

על צורכי האנרגיה של החברה האנושית בימינו



| דורון אורבך* |

א. ייצור, צבירה והמרת אנרגיה - בעיות והצעות לפתרון

משבר אנרגיה - האמנם?

ייצור, צבירה והמרה של אנרגיה מהווים ללא ספק אתגר טכנולוגי הולך וגדל של המין האנושי. ההתפתחות המואצת של החברה האנושית בעשרות השנים האחרונות, ובייחוד השינויים הכלכליים המפליגים בארצות מרובות האוכלוסין סין והודו בשנים האחרונות, מחייבים האצה כמעט בלתי נתפסת בייצור האנרגיה העולמי. המספרים הם עצומים. הצריכה העולמית כיום עומדת על כ-15 טרה-ואט ($15 \cdot 10^{12}$ Watt) והיא עתידה לעלות לעשרות רבות של טרה-ואטים במהלך המאה הנוכחית. לפנינו, אם כן, אתגר אדיר בייצור חשמל. התהליך הזול ביותר לייצור חשמל כיום הוא על ידי טורבינות קיטור הממירות חום/עבודה באמצעות שריפת פחם. יש לציין שבאדמת כדור הארץ ישנם מרבצי פחם שאמורים להספיק לייצור חשמל של עשרות טרה ואטים במשך מאות שנים. יוצא אפוא שמבחינת עתודות חומרי הגלם להפקת אנרגיה המצויים באדמת כדור הארץ, אנו רחוקים מאות שנים ממשבר כמותי ביכולת ייצור החשמל.

הבעיה, אם כן, היא סביבתית.

נסביר טענה זו: התחממות כדור הארץ בעשורים האחרונים היא עובדה בלתי ניתנת לערעור. הטמפרטורות

הממוצעות, כמו גם הטמפרטורות השנתיות המקסימליות במקומות רבים בעולם, עלו באופן ניכר במהלך עשרות השנים האחרונות. עקב כך ניכרת הצטמצמות קרחונים בכל האזורים המכוסים בקרח כמו בקטבים ובפסגות ההרים הגבוהים. לכך אפשר להוסיף גם צרות אקלימיות מכבידות כמו סערות תקופות באזורים רבים בעולם, הגובות מחיר כבד בחיי אדם וברכוש, וכן התרחבות המדבריות ברחבי אסיה, באפריקה ובמזרח התיכון.

ישנה קורלציה מדאגה בין עליית הטמפרטורות הממוצעות בעולם בשנים האחרונות לבין ריכוז CO_2 באוויר. CO_2 הוא גז הבולע קרינה בתחום האינפרא אדום, ולכן הוא מהווה "גז חממה" מובהק, וריכוזו העולה באטמוספירה עלול להוות סימן מדאיג.

לכן קיים חשש כבד שהפיתוח התעשייתי והתחבורתי המואץ גורם להצטברות גזים וגורמי אבק באטמוספירה, המונעים החזרת קרינה מכדור הארץ החוצה, וגורמים בכך ל"אפקט החממה".

בהקשר הזה יש להזכיר שכדור הארץ מוקרן על ידי השמש באור בתדירויות שונות. קרינת UV נעצרת ברובה בחלק הגבוה של האטמוספירה על ידי גז האוזון הבולע אותה. עיקר הקרינה המגיעה אלינו היא בתחום האור הנראה וחלקה בתחום האינפרא אדום.

כדור הארץ נמצא בשיווי משקל עם החלל הסובב אותו באמצעות החזרת חלק מהקרינה המגיעה אליו. שיווי משקל זה קובע את הטמפרטורות על פני האדמה. התפלגות

* פרופ' דורון אורבך, ראש הקבוצה לאלקטרוכימיה באוניברסיטת בר-אילן, עוסק בין השאר בחקר ופיתוח מקורות כוח ומערכות לצבירה והמרה של אנרגיה

הטמפרטורות בזמנים שונים ובאזורים גיאוגרפיים שונים, תלויה בתנועות כדור הארץ השונות: תנועתו סביב צירו (כך נקבעים היום והלילה) ותנועתו ביחס למישור שיוצר סיבובו סביב השמש (כך נקבעות עונות השנה). בליעה מופרזת של קרינה על ידי מרכיבי האטמוספירה, המונעת החזר קרינה לחלל, עלולה להביא לשינוי בשיווי המשקל האנרגטי של כדור הארץ ולגרום לעליית הטמפרטורה.

אם כן, ייתכן שאנו גורמים במו מעשינו לחימום כדור הארץ על ידי שינוי מתמיד בהרכב האטמוספירה. יש לציין שלא ברור לחלוטין אם אכן ההתפתחות התעשייתית והשפעתה על האטמוספירה היא הגורם לעליית הטמפרטורה הנצפית. ואמנם מנגד קיימת טענה שהשמש היא האחראית לעליית הטמפרטורה: לשמש יש פעילות מחזורית הגורמת לתנודות ברמת הקרינה שהיא שופעת, וזה הגורם העיקרי לשינויים בטמפרטורה על פני כדור הארץ, ללא כל קשר ברור והכרחי למעשי האדם. מכל מקום, דעת רוב המומחים בתחום האקלים היא שאנו אכן מזיקים לעצמנו ועלינו לשנות בדחיפות את משק האנרגיה שלנו, על ידי פיתוח דרכים לקליטה מאסיבית של CO_2 ומניעת הצטברות זו באטמוספירה, או על ידי מעבר לייצור אנרגיה בדרכים חלופיות לשריפת דלק ופחם לסוגיו.

דרכים לקליטת CO_2

ניתן לכאורה לקלוט כמות עצומה של CO_2 בתהליך הפוטוסינתזה על פי ה"תסריט" הבא:

ישנם שטחים נרחבים באזורים טרופיים שבהם ניתן לגדל עצי ענק בקצב גבוה, לכרות אותם ולקבור את הגזעים הכרותים באדמת כדור הארץ, למשל – במכרות נטושים. במצב הנוכחי יערות העד אינם יכולים לקלוט עודפי CO_2 שכן הם במצב סטטי מבחינת גדילתם וקיומם. אולם באמצעות כריתה וגידול מבוקר ניתן לנצל תהליכי צמיחה טבעית לקיבוע CO_2 . הבעיה היא שפתרון כזה מחייב ארגון ושיתוף פעולה עולמי כדי שארצות השוכנות באזורים הטרופיים, משני צדי קו המשווה, ייועדו לגידול עצי ענק ברוב שטחן, והארצות באזורים הסוב טרופיים והממוזגים יספקו להן מזון.

במצב הפוליטי השורר בעולם, פתרון זה נראה קשה לביצוע.

ניתן לכאורה גם לגדל אצות בים בכמות מאסיבית וכך

לקבוע CO_2 , אולם גם אפשרות זו כגורם מרכזי משמעותי לקיבוע CO_2 נראית קשה לביצוע ורחוקה.

לכן פתרון מעשי יותר הוא מעבר הדרגתי אך עקבי לאנרגיה חלופית (כלומר, חלופית לשריפת דלק לצורך ייצור חשמל).

ייצור אנרגיה בדרכים חלופיות

להלן מקורות אחדים של אנרגיה חלופית:

- ייצור החשמל הנקי והאלגנטי ביותר הוא ללא ספק ע"י **מפעלים הידרואלקטריים** בעלי טורבינות המונעות בכוח המים. בעולם קיימים לא מעט מפעלים הידרואלקטריים מרשימים: בארה"ב (שני הסכרים על נהר הקולורדו), בקנדה (בעיקר באזור קוויבק), בסין ובדרום אמריקה (איטיפו על נהר הפרנה, בין ברזיל ופרגוואי). עם זאת, נראה שמקור זה מיצה את עצמו.
- ניתן לחשוב על **מקורות חום גיאותרמיים**, אולם גם כאן הפוטנציאל מוגבל עד זניח.
- **אנרגיה גרעינית** על ידי תהליכי ביקוע (אורניום רדיואקטיבי) היא אופציה מצוינת ויעיד על כך משק האנרגיה של צרפת הנשען ברובו (80% מייצור החשמל) על תחנות כוח גרעיניות. מאידך, לשימוש בדלק גרעיני יש חסמים פסיכולוגיים ופוליטיים (עקב הסיכון שביכולת המעבר מייצור דלק לייצור נשק גרעיני) וכן חשש מתמיד מכך שתקלה בתחנת כוח גרעינית עלולה להיות הרת אסון בקנה מידה עולמי (ראו את אסון צ'רנוביל באוקראינה כדוגמה).

נותרנו למעשה עם שני מקורות אנרגיה "ירוקים": אנרגיית הרוח ואנרגיית השמש.

- **אנרגיית הרוח** – בשנים האחרונות ישנה התפתחות מרשימה בטכנולוגיות טורבינות רוח לייצור חשמל קיימים אזורים בעולם שבהם נושבות רוחות תמידיות היכולות להוות מקור אנרגיה לייצור חשמל.

יחד עם זאת, אופציה הזו מעלה קשיים מהותיים:

- א. נדרשת השקעה עצומה בצידוד.
- ב. האזורים המתאימים על היבשה מוגבלים ולכן יש לחשוב על האפשרות למקם טורבינות רוח בים, אפשרות המייקרת עוד יותר את הטכנולוגיה הזו.
- ג. גם אם ננצל את כל פוטנציאל הרוח בעולם, לא ניתן



הטמפרטורה הגבוהה ביותר של המדיום המתפשט בטורבינה, לרוב קיטור). $\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h}$ היא טמפרטורת הסביבה ו- T_h היא

האופציה הפוטו-תרמית מתפתחת היטב. ניתן היום לקלוט את אור השמש ולהפכו לחום ביעילות של 80%, לרכז את האור על ידי מראות קעורות ולייצר מקורות חום בטמפרטורות גבוהות ביותר (עד 1000°C). עם זאת, מדובר בהשקעה עצומה שכן אי אפשר להימלט מהצורך לכסות שטחים נרחבים ביותר בקולטי שטח יקרים (קיים יחס ליניארי בין הדרישה לאנרגיה ובין השטח שיש לכסות בקולטים).

2. אופציה מקבילה היא המרה ישירה של קרינת השמש לאנרגיה חשמלית על ידי **תאים פוטו-וולטאים**. חומרים הנקראים מוליכים למחצה יכולים להיות מקור של כוח אלקטרומניע בעקבות האינטראקציה שלהם עם קרינה הפרש האנרגיה בין הרמה המאוכלסת הגבוהה ביותר (HOMO) והרמה הלא מאוכלסת הנמוכה ביותר (LUMO) של המוליכים למחצה, כמו סיליקון, תרכובות של אטומים מקבוצת III ו-VI (גליום ארסניד) או תחמוצות כמו TiO_2 , מתאים לאנרגיה שנושאים פוטונים של אור נראה. לכן הפצצת חומרים אלה באור נראה "מקפצה" אלקטרונים מרמות מאוכלסות לרמות גבוהות בלתי מאוכלסות, כך שנוצרת קוטביות חשמלית המהווה כוח אלקטרומניע.

באמצעות אפקטים פוטו-אלקטריים כאלה ניתן להגיע לניצולות גבוהות יחסית בהפיכת אנרגיית קרינה לאנרגיה חשמלית (30% - 40%).

אולם דווקא החומרים הללו, שבאמצעותם ניתן להגיע לניצולות הגבוהות של אפקטים פוטו-אלקטריים, הם יקרים ורגישים ביותר, ושוב נשאלת השאלה: האם רלוונטי מבחינה כלכלית לייצר מהם קולטי שמש שאמורים לכסות מאות קמ"ר, כדי שאנרגיה סולרית אכן תהווה אנרגיה חלופית?

לכן מוצדקת השקעה מדעית וטכנולוגית בחיפוש אחר שיטות קליטה זולות של אנרגיה סולרית אפילו "על חשבון" יעילות נמוכה יחסית.

שיטות קליטה זולות יחסית של אנרגיה סולרית

פיתוח חשוב ביותר בתחום זה הוא תאים פוטו-וולטאים מרוגשי צבע (die sensitized photo-voltaic cells),

לספק את כל צורכי האנושות לחשמל בדרך זו.

ד. מדובר במקור לא יציב שהרי הרוחות משתנות תדיר.

• **אנרגיית השמש** - מקור בלתי נדלה מבחינת אספקת אנרגיה היא השמש. הספק הקרינה המושפע עלינו בכל רגע ורגע מגיע למאות טרה ואט, ערך זה גבוה בסדר גודל מכל ערך בר חיזוי לגבי הצריכה האנושית. אולם צפיפות ההספק¹ של קרינת השמש נמוכה (מתאימה לפוטו-סינטזה אך לא הרסנית) וזאת כדי שההארה תהיה ברחמים (כפי שנאמר בתפילה "... המאיר לארץ ולדלים עליה ברחמים...") ותאפשר קיום חיים על פני האדמה. באופן מעשי מדובר בכמות מאות ואט למ"ר למשך חלק משעות היממה בלבד. אם נוסיף לכך עננות, משקעים ואבק, הרי שמדובר במקור אנרגיה אדיר, אך מתנווד לאורך היממה ולאורך השנה.

משמעות צפיפות ההספק הנמוכה של אור השמש היא שכדי לספק חשמל באופן מאסיבי ממקור זה יש לכסות שטחים עצומים בקולטי קרינה. למשל, כדי לספק את צריכת ארה"ב כולה, המסתכמת ב-3 עד 4 טרה ואט, יש לכסות את מדינות יוטה ונבדה כולן בקולטי שמש, וזאת בהנחה שיעילות קליטת הקרינה עולה על 10%.

שיטות לקליטה והמרה של אנרגיית שמש לאנרגיה חשמלית

קיימות שתי טכניקות עיקריות לקליטת אנרגיית השמש והפיכתה לאנרגיה חשמלית:

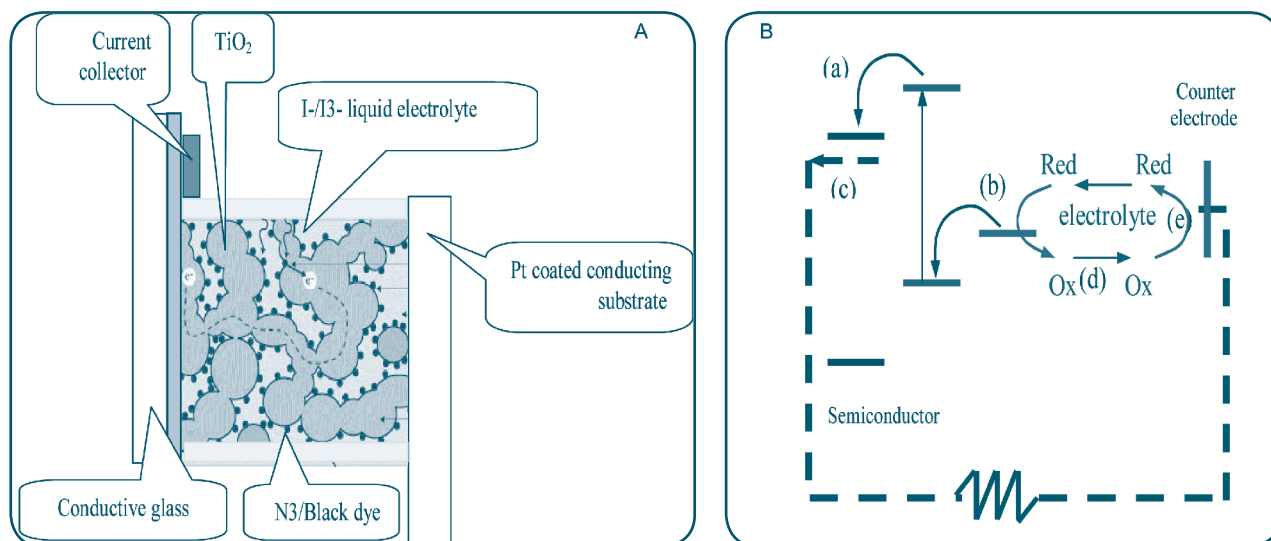
1. טכניקות פוטו-תרמיות.
2. טכניקות פוטו-וולטאיות.

1. **הטכניקה הפוטו-תרמית** ותיקה מאוד. למעשה רוב חימום המים בישראל מתבצע על ידי דודי שמש המבוססים על קולטים הממירים קרינה לחום.

כדי לייצר חשמל בשיטה פוטו-תרמית יש לרכז את אור השמש כך שיתקבלו טמפרטורות גבוהות ביותר - מאות מעלות צלסיוס, שתאפשרנה יצירת קיטור והפעלת טורבינות ביעילות סבירה (החוק השני של התרמודינמיקה מגביל אותנו בהפיכת חום לעבודה ומעמיד את היעילות המקסימלית בהפיכת חום לעבודה על פי הנוסחה הידועה

1 צפיפות הספק = אנרגיה ליחידת שטח





ציור 1 תיאור סכמטי של תא פוטו-וולטאי מרוגש צבע

בצד ימין: דיאגרמת אנרגיה. **בצד שמאל:** סכמת תפעול. חתך של התא המראה את המרכיבים העיקריים: ננו חלקיקים של TiO_2 מכוסים בחומר צבע אורגני, תמיסה אלקטרוליטית ואלקטרודה נגדית.

(עבודה). המעגל החשמלי נסגר על ידי תגובת חמצון-חיזור שבה חומר הצבע שאיבד אלקטרונים (ובכך הפך לגורם מחמצן), מחמצן את הרכיב הפעיל בתמיסה שעבר חיזור בקתודה (למשל $\text{I}_2 + \text{I}^- \rightarrow \text{I}_3^-$). ציור 1 בצד ימין מציג מערכת טיפוסית כזו מבחינה אנרגטית וציור 1 בצד שמאל מציג את התא הפוטו-וולטאי בצורה סכמטית.

חשוב לציין שכדי להשיג אפקטיביות בקליטת האור, על תחמוצת הטיטניום להיות בעלת שטח פנים גבוה מאוד, ולכן משתמשים בחלקיקי TiO_2 ננומטריים העוברים כבישה. בתאים אלה אפשר להשיג יעילות של כ- 10% בהפיכת אנרגיית קרינה לאנרגיה חשמלית.

החזון הוא פיתוח של תאים שטוחים כיריעות, תוך התבססות על מערכות אלקטרוליטיות מוצקות בתוך התאים הללו ופיתוח טכנולוגיה של יריעות סולריות הניתנות לפריסה על שטחים נרחבים.

ממציא גישה זו הוא המדען השווייצרי Michael Graetzel מהמכון Lousanne, EPFL. פיתוח מתקדם בתחום זה בארץ מתבצע על ידי קבוצת המחקר של פרופ' אריה צבן באוניברסיטת בר-אילן.

ניתן לומר שהקהילה המדעית-טכנולוגית העולמית נענית לאתגר של פיתוח מערכות **קליטה** של אנרגיה סולרית,

כמתואר בציור 1.

מדובר בתאים אלקטרוכימיים שבכל אחד מהם הקוטב השלילי (האנודה) נוצר על ידי הקרנת תחמוצת טיטניום המכוסה בחומר צבע אורגני. חומר הצבע בולע אור נראה וכתוצאה מכך אלקטרונים במרכיב הזה מוקפצים לרמות גבוהות (אנטי-קושרות). רמות האנרגיה של חומר הצבע מותאמות לאלו של תחמוצת הטיטניום (חומר מוליך למחצה) ולכן האלקטרונים המוקפצים לרמות הגבוהות של חומר הצבע עקב קרינת אור נראה, מועברים ישירות לרמות הלא מאוכלסות של תחמוצת הטיטניום, וכך נוצר הפרש פוטנציאלים בין הצבע והתחמוצת.

המערכת TiO_2 / חומר צבע, שהיא מחצית התא המהווה את האנודה, נמצאת במגע עם תמיסה אלקטרוליטית המכילה צמד חמצון-חיזור מתאים (למשל I_2 / I^-), העובר תגובה על האלקטרודה הנגדית של התא, שהיא הקתודה (משטח מתכתי אינרטי). כך מתקבל למעשה מקור כוח אלקטרו-מניע שנובע מקליטת קרינת אור נראה. האלקטרונים המצטברים באנודה $(\text{TiO}_2)^-$ מועברים למעגל חיצוני כדי לבצע עבודה חשמלית (כמו בכל סוללה אלקטרוכימית) ומשם לקתודה.

בקתודה החומר המחמצן, למשל $\text{I}_3^- + 2\text{e}^- \rightarrow \text{I}_2$, עובר חיזור על ידי האלקטרונים הבאים מהמעגל החיצוני



האלקטרודות (למשל, אבץ-ברום) ומערכות ניחות הפועלות בטמפרטורות קונבנציונליות. במאמר זה אנו דנים במערכות מהסוג האחרון בלבד.

להלן מערכות אלקטרוכימיות רלוונטיות

(ניחות ופועלות בטמפרטורת החדר).

1. עופרת-חומצה

אנודה: $\text{SO}_4^{2-} + \text{Pb} \rightarrow \text{PbSO}_4 + 2\text{e}^-$

קתודה: $\text{PbO}_2 + 2\text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{PbSO}_4 + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$
למערכת זו צפיפות אנרגיה² פרקטית של 40Wh/kg. זו צפיפות אנרגיה נמוכה, ולכן היא איננה מתאימה להנעה חשמלית. מערכת זו עשויה להתאים לצרכי LL אם יוכנסו בה שיפורים שיאפשרו להגדיל את מספר המחזורים (פריקה וטעינה) עד לדעיכה, בסדר גודל (ממאות לאלפים).

2. ניקל-קדמיום

אנודה: $\text{Cd} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Cd(OH)}_2 + 2\text{e}^-$

קתודה: $2\text{NiOOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Ni(OH)}_2 + 2\text{OH}^-$
גם למערכת זו צפיפות אנרגיה נמוכה יחסית, 50Wh/kg ולכן גם היא אינה רלוונטית להנעה חשמלית.

3. ניקל-אבץ

אנודה: $\text{Zn} \rightarrow \text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^-$

קתודה: $2\text{NiOOH} + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{Ni(OH)}_2 + 2\text{OH}^-$
למערכת זו יכולת טעינה/פריקה מוגבלת וצפיפות אנרגיה שיכולה להגיע עד 80Wh/kg. למרות צפיפות האנרגיה הגבוהה של המערכת יחסית לזו של שתי המערכות הקודמות שתיארנו, יכולת הפריקה והטעינה המוגבלת (מבחינת מספר מחזורים אפשרי) מוריד מאוד את חשיבות המערכת הזו עבור הנעה חשמלית.

4. סוללות מגנזיום נטענות

(פיתוח מיוחד של הקבוצה לאלקטרוכימיה באוניברסיטת בר-אילן)

אנודה: $\text{Mg} \rightarrow \text{Mg}^{2+} + 2\text{e}^-$

קתודה: $\text{Mo}_6\text{S}_8 + 2\text{Mg}^{2+} + 4\text{e}^- \rightarrow \text{Mg}_2\text{Mo}_6\text{S}_8$
ותמיסות אתריות עם קומפלקסים מטיפוס

הן דרך ההמרה התרמית והן דרך ההמרה החשמלית, אך אתגר חשוב לא פחות הוא פיתוח מערכות **האגירה**.

מערכות אגירה

מאחר שאנרגיה סולרית באה ממקור מתנודד, לכל מערכת המרה (למשל תאים פוטו-וולטאיים) חייבת להיות צמודה מערכת אגירה או צבירה (למשל – סוללות חשמליות), וכאן עומד לפנינו אתגר לא קטן.

אפשר לצבור אנרגיה בדרכים שונות:

בצורה **מכנית** – על ידי דחיסת גז, העלאת מים לגובה רב, (ולאחר מכן שחרור אנרגיה לפי הצורך באופן הידרו אלקטרי, על ידי טורבינות) או באמצעות גלגלי תנופה עתירי מסה.

בצורה **תרמית** – על ידי אגירת חום במערכות מבודדות מתאימות.

בצורה **כימית** – על ידי ביצוע תגובות המייצרות חומרי בעירה על ידי קליטת קרינת שמש.

בצורה **אלקטרוכימית** – על ידי מצברים חשמליים.

המאמר הזה מתרכז בצבירה והמרה אלקטרוכימית של אנרגיה לשני צרכים חשובים:

1. צבירה והמרה של אנרגיה חלופית (שמש, רוח) שנידונה לעיל, שימוש הנקרא load leveling (בקיצור LL).
2. הנעה חשמלית (נושא שיידון להלן).

בשימוש הראשון אין חשיבות רבה לצפיפות אנרגיה אלא לעמידות ארוכת טווח ולמספר רב של מחזורי פריקה וטעינה.

לצורך הנעה חשמלית חשובה ביותר צפיפות האנרגיה. על כלי רכב להיות קלים ככל האפשר. להלן נדון במערכות שונות לצבירה והמרה אלקטרוכימית של אנרגיה לאור התאמתן לצרכים הנ"ל.

למרות שקיימות אלפי תגובות חמצון-חיזור שיכולות להיות בסיס לתאים גלווניים, הממירים אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית (כלומר סוללות), אפשר להצביע על מספר מועט של מערכות אלקטרוכימיות מעשיות לצבירה והמרה הפיכה של אנרגיה חשמלית (מערכות ניטענות). המערכות הללו כוללות מצברים העובדים בטמפרטורות גבוהות (למשל, נתרן-גופרית), מערכות זרימה שפעולתן מחייבת הזרמת התמיסות האלקטרוליטיות על פני

2. צפיפות אנרגיה = אנרגיה ליחידת מסה

Hybrid Cars



6. סוללות ליתיום נטענות

אנודה: $\text{Li} \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^-$

קתודה: $\text{Li}^+ + \text{MO}_2 + \text{e}^- \rightarrow \text{LiMO}_2$

קתודות אינטרקלציה, $\text{M} = \text{Mn, Ni, Co}$ מעבר מתכת

למערכות אלו צפיפות אנרגיה תיאורטית גבוהה. ניתן להפעיל סוללות ליתיום נטענות עם אנודת ליתיום מתכתי, תוך שימוש בתמיסות אלקטרוליטיות מיוחדות וכן על ידי שימוש במערכות אלקטרוליטיות מוצקות (ג'ל, פולימר, חומר קרמי מוצק).

מערכות אלו אינן רלוונטיות לא לרכב חשמלי ולא לצרכי LL, עקב הבעייתיות בשימוש במתכת ליתיום כאנודה בסוללה נטענת (עלולה לבוא במגע עם אוויר לח, דליקה מאוד).

7. סוללות ליתיום-יון נטענות

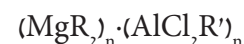
אנודה: $\text{LiC}_6 \rightarrow \text{Li}^+ + \text{e}^- + \text{C}_6$

אנודת אינטרקלציה: ליתיום לתוך גרפיט

קתודה: $\text{Li}^+ + \text{e}^- + \text{MO}_2 \rightarrow \text{LiMO}_2$

קתודות אינטרקלציה: ליתיום לתוך תחמוצת מתכת מעבר

$\text{M} = \text{V, Co, Ni, Mn, (Ni,Mn), (Ni,Mn,Co), (Ni,Co,Al)}$
מערכות אלו יכולות להגיע לצפיפות אנרגיה מעשית של 200 Wh/kg ואלו הן המועמדות הטובות ביותר לשימוש בהנעה חשמלית, עקב צפיפויות האנרגיה וההספק הגבוהים שאליהם ניתן להגיע באמצעותן. העתיד של פיתוח רכב חשמלי תלוי במערכות אלו, שבעזרתן ניתן לצמצם במידת מה את פער צפיפות האנרגיה בין הנעה



$\text{R} =$ קבוצות אלקיל, אריל.

גם למערכות אלו צפיפות אנרגיה נמוכה למדי - עד 60 Wh/kg וצפיפות הספק מוגבלת ולכן הן אינן רלוונטיות להנעה חשמלית אך עשויות להתאים בעתיד לצרכי LL.

5. סוללות ניקל מתכת הידריד

אנודה: $\text{HAB}_5 + \text{OH}^- \rightarrow \text{AB}_5 + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^-$

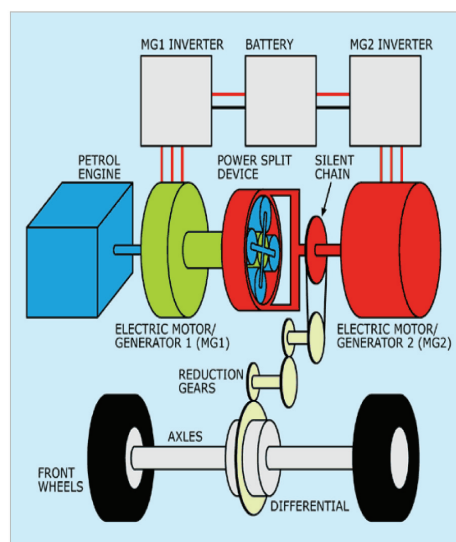
AB_5 הוא נתך כמו LaNi_5

המסוגל לספוח מימן תוך מעבר המטען הנדרש.

קתודה: $\text{NiOOH} + \text{H}_2\text{O} + \text{e}^- \rightarrow \text{Ni(OH)}_2 + \text{OH}^-$

למערכות 2, 3, ו-5 המופיעות לעיל תמיסה אלקטרוליטית מימית אלקלית $\text{H}_2\text{O}/\text{KOH}$.

למערכת 5 צפיפות אנרגיה פרקטית של 80 Wh/kg, צפיפות הספק גבוהה ומספר מחזורים רב. מערכות אלו משמשות כיום ברכב חשמלי היברידי כפתרון ביניים, עד שמערכות ליתיום-יון שיתוארו להלן יגיעו לבשלות המתאימה מבחינת בטיחות, מחיר ומספר מחזורים.



ציור 2 מכונות היברידיות. הנעה חלקית על ידי מנוע חשמלי ומצבר הנטען על ידי פעילות בלימה והאטה (עיקר ההנעה הוא עדיין מנוע שריפה פנימית).

3. רכב חשמלי היברידי = כולל הן הנעה חשמלית והן הנעה ע"י שריפה פנימית (ראו ציור 2)



וזולה יחסית - מנגן והחומר האנודי המבוסס על תחמוצת טיטניום (אף הוא חומר זמין וזול יחסית). מתח העבודה של מערכות כאלה אינו עולה על 2.5V - לעומת מתח העבודה של סוללות ליתיום-יון סטנדרטיות (ליתיום-גרפיט כאנודה ותחמוצת קובלט כקתודה) שהוא קרוב ל-4V.

הוויתור הזה על מתח גבוה ועל צפיפות האנרגיה מאפשר לקבל מערכת הפיכה שייתכן כי ניתן להפעילה במשך אלפי מחזורים.

ניתן לאגור אנרגיה בצורה אלקטרוסטטית על ידי התקנים הנקראים קבלי-על (ראו ציור מס' 4 להלן). כל מערכת אלקטרודה/תמיסה מהווה קבל מבחינה חשמלית, ולכן כל ממשק בין אלקטרודה לתמיסה יכול לאגור חשמל בצורה אלקטרוסטטית. ניתן לייצר אלקטרודות פחמן בעלות שטח פנים עצום - $2500\text{m}^2/\text{g}$. צימוד בין שתי אלקטרודות כאלה ותמיסה אלקטרוליטית יציבה בטווח של 3-4V (למשל תמיסות אלקטרוליטיות המבוססות על ממסים פולריים א-פרוטיים כפרופילן קרבונט או אצטוניטריל) מאפשר צבירה והמרה של אנרגיה בצורה אלקטרוסטטית במשך עשרות ואף מאות אלפי מחזורי פריקה וטעינה.

צפיפות האנרגיה של מערכות אלה נופלת בסדר גודל מזו של צפיפות האנרגיה של סוללות חשמליות נטענות, אולם צבירה והמרה של אנרגיה סולרית איננה דורשת צפיפות אנרגיה גבוהה שהרי ממילא עלינו לכסות שטחים עצומים בקולטים. מתחת לקולטים ניתן להתקין מערכות לצבירה והמרה של האנרגיה החשמלית ללא מגבלות נפח ומשקל.

פחמן הוא אחד היסודות הזמינים בטבע ולכן מערכות אלה מהוות אופציה חשובה ביותר.

באוניברסיטת בר-אילן מפתחים כיום סוללות מגנזיום נטענות המבוססות על אנודות מגנזיום, קתודות מוליבדנום סולפיד במבנה מיוחד, הנקראות תרכובות Chevrel (על שם המדען הצרפתי שגילה אותן) ותמיסות אלקטרוליטיות אורגניות (על בסיס ממסים אתריים) שבהן אלקטרודות מגנזיום מתנהגות בצורה הפיכה (תהליכי שיקוע והמסה של

חשמלית לבין הנעה בדלק (על ידי מנועי שריפה פנימית).

אף אחת מהמערכות לעיל אינה מתאימה מידית לצורכי צבירה והמרה של אנרגיה סולרית:

אם אכן תהיה אנרגיה סולרית גורם משמעותי במשק האנרגיה העולמי, מדובר בהספקים עצומים (טרה-ואטים) ולכן במערכות עצומות לאגירת אנרגיה. לדוגמה: אם נניח שאנו ממירים טרה-ואט אחד של אנרגיה סולרית לחשמל זמין במשך 8 שעות של אור, עלינו לצבור חלק ניכר מכמות זו כדי שיהיה אפשר לספק חשמל בשעות החשכה (16 השעות הנותרות של היממה שבהן לא ניתן לקלוט אור שמש).

צפיפות האנרגיה המעשית של הסוללות הטובות ביותר כיום, ליתיום-יון, אינה עולה על 200Wh/kg .

לכן לאגירת טרה-ואט אחד במשך 8 שעות אור יום, נדרשים לפחות 40 מיליון טון של חומרי אגירת אנרגיה המתאימים לסוללות חשמליות, לפי החישוב הבא:

$$10^{12} \times 8 / 200 = 4 \times 10^{10} \text{ kg} = 4 \times 10^7 \text{ ton}$$

מדובר בכמויות עצומות של חומרים רלוונטים ולכן תכנון מערכות אגירה מעין אלו מחייב בדיקה של זמינות חומרי הגלם בכמויות הנדרשות ובמחיר סביר.

כמו-כן על מערכות אלה לאפשר אלפי מחזורי פריקה וטעינה אמינים, שהרי מערכות עצומות כאלה הדורשות השקעות ענק. כדאי להקים אותן רק אם אורך חייהן יגיע לעשרות שנים (כלומר נדרשים אלפים רבים של מחזורי פריקה וטעינה, שהרי כל יממה מחייבת מחזור אחד).

אין כרגע בנמצא אף מערכת של סוללה חשמלית נטענת (קונבנציונלית) העונה לדרישות הללו. יחד עם זאת, ישנן כמה אופציות לשיפור המצב ואלו מתוארות להלן:

1. באדמת כדור הארץ קיימת עופרת בכמות רבה, וסוללות עופרת-חומצה הן מערכות הפיכות אמינות. כרגע סוללות אלה יכולות לאפשר מאות מחזורי פריקה וטעינה בלבד. ניתן לכאורה לשדרג את הטכנולוגיה הזו ולהעלות בסדר גודל את מספר מחזורי פריקה/טעינה שהמערכת מאפשרת.
2. ניתן להרכיב סוללות ליתיום-יון שבהן החומר הקתודי יהיה מבוסס על תחמוצת מתכת זמינה

שריפת פחם ודלק נוזלי לסוגיו מפרה את שיווי-המשקל התרמי של כדור הארץ ויוצרת "אפקט חממה" (כדור הארץ מקרין החוצה לחלל חלק קטן מקרינת השמש הפוגעת בו).

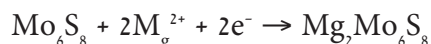
"אפקט החממה" מביא לעלייה מתמדת של הטמפרטורות הממוצעות בכל רחבי כדור הארץ ולכך יש תוצאות אקלימיות הרסניות. הפתרון האולטימטיבי לבעיה זו הוא מעבר לשימוש נרחב באנרגיה סולרית, הן על ידי קליטה תרמית והן על ידי קליטה חשמלית (פוטו אלקטרית או פוטו וולטאית), בניית מערכי קליטה על שטחים נרחבים ולצדם מערכות לצבירה והמרה של האנרגיה הסולרית הנקלטת.

ב. דלקים ואמצעי תחבורה - בעיות והצעות לפתרון

בעוד שבנושא ייצור חשמל אין למעשה משבר אנרגיה, שכן יש בידינו אופציה ארוכת טווח להמשך ייצור חשמל על ידי שריפת פחם כשהמחיר הוא סביבתי, הרי שבנושאי תחבורה אנו עומדים בפני משבר ומחסור אמיתיים - עתודות שמן האדמה הידועות לנו יספיקו רק לעשרות שנים.

ציור 3 מציג את תחזית התפוקה של שמן האדמה במהלך המאה הנוכחית. אנו קרובים עתה לשיא התפוקה והיא תתחיל לרדת בהתמדה.

מגנזיום ביעילות של 100%). כן תרכובות Chevrel עוברות תהליכי קליטה הפיכים של יוני מגנזיום על פי הסכמה הבאה:



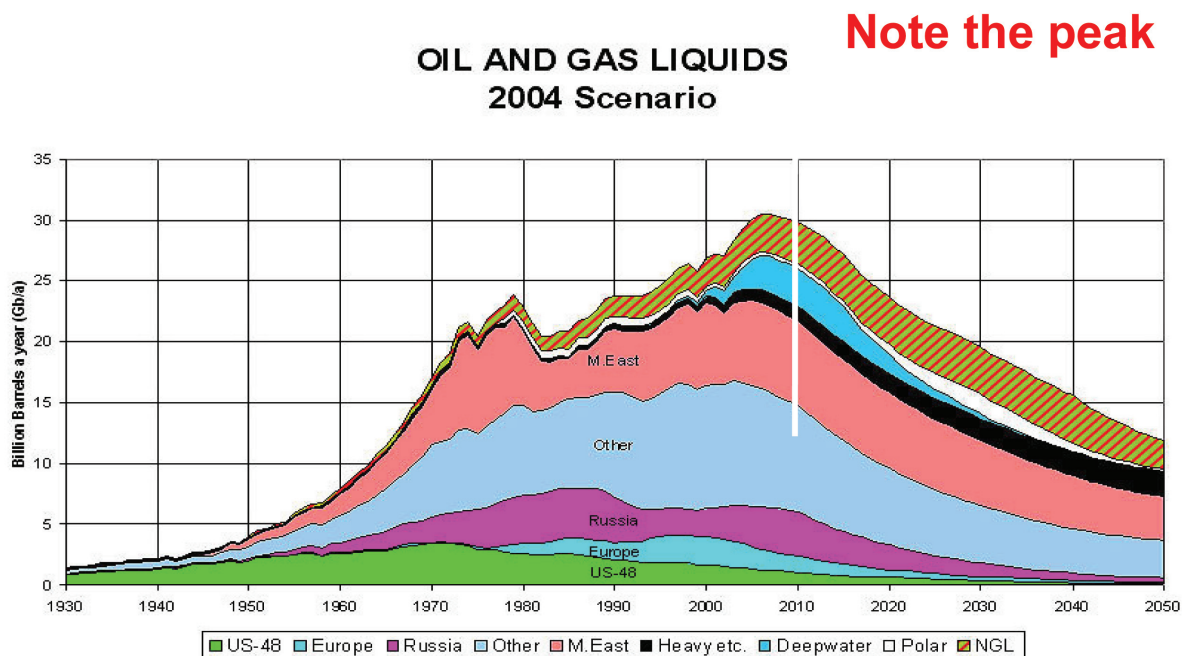
במעבדות הקבוצה לאלקטרוכימיה באוניברסיטת בר-אילן נוסו מערכות אב-טיפוס של סוללות מגנזיום נטענות שהורצו לאורך אלפי מחזורים של טעינה ופריקה.

אפשר לחשוב גם על גישות נוספות לאגירת אנרגיה סולרית כמו אלקטרוליזה של מים לייצור מימן וחמצן ושימוש במימן וחמצן בתאי דלק להפקת חשמל (תוך תגובה היוצרת מים).

הבעיה בגישה זו היא היעדר מערכות יעילות לאגירת מימן (לאגירת מימן כגז דחוס צפיפות אנרגיה נמוכה מדי, מתחת לסף ראוי מבחינה מעשית, וכן סיכון בטיחותי משמעותי).

לסיכום הפרק הזה

משבר האנרגיה הקשור לייצור חשמל הוא למעשה משבר סביבתי. פליטת גזים מואצת ומאסיבית לאטמוספירה עקב תהליכי



ציור 3 תחזית תפוקת שמן האדמה כיום ובעשורים הבאים



ניתן להפיק דלק גם מפחם על ידי תהליך פישר-טרופש:

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2; nCO + (2n+1)H_2 \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$$

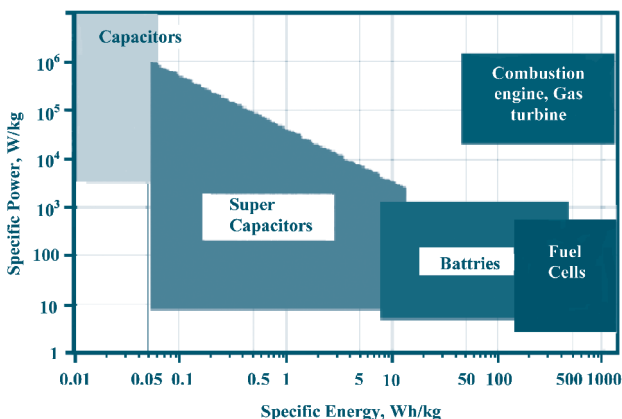
 אך מדובר בתהליך יקר הכרוך בזיהום סביבתי.

אפשר לייצר דלק גם ממקור ביו-אורגני (המוכר בשם ביו-דיזל): השמנים המיוצרים על ידי עולם הצומח והחי הם תערובות של אסטרים, תוצרי תגובות בין גליצרול וחומצות שומניות, שומנים, תוצרי פירוק של שמנים - כל אלה מהווים חומרי דלק לכל דבר.

ניתן לפתח תהליכים יעילים להפיכת שמנים אורגניים לביו-דיזל, כמו גם לפתח תהליכי תסיסה בעזרת חיידקים לפירוק פחמימות ואפילו לפרק מרכיבי עץ לפחמימנים דליקים. אולם שימוש נרחב בביו-דיזל משמעותו הקצאת משאבים ניכרת, אדמה ומים לגידול צמחים המיועדים לייצור דלק. אין לאנושות משאבים כאלה שכן אדמה ומים דרושים בראש ובראשונה לגידול צמחים למזון.

אלטרנטיבה של ניצול שטחי ים נרחבים לגידול אצות שממן ייוצר ביו-דיזל אף היא בעייתית, יקרה, וספק אם היא מעשית. לכן אנו חייבים לפתח במלוא המרץ אופציות של הנעה / תחבורה חשמלית.

ציור Ragone Plot 4 מציג צפיפות הספק מול צפיפות אנרגיה של מערכות שונות, קבלי על, סוללות חשמליות, תאי דלק ומנועי שריפה פנימית המניעים את צי הרכב כיום.



ציור 4 הצגות Ragone: צפיפות אנרגיה כנגד צפיפות הספק של התקנים שונים לצבירה והמרה של אנרגיה, סוללות נטענות, תאי דלק וקבלי-על.

כפי שניתן לראות מציור זה, להנעה בדלק באמצעות מנועי שריפה פנימית יש צפיפות אנרגיה והספק גבוהים בסדרי גודל מאלו של הסוללות הנטענות הטובות ביותר. במילים

אחרות, **הסוללה הנטענת הטובה ביותר היא מיכל הדלק הנוזלי**, הפער בינו לבין כל מערכת אלקטרוכימית בלתי ניתן לסגירה.

אף על פי כן, החברה האנושית תיאלץ במוקדם או במאוחר (תוך עשרות שנים בלבד) לוותר על יעילותה של ההנעה בדלק מבחינת מרחק הנסיעה בין טעינה לטעינה ומהירות הנסיעה האפשרית.

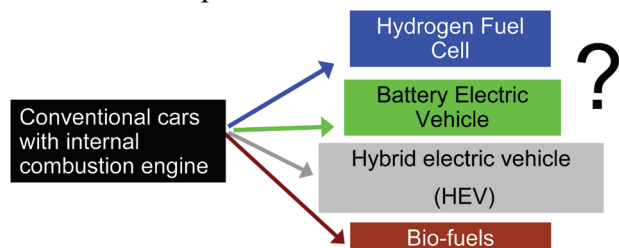
המעבר להנעה חשמלית יחייב בהכרח שינוי מהותי בהרגלי הנהיגה. נוכל לנסוע מרחקים מוגבלים - 100 עד 200 ק"מ (במקרה הטוב) בין טעינה לטעינה והמהירות תוגבל ל- 100 ק"מ לשעה.

יותר ויותר יהיה עלינו להשתית נסיעות למרחקים ארוכים על רכבות חשמליות. אמצעי תחבורה זה מוכיח את עצמו כיעיל למדי בכל הארצות המפותחות.

באשר לרכב החשמלי, נעשה כיום מאמץ מוגבר לפתח מקורות כוח אלקטרוכימיים לאופציה הזו.

להלן מובא תיאור תמציתי מהנעשה בתחום זה בעולם. ציור 5 מבטא את ההתלבטות בבחירת שיטות ההנעה החשמלית.

What are our options for EV?



ציור 5 תיאור ההתלבטות בנושא הנעה חשמלית לרכב: באילו מקורות כוח יש לבחור.

תאי דלק

תאי דלק הם למעשה סוללות ראשוניות שבהן מתבצעת תגובת שריפה בצורה אלקטרוכימית.

בקתודה עובר חמצן מהאוויר תהליך חיזור ובאנודה עובר דלק תהליך חמצון.

ישנם סוגים רבים של תאי דלק שניתן לסווגם על פי סוג הדלק (מימן, כוהלים, פחמימנים), על פי הטמפרטורות ועל פי התווך האלקטרוליטי (ממברנות מוליכות, פולימרים PEM, מלחים, קרבונטים מותכים, חומצה זרחתית, וחומרים קרמיים).

+ סוללה נטענת (בטכנולוגיות האלקטרוכימיות הקיימות כיום), לא ניתן להעביר כיום את צי הרכב מהנעת שריפה פנימית להנעה חשמלית מלאה.

רכב היברידי

הסוללות החשמליות הנטענות הטובות ביותר יכולות לאפשר, בהנעה חשמלית מלאה, נסיעות קצרות מדי במהירויות נמוכות מדי. לכן מעבר חד לרכב חשמלי מלא יהווה ירידה בלתי נסבלת ברמת החיים של האנושות. כולה ויגרום למשברים כלכליים-חברתיים בלתי נסבלים. הפתרון הוא רכב חשמלי היברידי, שכולל הן הנעה חשמלית והן הנעה באמצעות שריפה פנימית (ראו ציור 2).

ככל שטכנולוגיית הסוללות החשמליות תשתכלל, אפשר יהיה להגדיל בכל רכב את מידת השימוש בהנעה על ידי סוללות חשמליות, ובהתאמה להקטין את מידת השימוש במנועי שריפה פנימית.

הכנסת רכב היברידי לשימוש נרחב תאפשר להכין את החברה האנושית בהדרגה הנדרשת למהפך הבלתי נמנע בתחבורה: מעבר מרכב מנועי שריפה פנימית לרכב חשמלי מלא.

לכן המגמה כיום היא לפתח רכב חשמלי ברמות שונות שניתן לקטלג אותן כדלהלן:

1. רכב היברידי קל (light HEV):

רכב כגון Prius מתוצרת Toyota (יפן), המתרוצץ בכבישי העולם מזה כמה שנים, שבו יש מצבר קטן יחסית, הנטען על ידי פעולות הבלימה של הרכב ומסייע מעט בהאצה.

2. רכב היברידי בינוני (Plug in HEV=PHEV):

רכב שיש בו מצבר גדול יחסית, הנטען חיצונית על ידי רשת החשמל (וגם על ידי מנוע הרכב או פעולות הבלימה של הרכב). ברכב מסוג זה המצבר מסייע בהנעה. חלקו של המצבר בהנעה תלוי ביכולות המערכות האלקטרוכימיות הרלוונטיות.

3. רכב חשמלי מלא (EV) שבו המנוע הוא חשמלי בלבד, מופעל ע"י מצבר גדול הנטען על ידי הרשת.

גורם המפתח בפיתוח רכב חשמלי הוא כמובן מקורות הכוח.

הטכנולוגיה העיקרית המשרתת רכב חשמלי (בייחוד light HEV) כיום, היא טכנולוגיה של סוללות ניקל-מתכת הידריד (ראה לעיל).

נזכיר שלושה סוגים חשובים:

1. תאי דלק המבוססים על מימן (כדלק) וחמצן (מהאוויר, כחמצן).

2. תאי דלק הנקראים ישירים, המבוססים על כוהלים: מתאנול, אתאנול, אתילן גליקול.

3. תאי דלק העובדים בטמפרטורות גבוהות ומבוססים על חומרים קרמיים (Solid oxide fuel cells, SOFC) ויכולים להשתמש בפחמימנים כדלק (למשל מתאן CH_4).

מבחינה תרמודינמית, תאי דלק מהווים אופציה מצוינת להנעה חשמלית, שכן כאשר מבצעים תגובת שריפה בצורה אלקטרוכימית, אין לכאורה מגבלות הנובעות מהחוק השני של התרמודינמיקה לגבי הפיכת חום לעבודה. מאידך, לכל תאי הדלק יש הפסדי אנרגיה הנובעים מקינטיקה גרועה של התגובות האלקטרוכימיות. קינטיקה זו מתבטאת במתח יתר גבוה הנדרש לתפעול ומביאה לנזילות נמוכות. כדי להתגבר על הבעיות הקינטיות בחיזור חמצן וחמצון דלקים, משתמשים בקטליזטורים יקרים (בעיקר פלטינה) ובטמפרטורות גבוהות.

תאי הדלק מהסוגים 2 ו-3 לעיל, שבהם "נשרף" דלק, תורמים לזיהום אוויר כמו מנועי שריפה פנימית. בנוסף, תאי דלק ישירים (2) מחייבים שימוש בכמות גדולה מדי (בלתי נסבלת) של פלטינה כקטליזטור, בעיקר לחמצון הדלק. בתאים מסוג SOFC (3) יש בעיה תפעולית עקב הטמפרטורות הגבוהות הנדרשות לפעולתם.

לאור נתונים אלה, הטכנולוגיה הבשלה ביותר היא תאי דלק מימן-חמצן (1), המסוגלים להגיע ליעילות גבוהה יחסית בהמרת אנרגיה כימית לאנרגיה חשמלית, בטמפרטורות ובכמות קטליזטורים נמוכים יחסית.

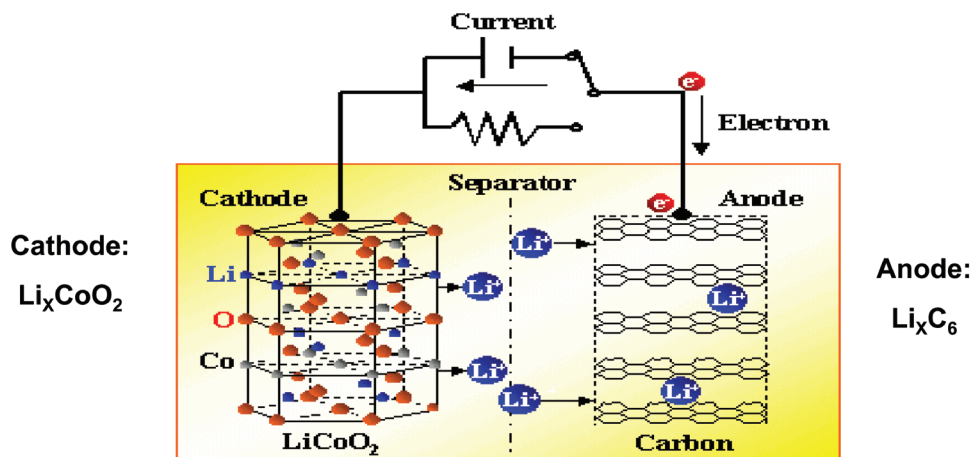
יחד עם זאת, בתאים אלה נותרה עדיין בעיה - ייצור ואגירת מימן. תפעול רכב מחייב אריזה צפופה ויעילה של דלק. אין בנמצא טכנולוגיה מעשית לאגירת מימן. שימוש בגז דחוס או במימן נוזלי כדלק להנעה חשמלית - איננו מעשי. לכן ניתן לומר שטכנולוגיית תאי דלק איננה רלוונטית עדיין כפתרון להנעה חשמלית. לפיכך נתרכז בעיקר בסוללות חשמליות נטענות ובמידה מסוימת בקבלי על כספקי צפיפות הספק גבוהה (לזמנים קצרים). מאחר שקיים פער עצום בין צפיפות האנרגיה של מערכות מנוע שריפה פנימית + מיכל דלק נוזלי לבין מנוע חשמלי



צויר 6 מתאר בצורה סכמטית את הפעולה של סוללות אלה וצויר 7 מתאר את קשת החומרים המאפשרים בניית סוללות חדשניות מסוג זה במתחים וצפיפויות אנרגיה שונות.

אולם ברור שהטכנולוגיה הרלוונטית לרכב חשמלי היא זו שצפיפות האנרגיה שלה היא הגבוהה ביותר ולכן הסוללות האמורות להניע רכבים חשמליים הן סוללות ליתיום נטענות (ראו לעיל).

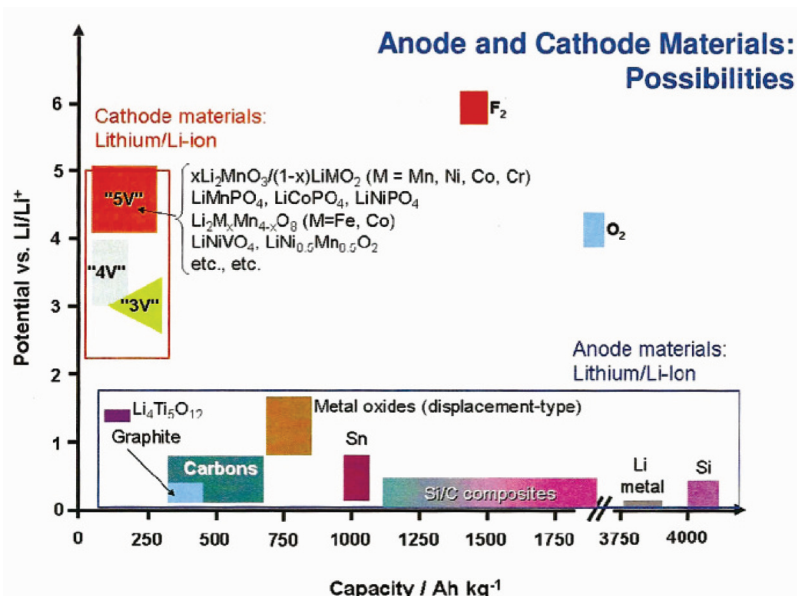
Standard (today) Rechargeable Li^+ ion batteries



Electrolyte solution: ethylene-carbonate & di-methyl carbonate/ LiPF_6

Voltage: 3.6 V Energy density: 150 Wh/Kg

צויר 6 תיאור סכמטי של סוללות ליתיום נטענות, כאלה המפעילות את רוב הטלפונים הניידים, המחשבים הנישאים והמצלמות הדיגיטליות בעולם (ליתיום-גרפיט כאנודה, Li_xCoO_2 כקתודה, יוני ליתיום עוברים אינטרקלציה/דה-אינטרקלציה מתרכובת לתרכובת במהלך פריקה וטעינה)



צויר 7 קשת החומרים הרלוונטיים לסוללות ליתיום-יון מתקדמות ציר אופקי קיבול ספציפי. ציר אנכי מתח פעולה.

מחומר פולימרי (למשל פוליאטילן ספוגי) הטבול בתמיסה האלקטרוליטית.

התהליך הראשוני הוא טעינה, שבו יוני הליתיום יוצאים מהחומר הקתודי ונכנסים בתגובה אלקטרוכימית לתוך חלקיקי הגרפיט. כך נוצר הפרש הפוטנציאל (3.5V) המפעיל את הסוללה.

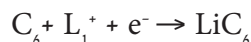
ברכב חשמלי נמצאים מארזים המכילים מאות סוללות בודדות היוצרות יחד מצבר המספק 200V ויותר וקיבול המאפשר הפעלת מנוע חשמלי בהספק סביר. צפיפות האנרגיה של מערכת כזו יכולה להגיע (כולל המארז) ל-100Wh/kg.

כפי שמראה ציור מספר 7, ישנם חומרים רבים במהלכי מחקר ופיתוח שונים, שבאמצעותם ניתן יהיה להגיע למתחים, קיבולת וצפיפויות אנרגיה גבוהות יותר (כלומר לנהיגה במהירויות גבוהות יותר וטווחים ארוכים יותר בין טעינה וטעינה).

למעשה ציים גדולים של רכבים המונעים בחשמל יכולים להיות מערכות אגירה לחשמל המיוצר ע"י אנרגיית השמש.

בימים אלה, מפותחים רכבים המבוססים על הנעה חשמלית חלקית (Hybrid) בעזרת סוללות ליתיום-יון הכוללות את המרכיבים הבאים:

אנודה - חלקיקי גרפיט העוברים אינטרקלציה הפיכה עם ליתיום על פי הנוסחה:



קתודה - חומר מוצק מינרלי (חלקיקים בגודל ננומטרי) מסוג הנקרא אוליבין (מינרלים דומים נמצאים באדמה), שנוסחתו $LiFePO_4$, העובר תגובת אינטרקלציה / דה-אינטרקלציה הפיכה עם ליתיום כדלהלן:



תמיסה - מבוססת על ממסים אורגניים מסוג אלקיל קרבונטים (למשל, אתילן קרבונט + די מתיל קרבונט) ומלח הליתיום $LiPF_6$ המתפרק היטב ליונים בתמיסה הנ"ל. מתח הסוללה הזו הוא כ-3.5V.

המקור לליתיום הוא החומר הקתודי. המערכת מורכבת מאלקטרודות המכילות גרגרי גרפיט מלוכדים על מצע נחושת (אנודה), גרגרי $LiFePO_4$ מלוכדים על מצע אלומיניום (קתודה) וביניהם ספוג דק

לסיכום

פיתוח רכב חשמלי הוא אתגר הכרחי, בלתי נמנע, עקב התדלדלות ודאית של מרבצי שמן האדמה בכדור הארץ. ברחבי העולם נעשים מאמצים פיתוח של רכב חשמלי הכוללים פיתוח סוללות ליתיום נטענות בעלות צפיפות אנרגיה גבוהה.

נעשה מאמץ לנצל חומרים זולים, זמינים על פני האדמה, המאפשרים תהליכי ייצור נוחים. המטרה היא להבטיח לא רק צפיפות אנרגיה גבוהה, אלא גם שימוש בטוח ללא הפתעות של טעינת יתר, חימום בלתי צפוי העלול להביא לתגובות לא רצויות או יצירת קצרים פנימיים.

בעוד שעיקר הרעיונות מקורו במערב, הייצור העיקרי הוא במזרח (סין).

מדינת ישראל מהווה מעבדה טבעית לבחינת המעבר

מנהיגה ברכב המונע על ידי שריפה פנימית לרכב חשמלי שכן מדובר במדינה קטנה שגבולותיה חסומים. טווחי הנהיגה המקסימליים הם קצרים ומהירויות הנהיגה המקובלות נמוכות יחסית למדינות מערביות אחרות. לכן, יש מקום להקים בהקדם, דווקא במדינת ישראל, תשתית ארצית לנהיגה ברכב חשמלי (תחנות מאורגנות למערכות טעינה, החלפת סוללות והשבתן לשימוש).

ניתן כבר עכשיו לסמן את הטכנולוגיה המועדפת לשימוש ברכב חשמלי: סוללות הליתיום הנטענות שתוארו לעיל. ברחבי העולם שוקדות מאות רבות של קבוצות מחקר על פיתוח סוללות ליתיום-יון לרכב חשמלי. מאמץ בכיוונים אלה נעשה גם בארץ, בקבוצות המחקר לאלקטרוכימיה שלי באוניברסיטת בר-אילן ושל פרופ' עמנואל פלד באוניברסיטת תל-אביב.

