

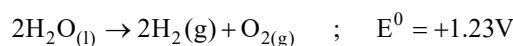
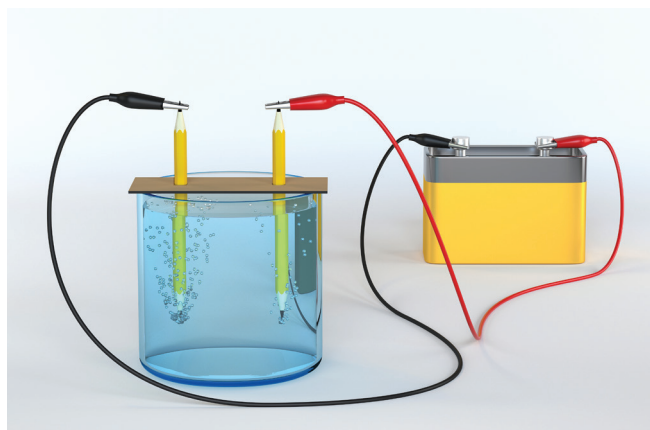
מימן, הדרך הקלה לכלכלת אנרגיה ירוקה

הילה קלרה הוניג¹

אחת הדרכים להפחתת פליטות של פחמן דו-חמצני היא המעבר לאנרגיות חלופיות, ובהן השימוש במימן ובתאי דלק מימניים כדרך להפקת אנרגיה שלא ממקורות דלק מחצביים. יישום השימוש במימן מתייחס לשורת תהליכים: מייצור המימן, דרך אחסונו והפצתו, ועד להפיכת המימן לאנרגיה חשמלית על ידי תא דלק. אחד האתגרים בתהליך הוא ייצור מימן "ירוק" שהפקתו אינה מערבת שימוש באנרגיות מתכלות. מוצע להפעיל מעגל של שימוש בחשמל העודף המופק מאנרגיות מתחדשות לביצוע אלקטרוליזה של מים, שאחד מתוצריה הוא מימן; המימן נאגר עד לשימוש בו בתאי דלק לייצור חשמל, והפליטה היחידה בתהליך היא מים. מעגל זה מְמַצֵּב את המימן כבעל תפקיד מפתח בעתיד אנרגיה נקי, בטוח וכלכלי.

לאורך השנים הפך מימן לחלק בלתי-נפרד מהתעשייה - החל בחקלאות, שם משתמשים במימן לייצור אמוניה (NH_3) לצורך הכנת דשנים; דרך תעשיית הפלדה, שבה נעשה שימוש במימן לחיזור הברזל; וכלה בתעשיית האנרגיה, שם נעשה שימוש רב במימן בתהליכי זיקוק הנפט, בשלב הטיהור מגופרית לצורך ייצור דלקים כמו בנזין ודיזל. ב-1960 נעשה השימוש המסחרי הראשון בתא דלק מימני. בסוכנות החלל האמריקאית נאס"א השתמשו בתא דלק מימני כמקור אנרגיה חשמלית ראשוני עבור החלליות אפולו וג'מיני. עשור לאחר מכן, בכנס של חברת גנרל מוטורס, עלה לכותרות המושג "כלכלת מימן"; כלכלה אנרגטית ירוקה שמטרתה להתמודד עם התנודתיות במחירי הנפט ועם רמות זיהום האוויר העולות. מדובר בנקודת מפנה עבור המימן; מלבד השימוש הנרחב שנעשה בו כחומר גלם, למימן יש פוטנציאל לשמש אבן דרך בכלכלת אנרגיה ירוקה. ואכן, במהלך שנות ה-70, סוכנות האנרגיה הבינלאומית (IEA) השיקה תוכנית לביסוס השימוש במימן ובתאי דלק מימניים, אשר תרמה משמעותית להרחבת המחקר סביב המימן וטכנולוגיות הקשורות בו ברחבי העולם.² במהלך שנות ה-90 עלתה המודעות למשבר האקלים והאנרגיה, המורכב מההתחממות הגלובלית וזיהום אוויר העולה בעקבות צריכה אנרגטית גוברת - אנרגיה שמקורה בדלקים מחצביים (נפט, פחם)

למימן ולאנרגיה יש היסטוריה משותפת ארוכה. בראשית המאה ה-19 התגלתה האלקטרוליזה, תהליך שבו מזרימים חשמל דרך מים, ואלו מתפרקים למימן וחמצן. כמה שנים לאחר מכן הומצא תא הדלק, טכנולוגיה שמטרתה לעשות את הפעולה ההפוכה לאלקטרוליזה-, כלומר, ליצור תגובה בין מימן וחמצן תוך יצירת חשמל.¹



תמונה 1. מערכת אלקטרוליזה של מים:
תהליך שבו מפרקים מים על ידי חשמל ליצירת חמצן ומימן

1. תלמידת מחקר לתואר שלישי בהנחיית פרופ' ליאור אלבז, המחלקה לכימיה, הפקולטה למדעים מדויקים, אוניברסיטת בר-אילן.



מדוע המימן נקרא נשא אנרגיה ולא דלק מימני?

נשא אנרגיה מוגדר כחומר או מערכת המשמשים מקור יעיל של אנרגיה (להבדיל מחום, הנחשב לצורה לא די יעילה). במילים "צורה יעילה של אנרגיה" מתכוונים להפקה מהירה של האנרגיה מהחומר או המערכת, בליווי אובדן אנרגיה כחום מופחת ככל האפשר.

בכך נשא אנרגיה שונה מ"דלק", שאותו לרוב שורפים לחום ומשתמשים בחום על ידי המרה לצורות אנרגיה אחרות, למשל חשמל.

מימן הוא היסוד הנפוץ ביותר בכדור הארץ, אך לא בצורתו הגזית, אלא כחלק מתרכובות (מים, אמוניה, גז טבעי). בצורתו הגזית, אפשר להפיק ממנו אנרגיה רבה פי שלושה מזו המיוצרת מדזל ומדלקים פחמימניים עבור יחידת מסה. מנגד, מימן הוא הגז הקל ביותר (מה שהופך אותו לדרך הקלה, תרתי משמע, לייצר אנרגיה ירוקה), אך צפיפות האנרגיה שלו בעבור יחידת נפח היא נמוכה מאוד.¹⁰

פרמטר נוסף שיש להביא בחשבון הוא הבטיחות. בניגוד לחומרי דלק אחרים, מימן אינו גז רעיל. בדומה לחומרי דלק, קיים במימן ממד של סכנה בכל הנוגע להצתה. טווח ההצתה הרחב של מימן ואנרגיית הצתה נמוכה הופכים אותו לדליק מאוד, אך בניגוד לחומרי דלק אחרים, הוא עובר דיפוזיה מהר (פי 14 קל יותר מאוויר) ולכן הפיזור שלו מהיר יותר מדלקים אחרים במקרה של דליפה.

כאמור, למימן שימושים רבים בתעשייה, ולכן קיים בשוק מגוון רכיבי בטיחות, כמו גלאים, וכללים ברורים המותאמים לעבודה עם מימן. שימוש נרחב יותר במימן יגדיל גם את הפיתוח בכל הנוגע לבטיחות העבודה עימו.

חשוב להבין כי מימן אינו מקור אנרגיה, אלא נשא אנרגיה. בניגוד לחשמל, מימן הוא נשא אנרגיה כימית, המורכב ממולקולות ולא רק מאלקטרונים. אנרגיה כימית היא אטרקטיבית מכיוון שאפשר לאחסן ולהוביל בצורה יציבה חומרים שנופיק מהם את האנרגיה, כפי שנעשה היום עם נפט, פחם וגז טבעי.

מכאן שעל מנת להרכיב את הפאזל של כלכלת מימן, יש לבחון כל חלק, החל מייצור המימן, דרך אחסונו והפצתו, ועד לשימוש הקצה - הפיכת המימן לאנרגיה חשמלית על ידי תא דלק.

שהשימוש בהם מעלה את פליטות גזי החממה. בעקבות כך כינס האו"ם את ועידת האקלים, ובה נדרשו מדינות העולם המפותחות להציג את יעדיהן ואת מדיניותן להורדת פליטות הפחמן.^{3,4} מלבד הצורך בהורדת פליטות הפחמן על מנת להאט את ההתחממות הגלובלית, השימוש בדלקים מחצביים יוצר תלות במדינות העשירות במחצבים אלו, ובכך הנחיצות בדלקים משפיעה גם על החופש והשלום בעולם, כפי שאפשר ללמוד מהמלחמה באוקראינה והשפעתה של רוסיה על מחירי הגז הטבעי.

כיום, בהתחשב בכל הגורמים, מספר רב של מדינות משקיעות מאמצים ומשאבים רבים בטכנולוגיות אנרגיה מתחדשת, כמו אנרגיה הידרואלקטרית, אנרגיה גיאותרמית, אנרגית רוח ושמשי.^{5,6,7} אך הבעיה הנשקפת משימוש נרחב באנרגיות מתחדשות היא הזמינות שלהן. הרוח אינה נושבת תמיד, ובלילות השמש אינה זורחת, ומכאן שעודף אנרגיה נוצר בשעות מסוימות וחסר בשעות אחרות. כדי ליצור כלכלה אנרגטית רציפה, המבוססת על אנרגיות אלו, יש לחשוב על פתרונות אגירת אנרגיה.⁸ ארצות הברית, יפן ומדינות האיחוד האירופי סקרו את הטכנולוגיות הזמינות לאגירת אנרגיה, וממצאיהן הצביעו על הטכנולוגיה היעילה, הנקייה והחסכונית ביותר - אלקטרוליזה של מים לייצור מימן. מדובר במעגל של שימוש בחשמל העודף שהופק מאנרגיות מתחדשות לביצוע אלקטרוליזה והפקת מימן. המימן נאגר, עד לשימוש בו בתאי דלק לייצור חשמל, כאשר הפליטה היחידה בתהליך היא מים. מעגל זה ממַצב את המימן כבעל תפקיד מפתח בעתיד אנרגיה נקי, בטוח וכלכלי.⁹



תמונה 2. כלכלת מימן ירוקה. עודף חשמל שנוצר ממקורות אנרגיה מתחדשים משמש לייצור מימן על ידי אלקטרוליזה



קשת הצבעים לייצור מימן

כידוע, מימן הוא גז חסר צבע, אך תהליך ההפקה שלו מסווג לשלוש אפשרויות עיקריות: מימן אפור, מימן כחול ומימן ירוק. כיום, הפקת מימן אפור היא הדרך הנפוצה ביותר לייצר מימן בתעשייה. מדובר בתהליך של פירוק גז מתאן (steam methane reforming) או גזפיקציה של פחם⁴. בשיטות אלו נוצרים גם פחמן דו-חמצני ופחמן חד-חמצני, מה שהופך את התהליך למזהם¹¹. בתהליך של הפקת מימן כחול, "לוכדים" את הפחמן הדו-חמצני ואת הפחמן החד-חמצני לתהליכי המשך בתעשייה (CO₂ capturing), ובכך הופכים את תהליך הייצור ליידידותי יותר לסביבה.

הפקת מימן ירוק היא השאיפה והבסיס לכלכלת מימן אידיאלית. המימן מיוצר על ידי אלקטרוליזה, פירוק של מים על ידי חשמל, באמצעות טכנולוגיה הנקראת אלקטרוליזר - כאשר החשמל מגיע מאנרגיות מתחדשות. בזמן שיא בייצור אנרגיה מתחדשת, למשל בשעה שתיים בצהריים, עודף האנרגיה מהלוחות הסולריים ינותב אל האלקטרוליזר שיפרק מים ויאגור את המימן שנוצר¹². בתהליכי הפקת מימן ירוק ישנן שיטות שנמצאות עדיין תחת מחקר, כמו ייצור מימן בתהליכים פוטו-ביולוגיים. במערכות פוטו-אנזימטיות, כמו אצות וחיידקים, נעשה שימוש באנרגיית השמש לפיצול מים לחמצן ומימן. לאחרונה נעשה שימוש נרחב בחיידקים כחוליים (cyanobacteria) בהרכבת פאנלים סולריים לייצור חשמל.

בשנת 2021, משרד האנרגיה האמריקאי יצא בפרויקט לעידוד פריצות דרך בתחום האנרגיות הירוקות (energy earthshot). במסגרתו הושקה התוכנית "1 ו 1", אשר מטרתה להוזיל את מחירו של מימן נקי לדולר 1, עבור 1 קילוגרם בעשור 13.

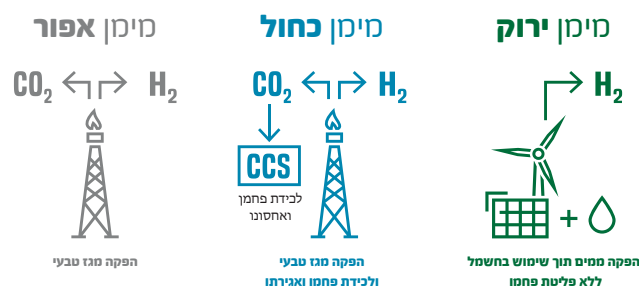
אחסון מימן

אמצעי האחסון המתאים ביותר תלוי בנפח שיש לאחסן, במשך זמן האחסון, במהירות הפריקה הנדרשת ובזמינות הגאוגרפית של אפשרויות שונות. כיום המימן מאוחסן בקנה מידה קטן, לרוב כגז דחוס או נוזל במכלים בעבור יישומים ניידים ונייחים. לאחסון בקנה מידה גדול ולטווח ארוך אפשר להשתמש במערות מלח קיימות (המשמשות כיום בעיקר לאחסון גז טבעי)¹⁴. אחסון גאולוגי הוא האפשרות הטובה ביותר כשמדובר בקנה מידה גדול ולטווח ארוך, בעוד שמכלים הם האפשרות המבטיחה ביותר כשמדובר בקנה מידה קטן ולטווח קצר. מחקרים רבים נעשים במטרה להקטין את המכלים ולשפר את עמידותם בלחצים גבוהים יותר, וכך לאפשר דחיסה גדולה יותר של מימן. פתרון נוסף, המצוי בשלבי מחקר ופיתוח, הוא אחסון מימן בחומרים במצב מוצק, כמו מתכות (הידרידים). חומרים אלה עשויים לאפשר צפיפות גדולה יותר של מימן מאחסון בלחץ אטמוספרי¹⁵.



תמונה 4. אחסון מימן במכלים עשויי סיבי פחמן

מימן - בדרך לאפס פליטות פחמן



תמונה 3. שלוש דרכים לייצור מימן. מימן אפור - Steam reforming, הדרך המזהמת. מימן כחול - זהה לייצור מימן אפור תוך לכידת הפחמן הדו-חמצני שנפלט. מימן ירוק - ייצור על ידי חשמל מאנרגיות מתחדשות

4 תהליך מבוקר של הפיכת פחם לגזים דליקים על ידי בקרת הטמפרטורה, הלחץ, כמות החמצן ושימוש בקיטור.



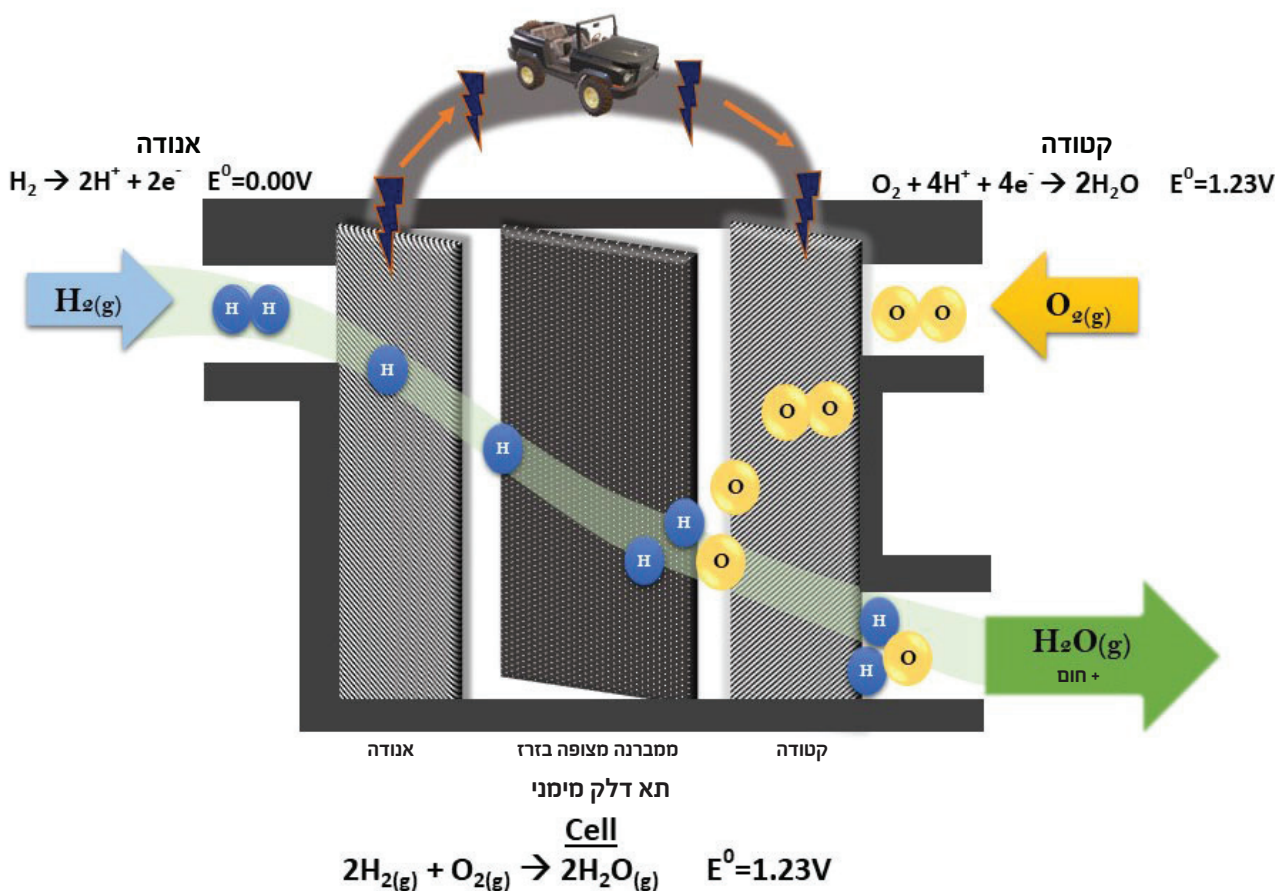
שינוע והפצת המימן

שינוע מימן נעשה כיום על ידי משאיות וספינות. בעתיד הכוונה היא ליצור מערכת צינורות, או להשתמש בתשתית הצינורות לשינוע גז טבעי על מנת להפיץ את המימן.¹⁶ האנרגיה הנדרשת להזרמתו של המימן תהיה גבוהה פי 4.5 מהאנרגיה הדרושה לשינוע גז טבעי. הובלה של מימן מזלי היא אפשרות שתגדיל את הצפיפות האנרגטית בעבור יחידת נפח, אך תהליך הניזול צורך אף הוא אנרגיה. לכן אפשרות השינוע של מימן דחוס היא הכלכלית ביותר כיום, ולצד הביקוש העולה, צופים שתחול ירידה בעלויות ההובלה לקילוגרם מימן.

תא דלק – ממיר אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית

על מנת להמיר את האנרגיה הגלומה במימן לאנרגיה חשמלית יש צורך בתאי דלק. תא דלק מורכב משתי אלקטרודות (אנודה וקטודה) וביניהן ממברנה שיש עליה שכבת זרז. המימן מוזרק לאנודה, שם הוא עובר תגובת חמצון ומתפרק לפרוטונים (H^+) ואלקטרונים. האלקטרונים עוברים דרך מעגל חיצוני אל הצרכן, והפרוטונים עוברים דרך הממברנה אל הקטודה, שם החמצן מהאוויר עובר חיזור, ונוצרים לנו מים.

עיקר העלות של תא הדלק טמון בשכבת הזרז. כדי שהתגובה תתרחש ביעילות ובמהירות, יש צורך בזרז בתגובה הקטודית (תגובת חיזור החמצן). כיום הזרז הנפוץ בתא דלק הוא סגסוגת של פלטינה, אך מדובר במתכת יקרה וכתוצאה מכך הטכנולוגיה מתייקרת.¹⁷



תיאור סכמתי של תא דלק מימני. סרטון מפורט אפשר למצוא באתר [מכון דוידסון](#)



בשנה הקרובה תחנת תדלוק במימן, במטרה לעודד ייבוא מכוניות הפועלות בעזרת תאי דלק ושימוש בהן.²⁰ כך מצטרפת גם מדינת ישראל למהפכת המימן.

ראוי לציין כי קיים שימוש נוסף של מימן כמקור דלק על ידי שריפתו במנועי בעירה פנימית. בשריפה של המימן עלולים להיווצר גזים מזהמים בעקבות הימצאות של פחמן דו-חמצני באוויר, ובחרנו שלא להרחיב על אודות שימוש זה במאמר.

מלבד ישראל, מימן מקבל רוח גבית חזקה ממדינות העולם

התמיכה בשימוש במימן מגיעה מממשלות המייבאות ומייצאות אנרגיה, כמו גם מגורמים כמו ספקי חשמל מאנרגיות מתחדשות, חברות נפט, חברות חשמל, יצרניות רכב וערים. השקעות במימן יכולות לסייע בפיתוח טכנולוגי ותעשייתי חדש בכלכלות העולם וליצור מקומות עבודה נוספים.⁵



תמונה 5. רכבים המונעים על ידי תאי דלק מימניים: משאית של חברת "Hyundai" (ימין), מכונית של "BMW" (שמאל)



תמונה 6. יפן מקדמת כלכלת מימן: שימוש באוטובוסים מונעי תאי דלק מימניים (ימין), הליפיד האולימפי בטוקיו 2020 דלק על ידי מימן שהופק מאנרגיות מתחדשות (שמאל)



בתחום תאי הדלק נעשה מחקר ופיתוח רב, בעיקר סביב חיפוש זרזים חלופיים לתגובת חיזור החמצן. בטבע, תגובת חיזור החמצן מתרחשת על ידי אנזימים מבוססים מתכות נפוצות, כמו ברזל ונחושת, והם משמשים השראה (biomimicking) ליצירת זרזים חלופיים בתאי דלק.¹⁸ קיימים מספר סוגים של תאי דלק, הנבדלים בחומר הדלק (מימן, מתאנול) ובתווך שבין האלקטרודות (ממברנה חומצית/בסיסית); השכיחים ביותר שבהם הינם תאי דלק מימניים בטמפרטורה נמוכה (כ-80 מעלות צלזיוס), המתאימים למגוון רחב של יישומים בתחבורה, כמו רחפנים, ואף משמשים מקור בלעדי לאספקת אנרגיה.¹⁹

יונדאי ויצרניות רכב מובילות אחרות מפתחות את מכוניות העתיד שלהן על בסיס תאי דלק. מכוניות אלו יפחיתו משמעותית את הזיהום בתעשייה זו, מאחר שהפליטה היחידה שלהן היא מים. בוועידת האנרגיה של כלכליסט הכריזה חברת סונול שתקים

5 חברת TEVVA, שהוקמה על ידי הישראלי אשר בנט, מייצרת משאיות היברידיות המשלבות סוללות ותאי דלק מימניים כדי להאריך את משך הנסיעה ובכך לאפשר נסיעות למרחקים ארוכים יותר.



תמונה 7. השקת משאית המימן הראשונה בישראל המימן הראשונה בישראל

על ידי בניית תוכניות לימוד לבתי הספר, והן על ידי קידום ומימון חברות הזנק בתעשייה וקבוצות מחקר באוניברסיטאות.²⁵ פעולות כמו קביעת **יום המימן** (8 באוקטובר, המסה המולרית של מימן, 1.008 גרם/מול), ושימוש של הצבא האמריקאי ברכבים מונעי מימן תורמים לחשיפה והטמעה של רעיון כלכלת המימן בקרב האוכלוסייה.²⁶

ראינו כי היו גלי סרק להתעניינות במימן. הפעם יכול להיות אחרת לצד ההתקדמות הגוברת בפיתוח טכנולוגיות אנרגיה דלוח-פחמן ושימוש בהן, השתפרה ההבנה בנוגע לנחיצותו של המימן. ככל שעלות פיתוח הטכנולוגיות לייצור אנרגיות מתחדשות יורדת, והמודעות לאורך להתמודד עם שימי האקלים וזיהום האוויר עולה, המימן מקבל תפקיד משמעותי יותר. מדובר בחלון הזדמנויות אמיתי להטמעת מדיניות ולנקיטת פעולות במגזר הפרטי והציבורי בדרך אל כלכלת מימן.

בראש צועדת יפן, שאחרי אסון הגרעין בפוקושימה משקיעה משאבים רבים לביסוס כלכלתה האנרגטית על מימן.²¹ ב-2021, כינתה יפן את המשחקים האולימפיים שאירחה "אולימפיאדת המימן", מכיוון שהכפר האולימפי ומרבית האוטובוסים התבססו על אנרגיה מתאי דלק מימניים.²² גרמניה, שבשנים האחרונות מבססת את עצמה כמעצמת אנרגיות מתחדשות ומבינה את החשיבות של אגירת אנרגיה ירוקה. לכן השימוש במימן משמר את הקו הירוק, ובימים אלו פועלות בגרמניה רכבות המונעות על ידי תאי דלק מימניים. רכבות אלו יכולות לנסוע מרחק של כ-1000 קילומטר במהירות של כ-110 קמ"ש, על מכל מימן בודד. במקביל, החל מחקר סוציו-מחקרי (HyTrust) בנושא ההשפעה של מימן ותאי דלק על התחבורה.^{23, 24} כאמור לעיל, משרד האנרגיה האמריקאי פועל במגוון רחב של תחומים כדי לפתח ולהנחיל את השימוש במימן ובתאי דלק - הן



תמונה 9. תחנת תדלוק של חברת "Shell" המאפשרת תדלוק במימן לרכבים המונעים על ידי תאי דלק בקליפורניה



תמונה 8. רכבת חשמלית בגרמניה מונעת מימן

- 1 Bockris, J., O'M. (2013). The hydrogen economy: Its history. *International Journal of Hydrogen Energy* 38, 6, 2579-2588.
- 2 Scott, R. (1994). The history of the International Energy Agency: the first twenty years. Volume 1: *Origins and structures of the IEA*.
- 3 Brown Weiss, E. (1992). United Nations conference on environment and development. *International Legal Materials* 31.4. p. 814-817.
- 4 UNFCCC. (2015, December). [Paris agreement](#). In *Report of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change* (21st Session, 2015: Paris).
- 5 Nagashima, M. (2018). [Japan's hydrogen strategy and its economic and geopolitical implications](#). Paris, France: Ifri.
- 6 IPHE (International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy) (2019), [Country Updates](#).
- 7 Tollefson, J., (2008). [Car industry: Charging up the future](#). *Nature*, 456, 436–440.
- 8 Tollefson, J., (2008). [Car industry: Charging up the future](#). *Nature*, 456, 436–440.
- 9 Kar, S., K., Harichandan, s. and Roy. B. (2022). [Bibliometric analysis of the research on hydrogen economy: An analysis of current findings and roadmap ahead](#). *International Journal of Hydrogen Energy*. 47,20, 10803-10824.
- 10 Abe, I. (2007) Physical and chemical Properties of Hydrogen. *Office Terra, Japan*.
- 11 IEA (International Energy Agency) (2018), *World Energy Investment*, IEA, Paris.
- 12 Ruth, M.F., Jadun, P. and Pivovar, B. (2017), [H2@Scale: Technical and economic potential of hydrogen as an energy intermediate](#). presentation at the Fuel Cell Seminar and Energy Exposition, Long Beach, CA, 9 November, 2017.
- 13 US DOE (United States Department of Energy), (2021). [Energy Earthshots –Hydrogen shot](#).
- 14 IAE (Institute of Applied Energy) (2019). [Economical evaluation and characteristic analyses for energy carrier systems, Final Report 2016](#). Japan, updated in 2019. Also presented in: Y. Mizuno et al., (2019). Economic analysis on International Hydrogen Energy Carrier Supply Chains. *Journal of Japan Society of Energy and Resources*, 38, 3, pp.11.
- 15 Reuß, M. et al. (2017). [Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model](#). *Applied Energy*, 200, pp. 290–302.
- 16 Jones, D. R., Al-Masryb, W. A. and Dunnill, C. W. (2018). Hydrogen-enriched natural gas as a domestic fuel: an analysis based on flash-back and blow-off limits for domestic natural gas appliances within the UK. *Sustainable Energy & Fuels*, 2, pp. 710–23.
- 17 US Department of Energy. (NA). [Fuel Cell Electric Vehicle Emissions](#). *Alternative Fuels Data Center*.
- 18 Honig, H., C., et al. (2020). Enhancement of the oxygen reduction reaction electrocatalytic activity of metalcorroles using contracted cobalt (iii) CF 3-corrole incorporated in a high surface area carbon support. *Chemical Communications*, 56,61, p. 8627-8630.
- 19 US Department of Energy (DOE) Hydrogen and Fuel Cells Program: [Annual Merit Review and Peer Evaluation \(DOE Hydrogen and Fuel Cells Program, 2009 through 2019\)](#).
- 20 ברויטמן, ד. (2021). סוגול תקים תחנת דלוק מימן ראשונה במפרץ חיפה במהלך 2022. כלכליסט 29.11.21
- 21 "Country Update for Japan," ([International Partnership for Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, April 2019](#)).
- 22 International Olympic Committee, (2020). At [Tokyo 2020, hydrogen shows promise of a carbon-free future](#).



- 23 Vanessa Dezem, "[Germany Turns to Hydrogen in Quest for Clean Energy Economy](#)", (Bloomberg, August 2, 2019).
- 24 HyTrust - Socioscientific reseach (NA). [Project research of the effects on society resulting from the introduction of hydrogen and fuel cell technology in the mobility sector.](#)
- 25 Office of energy efficiency and renewable energy (2023). [U.S National clean Hydrogen strategy and roadmap.](#)
- 26 US department od energy (NA). H2@Scale - [Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office](#)



מן המאמר אל שדה ההוראה

המאמר עוסק בשימוש במימן כאחד הפתרונות להפחתת פליטות פחמן דו-חמצני מתהליכי הפקת אנרגיה לייצור חשמל, לתחבורה או לתעשייה, ובהקשר זה כדאי ללמדו בחטיבות הביניים. הנושא של השפעת השימוש באנרגיה על הפרט, על החברה ועל הסביבה מוגדר אומנם בתוכנית הלימודים כהרחבה, אך בימים אלה הוא חיוני בהתייחס לקשר בין הפקת אנרגיה ושימוש באנרגיה לשינוי האקלים.

הנושא מתאים לכיתות ח' ו-ט' בהקשר של הפקת אנרגיה חשמלית או תהליך דלק כמקור אנרגיה בכלי תחבורה ובתעשייה. הבנת הנושא של הפקת המימן ושימוש במימן בתאי דלק מצריכה ידע והבנה של מושגים ותהליכים הנלמדים בנושאים הכימיים ובנושא האנרגיה, כמו: מבנה האטום, יסודות, תגובות כימיות, תהליך יצירת יונים, אלקטרוליזה וזרזים. כיצד משלבים בהוראה את נושא הפקת האנרגיה ממימן, הצעות:

א. לימוד הנושא כהרחבה לנושא תגובות כימיות: תגובות כימיות (התרכבות ופירוק כימי) שמעורבים בהן יונים. נהוג להציג את האלקטרוליזה כאחת הדרכים לפירוק כימי. לימוד התהליך מלווה בדרך כלל בהתנסות מסוג הדגמה של פירוק מים לחמצן ומימן. להדגמה אף נלווים: (1) הסבר למה שמתרחש ברמה החלקיקית (משיכה חשמלית, הפיכת יונים לאטומים או תגובות המשך); (2) התייחסות ליישומים התעשייתיים של תהליך האלקטרוליזה להפקת גזים כמימן או חמצן ולציפוי גופים במתכות.

הקשר הכימי הנוצר בקתודה של תא הדלק בין יוני המימן לחמצן מן האוויר אינו פשוט, שכן אינו קשר יוני ולא קוולנטי אלא קוטבי. עם זאת, אפשר להתייחס אליו בהקשר של התרכבות.

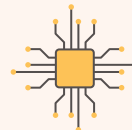
ב. כחלק מלימוד נושא האנרגיה בכיתה ח' - בהקשר של הפקת אנרגיה חשמלית או דלק מימני כמקורות אנרגיה חלופיים בכלי תחבורה ובתעשייה.

1. חשוב לציין שאצל חלק מן החברות המספקות ציוד מעבדתי לבתי הספר אפשר למצוא מערכת מדגימה של תא דלק מימני הכוללת "אלקטרוליזר" (מערכת שמתבצעת בה אלקטרוליזה) ומופקים בה המימן והחמצן המוזרמים לתא דלק שפעולתו מניבה זרם חשמלי המפעיל מנוע או נורה. מומלץ להצטייד במערכת כזו ולהדגים בעזרתה את אופן הפקת המימן והשימוש בו ליצור חשמל

2. קיימת גם [משימת אוריינות](#) בנושא "תא דלק", שאותה תוכלו להפעיל ולהתאים לתלמידים.

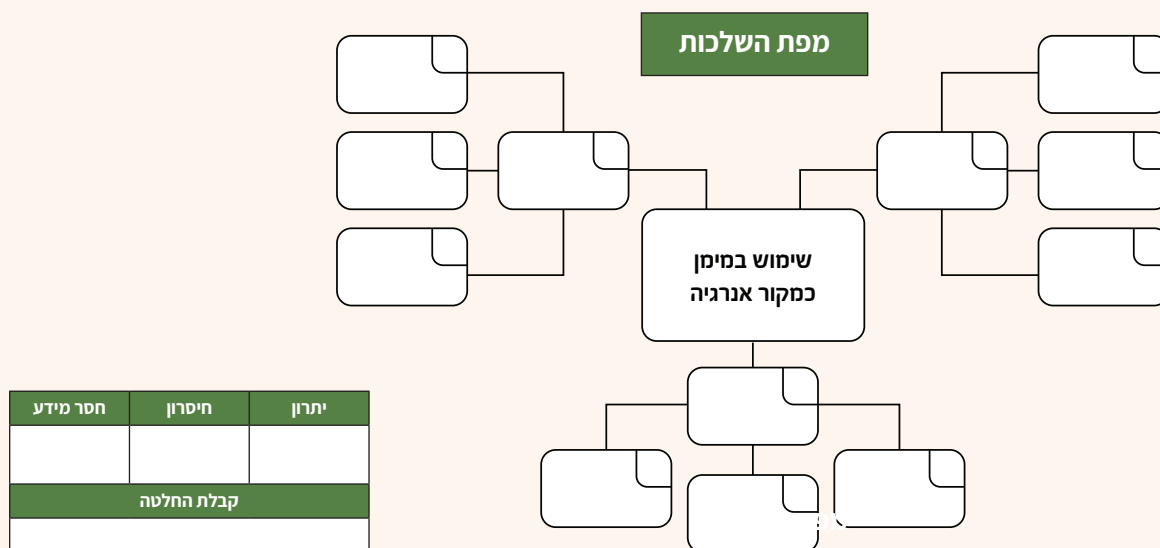
3. בהקשר של שילוב נושא השימוש במימן במהלך למידת נושא האנרגיה כדאי לדון בשאלות כמו:

- היתרונות והחסרונות של שימוש במימן להפקת אנרגיה בהשוואה לתהליכים אחרים.
- מדוע מימן נחשב נשא אנרגיה ופתרון טוב ל"אגירת אנרגיה"?
- כיצד השימוש במימן יכול להיות פתרון למצב של הפסקת חשמל ממושכת שמקורה בהפקת חשמל על ידי חברת חשמל? מה נדרש לשם כך מבחינת תכנון, הקמת תשתיות והיבטים נוספים?
- מה מגביל את הפצת השימוש במימן לייצור חשמל?





ג. שיעור מקשר: "מה בין כימיה לפיזיקה ולסביבה" - השיעור יכול לכלול לימוד על מימן כדלק, ממקורות מידע שונים, תוך הדגשת ההיבטים בכימיה ובפיזיקה שהוצעו בהצעות הקודמות, לרבות ניתוח של השלכות סביבתיות אפשריות (חיוביות ושליליות) כתוצאה משימוש במימן כדלק. בשיעור זה אפשר לעשות שימוש ב"מפת ההשלכות" ולחשוב על השלכות אפשריות מסדרים ראשון, שני ושלישי של המעבר לכלכלת מימן.



[ראו דוגמה למפת השלכות על סוגיה סביבתית](#)

מקורות נוספים למורה:

בהרצאתו של פרופ' ליאור אלבז מאוניברסיטת בר אילן אפשר ללמוד על המחקר והפיתוח [בתחום תאי הדלק בישראל](#).

הרחבה על השימוש במימן בתאי דלק באתר ["אנרגיה בהיבט רב תחומי"](#) מאת ד"ר רמי אריאלי. להעמקה (באנגלית) - קיימים כמה סוגים של תאי דלק; במקביל ללימוד על תגובות חמצון-חיזור, אפשר לסקור את [הסוגים השונים של תאי דלק](#) (תא דלק המורכבים ממברנות שונות, [חומצית](#) או [בסיסית](#), [תא דלק קרמי](#), תא דלק המשתמש [במתאנול](#) כחומר דלק).

[באתר משרד האנרגיה האמריקאי](#) (באנגלית) אפשר למצוא מגוון חומרי לימוד והסבר על אנרגיות מתחדשות באופן כללי, ובתוכו על אודות המימן בפרט.

