטרוליזה עשויה לגרום לפליטות גזי חממה, כתלות באופן ייצור החשמל; סוגיות של **בטיחות וביטחון**; **עלויות הפקה גבוהות** של מימן ירוק; נדרשת **השקעה ראשונית גבוהה** בתשתיות.

לצורך בחינת שילובו של מימן במשק האנרגיה הישראלי יש להתייחס למספר סוגיות: ההיתכנות הכלכלית והבשלות של טכנולוגיות המימן; חומרי הגלם וטכנולוגיות הפקה המתאימים לישראל; אפליקציות רלוונטיות ליישום; חלקו של המימן בתמהיל האנרגיה העתידי; תפקידו של המימן ביישום נרחב של אנרגיות מתחדשות; והתועלות הצפויות למשק. הבנה טובה יותר של סוגיות אלו תבחר האם נדרשת התערבות ממשלתית ובאיזה אופן, כאשר תפקיד המדינה משתנה לאורך הזמן, כתלות בשלבי היישום.

ה-**IEA מגדיר מספר אמצעי מדיניות לתמיכה בשילוב מימן**⁷: קביעת יעדים או מדיניות ארוכת-טווח; תמיכה ביצירת ביקושים; הפחתת סיכוני השקעה; תמיכה במחקר ופיתוח, פרויקטי הדגמה ושיתוף מידע; הסרת חסמים המונעים אימוץ הטכנולוגיה; וכן נדרשים אמצעים נוספים בהתאם לאפליקציות היישום.

³ DNV GL (2018). *Hydrogen as an Energy Carrier*. An evaluation of emerging hydrogen value chains.

⁴ <https://h2tools.org/hyarc/hydrogen-consumption>

⁵ IPCC (2018). *Special Report: Global Warming of 1.5 °C*.

⁶ IEA (2019). *The Future of Hydrogen*, IEA, Paris.

⁷ Ibid.

אנרגיה מתחדשת מהווה כיום כ-6% ממקורות האנרגיה של ישראל, ולפי התוכניות האחרונות שפורסמו על ידי משרד האנרגיה ואושרו על ידי הממשלה, היעד לשנת 2030 הינו 30%⁹. זה בהחלט צעד משמעותי קדימה, אך זה רחוק מאוד מההכרזות המשמעותיות של מדינות מתקנות בעולם, ששמו יעד ברור של איפוס אנרגטי (Net Zero) ב-2050.

זהו צעד נכון בכיוון, אך בניסיון לשנות את תמהיל האנרגיה של מדינת ישראל צריך להסתכל על מאפייניה הייחודיים – אי אנרגטי, מעט אנרגיית רוח וללא אנרגיה גאותרמית, שטחים מוגבלים לאנרגיה סולרית, גידול אוכלוסין משמעותי – ובשל כל אלו המימן בהחלט יכול להיות אחד הכלים למימוש יעדי האנרגיה המתחדשת בישראל.

על אף היותו של המימן יסוד נפוץ מאוד בטבע, לצורך הפיכתו לדלק שישתלב במשק האנרגיה העולמי נדרשות השקעות כספיות עצומות. הניתוחים בעולם צופים שכ-18-20% ממשק האנרגיה בשנת 2050 יהיה מבוסס על מימן ובהתאם לכך מושקעים כבר היום סכומים אדירים בכלכלת המימן: בארה"ב, תחת ממשל ביידן, כחלק מהמאבק בהתחממות הגלובלית, אחד הפרויקטים המרכזיים הינו להשריש את כלכלת המימן במשק האמריקאי עם 30% תמריצי מס למעבר מדלקים פוסיליים למימן; יפן בדרך להפוך למאופסת אנרגיה עוד לפני 2050 עם השקעות של כ-20 מיליארד דולר, וכך גם באיחוד האירופי, בגרמניה ובצרפת, מבינים את התפקיד של מימן בכלכלות דלות פחמן, ומדינה שרוצה להתקדם בכיוון משקיעה בהתאם.

מבחינת שימושים, כבר כיום אפשר לראות שימושים גם בתעשייה וגם בתחבורה – רכבים, רכבות (בסין ואירופה), אוניות; איירבוס הכריזו שב-2030 יהיו להם מטוסים שינועו על מימן.

המימן שאליו שואפים הוא מימן ירוק אשר אינו מייצר פליטות גזי חממה. אמנם היום עדיין הייצור יקר, אך כדי שהמחיר יהפוך להיות אטרקטיבי וניתן יהיה לאמץ את הטכנולוגיה באופן נרחב, נדרשות השקעות גדולות וכך אכן קורה ברחבי העולם – רואים השקעות באלקטרוליזה באסיה, ערב הסעודית, דרום אמריקה, אוסטרליה ועוד. ולפיכך, אני מאמין שמדינת ישראל חייבת להקים פרויקט אלקטרוליזה משמעותי. לדאבוני, ההשקעות שמשרד האנרגיה מעורב בהן לאחרונה של כמה מיליוני שקלים פה ושם לא ישיגו את המטרה. זה חשוב, כי הנושא של המימן הוא חלק מהגריד העתידי – שיכלול תחנות כוח שעובדות על גז טבעי, אנרגיות מתחדשות (סולרי ורוח), אגירת אנרגיה (למשל, באמצעות שימוש חוזר בסוללות (second life)), וגם תאי דלק, קרי, גנרטורים שיודעים לעבוד על מימן. לתאי דלק יש כמה תפקידים – הם יכולים להבטיח את רציפות אספקת החשמל במקרים של אירועי רשת והם יכולים לפצות על אי היציבות שאנרגיה מתחדשת מכניסה לתוך הגריד. התחזית שהמימן יהווה כחמישית ממשק האנרגיה מתבססת על העובדה שהוא ישמש גם בתעשייה, גם בתחבורה וגם ברשת החשמל.

⁸ חברת ג'נסל מפתחת ומייצרת תאי דלק אלקליים שעובדים על שני סוגי דלקים - מימן ואמוניה

⁹ החלטה מספר 465 של הממשלה מיום 25.10.2020 בנושא קידום אנרגיה מתחדשת במשק החשמל ותיקון החלטות ממשלה.

מדינה שרוצה לעשות זאת צריכה להחליט על כך וליישם. דוגמא לתוכנית כזאת אפשר לראות ב**יפן**, שלה תוכנית אסטרטגית שכוללת גם את **המקורות לייצור המימן וטכנולוגיות הייצור**, וגם התייחסות לנושא **השינוע** של המימן – באמצעות מימן מונזל (יקר מאוד לשנע חומר בצורתו הגזית ולכן צריך לקרר את המימן למינוס 253 מעלות, תהליך יקר שצורך הרבה אנרגיה ולכן הכלכליות היא גבולית); באמצעות נשא מימן שנקרא MCH (organic hydrides); או באמצעות אמוניה – אמוניה היא הכימיקל השני בשכיחותו בכדור הארץ, עם שימושים רבים החל בחקלאות ועד תעשיית הסמי-קונדקטורים, ואין כלכלה בעולם שמסדרת בלי אמוניה. אמוניה נושאת מימן רב וניתן לשנע אותה בלחץ נמוך של 8-10 בר באוניות, משאיות ורכבות. בנוסף, יש בתוכנית התייחסות לנושא של **השימוש** במימן. לצד קביעת התוכנית, ממשלת יפן גם מבצעת השקעות גדולות בכל ההיבטים.

אנחנו כיזמים מובילים דברים, אך מדינה צריכה להיות זאת שדוחפת – לא רק תוכניות אלא גם יישום, כולל פרויקטים טכנולוגיים, כדי לשנות את התעשייה. המפתח לכלכלת מימן הוא פתרונות נקיים לייצור וכן לשינוע ולאחסון של מימן. מבחינתנו, האמוניה היא הנשא האופטימלי של מימן. שמחתי לשמוע שחיפה כימיקלים זכתה בפרויקט של הקמת מפעל אמוניה בדרום, וברגע שהמפעל יהיה מוכן הוא יאפשר אספקה של דלק עם יעילות אנרגטית גבוהה מהמימן, ללא פליטות גזי חממה, קל לשינוע, עם מחיר נמוך שמתחרה אפילו בדיזל והוא בטוח לשימוש.

מימוש הפוטנציאל של המימן בישראל דורש השקעות במתקני ייצור והולכה, התמודדות עם ה"מוניטין" השלילי של האמוניה, ותמיכה של הרגולטורים והממשלה בתעשיינים, באוניברסיטאות ובגופים המובילים כדי להפוך את המימן לאנרגיה נגישה.

ד"ר רחלי קרייסברג – מנהלת מרכז ישראל-הולנד לחדשנות, שגרירות הולנד בישראל¹⁰

תמונת מצב אנרגיית מימן בהולנד

הולנד מחלקת את הפעילות שלה למגזרי-על, כאשר מגזר האנרגיה הוא אחד מהם, והייחוד של הולנד הוא בכך שהמגזרים כוללים את התעשייה, האקדמיה והממשלה (Public-Private Partnership). זה חשוב להתוות המדיניות וליישומה.

בהולנד יש למעלה מעשרה מרכזים (Hubs), כאשר ארבעה מתוכם מתמחים בנושא של אנרגיה ואנרגיית מימן:

- **Rotterdam** (במערב) – תוכניות גדולות למעבר של 20 מיליון טונות של מימן בנמל ב-2050, כולל פעילויות של מימן ירוק וכחול. כ-10% יהיה בייצור מקומי והשאר מיובא. כשליש מהכמות תהיה לצריכה עצמית בהולנד והשאר יסופק למדינות צפון-מערב אירופה, ולפיכך מוקמת גם תשתית המרת מימן לאנרגיה אותה ניתן לאגור, לצורך שינוע.
- **Groningen** (בצפון) – עד 2026 שואפים להיות עמק המימן של הולנד, כולל הפקת מימן מתחנות רוח בים וקישוריות בין כל רכיבי שרשרת האספקה – הפקה, שינוע ואחסון. הפעילות בשיתוף של הנמל עם

¹⁰ ד"ר קרייסברג הינה בוגרת הטכניון ועובדת ברשת של נספחי חדשנות של משרד הכלכלה ההולנדי, והיא ראש המרכז הישראלי-הולנדי לחדשנות

חברת Shell וארגון Gasunie. התוכניות ממומנות ברמה הלאומית, אך גם ברמה הבין-לאומית, במסגרת פרויקטים של האיחוד האירופי HEAVENN – ויש לכך חשיבות פיננסית אך גם שיתופית. המיזם של האיחוד האירופי כולל בתוכו 29 גופים משבע מדינות אירופיות שונות.

- **Arnhem/Nijmegen** (במזרח) – מיפוי כל האלמנטים שקשורים למימן ברמת תעשייה, החל מתחומי פעולה, כגון תחבורה והולכה, ועד לבעלי עניין כאוניברסיטאות וחברות פרטיות.
- **Eindhoven** (בדרום) – יש פעילויות של מחקר בסיסי ויישומי, כולל יישום של מימן בתחבורה (אוטובוסים ומשאיות) וכן הקמת תחנות תדלוק במימן.

בהולנד פרויקטים רבים של **ייצור** מימן בטכנולוגיות ומחומרי גלם שונים – כולל הפקת מימן מביומסה ומשפכים, ניסיונות להפיקת מימן אפור לכחול ומימן כחול לירוק, הפקה באמצעות חוות רוח וכן פיתוחים של אלקטרוליזה בקני מידה שונים.

בנושא של **שינוע** – יש מחשבה להשתמש בצנרת של גז טבעי לצורך שינוע מימן. זה יאפשר להולנד לשנע את המימן מאתרי הייצור לאתרי הצריכה גם בתוך הולנד וגם מחוצה לה.

בנושא של **אחסון** – להבדיל מישראל, בהולנד יש תנאים גאולוגיים שמאפשרים לאחסן את המימן בתוך מערות מלח. יצוין שעלתה שאלה לגבי חיזור מיקרוביאלי של המימן הנאגר והוצעו פתרונות, למשל, באמצעות העלאת ה-PH.

להולנד יש **מדיניות** מאוד מסודרת – ביוני 2019, במסגרת הסכם האקלים, הולנד התחייבה להוריד את היקף פליטות גזי החממה ב-49% ב-2030 ולהיות מאופסת פחמן ב-2050. הם גם מאוד טובים ביישום, ולצורך כך מפרסמים בתחילת 2020 מפת דרכים חדשנית ליישום כלכלת המימן¹¹ וכן את אסטרטגיית הממשלה בנושא – איך הממשלה הולכת לסייע ביישום, כולל חקיקה ואסדרה, תמיכה בהגדלת הייצור והורדת עלויות, שימוש בר-קיימא, ושיתופי פעולה בין-לאומיים. הולנד מבינה שהיא לא יכולה לעשות את זה לבד ולכן ישראל יכולה להתייחס להולנד כשותף פוטנציאלי לפיתוח הנושא. כחלק מהמאמץ הזה הולנד פרסמה רשימה של למעלה ממאה פרויקטים של מימן¹², כולל המטרות, השותפים והתקציבים שלהם, ובנוסף, להולנד יש מכרזים לאומיים בנושא, כאשר גופים זרים יכולים לקחת בהם חלק אך נדרש שיתוף פעולה עם גוף הולנדי (השגרירות יכולה לסייע בזה).

בשגרירות עוסקים גם בהעברת מידע, כולל קורסים בנושאים של אנרגיות מתחדשות ומימן, וכן מסייעים בחיפוש שותפים לצורך קבלת מימן מהאיחוד האירופי.

¹¹ TKI NIEUW GAS (2020). [Hydrogen for the energy transition](#).

¹² TKI NIEUW GAS (2020). [Overview of Hydrogen Projects in the Netherlands](#).

אלון גולד – יועץ כלכלה וסחר של שגרירות פינלנד בישראל

תוכנית לאומית והתפתחויות בשימוש במימן בפינלנד

פינלנד חברה באיחוד האירופי ופועלת במסגרת ה-Green Deal וההתחייבויות לאיפוס פחמן בשנת 2050. אך פינלנד רוצה לקחת את זה צעד קדימה, והממשלה הנוכחית התחייבה¹³ לאיפוס פחמן כבר ב-2035, וזה דורש שינוי משמעותי של אורחות החיים וכמובן של התעשייה. במסגרת זו ענפים שונים בכלכלה מפרסמים, בתיאום עם משרדי הממשלה, מפות דרכים לצורך השגת היעד¹⁴. המימן, לצד הנושא של כלכלה מעגלית, הוא חלק חשוב בשינוי הזה. מימן משמש כיום בעיקר בתעשייה הכימית הגדולה בפינלנד, ותעשייה זו התחייבה במפת הדרכים שלה לאיפוס פחמן ב-2045.

בפינלנד, כמעט 50% מייצור החשמל מתבסס על אנרגיות מתחדשות, כאשר ביומסה מיערות מהווה חלק ניכר מכך, אך במקביל מקדמים גם את הנושא של אנרגיית רוח, שמהווה כיום 9% בלבד מייצור החשמל במדינה, וגם זה קשור לנושא של מימן.

כמו כן, פינלנד פרסמה מפת דרכים לאומית לשילוב מימן, שבו היא מנתחת את המצב הקיים וכן מציגה ניתוחים כלכליים, טכנולוגיים ותשתיתיים, והאפשרויות לשילוב מימן במשק¹⁵. את המסמך כתב ארגון VTT, מכון מחקר יישומי שיש לו חלק חשוב במו"פ במדינות הנורדיות בכלל, והוא נכתב בעבור Business Finland, גוף דומה לרשות החדשנות בישראל, שלו תוכנית לקידום הנושא ולמעבר של התעשייה לכיוון של מימן.

המימן מיוצר כיום בפינלנד בצורה מסורתית ואלקטרוליזה מהווה חלק קטן בלבד. עיקר היצרנים, שהם גם בדרך כלל הצרכנים, הם התעשייה הכימית, בעיקר ייצור דלקים לתחבורה. חלק מהמימן הוא גם תוצר לוואי של תהליכים אחרים. גם בפינלנד קיימת בעיית השינוע – הייצור הינו בעיקר בצפון (כולל חוות רוח עתידיות המתוכננות באזור לפלנד) והצרכנים בדרום המדינה, כך שנדרשות השקעות בתשתיות, אך יש שרשרת ערך שכבר עובדת. כיום יש השקעות גדולות גם בחברות שהן צרכניות המימן, אך גם במו"פ, ויש גם אקוסיסטמים מעניינים שעוסקים בנושא. בהמלצות של מפת הדרכים מדגישים את הצורך בהשקעות נוספות וכן בשיתופי פעולה בין-לאומיים, גם בשלב המו"פ וגם בשלבים מתקדמים יותר.

החוזקות של פינלנד בפיתוח כלכלת מימן כוללות: משטר רוחות נוח, חיבור לרשת החשמל הנורדית, השקעות ומו"פ שמהווים הזדמנות טובה לשיתופי פעולה. החולשות הן שנדרשת השקעה גבוהה בתחום האחסון (אין גאולוגיה מתאימה לנושא), ואין ניסיון יישומי בתחום התחבורה. עם זאת, פינלנד יכולה להוות מעין מעבדה בתחום הלוגיסטי, כי היא מאוד חזקה בתחום המשאיות והאוניות.

¹³ [Carbon neutral Finland 2035 - Ympäristöministeriö](#)

¹⁴ [Low-carbon roadmaps 2035 - Ministry of Economic Affairs and Employment \(tem.fi\)](#)

¹⁵ Business Finland (2020). [NATIONAL HYDROGEN ROADMAP for Finland](#).

יוסי שביט – ראש יחידת הסייבר בתעשייה, המשרד להגנת הסביבה¹⁶

סיכויי סייבר הטמונים בייצור, אחזקה ושינוע של מימן

לצד היתרונות הרבים של מימן, יש לו מספר מאפיינים המהווים חסרון:

- גז חסר צבע וריח – מקשה על זיהוי דליפה
- ניצת בקלות ובער בלהבה חלשה וכמעט בלתי נראית
- דליק בתחום רחב של ריכוזים (4.1-72.1% מימן באוויר) – נוצרת ריאקציה עם החמצן שבאוויר שתוצריה הם מים והמון אנרגיה
- אנרגיית הצתה נמוכה
- האנרגיה הנפלטת בדליקה או פיצוץ היא גבוהה ויכולה לגרום לפציעות והרס כתוצאה מגלי הדף
- דליפה מגליל דחוס או חימום ממוקד של איזוטנק עלולים להביא לשחרור מהיר של כמויות גדולות
- אינו רעיל אך במקרה של דליפה בחלל סגור עלול לדחוק את החמצן ולגרום לחנק.

גז המימן שייך למשפחת הגזים הדליקים (קבוצת סיכון 2.1)¹⁷, ברמה הגבוהה ביותר מבחינת דליקות, ולכן מדובר בסכנה מיידית ומוחשית לחיי אדם. האסון המפורסם בהקשר של מימן הוא אסון היידנבורג שבו ספינת אוויר גרמנית נשרפה בניו ג'רזי לקראת הנחיתה – שילוב של מימן וחמצן עם ניצוץ מחשמל סטטי.

מימן מוגדר כחומר מסוכן. מערכות ייצור, שינוע ואחסון של חומרים מסוכנים בדרך כלל מבוססות על מספר אלמנטים עיקריים: ממשק אדם-מכונה (Human-Machine Interface (HMI) שהוא התחנה ששולטת על מערכת הייצור ונותנת פקודות לרצפת הייצור ובתוך כך גם למיכלי האחסון של החומר המסוכן. בהקשר של סייבר אנו חוששים מפריצה למערכות הממוחשבות שמאפשרת שינוי הרכבים של חומרים שמגיעים לראקטור, שינוי יעדי אחסון, שינוי הוראות ייצור, שינוי לחצים, טמפרטורות, ספיקות, ערכי PH ועוד – מה שעלול לגרום לדליפות ופיצוצים גם במיכלים וגם בצנרת של חומרים מסוכנים. תקיפת סייבר יכולה להתרחש כלפי כל אחד מרכיבי מערכת הבקרה התעשייתית (Industrial Control System (ICS) – בקרים, וסתים, ברזים, גופי חימום, מיכלי אחסון וסנסורים – וכן כלפי מערכות התקשורת בין הרכיבים, ולהתערב בתהליך.

בהקשר של מימן, היבטי סייבר יכולים להתרחש בכל אחד מהשלבים:

- בייצור – אם באמצעות אלקטרוליזה או פרום (SMR) של מתאן וכן בתהליכי גיזוז והפקת מימן ממתכות אלקליות, החשש הוא מהתערבות בתהליכים שתגרום לדליפות ופיצוצים של מימן או מתאן וכן פחמן חד-חמצני (CO) שהוא רעיל ועלול לגרום לחנק;
- בשינוע – משאיות של מימן (המאוחסן בגלילים או במצב נוזלי) שנוסעות בכבישי ישראל חשופות לתקיפה דרך אלמנטים רבים ובהם, GPS, תקשורת סלולרית, אפליקציות מובייל, קישור לצי הרכב ועוד. החשש הוא מהשתלטות שתביא בסופה להתהפכות הרכב. אפשרויות התקיפה אף מתרחבות בתחום

¹⁶ מר יוסי שביט הינו בוגר הנדסת מכונות וחומרים בטכניון, עם ניסיון בתעשייה והסמכה בתחום הסייבר (CISM). מעל 25 שנות ניסיון בנושאי אבטחת מידע וסייבר במערכות מידע (IT) ובמערכות תפעול (OT).

¹⁷ [CAMEO Chemicals | NOAA](https://www.noaa.gov/cameo-chemicals)

של רכבים מקושרים, ובעתיד גם רכבים אוטונומיים, שם גם רכיבי התשתית, כמו שלטים או רמזורים, יהיו מקושרים;

- באחסון – מניפולציה במערכת המטפלת באחסון, כמו השתלטות על ברז המילוי או העלאת הלחץ במיכל, יגרמו לדליפת מימן עם סיכוי גבוה לדליקה או פיצוץ;
- בשימוש.

לפיכך, פורסמה ב-2020 רגולציה חדשה בנושא של סייבר, שגובשה בשיתוף עם התאחדות התעשיינים. למעשה, המשרד להגנת הסביבה אימץ את הדירקטיבה האירופית Seveso III, שמגדירה חומרים מסוכנים לפי רמת מסוכנות (מימן נכלל בטבלאות אלו), וכן מגדירה מהו תהליך מסוכן, כאשר מספיק 100 ק"ג של מימן בתוך תהליך ממוחשב כדי שזה יחשב תהליך מסוכן שיכול לגרום נזק לציבור ולסביבה. הרגולציה בישראל מבוססת על עמידה בכמויות סף, עמידה בקריטריון 'תהליך מסוכן' והתייחסות לחיבור למערכת מיחשוב.

במקביל פורסם גם מדריך לניהול סיכוני סייבר בתעשיית החומרים המסוכנים, שמימן נכלל בתוכה¹⁸. מדובר על מתודולוגיה חדשה וייחודית בעולם, המבוססת על עבודת שטח מאוד מעמיקה, כולל ביצוע סקרי סיכונים במפעלים וכן תהליכים של שיתוף ציבור. עם זאת, המתודולוגיה גם מבוססת על תקן NIST (National Institute of Standards and Technology) שמגדיר חמש פונקציות של סייבר¹⁹.

פעולות נוספות בנושא כוללות קורס סייבר בשיתוף התאחדות התעשיינים והקמת מרכז מידע בבאר שבע שיכול לנטר גופים שמייצרים חומרים מסוכנים ולתת התרעות על אירועי סייבר. אנחנו מאמינים שכל הפעילויות שהוזכרו יכולות להגביר את החוסן של המפעלים בישראל. זה פרויקט ייחודי לישראל ונשמח לשתף את הידע עם מדינות נוספות.

¹⁸ המשרד להגנת הסביבה (2020). מדריך סייבר: עמידה בתנאים של היתר רעלים בתחום הסייבר בתעשייה

¹⁹ <https://www.nist.gov/cyberframework>

לאחר מצגות המשתתפים התקיים דיון פתוח על המידע שהוצג, ועל המסקנות האופרטיביות שיש להפיק ממנו. הדיון התמקד בשאלות:

- מהן התועלות של שילוב מימן במשק האנרגיה?
- מה יכולה לעשות ממשלת ישראל לקידום הנושא?
- מה ניתן ללמוד בתחום זה ממדינות אחרות בעולם?

דברי המשתתפים מובאים כאן בסדר בו נשמעו וללא עריכה, לאחר שעברו ביקורת על ידי אומריהם.

ד"ר שלמה ולד: השימוש העתידי העיקרי של מימן בעיניי הוא לתחבורה, לצד תחבורה חשמלית, כאשר הרעיון החשוב הוא לייצר את האנרגיה במקום הצריכה (on board) וכך נמנע הצורך בשינוע, ונחסכת אנרגיה רבה בהמרות של מתאן למימן, לאמוניה ובחזרה למימן. לגבי אחסון ארוך טווח, קל וזול יותר לאחסן בצורה של DME (Di-Methyl-Ether), שהוא גם חומר ידידותי לסביבה. ה-DME הוא דלק שניתן להשתמש בו ישירות בתאי דלק ולאסוף את הפחמן בצורה של נוזל או מוצק. מדינת ישראל צריכה לחשוב מה יהיה העתיד של הגז הטבעי – אם יש עתודות לעוד עשרות שנים כדאי לחשוב על תעשייה שמתבססת על גז טבעי, שתשמש מקור דלק מימני לתאי דלק ועוד.

ד"ר גדעון פרידמן: אני רוצה להסתכל על המימן מן הפרספקטיבה הישראלית. צריך לזכור שאנחנו כלכלה קטנה, ואנחנו לא נכתיב את המדיניות העולמית, אלא אנחנו נסמכים עליה. ברמה הגאוגרפית, אנחנו גם מדינה קטנה ולכן המרחקים פה גם הם קטנים. לישראל יש תעשייה קטנה שאחראית רק ל-10% מפליטות גזי החממה, בשונה מהעולם שם מדובר בדרך כלל על כ-20%, ולכן הבעיות של הפליטות בתעשייה הן קצת פחות אקוטיות בישראל. זה גם מחליש את המקום הפוטנציאלי של מימן במשק. לישראל יש מאגרי גז גדולים ואסור להתעלם מזה. מבחינת אנרגיות מתחדשות יש לנו בעיקר אנרגיה סולרית וגם זה צריך להלקח בחשבון. ישראל גם מחזיקה מעצמה כמעצמת חדשנות. לאור כל זאת, אנחנו צריכים בעיקר להשקיע במו"פ בתחום של המימן. אנחנו עושים את זה במידה מסוימת, וגם יש בישראל אקדמיה חזקה בתחום של תאי דלק ומימן, ואנחנו צריכים להמשיך ולהביא את החדשנות בתחומים האלה.

אנחנו (משרד האנרגיה) מחפשים פרויקט של אלקטרוליזה מזה זמן. אנחנו נשמח מאוד לסייע בפרויקט כזה שיכלול את כל מעגל המימן – משלב הייצור ועד אגירה וייצור מחדש של חשמל באמצעות אנטי-אלקטרוליזה (תאי דלק).

מדינת ישראל ומשרד האנרגיה קבעו יעדי אנרגיה מתחדשת שאולי יכולים להחשב כצנועים ביחס לעולם, אבל עדיין מדובר על יעדים מאתגרים לעומת המצב שבו אנחנו נמצאים כיום (30% מייצור החשמל מאנרגיות מתחדשות עד 2030). כמו כן, נקבעו יעדי הפחתת פליטות ל-2050 שנראים לי בהחלט משמעותיים, 75-85% הפחתה, כאשר האמצעים יכללו כנראה אחוז ניכר של אנרגיות מתחדשות, אך לא הייתי מתחייב על כך כי לא ניתן לדעת מה תהיה הטכנולוגיה שתתאים לנו בעוד שלושים שנה.

מעבר למו"פ, אנחנו צריכים להמשיך להשקיע ביישום של מה שקיים בעולם; אנחנו רוצים להיות חלק מהמשחק ולדעת לעשות את הדברים בצורה נכונה וטובה וללמוד מהניסיון של אחרים. אנחנו מקימים תחנת תדלוק במימן ורוצים להביא תחבורה כבדה שתונע במימן – משאיות כבדות ואוטובוסים לטווח רחוק. האתגרים הם כאלה שאנחנו, כמדינה קטנה, לא חייבים לרוץ וליישם בקנה מידה גדול, כאשר הנושא הוא עדיין מאוד לא כלכלי. אנחנו צריכים להשקיע במימן כחול או ירוק; למשל, יזמנו מחקר לגבי הפיכת גז טבעי למימן ללא פליטות פחמן דו-חמצני ויש רעיונות כמו פירוליזה שבה הפחמן מתקבל כמוצק. זה בעדיפות מבחינת ישראל אם רוצים ללכת למימן נקי.

ישנם עוד אתגרים מהותיים במעגל המימן שאינם קרובים לפתרון – גם נושא המחיר, גם נושא הלוגיסטיקה (שינוע ואחסון) וגם הנושא של היעילות הכוללת של מעגל המימן, שכיום, היא אינה טובה. זה אולי לא יעלה הרבה, אבל עדיין מבחינת קיימות לא סביר שנשתמש במוצר שאנחנו מנצלים בכל המעגל שלו כ-30% מהאנרגיה. לכן גם צריך למצוא את הדרכים לעשות את זה משמעותית יותר יעיל.

אסא זיו: אחד המפתחות לכלכלת מימן הוא הורדת עלות הייצור. אמנם המחיר עדיין מאוד יקר יחסית, אבל כבר היום חברות שמפיקות מימן בהיקפים גדולים יכולות להציג עלות של פחות מדולר לקילוגרם מימן. הבעיה היא שאת כל הכמות הזאת צריך להעביר לצרכנים ואז נתקלים בבעיית השינוע. כדי לשנע מימן דחוס צריך טאנקרים שכל אחד מהם עולה כ-600 אלף דולר וזה עוד לפני עלות הדחיסה. צריך לדחוס לפחות ל-250 אטמוספירות וזה מהווה בעיה כלכלית וכן בעיה בטיחותית כאשר המיכליות האלו צריכות לנסוע על הכבישים. גם האפשרות של שינוע מימן מונזל, מקורר למינוס 253 מעלות, היא בעייתית; יש איבודי אנרגיה גבוהים – מדובר על שימוש בכ-30% מהאנרגיה רק לצורך ההנזלה, המיכלית עצמה יכולה להגיע למחיר של 1.4 מיליון דולר וישנם חסרונות נוספים. אפשרות נוספת היא פתרונות כימיים לשינוע מימן, כמו שעושים ביפן – לוקחים את המימן ומכניסים אותו לחומר כימי, ובמקרה כזה השינוע הוא יותר פשוט ולא מצריך תנאים מיוחדים. אך בתהליכים אלו יש בעיה של יעילות – מקילוגרם אחד של מימן אפשר להפיק באמצעות תא דלק כ-16 קילוואט-שעה, אך לפי הפרסום של חברת Hydrogenious הגרמנית²⁰, אחת מהחברות המובילות בתחום הזה בעולם, אשר מחברת את המימן לחומר אורגני נוזלי, כדי להפיק קילוגרם מימן בתהליך שלהם צריך להשקיע 13.3 קילוואט-שעה (רק מהפריקה), כלומר, נטו נותר פחות מ-3 קילוואט-שעה מהתהליך הזה. לכן לפתרונות הכימיים, שהם כיום בחזית, יש בעיה אנרגטית ולכן גם בעיה כלכלית רצינית. גם באמוניה יש בעיות לא זניחות בכלל, וגם שם התהליך צורך הרבה אנרגיה. הפתרון שלנו של אגירת מימן במים, מציע, לפחות ברמה העקרונית, יעילות אנרגטית טובה יותר ותוצאות אטרקטיביות, ואנחנו עושים זאת הן על ידי תנאי עבודה נוחים של טמפרטורה ולחץ הדומים לתנאי החדר, והן באמצעות שימוש בחומרים נפוצים, זולים וידידותיים לסביבה כמו מים, חומר דומה לסודה לשתייה ועוד. אנחנו מקבלים הרבה עזרה והשקעות מהמדינה, ממשרד האנרגיה ורשות החדשנות, אבל אין ספק שהשקעות גבוהות יותר היו מאפשרות לקדם את הנושא בצורה משמעותית.

פרופ' ליאור אלבז: אני עומד בראש הקונסורציום הישראלי לתאי דלק ולמעשה מוביל מאמץ של 12 מעבדות בתחום תאי הדלק, כמעט מכל האוניברסיטאות בארץ.

²⁰ <https://www.hydrogenious.net/index.php/en/hydrogen-2-2/>

מימן לא נולד כפתרון לתחבורה, אלא כפתרון לאגירה נרחבת של אנרגיה שצריכה לתת מענה לחוסר היציבות באספקה של אנרגיה מתחדשת (רוח ושמש) ושאמורה להתמודד עם הפער בין השעות שבהן מסופקת מרבית האנרגיה הסולרית (בעיקר בצוהריים) לבין שעות שיא של צריכה בשעות הערב. אחד הפתרונות לנושא הזה הוא סוללות, אך סוללות לא מתאימות לאגירה נרחבת ולאורך זמן, אלא בעיקר ל-peak shaving. מימן בא לענות על הצורך של אגירה לאורך שעות, ימים ועונות ואף להוות מאגר אסטרטגי של אנרגיה.

אנחנו לא כלכלה שתקבע מגמות בעולם, אלא אנחנו בעיקר מתיישרים לפי מה שקורה בעולם. נכון עושה משרד האנרגיה שמשקיע בעקומת הלימוד של התחום, אבל כמובן שניתן להשקיע יותר. אנחנו נמצאים באיחור של 7 עד 10 שנים אחרי העולם, ואחד הדברים הבולטים ביותר הוא חוסר ברגולציה – לא קיימת בישראל בכלל רגולציה ייעודית למימן, אלא מסתכלים עליו כחומר מסוכן. כדי שמימן ישמש לאגירה ותחבורה נדרשת רגולציה אחרת וזה מהווה צוואר בקבוק בעקומת הלמידה שלנו.

יש לישראל מה להציע בחדשנות בתחום, אך עדיין תמיכה ממשלתית תדרש כאן, כמו שנעשה בכל המדינות, ולראייה, צפויות בעולם השקעות של כטריליון דולר בתחום המימן בעשור הקרוב.

ערב הסעודית מקימה ב-Neom על הים האדום, כ-70 ק"מ דרומית לאילת, מגה תחנה סולרית, שאינה מתוכננת לספק חשמל למדינה אלא לייצר אנרגיה לייצוא, שכנראה תהיה בצורת מימן. הם חתמו על חוזה עם Air Products שהיא אחת החברות המובילות בעולם בייצור של מימן. ישראל נמצאת במשולש הזה של Neom, עקבה ואילת, שהוא אחד האזורים הטובים ביותר בעולם לייצור אנרגיה סולרית, וישראל צריכה לחשוב איך היא משתלבת בעניין הזה.

פרופ' גדעון גרדר: מימן אכן יכול לשמש צרכים וצרכנים רבים, ושוק הרכב הוא לא בהכרח השוק הכי מתאים בשבילו, למרות שזה שוק נוח כיוון שכמויות הייצור והצריכה הן יחסית קטנות וגם הצמיחה של השוק היא מאוד נוחה. חשוב להדגיש, לבעיית האנרגיה של ישראל בפרט והעולם בכלל אין פתרון אחד שפותר הכל, והמימן הוא אחד מסל הפתרונות לבעיה. בכדי שנתחיל בישראל ללמוד את הנושא של מימן, צריך פשוט להתחיל, ולדעתי, המקור הראשון של מימן בכמויות שיצטרכו בשנים הראשונות נכון שיבוא מהגז הטבעי. זה המקור היחיד שיוכל להתמודד בלוח זמנים קצר עם הכמויות שיצטרכו – להנעת משאיות, לשימושים צבאיים, לאוטובוסים. גז טבעי הוא משאב שמאוד נוח לישראל להשתמש בו, אך ייצור המימן מגז טבעי לא חייב להיות באמצעות פרום (SMR) אשר מייצר פחמן דו-חמצני, אפשר לחשוב גם על תהליכי GTL (Gas-to-Liquids) שבהם לוקחים את הגז הטבעי והופכים אותו למולקולה שהיא פחמימן (CH_2) ועל הדרך נפלט הרבה מימן שבו ניתן להשתמש, וגם בפחמימן ניתן להשתמש בתעשיות של דלקים סינטטיים. זה רק פתרון זמני, כי בסופו של דבר גם פרק זמן של 20-30 שנה עובר, ואם המדינה תבנה פה תשתית לייצור ולשימוש במימן, היא תצטרך את המימן גם ביום שהגז הטבעי ייגמר. ייצור מימן מאנרגיות מתחדשות הוא הפתרון לטווח הארוך. צריך להסתכל בראייה ארוכת שנים וחשוב שהרגולטורים יסייעו בהתנעת תהליכי השימוש במימן בעתיד הקרוב ולא יידחו את הנושא.

ד"ר רחלי קרייסברג: בהקשר של ייצור מימן, אגירה, שינוע ושימוש במימן, אולי אפשר לחשוב על ישראל בהיבט האזורי – א) האם ישראל יכולה להצטרף למאמצים של הולנד בעניין שינוע מימן שמוצא במדינות המפרץ, ערב

הסעודית ומדינות המזרח התיכון? ב) האם ניתן לאחסן מימן בנמלי חיפה ואשדוד הישנים והחדשים? ג) האם ישראל יכולה לייצר מימן ירוק בחוות הסולריות בנגב, וזאת בהתייחס לאסטרטגיה האירופית למדינות המזרח התיכון וצפון אפריקה (Middle East and North Africa (MENA)) אשר אמורות לייצר מימן נקי ולייצאו לאירופה? ד) האם ישראל יכולה לייצא טכנולוגיות התפלת מי ים אשר יכולות להיות מיושמות במדינות אחרות בהן יש צורך במים באיכות טובה לאלקטרוליזה? ה) האם ישראל יכולה להציע טכנולוגיות סייבר להגנה על מתקנים לייצור, אחסון ושינוע מימן בעולם?

לא הייתי מתעלמת ממה שמתרחש באגן הים התיכון – למה שהולנד וישראל לא ישתפו פעולה, בדומה למה שקורה בין גרמניה ומרוקו? צריך לשים את ישראל על המפה האזורית. אנחנו שייכים לאזור גאוגרפי וצריך גם לקחת בחשבון את ההתפתחויות במדינות המפרץ, עם החוזקות שלהן ועם שחקנים אירופים חזקים שנמצאים שם.

ד"ר גלעד פורטונה: אגירה ניתן לעשות לא רק באמצעות הסוללות הקיימות, אלא גם בעזרת טכנולוגיה שנקראת סוללות זרימה (flow battery), שבאמצעותה ניתן לאחסן אנרגיה גם לזמן ארוך, הרבה יותר מהמתאפשר בעזרת הסוללות הקיימות. פיתוח סוללות אלה מתבסס על חומרי גלם שיש בישראל ונעשה בשילוב של הטכניון וכימיקלים לישראל. יש כאן גם בשורה לאחסון כמויות גדולות וגם לשילוב טכנולוגיה וחומרים המיוצרים בישראל. סוללות כאלה כבר מיושמות בקנה מידה קטן. לגבי שימושי המימן – אמנם המימן התחיל להתפתח בעיקר בהקשר של אגירת אנרגיה, אבל כיום חשוב להסתכל על שני ההיבטים – על אגירת חשמל למערך ייצור אנרגיה מתחדשת, ועל שימוש במימן כנשא אנרגיה לתחבורה. לגבי כל היבט משני היישומים, צריך לייצר תחזית, ומתוך התחזיות ניתן יהיה לגזור את כמויות המימן שנצטרך ואת כלכלת המימן הריאלית.

כיוון שכיום מדברים על 30% חשמל מאנרגיה מתחדשת ב-2030, אני חושב שכל עוד האנרגיה העיקרית שלנו מגיעה מגז טבעי, ואין אנרגיה שיורית שמגיעה מאנרגיה נקייה, יש מקום להמשיך בתהליכים קיימים של פרום (SMR) לתקופת הביניים, כפי שעדיין נעשה במרבית העולם, בייחוד כשיש לנו בישראל גז טבעי במחיר מקומי. אם נגיע ב-2050 לאיפוס של אנרגיה פוסילית, אז יהיה יותר נכון לייצר גם את המימן באלקטרוליזה מאנרגיות מתחדשות. עד כמה שאני יודע, היעילות של תהליכי הפרום היא כפולה מהיעילות של אלקטרוליזה. לכן, יש הצדקה לאלקטרוליזה רק אם כמעט כל החשמל מיוצר באנרגיה מתחדשת.

רותם זמיר: היכן ניתן למקם מתקני אגירת מימן המיוצר מאנרגיות מתחדשות? האם הנמלים מהווים פוטנציאל לאגירה כזאת – בשטח הנמל או בשטח הימי הסמוך?

פרופ' ליאור אלבז: זאת השאלה המרכזית בתחום – איך ניתן לאחסן כמויות גדולות של מימן ולזמן ארוך (כולל אגירה עונתית)? הגרמנים מנסים לאמץ פתרון של מערות מלח שמתאים לגאולוגיה שלהם. דבר נוסף שנעשה באירופה זה השמשה של צנרת גז טבעי לאגירה של מימן, כמיכל גדול שמפוזר על כל היבשת. כל מקום כנראה יאמץ פתרון אחר בהתאם לתנאים ספציפיים (גאולוגיה, תשתיות קיימות ועוד). והשאלה היא מה מתאים למדינת

ישראל? אנחנו נמצאים בקשר עם חברת תש"ן²¹ והם מתעניינים מאוד בנושא כי הם אחראים בסופו של דבר על אספקת האנרגיה למשק, ויצטרכו לדאוג לאספקת ואגירת מימן אם המשק יפתח כלכלת מימן. כיום עוד אין פתרון בשל למדינת ישראל, אבל בהחלט צריך לבחון מה מתאים לישראל, בהתייחס לפתרונות שמישמים בעולם.

אסא זיו: אחת הבעיות המרכזיות היא אכן אגירה בכמויות גדולות, אך אני לא חושב שאגירה במבנים גאולוגיים מתאימה לישראל. מדובר על השקעות תשתיות ענקיות. ולכן, לדעתי, הפתרון יהיה ממשפחת הפתרונות הכימיים אשר יהיה נוח לשימוש, יאפשר אגירה ללא צורך בלחץ מיוחד, ללא מגבלה של הרחבת השימוש ובאופן ידידותי לסביבה.

ד"ר שחר דולב: במשרד האנרגיה קיימנו בחינה פנימית של נושא האגירה ארוכת הטווח במשק הישראלי, בתרחישים של חדירה נרחבת של אנרגיות מתחדשות (70-90%). עד חדירה של כ-80% אנרגיות מתחדשות, הצורך באגירה מתמצה במחזור היומי – העברת עודפי אנרגיה סולרית מהצהריים לערב וללילה. אבל כשמתקרבים ל-90% אנרגיות מתחדשות אנחנו ממצים את המחזור היומי ועולה צורך בהעברת אנרגיה עונתית. את המחזור היומי סוללות יכולות למלא – יש, כבר כיום, פרויקטים מאוד גדולים בעולם (בהיקפים של ג'יגה-ואט-שעה ויותר) של אגירה בסוללות, וסביר מאוד להניח שבטווח של 20-30 שנה, עד שנגיע להיקפים כאלו של ייצור מאנרגיות מתחדשות בישראל, הטכנולוגיות יהיו יותר אפקטיביות, יותר זולות וישתמשו בחומרים יותר ידידותיים, ולכן זה יהיה כנראה הפתרון המועדף למחזור היומי. מאידך, יש לנו בראייה השנתית בעיה של עודפים באביב ומחסור בחורף, נדרש תהליך שיעביר הרבה מאוד אנרגיה בין העונות, וכאן מימן מסתמן כפתרון אפשרי. בסביבות 70-80% אנרגיה מתחדשת יש לנו עודפים גדולים של אנרגיה שלא יהיה לה שימוש בצורה הישנה של הימים הכי שמשיים באביב, ולכן ניתן יהיה לקחת את העודפים האלה ולייצר מהם מימן שניתן יהיה להשתמש בו בחורף. לא נצטרך להוסיף יכולת ייצור כדי לייצר את המימן הזה, היות ונצול עודפים שאחרת היו מושלכים. את המימן ניתן יהיה לאגור במאגרים תת-קרקעיים – אפשרות אחת היא במאגר גז נטוש, לדוגמה, מאגר ראש זהר ליד ערד שהתרוקן. מבחינת נפח אגירה – לאגירה עונתית בישראל צריך כחצי BCM (Billion Cubic Meters) של מימן, ומאגר ראש זהר יכול לקלוט את הכמות הזאת. אפשרות נוספת היא נקרות מלח שיש בסביבות ים המלח, כאשר הנושא כמובן עוד צריך להבדק.

פרופ' אבנר רוטשילד: לא מומלץ למקד השקעות בכיוונים ספציפיים, כי ניתן לראות, אפילו בפורום הזה, שיש הרבה מאוד דעות והרבה כיווני התפתחות אפשריים. בישראל וגם בעולם לא ניתן לדעת אילו כיוונים יישאו פירות ואילו לא, ולכן בשלב הזה כל האפשרויות פתוחות ולא מומלץ למקד את ההתפתחות בכיוון מסוים. הבסיס לתמיכה הקיימת צריך לצמוח מלמטה ולא להיות מונחה מלמעלה. צריך לייצר מנגנונים שבהם הרשויות שמספקות את המימן ידעו לזהות את הגופים, את החוקרים באקדמיה, את החברות או המיזמים שיכולים לקדם רעיונות טוב יותר מאחרים. אם יש איזושהי מחשבה להנחות את זה מלמעלה, לדעתי, זה מצליח רק לעיתים נדירות. לנסות לכנס קבוצות גדולות של אנשים שיפעלו ביחד למען אותה מטרה, זה על פי רוב לא מצליח, ואני חושב שזו תהיה טעות ללכת בכיוון הזה.

²¹ תש"ן (תשתיות נפט ואנרגיה בע"מ), הינה חברת התשתית הלאומית של משק הדלק והאנרגיה בישראל. החברה אחראית לספק את צרכי משק האנרגיה הן בשגרה והן בחירום.

פרופ' ליאור אלבז: אני מעורב גם בקונסורציום לתאי דלק וגם במרכז להנעה אלקטרוכימית (Israel National Research Center for Electrochemical Propulsion (INREP) שכולל כ-25 קבוצות מחקר מכל הארץ שעובדות ביחד כבר כעשר שנים. הסינרגיה בעבודה יצרה המון דברים טובים, ובין היתר גם אחריות לאומית של חוקרים לקדם נושאים שחשובים לתעשייה ולעמיד של מדינת ישראל. זה נכון שלא תמיד זה עובד, אם זה לא ממוקד או לא מנוהל כראוי, אבל ליצור מסה קריטית של חוקרים בתחומים מסוימים יש בזה חכמה לפעמים.

קליפורניה היא אחת המדינות המתקדמות בעולם בשימוש בסוללות לאגירה, אך השימוש בסוללות יכול לתת מענה למספר שעות, כאשר מדובר על ימים זה כבר יותר קשה. צריך גם לזכור שאין מספיק משאבים בעולם, כמו ליתיום, כדי לייצר כמויות גדולות של סוללות ולספק את כל הצרכים שלנו. כיום משתמשים בגרמים בודדים לאדם, ובעתיד אנחנו נצטרך עשרות קילוגרמים לאדם, למשל, לצורך מכוניות חשמליות. לכן הפתרון יהיה כנראה היברידי, לא רק סוללות או רק מימן, אלא לכל אפליקציה נתאים את הטכנולוגיה המתאימה. כאמור, סוללות מתאימות ל-peak shaving כי הן מגיבות מהר יותר, לזמנים ארוכים יותר מימן יתאים. נקודה נוספת שצריך לקחת בחשבון היא מחזור החיים השלם של הפתרונות השונים (cradle-to-grave), וגם כאן לסוללות יש בעיה. לא קיים כיום תהליך מחזור אמיתי לסוללות ליתיום – לטעמי, תהליך המחזור כיום הוא פיקציה, ההמצאה של second life היא דרך לקבור את הסוללות בבתים שלנו, בחצר האחורית שלנו, כיוון שלא קיים תהליך מחזור. חברות כמו סטלה ואחרות היו רוצות למחזר את הסוללות שלהן אבל הן לא יכולות, ובכדי למכור רכבים באירופה למשל, הן נדרשות להציע תוכנית לטיפול בסוללות בסוף חייהן בכלי הרכב, אז הן מציעות להפוך את הסוללות האלו, שהן כבר לא במצב אידיאלי, לאמצעי אגירה ביתי ובעצם מעבירות את הבעיה אל הצרכנים שיצטרפו למחזור את הסוללות בהמשך. יש כאן תרמית בעולם הזה, ואסור לנו לעצום עיניים; אנחנו צריכים להכנס לזה בצורה חכמה. זה מעין תמרוך למשרד האנרגיה – כאשר מציעים הצעות כאלה לפחות תשאלו את השאלות הנכונות, מה הולכים לעשות עם הסוללות בהמשך חייהן? סמארטפונים מוחלפים אחת לשנתיים-שלוש, רק בשל הסוללה, וצריך לחשוב, מה ההוצאות ומה ההשלכות לגבי אגירה נרחבת בסוללות?

אגירה באופן כימי – אני אחד הבודדים בעולם שניסו ליישם DME בהקשר של תאי דלק, ואני שותף במעבדה לאומית בארה"ב שבה ניסו להשתמש ב-DME כאוגר אנרגיה, והניסיון לא הוכיח את עצמו לאורך השנים. יש אוגרי אנרגיה אחרים – אני יודע שאמוניה היא מעניינת, בעיקר בגלל נושא השינוע, זה מתאים למשל לאוסטרליה שרוצה להשתלט על שוק המימן העולמי, והם מצאו שהכי כלכלי להם לעשות זאת באמצעות אמוניה. אבל צריכים להיות זהירים ולבחון את כל ההיבטים, לא רק הכלכליים, אלא גם היבטים סביבתיים של פליטות ופסולת וגם היבטים של יעילות אנרגטית. דוגמה מעניינת לכך – הצוללות הישראליות מונעות באמצעות מימן ותאי דלק ועל כל צוללת יש 200 טון של מתכת שסופחת מימן, שמצליחה לספוח כ-1% בסך הכל (2 טון מימן). הנושא הזה משרת את הצוללות בהיבט אחר ובנוסף במים משקל לא מהווה בעיה ולפעמים אפילו להיפך, אבל זה לא היחס המשקלי שאנחנו רוצים לראות בתחום הרכב, שם מקובל יחס של כ-5.5%. הפתרונות צריכים להיות יצירתיים בכל מיני כיוונים.

ד"ר רחלי קרייסברג: אחת החוזקות של ישראל היא הנושא של חדשנות, ולכן הייתי ממליצה לא לנסות לפתור את בעיות משק האנרגיה העולמי, אבל להסתכל באופן רחב, לנסות להתאים את הפתרונות שצומחים כאן למדינות שצריכות פתרונות כאלה, וכן לנסות לעשות פיילוטים בשיתוף עם מדינות אחרות – ככה ניתן גם ללמוד

מה קורה בפועל במדינות אחרות ולא להסתמך על הצהרותיהן בלבד. בדרך זו ישראל השיגה הרבה בתחום אבטחת הסייבר, היא הציעה פתרונות לחברות גדולות ולמדינות שבהן הנושאים האלה משמעותיים.

יש מדינות גדולות מישראל, שבהן סביר שמנועי המימן, על כל המשמעויות התשתיות והכספיות, ינועו הרבה יותר מהר, אך אנחנו יכולים להנות מכך תוך יצירת שיתופי פעולה. לכן גם מאוד חשוב להכניס את רשות החדשנות לנושא הזה, ושיהיו מענקי מחקר לשיתופי פעולה בי-לטרליים ומולטי-לטרליים, גם דרך הפרויקטים של האיחוד האירופי (Horizon Europe, FCH-JU), כך שניתן יהיה לעשות מהר יותר פיילוט עם טכנולוגיה ישראלית. מומלץ לאפשר לגופים גדולים, אולי דרך סטארט-אפ ניישן סנטרל, לעשות סקאוטינג בארץ בתחום הזה; לייצר קשרים בין חברות הסטארט-אפ והטכנולוגיה הישראליות לבין נמלים ושדות תעופה; לעודד חברות סטארט-אפ ישראליות להשתתף בחממות ותחרויות (כמו, New Energy Challenge of Shell); ולתמרץ חברות רב-לאומיות לפתוח מרכזי פיתוח בישראל, לפיתוח משותף של טכנולוגיות.

עידן ליבס: אי אפשר לקבוע קטגורית שהנושא של מחזור סוללות לא קיים. נעשים מאמצים גדולים בעולם למחזור סוללות. עם זאת ברור שבסופו של דבר נדרש לתמהיל של פתרונות בשוק האנרגיה ולא נוכל להסתמך על סוללות בלבד.

לא תהיה בישראל אפליקציה אחת של מימן שתמשוך את כל השוק, ולכן יהיה צורך ביישום המשלב מימן בתחבורה, באגירת אנרגיה לטווחים שונים, וגם בתעשייה. עדיין צריך יהיה עוגן מרכזי לצריכה של מימן, לפחות בשלבים הראשונים, ובכל אחד מהיישומים יש אתגרים ותחרות עם פתרונות אחרים – בתחום האגירה בעיקר עם סוללות, במגזר התחבורה עם רכבים חשמליים, שכיום מתקדמים יותר מבחינת נצילות אנרגטית והיתכנות מסחרית, ובמגזר התעשייה - הגז הטבעי מהווה תחרות גם כחומר גלם וגם כמקור אנרגיה. שאלה פתוחה היא האם במגזר מסוים יש למימן יתרון משמעותי על פני פתרונות אחרים? והאם ניתן להצביע על צרכן גדול של מימן, שסביב הפעילות שלו ניתן יהיה לבנות את ההיבטים הנוספים של ייצור, שינוע ואחסון?

ד"ר גלעד פורטונה: הייתי שמח לשמוע מפרופ' ליאור אלבז, על ההשוואה בין הסוללות הקיימות היום לסוללות זרימה.

לגבי הובלת המימן – להבנתי, מימן ישרת בעיקר רכבים כבדים כמו רכבות ומשאיות ענק, ולא מכוניות פרטיות, ולכן לא נדרש פיזור נרחב של תשתיות תדלוק בכל הארץ, ולכן התשתיות יכולות להיות מרוכזות במקום או שניים בצפון, בדרום ואולי גם במרכז, וזה יתרון שיש למימן.

פרופ' אבנר רוטשילד: אני לא חושב שתחבורה מבוססת מימן מתאימה כעוגן ראשוני בישראל, זה מורכב מדי. צרכן גדול יכול להיות התעשיות הפטרוכימיות, למרות שכבר יש להן מקורות מימן. בתור חוקר של תחום המימן, מאוד מעניין בעיניי הפרויקט שמוקם ב-Neom, כפלטפורמה לבדיקה טכנולוגית.

פרופ' ליאור אלבז: ערב הסעודית לא הצטרפה רשמית להסכמי אברהם, אך אנחנו בהחלט מתכוונים לאזור הזה של העולם. יש דיונים בנושא הזה ברמה הלאומית, ואני בטוח שיהיה מעניין, ואם דברים ייעשו כמו שצריך יפתחו הרבה אפשרויות בשנים הקרובות.

הטכניון ואוניברסיטת בר אילן מובילים מהלך להקמת מרכז אנרגיה לאומי, והם עוסקים בכך מול משרד האנרגיה, ככה שדברים מתגבשים יפה ברמה הלאומית לתוכנית אחת כוללת.

לגבי סוללות זרימה – אין לי דעה מגובשת לגבי הטכנולוגיה הזאת. ראיתי לא מעט ניסיונות, עוסקים בזה בטכניון ובאוניברסיטת תל אביב, כאשר אחד הדברים שהבשילו היה פרויקט של פרופ' עמנואל פלד. הטכנולוגיה הזאת יכולה להתאים לאגירת אנרגיה נרחבת, אבל עדיין יש בעיות לא פתורות.

פרופ' גדעון גרדר: מימן מאוד מתאים ליישום בתחבורה כבדה, זה גם מתאים להיקף ייצור המימן שנעשה כאן וזה יכול להוות בסיס לאחר מכן להתפתחות בהיקף נרחב יותר. במקרה כזה גם הייצור של המימן יהיה מבוצר, וכאשר יש אלקטרוליזרים יעילים הם יכולים להיות ממוקמים במרכזי התדלוק ואין צורך בשינוע המימן. מה שצריך זה חשמל, והחשמל צריך להיות ירוק כדי שיהיה היגיון בדבר הזה, אבל חשמל הרבה יותר קל לשנע מאשר מימן.

לפני כשנתיים היה ביקור בטכניון של חברה סינית גדולה שסיפרה שיש להם בתי קברות גדולים של סוללות ליתיום-יון שאין להם מה לעשות איתן, ולטענתם התחבורה הכבדה, החל באוטובוסים ומשאיות ועד רכבות, אוניות ומטוסים, לא צריכה להתבסס על הנעה חשמלית אלא על מימן (כיום מדובר בסין בעיקר במימן חום).

בייצור מבוצר זה אפשרי היום בישראל וזה כיוון נכון יותר מאשר להקים פרויקטים ענקיים של אמוניה או של חומרים כימיים אחרים שדורשים המון חשמל. אין לנו בישראל כמות כזו של חשמל ירוק. צריך לגדול עם השוק ולא לנסות להשיג מיד יעדים שהם מאוד רחוקים, אלא לסמן יעדים מציאותיים וקרובים ליישום, ולכן תחבורה או אפליקציות צנועות אחרות יותר מתאימות וניתן יהיה להתמודד איתן.

ד"ר שלמה ורד: היה ניסיון בארץ עם סוללות זרימה על בסיס של ונדיום, של פרופ' דוד פיימן מאוניברסיטת בן-גוריון, זה היה מאוד מוצלח אבל לא הצליחו למסחר את זה. אני לא הייתי סותם את הגולל על הנושא הזה. פרופ' עמנואל פלד עסק רבות בנושא של אגירה במימן והוא פיתח reversible fuel cell – היו מייצרים מימן בשעות השיא של האנרגיה הסולרית, שומרים במיכל בלחץ אטמוספרי ללא דחיסה, ובשעות הערב היו עושים את המסלול ההפוך, וכל זה ביעילות גבוהה של יותר מ-80%. אני לא יודע למה זה ירד מהפרק. לגבי אגירה ארוכת טווח, היה גם פרויקט מעניין של פרופ' יואל ששון שעסק באגירה של מימן בחומצה.

הפוטנציאל החשוב ביותר של מימן הוא בתחבורה. אנחנו צריכים לייצר את המימן במקום שצורכים אותו, כיוון שכאשר נדרשים גם לשינוע ואחסון היעילות האנרגטית יורדת. יש כמה שיטות טובות לעשות את זה, גם ברכבים עם הספק גבוה, במשאיות, אוניות וצוללות. הפתרון של אחסון במתכת שהזכיר ליאור אלבז נוצר משמרנות היסטורית שקשורה בתוצרי לוואי של דלק גרעיני.

לגבי DME – בדרום קוריאה ניסו לפתח תעשייה שלמה סביב העניין שנועדה לשינוע ואגירה זולה של גז טבעי, שכן DME הוא סביבתי, קל לדחיסה, מתאים כדלק למערכות מבוססות סולר וגם מקור למימן. לכן לא הייתי מבטל גם את הרעיון הזה.

תחנות תדלוק מהירות של רכב חשמלי מצריכות כמות אדירה של חשמל, שאם לא תיוצר במקום היא תחייב הרחבה מאסיבית של רשתות חלוקה והולכה. כיום, לא נותנים את הדעת עדיין להשלכות הסביבתיות של רכב חשמלי וטעינה מהירה, למשל, הנושא של הקרינה באזור כזה. לכן, עדיף לכוון את התעשייה של המימן לייצור החשמל במקום, כך ניתן להגיע להישגים טובים, והחדשנות בישראל בהחלט יכולה לבוא לידי ביטוי גם בתחומים האלה.

עמיחי ברם: אנחנו מובילים את התהליך של הקמת תחנת התדלוק הראשונה של מימן בישראל, במסגרת פרויקט חלוץ של משרד האנרגיה. אנחנו מאמינים שתהיה תחבורה מבוססת מימן בישראל, למשאיות ואוטובוסים. מעבר לשיתוף הפעולה עם משרד האנרגיה, מנהלת תחליפי דלקים ומשרדים נוספים, אנחנו חושבים שנדרשים שני דברים נוספים לקידום הנושא – תמרוץ הבאה של רכבים המונעים במימן לארץ, כי בהתחלה זה באמת לא יהיה כלכלי, וקידום הרגולציה בתחום, גם לתחנות התדלוק וגם לרכבים.

ד"ר גלעד פורטונה: הגדלת היעדים של אנרגיה מתחדשת לעשור הקרוב הופכת את האגירה למאוד חיונית. צריך לקבל החלטות לגבי טכנולוגיית האגירה לתקופה הקרובה, ואחוז החדירה של מימן תלוי ביכולת שלו להשתלב בתחום האגירה. אני מציע לעשות עבודה מערכתית בנושא, בהובלת משרד האנרגיה והמשרד להגנת הסביבה, כדי לקבל החלטות במה להשקיע, על סמך הנתונים הקיימים. זה לא נכון להשאיר הכל פתוח ולהגיע ל-30% אנרגיות מתחדשות ללא פתרונות אגירה בשטח.

פרופ' ליאור אלבז: אני בעד מימן לתחבורה, רק היה לי חשוב להדגיש שמימן לא נולד כפתרון לתחבורה אלא לאגירה נרחבת של אנרגיה. ישראל עושה נכון בכך שהיא מתחילה בעקומת הלמידה – להקים תחנת תדלוק במימן זה דבר חשוב כדי לפתח את הרגולציה, ללמוד איך זה עובד ולסייע לפתרון בעיית הביצה והתרנגולת. אין חברת אנרגיה אחת בישראל שלא מסתכלת בצורה רצינית על מימן, כולל השקעות גדולות, וזה בדומה לעולם – Shell, שהיא חברת נפט ענקית, מקימה את רשת תחנות התדלוק המימניות באירופה במסגרת H2 MOBILITY.

צריך לעשות בדיקה מקיפה ולהסתכל בצורה ביקורתית על טכנולוגיות שקיימות בעולם. צריך לנצל את העובדה שאנחנו מתחילים מאוחר וללמוד מטעויות של אחרים וכך לחסוך זמן וכסף. הטכנולוגיות לא בהכרח מתחרות אלא משלימות, וצריך לדעת לנתב אותן ליישומים הנכונים.

זהו הזמן הנכון לנצל את הפוטנציאל של מימן למלא תפקיד מפתח בעתיד אנרגיה נקי, בטוח ובמחיר סביר. הסוכנות הבין-לאומית לאנרגיה (International Energy Agency (IEA)) הפיקה דו"ח ציון-דרך כדי לנתח את מצבה הנוכחי של טכנולוגיית המימן ולהציע הנחיות לפיתוחה העתידי. הדו"ח מגלה כי מימן נקי נהנה כרגע ממומנטום פוליטי ועסקי חסר תקדים, כאשר מספר התוכניות והפרויקטים ברחבי העולם מתרחב במהירות. מסקנת הדו"ח היא שזה הזמן להגדיל את היצע הטכנולוגיות ולהוזיל את העלויות כדי לאפשר שימוש נרחב במימן. ההמלצות הפרגמטיות הניתנות לממשלות ולתעשייה יאפשרו לנצל את המומנטום הגובר הזה במלואו. כדי שמדינת ישראל תוכל להשתלב במאמץ העולמי להגבלת ההתחממות הגלובלית ולהנות תוך כדי כך גם מתועלות כלכליות וסביבתיות, המליצו משתתפי הפורום על מספר צעדים שראוי לנקוט.

המלצות:

1. **מפת דרכים לשילוב מימן במשק הישראלי** – יש לבחון את הנושא בצורה ביקורתית בהתאם לתנאים הייחודיים של ישראל. בחינת הנושא צריכה לכלול התייחסות למגוון נושאים ובהם: חומרי הגלם לייצור, טכנולוגיות הפקה (הבשלות, היעילות והכלכליות שלהן), פתרונות שינוע ואחסון, יישומים רלוונטיים לישראל והחלק הראוי למימן בתמהיל הדלקים העתידי, תוך השוואת המימן לפתרונות חלופיים. בהתאם לממצאי הבדיקה ניתן יהיה לגבש אסטרטגיה לשילוב מיטבי של מימן במשק האנרגיה הישראלי.
2. **פיתוח רגולציה ייעודית למימן** – העדרה של רגולציה ייעודית והתייחסות למימן דרך הפריזמה של חומר מסוכן בלבד, מהווים צוואר בקבוק לפיתוח ויישום טכנולוגיות מימן בישראל. נדרשת רגולציה מתאימה לכל השלבים: ייצור, שינוע, אחסון ושימוש, הן בתחום התחבורה (גם לתחנות התדלוק וגם לרכבים), והן בתחום אגירת האנרגיה.
3. **מקומה של ישראל בסחר הבין-לאומי במימן** – מומלץ לבדוק את האפשרות של ישראל לעסוק בהובלת מימן באזורנו (דרך נמלי הים), ובמיוחד, לבדוק שיתוף פעולה אפשרי של ישראל כמדינת MENA עם מדינות באירופה או במזרח התיכון, בפרויקטים של ייצור אנרגיה ירוקה.
4. **פיתוח החדשנות הישראלית בתחום המימן** – פיתוח המו"פ בתחום המימן יכול לסייע ביישום הנושא בשוק הישראלי לצד פוטנציאל לתועלות כלכליות משמעותיות. רשות החדשנות, בהיותה גורם מרכזי במו"פ, ומשרד האנרגיה, צריכים להוות שחקני מפתח בתהליך. ניתן לקדם את התחום באמצעות פעולות שונות שיכולות להיות מיושמות במקביל:

- תמיכה במחקר אקדמי בתחום, עם דגש על קונסורציומים אקדמיים עם מטרות רלוונטיות לתעשייה, בדומה לאלו הקיימים באיחוד האירופי, בארה"ב ובמזרח.
- משיכת חברות זרות בתחום המימן להקמת מרכזי מו"פ בישראל, לפיתוח טכנולוגי משותף.
- לאפשר הפעלת פרויקטים ניסיוניים של חברות סטארט-אפ ישראליות עם חברות גלובליות.
- פיתוח שיתופי פעולה דו-רוב-צדדיים (למשל, באמצעות מימון מהאיחוד האירופי).
- עידוד סטארט-אפים ישראלים להשתתפות במאצים ובתחרויות בין-לאומיים בתחום המימן.
- הפצת מידע עדכני בנושא, כולל מיפוי תעשיית המימן הישראלית וסימון כיווני פיתוח אפשריים.

נספח 1: תוכנית פורום האנרגיה

13:00 **פתיחה** – פרופ' גרשון גרוסמן, ראש פרויקט פורום אנרגיה

13:10 נעמה שפירא ועידן ליבס, צוות אנרגיה וסביבה, מוסד נאמן

שילוב מימן במשק האנרגיה – סקירת רקע

13:20 רמי רשף, מנכ"ל חברת ג'נסל

פחם OUT, מימן IN

13:30 ד"ר רחלי קרייסברג, מנהלת מרכז ישראל-הולנד לחדשנות, שגרירות הולנד בישראל

מצב אנרגיית מימן בהולנד

13:45 אלון גולד, יועץ כלכלה וסחר של שגרירות פינלנד בישראל

תוכנית לאומית והתפתחויות בשימוש במימן בפינלנד

13:55 יוסי שביט, ראש יחידת הסייבר בתעשייה, המשרד להגנת הסביבה

סיכוני סייבר הטמונים בייצור, אחזקה ושינוע של מימן

14:25 **דיון פתוח**, תוך התמקדות בשאלות:

- מהן התועלות של שילוב מימן במשק האנרגיה?
- מה יכולה לעשות ממשלת ישראל לקידום הנושא?
- מה ניתן ללמוד בתחום זה ממדינות אחרות בעולם?

מפגשי פורום האנרגיה של מוסד נאמן (www.neaman.org.il)

2020	פורום האנרגיה ה-48: אנרגיה בעיר חכמה
2019	פורום האנרגיה ה-47: מערכות פוטו-וולטאיות משולבות אגירה לייצור חשמל מאנרגיית השמש
	פורום האנרגיה ה-46: הפקת אנרגיה מפסולת
2018	פורום האנרגיה ה-45: חסמים וזרזים להקמת מתקני ייצור חשמל פרטיים בישראל
	פורום האנרגיה ה-44: שיקולים סביבתיים, כלכליים וביטחוניים במיקום אסדת הטיפול בגז ממאגר לויתן
	פורום האנרגיה ה-43: הסרת הבידוד האנרגטי מעל ישראל
	פורום האנרגיה ה-42: היבטים פסיכולוגיים והתנהגותיים של חיסכון באנרגיה
2017	פורום האנרגיה ה-41: רכב היברידי וחשמלי
	פורום האנרגיה ה-40: גז טבעי לתחבורה בישראל
	פורום האנרגיה ה-39: מיקרוגרید ורשת חשמל חכמה בעידן של ייצור מבזר ואנרגיות מתחדשות
2016	פורום האנרגיה ה-38: צעדים ליישום לאחר אישור מתווה הגז בישראל
	פורום האנרגיה ה-37: ביטחון באספקת אנרגיה בישראל
	פורום האנרגיה ה-36: התייעלות אנרגטית בישראל: שדרוג מערכות
2015	פורום האנרגיה ה-35: אגירת אנרגיה בייצור חשמל
	פורום האנרגיה ה-34: ייצור משולב של חום וחשמל
	פורום האנרגיה ה-33: הרפורמה במשק החשמל בישראל
2014	פורום האנרגיה ה-32: ניצול מיטבי של הגז הטבעי המקומי, לרבות סוגיית הייצוא
	פורום האנרגיה ה-31: ביומסה לאנרגיה בישראל
2013	פורום האנרגיה ה-30: חשמל מאנרגיה סולארית בישראל
	פורום האנרגיה ה-29: עיר חכמה
	פורום האנרגיה ה-28: תחבורה יבשתית בת קיימא: היבטי אנרגיה וסביבה
	פורום האנרגיה ה-27: רשת חשמל חכמה כמנוע צמיחה לתעשייה בישראל
2012	פורום האנרגיה ה-26: ניצול פצלי שמן בישראל
	פורום האנרגיה ה-25: משק האנרגיה בישראל - חזון 2028
	פורום האנרגיה ה-24: אנרגית שמש לבנייני מגורים בישראל
2011	פורום האנרגיה ה-23: ניצול אנרגיית הרוח בישראל
	פורום האנרגיה ה-22: תחנת כוח גרעינית בישראל
	פורום האנרגיה ה-21: שיפוץ אנרגטי של בניינים
	פורום האנרגיה ה-20: מערכות פוטו-וולטאיות מחוברות-רשת למגזר הביתי והמסחרי
2010	פורום האנרגיה ה-19: חיסכון באנרגיה במערכות תאורה
	פורום האנרגיה ה-18: מיזוג אוויר סולארי בישראל
	פורום האנרגיה ה-17: השלכות חדירת גז טבעי למשק האנרגיה של ישראל
	פורום האנרגיה ה-16: רשת חשמל חכמה
2009	פורום האנרגיה ה-15: התייעלות אנרגטית ברשויות המקומיות בישראל
	פורום האנרגיה ה-14: רכב חשמלי והיברידי
	פורום האנרגיה ה-13: תחנות כוח סולאריות בישראל
2008	פורום האנרגיה ה-12: אנרגיה במשק המים
	פורום האנרגיה ה-11: בנייה חסכונית באנרגיה
	פורום האנרגיה ה-10: השפעות בריאותיות וסביבתיות של השימוש בגז טבעי בישראל
	פורום האנרגיה ה-9: מקומה של ישראל בשוק הביואתנול העולמי
2007	פורום האנרגיה ה-8: ניהול ביקושים ואספקה
	פורום האנרגיה ה-7: ביודלקים להפקת אנרגיה
	פורום האנרגיה ה-6: חיסכון במערכות מיזוג אוויר
	פורום האנרגיה ה-5: צרכי המחקר באנרגיה חלופית בישראל
	פורום האנרגיה ה-4: אנרגיית השמש להפקת חום
2006	פורום האנרגיה ה-3: הפקת אנרגיה מפסולת
	פורום האנרגיה ה-2: מערכות משולבות ליצירת חום וחשמל (קוגנרציה)
	פורום האנרגיה ה-1: חשמל ממערכות פוטו-וולטאיות

אנרגיה וסביבה



מוסד שמואל נאמן
למחקר מדיניות לאומית

טל. 04-8292329 | פקס. 04-8231889
קרית הטכניון, חיפה 3200003
www.neaman.org.il