

אנרגיה חיובית

מסוללות נטענות ועד תאי דלק: אנרגיה
אלקטרוכימית כאחת החלופות המרתקות
והירוקות למנועי הבעירה



יעקב וילנצ'יק, דוד אנדלמן
ועמנואל פלד



הקדמה

מחירי הנפט המאמירים והמודעות הגוברת לאיכות הסביבה העלו את סוגיית ייצור האנרגיה והשלכותיה על סדר היום הציבורי, ובעוצמה רבה. מקבלי ההחלטות ברמה הבינ-לאומית מתחילים להכיר בכך שהמשך שימוש מסיבי במנועי בעירה הצורכים דלק פחמני ממקור מאובן (בנזין, סולר, גז טבעי, פחם) עלולים לגרום לנזק אקולוגי גלובלי, המתבטא לדעת רבים כבר כעת בשינויי מזג האוויר, בהמסת קרחונים ועוד. נוסף על כך, לפי כל ההערות יאזל הדלק הפחמני, או לפחות מאגריו ידולדלו והוא יתייקר במידה ניכרת במאה הנוכחית. נסיבות אלו דחפו בעשורים האחרונים מספר רב של מיזמים וחברות "ירוקות" לחיפוש אחר מקורות אנרגיה חלופיים. במאמר זה נסקור את החידושים והאתגרים העומדים לפני התקנים אלקטרוכימיים דוגמת תאי דלק וסוללות חשמליות נטענות, שיוכלו להחליף בעתיד את מנוע הבעירה. זאת ועוד, נראה כיצד הבנה של עקרונות פיזיקליים מתחום התרמודינמיקה, ובעיקר מושג האנטרופיה, הכרחית לפיתוח יישומים חדשניים.

אנרגיה מהי?

בעבור מרבית האנשים למושג האנרגיה משמעות אינטואיטיבית, אשר לרוב מתקשרת ליכולת לבצע פעולות מכניות או חשמליות. מעטים האנשים המכירים את ההגדרה המדויקת (המסובכת למדי) של מושג פיזיקלי זה. המילה "אנרגיה" (Energy) הושאלה עוד בעת העתיקה מהמילה היוונית אֶנְרְגִיָה (Energeia) שמובנה מערכת או מצב בפעולה. רק בתחילת המאה ה-19 המדען הבריטי תומס יאנג (Young) ואחרים השתמשו לראשונה במילה זו בהקשרה המדעי כדי לתאר את מה שמכונה כיום "אנרגיה קינטית" – אנרגיה הקשורה לתנועה של חלקיקים.

למעשה, עקרון שימור האנרגיה הוא זה המגדיר מהי אנרגיה, ולכן יש להבהירו תחילה. העיקרון קובע כי בכל מערכת סגורה המבודדת מסביבתה ישנו גודל בשם "אנרגיה", השומר על ערך מספרי קבוע לאורך זמן. ההסבר הפיזיקלי לכך שהאנרגיה נשארת קבועה קשור קשר עמוק למושג הזמן, ובפרט לעובדה שהתנהגות חוקי הטבע, הקובעים את התנהלות העולם בהווה, תישאר כזו בעתיד בדיוק כפי שהיתה בעבר. במילים אחרות, האנרגיה נשארת קבועה מכיוון שלחוקי הטבע לא אכפת מה התאריך, השעה או הדקה...

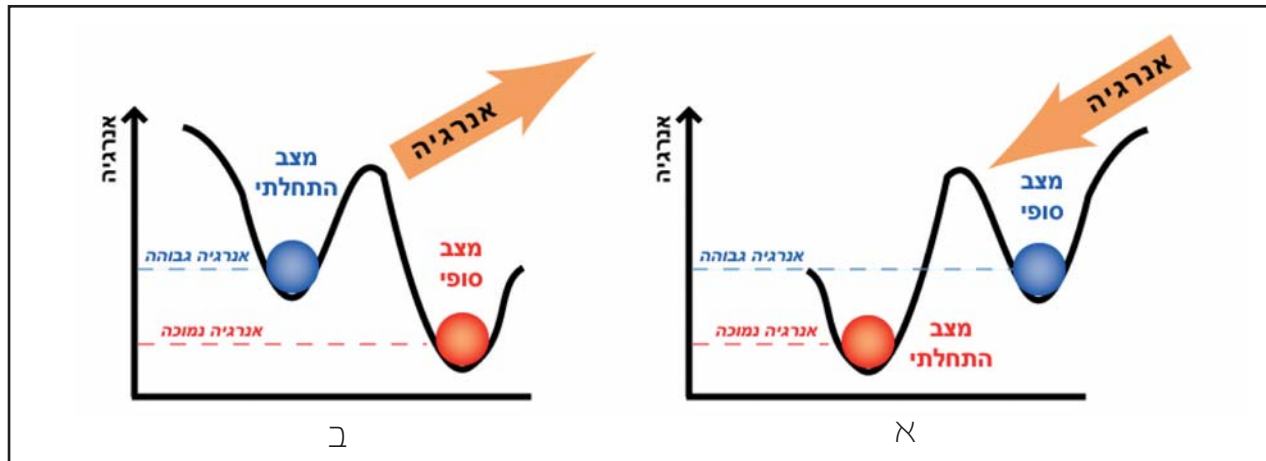
חישוב האנרגיה הכללית דורש חישובים מסובכים אשר

יכללו, לדוגמה, את מהירות כל החלקיקים במערכת, את המסה שלהם, את מטענם החשמלי, את מיקומם ביחס לחלקיקים האחרים, ועוד. האנרגיה הכללית מורכבת מתת-רכיבים הנקראים "צורות אנרגיה", ולהם משמעות פיזיקלית שונה. לדוגמה, האנרגיה המתארת תנועת חלקיקים נקראת אנרגיה קינטית; זו הלוקחת בחשבון את כוח המשיכה בין כל שני גופים בעלי מאסה (למשל בין כדור הארץ והשמש) נקראת אנרגיה גרוויטציונית; החלק הכולל את המשיכה או הדחייה של חלקיקים בעלי מטען חשמלי נקרא אנרגיה אלקטרוסטטית, וכן הלאה. חוק שימור האנרגיה קובע כי סך האנרגיה של מערכת המבודדת מסביבתה וללא אפשרות לחילופי אנרגיה עמה, יישאר קבוע, אך החלקים השונים בביטוי זה (צורות האנרגיה השונות) יכולים להיות מומרים זה בזה. כך אנו יכולים להפיק צורה אחת של אנרגיה מצורות אנרגיה אחרות. לדוגמה, בתחנת הכוח החשמלית, האנרגיה הכימית האגורה בדלק (מזוט, פחם או גז טבעי) מומרת לחום (תוך כדי שרפה עם החמצן באוויר) שבאמצעותו מחממים מים ויוצרים קיטור. לקיטור הנמצא בלחץ גבוה יש אנרגיה קינטית רבה המשמשת לסיבוב טורבינות גדולות, המפיקות חשמל בדומה לדינמו שמפיק חשמל מסיבוב גלגל האופניים.

אנרגיה אלקטרוכימית

מולקולה היא היחידה הבסיסית ביותר של החומר, הבנויה מאטומים הקשורים ביניהם בקשרים כימיים. קשרים אלו קובעים את המצב האנרגטי של המולקולה, כלומר את האנרגיה הכימית שלה. בתהליכים כימיים אפשר לבצע ריאקציה שבה כמה מגיבים יוצרים מולקולה חדשה. כאשר המצב האנרגטי של התוצרים גבוה יותר מזה של המגיבים, פירושו של דבר שהושקעה אנרגיה ממקור חיצוני (איור 1א). לעומת זאת, כאשר למצב הסופי יש אנרגיה כימית נמוכה יותר מאשר למגיבים, הפרש האנרגיה יומר לצורת אנרגיה אחרת, דוגמת חום שמשתחרר לסביבה (איור 1ב). הפרש זה נקרא האנרגיה של התהליך הכימי.

בהתקנים אלקטרוכימיים האנרגיה הכימית של התהליך מומרת לאנרגיה חשמלית ולחום, ואפשר לחלקם לשני סוגים: סוללות חשמליות ותאי דלק. הסוללות מוכרות לכול. את הסוללה החשמלית המציא הפיזיקאי האיטלקי אלסנדרו וולטה (Volta) לפני למעלה מ-200 שנה והיא משמשת במגוון שימושים בחיי היום-יום.



איור 1. סכמת אנרגיה.
 א. המערכת עוברת ממצב התחלתי בעל אנרגיה נמוכה למצב סופי בעל אנרגיה גבוהה תוך כדי שימוש באנרגיה חיובית.
 ב. המערכת עוברת ממצב התחלתי בעל אנרגיה גבוהה למצב סופי בעל אנרגיה נמוכה יותר, והאנרגיה העודפת תשתחרר לסביבה.

מחומרים בעלי יכולת לעבור תהליך של חיזור, כלומר, לקבל אלקטרונים, דוגמת תחמוצת מנגן (Manganese Oxide), ליתיום קובלט אוקסיד (LiCoO_2) ותחמוצת עופרת (PbO_2). בין האנודה לקתודה קיים חוצץ נקבובי אשר רווי באלקטרוליט, הנקרא גם ספרטור.

כאן המקום להבהיר את ההבדל בין הולכה חשמלית במתכות ובין הולכה יונית באלקטרוליט. מתכת היא חומר מוליך חשמל משום שתחת הפרש פוטנציאל חשמלי מתאפשר בה זרם של אלקטרונים (ללא תנועה של האטומים). אלקטרוליט, לעומתה, הוא מבודד שלא מאפשר זרימה של אלקטרונים אך היונים עצמם יכולים לנוע דרכו. בזמן הפעלת ההתקן החיצוני (סגירת המעגל החשמלי) יונים נעים דרך החוצץ הספוג באלקטרוליט, וזרם זה נקרא זרם מיגרציה. האלקטרוליט הוא לרוב תמיסה נוזלית (מימית או אל-מימית) או במצב ג'ל (gel). בתאים מימיים משתמשים בחומצות או בסיסים, ואילו בתאי יון-ליתיום משמשים בתמיסות אל-מימיות המכילות מלחי ליתיום. הסוללות המכילות תמיסת אלקטרוליט מחייבות בניית מארז סגור הרמטית על מנת למנוע דליפה, נידוף או חדירת מים ואוויר. איור 3 מדגים שתי צורות סוללות נפוצות.

תהליך הפריקה של סוללת יון-ליתיום, שבה מומרת אנרגיה כימית לחשמל (ראו איור 2), מתרחש בו זמנית באנודה ובקתודה. באנודה נוצרים יונים ואלקטרונים באופן ספונטני (תהליך החמצון). היונים נעים דרך האלקטרוליט

לעומתן, תאי דלק מופרים פחות משום שעד כה השתמשו בהם בעיקר בתוכניות חלל. אך בעשרות השנים האחרונות מושקעים מאמצים רבים ליישום תאי הדלק בייצור חשמל בתעשיות הרכב והמיקרו-אלקטרוניקה, כפי שניווכח בהמשך.

איך עובדת סוללה חשמלית?

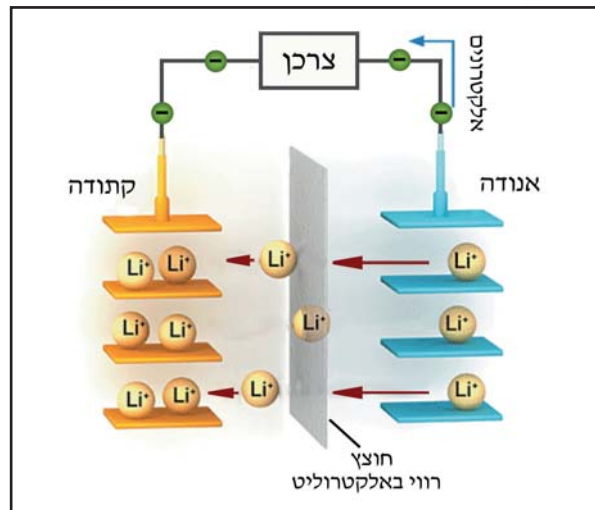
סוללה היא יחידה עצמאית (תא) שבתוכה אגורה אנרגיה כימית אשר אפשר להמירה לאנרגיה חשמלית לפי דרישה. נהוג להפריד בין סוללות ראשוניות, שאינן ניתנות לטעינה, ובין סוללות נטענות (הנקראות גם מצברים). איור 2 מתאר סכמה של מבנה סוללה נטענת מסוג הנקרא סוללת יון-ליתיום. האנרגיה החשמלית נוצרת באמצעות תגובות כימיות שמתרחשות בו-זמנית בשתי האלקטרודות (קטבי הסוללה). האנודה היא הקוטב השלילי ("המינוס" בסוללה), ואילו הקתודה היא הקוטב החיובי ("הפלוס").

כיום נמצאות בשימוש מספר רב של סוללות הנבדלות ביניהן בחומרים שמהם מיוצרות האלקטרודות, בסוג האלקטרוליט וכן בקיבולת האנרגיה שלהן, בצורתן ובמתח העבודה שלהן. אופן הפעולה הבסיסי שלהן, כפי שמודגם באיור 2 בעבור סוללת יון-ליתיום, דומה. האנודה מכילה חומרים המתאפיינים ביכולת גבוהה לעבור תהליך של **חמצון**. כלומר, היא בנויה מחומרים דוגמת ליתיום, אבץ ועופרת התורמים בקלות אלקטרונים. מנגד, הקתודה בנויה

שהמעגל סגור, וכל עוד נותר חומר מגיב באנודה ובקתודה. חלק ניכר מהאנרגיה שמשתחררת בתגובה זו מומר לאנרגיה חשמלית באמצעות האלקטרון שעבר במעגל החיצוני, וזוהי האנרגיה שהסוללה מספקת.

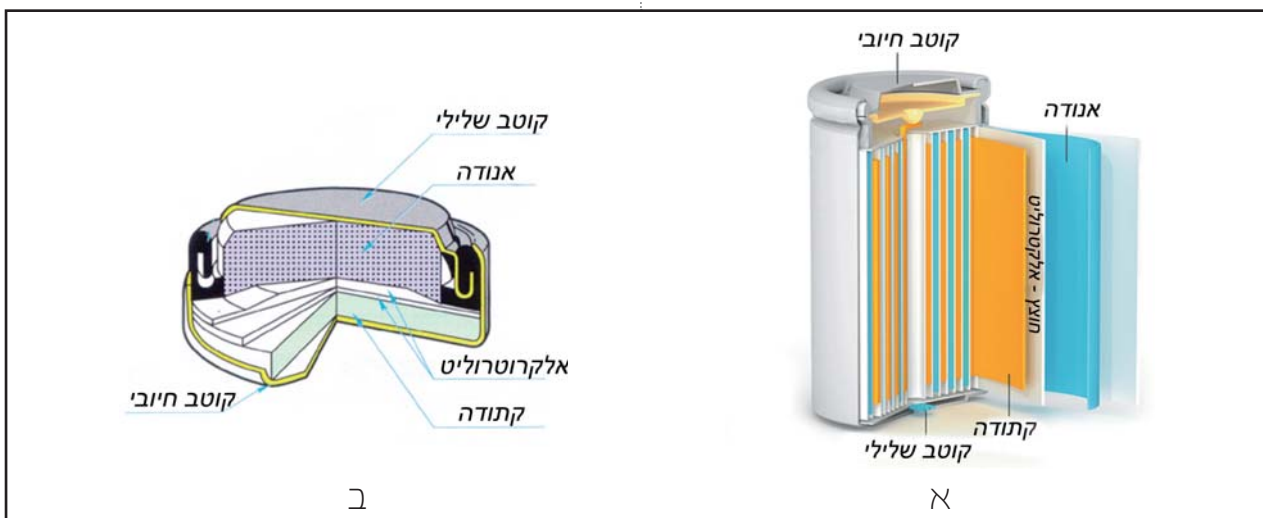
אחת הסוללות הלא נטענות הנפוצות ביותר בשימוש היא **סוללת ליתיום**, שבה רדיד ליתיום מתכתי משמש כאנודה. הליתיום הוא יסוד כימי ממשפחת המתכות האלקאליות (ונמצא בטור הראשון בטבלה המחזורית). הוא קל משקל, מגיב בקלות (כלומר, מוסר בקלות אלקטרון לטובת חומרים אחרים) ולכן הוא מועמד מצוין להמרת אנרגיה כימית לחשמל. סוללות אחרות ומתקדמות יותר שקיימות היום הן סוללות נטענות מסוג יון-ליתיום שאוזכרו לעיל. סוללות אלו אינן מכילות ליתיום מתכתי, אלא יוני ליתיום המוחדרים לתוך מטריצה פחמנית מוצקה (בעיקר גרפיט או פחם). יוני הליתיום נמצאים בחללים בין מישורי אטומי הפחמן, משתחררים מהאנודה בתהליך החמצון (פריקה) ומגיעים דרך האלקטרוליט לקתודה שבה הם יוצרים בתהליך חיזור את הליתיום קובלט אוקסיד. במקביל האלקטרונים זורמים במעגל החיצוני מהאנודה לקתודה ומספקים אנרגיה חשמלית.

היתרון הגדול של סוללת יון-ליתיום הוא שאפשר להטעינה מחדש (כלומר לבצע את התהליך ההפוך) מספר



איור 2. עקרון הפעולה של הסוללה החשמלית.

לכיוון הקתודה, ואילו האלקטרונים לא יכולים לעבור דרך האלקטרוליט, והם מגיעים לקתודה דרך המעגל החיצוני, "הצרכן". היות שהגיע לקתודה מגיב כימית עם החומר שממנו היא מורכבת ועם האלקטרון המגיע דרך המעגל החיצוני (ההתקן שאנו מפעילים). זהו תהליך החיזור (לכידה) של האלקטרון. תהליך זה ממשיך באופן רציף בסוללה, בזמן



איור 3. צורות נפוצות של סוללות

א. סוללה גלילית. המבנה הנפוץ ביותר לסוללה שמורכבת מרדידים של קתודה – חוצץ (ספוג באלקטרוליט) – אנודה המגוללים לצורת "רולדה" על מנת ליצור קיבולת אנרגיה גבוהה.
ב. סוללת כפתור המשמשת בשעונים, מחשבוני, מכשירי שמיעה וכו'.

חשוב מאוד בכל התהליכים שבהם מומרת אנרגיה התחלתית לחשמל או לעבודה. למשל, בסוללה בעלת יעילות של 85% היכולת להמיר אנרגיה אגורה לחשמל מוגבלת ל-85%, בעוד שאר ה-15% מתבזבזים, בעיקר בצורה של חום. אנרגיית הסוללה נמדדת לרוב ביחידות של וואט-שעה (יחידת אנרגיה השווה להספק של וואט אחד במשך שעה). לחלופין נהוג לציין אנרגיה ביחידות של אמפר-שעה בעבור מתח עבודה נתון. בחירת הסוללה האידאלית תלויה ביישום. לדוגמה, במכשירי שמיעה או בקוצבי לב, שבהם הנפח חשוב מן המשקל ואין אפשרות מעשית לטעון את הסוללות שבתוכם, יהיה ראוי לבחור סוללה חד-פעמית בעלת סך אנרגיה גבוה ליחידת נפח. ביישומים אחרים שבהם המשקל חשוב מהנפח, דוגמת מחשבים וטלפונים ניידים, נבחר סוללה נטענת בעלת סך אנרגיה גבוה ליחידת משקל. עוד שיקול חשוב הוא משך זמן הטעינה מחדש. ביישומים ניידים כגון מכוניות חשמליות, השבתת המכונית לתקופה של כמה שעות לשם הטענת הסוללות היא חיסרון בולט, מכיוון שבזמן הטעינה הסוללה אינה יכולה לשמש כמקור לאנרגיה. חיסרון זה של הסוללה הנטענת קיבל מענה – לפחות חלקי – בהתקן אחר שממיר אנרגיה כימית לחשמלית: **תא הדלק**. להבדיל מסוללה, האנרגיה הכימית של תא הדלק אינה אגורה בתוכו אלא מוזנת באורח רציף ממקור דלק חיצוני (כגון מכל מימן חיצוני) המאפשר שימוש נייד ורציף.

תאי הדלק בשימוש יומיומי: מטלפונים ניידים ועד להארת ערים

סוללות נטענות ותאי דלק מאופיינים ביעילות גבוהה, בבלאי נמוך ובפעולה שקטה יחסית ונקייה ללא פליטה של גזי חממה. תכונות אלו הן שמקנות לשתיהם טכנולוגיות אלו פוטנציאל להחלפת מנועי הבעירה בכלי הרכב, כאשר לכל יישום יתרונות וחסרונות אופייניים. לתאי הדלק יכולת לעבוד בטווחי טמפרטורה שונים ולהפיק הספקי אנרגיות בתחום רחב שבין ואטים בודדים ועד כמה מגה-ואטים (מיליוני ואט) בעתיד. כנראה שיהיה אפשר לנצל יכולות מרשימות אלה בתחומים רבים ומגוונים: החל מסוללות חדשניות לטלפונים ניידים, עבור למכוניות ותחבורה ציבורית (אוטובוסים וחשמליות) ועד לתחנות כוח שתוכלנה לספק חשמל לערים שלמות! תיאור של כמה תאי דלק נפוצים, שימושיהם וטמפרטורות העבודה שלהם תוכלו לראות באיור 5.

רב של פעמים ויש לה יכולת אחסון אנרגיה הקרובה לזו של הסוללות החד-פעמיות. בסוללה חד-פעמית עברו התוצרים בקתודה ו/או באנודה שינויים כימיים שאינם מאפשרים טעינה חוזרת. לעומתה, בסוללת יון-ליתיום מתרחשת בתהליך הפריקה והטעינה החדרה והוצאה של יון ליתיום "אורח" מתוך שינויים קטנים בלבד במבנה האלקטרודות. לכן, הפעלה של מתח הגבוה ממתח הסוללה (השקעת אנרגיה חשמלית) מאפשרת להחזיר את יוני הליתיום מהקתודה לאנודה (דרך האלקטרוליט), ובכך לטעון מחדש את המצבר (כלומר להמיר בחזרה אנרגיה חשמלית לכימית) וכך להשתמש בה שוב ושוב במספר רב של מחזורי פריקה וטעינה.

דור חדש יותר של סוללת יון-ליתיום נטענת נקרא סוללת ליתיום פולימרית. ההבדל הוא שבמקום תמיסה אלקטרוליטית נוזלית יש בו אלקטרוליט בצורת ג'ל. שימוש בג'ל מקטין את סכנת הנזילה ומאפשר אריזה הרמטית ברדיד מתכת מצופה ברדיד פולימר. סוללות אלו קלות משקל ואפשר לעצבן בצורות שונות, דוגמת סוללה שטוחה לגמרי בעלת עובי של כמילימטר הנכנסת לתוך כרטיס אשראי חכם (איור 4).

ישנם כמה מדדים המשמשים להשוואה בין ביצועי הסוללות השונות, וביניהם: הספק (אנרגיה ליחידת זמן), אנרגיה ליחידת משקל וליחידת נפח, תחום טמפרטורות



איור 4.

כרטיס אשראי חכם שבו מצויה סוללה שטוחה בעובי מילימטר באדיבות חברת EMUE

עבודה, בטיחות ויעילות הסוללה. **יעילות הסוללה** מוגדרת כיחס בין כמות האנרגיה אשר אפשר להמיר לחשמל ובין סך כל האנרגיה הכימית האגורה בסוללה. מדד זה של יעילות

PEM - Polymer Electrolyte Membrane

השימושים: מחשבים ניידים, טלפונים סלולאריים, מכונות

מימן או מתנול

אלקטרוליט: ממברנה פולימרית

מים (ופחמן דו-חמצני)

טמפרטורת עבודה: עד 120 מעלות

SOFC - Solid Oxide Fuel Cell

השימושים: תחנות כוח

מימן או גז טבעי

אלקטרוליט: תחמוצת קראמית

מים ופחמן דו-חמצני

טמפרטורת עבודה: עד 700 מעלות

AFC - Alkaline Fuel Cell

השימושים: חלליות, צוללות

מימן טהור

אלקטרוליט: אשלגן הידרוקסיד

מים

טמפרטורת עבודה: עד 70 מעלות

איור 5. שלושה תאי דלק נפוצים ומאפייניהם.
בכל שלושת המקרים, הדלק הוא מימן ו/או פחמימן כאשר לקתודה מוזרם חמצן, אוויר או מחמצן אחר.

מבט היסטורי קצר: אף על פי שהמונח "תאי דלק" (Fuel Cells) נתפש בציבור כהמצאה חדשה ומהפכנית, כבר לפני 170 שנה, בשנת 1839, דיווח המדען השווייצרי פרידריך שונביין (Schönbein) על זרם חשמלי הנוצר כתוצאה משילוב של מימן וחמצן. שלוש שנים לאחר מכן המציא המדען הבריטי ויליאם גרוב (Grove), את תא הדלק הראשון שאותו כינה "סוללת גז". בעיות טכנולוגיות דחקו לשוליים את המשך פיתוח תאי הדלק יותר ממאה שנה, ורק בתחילת שנות השישים של המאה ה-20 נכנס תא הדלק לשוק, לראשונה כמוצר מסחרי. השימוש הראשון נעשה כאשר סוכנות החלל האמריקאית (נאס"א), בשיתוף חברת ג'נרל אלקטריק, פיתחו תא דלק בעבור פרויקט החללית ג'מיני.

אמברגו הנפט ב-1973 דחף כמה חברות להשקיע בפיתוחם של תאי דלק בשנות השבעים. מאז גדל התחום והתפתח, ובשנים האחרונות ניכרת מגמת עלייה ברורה במחקר ובפיתוח של תאי דלק, כאשר האתגרים העיקריים הם מציאת חומרים ותהליכים יעילים וכדאיים יותר מבחינה כלכלית.

מבנה תא הדלק

היום יש בשוק כמה סוגים של תאי דלק, הנבדלים זה מזה בהרכבם, בטווח טמפרטורות העבודה שלהם ובהספקם, אולם עקרונות העבודה הבסיסיים שלהם זהים, ומקור הדלק לתא יכול תמיד צורה כלשהי של חומר המכיל מימן. איור 6 מדגים את עקרון הפעולה הבסיסי של תא דלק טיפוסי מסוג פא"מ (PEM, Polymer Electrolyte Membrane). הרכיבים העיקריים של תא הדלק הם אנודה, שאליה מסופק מימן; קתודה, שאליה מסופק חמצן; וממברנה אלקטרוליטית אשר מאפשרת ליוני מימן, אך לא לאלקטרונים, לעבור דרכה (ראו מסגרת). הן האנודה והן הקתודה מצופות בשכבת זרז (קטליזטור). בנוכחות הזרז, קצב החמצון-חיזור עולה וכך הזרם בתא עולה. אך, חשוב להדגיש שאין הזרז משנה את מאזן האנרגיה בתא. באנודה הזרז מאיץ את קצב החמצון של מולקולות מימן ליון מימן ואלקטרון, ואילו בקתודה הזרז מאיץ את קצב החיזור של החמצן למים.

איך תא הדלק מייצר חשמל?

בשורה התחתונה, שחרור האנרגיה בתהליך שבו נוצרת מולקולת מים מנוצל בתא הדלק ליצירת אנרגיה חשמלית. אפשר להשוות את התהליך למפל מים: למים בראש המפל יש אנרגיה גבוהה מזה שבתחתיתו, ולכן משתחררת אנרגיה בתהליך שבו המים נופלים במורד המפל. באופן טבעי, המים

הממברנה האלקטרוליטית והשכבה המזרזת

הממברנה האלקטרוליטית: הממברנה האלקטרוליטית מאפשרת הובלה של יוני המימן מהאנודה לקתודה, אך לא מעבר לאלקטרונים. אלו חייבים לנוע דרך המעגל החיצוני ובתוך כך מספקים אנרגיה חשמלית. מבנה הממברנה משתנה בהתאם לסוג תא הדלק וזה המרכיב העיקרי המבדיל בין סוגי התאים השונים. אחת הממברנות הנפוצות ביותר, בייחוד בתאי דלק המשמשים את תעשיית הרכב והאלקטרוניקה, היא ממברנה פולימרית העשויה מחומר שנקרא נאפיון (Nafion). לפולמר זה ישנם אזורים הידרופיליים ("אוהבי מים") ואזורים הידרופוביים (דוחי מים), ובמגע עם מים שילוב זה יוצר תעלות מים ננוסקופיות, המאפשרות את מעבר יוני המימן דרך הממברנה. השלד של המבנה הפולימרי עשוי טפלון, ואליו מחוברות קבוצות של גפרית תלת חמצנית (SO_3^-) בעלות מטען חשמלי שלילי. תכונה זו מקנה למבנה הנאפיון עבירות ליונים חיוביים בלבד כפי שנדרש מהממברנה.

יבוש תעלות המים בממברנה הוא אחד הגורמים העיקרים לירידה ניכרת ביעילות תא הדלק עם הזמן. היון העובר בתעלה עקב השדה החשמלי (מיגרציה) גורר אחריו כמה מולקולות מים ומייבש את התעלות. פתרונות אפשריים לבעיית היבוש הם הפעלת הפרש לחצים בין האנודה והקתודה כך שהמים יחזרו אחורה לממברנה; או העשרת הדלק באדי מים שיתחברו עם יוני המימן הנכנסים מהאנודה לממברנה וימנעו את יבוש תעלות המים.

השכבה המזרזת: תפקיד הזרז (קטליזטור) הצמוד לאנודה הוא לזרז את תהליך פירוק מולקולת המימן (H_2) לשני פרוטונים (H^+) טעונים חיובית ושני אלקטרונים (e^-) ולהעביר את היונים לאנודה. הזרז בנוי מחלקיקים ננומטריים של סגסוגות שונות של פלטינה. כאשר מולקולת מימן נספחת על הזרז עולה הסיכוי שלה למסור, בתהליך חמצון, את האלקטרונים המקשרים בין שני אטומי המימן. באופן דומה, הזרז הנמצא בצד של הקתודה מעודד את מולקולות החמצן (O_2) להתפרק לשני אטומי חמצן, הנספחים על הזרז. ארבעת האלקטרונים המתקבלים מהאלקטרודה (דרך המעגל החיצוני) מחזרים את החמצן ועם יוני המימן שמגיעים מהממברנה מגיבים ויוצרים מולקולת מים. היום מושקע מאמץ רב במחקר של פיתוח זרזים ננומטריים יעילים יותר, בעיקר בעבור חיזור החמצן, אשר יוכלו להוריד את כמות הפלטינה בתא הדלק במידה ניכרת, שכן היא חומר גלם יקר.

עוברים דרך הממברנה האלקטרוליטית מהאנודה שבה הם נוצרים וריכוזם גבוה לקתודה, שם ריכוזם נמוך. הממברנה, בדומה לשכבה האלקטרוליטית בסוללה, עבירה רק ליונים אך אינה מאפשרת מעבר אלקטרוניים דרכה. עקב כך מתפתח מתח חשמלי בין שני הקטבים, שערכו המרבי הוא 1.23 וולט. מכיוון שהאלקטרוניים אינם יכולים לעבור בתוך התא, אם נחבר את תא הדלק למעגל חיצוני, האלקטרוניים יזרמו במעגל זה ויגיעו לקתודה. בקתודה, מולקולות חמצן מן האוויר מתפרקות בנוכחות הזרז לאטומי חמצן הספוחים על הזרז. אלה מגיבים הן עם יוני המימן והן עם אלקטרוניים שהגיעו מהאנודה. בסופו של תהליך זה נוצרות שתי מולקולות מים מכל מולקולת חמצן וארבעה יוני מימן, בתהליך המסומן כך:



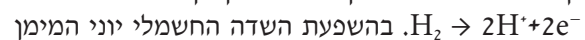
ההבדל האנרגטי בין מולקולת המים ובין מולקולות המימן והחמצן מומר לאנרגיה חשמלית. בשביל לייצר מתח חשמלי גדול יותר מהמתח שמייצר תא אחד אפשר לחבר בטור (לשרשר) כמה תאי דלק, כפי שנהוג גם בסוללות רגילות ובמצברים.

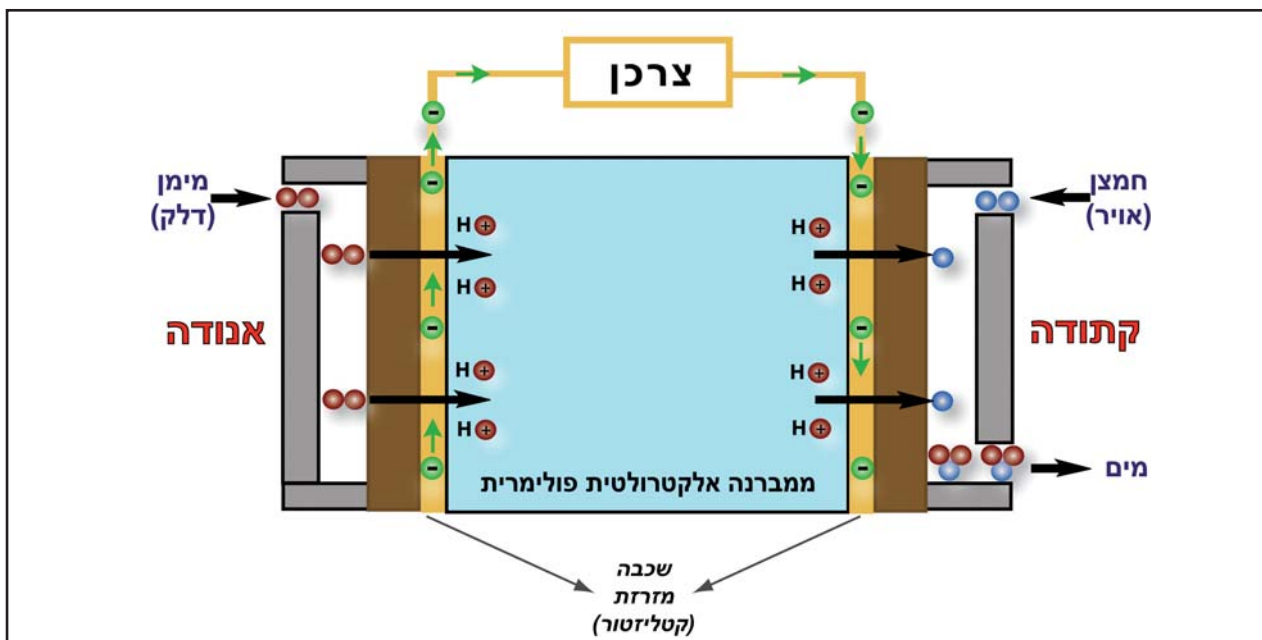
סוללות ותאי דלק בתעשיית הרכב

מבין החלופות השונות למנועי הבעירה הצורכים דלק

הנופלים יתנפצו בתחתית המפל, והאנרגיה שהשתחררה בתהליך תתבזבז ליצירת קול, חום ומערבולות. אולם, מקצת ממנה יומר לאנרגיה מכנית אם נבנה התקן מתאים כמו גלגל מים, שבו המים לא יפלו עד תחתית המפל תוך כדי שחרור פתאומי של אנרגיה בצורה לא יעילה, אלא יסובבו את הגלגל. באופן דומה, בתגובה כימית של היווצרות מולקולת מים משתחררת אנרגיה, וללא התקן מתאים היתה אנרגיה זו מתבזבזת ומומרת בעיקר לחום. המבנה הייחודי של תא הדלק מאפשר להמיר אנרגיה כזו לאנרגיה חשמלית **תוך כדי** תהליך היווצרותן של מולקולות מים. במקום שמולקולות המימן ימסרו אלקטרוניים ישירות למולקולות החמצן בתהליך כימי רגיל, האלקטרוניים מאולצים לעבור דרך המעגל החשמלי.

לצורה שבה מומרת אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית בתא הדלק יש הרבה מהשותף עם עקרון הפעולה של הסוללה החשמלית כפי שמודגם באיור 6. נסביר תחילה מה קורה באנודה, שם מולקולת מימן, המורכבת משני אטומי מימן, נספחת על הזרז ומתפרקת לשני יוני מימן H^+ ושני אלקטרוניים e^- . נהוג לסמן את התהליך כך:





איור 6. מבנה תא דלק טיפוס מסוג פא"מ (Polymer Electrolyte Membrane). עובי הממברנה הפולימרית הוא רק כ-0.1 מ"מ.

בטיחות לקויה, תחום צר של טמפרטורת עבודה, ובעיות יציבות של הסוללה בעבודה שוטפת, המצריכה מחזורים רבים של טעינה ופריקה. השאיפה היא להגיע לאורך החיים של סוללת ליתיום נטענת עם כ-1000-2000 מחזורי טעינה ופריקה.

בתחום זה ראוי לציין את חברת Better Place של היזם הישראלי שי אגסי. החברה מתכננת לספק פתרונות תשתית לרכבים חשמליים. חזון החברה הוא לרשת את חניוני היום והלילה בתחנות עגינה שבהן יטענו את כלי הרכב החשמליים, בעיקר בשעות הלילה, שעה שצריכת החשמל הממוצעת נמוכה. נוסף על כך, תהיה רשת של תחנות (בדומה לתחנות דלק) להחלפה מהירה של סוללות ריקות בסוללות מלאות. עוד טכנולוגיה, הנמצאת עדיין בשלבי פיתוח מוקדמים, היא של תאי הדלק שמתקרבים בביצועיהם לאלו של מנועי הבנזין והדיזל, וכמה חברות רכב מדגימות בהצלחה את השימוש בטכנולוגיה זו במכוניות "קונספט". היעד העיקרי בדגמים אלו הוא להגדיל את טווח הנסיעה בין תדלוקים ולייצר תאי דלק יעילים יותר. אולם, נכון להיום, המכשול העיקרי במעבר לייצור המוני של מכוניות המבוססות על תאי דלק אינו טכנולוגי אלא כלכלי. תהליכי הפקת גז

פחמני, בולטים במיוחד פתרונות המבוססים על מנועים חשמליים. סוללות חשמליות נטענות ותאי דלק הם שני פיתוחים מקבילים המתחרים ביניהם על אספקת אנרגיה למנוע החשמלי ברכב.

ההתקדמות הרבה בפיתוח של סוללות הליתיום למיניהן הופכת טכנולוגיה זו למועמדת טבעית ומיידית גם בתחום הרכב. כבר כיום נוסעות על הכבישים מכוניות היברידיות שמאפשרות חיסכון גדול בדלק של כ-40%. במכוניות אלו, בנוסף למנוע בעירה קטן וחסכוני העובד במהירות קבועה (ללא האצה), ישנה סוללה נטענת שמספקת חלק מאנרגיית ההנעה לרכב. סוללות אלו נטענות על-ידי המנוע ועל-ידי ניצול האנרגיה שמשחררת בזמן בלימת הרכב. כרגע ממדיה הקטנים של הסוללה מאפשרים רק חיסכון בדלק, ואינם מהווים בשורה אקולוגית ממשית, כמו זו שתוכל לבוא ממכוניות חשמליות המבוססות אך ורק על סוללות נטענות. אולם, למכוניות חשמליות עדיין יש כמה חסרונות משמעותיים: תכולת אנרגיה נמוכה של הסוללה ומשקלה הגדול אינם מאפשרים אלא טווח נסיעה מרבי של כ-250 קילומטרים בין טעינות ומצריכים זמני טעינה ממושכים, האורכים לרוב כמה שעות. בעיות נוספות הן המחיר,

לדוגמה, חברת ג'נרל מוטורס ייצרה לאחרונה כמאה מכוניות מסוג שברולט אקווינוקס (Equinox) המבוססות על תאי דלק במטרה לבחון את ביצועי הרכב והתשתית, וכן את תגובות הנהגים והנוסעים (איור 7). הצפי בעשור הקרוב הוא לכמה אלפי מכוניות כאלו על הכביש, כשהדגש בפיתוח יהיה צמצום עלויות. ייצור המוני של כלי תחבורה מבוססי תאי דלק יתאפשר אם ימומשו היעדים, אך קשה לנבא לוח זמנים והאם אכן טכנולוגיה זו תגשים את כל התקוות שתולים בה.

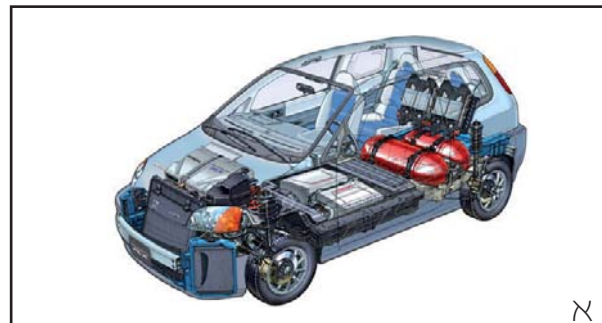
מיקרו תאי דלק

העשור האחרון התאפיין בגידול עצום בביקוש למכשירים אלקטרוניים ניידים, בעיקר בתחום התקשורת והאינטרנט. במקביל, חלה התפתחות משמעותית בפיתוח סוללות נטענות מסוג ליתיום או ניקל, שנתנו עד כה מענה לדרישות האנרגיה של המכשור הנייד. אך הדור הבא של מכשירי האלקטרוניקה הניידת מגביר את הצורך לשפר את צפיפות האנרגיה של הסוללות הנטענות, כלומר, לייצר יותר אנרגיה בפחות משקל סוללה. עם שילובה של התקשורת הסלולרית בשוק האינטרנט האלחוטי היו דרישות אלו לחריפות יותר, וסוללות הליתיום אינן מסוגלות לספק במלואן את הדרישות של הגדלת צפיפות האנרגיה וזמן הפעולה בין טעינות. מצב זה הביא להכרה כי לטכנולוגיית תאי הדלק יש פוטנציאל גם בתחום מכשירי האלקטרוניקה הניידים.

בניגוד לתעשיית הרכב, שבה טבעי להשתמש במימן כדלק בשל יעילותו הגבוהה, בתעשיית המיקרו-אלקטרוניקה שימוש כזה הוא בעייתי. אחסון של גז מימן דחוס הוא מסובך ויקר, בעיקר בשל מגבלות המשקל הקטן של תא הדלק הנייד. כמו כן, שימוש במימן דחוס למכשירים ניידים עלול להיות מפגע בטיחותי (לעומתם, במכונית יש גם תא דלק מסיבי וגם מקום להתקין מערכות בקרה ושליטה המקטינות את הסיכון של שימוש במימן). מסיבה זו, במכשירים ניידים דלק נוזלי פחמימני שעשיר במימן מחליף לעתים קרובות את המימן, אף על פי שיעילות הדלק נמוכה מזו של מימן. למשל, תא המכיל אלכוהול מסוג מתנול (CH_3OH) שיש בו מימן, פחמן וחמצן יכול לשמש מקור מידי לאנרגיה חשמלית ללא צורך בהטענה ממושכת של סוללות.

בבית הספר לכימיה של אוניברסיטת תל-אביב פותח אב טיפוס של תא דלק הניזון ממתנול (או גם מכוהל אחר הנקרא אתילן גליקול) אשר מפעיל מחשב נייד קטן למשך 6 שעות (איור 8). כמו כן, יש חברות בתעשיית המיקרו-אלקטרוניקה, דוגמת טושיבה, מוטורולה, סמסונג, ו-NEC, המפתחות תאי

המימן והעלויות הגבוהות של ייצור תאי הדלק עדיין לא מתחרים במחירי הדלק הפחמי המאובן ובמנועי הבעירה. כדי להזיל את עלויות הייצור של תא הדלק ושל המימן יש צורך בייצור המוני שלהם. וכאן מקור המלכוד הכלכלי, מעין פרדוקס הביצה והתרנגולת: הציבור יעבור לכלי תחבורה ממונעי מימן רק כאשר תהיה תשתית של תחנות מילוי בפריסה נאותה, ואילו חברות הדלק יפרסו מספיק תחנות לתדלוק מימן רק כאשר תהיה לכך הצדקה כלכלית. נכון לעכשיו, כלי תחבורה ממונעי מימן משמשים רק לצורכי תעבורה מקומית או אזרית, שבהם אפשר להגיע לתחנת מילוי: בתחומי עיר, במפעל, באזור תעשייה, באזורי ניסוי וכדומה. אבל גם שימוש מוגבל זה מאפשר ניסוי ושיפור של הטכנולוגיה והתשתיות ומהווה אבן דרך חשובה בדרך לכלכלת מימן.



א



ב

איור 7.

א. הונדה FCX הברידית וממונעת מימן. המימן במכלים (צבע אדום) מזין את מערך תאי הדלק (צבע לבן) אשר מניעים את המנוע החשמלי.
ב. שברולט אקווינוקס (Equinox). בשנת 2008 נעו כמאה מכוניות כאלה על כבישי לוס-אנג'לס, ניו-יורק והבירה וושינגטון.

חלק ממנה יומר לחום **תמיד**. המייחד התקנים אלקטרוכימיים הוא שאם מפעילים אותם בהספק נמוך אפשר להמיר את המקסימום האפשרי של אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית. במילים אחרות, ניצולת המרת האנרגיה קרובה ל-100%. אולם, ככל שנפעיל התקן זה בהספק גדול יותר כך יהיה אובדן רב יותר של אנרגיה לחום.

מעניין לציין שאף על פי שהפיתוחים של סוללות ותאי דלק מבוססים על חידושים טכנולוגיים עכשוויים, המגבלה של יעילות בתהליכי המרת אנרגיה אינה טכנולוגית אלא מגבלה עמוקה הקשורה למדע התרמודינמיקה, ואשר ידועה כבר למעלה מ-150 שנה.

התרמודינמיקה היא תורה שפותחה במאה ה-19, והיא מסבירה מעברי אנרגיה וחום במערכות פיזיקליות, כימיות ואף ביולוגיות. זוהי תורה המבוססת על שלושה חוקי יסוד. החוק הראשון של התרמודינמיקה הוא חוק שימור האנרגיה, הקובע כי סך האנרגיה במערכת סגורה (מערכת שבה לא מתאפשרת זרימה של אנרגיה או חלקיקים ממנה או לתוכה) נשאר קבוע בכל זמן. החוק השני קשור למושג **אנטרופיה**, שהיא מדד לאי הסדר במערכת. חוק זה קובע כי אנטרופיה של מערכת סגורה יכולה להישאר קבועה או לגדול – אבל היא לעולם לא תקטן (וראו מסגרת).

בתהליכים דוגמת אלו שמתרחשים בתאים אלקטרוכימיים (תאי דלק וסוללות), לחוק השני יש השלכות חשובות לגבי הגבלת יעילותו. לרוב, אם נשווה את האנטרופיה של המגיבים לזו של התוצרים יהיה נדמה שהאנטרופיה בתהליך קטנה, בניגוד לחוק השני. הטעות נובעת מכך שלקחנו בחשבון רק את מבנה תא הדלק או הסוללה, ולא חישבנו את האנטרופיה של המערכת כולה, הכוללת גם את סביבתו החיצונית של התא. חישוב כזה מראה כי לאחר שהתרחשה תגובה כימית בתא האלקטרוכימי, האנטרופיה של הסביבה עלתה, כך שסך האנטרופיה במערכת (התא עם סביבתו) אכן אינו קטן, כפי שמחייב החוק השני. כיצד גדלה האנטרופיה של הסביבה? על-ידי זרימה של חום מהתא לסביבתו! מכיוון שסך כל האנרגיה בתהליך נשמר, ככל שנבזבז יותר אנרגיה על-ידי פליטה של חום לסביבה, נוכל לנצל פחות אנרגיה ליצירת חשמל. מצד שני, כאשר בתהליך הפריקה של הסוללה האנטרופיה גדלה, אזי הסוללה שואבת חום מהסביבה (ומהסוללה) והופכת אותו לאנרגיה חשמלית בניצולת תיאורטית של 100%.

דלק לשימוש במוצריהן הניידים, ואולי לא רחוק היום שבו נמלא את המחשב הנייד או את הטלפון הסלולרי באלכוהול במקום – או בנוסף – להטענתם מרשת החשמל.



איור 8.

אב טיפוס של תא דלק מסוג DMFC להפעלת מחשב נייד שפותח בביה"ס לכימיה של אוניברסיטת תל אביב.



איור 9.

אב טיפוס של חברת פוג'יטסו: מטען נייד לטלפון המבוסס על תאי דלק DMFC. 18 סמ"ק של מתנול מספיקים להטענת 3 סוללות ליתיום.

עד כמה תהליכי ייצור חשמל יעילים?

לא כל האנרגיה הכימית שמשתחררת בסוללה או בתא הדלק יכולה להיות מומרת לחשמל – בפועל

אנטרופיה והחוק השני של התרמודינמיקה

נתייחס לדוגמה למערכת גדולה כלשהי, המורכבת מהרבה אטומים ומולקולות. מאפייני המערכת, כגון לחץ וטמפרטורה, אינם תלויים במצבו הספציפי של כל חלקיק וחלקיק מיקרוסקופי במערכת, אלא רק בתכונות הממוצעות שלהם (בדיוק כפי שאין צורך למדוד את מהירות כל האטומים בגוף על מנת לקבוע את טמפרטורת הגוף). מאפיינים כגון לחץ וטמפרטורה מגדירים את המצב הכללי המאקרוסקופי של המערכת. ואכן, כל מצב מאקרוסקופי יכול לנבוע ממספר עצום של מצבים מיקרוסקופיים, ומספר מצבים זה קשור לאנטרופיה של הגוף (ליתר דיוק, האנטרופיה קשורה ללוגריתם של מספר מצבים זה).

כולנו מכירים את התופעה שבה מטפטים טיפת דיו (או תרכיז פטל) לתוך כוס מים, והטיפה מתערבבת במים מעצמה ללא התערבות חיצונית. לתהליך קשר הדוק לאנטרופיה, משום שמספר האפשרויות המיקרוסקופיות שיש למולקולות מים ודיו בכוס הוא עצום. ביחס למספר זה, מספר האפשרויות שבהן מולקולות המים והדיו תשארנה מופרדות הוא זעום. בלשון התרמודינמיקה אפשר לומר כי האנטרופיה של הכוס שבה יש הפרדה בין הדיו והמים קטנה בהרבה מזו של הכוס שבה שני הנוזלים מעורבבים. החוק השני של התרמודינמיקה קובע כי האנטרופיה לעולם לא תקטן בתהליכים פיזיקליים והוא נראה אינטואיטיבי למדי מדוגמה זו: אם נשאיר את הכוס לזמן רב, לא נצפה למצוא אותה חוזרת מעצמה למצבה ההתחלתי שבו יופרדו לגמרי המים והדיו. נהפוך הוא, המערכת תגיע למצב שבו האנטרופיה מרבית - כאשר מולקולות המים והדיו מעורבבות לחלוטין. חשוב לציין, כי החוק השני הקובע כי אי אפשר להקטין את האנטרופיה, תקף רק בתהליכים פיזיקליים המתרחשים במערכת סגורה, מבודדת אנרגטית מן הסביבה. במתקן לטיהור מים, למשל, משקיעים אנרגיה מבחוץ (מערכת לא סגורה) כדי להפריד בין מולקולות המים ומומסים שונים ותוך כדי כך מורידים את אנטרופיית המערכת.

למושג האנטרופיה יש קשר הדוק לחום. אנרגיית חום נובעת מתנועה של מספר עצום של חלקיקי מערכת הנעים בכיוונים אקראיים במהירויות שונות, ולכן אפשר לראות בחום של אנרגיה אנטרופית. לעומת זאת, צורות אחרות של אנרגיה רובן "מסודרות" יותר, כגון אנרגיה מכנית, קשורות לתנועה של גופים בכיוון ובמהירות מוגדרים. החוק השני מגביל את יכולתנו להמיר בעילות חום לצורות אחרות של אנרגיה, למשל, להנעה מכנית. הסיבה לכך היא שהמרת אנרגיה של תנועה אקראית (חום) לאנרגיה של תנועה מוגדרת (הנעה) כרוכה בהקטנת האנטרופיה, ולשם כך נצטרך "לשלם" באנרגיה מבזבזת.

מדוע מנוע חשמלי יעיל ממנוע הבעירה הפנימית?

באופן כללי, יעילות מנוע חשמלי גדולה במידה ניכרת מזו של מנועי הבעירה. הסיבה העיקרית לכך היא שיעילות תא הדלק אינה מוגבלת על-ידי החסם האנרגטי של קרנו. סאדי קרנו (Sadi Carnot) היה מדען ומהנדס צרפתי דגול שחי במאה ה-19. הוא היה הראשון שהבין שיש רף עליון ליעילות של מנועים שבהם משתחרר חום. מנוע בעירה עובד על עיקרון של העברת אנרגיה מאזור חם (תא הבעירה של המנוע) לאזור קר (האוויר מחוץ לרכב). בתהליך הבעירה נוצרים בתא הבעירה גזים חמים בלחץ גדול. תוך כדי העברת גזים אלו החוצה, חלק מן האנרגיה מומר לעבודה מכנית. חסם קרנו, הוא רף היעילות של קרנו, קובע שאי אפשר להמיר את כל אנרגיית החום לעבודה מכנית, וכי חלק מאנרגיית החום יתבזבז בהכרח לסביבה. זהו חסם עליון ליעילות של מנועי בעירה, אך הוא אינו חל על מנועים חשמליים. הסיבה לכך קשורה למושג האנטרופיה ולחוק השני של התרמודינמיקה. הסבר פשטני הוא שככל שהתהליך מתבצע בצורה מבוקרת ואטית, כמו שקורה במנוע החשמלי, כך השינוי האנטרופי בתהליך קטן יותר - כלומר פחות חום נוצר ומבזבז.

ההשוואה בין יעילות של מנועים מסוגים שונים אינה פשוטה כלל, אולם ברור כי היעילות של מנוע בעירה קטנה במידה ניכרת מתהליך שבו אנרגיה כימית מומרת תחילה לאנרגיה חשמלית באמצעות תא דלק או סוללה, ולאחר מכן אנרגיה זו מומרת לאנרגיה מכנית באמצעות מנוע חשמלי יעיל. תהליך החמצון האטמי שמבוצע בסוללה או בתא הדלק משחרר פחות חום מאשר שרפה מהירה של דלק בטמפרטורה גבוהה מאוד ביחס לסביבה, או התפשטות מהירה של אוויר בבוכנות מנוע הבעירה.

כפי שמודגם באיור 10, למכוניות שמונעות באמצעות דלק מימני יש שרשרת אנרגיה ארוכה: החל מתהליך ייצור המימן, דרך דחיסתו והובלתו ועד לשימוש בו במכונית. חשוב לזכור שחלק מהאנרגיה שהושקעה לצורך הנעת המכונית יבזבז גם בתהליך היעיל ביותר, ואף ייפלטו בו גזי חממה. מכל מקום, מדובר בתהליכים שהם הרבה יותר יעילים ממנועי הבעירה.

כלכלת המימן ואקולוגיה

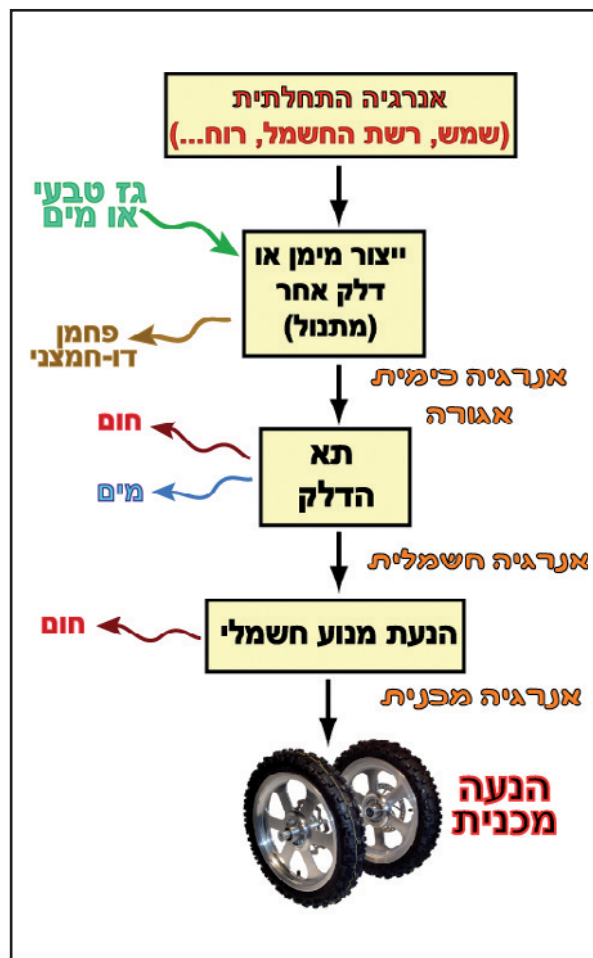
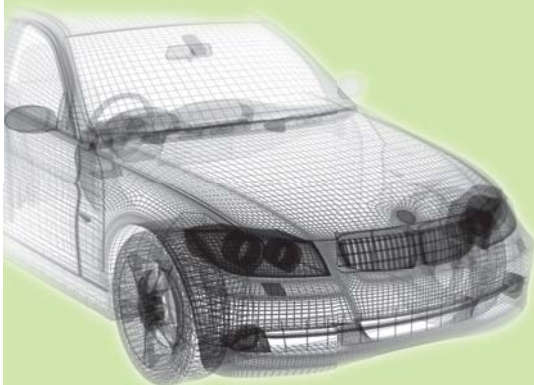
מימן הוא היסוד הנפוץ ביותר ביקום, והוא מרכיב כ-75%

יעילות של מנוע

מנוע הוא מכונה אשר ממירה אנרגיה ממקור כלשהו לאנרגיה מכנית לביצוע עבודה. אפשר לחלק בצורה כללית את המנועים לסוגים שונים על פי צורת האנרגיה שבה משתמש המנוע, כאשר שני המנועים הנפוצים ביותר הם מנוע הבעירה הפנימית והמנוע החשמלי.

מנוע הבעירה הפנימית, כמו זה הקיים במכוניות, הוא למעשה מכונת חום, כלומר, מנוע ה"שואב" חום מסביבתו (תא הבעירה) וממירו לעבודה מכנית. חסם קרנו מגביל מאוד את יעילותו של מנוע החום. לדוגמה, בעבור מנוע של מכונית, אשר תא הבעירה שלו מגיע לטמפרטורה של כ-700 מעלות צלזיוס, היעילות האידיאלית (הנובעת מחישוב חסם קרנו) תוגבל לכ-70%. משמעות הדבר היא שבמנוע האידיאלי והיעיל ביותר, יתבזבזו כחום בין רבע לשליש מהאנרגיה האגורה בדלק. בפועל, יעילות של מנועי בעירה נמוכה הרבה יותר.

מנוע חשמלי הוא מנוע הממיר אנרגיה חשמלית לאנרגיה מכנית. גם במנוע זה חלק מן האנרגיה החשמלית מתבזבז בשל חיכוך והתנגדות חשמלית היוצרים חום שנפלט לסביבה. אבל היעילות הטיפוסית של מנוע חשמלי היא מעל 90%. את האנרגיה החשמלית במנוע מספקים לרוב סוללה חשמלית או רשת החשמל, ולעתים תא דלק או תא שמש. לכל אחת משיטות ייצור החשמל הללו יעילות משלה. לדוגמה, יעילות המרת האנרגיה הסולארית לאנרגיה חשמלית בתא שמש טיפוסי נמוכה, ונעה לרוב בטווח בין 5% ל-20%, אך אנרגיית השמש זמינה ולא צריך לייצרה. יעילות המרת האנרגיה הכימית האגורה במימן לאנרגיה חשמלית בעבור תא הדלק גבוהה הרבה יותר ונעה לרוב בין 50% ל-70%, אך חישוב זה אינו לוקח בחשבון את השקעת האנרגיה בתהליך הפקת המימן!



איור 10. שרשרת האנרגיה "מהמפעל ועד הגלגל".

ממאסתו של כדור הארץ. לעומת זאת, באטמוספירה נמצא הגז מימן בריכוזים נמוכים מאוד, משום שהוא חומק בקלות מהאטמוספירה לחלל עקב משקלו הסגולי הנמוך (ביחס לגזי אטמוספירה אחרים). על פני כדור הארץ, היסוד מימן שכיח בצורת תרכובות כימיות של מימן עם פחמן או מים (H_2O) המצויים בעיקר באוקיינוסים. מסיבה זו שימוש במימן כדלק מחייב קודם כל ייצור של מימן מולקולרי. ולכן, בכל החישובים הקשורים ליעילות ולעלויות חייבים לקחת בחשבון גם את תהליך הפקת המימן.

המימן הוא גז דליק ונפיץ, וזכורה התפוצצות ספינת האוויר הגרמנית צ'פלין הינדנבורג, שגרמה למותם של 36 בני אדם מול מצלמות העיתונאים בשנת 1937. החשש



גזי חממה לאטמוספירה, שכן החומר האורגני מבוסס על צמחייה שבעת גדילתה, עם תהליך הפוטוסינתזה, ספגה כמות דומה של גזי חממה מהאטמוספירה. גזים אלו ייפלטו בין כה וכה חזרה לאטמוספירה בתהליך הריקבון והפירוק הטבעי שמאפיין חומרים אורגניים.

אפשרות נקייה נוספת לייצור מימן היא על-ידי פירוק מים באלקטרוליזה באמצעות אנרגיה "ירוקה", דוגמת תחנות רוח, אנרגיה סולארית ואנרגיה הידרואולית. אך לשיטות הנקיות לייצור מימן דרושות שנים נוספות של פיתוח, בעיקר כדי להוריד את עלויות הייצור שהן גבוהות מאוד היום.

נראה שכבר בעתיד הקרוב השימוש בגז טבעי לייצור מימן יהיה זה שיזין את כלכלת המימן העתידית. אף על פי שאין זה פתרון מושלם מבחינת זיהום אוויר, הוא זה שידחוף קדימה שימוש מאסיבי במימן ויאפשר מעבר לייצור מימן "נקי" ו"ירוק" יותר בעתיד.

מימן - זול יותר מדלק?

נכון להיום, מימן יקר יותר מבנזין ויש לו כמה חסרונות. הובלת מימן היא תהליך מסורבל ויקר. לצורך הובלת מימן ביעילות יש לדחוס אותו בלחץ של 700 אטמוספרות או לקררו לטמפרטורה של מינוס 253 מעלות צלזיוס, ולהוביל אותו בצורתו הנוזלית. יתרה מכך, אחסון המימן דורש טמפרטורת נמוכות מאוד, או שימוש במכלים כבדים העמידים בלחצים גבוהים מאוד. עובדות אלו, מלבד היותן גורם המייקר את השימוש במימן, גם מנבאות את העתיד של הפקת המימן. מכיוון שאפשר לייצר מימן במגוון רחב של תהליכים נראה שבעתיד יופק המימן לפי הצורך בתחנות מקומיות, תוך כדי ניצול המשאבים הטבעיים המתאימים לכל אזור. לדוגמה, באזורים שטופי שמש יוכלו להשתמש באנרגיה סולארית לפירוק של מים למימן, ורק באזורים מבודדים יאלצו להוביל מימן מרחוק. ייצור מימן באמצעות אנרגיה נקייה הוא תהליך יקר מאוד, ואפילו ייצור מימן על-ידי שימוש בגז טבעי יקר יותר מדלק. בעתיד, הורדת העלויות תתאפשר כאשר הביקוש למימן יגבר וייצורו יהיה נפוץ יותר, בד בבד עם עליית מחירי הדלק הפחמני כתוצאה מדלדול המאגרים הטבעיים. מכיוון שהצפי הוא שמחיר המימן יהיה כפול מזה של דלק פחמני (ליחידת אנרגיה), יעילות של תא דלק שתהיה כפולה מזו של מנוע שרפה פנימית תקזז את הפרשי המחיר, וזו מטרה אפשרית להשגה.

העיקרי בשימוש בגז מימן הוא העובדה שהוא מתלקח בתחום רחב של ריכוזים, וכן כי כמעט בלתי אפשרי להבחין בשלהבת גז מימן. עם זאת, אפשר להגיע לשימוש בטוח למדי במימן בעזרת תכנון הנדסי נכון המביא בחשבון הן את משקלו הסגולי הנמוך של

המימן, המאפשר את פיזורו המהיר ומקשה עליו להגיע לריכוז הנפחי הנדרש להתלקחות, והן את הטמפרטורה הגבוהה שבה המימן מתלקח. ואכן מפעלי תעשייה רבים משתמשים כיום במימן בדרך השגרה, וללא תאונות.

האם המימן הוא דלק ירוק וידידותי לסביבה?

לכאורה, בתהליך השרפה או החמצון של מימן נפלטים לסביבה רק מים, ולא משתחררים גזי חממה (כגון פחמן דו-חמצני) ולכן נראה שהמימן הוא דלק ירוק לחלוטין. עם זאת, מכיוון שמימן כחומר טהור נדיר מאוד על פני כדור הארץ ואין מאגרים טבעיים שלו, יש צורך בהפקת מימן מחומרים אחרים בתהליכים מלאכותיים, שצורכים אנרגיה לכשעצמם, וכן מלווים לעתים בפליטה של גזי חממה.

ייצור מימן הוא עניין שגרתו למדי, וכשני אחוזים מתצרוכת האנרגיה העולמית משמשים לייצורו כתוצר ביניים בתעשיות שונות. הסיבה לכך היא שמימן משמש את בתי הזיקוק בתהליך זיקוק הנפט לשם טיהור הנפט מגפרית, לפירוק מולקולות גדולות הכלולות בנפט גולמי וכן לייצור אמוניה וחומרים אחרים. למעשה, אם היינו משתמשים במימן המיוצר כיום אך ורק כדלק לתעשיית הרכב, אפשר היה לתדלק כ-20 אחוזים מצי המכוניות העולמיות.

רובו המוחלט של המימן המשמש את תעשיות הנפט והכימיקלים מיוצר מגז טבעי ומתוצרי נפט. החיסרון בייצור מימן בדרך זו הוא שבזמן התהליך נפלט פחמן דו-חמצני לסביבה וזה כמובן מהווה מפגע אקולוגי – בדיוק מאותו סוג שאנו מנסים למנוע עם המעבר ממנועי בעירה לתאי דלק ולמנועים חשמליים! ובכל זאת יש כאן יתרון גדול. אף על פי שגזי חממה נפלטו בתהליכי ייצור מימן מגז טבעי, אפשר לשלוט עליהם ולבקר אותם ביעילות רבה יותר מפליטה של גזי חממה במנועי הדלק של מכוניות. כמובן שהמטרה בסופו של דבר היא לייצר מימן בתוך שחרור מינימלי, אם בכלל, של גזי חממה.

אחד הרעיונות לייצור מימן הוא הפקת גז מימן מביו-מסה ומזבל אורגני, על-ידי חימום מבוקר לטמפרטורות גבוהות בנוכחות חמצן ואדי מים. במאזן הכללי תהליך זה לא יוסיף

תודות

המחברים מודים למיכל אנדלמן, דן דוידוב, גיא כהן, מריאנה קורז'וב, נטע קליגלר וילנצ'יק, מיכאל רוטמן, רפי שיקלר ובעיקר לאליעזר גלעדי וג'י דויטש על הערותיהם המועילות.

יעקב וילנצ'יק הוא בעל תואר ראשון בפיזיקה והנדסת חשמל מאוניברסיטת תל אביב.

פרופ' דוד אנדלמן נמנה על חברי הסגל של ביה"ס לפיזיקה ואסטרונומיה באוניברסיטת תל-אביב, והוא חוקר תכונות פיזיקליות של חומרים בעלי יישומים הנדסיים וביולוגיים.

פרופ' עמנואל פלד נמנה על חברי הסגל של ביה"ס לכימיה באוניברסיטת תל-אביב. תחום מחקרו כולל התקנים אלקטרוכימיים ובעיקר סוללות ליתיום ותאי דלק.

לקריאה נוספת

What are Batteries, Fuel Cells, and Super capacitors, Chemical Review **104**, 4245-4269 (2004)

High Hopes for Hydrogen, Scientific American **295**(3), 94-101 September 2006.

Micro-fuel Cells—Current Development and Applications, Journal of Power Sources **170**, 67—78 (2007).

www.fuelcell.no

אתר אינטרנט נורבגי בנושא תאי דלק

The Entropy Crisis, Guy Deutscher, World Scientific, 2008.

<http://www.allaboutbatteries.com>

אתר אינטרנט בנושא סוללות

<http://www.betterplace.com>

אתר הבית של מיזם עכשווי לבניית רשת לטעינת מכוניות חשמליות

מילות סיכום

החיפוש אחר מקורות אנרגיה חלופיים שיצמצמו את התלות המסיבית בדלק פחמני מאובן נובע משתי סיבות חשובות. הראשונה היא "משבר האנרגיה" העולמי, ובו יתרות מאגרי הנפט, הגז הטבעי והפחם מתדלדלים בצורה מעוררת דאגה. השנייה קשורה לפליטה מוגברת של גזי חממה עקב שרפה של דלק פחמני. שרפה בזבזנית של דלק פחמני תורמת רבות להגדלת האנטרופיה בעולם. כפי שטוען ג'י דויטש, פיזיקאי מאוניברסיטת תל-אביב בספרו "משבר האנטרופיה" משקף נכון יותר את "משבר האנרגיה" העולמי (וראו "לקריאה נוספת"). צריכת אנרגיה בזבזנית ולא יעילה, דוגמת זו של מנועי הבעירה, מגדילה את האנטרופיה בעולם ויש לה השפעות הרסניות ואולי אף בלתי הפיכות על המערכת האקולוגית והאקלים.

בעשורים הקרובים תחייב הדרישה למקורות אנרגיה חלופיים פתרונות ארוכי-טווח, שבמסגרתם נצטרך לבחון מחדש את דרישות האנרגיה שלנו ואת ההשלכות הסביבתיות שלהם. בין הפתרונות המוצעים נכללים המרת אנרגיה כימית (כפי שסקרנו כאן), רתימת אנרגיית הרוח והגלים, שימוש בביו-דלק (וראו: ג'ודי ואריה מלמד-כץ, "אנרגיה בתנועה", "גליליאו" 125), שחרור מבוקר של אנרגיה גרעינית, וניצול אנרגיית השמש. למעשה, השמש היא מקור בלעדי לאנרגיה המתחדשת על פני כדור הארץ. למעט אנרגיה גרעינית, כל שאר מקורות האנרגיה נובעים באופן ישיר או עקיף מן השמש. לדוגמה, נפט נוצר לפני מיליוני שנים עקב תהליכי פוטוסינתזה של צמחים עם אור השמש. השמש, שהיא למעשה כור גרעיני ענק, משחררת כמויות אנרגיה אדירות: אך אף על פי שאנרגיה זו זמינה לנו, גם תהליך המרתה לצורות אנרגיה אחרות (לדוגמה חשמל או הנעה) יביא עמו השלכות סביבתיות. חשוב להבין כי גם פתרונות אנרגיה חלופיים אינם פתרונות קסם – הם אמנם יעילים בהרבה, אך גם בהם מתבזבזת אנרגיה בצורה של חום שנפלט לסביבה ומגדיל את האנטרופיה העולמית.

לכן, בד בבד עם פיתוח טכנולוגיות חדשות, נצטרך לצמצם ככל האפשר את השימוש באנרגיה ו"לחסוך" באנטרופיה בזמן תהליכי המרות אנרגיה. שימוש באנרגיה אלקטרוכימית להחלפת מנועי בעירה הוא אחת הדרכים לכך. אך במקביל, העלאת נושא האנרגיה לסדר היום הציבורי והגברת המודעות והרגולציה במישור הלאומי והגלובלי, הכרחיים להמשך קיומנו כחברה מתקדמת. ❖