



משרד האנרגיה והמים

# שילוב רכב חשמלי והיברידי לסוגיו במערך

## התחבורה בישראל

שלב א': סקר ספרות



מוגש למשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים, מנהלת  
תחליפי נפט

מכרז 53/12

ספטמבר 2013

כתבו וערכו:

פרופ' אופירה אילון

יערה גרינברג

עידן ליבס

מוסד שמואל נאמן  
למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה



גדי רוזנטל

דנה גבאי



יועץ לענייני תחבורה - ד"ר ליאוניד טרטקובסקי - טכניון

## תוכן עניינים

6	מבוא	1.1
7	רקע ומבנה העבודה	1.2
8	שיפורים במנועי בעירה פנימיים	2.1
10	סוללות	2.2
13	טכנולוגיות נוספות לאגירת אנרגיה	2.3
13	גלגל תנופה	2.3.1
13	קבלי-על	2.3.2
17	רכבים היברידיים Hybrid-Electric Vehicles	3.
17	כללי	3.1
18	מאפיינים טכניים	3.2
18	תצורה טורית (Series HEVs)	3.2.1
19	תצורה מקבילה (Parallel HEVs)	3.2.2
20	תצורה משולבת (Series-parallel HEV)	3.2.3
21	מאפיינים סביבתיים של רכבים היברידיים	3.3
21	תקינה	3.4
21	שיעורי חדירה	3.5
22	חסמים	3.6
22	תמריצים	3.7
23	ניתוח SWOT רכבים היברידיים	3.8
24	רכבים היברידיים פלאג-אין, Plug-in Electric Vehicles	4.
24	כללי	4.1
24	מאפיינים טכניים	4.2
25	מאפיינים סביבתיים	4.3
27	תקינה	4.4
27	שיעורי החדירה בעולם	4.5
28	חסמים	4.6
28	תמריצים	4.7
28	ניתוח SWOT רכבים היברידיים פלאג-אין	4.8
29	רכבים חשמליים Electric Vehicles/ Battery Electric Vehicles	5.
29	כללי	5.1
30	תשתית טעינה והחלפת סוללה	5.2
31	רשת חכמה – Smart grid	5.3
32	מאפיינים סביבתיים	5.4
33	תקינה	5.5
34	שיעורי חדירה	5.6
34	בישראל	5.6.1
34	בעולם	5.6.2
34	תחבורה ציבורית	5.6.3
34	משאיות	5.6.4
36	חסמים	5.7
38	היבטים רגולטורים - תקנות ותמריצים	5.8
38	תמריצים בישראל	5.8.1
39	תמריצים בעולם	5.8.2
42	ניתוח SWOT רכבים חשמליים	5.9

43 .....	Fuel Cell Vehicles/ Fuel Cell Electric Vehicles <b>רכבים מונעי תא דלק</b>	6.
43.....	רקע	.6.1
43.....	מאפיינים טכניים	.6.2
46.....	תשתיות	.6.3
49.....	מאפיינים סביבתיים	.6.4
50.....	היבטים בטיחותיים	.6.5
50.....	שיעורי חדירה בעולם	.6.6
51.....	חסמים	.6.7
51.....	היבטים רגולטורים - תקנות ותמריצים	.6.8
51.....	ניתוח SWOT רכבי FCV	6.9.
52 .....	<b>סיכום</b>	<b>.7</b>
54 .....	<b>ביבליוגרפיה פרק רכבים</b>	<b>.8</b>
58 .....	<b>נספחים</b>	<b>.9</b>
58.....	<b>נספח א' - גז טבעי נוזלי (LNG)</b>	<b>.9.1</b>
58.....	רקע	.9.1.1
58.....	תשתיות	.9.1.2
58.....	מאפיינים סביבתיים	.9.1.3
60.....	חדירה לשווקים	.9.1.4
60.....	תחבורה ציבורית	.9.1.5
60.....	משאיות	.9.1.6
60.....	חסמים	.9.1.7
61.....	תמריצים ורגולציה	.9.1.8
61.....	סיכום מאפייני LNG	9.1.9.
62.....	<b>נספח ב' - גז פחמימני מעובה (גפ"מ)</b>	<b>.9.2</b>
62.....	רקע	.9.2.1
62.....	תשתיות	.9.2.2
63.....	מאפיינים סביבתיים	.9.2.3
64.....	חדירה לשווקים	.9.2.4
64.....	תחבורה ציבורית	.9.2.5
64.....	משאיות	.9.2.6
64.....	חסמים	.9.2.7
65.....	רגולציה	.9.2.8
65.....	תמריצים	.9.2.9
66.....	סיכום מאפייני גפ"מ	.9.2.10
66.....	ניתוח SWOT רכבי גפ"מ	.9.2.11
	<b>נספח ג' - מחירים וצריכת דלק של רכבים נבחרים מסוג HEV, PHEV, BEV ו-FCEV</b>	<b>.9.3</b>
	67	FCEV
68.....	מקורות	.9.3.1

## רשימת תרשימים

11	תרשים 1 - קיבולת האנרגיה של סוגי סוללה שונים
13	תרשים 2 - גלגל תנופה (flywheel) מחובר למנוע, שרטוט של ג'נרל מוטורס
14	תרשים 3 - מבנה ועקרון פעולה של קבלי-על
14	תרשים 4 - קיבולת אנרגיה והספק של מקורות הנעה שונים
15	תרשים 5 - שימוש בגוף הרכב לאגירת אנרגיה, וולוו
16	תרשים 6 - אוטובוס ה-Ultracap Bus מונע קבלי-על, בטעינה בתחנה
16	תרשים 7 - אוטובוס היברידי Lion's City Hybrid של חברת MAN המשלב מנוע דיזל עם קבלי-על
19	תרשים 8 - מערכת הנעה היברידית, תצורה טורית
19	תרשים 9 - מערכת הנעה היברידית, תצורה מקבילה
20	תרשים 10 - מערכת הנעה היברידית, תצורה משולבת (power-split)
26	תרשים 11 - הפחתת פליטות גזי חממה ע"י PHEV כתלות בטווח החשמלי ובדלק
26	תרשים 12 - פליטות CO <sub>2</sub> של רכבים קונבנציונלים, HEV ו-PHEV כתלות באמצעי ייצור החשמל
38	תרשים 13 - העלייה במחירי המתכות הנדירות
44	תרשים 14 - Fuel cell stack
44	תרשים 15 - מבנה ואופן הפעולה של תא דלק מסוג PEM
45	תרשים 16 - יחידת הכח של תא הדלק
45	תרשים 17 - המקורות הנוכחיים להפקת מימן
47	תרשים 18 - השוואת עלות ההפקה והחלוקה של מימן לדלקים אחרים, על בסיס עלות ל-gge
47	תרשים 19 - השוואת עלות ההפקה והחלוקה של מימן לדלקים אחרים, על בסיס עלות למייל
53	תרשים 20 - פרמיית העלות של רכבי סוללה והחיסכון בדלק בטווח הקרוב והרחוק*
59	תרשים 21 - האפקט המחמם של דליפות מתאן מכלי רכב בטווח הקצר
59	תרשים 22 - ניתוח LCA של פליטות CO <sub>2</sub> של LNG ודיזל לפי מחקרים שונים
63	תרשים 23 - פליטות מזהמים של רכבי גפ"מ (Autogas) בהשוואה לבנזין ולדיזל
63	תרשים 24 - פליטות CO <sub>2</sub> של רכבי גפ"מ על בסיס WTW בהשוואה לבנזין ולדיזל

## רשימת טבלאות

- 8..... טבלה 1 - סיכום מאפייני רכב בנזין קונבנציונלי כיום
- 10..... טבלה 2 - מרכיבים שונים לשיפור יעילות מנועי בנזין ודיזל, והערכת עלותם
- 12..... טבלה 3 - מאפייני הסוללות בטווח הקרוב והרחוק
- 18..... טבלה 4 - מאפייני רכב היברידי טיפוסי (טויוטה פריוס 2012)
- 21..... טבלה 5 - השוואה בין מאפייני רכבי HEV לרכבי בנזין קונבנציונליים\*
- 23..... טבלה 6 - ניתוח SWOT רכבים היברידיים
- 24..... טבלה 7 - מאפייני רכבי היברידי פלאג-אין אופייני (טויוטה פריוס פלאג-אין 2012)
- 28..... טבלה 8 - ניתוח SWOT רכבים היברידיים פלאג-אין
- 29..... טבלה 9 - מאפייני רכב חשמלי טיפוסי
- 32..... טבלה 10 - נתוני זיהום אוויר בייצור חשמל מגז טבעי ופחם בישראל 2020
- 33..... טבלה 11 - השוואה סביבתית בין רכבי בנזין, HEV ו-EV
- 34..... טבלה 12 - מספר כלי הרכב החשמליים הרשומים במדינות שונות בשנת 2011
- 40..... טבלה 13 - מיסים ותמריצים פדרליים בארה"ב לדלקים אלטרנטיביים
- 41..... טבלה 14 - מיסים ותמריצים פדרליים בארה"ב לרכבים אלטרנטיביים
- 42..... טבלה 15 - ניתוח SWOT רכבים חשמליים
- 43..... טבלה 16 - מאפייני FCV - Honda FCX Clarity
- 48..... טבלה 17 - מרכיבי המחיר של gge מימן
- 48..... טבלה 18 - עלות השקעה משוערת בתשתית, \$/day/gge
- 49..... טבלה 19 - עלות הפקת המימן ופליטות CO<sub>2</sub>
- 51..... טבלה 20 - ניתוח SWOT רכבי FCV
- 52..... טבלה 21 - השוואה מסכמת
- 61..... טבלה 22 - סיכום מאפייני LNG (משאית בעלת מיכל דלק בנפח 570 ליטר, השוואה לדיזל ול-CNG)
- 61..... טבלה 23 - ניתוח SWOT רכבי LNG
- 66..... טבלה 24 - סיכום מאפייני גפ"מ (הערכה, השוואה לפולקסווגן גולף 2.0)
- 66..... טבלה 25 - ניתוח SWOT רכבי גפ"מ
- 67..... טבלה 26 - מחירים וצריכת דלק של רכבים נבחרים מסוג HEV, PHEV, BEV ו-FCEV

## 1. מבוא

מערכת התחבורה העולמית מושתתת כיום רובה ככולה, על דלקים מבוססי נפט המוזנים למערכות הנעה המונעות בלעדית ע"י מנוע בעירה פנימית. על רקע הדאגה העולמית מההשפעות הסביבתיות המחרפות של השימוש בדלקים פוסיליים (על בריאות הציבור והסביבה) והצורך להיגמל מהתלות האנרגטית בהם (בעיקר בסקטור התחבורה), מושקעים מאמצעי מחקר על מנת לתת מענה, בין היתר, לשני הכיוונים המשלימים הבאים:

- העמקת המחקר והפיתוח בניהול מערכות תחליפי דלקים ביולוגים או סינטטיים לשימוש בתחבורה
- פיתוח ופריסה מערכות הנעה אלטרנטיביות, יעילות ונקיות יותר (במונחי צריכת דלק ופליטת מזהמים)

במסגרת החלטת ממשלה משנת 2011<sup>1</sup> בדבר הפעלת תכנית לאומית להפחתת התלות העולמית בנפט, ובהמשך להחלטת ממשלה נוספת משנת 2013<sup>2</sup> בנושא הפחתת התלות הישראלית בנפט לתחבורה, מקדמת יחידת המדען הראשי, במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים, מחקר מעמיק בשני הכיוונים לעיל.

מסמך זה הינו חלק ממערך דוחות שנועדו לתת מענה לצרכי המחקר הללו והוא מוגש למנהלת תחליפי נפט במשרד האנרגיה, במסגרת מכרז 53/12. על פיו, תעסוק העבודה בשני הנושאים הבאים:

1. טכנולוגיות להפקת דלקים מפסולות
2. מערכות הנעה חשמליות והיברידיות לרכבים

כל נושא נחקר בשני שלבים (להלן שלב א'/ב'). הראשון נועד לספק סקירה ספרותית מקיפה על ישימותם של הטכנולוגיות לייצור הדלק ומערכות ההנעה שנבחנו. השלב השני מספק ניתוח כלכלי ראשוני וניתוח מחזור חיים של שימוש בטכנולוגיות ובמערכות ההנעה השונות. נדגיש כי על אף נקודות ההשקה בין שני כיווני המחקר, הנושאים נותחו והוצגו בנפרד.

מסמך זה הינו שלב א' עבור הפרק השני ויעסוק בסקירת ספרות אודות מערכות ההנעה האלטרנטיביות (תוך דגש על רכבים חשמליים והיברידיים, לסוגיהם).

<sup>1</sup> מספר 2790 מיום 30.1.2011  
<sup>2</sup> מספר 5327 מיום 13.1.2013

## 2. רקע ומבנה העבודה

מערכות ההנעה מתפרשות על ציר שמצדו האחד רכבים בעלי מנוע בעירה פנימי (ICE), המונעים מדלקים פוסיליים בלבד (לרב בנזין או סולר), ומצדו השני רכבים בעלי הנעה חשמלית גרידא שאינם צורכים דלק באופן ישיר כלל. באמצע נמצאים הרכבים ההיברידיים המשלבים את שתי מערכות ההנעה גם יחד ומאפשרים, כפי שיוצג בהמשך, התייעלות ניכרת בביצועי הרכבים (במונחים של ק"מ לליטר ופליטת פד"ח ומזהמים לאוויר). רכבים נוספים הנמצאים בשלבי פיתוח מוקדמים, הם רכבי תאי הדלק המונעים מתאים אלקטרו-כימיים שממירים אנרגיה כימית מהדלק המסופק להם, לאנרגיה חשמלית.

כחלק מהרקע לפרק, תינתן סקירה קצרה על השיפורים הנצפים כיום בביצועי רכבי מנועי בעירה פנימית (Internal Combustion Engine – ICE). הסקירה הכרחית, שכן מגמות אלו הינן חלק בלתי נפרד מתעשיית הרכבים בכלל וההיברידיים בפרט, והן בעלות השפעה חשובה על מערכת היתרונות היחסיים של סוגי הרכבים הנסקרים (וניתוחי עלות תועלת הנובעים מהם). לאחר מכן, עדיין במסגרת הרקע, יוצגו בקצרה נושא הסוללות המהווה תפקיד ואתגר מרכזי עבור מערכות ההנעה החשמלית וההיברידי (בייחוד פלאג-אין) וטכנולוגיות נוספות לאגירה.

הפרקים הבאים יתייחסו לכל סוג רכב בנפרד הנחלקים לארבע קבוצות עיקריות:

- **רכבים היברידיים (Hybrid Electric Vehicle – HEV)** - רכבים המשלבים שתי מערכות הנעה משלימות: מנוע בעירה פנימי ומנוע חשמלי. המנוע החשמלי מונע ממצברים שאינם נטענים מהרשת.
- **רכבים היברידיים פלאג-אין (Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV)** - רכבים בעלי שתי מערכות הנעה, שניתן את המצברים המניעים את המנוע החשמלי, להטעין ישירות מרשת החשמל.
- **רכבים חשמליים (Electric vehicles – EV; Battery Electric vehicles – BEV)** - רכבים הפועלים ללא מנוע בעירה פנימי כלל. על ידי חיבור הסוללה לרשת החשמל והטענתה יכולים רכבים אלו לנסוע טווחי נסיעה מוגבלים ונמוכים משמעותית מאלו של רכבי ה-ICE. רכבים אלו לא פולטים מזהמים כלל העירוני באזור בו הם נוסעים ומקטינים משמעותית את ההשפעה על זיהום האוויר ופליטות הפד"ח באזורים אלו.
- **רכבי תא דלק (Fuel Cell Vehicles – FCV; Fuel Cell Electric Vehicles – FCEV)** - מקור האנרגיה להנעתם הוא תא דלק המפיק חשמל ומעבירו למנוע חשמלי. בניגוד לסוללה שהיא מתקן לאגירת חשמל, תא דלק משתמש בדלק (שיכול להיות בעיקרון כל דלק, אך הנטייה היום היא להשתמש במימן הדחוס בלחץ 350 אטמוספרות), על מנת לייצר חשמל בריאקציה כימית. לרכבים אלו אין פליטות כלל והם עשויים להיות בעלי טווח נסיעה דומה לזה של רכבים קונבנציונאליים.

כל פרק יכיל, עבור כל סוג רכב, את מאפייניו הטכניים, הסביבתיים, שיעורי חדירתו לשווקים, התקינה והתמריצים בארץ ובעולם. הסקירה תתבצע על פי ניסיון בינלאומי, שיחות עם מומחים ועבודות שנעשו על ידי גורמי ממשל מוסמכים ואובייקטיבים ברחבי העולם (המידע על היצע הרכבים ומאפייניהם נלקח

מאתר מנתוני רשות הסביבה האמריקאית (EPA)<sup>3</sup>.

## 2.1. שיפורים במנועי בעירה פנימיים

לאור המודעות הסביבתית ומחירי הדלקים המאמירים, תעשיית הרכב שיפרה באופן משמעותי את הרכבים ה"קונבנציונליים" (אלו בעלי מנוע הבעירה הפנימי, המונע ע"י בנזין או על דיזל) במטרה לייעל את צריכת הדלק ולהפחית את פליטות גזי החממה וזיהום האוויר (NAP, 2013). נושא זה חשוב מכיוון שמנועי בעירה פנימיים הם חלק בלתי נפרד ממערכות ההנעה ההיברידיות והשיפורים בהם משנים את יתרון היחסי ביחס לרכבים אחרים. ככל שביצועי הרכבים הקונבנציונליים ישתפרו, לטכנולוגיות ההנעה האלטרנטיביות תהיה תחרות קשה יותר, ומנקודת המבט של הצרכן, התמריץ הכלכלי לעבור לרכב אלטרנטיבי יפחת.

אחת האסטרטגיות שאומצה באירופה, להפחתת פליטות הפחמן דו-חמצני (פד"ח, CO<sub>2</sub>), היא עידוד מעבר לרכבי דיזל הידועים ביעילותם הגבוהה יחסית לרכבי בנזין בכל הנוגע לפליטת פד"ח. רכבי דיזל פולטים פחות CO<sub>2</sub> ושאריות דלקים פחמימניים (HC) ו-CO, לעומת זאת הם רועשים יותר ומעלים באופן משמעותי את פליטות תחמוצות החנקן (NO<sub>x</sub>) והחלקיקים (PM). בנוסף, חשוב לציין כי השימוש ברכבי דיזל באירופה הוא קצר טווח, ורכבים אלה יורדים מהכביש במהירות רבה (שלא כמו בישראל).

להלן נתונים מאפיינים של רכבים קונבנציונליים כיום כפי שנקחו מאתר משרד האנרגיה האמריקאי:

טבלה 1 - סיכום מאפייני רכב בנזין קונבנציונלי כיום

דגם	סוג דלק	יעילות המנוע	ק"מ לליטר דלק	עלות ק"מ (ליטר בנזין=7.57 ש"ח)	פליטות CO <sub>2</sub> (גרם לק"מ, LCA)
פולקסווגן גולף R 2.0 ידנית 2012	בנזין	18%	9.26	82 אגורות	212
פולקסווגן גולף 2.0 דיזל טורבו ידנית 2012	סולר	24%	14.3	60 אגורות	159

מאז שנת 1978 יצרניות הרכב האמריקאיות עובדות על פי סטנדרט CAFÉ (Corporate Average Fuel Economy) שנקבע ע"י משרד התחבורה האמריקאי ומגדיר מטרות ליעילות צריכת הדלק של רכבי נוסעים ומשאיות ומכריח, דה פקטו, את התעשייה להתייעל. מאז שהוכנס לשימוש בראשונה, עלו דרישות CAFE ליעילות ממוצעת של רכב נוסעים מ-18 מייל לגלון ל-30.2 מייל לגלון ב-2011 (NHTSA 2011), וצפויים לעלות ל-49.6 מייל לגלון (17.5 ק"מ.ליטר) עד 2025 (NAP, 2013).

<sup>3</sup> <http://www.fueleconomy.gov/>

מאחר ורכבים היברידיים כוללים גם מערכת ICE, חשוב לסקור את ההתפתחויות הרלוונטיות בתחום הפחתת העומס ושיפורים במערכת ההנעה:

#### שיפורים להפחתת העומס:

- הפחתת המשקל העצמי של הרכב ע"י שימוש בחומרים קלים יותר – ההנחה היא שכל הפחתה של 10% ממשקל הרכב שווה ערך ל-6-7% חיסכון בצריכת הדלק. חברת הרכב Lotus Engineering מעריכה שעד שנת 2020 יהיה ניתן להפחית 20% ממשקל הרכב ללא עלות, ו-40% מהמשקל בעלות של 3% ממחירו הכולל (בעיקר רכבים המורכבים מאלומיניום ומגנזיום). במשאיות ורכבים כבדים המשקל יופחת באופן פחות משמעותי, על מנת לשמר את יכולת הגרירה שלהם. מומחים מדגישים כי חשוב לבחון את ההשפעה שיש להפחתה במשקל הרכב על בטיחות הנוסעים.
- שיפורים אווירודינמיים והפחתת חיכוך – 10% הפחתה מהחיכוך עם הכביש שווים 1-2% התייעלות בצריכת הדלק, והפחתת 10% מכוח הגרר כתוצאה מההתנגדות האווירודינמית מפחיתים 2% נוספים בצריכת הדלק. שיפורים אלו ניתן להשיג ע"י עיצוב אווירודינמי יותר (שמשא קדמית משופעת יותר לדוגמה) או על ידי שימוש בצמיגים מחומרים מיוחדים ובעיצובים מיוחדים להקטנת החיכוך עם הכביש.
- ייעול כל המערכות צורכות החשמל של הרכב קרי המזגן, התאורה, הגה כוח וכדומה.

#### שיפורים במערכת ההנעה:

- מערכת הזרקת דלק ישירה (Gasoline Direct Injection – GDI\DI) – מערכות יעילות יותר שהולכות ותופסות חלק נרחב יותר משוק הרכב האמריקאי. הזרקת הדלק ישירות לצילינדרים מאפשרת יעילות גבוהה יותר ותוספת הספק. ניתן לשלב את ה-GDI עם מגדש טורבו (Turbocharger), מה שיוסיף עוד הספק ויאפשר הקטנה נוספת של המנוע. עד 2025 המנועים המשופרים צפויים להיות יעילים יותר ב-20-25%.
- הפחתת הפסדי האנרגיה כתוצאה מחיכוך – החיכוך של הרכב במנוע גורם להפסדי אנרגיה ושיפור הרכבים השונים בבוכנה ובצילינדר יכול להביא להתייעלות משמעותית. קצב התקדמות הטכנולוגיה הוא בערך הפחתה של 1% מהפסדי החיכוך בשנה. כך שעד 2030 החיכוך יופחת ב-17% בהשוואה להיום<sup>4</sup>. כאמור במבוא, קיימים חילוקי דעות בנוגע לחלק מההערכות הללו (לדוגמת הטבלה הבאה המציגה הערכות שונות שמקורן ב-EPA).
- שיפורים בתיבות ההילוכים – יש כבר תיבות אוטומטיות של 8 ו-9 הילוכים במקום ה-6 המוכרים. זה מאפשר למנוע לעבוד בנצילות גבוהה יותר במגוון רחב של מצבי פעולה. עד 2025 צפויה ירידה של כ-20-33% בהפסדי אנרגיה פנימיים של תיבות ההילוכים.

בטבלה הבאה ניתן לראות את השפעת פיתוחים טכנולוגיים שונים על התייעלות מנועי בנזין ודיזל. השיפורים, הן ביעילות מנועי הבנזין והן ביעילות מנועי הדיזל, הם בתחומים שונים ובכיוונים שונים – החל מהצתה, התמסורת, הקטנת החיכוך ומשקל הרכב, וכלה בטכנולוגיות להפחתת פליטות מהמפלט.

טבלה 2 - מרכיבים שונים לשיפור יעילות מנועי בנזין ודיזל, והערכת עלותם

	Improvement potential (% of reduction in fuel use, cumulative)		Cost (USD/vehicle, cumulative)	
	Near term	Long term	Near term	Long term
<b>Spark ignition engines</b>				
Emission control requirements	-1%	-2%	250	350
Reduced engine friction	0%	0%	310	350
Starter-alternator	7%	7%	560	480
Variable valve lift and timing (VVT)	12%	11%	800	710
Advanced cooling circuit + electric water pump	14%	13%	950	840
GDI stoichiometric, including downsizing and turbocharging	20%	19%	1 570	1 060
GDI advanced (CAI, with VVT)		23%		1 580
Transmission improvements	24%	28%	2 200	2 150
<b>Compression ignition engines</b>				
Emission control requirements	-3%	-4%	500	700
Reduced engine friction	-1%	-2%	560	700
Starter-alternator	6%	4%	880	890
Diesel engine	24%	22%	2 440	1 960
Advanced combustion in diesel engines		26%		2 480
Advanced cooling circuit + electric water pump	26%	28%	2 590	2 600
Transmission improvements	30%	33%	3 220	3 160

מקור: IEA (2009)

## 2.2. סוללות

השימוש בסוללות הוא פתרון לשיפור היעילות האנרגטית של הרכבים, הנובעת מהיעילות הנמוכה של רכבי ICE. ברכבי מנוע בעירה פנימי ישנם איבודי אנרגיה משמעותיים ורק 35% מהאנרגיה האצורה בדלק מניעה את הגלגלים והיתר, כ-65%, אובדת כחום או חיכוך (ידוע כי הרגלי נהיגה לא יעילים של האצה והאטה רק מגבירים את הבזבז). מערכת הנעה חשמלית מאפשרת לאזן את התנודתיות – ליתר הספק עודף של ה-ICE בתאוצה כשהמנוע החשמלי ייכנס לפעולה, ולאגור בסוללה אנרגיה עודפת בזמן האטה (בלימה רגנרטיבית).

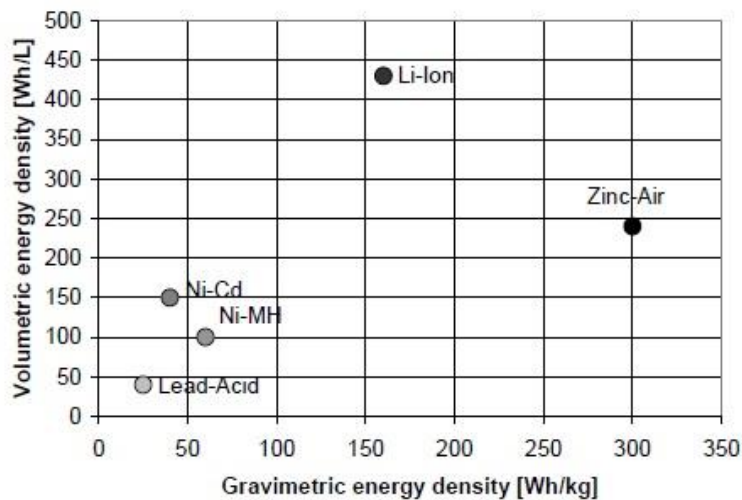
חסמים מרכזיים רבים, המעכבים חדירה משמעותית של רכבים היברידיים (בעיקר PHEV) וחשמליים לשוק, תלויים ישירות בהתקדמות הטכנולוגית בתחום הסוללות. האתגרים העיקריים הם:

1. השגת היכולת לאגור בסוללה מספיק אנרגיה שתספיק לטווח נסיעה דומה לזה של רכבים קונבנציונליים מונעים בדלק, תוך צמצום נפח ומשקל הסוללה, שמכבידים על ביצועי הרכב ועיצובו
2. טעינת הסוללה בזמן קצר שיהיה דומה לזמן תדלוק של רכב רגיל
3. העלות הגבוהה של הסוללה ובעקבות כך של רכב חשמלי/ היברידי באופן כללי
4. היבטים של טיפול בסוללות ישנות והזיהום הפוטנציאלי מהן
5. נדירות המתכות בהן משתמשים בסוללות

הסוללה עובדת באופן אופטימאלי בטווח טמפרטורה מסוים כאשר מזג אוויר קר משפיע לרעה על קיבולת הסוללה ומקצר את טווח הנסיעה. בעיות נוספות איתן יש להתמודד הן דעיכת קיבולת הסוללה לאורך הזמן, זמן חיים קצר יחסית (מספר מחזורי פריקה-טעינה נמוך) ואופן הטיפול בסוללות לאחר השלכתן.

המקובל בספרות המקצועית הוא שקיבולת הסוללה של רכב חשמלי (EV) היא 30-50 קוט"ש, והיא גדולה באופן משמעותי בהשוואה לסוללות של רכבי PHEV (06-30 קוט"ש) ושל רכבי HEV (1-2 קוט"ש). ברכבי HEV, סוללות (Nickel Metal Hydride) NiMH הן הנפוצות ביותר, אך מאחר וההערכות הן שהטכנולוגיה הגיעה למיצוי, לא צפויים בהן שיפורים או הורדת עלויות. מסיבות אלה, המגמה הרווחת כיום בקרב יצרני המכוניות היא מעבר לשימוש בסוללות Lithium ion בעלות הקיבולת הטובה יותר בכל סוגי הרכבים החשמליים וההיברידיים, ונראה כי הטכנולוגיה עוד רחוקה ממיצוי וצפויים בה שיפורים, כמו גם הורדת עלויות. למרות כל האמור לעיל, גם אם ישתפרו הסוללות וקבלי העל (יפורט בהמשך), הסוללות היעילות ביותר הן בעלות קיבולת של 300 ואט-שעה/ק"ג (או 430 ואט-שעה/ליטר בחישוב לפי נפח), ועדיין רחוקות מאוד מהקיבולת האנרגטית של מתנול, LNG, בניין ודיזל - בערך 6,000, 12,000, 13,000 ו-14,000 ואט-שעה/ק"ג בהתאמה (Tartakovsky et al. 2012).

תרשים 1 - קיבולת האנרגיה של סוגי סוללה שונים



מקור: Tartakovsky et al. (2012)

מחירי הסוללות צפויים לרדת עם הזמן, ככל שיגדלו היקפי הייצור (עם זאת יש אלו הטוענים כי מחירם ייעלה דווקא בשל נדירות המתכות בהן). מחיר קוט"ש סוללה לרכב חשמלי בעל טווח של 150 ק"מ צפוי לעלות 400-500 דולר ב-2020. מחיר קוט"ש סוללה לרכבי PHEV יהיה מעט גבוה יותר, מאחר ועל הסוללות ברכבים אלה להיות בעלות צפיפות אנרגטית גבוהה יותר. ה-IEA העריך שמחיר הסוללות (השלמות) לרכבים חשמליים בעלי טווח 150 ק"מ יהיה בטווח 16-20 אלף דולר, מחיר סוללה בעלת 8 קוט"ש לרכבי PHEV בעלי טווח 30-40 ק"מ יעמוד על כ-6,000 דולר, ומחיר סוללה לרכבי HEV יעמוד על 1,000 דולר בערך (IEA 2009). מידע נוסף ניתן למצוא בטבלה הבאה. ניתן לראות כי האנרגיה בטווח הארוך תהיה נמוכה יותר, משקל הסוללת יפחת וכך גם העלות הכוללת והעלות לק"מ נסיעה.

טבלה 3 - מאפייני הסוללות בטווח הקרוב והרחוק

**Table 3.7** ► Characteristics of batteries for different vehicles

	Battery	Timeline	Energy	Power	Weight	Specific costs		Total cost
			(kWh)	(kW)	(kg)	(USD/kWh)	(USD/kW)	(USD)
Conventional hybrid	NiMH	Near term	1.0	45	35-50	750-830	16-18	750-830
	NiMH	Long term	0.5	45	30-40	560-640	5.5-6.5	250-290
Conventional hybrid	Li-ion	Near term	1.0	45	15-25	760-1 000	17-22	760-1 000
	Li-ion	Long term	0.5	45	10-20	460-700	4.5-7	210-320
Plug-in hybrid	Li-ion	Near term	8	75	45-65	570-755	59-80	4 600-6 000
	Li-ion	Long term	6	75	30-50	420-645	33-52	2 500-3 900
Electric LDV 150 km range	Li-ion	Near term	33	75	180-240	470-620	230-300	16 000-20 000
	Li-ion	Long term	27	75	130-200	350-530	120-190	9 000-14 000
Electric LDV 200 km range	Li-ion	Near term	44	75	235-315	445-590	300-400	20 000-26 000
	Li-ion	Long term	36	75	170-270	330-505	160-240	12 000-18 000
Electric LDV 400 km range	Li-ion	Near term	88	75	415-555	405-535	520-700	36 000-47 000
	Li-ion	Long term	72	75	310-470	300-460	290-440	22 000-33 000

מקור: IEA (2009)

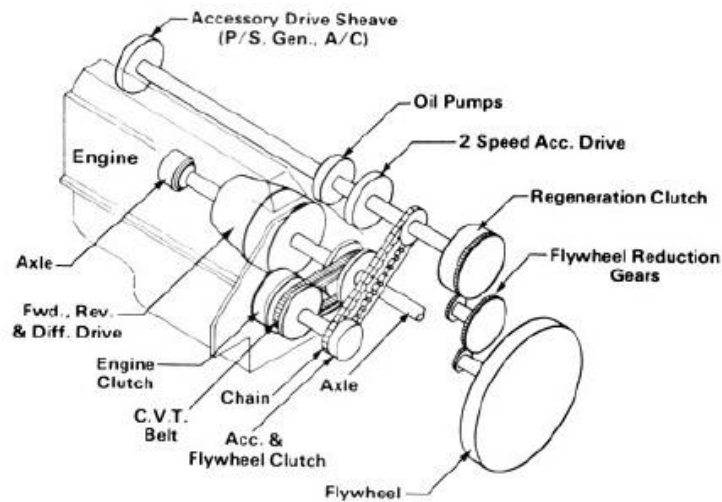
## 2.3. טכנולוגיות נוספות לאגירת אנרגיה

ישנן בנמצא טכנולוגיות נוספות בעלות מאפיינים ומגבלות ייחודיים, אשר מונעים מהן להוות בסיס למערכת הנעה מלאה מחד, אך מאפשרים שימוש בהן כמערכת מסייעת מאידך.

### 2.3.1. גלגל תנופה

גלגל תנופה (Flywheel) הינו רכיב מכני המחובר לתמסורת הרכב (ראה תרשים 2) ומשמר אנרגיה בצורה של אנרגיה סיבובית. בעת בלימה, מומרת אנרגיית התנועה לסיבוב של גלגל התנופה במהירות גבוהה ובכך נשמרת האנרגיה הקינטית מהבלימה. כשהרכב מאיץ שוב, במקום להשתמש בדלק/ סוללה, הוא משתמש באנרגיה המכנית שנשמרה בגלגל התנופה, שבינתיים מאט. זוהי למעשה אפשרות נוספת לרכב היברידי ללא סוללה – המערכת חוסכת דלק וזיהום ברמות דומות למערכות הקיימות ברכבים היברידיים עם סוללה, אך קטנה וזולה מהם. המערכת מתאימה במיוחד לרכבים שנוסעים ובולמים לעיתים קרובות, למשל אוטובוסים ומוניות.

### תרשים 2 - גלגל תנופה (flywheel) מחובר למנוע, שרטוט של ג'נרל מוטורס

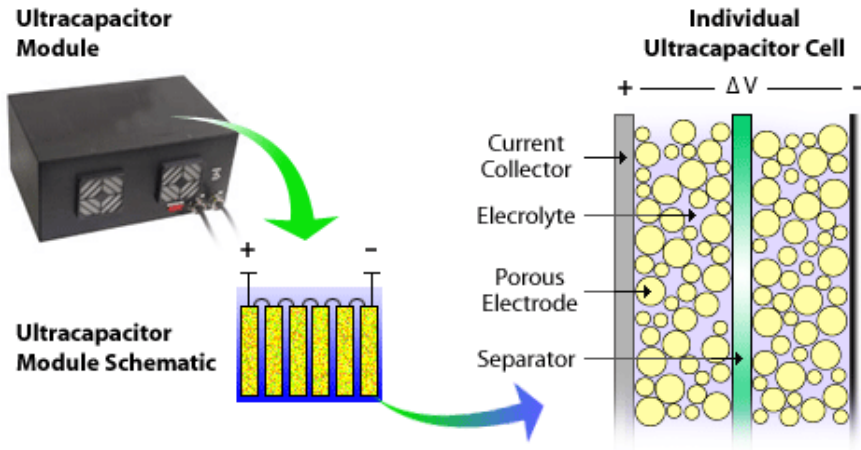


מקור: Mindl & Cerovsky, (2010)

### 2.3.2. קבלי-על

קבל הינו רכיב המאפשר אגירה של אנרגיה חשמלית ושימוש בה (פריקה) על פי צורך, בדומה לסוללה. עם זאת, בשונה מסוללה האוגרת אנרגיה באמצעות ריאקציה כימית, קבלים אוגרים אנרגיה אלקטרוסטטית. עקרון הפעולה של קבלים מתבסס על שני מוליכים המופרדים זה מזה ע"י שכבה מבודדת. בעת טעינה, נבנה מטען חיובי על אחד המוליכים ומטען שלילי על האחר; היות והבידוד בין המוליכים מונע מעבר מהאלקטרונים השואפים לאזן את המטען, נבנה שדה חשמלי (כך למעשה אגורה האנרגיה), עד לפריקה בה מתאפשר מעבר של אלקטרונים בין המוליכים. בקבלי-על (Ultra-capacitors, Supercapacitors, double-layer capacitors) על כל מוליך ישנה שכבה העשויה מחומר בעל נקבוביות גבוהה (בד"כ פחם אקטיבי) המושרה בתמיסה אלקטרוליטית של יונים (ראה תרשים 3). כך, שטח הפנים של כל מוליך גדל פי 10,000 עד 100,000 ולכן אפקטיבית מגדיל באופן ניכר את יכולת אגירת האנרגיה של קבל-על. (NREL, 2009).

תרשים 3 - מבנה ועקרון פעולה של קבלי-על

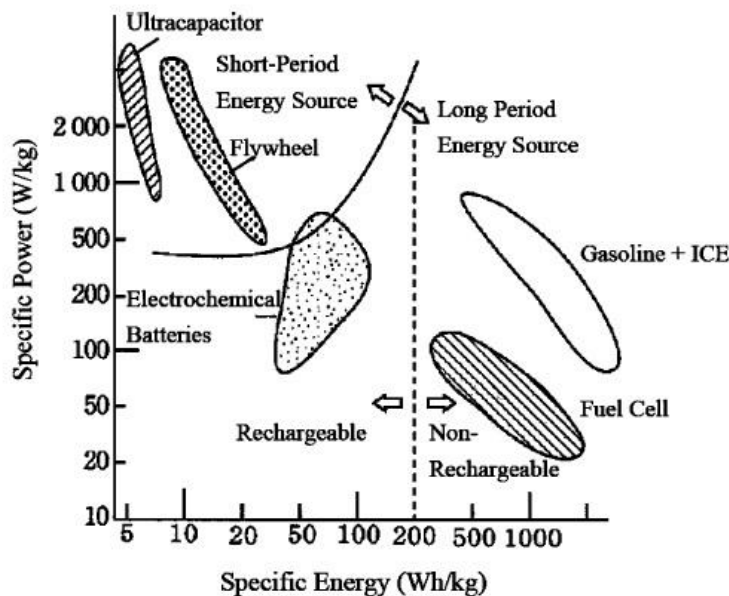


מקור: NERL (2009)

היות ואין ריאקציה כימית בתהליך, טעינה ופריקה של קבל-על היא מהירה מאוד ביחס לסוללה, הוא מתפקד היטב גם בטמפרטורות נמוכות באופן קיצוני, ויתרה מכך יכול הקבל לעבור מאות-אלפי מחזורי טעינה ללא פגיעה ביכולותיו – תכונות קריטיות לרכב המתבסס על הנעה חשמלית. צפיפות ההספק הגבוהה של קבלי העל הופכת אותם ליעילים במיוחד הן בהאצות (הדורשות פריקה מהירה) והן באגירת אנרגיית בלימה (הדורשת טעינה מהירה) (Chan, 2007).

מנגד, מחירים של קבלי-על ליחידת אנרגיה גבוהה מזה של סוללות, וקיבולת האנרגיה שלהם נמוכה יותר – כ-5% מהקיבולת של סוללות ליתיום-איון, לדוגמא. מגבלה נוספת של קבלי-על היא שהשכבה הנקבובית שבהם אינה עמידה במתחים גבוהים, ובשל כך הם פועלים במתחים נמוכים יחסית – עובדה אשר מגבילה את הקיבולת בפועל ביחס לקיבולת התיאורטית הגדולה בהרבה (פי 1500 אנרגיה מקבל רגיל, לעומת קיבולת תיאורטית של פי 15,000,000). כאמור מעלה, הצפיפות האנרגטית (ואט-שעה / לק"ג) של קבלי-על נמוכה ביחס ליתר החלופות (ראה תרשים 4).

תרשים 4 - קיבולת אנרגיה והספק של מקורות הנעה שונים



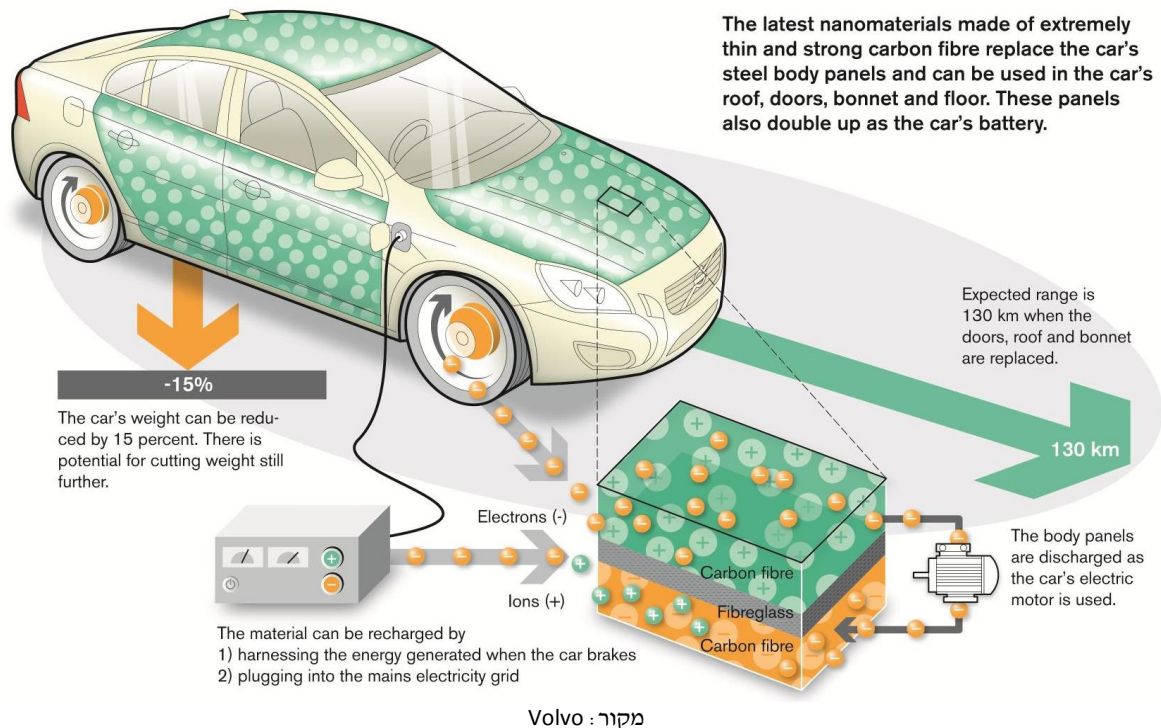
מקור: (Chan, 2007)

ניתן לשלב קבלי-על עם סוללות או מערכות הנעה אחרות – דוגמת מערכות "עצור-סע" (stop-and-go) – באופן שבו הם יספקו תוספת כוח לפרצי זמן קצרים, וייטענו מחדש לאחר מכן ממערכת ההנעה הראשית. שילוב שכזה עשוי לשפר ביצועים בעת האצות ועליות, להאריך את חיי הסוללה, להוריד עלויות תחזוקה ולאפשר שימוש בסוללות קטנות יותר – אך עם זאת יחייב שימוש במערכת אלקטרוניקה להתאמת מתחים אשר תייקר את עלות הרכב.

המחקר כיום עוסק הן בהגדלת שטח הפנים של קבלי העל והן בשיפור עמידותם בפני מתחים גבוהים יותר; זאת, ע"י שימוש בחומרים מתקדמים, דוגמת גרפן (graphene), מבני נאנו-שפורפרות מקרבון ואלקטרוליטים מ-Liquid Ion. פיתוח חדשני נוסף ע"י חברת וולוו בוחן את שילובם של משטחי קרבון בגוף הרכב, אשר ישמשו לאגירת אנרגיה ויהפכו למעשה את גוף הרכב עצמו לקבל.

### תרשים 5 - שימוש בגוף הרכב לאגירת אנרגיה, וולוו

## The car's body panels serve as a battery



נכון להיום השימוש בקבלי-על במערכות הנעה לתחבורה מוגבל ביותר, אך קיים.

רכב ה-Bluecar של חברת Bolloré הינו רכב חשמלי עירוני העושה שימוש בסוללת פולימר-ליתיום של 30kWh המשודכת לקבלי-על ובעל טווח נסיעה של 250 ק"מ בעיר ו-150 ק"מ מחוץ לעיר. מחירו של הרכב עומד על €19,000 (בצרפת, לא כולל מיסים והטבות), ונכון לסוף 2013 נמכרו 2600 רכבי Bluecar מאז 2011 – מתוכם כ-2000 רכבים בשימוש בתכנית שיתוף הרכבים 'Autolib' שבעיר פריז (Automobile-Propre, 2014; Bolloré, 2014).

ה-Ultracap Bus של חברת Sinautech הינו אוטובוס חשמלי בן 41 מושבים המונע ע"י קבלי-על בהספק

שילוב רכב חשמלי והיברידי לסוגיו במערך התחבורה בישראל  
שלב א': סקר ספרות

של 5.9kWh. לאוטובוס זה טווח של 5.5-9.5 ק"מ (בהתאם למידת השימוש במיזוג), כאשר טעינתו מתבצעת תוך כ-30 שניות בעת עצירתו בתחנות. אוטובוסים אלו פועלים באזור שנחאי משנת 2006, ונוסף על החיסכון בזיהום ורעש לטענת החברה ה-Ultracap Bus עשוי לחסוך עד \$200,000 לאורך חייו לעומת אוטובוס מונע דיזל.

תרשים 6 - אוטובוס ה-Ultracap Bus מונע קבלי-על, בטעינה בתחנה



מקור: Sinautech (2008)

חברת MAN מייצרת אוטובוס היברידי בשם Lion's City Hybrid, שהינו מונע באמצעות מנוע חשמלי המוזן ע"י מנוע דיזל (הפועל בנצילות של 45%) המצויד במערכת עצור-סע; קבלי-על בקיבולת מקסימלית של 200kW הממוקמים בגג האוטובוס מסייעים בהאצות ואוגרים אנרגיית בלימה. האוטובוס צורך כ-30% פחות דלק מאוטובוס דיזל רגיל. (MAN, 2014)

תרשים 7 - אוטובוס היברידי Lion's City Hybrid של חברת MAN המשלב מנוע דיזל עם קבלי-על



מקור: MAN (2014)

## 3. רכבים היברידיים Hybrid-Electric Vehicles

### 3.1. כללי

רכבים היברידיים (HEV) משלבים שתי מערכות הנעה: מערכת אחת היא מנוע בעירה פנימית המתודלק בבנוז, בדיזל או דלק אחר, ומערכת שנייה שהיא מערכת הנעה חשמלית שמבוססת על אנרגיה כימית שאצורה בסוללה הנטענת בזמן נסיעת הרכב ממנוע הבעירה הפנימי (Chan, 2007). בניגוד לרכבים חשמליים גרידא ורכבי הפלאג-אין היברידי, המערכת החשמלית ברכבים ההיברידיים אינה נטענת מרשת החשמל כלל והנעתם מתאפשרת באמצעות האנרגיה שהופקה בתהליך שריפת הדלק ברכב בלבד.

רכבים היברידיים בכלל הם פתרון ביניים בין שתי קצוות הסקאלה. בקצה אחד הרכבים ה"קונבנציונליים", שצורכים כמות גבוהה של דלק, מאבדים למעלה מ-60% מהאנרגיה שנוצרת ופולטים, בתוך ריכוזי אוכלוסייה ממפלט (אגוז) בגובה נמוך<sup>5</sup>, מזהמים שונים כגון: CO, NO<sub>x</sub>, חלקיקים ועוד וכן פד"ח. בקצה השני של הסקאלה, הרכבים החשמליים- יתרונם נובע מכך שניצילותם גבוהה יותר וכן שהם אינם פולטים ישירות מזהמים כלל בזמן שימוש, והנעתם מתבצעת כולה ע"י אנרגיה חשמלית המופקת בתחנות כוח<sup>6</sup> הפולטות את המזהמים מייצור החשמל, בגובה של עשרות או מאות מטרים מעל פני הקרקע (נציין כי עבור גזי חממה אין חשיבות לגובה הפליטה). שילוב שתי מערכות הנעה אלו, מאפשר ייעול ונתוני צריכת דלק מרשימים כמו גם יתרונות סביבתיים.

הרכבים ההיברידיים מכילים, על מנת לשפר את יעילות צריכת האנרגיה, מערכת בלימה רגנרטיבית (Regenerative breaking). מערכת זו ממירה את האנרגיה הקינטית של הרכב בעת הבלימה או ההאטה, לאנרגיה כימית האצורה בסוללה לשימוש מידי או לאגירה ומשפרת את ביצועי הרכבים.

רכבים היברידיים מאפשרים חסכון באנרגיה בדרכים הבאות (Tartakovsky et al. 2012):

1. כיבוי המנוע כשהרכב עוצר.
2. טעינת הסוללה/ קבל-העל בזמן בלימה באמצעות בלימה רגנרטיבית.
3. שימוש במנוע החשמלי בזמן האצה מאפשרת שימוש במנועים קטנים יותר.
4. שימוש במנוע החשמלי במקום ב- ICE בתנאי נהיגה מסוימים בהם יעילותו נמוכה.
5. עצם הנעת הרכב באנרגיה חשמלית יעיל יותר ומפחית מאובדן האנרגיה בצורת חום.

בטבלה הבאה ניתן לראות את מאפייניו של הדגם ההיברידי הנמכר ביותר - טויוטה פריוס 2012 ולהבחין בביצועים מרשימים של טווח הנסיעה שלו וצריכת הדלק.

<sup>5</sup> במחקרים אפידמיולוגיים נמצא כי ההשפעות המזיקות של פליטת מזהמים (להוציא גזי חממה) גדלה משמעותית ככל שגובה הפליטה נמוך יותר לפני הקרקע ובכך קרוב יותר למערכת הנשימה של בני אדם.

<sup>6</sup> חשוב לציין כי תחנות הכוח מונעות בגז או בפחם, בעיקר, ולכן לחשמול כלי הרכב יש יתרון נוסף בהסטה של הביקושים מנפט לגז ופחם

טבלה 4 - מאפייני רכב היברידי טיפוסי (טיוטה פריוס 2012)

יחידות שנמכרו בעולם	מחיר לצרכן בארה"ב <sup>7</sup>	פליטות CO <sub>2</sub> (גרם לק"מ, LCA)	טווח נסיעה (ק"מ)	עלות ק"מ (ליטר בנזין=7.57 ₪)	ק"מ לליטר דלק	יעילות המנוע
כ-10 מיליון	23-30 אלף דולר	143	857	36 אגורות	21	36% בתצורה מקבילה 40% בתצורה טורית

מקור: EPA, <http://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=31767>

ברכבים ההיברידיים, צריכת הדלק השתפרה בכ-126% (פי יותר ק"מ לליטר) לעומת רכבי בנזין ובכ-46% לעומת רכבי דיזל. כמו כן, ניתן להתרשם מטווח נסיעה גבוה במיוחד של 857 ק"מ, טווח גבוה בהרבה מכל יתר המכוניות שנבחנו.

### 3.2. מאפיינים טכניים

מבחינה טכנית קיימות מספר קטגוריות של רכבים היברידיים (Chan, 2007; Bayindir et al., 2011): טורית, מקבילה ומשולבת.

#### 3.2.1. תצורה טורית (Series HEVs)

במכונית היברידי טורית, המנוע החשמלי מניע את המכונית כשמנוע הבעירה הפנימי משמש כגנראטור בעת הצורך, לטעינת מצבר המנוע החשמלי או לתגבר את המנוע החשמלי בזרם נוסף. ה-ICE לא מחובר מכנית לגלגלים והאנרגיה המכנית שהוא מייצר מומרת לחשמל ע"י ה-motor-generator, הטוען את הסוללה, או עובר למנוע החשמלי לשם הנעת הגלגלים. קבלי-על, כאמור, יכולים להתווסף למערכת על מנת להאריך את חיי הסוללה ולהגדיל את ההספק המרבי. חשוב לציין שבנסיעה עירונית, כמות משמעותית של אנרגיה באה ממערכת הבלימה הרגנרטיבית.

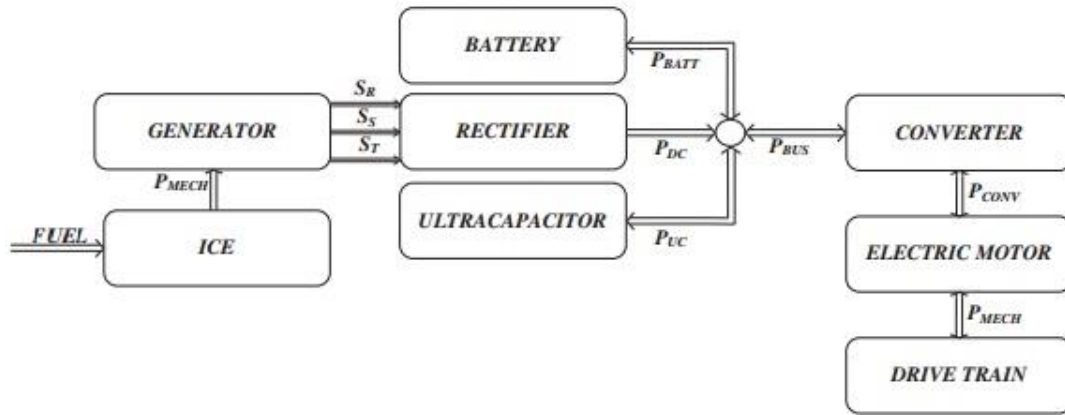
מערכת ההנעה יכולה לפעול בארבעה אופני פעולה:

- **סוללה בלבד** - ה-ICE כבוי, הרכב מונע רק ע"י המנוע החשמלי ואנרגיה מהסוללה, בתחילת נסיעה או בנסיעה במהירות נמוכה בתוך עיר למשל.
- **מנוע בעירה פנימית בלבד** - רק ה-ICE (והגנרטור) מניע את הרכב, לאחר שהסוללה התרוקנה.
- **מצב משולב** - הרכב מונע ע"י ה-ICE (והגנרטור) והסוללה, כאשר הגנרטור לא מייצר מספיק אנרגיה.
- **חלוקת הכוח (power split)** - ה-ICE (והגנרטור) מניע את הרכב וטוען את הסוללה בו זמנית, כאשר הגנרטור מייצר עודפי אנרגיה.

יתרונות התצורה הטורית הם יעילות גבוהה של ICE הפועל במשטר אופטימאלי, המאפשרת את הקטנת המנוע והפליטות. החיסרון הוא שיש אובדן אנרגיה בגלל יותר מדי המרות בין מרכיבי המערכת השונים והצורך במצבר גדול וכבד יותר.

<sup>7</sup> מחירים ללא מיסוי וסובסידיות מוצגים בנספח ג'

תרשים 8 - מערכת הנעה היברידית, תצורה טורית



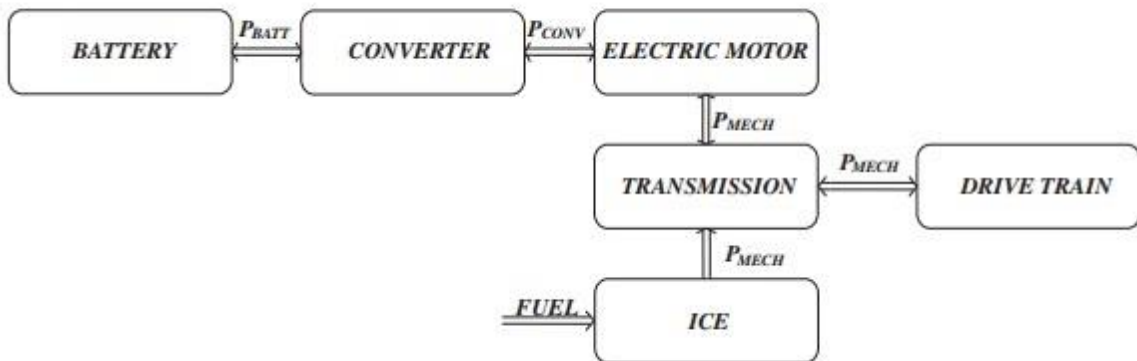
מקור: Bayindir et al. (2011)

3.2.2 תצורה מקבילה (Parallel HEVs)

רכב היברידי מהתצורה המקבילה הוא רכב שבו מותקנים שני מנועים אשר פועלים יחד בתזמון המביא לניצול היתרונות היחסיים של כל אחד מהם. בתצורה זו גם ה-ICE וגם המנוע החשמלי מחוברים לגלגלים. יש מספר אסטרטגיות עבודה בתצורה מקבילה, כשבשכיחה ביותר ה-ICE עובד כל הזמן ברמה אופטימלית ומספק אנרגיה קבועה. אם לרכב דרוש עוד הספק, מופעל המנוע החשמלי ועוזר להניע את הגלגלים. אם לרכב לא דרושה כל האנרגיה שמייצר ה-ICE, העודף יופנה לטעינת הסוללה. המנוע החשמלי יכול לשמש להטענת הסוללה ע"י מנגנון הבלימה הרגנרטיבית. אפשרות נוספת היא הנעה על ידי המנוע החשמלי בלבד כאשר ה-ICE כבוי.

יתרונות התצורה המקבילה על הטורית הן שיש פחות איבוד אנרגיה בהמרות בין מרכיבי המערכת, אין צורך בגנרטור, וניתן להשתמש ב-ICE ובמנוע חשמלי קטנים יותר להשגת אותם ביצועים עד להתרוקנות הסוללה. החיסרון העיקרי הוא גיר מורכב. הונדה אינסייט היא בעלת מערכת הנעה בתצורה מקבילה.

תרשים 9 - מערכת הנעה היברידית, תצורה מקבילה

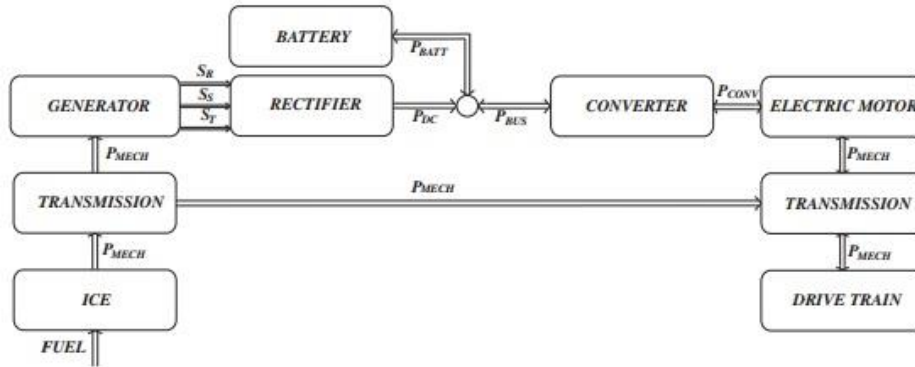


מקור: Bayindir et al. (2011)

### 3.2.3. תצורה משולבת (Series-parallel HEV)

לפעמים גם נקראת תצורת power-split. משלבת מרכיבים משתי הקטגוריות הראשונות כדי לנצל את יתרונותיהן היחסיים. מכיוון שיש בה יותר מרכיבים היא נחשבת מסובכת ויקרה יותר. טויוטה פרוס היא בעלת מערכת הנעה בתצורה משולבת.

תרשים 10 - מערכת הנעה היברידי, תצורה משולבת (power-split)



מקור: Bayindir et al. (2011)

בשלושת התצורות (טורית, מקבילה או משולבת), המעבר בין שימוש במנוע הבעירה הפנימית, במנוע החשמלי או בשניהם יחד נשלט אוטומטית ע"י מערכת הבקרה של הרכב. בזכות השימוש היעיל במנוע החשמלי היעילות האנרגטית של רכבים היברידיים היא גבוהה מאוד בהשוואה לרכבים קונבנציונאליים, מה שבא לידי ביטוי בצריכת דלק משופרת ובטווח נסיעה מוגדל.

ניתן לסווג את הרכבים ההיברידיים גם על פי הספק המנוע ומתח הסוללה:

1. **מיקרו היברידי (Micro hybrid):** מנוע חשמלי טיפוסי בהספק 2.5KW במתח 12V, המנוע החשמלי משמש בעיקר להתחלת נסיעה ולעצירה, כלומר שימושי מאוד בערים, והחיסכון האנרגטי הוא 5%-10%, ע"י בלימה רגנרטיבית ומנגנון start-stop (כיבוי אוטומטי של המנוע בעצירות). עלות הרכב גבוהה רק במעט יחסית לרכב רגיל.
2. **היברידי מתון (Mild hybrid):** מנוע חשמלי טיפוסי לדגמי סדאן בעל הספק 10-20KW במתח 100-200V. המנוע החשמלי יכול להניע את הגלגלים במקביל ל-ICE, והחיסכון האנרגטי הוא 20%-30%, כשהעלות עולה ביחס דומה. הונדה סיוויק והונדה אינסייט שתייהן שייכות לקטגוריה זו.
3. **היברידי מלא (Full hybrid):** מנוע חשמלי טיפוסי לדגם סדאן יהיה בעל הספק 50KW במתח 200-300V. בד"כ התצורה תהיה משולבת או מורכבת, וחלוקת הכוח בין ה-ICE למנוע החשמלי גמישה על מנת למקסם את היעילות ולהפחית למינימום את הפליטות. בד"כ בהתחלת נסיעה ועצירה יפעל המנוע החשמלי לבד, בנסיעה במהירות קבועה (שיוט) יפעל רק ה-ICE, ואם אין לו מספיק כוח (עלייה או תאוצה) יצטרף אליו המנוע החשמלי. היעילות האנרגטית של רכבים אלו משתפרת ב-30%-50% ועלותם עשויה להיות גבוהה יותר ב-30%-40%. ככל שגדלים עומסי התנועה כך גדל השיפור ביעילות האנרגטית. טויוטה פרוס נכללת בקבוצה הזאת.

### 3.3. מאפיינים סביבתיים של רכבים היברידיים

בזכות היעילות המשופרת של צריכת האנרגיה, רכבים היברידיים פולטים פחות מזהמים בהשוואה לרכבים מונעי מנוע בעירה פנימי בלבד. בטבלה הבאה מרוכזים נתוני צריכת הדלק ופליטות CO<sub>2</sub> עבור דגמים היברידיים בולטים מונעי בנזין (U.S. DOE).

טבלה 5 - השוואה בין מאפייני רכבי HEV לרכבי בנזין קונבנציונליים\*

דגם (ונפח מנוע)	מחיר בארה"ב (אלפי \$)	ק"מ לליטר	פליטת CO <sub>2</sub> גר' לק"מ	פליטת CO <sub>2</sub> לק"מ (כולל שלב הייצור, גר' לק"מ)
Toyota Prius 1.8	23-30	21.3	111	139
Toyota Corolla 1.8	16-19	12.2	191	239
Toyota Camry Hybrid LE/XLE 2.5	26	18.3/17	135	169
Toyota Camry 2.5	22-30	11.8	198	247
Honda Civic Hybrid 1.5	24	18.5	126	157
Honda Civic 1.8	16-24	13.5	174	216
Honda Insight 1.3	18.5-23.5	17.9	132	165

מקור: [www.fueleconomy.gov](http://www.fueleconomy.gov)

\*הנתונים עבור דגמי 2012. ההנחה בארה"ב היא שרכב נוסע בממוצע 300,000 ק"מ לאורך חייו. מאחר ולא כל הדגמים מיובאים לישראל, מוצגים המחירים בארה"ב, התנודות במחיר נובעות ממגוון תמריצים במדינות השונות.



מהטבלה עולה כי הטכנולוגיות ההיברידיות מסוגלות להגדיל את הנסועה לליטר דלק ולהקטין את פליטת הפד"ח בשיעורים העולים על 70% (בהשוואה לרכבי בנזין).

### 3.4. תקינה

רכבים היברידיים, כמו כלי רכב אחרים, עומדים בדרישות תקינה בינלאומית לרכב ומיובאים לישראל כאשר הם עברו בדיקות אב-טיפוס (official approval test) של EEC או ארה"ב.

### 3.5. שיעורי חדירה

קיימים כיום רכבים היברידיים ממגוון סוגים: החל מרכבי נוסעים, דרך רכבי שטח (SUV) ועד לאוטובוסים.

#### בעולם

הטויוטה פריוס הייתה המכוננית ההיברידית הראשונה בייצור המוני ושווקה ביפן כבר ב-1997, ומאז כבר חדרו הרכבים ההיברידיים באופן נרחב לשווקים. נכון לחודש יוני 2012, נמכרו בעולם כ-4.5 מיליון רכבים היברידיים, מתוכם 2.2 מיליון בארה"ב (מחציתם, דגמי טויוטה פריוס), 1.5 מיליון ביפן וכחצי מיליון באירופה (לפי משרד האנרגיה האמריקאי). רוב יצרניות הרכב בעולם כבר משווקות היום גרסאות היברידיות לדגמים המוכרים ולכל קטגוריות הרכב.

### תחבורה ציבורית

אוטובוס היברידי עולה בערך כפול מאוטובוס דיזל דומה. השימוש באוטובוסים היברידיים יכול לסייע מאוד בהפחתת פליטות תחמוצות החנקן והחלקיקים במרכזי הערים הצפופים. ב-2011 היו בקנדה למעלה מ-900 אוטובוסים היברידיים, באיטליה כ-300, בגרמניה 90 ובבלגיה יותר מ-80 (IEA 2012), ויש כמובן בערים ומדינות נוספות.

### משאיות

כלי רכב היברידיים בינוניים וכבדים המונעים בדיזל מיוצרים בייצור המוני כבר מ-2007. בארה"ב נמכרים כ-20 דגמים שונים של 8 יצרניות (כגון, וולוו, פורד, ג'נרל מוטורס ועוד), המתאימים למגוון שימושים רחב, החל ממשלוחים ועד להובלת משא (ORNL 2013). ב-2011 היו בצרפת כ-500 משאיות היברידיות, בגרמניה 190, בעיר גנט שבבלגיה כ-100 ובאוסטריה כ-70 (IEA 2012).

### בישראל

לפי נתוני איגוד יבואני הרכב, ב-2012 נמכרו בישראל 4,218 רכבי HEV, כשהדגמים המובילים הם טויוטה פריוס, הונדה ג'אז, הונדה אינסייט וטויוטה אאוריס (1,340, 1,135, 740 ו-661 רכבים, בהתאמה). ב-2010 היו בישראל 10,700 רכבים היברידיים.

## 3.6. חסמים

החסם העיקרי המונע חדירה בשיעורים משמעותיים יותר הוא החסם הכלכלי. מאחר ורכבים היברידיים משלבים מערכות הנעה כפולות, עלותם גבוהה בעשרות אחוזים בהשוואה לרכב בעל הנעה רגילה. יש לזכור כי החדירה הנוכחית שלהם לשווקים בארץ ובעולם מתאפשרת כרגע בעזרת תמריצים ממשלתיים, אך אלה כבר נמצאים בתהליך הפחתה הדרגתי. מבחינה טכנולוגית, רכבי HEV כבר מוכנים לכניסה רחבה לשוק וחלק ושיעור הרכבים הנמכרים הולך ועולה בקצב משמעותי כל שנה.

## 3.7. תמריצים

### בישראל

▪ "מיסוי ירוק" - בשנת 2008, פורסם דו"ח הוועדה הבין-משרדית למיסוי ירוק של משרדי האוצר, התחבורה, התשתיות (כיום משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים) והמשרד להגנת הסביבה, שמטרתו מתן תמריצים לרכישת רכבים בעלי "ציון ירוק" נמוך. הנוסחה לשקלול הציון מביאה בחשבון את כלל הפליטות של הרכב - CO<sub>2</sub>, CO, שיירי פחמימנים וחלקיקים נשימים. ככל שהציון הירוק של הרכב נמוך יותר, כך המדינה מעניקה הטבת מס גבוהה יותר על רכישתו. במסגרת הרפורמה נקבע שעל רכב בעל הנעה היברידית בעל ציון ירוק נמוך מ-130, יוטל מס קנייה בשיעור 30% בין השנים 2009-2012, שיעלה ל-45% ב-2013 ול-60% ב-2014, עד שב-2015 ישווה מס הקנייה על רכב היברידי לשל רכבים בעלי הנעה רגילה, 82%.

## בארה"ב

- הסובסידיות ברמה הפדרלית שניתנו בעבר לרכישת רכבי HEV בוטלו.
- תכנית Clean Cities הפועלת לשילוב טכנולוגיות אלטרנטיביות בציי הרכב של כ-100 ערים עדיין מעודדת רכישת רכבי HEV, אך הם מהווים חלק קטן יחסית מהרכש החדש.

## 3.8. ניתוח SWOT רכבים היברידיים

טבלה 6 - ניתוח SWOT רכבים היברידיים

יתרונות	חסרונות	הזדמנויות	איומים
<ul style="list-style-type: none"><li>▪ חסכוניים בדלק</li><li>▪ פליטות נמוכות יותר</li><li>▪ טווח נסיעה מוגדל</li><li>▪ טכנולוגיה בשלה</li><li>▪ שכבר נכנסה לשוקים</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ יקרים יותר - החזרת ההשקעה לרכב נוסעים ממוצע היא 3 שנים</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ משתלם לצי רכב - החזרת ההשקעה תהיה מהירה יחסית, עד שנה וחצי.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>▪ הצורך בטיפול ומיחזור כמויות גדולות של סוללות (בעיקר אלו המכילות ליתיום)</li></ul>

## 4. רכבים היברידיים פלאג-אין, Plug-in Electric Vehicles

### 4.1. כללי

כמו רכבי HEV, גם רכבים היברידיים פלאג-אין (PHEV) משלבים מערכת הנעה המבוססת על מנוע בעירה פנימי ומערכת הנעה חשמלית. הסוללה של רכבים אלה גדולה יותר מאשר ברכבי HEV וניתן לטעון אותה ישירות מרשת החשמל (בדומה לרכבים חשמליים). הסוללה הגדולה ואפשרות הטעינה שלה "מהשקע" מאפשרים לנסוע רק על אנרגיה חשמלית לטווחים ארוכים יותר ובמהירויות גבוהות יותר, כאשר הדגמים השונים נבדלים בעיקר בטווח הנסיעה עם המנוע החשמלי בלבד (all-electric range), שנע בין 15 ל-60 ק"מ (Chan, 2007). נקדים ונדגיש כי התועלות הסביבתיות מרכבים הנטענים מרשת החשמל, תלויות באופן מובהק וישיר בתמהיל יצור החשמל במדינה הנבחרת (יפורט בהמשך).

להלן נתוני רכב פלאג-אין אופייני הנמכר כיום בשווקים:

טבלה 7 - מאפייני רכבי היברידי פלאג-אין אופייני (טויוטה פרוס פלאג-אין 2012)

יעילות המנוע	ק"מ לליטר דלק	עלות ק"מ (ליטר) (בנזין=7.57 ₪)	טווח נסיעה חשמלי (ק"מ)	טווח נסיעה כולל (ק"מ)	מחיר לצרכן בארה"ב <sup>8</sup>	יחידות שנמכרו בעולם
40%-70% תלוי במצב הפעולה	16-40 (תלוי במצב ההנעה)	19-36 אגורות	17	860	32-39.5 אלף דולר	פחות מ-150 אלף

מקור: <http://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=33324&id=33612&id=32655&id=33335>

צריכת הדלק לק"מ נסועה תלויה משמעותית במצב הסוללה בעת הנסיעה. כאשר הרכב נוסע על מנוע בעירה בלבד צריכת הדלק גבוהה משל רכב היברידי רגיל ועומדת על 16 ק"מ לליטר (לעומת 21 בדגם ההיברידי). יעילות צריכת הדלק מתבטאת בעת הפעלתו של המנוע החשמלי המאפשר נסועה של 40 ק"מ לשווה ערך ליטר דלק (MPGGE=Miles per Gallon of Gasoline Equivalent). השוואה למאפייניו המדווחים של דגם נוסף ממשפחת רכבים אלו, השברולט וולט 2013, מעלה נתונים דומים, מלבד טווח הנסיעה החשמלית הגבוה פי 3 בדגם השברולט.

### 4.2. מאפיינים טכניים

בדומה לרכבי HEV, גם כאן מערכת ההנעה יכולה להיות בתצורה טורית, בה רק המנוע החשמלי מספק כוח להנעת הגלגלים, תצורה מקבילה בה גם מנוע ה-ICE וגם המנוע החשמלי יכולים לספק אנרגיה ביחד להנעת הגלגלים, ותצורה טורית/מקבילה או משולבת (Power split) שמנצלת את יתרונות שתי התצורות. שברולט וולט היא דוגמה ל PHEV בתצורה טורית (Tartakovsky et al. 2012).

את הטווח החשמלי הטעון בסוללה ניתן לנצל ב-4 אסטרטגיות שונות (שנקבעות ע"י אלגוריתם מערכת הבקרה):

<sup>8</sup> מחירים ללא מיסוי וסובסידיות מוצגים בנספח ד'

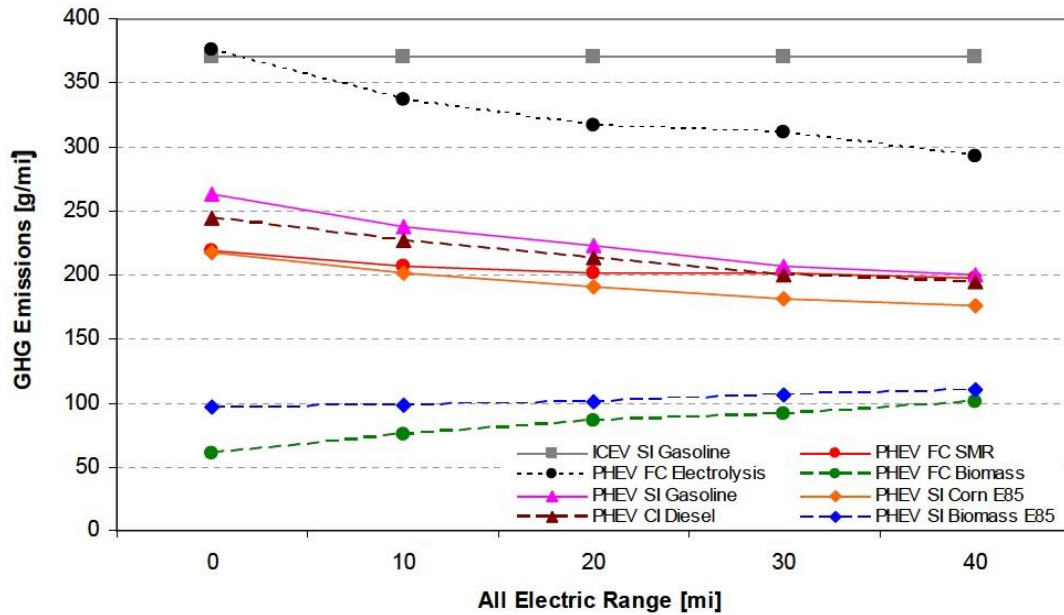
1. **מצב התרוקנות הטעינה (Charge depleting mode)** - הרכב מונע אך ורק בעזרת אנרגיה חשמלית (למעט בתאוצה חזקה) עד שהסוללה מתרוקנת לרמה מוגדרת מראש (all electric range) אז מופעל מנוע הבעירה הפנימי.
2. **מצב משולב (Blended mode)** - הרכב מונע על אנרגיה חשמלית במהירויות נמוכות יחסית, עד 60-70 קמ"ש, אז מצטרף מנוע הבעירה הפנימי והאנרגיה מתחלקת בינו לבין המנוע החשמלי. במצב זה יעילות הטווח החשמלי היא כפולה - ניתן לנסוע 10 ק"מ במצב המשולב ולנצל רק 5 ק"מ מהטווח החשמלי שמאפשרת הסוללה.
3. **מצב שמירת טעינה (Charge sustaining mode)** - מצב זהה לזה של רכבי HEV. לאחר שהסוללה התרוקנה לרמה שהוגדרה מראש, שתי מערכות ההנעה, החשמלית והמבוססת על ה-ICE, יעבדו באופן היעיל ביותר מבלי לאפשר למצב הטעינה של הסוללה לחרוג מתחום צר ומוגדר מראש.
4. **מצב משתנה (Mixed mode)** - שלבים שונים בנסיעה יפעלו באחד המצבים המוזכרים למעלה. למשל, בנסיעה מהבית לכביש המהיר ייסע הרכב על אנרגיה חשמלית בלבד, כשיעלה על הכביש המהיר יעבור למצב משולב, עד שתתרוקן הסוללה, אז יעבור הרכב למצב שמירת טעינה ויפעל כרכב HEV.

### 4.3. מאפיינים סביבתיים

בזמן פעולת הרכב על המנוע החשמלי בלבד אין פליטת CO<sub>2</sub> ומזהמים ממפלט הרכב, אך עדיין קשה לאמוד במדויק את התועלת הסביבתית של רכבי PHEV מאחר וזו תלויה באופן ישיר במקורות האנרגיה הראשוניים המשמשים להפקת החשמל המקומי, ומשתנה בין אזור לאזור. התועלת הסביבתית שבנסיעה ברכב PHEV בהשוואה לרכב בעל הנעה רגילה נמצאת ביחס ישר לחלקם של מקורות אנרגיה נקיים יותר ומתחדשים בתמהיל האנרגיה להפקת החשמל (Tartakovsky et al. 2012). לאחר התרוקנות הסוללה ומיצוי הטווח החשמלי בלבד, הרכב יפעל כרכב HEV, והתועלות יהיו דומות לשל רכבים אלו.

בנסיעה במצב charge depleting, ככל שהטווח החשמלי גדול יותר, וככל שהנסיעה היומית קצרה יותר, כך יגדל חלקו מסך הקילומטרים של הרכב. כך לדוגמה, מי שנוסע ביום 20 ק"מ ברכב PHEV בעל טווח חשמלי של 20 ק"מ ומעלה, יוכל לנסוע ללא להפעלת מנוע ה-ICE. מחקר שהשווה בין רכבי PHEV המונעים בדלקים שונים ובעלי טווח חשמלי שונה, מצא שכולם עדיפים באופן משמעותי על פני רכבים קונבנציונליים ויכולים להפחית את פליטות גזי החממה בלפחות 50% שונה (Elgowainy et al., 2009) (ראה תרשים 11).

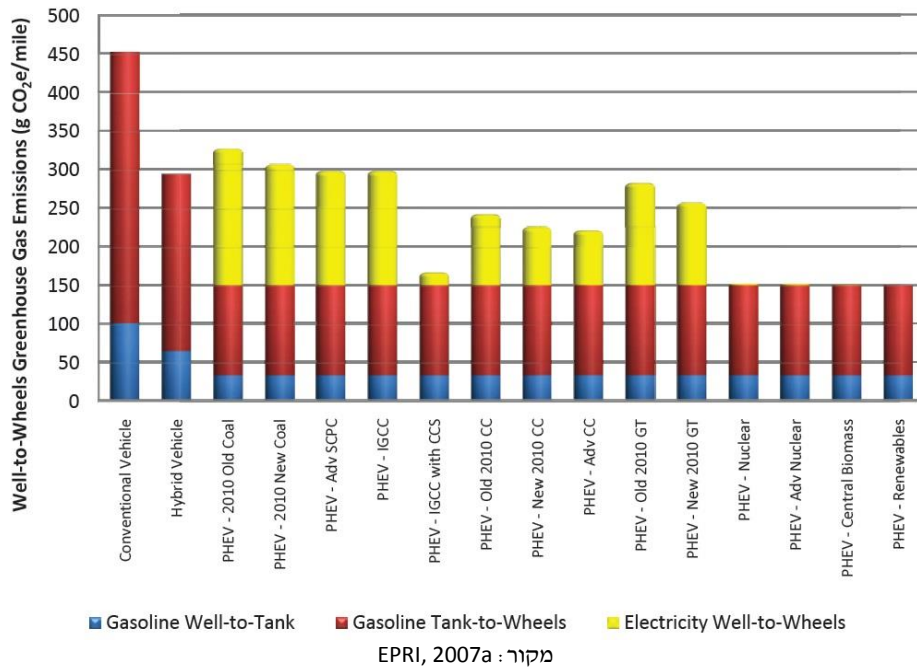
**תרשים 11 - הפחתת פליטות גזי חממה ע"י PHEV כתלות בטווח החשמלי ובדלק**



מקור: Elgowainy et al. (2009)

במחקר שערך ה-EPRI (Electric Power Research Institute) ב-2007, נבדקה ההשפעה האפשרית של רכבי PHEV על פליטת גזי חממה בשנת 2050 ועל זיהום האוויר בשנת 2030. ההשפעות היו תלויות באופן חזק בשימוש בדלקים פוסיליים במשק החשמל האמריקאי וכן ברמת החדירה של רכבים אלו לשוק. החוקרים לקחו בחשבון את אפקט הצפיפות ותופעת כליאת הזיהום של פליטות במרכזי ערים, לעומת הפליטות סביב תחנות הכוח באזורים בהם האוכלוסייה פחות צפופה וגובה הארובה גבוה יותר. סיכום ממצאי המחקר (EPRI 2007a,b) מוצגים בתרשים 12 להלן ומנותחים אחריהם.

**תרשים 12 - פליטות CO<sub>2</sub> של רכבים קונבנציונלים, HEV ו-PHEV כתלות באמצעי ייצור החשמל**



מקור: EPRI, 2007a

- רכבי PHEV יפחיתו את פליטות ה- $CO_2$  בטווח שבין 163 ל-612 מיליון טון בשנה (במשק חשמל שמבוסס בעיקרו על אנרגיה נקייה ושיעור חדירה גבוה של הרכבים), ובמצטבר ב-3.4 עד 10.3 מיליארד טון בשנים 2010-2050.
- ברוב ארה"ב נמצא שרכבי PHEV משפרים במקצת את איכות האוויר ומורידים את רמות תחמוצות החנקן והגופרית (שרמתם מוגבלת במכסות), והחלקיקים הנשימים.
- רמות האוזון בגובה פני הקרקע יורדות ברוב האזורים, אבל עולות במקצת במספר נקודות מקומיות. ההערכה היא שכ-60% מהאוכלוסייה ייהנו מירידה ברמות האוזון, ואילו 1% ייאלצו להתמודד עם עלייה קלה.
- רמת פליטות הכספית תעלה ב-2.4% עקב הגברת ייצור החשמל. מאחר ופליטות הכספית בארה"ב מפוקחות במנגנון cap-and-trade לא תהיה השפעה על המאזן העולמי.
- רמת החלקיקים הנשימים (PM) תעלה ב-10% כתוצאה מהגברת השימוש בפחם בתחנות הכוח (על פי הנחה של חוקרים). למרות זאת, מאחר ופליטת החלקיקים מכלי הרכב תרד, ברוב האזורים ריכוזם הכולל ירד.

#### 4.4. תקינה

כהכנה ליבוא PHEV וכלי רכב חשמליים, מפותחת כיום בישראל תקינה לאומית לטעינה וטיפול בכלי רכב אלו (ועדה טכנית 1317 "רכב חשמלי", מכון התקנים הישראלי).

#### 4.5. שיעורי החדירה בעולם

בסוף שנת 2008, נכנס לייצור המוני הדגם הראשון של PHEV, F3DM (סדאן משפחתית) של יצרנית הרכב הסינית BYD, ובתחילה נמכר לסוכנויות ממשלתיות. הרכב, בעל טווח חשמלי (all electric range) של כ-100 ק"מ שווה לקהל הרחב החל מ-2010 במחיר \$22,000, כפול ממחיר מכונית דומה בעלת הנעה רגילה, מה שהקשה על חדירתו לשוק. למרות זאת, ניכרת עלייה משמעותית בקצב המכירות, שעלה מ-48 ב-2010 ל-417 ב-2011 ו-2,200 ב-2012.

עד היום נמכרו בעולם כ-80,000 רכבי PHEV, למעלה מ-50,000 מתוכם בארה"ב בלבד (4 דגמים הוצעו למכירה ב-2012), אחריה יפן עם כ-12,000, הולנד עם כ-4,700 וסין, קנדה, גרמניה ואנגליה עם כ-1,000, 2,500 כל אחת (נכון לפברואר 2013). דגם השברולט וולט, ובגרסתו האירופית אופל אמפרה (Ampera), אחראי ליותר ממחצית המכירות, כשמכר עד היום למעלה מ-42,000 יחידות. טויוטה פריוס PHV מכרה כ-30,000 יחידות, ואחריה דגמים של פורד (C-max Energi), מיצובישי (Outlander P-HEV), BYD (F3DM) ו-Fisker (Karma) שמכרו בשיעורים נמוכים בהרבה. בארץ, שיווק הטויוטה פריוס פלאג-אין צפוי להתחיל ב-2013.

#### 4.6. חסמים

- **מחיר** - מחירו של רכב PHEV גבוה בהשוואה למחיר רכב דומה בעל מערכת הנעה רגילה וזהו החסם העיקרי העומד לפני חדירה משמעותית יותר לשווקים. כך למשל מחירה של טויוטה PHV בארה"ב נע בין \$32,000 ל-\$39,500, תלוי בסובסידיות, בהשוואה למחירה של טויוטה קורולה עם נפח מנוע זהה (1.8 ליטר) שעולה \$16,000-\$19,000 בלבד. מחירו של דגם הפלאג-אין של הפריוס גבוה משמעותית גם ביחס לגרסה ההיברידית הרגילה, שמחירה נע בטווח \$24,000-\$30,000.
- **רשת הטעינה** - מאחר ומדובר בהיבטים טכניים זהים, נרחיב על רשת הטעינה בפרק הון ברכבים חשמליים (EVs).

#### 4.7. תמריצים

מאחר והם דומים וברוב המקרים חופפים, על תמריצים להעלאת שיעור החדירה של רכבי PHEV במדינות שונות נרחיב בפרק על רכבים חשמליים (EVs).

#### 4.8. ניתוח SWOT רכבים היברידיים פלאג-אין

טבלה 8 - ניתוח SWOT רכבים היברידיים פלאג-אין

יתרונות	חסרונות	הזדמנויות	איומים
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ חסכוניים בדלק</li> <li>▪ פליטות נמוכות יותר באופן משמעותי</li> <li>▪ טווח נסיעה מוגדל</li> <li>▪ אפשרות לפליטה אפסית בנסיעה על אנרגיה חשמלית המיוצרת ממקור נקי</li> <li>▪ הטכנולוגיה בשלבים המוקדמים של חדירה לשווקים</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ יקרים ברמה של רכבים חשמליים</li> <li>▪ על מנת לממש את הפוטנציאל צריכים רשת טעינה שעדיין לא פרוסה</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ שלב מעבר עד הבשלת טכנולוגיית המכוניות החשמליות</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ עליית טכנולוגיה מתחרה זולה יותר</li> <li>▪ מתן תמריצים ממשלתיים</li> <li>▪ לטכנולוגיה או דלק אלטרנטיבי</li> <li>▪ ירידה במחירי הנפט</li> </ul>

## 5. רכבים חשמליים / Battery Electric / Electric Vehicles Vehicles

### 5.1. כללי

בניגוד לרכבים ההיברידיים אותם הזכרנו בסעיפים הקודמים, לרכב חשמלי "טהור" אין מנוע בעירה פנימי והוא מונע אך ורק ע"י מערכת הנעה חשמלית. הסוללה נטענת על ידי חיבור ישיר של הרכב לרשת החשמל (ובעזרת הבלימה הרגנרטיבית). יעילותם של מנועים חשמליים גבוהה בהרבה משל מנועי בעירה פנימית ומגיעה לכ- 90% (ברוטו). יש לזכור כי היעילות הכוללת של הנעת רכבים חשמליים תלויה, בראש ובראשונה, ביעילות הפקת החשמל, ומשם נגזרת גם התועלת הסביבתית, הפחתת פליטת גזי החממה ומזהמי אוויר נוספים. נקדים ונאמר כי לדעת מומחים רבים החסם העיקרי לרכבים אלו הינו טווח הנסיעה המוגבל שלהם ביחס לרכבים קונבנציונאליים ובוודאי ביחס להיברידיים המשווקים כיום.

על מנת לקבל מושג ראשוני על ביצועי רכבים חשמליים המשווקים כיום (פורד חשמלי 2013), מוצגת הטבלה הבאה:

טבלה 9 - מאפייני רכב חשמלי טיפוסי

יעילות המנוע	ק"מ לקוט"ש	עלות ק"מ (בתעריף חשמל ביתי - 60 אג' לקוט"ש)	ק"מ לליטר (mpge)	טווח נסיעה אופייני	פליטות CO <sub>2</sub> בישראל* (גרם לק"מ)	מחיר בארה"ב	עלות עמדת טעינה (רמה 2) ללא סיבסוד	יחידות שנמכרו בעולם
70%	5-8	7-12 אגורות	40-45	כ-150 ק"מ	110	35-37 אלף דולר	-1,000 עד 7,000 דולר	עד 150 אלף

מקור: <http://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=33612&id=33024>

\*חושב על פי תחזית תמהיל הדלקים לייצור חשמל בישראל בשנת 2020 ועל פי מקדמי הפליטה של חברת החשמל

קל להבחין מהנתונים הללו, ביתרונותיו וחסרונותיו של הרכב החשמלי, ביחס לרכבים האחרים שנבחנו. טווח הנסיעה הוא ללא ספק אחד החסרונות הבולטים של הרכב החשמלי ומגיע לכ-150 ק"מ ברכב חשמלי טיפוסי (בנסיעה מישורית, ללא שימוש במזגן) המשווק ביום ולכ-222 ק"מ בדגמים מתקדמים (לעומת 700 ברכב ICE ולמעלה מכך ברכבים היברידיים). הנצילות האנרגטית היא הגבוהה ביותר מבין הרכבים שנבחנו עד כה.

## 5.2 תשתית טעינה והחלפת סוללה

בארה"ב מתקני הטעינה (Electric Vehicle Supply Equipment – EVSE) מחולקים לשלוש קטגוריות:

- 1 רמה 1 (Level 1 EVSE)** - בבתים בהם מתח החשמל הוא 120V בזרם AC, ניתן לטעון רכב חשמלי בחיבור ישיר לשקע (NEMA-15 האמריקאי) כשרוב הרכבים הנטענים כבר באים עם הכבל המתאים. זו אפשרות הטעינה האיטית ביותר, כשבכל שעה נטען טווח של 3-8 ק"מ, כתלות במערכת הטעינה של הרכב וסוג הסוללה. יש לדאוג שהשקע ממנו טוענים את הרכב יהיה על מעגל חשמלי נפרד משל מכשירים בעלי צריכה אינטנסיבית על מנת להימנע מעומס יתר.
  - 2 רמה 2 (Level 2 EVSE)** - מתאימה למתח 240V, בתשתית ביתית או ציבורית, ונדרש התקן מיוחד לוויסות הזרם, בין 20 ל-80 אמפר, בהתאם לתשתית הטעינה של הרכב. בזרם של 80 אמפר, התשתית יכולה לספק 19.2 קילו-ואט, אך רוב מערכות הטעינה הביתיות פועלות בזרם של עד 30 אמפר והספק של 7.2 קילו-ואט. למערכות אלה דרוש מעגל חשמלי של 40 אמפר. אלה המערכות הנפוצות ביותר, ויכולות לטעון את הסוללה בטווח של 16-32 ק"מ לכל שעת הטענה.
  - 3 טעינה מהירה (DC fast charging)** - מערכות אלה הן נדירות יותר, ועובדות במתח 480V ובזרם AC, אותו הן ממירות לזרם DC. הן נועדו לשרת נהגים לצדי כבישים מהירים ויכולות לעבוד בהספק של כ-50 קילו-ואט ולהטעין סוללת הרכב (שתספיק לטווח הנסיעה בהנעה חשמלית של 96-128 ק"מ) בתוך כ-20 דקות.
- כיום יש בארה"ב למעלה מ-16,000 שקעים לטעינה מכל הסוגים, לא כולל מערכות הטענה בבתי מגורים. פריסת עמדות הטעינה הגבוהה ביותר היא בקליפורניה, ואחריה טקסס וווישינגטון (1,400, 4,000, ו-1,100 עמדות, בהתאמה). מרכיב המכשור במחיר עמדת טעינה (רמה 2) בארה"ב נע בין \$1000 ל-\$7000, תלוי עד כמה היא משוכללת, לפני סובסידיות ממשלתיות. בעמדות טעינה מהירות הוא כבר עולה: \$20,000-\$50,000 וזהו חסם מרכזי לפריסה רחבה שלהן. ביחד עם עלות ההתקנה עלות עמדת טעינה רגילה (רמה 2) עם שקע אחד או שניים מוערכת ב-\$12,000-\$18,000, ועמדת טעינה מהירה מוערכת ב-\$45,000-\$100,000. עלויות התחזוקה מוערכות ב-\$25-\$50 בשנה לכל עמדה (U.S. DOE).
- חברת בטר פלייס, אשר הקימה בישראל 38 תחנות להחלפת סוללה עבור מכונית הרנו פלואנס ZE החשמלית אותה היא שיווקה, הודיעה על פירוקה במאי 2013. עדיין לא ידוע מה יעלה בגורלן של המכוניות החשמליות ועמדות הטעינה של החברה הפרוסות ברחבי הארץ.
- מלבד עמדות הטעינה של חברת בטר פלייס במספר חניונים ובבתי לקוחותיה, ב-2012 פרסם משרד האנרגיה והמים מכרז להקמת 100-10 עמודי טעינה ציבוריים, בתעריף 60 אגורות לקוט"ש, בדומה לתעריף השימוש הביתי. טעינה מהשקע הביתי (רמה 1) אסורה כיום בישראל.

#### נקודות שיש להביא בחשבון בקביעת מיקום עמדות הטעינה:

- נוחות – קרבה לתשתית החשמל הרגילה. יש להביא בחשבון את הפעילות השגרתית באותו אזור, מאחר ורכב נטען צפוי להישאר ליד העמדה זמן ארוך.
- בטיחות – למנוע הפרעה להולכי הרגל באזור.
- טמפרטורה – סוללות עובדות ונטענות באופן אופטימלי בטווח טמפרטורה נתון. באזורים חמים או קרים מאוד, עדיף שעמדת הטעינה תהיה במקום סגור בו ניתן לבקר את התנאים.
- לא למקם ליד בריכות או מערכות השקיה, להפחתת הסיכון לקצר והתחשמלות.
- למנוע אפשרות של התנגשות הרכב הנטען בעמוד הטעינה ע"י שימוש חכם במדרכה או בסטופרים.
- יש לזכור להתחשב בסוגיות של נגישות לבעלי מוגבלויות.
- ונדליזם – הפחתת נזק אפשרי ע"י שימוש בצבע מתאים, אזהרה ומנגנוני הגנה נוספים.
- תמרור – יש לסמן באופן אחיד וברור מקומות חנייה לטעינת רכב חשמלי, על הכביש ועל תמרור.
- מחסה מתנאי מזג אוויר קשים ותאורה מתאימה לשיפור נוחות התפעול של עמדת הטעינה.
- תקשורת – עמדות טעינה בהן מוטמעת מערכת תשלום ידרשו מערכת תקשורת, יש להביא בחשבון את התשתיות הנלוות באזור.
- דרכים ליצירת קשר עם בעלי עמדת הטעינה במקרה של תקלה או מפגע.
- אסתטיקה.

### 5.3 רשת חכמה – Smart grid

על מנת לנהל את העומסים ולצמצם (או למנוע) את הצורך בתוספת יחידות לייצור חשמל, בעולם ובישראל, יש מגמה של מעבר לניהול אספקת החשמל ב"רשת חכמה". הכוונה היא לזרימה דו כיוונית של מידע בין מערכות הבקרה של חברת החשמל ללקוחות, כמו גם האפשרות להולכה דו-כיוונית של חשמל בעתיד (מכון התקנים האמריקאי, [www.nist.gov](http://www.nist.gov)). רשת כזאת תוכל לנהל את הספקי הייצור של מתקנים שונים ואת אספקת החשמל ללקוחות בצורה יעילה יותר שתיטיב עם הסביבה ותחסוך כסף ומשאבים. עם זאת, יש הטוענים כי דווקא ברשתות חשמל מבוזרות (מיקרו-גריד) טמון העתיד, ולהן תועלות סביבתיות וכלכליות גבוהות יותר.

הקמת הרשת החכמה הראשונה בעולם שהחלה לעבוד ב-2005 באיטליה (ENEL Telegstore Project) עלתה 2.1 מיליארד יורו, אבל חוסכת 500 מיליון יורו בשנה (NETL, 2007). רשתות חכמות מקומיות נוספות מוקמות היום בטקסס, קליפורניה, קנדה, גרמניה, הולנד, פורטוגל ועוד. גם בישראל החלה לפעול מנהלת רשת חכמה במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים.

כל עמדות הטעינה אמורות להיות מחוברות לרשת חכמה (כמו של בטר פלייס) שתתקשר עם הרשת של חברת החשמל, על מנת לנהל באופן היעיל ביותר את אספקת החשמל לרכבים נטענים. אחת האפשרויות היא שהסוללות של הרכבים ובתחנות ההחלפה ישמשו כמאגר אנרגיה וניתן יהיה לטעון אותן בשעות השפל, וכך לנצל את החשמל הבלתי מנוצל שכיום לא ניתן לאגור.

## 5.4. מאפיינים סביבתיים

ההשפעה הסביבתית של רכבים נטענים (EV ו-PHEV) תלויה, כאמור, במקורות ותמהיל ייצור החשמל המקומי. ב-2010 תמהיל ייצור החשמל בישראל הורכב מ-61% פחם, 37% גז טבעי ו-2% דיזל ומזוט). זהו משק מזהם יחסית וצפויים שינויים בו בשנת 2020 בה, עפ"י התכנון, ישתנה תמהיל ייצור החשמל ל-65% גז טבעי, 25% פחם ו-10% ממקורות מתחדשים.

למנוע החשמלי יתרונות סביבתיים כמו גם חסרונות. היתרון הבולט הוא בנתונים הנמוכים של פליטת ה- $CO_2$  לק"מ. על פי תמהיל ייצור חשמל זה, נתוני הפליטות לקוט"ש (כפי שמדווחים ע"י חברת החשמל) ונתוני צריכת החשמל לק"מ של המכוניות החשמליות המשווקות, ניתן לאמוד פרמטרים שיאפשרו השוואה בין פליטות המזהמים השונים לאוויר. יש להבחין בין פליטת פד"ח למזהמים אחרים. גזי חממה אינם משפיעים ברמה המקומית ובאופן ישיר על בריאות הציבור. חלקיקים ומזהמים אחרים כגון  $NO_x$  ופחמן חד חמצני, פוגעים באופן מקומי וישיר באוכלוסייה הנחשפת לפליטה. לעיתים, מעבר מטכנולוגיית הנעה אחת לשנייה (גם ברכבים קונבנציונליים כמו הבנזין והדיזל) מעלה ו/או מפחיתה קבוצות מזהמים שונות ומקשה בכך את בחינת ההשפעה הסביבתית הכוללת).

על מנת להשוות בין הפליטה לק"מ של רכבים חשמליים לעומת רכבי בנזין והיברידי, נתבסס על נתוני הפליטות לקוט"ש (לפי נתוני חברת חשמל, 2010) ותמהיל ייצור החשמל שתואר לעיל.

טבלה 10 – תחזית פליטות זיהום אוויר בייצור חשמל מגז טבעי ופחם בישראל 2020<sup>9</sup>

$CO_2$	$NO_x$	$SO_2$	PM10	NM VOC	מתכות כבדות (למעט כספית)	כספית	פליטות בהתאם לתמהיל הדלקים בייצור החשמל
498	0.35	0.18	0.03	0.01	7.50E-05	1.5E-06	גרם לקוט"ש

השוואה לנתוני צריכת החשמל של מכונית חשמלית והפליטות בגינה, מעלה כי רכבים חשמליים פולטים באופן משמעותי פחות  $CO_2$  מרכבים עם מנוע בעירה.

חישוב על פי נתוני הרכב: רנו פלואנס, אותו שיווקה בטר פלייס (22 קוט"ש על הסוללה וטווח נסיעה רשמי של 160 ק"מ) מניב, עבור שנת 2020, תוצאה של 68.5 גרם  $CO_2$  לק"מ (בהשוואה לממוצע של 180 גרם  $CO_2$  לק"מ ברכבים קונבנציונליים). גם אם נניח שהפלואנס מסוגלת לנסוע רק 100 ק"מ בטעינה מלאה, נקבל תוצאה של 110 גרם  $CO_2$  לק"מ, שזה עדיין נמוך באופן משמעותי מרוב הרכבים כיום. לשם השוואה, בנסיעה בשברולט וולט בעלת צריכת אנרגיה של 22.5 קוט"ש ל-100 ק"מ, באחת ממדינות ה-OECD באירופה, (פליטה ממוצעת של כ-350 גרם  $CO_2$  לקוט"ש), תייצר פליטה של 78.75 גרם פר ק"מ נסיעה, נמוך יותר מכל רכב ICE.

O. Ayalon, B. Flicstein, A. Shtibelman. 2013. Benefits of Improving Air Quality - Replacing Conventional Car-based Transportation to Electric Mobility. Journal of Environmental Protection. Volume 4 (10),<sup>9</sup>

מחקר נוסף השווה בין רכב מונע בנזין, HEV ו-EV (Aguirre et al., 2012) וחישב גורמים שונים לאורך מחזור החיים של הרכבים. החוקרים מצאו שבמהלך חייו של רכב רגיל הוא גורם לפליטת כ- 63 טון CO<sub>2</sub>, רכב היברידי כ-41 טון, וחשמלי כ- 32 טון. חשוב לציין שחלוקת הפליטות בין שלבי החיים השונים של הרכב שונה מהותית בין סוגי הרכב, כשכמעט שליש מפליטות מחזור החיים של EV נגרמות בשלב ייצור הסוללה. הנחות היסוד של החוקרים התייחסו לתמהיל האנרגיה של קליפורניה (42% גז טבעי, 14% גרעין, 13% הידרו, 7% פחם, 5% רוח, 5% גאותרמי ו- 2% ביומסה), כ-290,000 ק"מ שהרכב ייסע במהלך חייו, וסוללת Li-ion במשקל 300 ק"ג שתוחלף פעם אחת (1.5 סוללות). לרכב ההיברידי חושבה ההשקעה בסוללה כשישית מזו של הרכב החשמלי. תוצאות נוספות מסוכמות בטבלה 11. נדגיש שוב כי פליטות גזי החממה וגורמי זיהום האוויר תלויים בתמהיל מקורות האנרגיה המשמשים להפקת החשמל.

טבלה 11 - השוואה סביבתית בין רכבי בנזין, HEV ו-EV

סוג הרכב	פליטות CO <sub>2</sub> לאורך מחזור החיים (טון)	פליטות CO <sub>2</sub> לק"מ (גרם)	השקעת אנרגיה לאורך מחזור החיים (MJ)
בנזין	63	218	858,000
HEV	41	143	565,000
EV	32	112	507,000

מקור: Aguirre et al. (2012)

מהטבלה לעיל עולה כי פליטות הפד"ח קטנות בכמחצית במעבר בין רכבי בנזין ולרכבים חשמליים. הרכבים ההיברידיים, באופן צפוי, נמצאים באמצע עם ממוצע של 143 גרם פליטה CO<sub>2</sub> לק"מ.

לגבי חלקיקים נשימים התמונה מעט שונה ויש הטוענים כי מעבר לרכבים חשמליים, תחת תמהילי ייצור חשמל מסוימים, יגביר את פליטת החלקיקים לאוויר (עבור רכב בנזין). מחקר שנעשה ב- 34 ערים בסין השווה בין פליטות CO<sub>2</sub> וחלקיקים נשימים PM<sub>2.5</sub>, של רכבים מונעי בנזין או דיזל ורכבים חשמליים (Ji et al., 2012). התוצאות עבור רכבים חשמליים (שלטובת החישוב מנצלים 18 ואט-שעה/ק"מ) משתנות כצפוי בין הערים ותלויות בתמהיל האנרגיה המקומי לייצור החשמל, ונעו בין 135 גרם CO<sub>2</sub> לק"מ בצינגדו ל-220 גרם לק"מ בבייג'ין (נתונים דומים לפליטות של רכב בעל יעילות של 11-18 ק"מ לליטר בנזין). לגבי החלקיקים, נמצא שבתהליך ייצור החשמל נפלטים פי 19 יותר חלקיקי PM<sub>2.5</sub> לק"מ נסיעה של רכב חשמלי בהשוואה לרכב רגיל. גם לאחר שהחוקרים תיקנו את התוצאות כדי להתחשב בעובדה שמדובר בחלקיקים שנפלטו באזור תחנות הכוח ולא במרכזי הערים, הם העריכו שרכב חשמלי פולט ממוצע פי 3.6 יותר חלקיקים מרכב בנזין, אבל פי 2.5 פחות בהשוואה לרכב מונע דיזל.

## 5.5. תקינה

כהכנה ליבוא כלי רכב חשמליים, מתפתחת בישראל כעת תקינה לאומית לטעינה וטיפול בכלי רכב הללו (ועדה טכנית 1317 "רכב חשמלי", מכון התקנים הישראלי). התקינה הישראלית הקיימת מסדירה את המאפיינים הטכניים של טעינת הרכבים ועמדות הטעינה עצמן, כפי שהם מוגדרים בת"י 1-61851 - מערכת טעינה-בחיבור-מוליכי לרכב חשמלי: דרישות כלליות; ובת"י 22-61851 - מערכת טעינה-בחיבור-

מוליכי לרכב חשמלי: עמדת טעינה בזרם חילופין לרכב חשמלי. 4 תקנים נמצאים בשלבי הכנה אחרונים:

- סדרה ת"י 6469 - רכבי כביש מונעים בחשמל – מפרטי בטיחות (3 תקנים), ו-
- ת"י 6237 - רכב חשמלי – בטיחות במוסך – דרישות כלליות.

## 5.6. שיעורי חדירה

### 5.6.1. בישראל

נכון לפברואר 2013 נמכרו בישראל 730 מכוניות חשמליות של חברת בטר פלייס, נמוך באופן משמעותי מההערכות המוקדמות של החברה (על פי אתר איגוד יבואני הרכב). אין כרגע ייבוא מוסדר של דגמים חשמליים של יצרניות אחרות בעולם, בעיקר עקב חוסר המוכנות של תשתית הטעינה ותהליכי תקינה של משרד התחבורה.

### 5.6.2. בעולם

לפי סוכנות הידיעות בלומברג (www.bloomberg.com), בשנת 2013 צפויות להימסר ברחבי העולם 225,000 מכוניות נוסעים חשמליות או היברידיים פלאג-אין, כמעט כפול מהמכירות בשנת 2012, אך עדיין רק שליש מההערכות המוקדמות יותר של יצרניות הרכב. הדגמים המובילים ב-2012 היו שברולט וולט (PHEV) עם 30,090 יחידות, טויוטה פריוס פלאג-אין עם 27,181 יחידות וניסאן ליף עם 25,435 יחידות.

טבלה 12 - מספר כלי הרכב החשמליים הרשומים במדינות שונות בשנת 2011

מדינה	רכב מסחרי קטן (Light Duty Vehicles)	רכבי נוסעים (Passenger vehicles) (כולל LDV)	אוטובוסים	משאיות
ארה"ב		18,108		
בריטניה	3,753	2,504	68	893
גרמניה (2010)		2,307	90	1,313
איטליה	9,000	404	950	
דנמרק		845	11	10
שווייץ (2010)	350	1,000	30	
שוודיה		366	4	115

מקור: IEA (2012)

### 5.6.3. תחבורה ציבורית

אוטובוסים חשמליים מתחילים לחדור לשווקים אך בקצב איטי יחסית. בעיר שז'ן בסין נמצא צי האוטובוסים החשמליים הגדול בעולם, בזכות 300 אוטובוסים חשמליים מתוצרת BYD בעלי טווח גדול מ-300 ק"מ. באיטליה היו ב-2011 950 אוטובוסים חשמליים - כ-50 מהם ברומא, באוסטריה היו למעלה מ-100, ובהולנד ובגרמניה היו 90 (IEA 2012).

### 5.6.4. משאיות

ב-2012 הוצעו למכירה בארה"ב מספר דגמי משאיות קלות, המיועדות למשימות לטווחים קצרים כגון: שאטלים בשדות התעופה, משאיות חלוקה, משלוחים והובלות (ORNL 2013). ב-2011, היו באוסטריה כ-

70 משאיות חשמליות, בבריטניה כ- 900, בקנדה כ- 250 (2009) ובגרמניה כ- 1,300 משאיות (IEA 2012).  
מלבד המחיר הגבוה, הטווח המוגבל אינו מאפשר כרגע שימוש במשאיות חשמליות לנסיעות ארוכות.

## 5.7. חסמים

השינוי התפיסתי והטכנולוגי העמוק שמציעים הרכבים החשמליים, מציב אותם מול אתגרים וחסמים לא פשוטים. עיקרם מתוארים להלן:

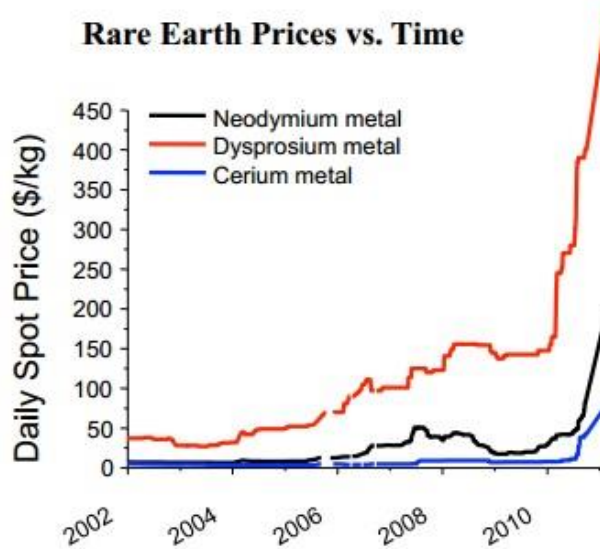
- **חסם כלכלי** - חלק משמעותי ממחירי הרכבים הניטענים וההיברידיים הגבוהים היום נובע ממחירי הסוללות הגבוהים והתחלת החדירה שלהם לשוקים מתאפשרת היום הודות לסובסידיות גדולות מאוד. דו"ח של חברת מקינזי מ-2012 מעריך שעד שנת 2025 יתרחשו פריצות דרך טכנולוגיות משמעותיות שיובילו להגדלת הקיבולת של הסוללות ב-110%-80% ועלות כל קוט"ש על הסוללה תצנח מ-\$500 היום ל-\$160, ורכבים ניטענים יהפכו תחרותיים הרבה יותר.
- **זמן טעינה ארוך** - כל עוד לא יתאפשר לטעון רכב חשמלי בזמן דומה לתדלוק רכב קונבנציונלי, האחרונים יועדפו. פתרון אפשרי לזמן הטעינה הארוך הוא עמדות לטעינה מהירה, שתוארו סעיף 5.2. מלבד העלות הגבוהה מאוד של עמדות טעינה כאלה, ההיתכנות תלויה גם בטכנולוגיות הסוללה, שיאפשרו טעינה בקצב גבוה. סוללות שנטענות מהר מאוד כבר עובדות במסגרת ניסויים, אך יקרות מדי לשיווק והפצה. בנוסף, יש להתאים את תשתית הטעינה שתוכל לתמוך בטעינה מהירה כזאת בלי שייגרם לה או לסוללה נזק, ולצמצם סכנות התחשמלות עקב המתח הגבוה במיוחד שמחייבות עמדות טעינה מהירות.
- **טווח נסיעה מוגבל** - מהווה חסם פרקטי אך גם פסיכולוגי עמוק. הרכב החשמלי דורש שינוי מחשבתי שחלק גדול מהציבור יתקשה להטמיע. יש הטוענים כי עד שלא יושג טווח דומה לשל רכב קונבנציונלי במחיר סביר, לרכבים ניטענים יהיה קשה לתפוס נתח שוק משמעותי.

החכרת סוללה מתחלפת (מודל בטר פלייס) היא פתרון יצירתי שנותן מענה חלקי לשלוש הבעיות הקשורות לסוללה שהוזכרו. בעיית הטווח המוגבל נפתרת רק באופן חלקי מאחר ועדיין המרחקים שבין החלפת סוללה הם קצרים יחסית. יתרונות נוספים של המודל הם אחריות החברה המחכירה לסוללות והאפשרות להחליף אותן עם הזמן בדגמים משופרים, כמו גם ריכוז הסוללות לצורך מחזורן או הטיפול בהן כפסולת מסוכנת. החיסרון במודל הוא שהחברה המחכירה את הסוללות קושרת את הצרכן בחוזה בו מגולמת עלות החשמל, עלות הקמת התשתית ועלות החכרת הסוללה, וכך העלויות השוטפות כבר נעשות דומות לשל רכב רגיל והאטרקטיביות של רכישת הרכב יורדת. חסרון נוסף הוא במקרה של מכירת הרכב ליד שנייה, כשיהיה על הרוכש להיקשר בעצמו לחברה המחכירה, והשאלות לגבי סיום החוזה של בעל הרכב המקורי טרם המועד המוסכם. מודל החלפת הסוללה הוא ייחודי לרנו-ניסאן ולבטר פלייס, ונראה כי יצרניות הרכב האחרות לא מעוניינות לעשות סטנדרטיזציה לרכביהם כדי שיתאימו לסוללות. על אף האמור לעיל, חברת רנו מוכרת בצרפת את הדגמים החשמליים שלה, Kangoo Z.E וה-Fluence Z.E במחירים הדומים למחירי רכבים קונבנציונליים, על ידי מנגנון דומה של החכרת הסוללה לנהגים (ללא החלפה) בתשלום חודשי של 70-80 אירו (IEA, 2012).

אתגרים וחסמים נוספים הינם :

- **עומס אפשרי על רשת החשמל** - חדירה משמעותית ומהירה של רכבי EV ו-PHEV תשפיע על היקף הביקושים ברשת החשמל, מה שעשוי להכביד מאוד בשעות צריכת השיא. כאמצעי ראשוני להפחתת העומסים הצפויים ניתן לקבוע תעריף תעו"ז לעמדות הטעינה (כפי שנהוג בארה"ב). אמצעי זה לא יהיה אפקטיבי במקרה של חוזים גלובליים בין הנהגים לספקית החשמל שלהם (עד לא מזמן בטר פלייס בישראל). אמצעי מורכב יותר לניהול העומסים הוא רשת חכמה (סמארט גריד) עליה נכתב בפרק על רשת הטעינה.
- **שוק יז שנייה** - כל עוד שלא תהיה חדירה משמעותית של רכבים חשמליים לשוק, האפשרות למכור אותם ליד שנייה תהיה מוגבלת, ועקב הביקוש הנמוך גם המחיר שיכול בעל הרכב לבקש יהיה נמוך בהשוואה לרכב דומה בעל מערכת הנעה רגילה.
- **בטיחות** - כחלק מבניית האמון בקרב הציבור בטכנולוגיה החדשה, יש לצמצם את סכנת התחשמלות בעת הטעינה. היו מספר מקרים של התלקחות סוללות חשמליות, המפורסמת ביותר היא של הסוללה על מטוס הבואינג 787, בעת שחנה בשדה התעופה בבוסטון בינואר 2013. סוללה יכולה להתלקח עקב טעינת יתר, פריקה מהירה מדי או קצר חשמלי, לכל אלה ישנם אמצעי בקרה ושליטה במארז הסוללה. אמנם גם לרכבים בעלי הנעה רגילה ישנם הסיכונים הבטיחותיים שלהם (תכונות הדליקה של בנזין) ואלה שופרו במהלך השנים, אך בשלב מוקדם זה של החדרת הרכבים החשמליים לשווקים, להתלקחות סוללות עשויה להיות השפעה שלילית משמעותית ( Boston consulting group, 2010).
- מאחר והמנוע החשמלי שקט מאוד, יש חשש **לבטיחות הולכי הרגל ורוכבי האופניים**. על מנת לצמצם את הסיכונים, באירופה קבעו תקן שמחייב את היצרניות לדאוג שהרכב יפיק רעש בעוצמה מינימלית.
- **מתכות נדירות (rare earth minerals)** - עם הגידול החד הצפוי בחדירת רכבים עם סוללות גדולות לשווקים, צפוי לגדול משמעותית הביקוש למתכות הנדירות שמהם עשויים מרכיבי הסוללות. אם היום עולה הביקוש ל-Dy (dysprosium) ו-Nd (neodymium) בקצב שנתי של כ-6%, ב-25 השנים הקרובות יעלו הביקושים (בסה"כ) ל-Nd ב-700% ול-Dy ב-2,600% (Alonso et al. 2011). בעקבות העלייה בביקושים, חלה עלייה משמעותית במחיר המתכות וקיים חשש שהשוק לא יוכל לתת מענה לביקושים בעתיד. לגבי ליתיום, המרכיב המרכזי בסוללות Li-ion, הביקוש למתכת כבר נמצא בעלייה משמעותית והיקפי ההפקה עלו בשנים 2010-2000 מ-15,000 טון ל-25,000 טון בשנה (ליתיום נקי ומעובד). ההערכות לכמויות שיופקו ב-2020 נעות בין 58 ל-110 אלף טון, כשסך כל הכמות הזמינה מוערך גם הוא בטווח רחב מאוד שבין 2 ל-20 מיליון טון, במקרה כזה ליתיום אינו מהווה גורם מגביל לכל שימוש שהוא (UKERC 2013). הפתרון יכול להיות הקמת מערכים למחזור הסוללות.
- דרושה תשתית רחבה למחזור סוללות ישנות.

### תרשים 13 - העלייה במחירי המתכות הנדירות



מקור: (Alonso et. al 2011)

## 5.8 היבטים רגולטורים - תקנות ותמריצים

כל סוגי רכב החשמליים שהוזכרו עד כה חייבים ברישוי מסוג M או N עפ"י פקודות התעבורה, תשכ"א 1961, סעיף 271. טעינת רכבי EV ו-PHEV תהיה דרך התקן מיוחד בביתו של בעל הרכב, במקום העבודה או בחנייה בשטח ציבורי, זאת במטרה למנוע סכנת התחשמלות ולאפשר בקרה על הטעינה ותקשורת דו כיוונית בין הרכב לעמדת הטעינה, אשר חשיבותה מניעת עומס יתר על רשת החשמל. אמצעי נוסף להפחתת העומס על הרשת בשעות השיא הוא הנהגת תעריפי עומס וזמן (תעו"ז) שייקבעו ע"י רשות החשמל ויביאו להעדפת הטעינה בשעות השפל (משרד התשתיות הלאומיות 2011).

### 5.8.1 תמריצים בישראל

- במסגרת רפורמת המיסוי הירוק הוגדרו המכוניות חשמליות כ"רכב נטול פליטות רעילות בגובה פני הקרקע", ומוטל עליהן מס קנייה של 10% עד 2014, שיעלה ל-30% ב-2015. לא ברור כרגע אם מכונית PHEV תיחשב לצרכי חישוב ההטבה כהיברידית, או חשמלית, כמו ברוב העולם.
- הטבות חנייה - במספר רשויות מקומיות בארץ רכבים היברידיים וחשמליים יכולים לחנות בחינם למספר שעות או ללא הגבלה. כך למשל רכבים היברידיים בפתח תקווה יכולים לחנות בכחול-לבן ללא הגבלת זמן, בחיפה רכב היברידי יכול חנות חינם לזמן מוגבל, ובהרצליה מכוניות חשמליות יכולות לחנות בחינם ללא הגבלת זמן.
- פיתוח והגדרת "אזורים נקיים" בערים בארץ עשוי להוות תמריץ נוסף להגדלת הביקוש לכלי רכב בעלי הנעה חשמלית (EV, PHEV, HEV).

## 5.8.2. תמריצים בעולם

### 5.8.2.1. ארה"ב

קיימים תמריצים לעידוד הכניסה לשווקים של כל הרכבים בעלי ההנעה החשמלית (HEV, PHEV, EV) ברמה הפדרלית כמו גם ברמת המדינות והרשויות המקומיות, לעידוד מחקר בתחום, לרכישת רכבים בעלי רמת זיהום נמוכה ולהשקעה בתשתיות הטעינה.

#### ברמה הפדרלית:

- עבור רכישת רכב חשמלי בעל סוללה עם קיבולת מינימלית של 4 קוט"ש, אשר עושה שימוש במקור אנרגיה חיצוני לטעינתה, ושוקל פחות מ-14,000 פאונד, ניתן לקבל זיכוי ממס קנייה בגובה \$2,500-7,500, כתלות בקיבולת הסוללה ובמשקל הרכב. הטבת המס תוקטן בהדרגה לאחר שיצרן הרכב ימכור לפחות 200,000 רכבים נטענים בארה"ב.
- ציי רכב של יותר מ-50 רכבים קטנים (Light duty vehicles, עד 4,500 ק"ג), כשלפחות 20 מהם בשימוש באזור סטטיסטי אחד, מחויבים לרכוש רכבים בעלי הנעה אלטרנטיבית, כולל רכב חשמלי, עליהם הם מקבלים קרדיט. בסוף השנה עליהם לעמוד ביעד מסוים, אם הם עברו אותו הם יכולים לסחור בקרדיט העודף.
- פטור מדמי שימוש בנתיבים מהירים (High Occupancy Vehicle lanes) לכלי רכב בעלי רמת זיהום נמוכה, בלי קשר למספר הנוסעים ברכב.
- סבסוד של 50% מעלות כלי רכב בעלי אפס פליטות (Zero Emission Vehicles) לציי רכב של נמלי תעופה אזרחיים.
- לשם הגדלת רשת הטעינה ונגישותה לנהגים, על הקמת עמדת טעינה עד סוף 2013 ישנו זיכוי במס של 30% מהעלות, עד לסך של \$30,000. מי שרכשו עמדת טעינה ביתית זכאים לזיכוי מס של עד \$1,000.
- עמדות טעינה רבות ניתנות לשימוש ללא תשלום כרגע, אם כי בעתיד הן יגבו תשלום ישירות עבור החשמל או בעבור השרות (בארה"ב רק לחברות חשמל מותר למכור חשמל באופן ישיר).

#### ברמת המדינות:

- באילינוי, ארגוני קאר שרינג (שיתוף רכבים) זכאים למענקים בגובה של עד 25% מעלות רכב חשמלי או היברידי פלאג-אין, כולל הקמת תשתית הטעינה. בנוסף ניתן לקבל מענק של עד \$4,000 להפיכת רכב סטנדרטי לרכב חשמלי. סובסידיות בגובה 50% מעלות עמדת טעינה (כולל הקמה) ועד לגובה \$3,750 ניתנות לכל עמדת טעינה (רמה 2) ברשת ציבורית (או \$7,500 לעמדה עם שני שקעים) ועד \$3,000 לעמדה שאינה ברשת (או \$6,000 לעמדה עם שני שקעים). סה"כ מקסימום הסובסידיה הוא \$49,000 או 50% מעלות הפרויקט הכוללת של 15 עמדות טעינה, הסכום הנמוך מבניהם.
- באריזונה יש הנחה באגרת הרישוי השנתית וחנייה חינם במקומות ייעודיים.
- בקליפורניה, ה-Bay area air quality management district (BAAQMD), מעניק החזרים בסכומים משתנים ל-2,750 רוכשי מכוניות נטענות שהתקינו עמדת טעינה ביתית מרמה 2, על

שילוב רכב חשמלי והיברידי לסוגיו במערך התחבורה בישראל  
שלב א': סקר ספרות

בסיס כל הקודם זוכה. בלוס אנג'לס, מחלקת האנרגיה והמים מעניקה החזרים של עד \$2,000 ל-1,000 לקוחות ביתיים שרכשו רכב נטען ועמדת טעינה רמה 2.

- באורגון, ציי משאיות מקבלים החזר של \$20,000 בעבור רכישת משאית בעלת אפס פליטות. בעלי עסקים זכאים לעד 35% זיכוי ממס עבור הקמת תשתיות טעינה, ויש אפשרות לקבל הלוואות בריבית נמוכה להקמתה.
- במישיגן, חברת החשמל המקומית, Consumer Energy, מציעה תעריפי תעו"ז לטעינת הרכב על מנת להגדיל את החיסכון בהשוואה לעלויות דלק. התעריף בשעות השפל הוא 7 סנט לקילו-ואט, חצי מהתעריף הרגיל ושליש מתעריף שעות השיא.

טבלה 13 - מיסים ותמריצים פדרליים בארה"ב לדלקים אלטרנטיביים

Table A-2. Federal Taxes and Incentives for Alternative Fuels

Fuel	Excise Tax Rate (¢ per gallon)	Production Incentive	Incentive for Blending and/or Fuel Use	Federal R&D	Other Programs
<b>Biofuels</b>					
General				DOE Biomass R&D program - \$199 million in FY2012. <sup>a</sup> USDA Biomass R&D - \$40 million in FY2012. <sup>b</sup>	Renewable fuel standard (RFS) mandates biofuel use by gasoline and diesel fuel suppliers—mandate of 15.2 billion gallons in 2012.  Tax credit for installation of refueling infrastructure for some biofuels.
Conventional Ethanol	18.4	None	\$0.54 per gallon [expired]		Majority of RFS met through use of conventional (corn-based) ethanol.
Biodiesel and Renewable Diesel	24.4	\$1.00 plus \$0.10 for small producers	\$1.00 per gallon (may not claim this and the producer credit)		Specific carve-out in RFS for biomass-based diesel—1.28 billion gallons in 2013.
Cellulosic and Algae-Based Biofuels	Varies	\$1.01 per gallon, plus accelerated depreciation of plant property	None	DOE and USDA biomass programs focused on cellulosic biofuel development.	Specific carve-out in RFS for cellulosic biofuels—8.65 million gallons in 2012.
Advanced Biofuels <sup>c</sup>	Varies	Varies	Varies	DOE Biomass Program.	USDA Farm Bill programs, including Biorefinery Assistance, Repowering Assistance, Bioenergy Program, Biomass Crop Assistance Program (BCAP).
<b>Hydrogen</b>	18.4	None	\$0.50 per gallon	DOE Hydrogen and Fuel Cell Technologies Program—\$104 million in FY2012. <sup>d</sup>	Tax credit for installation of refueling infrastructure.
<b>Liquefied Petroleum Gas (LPG)</b>	18.3	None	\$0.50 per gallon		Tax credit for installation of refueling infrastructure.
<b>Natural Gas</b>					
Compressed Natural Gas (CNG)	18.3	None	\$0.50 per gallon		Tax credit for installation of refueling infrastructure.
Liquefied Natural Gas (LNG)	24.3	None	\$0.50 per gallon		Tax credit for installation of refueling infrastructure.

מקור: CRS (2013)

טבלה 14 - מיסים ותמריצים פדרליים בארה"ב לרכבים אלטרנטיביים

Table A-3. Federal Incentives for Alternative Fuel and Advanced Technology Vehicles

Vehicle Technology or Fuel Type	Manufacturing Incentive	Purchase Incentive	Federal R&D	Other Programs
<b>Electrified Vehicles</b>				
General			\$118 million in FY2012 under DOE's Vehicle Technologies Program covers hybrid, battery electric, and plug-in technologies.	National Clean Diesel Campaign (NCDC), Clean Cities.
Hybrid	ATVM loan program generally applies.	Up to \$3,400 for passenger vehicles <i>[expired]</i>		
Battery Electric	Credits under CAFE program; ATVM loan program generally applies.	Up to \$7,500 for passenger vehicles; Up to \$2,500 for two- and three-wheeled and low-speed vehicles; Up to \$4,000 for conversion kits <i>[expired]</i>		
Plug-in Hybrid	Credits under CAFE program; ATVM loan program generally applies.	Up to \$7,500 for passenger vehicles; Up to \$2,500 for two- and three-wheeled and low-speed vehicles; Up to \$4,000 for conversion kits; <i>[expired]</i>		
Ethanol Flexible Fuel Vehicle (FFV)	Credits under CAFE program expire after 2019 model year.	None	Limited	National Clean Diesel Campaign (NCDC), Clean Cities.
Fuel Cell Vehicles	Credits under CAFE program; ATVM loan program generally applies.	Up to \$8,000 for passenger vehicles	DOE Hydrogen and Fuel Cell Technologies Program—\$104 million in FY2012. <sup>a</sup>	National Clean Diesel Campaign (NCDC), Clean Cities.
<b>Natural Gas Vehicles</b>				
Compressed Natural Gas (CNG)	Credits under CAFE program; ATVM loan program generally applies.	Up to \$4,000 for passenger vehicles <i>[expired]</i>	Limited	National Clean Diesel Campaign (NCDC), Clean Cities.
Liquefied Natural Gas (LNG)	Credits under CAFE program; ATVM loan program generally applies.	Up to \$4,000 for passenger vehicles <i>[expired]</i>		National Clean Diesel Campaign (NCDC), Clean Cities.

Source: CRS Analysis.

Notes: For more details, see Table A-1. Italics indicate expired provisions.

a. Program not exclusively focused on transportation.

מקור: CRS (2013)

5.8.2.2 אנגליה

- החל מ-2011, ניתן מענק לרכישת רכב בעל פליטות נמוכות במיוחד, בכלל זה רכב חשמלי (Plug-in grant). המענק נועד לכיסוי 25% מעלות הרכב, ועד לסכום 5,000 פאונד. המענק הביא לזינוק ברכישת רכבים חשמליים באנגליה, ובתוך שנה עלה מספר הרכישות מ-250 ל-1,200 (UK Department for Transport 2011).
- השתתפות במימון עד 75% מעלות הקמת תשתית טעינה ביתית או ציבורית, עד לגובה 7,500 פאונד (UK Department for Transport 2013). לונדון היא בין הזוכות במימון ומתכננת להקים 25,000 עמדות טעינה עד 2015.
- קרן של 30 מיליון פאונד מוקדשת למימון רכישת 349 אוטובוסים בעלי רמת זיהום נמוכה, מתוך אלה 55 הם חשמליים.
- בלונדון - פטור מאגרת גודש, חנייה חינם ברובעים מסוימים, הקמת 25,000 עמדות טעינה עד 2015 (עד היום הותקנו 200) ורכישת EV 1,000 לצי הרכבים של העירייה.

### 5.8.2.3. צרפת

- ב-2011, נחנכה בפריז תכנית להשכרת רכבים חשמליים שנקראת Autolib. במסגרת התכנית נפרשו בעיר כ-3,000 מכוניות קומפקטיות ב-1,000 נקודות השכרה, והעירייה השקיעה בפרויקט 110 מיליון אירו.
- תכנית דומה ל"מיסוי ירוק" שמעניקה הנחה משמעותית ברכישת רכבים בעלי פליטות נמוכות מ-60 גרם CO<sub>2</sub> לק"מ (tank to wheel) כוללת למעשה את כל הרכבים החשמליים. גובה המענק הוא 5,000 אירו, תכנית דומה יש גם באירלנד.

### 5.8.2.4. אירלנד

- הממשלה הקימה 1,500 עמדות טעינה "רגילות" ברחובות הערים ועוד 30 עמדות טעינה מהירות.

## 5.9. ניתוח SWOT רכבים חשמליים

טבלה 15 - ניתוח SWOT רכבים חשמליים

יתרונות	חסרונות	הזדמנויות	איומים
<ul style="list-style-type: none"> <li>אפס פליטות ממפלט הרכב</li> <li>העלות השולית של טעינת הרכב נמוכה מאוד</li> <li>פעולת המנוע שקטה מאוד (יש הטוענים שהיא מסכנת את הולכי הרגל ולכן יש להוסיף "רעש")</li> <li>את החשמל ניתן להפיק ממקורות מתחדשים עלויות התחזוקה והטיפול נמוכות יותר</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>יקרים מאוד</li> <li>טווח נסיעה מוגבל</li> <li>התועלת הסביבתית תלויה בתמהיל הדלקים לייצור החשמל</li> <li>השקעה בפרישת רשת עמדות טעינה</li> <li>התקדמות איטית של טכנולוגיית הסוללות</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ניתן להשתמש בסוללות הרכבים לניצול ואגירת חשמל שהופק בשעות השפל או ממקורות מתחדשים</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ככל שישתפרו הרכבים הקונבנציונליים וההיברידיים תקטן התועלת הסביבתית שבהשקעה ברכב חשמלי</li> <li>טכנולוגיית תאי הדלק עשויה להוות פתרון נקי ומהיר יותר</li> <li>מחירים גבוהים של מתכות נדירות</li> </ul>

## 6. רכבים מונעי תא דלק Fuel Cell Vehicles/ Fuel Cell Electric Vehicles

### 6.1. רקע

ברכבים אלה מקור האנרגיה הוא תא דלק לשם הפקת חשמל והעברתו למנוע חשמלי. בניגוד לסוללה שהיא מתקן לאגירת חשמל, תא דלק משתמש בדלק (יכול להיות בעיקרון כל דלק, אך הנטייה היום היא להשתמש במימן הדחוס בלחץ 350 אטמוספרות), על מנת לייצר חשמל בריאקציה כימית. בתדלוק עם מימן, תוצרי הפליטה היחידים בתהליך הם אדי מים, במילים אחרות רכבים אלו אינם פולטים CO<sub>2</sub> ומוזהמים. הטווח של רכבי FCV המוצעים היום למכירה עומד על 300-400 ק"מ, גבוה בהשוואה לרכבים חשמליים, וצפוי בעתיד להיות גבוה באופן משמעותי גם מהטווח של רכבים קונבנציונליים.

נציג תחילה מאפיינים בולטים של רכבים מונעי תאי דלק:

טבלה 16 - מאפייני FCV - Honda FCX Clarity

יעילות המנוע	ק"מ לק"מ מימן	ק"מ לק"מ מימן	מחיר ק"מ מימן	עלות לק"מ	טווח נסיעה (ק"מ)	פליטות	מחיר בארה"ב	יחידות שנמכרו בעולם
70-90%	96	5 דולר	מ-20 אגורות (מעל ל-5 סנט)	380	0	לא מוצעת למכירה כרגע, אלא לליסינג במחיר \$600 בחודש	אלפים מעטים	

מקור הנתונים: [http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv\\_sbs.shtml](http://www.fueleconomy.gov/feg/fcv_sbs.shtml)

מהטבלה עולה כי:

- הטכנולוגיה נמצאת בראשית דרכה ולא מיושמת כמעט כלל.
- טווח הנסיעה מרשים ביחס לרכבים חשמליים ופלאג אין ומשתווה לזה של רכב בנין קונבנציונאלי.
- להוציא פליטת מזהמים בתהליך הפקת המימן, הרכב לא פולט ישירות אף מזהם.

אין ספק כי הנעה ללא פליטות היא פסגת השאיפות האפשריות בתחום הרכבים, עם זאת זוהי טכנולוגיה שתדרוש משאבים וזמן רב אם וכאשר תחדור לשווקים.

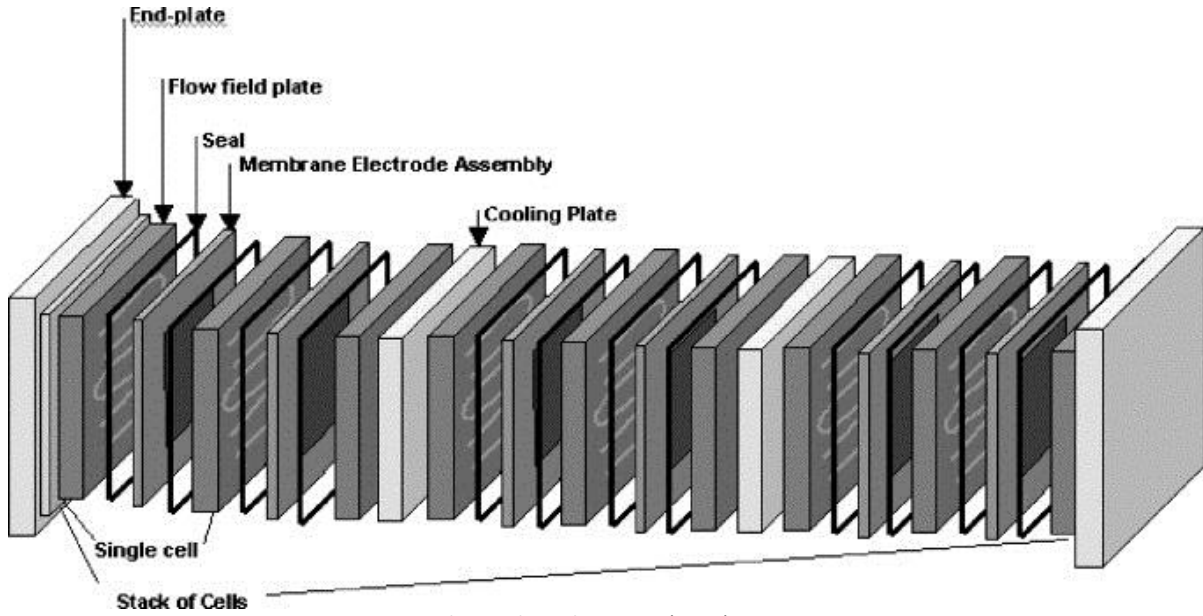
### 6.2. מאפיינים טכניים

יש מספר טכנולוגיות בהן ניתן להשתמש בתאי הדלק:

polymer electrolyte ו- Phosphoric acid (PA), solid oxide (SO), Molten carbonate (MC) membrane (PEM) ועוד. לכל סוג של תא דלק יש טכנולוגיה נפרדת ותכונות שונות, כשהנצילות הכללית גבוהה בכ-50% (טרטקובסקי ועמיתיו, 2001). תאי דלק מסוג PEM הם הרלוונטיים ביותר לשימוש בכלי רכב ומבוססים על אלקטרוליט מסוג perfluorinated isomer polymer membrane המוליך פרוטונים

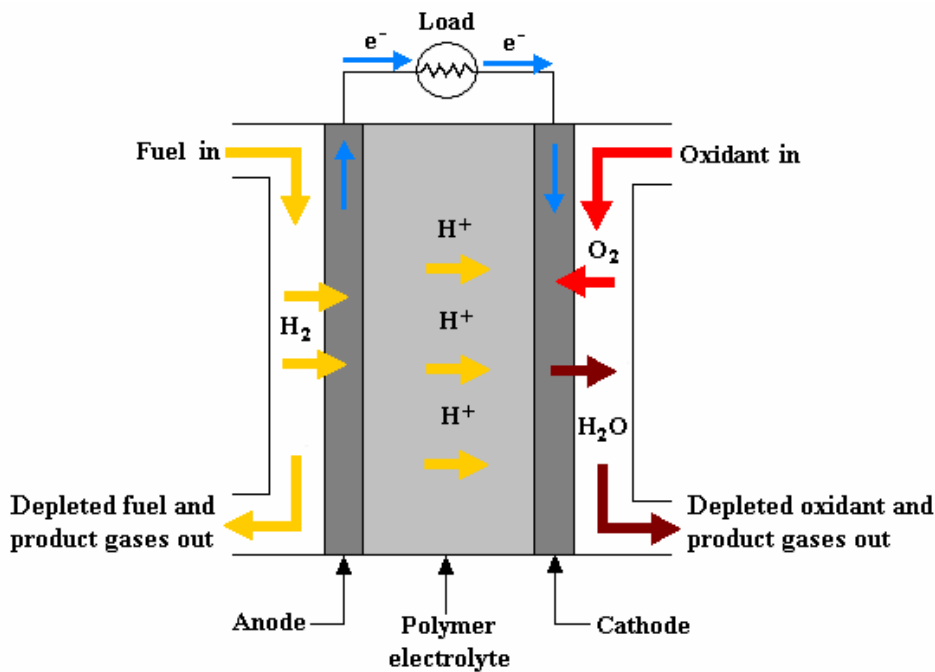
(ממברנות כאלה נקראות גם לפעמים "אלקטרוליט פולימרי מוצק"). תא הדלק כולל אנודה וקתודה המצופות בקטליזטור, כשהאלקטרוליט בתווך בין שתיהן. כאשר המימן מגיע לאנודה, הקטליזטור עליה גורם לו לאבד אלקטרון ולהפוך לפרוטון. האלקטרונים מועברים לקתודה ע"י מעגל חיצוני ויוצרים זרם חשמלי, והפרוטונים עוברים דרך האלקטרוליט לכיוון הקתודה, שם יתרכבו עם חמצן מהאוויר וייפלטו כאדי מים. על מנת לספק מתח מתאים לפעולת מערכות הרכב, כמה מאות תאים מורכבים ביחד ב- Fuel cell stack, כפי שניתן לראות בתרשים הבא:

תרשים 14 - Fuel cell stack



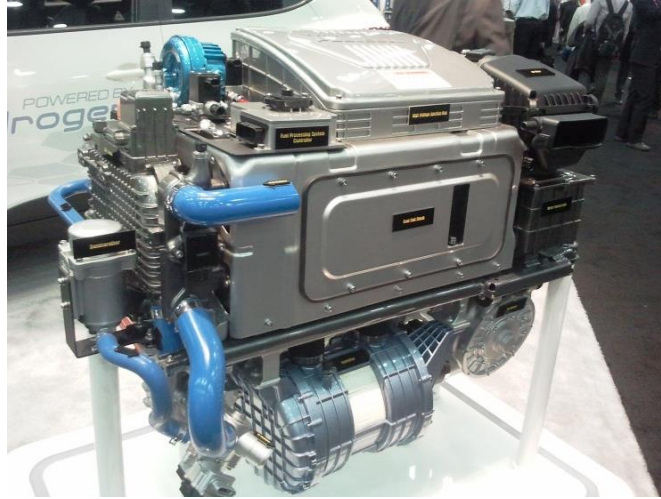
מקור: Mehta and Smith Cooper (2003)

תרשים 15 - מבנה ואופן הפעולה של תא דלק מסוג PEM



יש לציין, שיחידת כוח (power plant) המבוססת על תא דלק הינה כיום מורכבת מאד (ראה תרשים 16) וכוללת מספר רב של מערכות ומכלולי עזר המפחיתים את נצילותה הכוללת.

#### תרשים 16 - יחידת הכח של תא הדלק

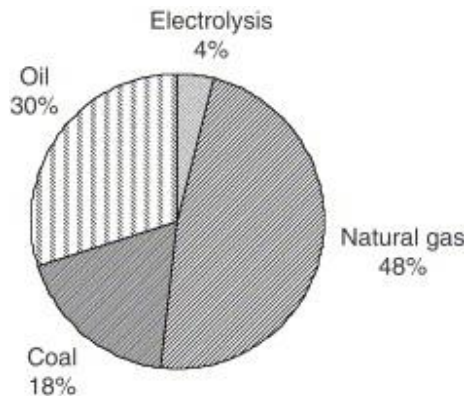


מקור: צילום מתערוכת הקונגרס העולמי של SAE בדטרויט (2013)

היתרונות של השימוש בתא דלק PEM בכלי רכב נוסעים הם טמפרטורת העבודה הנמוכה יחסית ( $80^{\circ}\text{C}$ ), אפשרות הפעלה מהירה, קומפקטיות, ועבודה יעילה בהספקים משתנים. חסרונותיו הם הרגישות שלו לאיכות הדלק ועלותו הגבוהה. חברת Ballard הקנדית, המובילה בתחום ייצור תאי דלק מסוג PEM, מעריכה שבייצור המוני ל-300,000 כלי רכב בשנה, ירדו המחירים ל-50-60 דולר לקילו-ואט, רמה תחרותית למנועי ICE קטנים (טרטקובסקי ועמיתיו 2001).

למרות שמימן הוא היסוד הכי נפוץ בטבע, הוא לא קיים בו בצורתו הגזית  $\text{H}_2$  באופן טבעי. לכן הוא לא מקור אנרגיה זמין, אלא נשא האנרגיה (energy carrier). ישנו מגוון רחב של דרכים להפקת מימן, אשר ניתן להפיק מחומרי גלם שונים כמו גז טבעי, פחם, מים, מתנול, אתנול, אמוניה, פסולת ועוד, וכן עיי טכנולוגיות שונות, כאלקטרוליזה או פוטוליזה של מים, גזיפיקציה של פחם, חימצון חלקי ו-steam reforming. כיום steam reforming היא הטכנולוגיה הנפוצה ביותר כאשר 96% מחומרי הגלם הם דלקים פוסיליים, בראשם גז טבעי (בעיקר מתאן).

#### תרשים 17 - המקורות הנוכחיים להפקת מימן



מקור: Kothari et al. (2008)

### 6.3. תשתיות

תשתית לשימוש במימן כדלק צריכה לספק פתרונות להפקת המימן, הכנתו לחלוקה (דחיסה או קירור), חלוקתו, אחסון במפעלים ובתחנות הדלק והתשתית לתדלוק הרכבים.

- עלויות ההובלה של מימן ירדו באופן דרמטי בעשור האחרון וב-2010 הוערכו בכ-\$2-\$3 לכל gge (gasoline gallon equivalent), כתלות באמצעי ההובלה - משאיות להובלת גז מימן דחוס - Tube trailers (השיטה היקרה ביותר), מכליות להובלת מימן נוזלי, או מערכת צינורות להובלת גז מימן דחוס בלחץ 400 psi בנקודת הטעינה (ו-300 psi בנקודת הפריקה) (U.S. DoE 2011). ההערכות חושבו עבור היקפים מסחריים גדולים. את עלויות כל אחת מהמערכות ניתן לחלק על פי מרכיביה:
1. Tube trailers – לפי מחיר מוערך של \$2.85 ל-gge, קירור \$0.25, אחסון בתחנה \$0.25, עלויות תחנה נוספות \$0.25, הטריילר עצמו \$0.5, טרמינל \$0.75 ודחיסת הגז בתחנה \$0.8 ל-gge.
  2. עלות הובלת מימן נוזלי במכליות – לפי מחיר מוערך של \$2.7 ל-gge, אחסון בתחנה \$0.2, עלות המשאית \$0.25, עלויות תחנה נוספות \$0.3, משאבות מיוחדות לטמפרטורות נמוכות בתחנה \$0.7 והטרמינל \$1.25 ל-gge.
  3. עלות הובלת מימן גזי בצנרת – לפי מחיר מוערך של \$2.2 ל-gge, דחיסת הגז בצינורות \$0.25, עלויות תחנה נוספות \$0.25, עלות הצינורות \$0.45, אחסון בתחנה \$0.5, דחיסה בתחנה \$0.9 ל-gge.

**בחישוב (לפי gge) נמצא כי העלויות הכוללות של הפקת המימן וחלוקתו הן עדיין הגבוהות ביותר מבין כל הדלקים הקונבנציונליים והאלטרנטיביים, ועדיין לא יכולות להתחרות בדלקים אחרים (1 gge שווה בערך לק"ג מימן).**

בתרשימים הבאים מוצגות השוואות המתייחסות לכמויות המופקות, לחומרי הגלם ולאופן החלוקה. בחישוב על בסיס gge (תרשים 18) ועל בסיס עלות למייל. כפי שניתן לראות, על בסיס עלות למייל מימן תחרותי ועלותו תחת תנאים מסוימים אפילו עדיפה על בנזין.

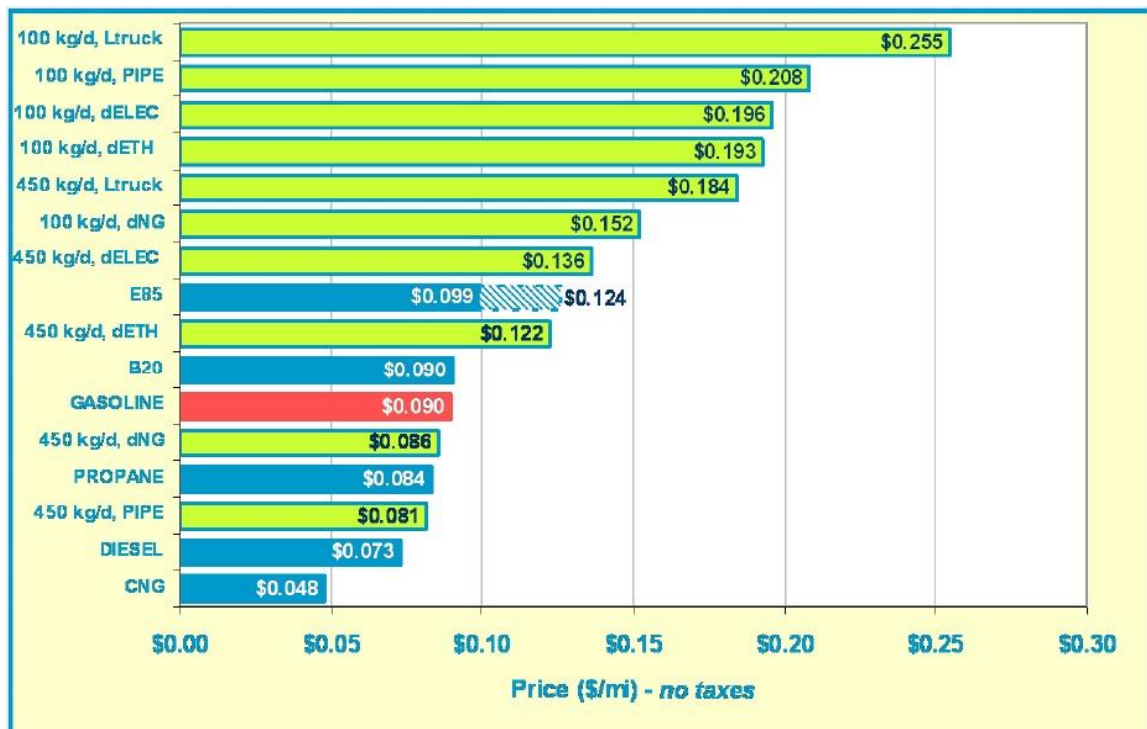
תרשים 18 - השוואת עלות ההפקה והחלוקה של מימן לדלקים אחרים, על בסיס עלות ל-gge



מקור: U.S. DoE (2011)

\*השטח המקווקו מייצג את הסובסידיות הפדרליות הניתנות לאתנול

תרשים 19 - השוואת עלות ההפקה והחלוקה של מימן לדלקים אחרים, על בסיס עלות למייל



מקור: U.S. DoE (2011)

\*השטח המקווקו מייצג את הסובסידיות הפדרליות הניתנות לאתנול

נכון להיום, מחיר המימן בתחנות הדלק עומד על כ-10\$ ל-gge. המחיר צפוי לרדת באופן משמעותי לכשתתחיל חדירת הרכבים לשוק ולהתייצב על כ-4\$ לאחר שיימכרו 5 מיליון רכבים. הירידה בעלות תלויה בהיקפי הפקת המימן, מבחינה טכנולוגית לא צפויה ירידה משמעותית במרכיבי המחיר. טבלה 17 מפרטת את העלות המשוערת של מרכיבי המחיר של מימן עד 2050.

טבלה 17 - מרכיבי המחיר של gge מימן

	2010	2020	2035	2050
Industrial natural gas, \$/million Btu	4.80	5.36	7.21	9.06
Delivered coal, \$/ton	45.9	46.1	48.9	50.2
Industrial electricity, \$/kWh	0.068	0.061	0.064	0.067
Delivered biomass, \$/ton	75.0	75.0	75.0	75.0
Coal needed, kg/gge H <sub>2</sub>	9.8	9.8	9.8	9.8
Biomass needed, kg/gge H <sub>2</sub>	12.8	12.8	12.8	12.8
Natural gas needed, cubic ft/gge H <sub>2</sub>	170	170	170	170
Electricity needed, kWh/gge H <sub>2</sub>	45	45	45	45

מקור: NAP (2013)

אמנם המימן המופק כיום מופק באופן מרוכז במפעלים גדולים, אך ישנה האפשרות שלפחות בשלב הראשון של הקמת התשתית המימן יופק במתקנים קטנים יותר, אפילו בתחנות הדלק, וכך ייחסכו עלויות השינוע. קיימות מספר טכנולוגיות בהן יהיה ניתן לעשות שימוש (NAP 2013):

- מתקן לזיקוק גז טבעי – תהליך זה לזה שקורה בבתי זיקוק גדולים, רק בסדר גודל קטן בהרבה, של מכשיר חשמלי גדול, וכבר נעשו ניסויים בארה"ב, אירופה ויפן. החיסרון של השיטה הוא ש-CO<sub>2</sub> נפלט לאוויר.
- מתקן אלקטרוליזה של מים – המכשירים כבר קיימים בשוק. פליטות הפד"ח תלויות במקור האנרגיה ממנו הופק החשמל.
- מתקן לזיקוק ביו-דלק - עדיין בשלבי מו"פ. הפליטות יהיו תלויות במקור הדלקים.

לאחר שחדירת רכבי FCV תגיע לרמה מסוימת, ישתלם יותר כלכלית להפיק את הגז באופן מרוכז במתקנים גדולים ע"י זיקוק גז טבעי, גזיפיקציה של פחם או ביומסה, או אלקטרוליזה מונעת אנרגיה מתחדשת.

טבלה 18 - עלות השקעה משוערת בתשתית, gge/day/\$

H <sub>2</sub> Production Method	Plant + CCS	Distribution	Stations	Total
Distributed natural gas reforming	700	0	2,345	3,045
Distributed electrolysis, current grid	860	0	2,345	3,205
Coal gasification without CCS	2,250	225	2,345	4,820
Coal gasification with CCS	3,020	225	2,345	5,590
Central natural gas reforming without CCS	400	225	2,345	2,970
Central natural gas reforming with CCS	740	225	2,345	3,310
Biomass gasification without CCS	1,040	225	2,345	3,610

מקור: NAP (2013)

## 6.4. מאפיינים סביבתיים

כשהמימן נמצא בשימוש במערכת תא דלק, הפליטות היחידות מכלי הרכב הן אדי מים. טווח הנסיעה על ק"ג מימן (כאמור, שווה ערך לגלון בנזין) הוא גבוה מאוד וכבר היום מגיע לכ-90 ק"מ, כלומר דרוש פחות מימן מבנזין על מנת לנסוע מרחק זהה. ליעילות המרשימה הזו תורמת גם שמירת האנרגיה בזמן ההאטה והבלימה, באמצעות מנגנון בלימה רגנרטיבית. כאשר הוא בשימוש לתדלוק מנוע ICE, הפליטות הן מים, מעט תחמוצות חנקן (NOx) ושאריות של כימיקלים מחומרי הסיכוד (כמובן שיש להתייחס לכל תהליך הפקת המימן).

ישנם מספר מסלולים אפשריים להפקת מימן:

1. **המטרה היא להפיק מימן זול** – הדגש הוא על הורדת מחירי המימן ואין התחשבות בפליטות גזי החממה. במקרה כזה, תמהיל חומרי הגלם ותהליכי הפקת המימן עשוי להיראות כך: 25% זיקוק גז טבעי באופן מבוזר, 25% זיקוק גז טבעי באופן מרוכז ללא מנגנון לכליאת הפחמן (CCS), 25% גזיפיקציה של פחם ללא CCS ו-25% גזיפיקציה של ביומסה ללא CCS.
2. **מקרה ביניים שבו המטרה היא הפקת מימן זול אך ללא ויתור על CCS** – כל שיטות הייצור שהוזכרו בסעיף הקודם, בתוספת מנגנונים לכליאת הפחמן.
3. **המטרה היא הפקת מימן נקי** – פחות התייחסות להשגת מחירים נמוכים. הפקת המימן במקרה כזה עשויה להיות מורכבת מ-10% זיקוק גז טבעי באופן מבוזר, 40% זיקוק גז טבעי באופן מרוכז עם CCS, 30% גזיפיקציה של ביומסה ללא CCS, ו-20% אלקטרוליזה ע"י חשמל ממקורות נקיים.

בטבלה הבאה מסוכמים עלויות ההפקה והפליטות בכל תרחיש. על מנת שנוכל להשוות את הפליטות לשל רכבים קונבנציונליים ואלטרנטיביים אחרים, לחישוב הפליטות לק"מ השתמשנו בצריכת הדלק של הונדה FCX Clarity, כ-60 מייל ל-gge מימן. בתרחיש המימן הזול אין למימן למעשה יתרון על רכבים קונבנציונליים, בשני התרחישים האחרים למימן יתרון משמעותי.

טבלה 19 - עלות הפקת המימן ופליטות CO<sub>2</sub>

תרחיש	gge/\$	Kg CO <sub>2</sub> eq/gge	grCO <sub>2</sub> /Km
מימן זול	3.85	12.2	127
מקרה ביניים	4.1	5.1	53
מימן נקי	4.8	2.6	27

מקור: NAP (2013)

## 6.5. היבטים בטיחותיים

קיימת דאגה ביחס לשאלה האם השימוש במימן הוא בטיחותי בהשוואה לשימוש בבנזין. ובכן, למימן מספר יתרונות על פני בנזין (טרטקובסקי ועמיתיו, 2001):

1. מאחר והוא קל יותר, במקרה של דליפה הוא מתנדף מהר יותר.
2. מימן דורש ריכוז גבוה מ-4% באוויר כדי ליצור תערובת דליקה, לעומת 1% בלבד עבור בנזין. יחד עם זאת, למימן גבולות הצתה הרחבים ביותר, דבר הגורם להגברת סיכון התלקחות של תערובות מימן עם אוויר.
3. מימן אינו רעיל, וכאמור במקרה של דליפה הוא מתאדה באופן מידי, זאת בניגוד לבנזין (וגם למתנול) שמצטבר על הקרקע וגורם לזיהום סביבתי כבד במקרה של דליפה.
4. מימן הרבה פחות רעיל בהשוואה לבנזין, ובעיקר בהשוואה למתנול – זו אחת הסיבות שמעדיפים לא להשתמש במתנול באופן כללי ובתאי דלק בפרט (ביחד עם הסיכון בזיהום).

חיסרון אחד בשימוש במימן הוא שאנרגיית ההצתה שלו נמוכה משל בנזין ויש לנקוט בצעדים מיוחדים למניעת ההצתה. בנוסף לכך, מימן הינו גז קל ביותר ולכן קיימת בעיית אחסונו ברכב. אחסון מימן דחוס ברכב נעשה בדרך כלל בגלילי גז בלחץ של כ-700 בר, דבר הגורם לתוספת משקל ברכב ובעיות בטיחות. אחסון מימן נוזלי במכלים קריוגניים חייב להתבצע בטמפרטורה של 235 מעלות צלסיוס עם בעיות קשות של הפסדי הגז ובעיות הבטיחות הנובעות מכך.

## 6.6. שיעורי חדירה בעולם

ב-2010 היו בארה"ב כ-400 רכבי FCV. ב-2012 הוצעו למכירה רק 2 דגמים, הונדה FCX Clarity ומרצדס F-Cell, את שתייהן ניתן לרכוש רק בקליפורניה. להונדה (דגם משפחתי) שהוצגה כבר ב-2007, תא דלק PEM בעל הספק 100 קילו-ואט וסוללת Lithium ion המספקת מתח של 288 וולט. לתדלוק מלא של ההונדה יש צורך ב-3.92 ק"ג מימן דחוס בכ-350 אטמוספרות (psi 5,000) וכל ק"ג מימן מאפשר לה לנסוע 96 ק"מ, מה שמעניק לה טווח של 380 ק"מ. המרצדס, שהוצגה רק ב-2011, גם היא בעלת תא דלק PEM בעל הספק 90 קילו-ואט, ויכולה לנסוע 385 ק"מ במהירות של עד 170 קמ"ש (Jain & Agrawai 2011). יש לציין שמיכל מימן ייעודי ללחצים גבוהים יותר (700 אטמוספרות) מגדיל את כמות המימן שניתן לאגור ומאריך את הטווח ב-70%. מחירה של ההונדה מוערך בלמעלה מ-100,000 דולר, אך בשלב זה היא אינה נמכרת, אלא מוצעת להחכרה בליסינג לחברות נבחרות, ב-600\$ בחודש. דגמים נוספים צפויים להיכנס לשווקים עד 2020. כיום יש בארה"ב כ-60 תחנות תדלוק במימן, רובן בקליפורניה, כולן בסדר גודל קטן. אלה מיועדות לשרת רכבי ניסוי והדגמה, בעיקר אוטובוסים. יפן הכריזה ב-2010 על כוונה להקים 1,000 תחנות תדלוק במימן ולהגיע ליעד של 2 מיליון רכבי FCV עד 2025. גרמניה מתכננת לבנות 150 תחנות תדלוק במימן עד סוף 2013, ו-1,000 עד 2017 (NAP, 2013).

## 6.7. חסמים

- מחיר הפקת המימן – השיטות הזולות הנוכחיות מתבססות על דלקים פוסיליים שבתהליך ייצורם נפלטים גזי חממה. שיטות ההפקה הנקיות יותר עדיין יקרות ולא תחרותיות (NAP 2013).
- מחיר הרכבים צפוי להמשיך ולהיות גבוה כל עוד מספרם יהיה נמוך.
- הקמת תשתית המימן צפויה להיות מורכבת ויקרה. רשת תדלוק היא חיונית על מנת לאפשר את חדירת רכבי ה-FCV לשווקים.
- היבטים בטיחותיים ותקינה מתאימה טרם נקבעו ביחס למימן.

## 6.8. היבטים רגולטורים - תקנות ותמריצים

- בארה"ב מיושמים תמריצים לעידוד פיתוח רשת החלוקה כמו גם לרכישת הרכבים, ברמה הפדרלית:
- זיכוי ממס לתחנות תדלוק מימן בשווי 30% מעלות ההקמה עד מקסימום של \$200,000.
  - זיכוי במס של עד \$4,000 לרכישת רכב נוסעים מונע תא דלק. ישנם תמריצים גם עבור רכישת רכבים גדולים יותר, אמנם אין כאלו בייצור כרגע.
  - ישנם תמריצים נוספים לעידוד השימוש בתאי דלק בשימושים אחרים – בסקטור הביתי ובסקטור החשמל.

כל עוד לא יהיו רכבי FCV בייצור סדרתי, לא יושקעו המשאבים הדרושים להקמת התשתיות החיוניות וקשה להאמין שרכבים אלו יחדרו לשווקים באופן נרחב עד 2050, אלא אם יהיו פריצות דרך משמעותיות. נראה שעד אז דווקא רכבי ה-HEV ו-PHEV יהפכו נפוצים ושכיחים (Tartakovsky et al. 2012).

## 6.9. ניתוח SWOT רכבי FCV

טבלה 20 - ניתוח SWOT רכבי FCV

יתרונות	חסרונות	הזדמנויות	אימים
<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ הפליטות ממפלט הרכב הן של מים בלבד</li> <li>▪ טווח הנסיעה דומה לשל רכבים קונבנציונליים</li> <li>▪ עלות המימן יכולה להיות נמוכה בהשוואה לבנזין</li> <li>▪ את המימן ניתן להפיק ממגוון גדול של מקורות ואין תלות בדלקים פוסיליים</li> <li>▪ ניתן לתדלק ב-10-5 דקות</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ כרגע יקרים מאוד</li> <li>▪ צפויים להתחיל לחדור לשווקים בסביבות 2020</li> <li>▪ אין כיום תשתית תדלוק במימן</li> <li>▪ מחירי המימן בתחנות הדלק תלויים בגובה הביקושים</li> <li>▪ בעיית אחסון המימן על הרכב</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ניתן לאגור את האנרגיה ממקורות מתחדשים ע"י אלקטרוליזה של מימן בשעות השפל</li> <li>▪ עשויים לפרוץ מהר יותר מהרכבים החשמליים</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ עיכובים בפיתוח הטכנולוגיה עשויים למנוע את הכניסה שלהם לשוק, לפחות עד 2050</li> <li>▪ תפיסת השוק ע"י המכוניות החשמליות</li> </ul>

## 7. סיכום

קבוצות הרכבים שנסקרו נבדלות זו מזו באופן הטענת האנרגיה החשמלית לרכב ובמידת ההיסמכות עליה (כשהמינימאלית היא ברכבים ההיברידיים והמקסימאלית ברכבים החשמליים ותאי הדלק). הבדל חשוב נוסף הוא אופן הטענת הסוללה ומאפייניה. הרכבים ההיברידיים מפיקים את האנרגיה החשמלית ממנוע הבעירה ולא נטענים חיצונית מרשת החשמל בעוד שרכבי הפלאג-אין משלבים בין השניים. הרכבים החשמליים ותאי הדלק לעומתם נסמכים רק על מערכת ההנעה החשמלית.

ככל שההנעה יותר חשמלית משתפרים ביצועי הרכב במונחי צריכת דלקים (או שווה ערך דלקים) כמו גם פליטת המזהמים לאוויר. יחד עם זאת מתגלעים חסרונות מהותיים אחרים, הגדלים ככל שהרכב נסמך יותר על הסוללה, כשהעיקריים בהם הם: מחיר יקר, טווח נסיעה קטן יחסית וזמן טעינה ארוך (נזכיר כי טווח הנסיעה של רכב חשמלי הינו כרבע מזה של רכב היברידי רגיל והזמן הנדרש להטענתו הוא בין 6 ל-12 שעות). יש מומחים הטוענים כי חסרונות אלו יכריעו את עתידן של המכוניות החשמליות לטובת ההיברידיות (ובטווח הרחוק גם לפלאג-אין), כי לא יהיה ניתן לשנות מהותית את העדפות הצרכנים בכל הקשור להיבטי נסיעה ותדלוק אלו, בעיקר לאור מחירן הגבוה של המכוניות ומיצוי הטכנולוגיה בהן. על פי נתוני ה-EPA, נראה שעד 2050 דווקא רכבי FCV יהיו בעלי ביצועים דומים לשל רכבים קונבנציונליים ובעלות דומה, אך חסמי מדיניות ותשתית יעכבו חדירה רחבה לשווקים.

הטבלה הבאה מסכמת את עיקרי הפרמטרים להשוואה בין הרכבים שנסקרו:

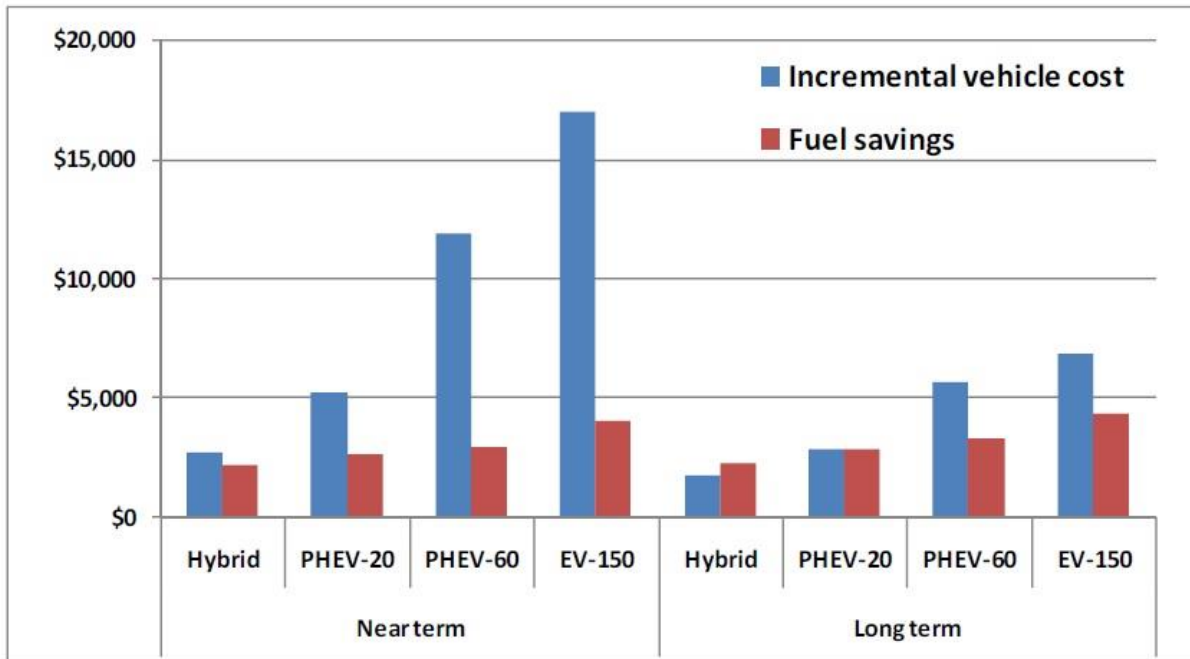
טבלה 21 - השוואה מסכמת

ישומות בעולם	פליטת CO <sub>2</sub> מהרכב	טעינה שעות	טווח נסיעה חשמלי (ק"מ)	טווח נסיעה כולל (ק"מ)	ק"מ לליטר בנזין (mpge*)	ק"מ לליטר דלק	יעילות מנוע	דלק	סוג רכב
מאות מיליונים	212			542	9.26	9.26	18%	בנזין	ICE
מאות מיליונים	159			710	14.3	14.3	24%	דיזל	
למעלה מ-10 מיליון	143			857	21	21	36%-40%	בנזין	HEV
עד מאה אלף	תלוי בתמהיל הדלקים לייצור חשמל			619		16	40%	בנזין	PHEV
עד מאה אלף		4	17-60		42		70%	מנוע חשמלי	
עד מאה אלף		12	150		46		70%	מנוע חשמלי	EV
מאות	0			380			70%-90%	מימן	FCV

מקור נתונים: <http://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&id=33324&id=33612&id=32655>

מהספרות עולה כי כל כלי הרכב שנידונו בעבודה צפויים להיות יקרים יותר בהשוואה לרכבים קונבנציונליים גם ב-2050, בעיקר רכבי FCV ורכבי הסוללות – HEV, PHEV ו-EV, כמוצג בתרשים הבא:

תרשים 20 - פרמיית העלות של רכבי סוללה והיסיכון בדלק בטווח הקרוב והרחוק\*



מקור: IEA (2011)

\*המספר בקטגוריות רכבי ה-PHEV וה-EV השונות מציין את הטווח החשמלי. החישוב העריך את החיסכון בעלויות הדלק לפי 160,000 ק"מ, והניח מחיר חבית נפט בטווח הקרוב של \$80 ובטווח הרחוק \$120.

על פי תחזיות ה-EPA, מחיר הרכבים צפוי להמשיך להוות מחסום לחדירתם של המכוניות ההיברידיות והחשמליות לשוק גם בטווח הארוך. האמור נכון לכלל המכוניות שנסקרו מלבד ההיברידיות, עבורן נצפית מגמה הפוכה של חיסכון נטו (החיסכון בדלק עולה על פרמיית מחיר הרכב). עוד עולה כי החיסכון הנובע משימוש מופחת בדלקים "ידביק" את הפער ויאפשר את חדירתן לשוק של מכוניות ה-PHEV-20 בטווח הארוך. עבור הרכבים שהיסמכותן על סוללות גבוהה (ה-PHEV-60 וה-EV) נותר פער בין הפרמיה למחיר הרכב והחיסכון בדלק הנובע ממנו, אם כי קטן משמעותית מזה של הטווח הקצר. יש הסוברים כי מחיר הסוללה ברכבי PHEV ימשיך להוות חסם שימנע מעבר אליהם מרכבי HEV שכן יתרון היעילות שיש כיום לרכבי PHEV והפוטנציאל שלהם להפחית פליטות יהיה פחות משמעותי ככל שישתפרו המנועים הקונבנציונליים ושילובם במערכות HEV. מחירי הסוללות לרכבי EV צפויים להיות נמוכים פי 5 ממחיריהם הנוכחיים עד 2050, אבל נראה שעל מנת לאפשר את חדירת הרכבים לשווקים יהיה צורך בסובסידיות ל-20 השנים הקרובות. גם לאחר שירדו המחירים, סוללה שתוכל לספק טווח זהה לשל רכב קונבנציונלי תהיה עדיין גדולה וכבדה מדי, ותדרוש זמן טעינה ארוך. מכאן נראה שרכבי EV יוכלו להוות פתרון לנסיעות קצרות עד בינוניות בלבד.

## 8. ביבליוגרפיה פרק רכבים

1. Aguirre, K., Eisenhardt, L., Lim, C., Nelson, B., Norring, A., Slowik, P. & Tu, N. (2012). Lifecycle analysis comparison of a battery electric vehicle and a conventional gasoline vehicle. Prepared for California Air Resources Board.
2. Ahman, M. (2001). Primary energy efficiency of alternative powertrains in vehicles. Energy, Vol. 26.
3. Al-Hasan, M. (2003). Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. Energy Conversion and Management, Vol. 44.
4. Alonso, E., Field, F., Roth, R., Kirchain, R., Sherman, A., Everson, M. & Wallington, T. (2011). Evaluating dynamic factors that affect rare earths scarcity.
5. Alvarez, R.A., Pacala, S.W., Winebrake, J.L., Chameides, W.L. & Hamburg, S.P. (2012). Greater focus on methane leakage from natural gas infrastructure. Proceedings of the National Academy of Science.
6. Anderson, L.G. (2012). Effects of biodiesel fuels use on vehicle emissions. Journal of Sustainable Energy & Environment, Vol. 3.
7. Angelo, C. (2012). Growth of ethanol fuel stalls in Brazil. Nature, Vol. 491, 646–647.
8. Argonne National Laboratory. (1999). A Fuel-cycle analysis of energy and emissions impacts of transportation fuels produced from natural gas.
9. Arteconi, A., Brandoni, C., Evangelista, D. & Polonora, F. (2010). Life-cycle greenhouse gas analysis of LNG as a heavy vehicle fuel in Europe. Applied Energy, Vol. 87.
10. Balat, M. (2008). Possible methods for hydrogen production. Energy Sources part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects, Vol. 31, Issue 1.
11. Bayindir, K.C., Gozukucuk, M.A. & Teke, A. (2011). A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. Energy Conversion and Management, Vol. 52.
12. BEST – Bio ethanol for sustainable transport – final report.
13. BEST – Bio ethanol for sustainable transport. (2010). Results and recommendations from the European BEST project.
14. Boston Consulting Group. (2010). Batteries for electric cars – challenges, opportunities and the outlook to 2020.
15. Chan, C.C. (2007). The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles. Proceedings of the IEEE, Vol. 95, No. 4.
16. CRS (Congressional Research Centre). (2013). Alternative fuel and advanced vehicle technology incentives: A summary of federal programs.

17. EIA. Annual energy outlook 2012
18. EPRI (2007a). Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles. Volume 1: Nationwide greenhouse gas emissions.
19. EPRI (2007b). Environmental assessment of plug-in hybrid electric vehicles. Volume 2: United States air quality analysis based on AEO-2006 assumptions for 2030.
20. EUCAR (European council for automotive R&D). (2007). Well-To-Wheel analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context: Well-To-Tank report. Version 2c.
21. Fargione, J.E., Plevin, R.J. & Hill, J.D. (2010) The ecological impact of biofuels. Annual Review of Ecology, Evolution and Systematic, 41:351-377.
22. Flor, A., Gutman, M., Zvirin, Y. & Tartakovsky L. (2003). Use of gas as alternative fuel for vehicles in Israel. Proceedings of the Israeli conference on mechanical engineering.
23. Future Transport Fuels. (2011). Report of the European expert group on future transport fuels.
24. Graham, L.A., Belisle, S.L. & Baas, C.L. (2008). Emission from light duty vehicles operating on low blend ethanol gasoline and E85. Atmospheric environment, Vol. 42.
25. Gutman, M., Tartakovsky, L. & Zvirin Y. (1998). Fuel effects on emissions. Chapter 16 in the Handbook Of Air Pollution From Internal Combustion Engines: Pollutant Formation And Control, edited by E. Sher, Academic Press, 548 – 651
26. IEA. (2012). Hybrid and electric vehicles.
27. IEA. (2011a). Technology roadmap: Biofuels for transport.
28. IEA-AMF. (2012). Life cycle analysis of transportation fuel pathways.
29. IEA. (2011b). Transport projections to 2050: Moving toward sustainability?
30. Jain, A. & Agrawai, S. (2011). An analysis of trends in vehicle technologies based on alternative fuels: battery electric vehicles and fuel cell electric vehicles.
31. Kapdan, I.K. & Kargi, F. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. Enzyme and microbial technology, Vol. 38.
32. Kothari, R., Buddhi, D. & Sawhney, R.L. (2008). Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. Renewable and sustainable energy reviews, Vol. 12, Issue 2.
33. Mehta, V. & Smith Cooper, J. (2003). Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing. Journal of power sources, Vol. 114, No. 1.
34. Mindl, P. & Cerovsky, Z. (2010). Trends in hybrid propulsion concepts. 14th International power electronics and motion control conference.

35. NAP. (2013). Transitions to Alternative Vehicles and Fuels.
36. NETL (National Energy Technology Laboratory). (2007). Modern grid benefits.
37. NHTSAH. (2011). Summary of fuel economy performance.
38. ORNL (Oak Ridge National Laboratory). (2013). 2012 Vehicle technologies market report.
39. Praj. (2012). Ethanol blending program in India – one step forward and two backwards.
40. RFA (Renewable Fuels Association). (2013). E15 retailer handbook.
41. Roberts, M.C. (2008). E85 and fuel efficiency: An empirical analysis of 2007 EPA test data. Energy Policy, Vol. 36, No. 3.
42. Shuguang, J., Cherry, C.R., Bechle, M.J., Wu, Y. & Marshal, J.D. (2012). Electric vehicles in China: emissions and health impacts. Environmental science and technology 46.
43. SMP (The sustainable Mobility Project). (2004). Mobility 2030: Meeting the challenges to sustainability.
44. Tartakovsky, L., Gutman, M. & Mosyak, A. (2012). Energy efficiency of road vehicles – trends and challenges. In: Energy efficiency. Editors: E.F. Santos Cavalcanti and M. Ribeiro Barbosa.
45. U.S. DoE. (2008). Clean Cities – Business case for installing E85 at retail stations.
46. U.S. DoE. (2011). Hydrogen and infrastructure costs. Hydrogen infrastructure market readiness workshop.
47. U.S. DoE. Plug-in electric vehicle handbook.
48. UK Department for Transport. (2013). Grant scheme for the installation of plug-in vehicle chargepoints on the UK government and wider public sector estate.
49. UK Department for Transport. Vehicle licensing statistics: 2011
50. UKERC (UK Energy Research Centre). (2013). Materials Availability: Potential constraints to the future low-carbon economy. Working Paper II: Batteries, Magnets and Materials.
51. Von Blottnitz, H. & Curran, M.A. (2007). A review of assessments conducted on bio-ethanol as a transportation fuel from a net energy, greenhouse gas, and environmental life cycle perspective. Journal of cleaner production, Vol. 15.
52. WLPGA (World LP Gas Association). (2012). Autogas incentive policies.

1. דו"ח הוועדה הבין משרדית למיסוי ירוק. משרדי האוצר, התחבורה, התשתיות והמשרד להגנת הסביבה, ינואר 2008

2. טרטקובסקי ל., זבירין י., דיין י., גוטמן מ., וקוטיק ד. הערכת ייתכנות השימוש בתאי דלק להנעת כלי רכב עם פליטה אפסית. יוני 2001

3. למ"ס. הודעה לעיתונות: 2.68 מיליון כלי רכב מנועיים בישראל בשנת 2011

אתרי אינטרנט:

1. [Automobile Propre](http://www.automobile-propre.com/dossiers/voitures-electriques/chiffres-vente-immatriculations-france/) at <http://www.automobile-propre.com/dossiers/voitures-electriques/chiffres-vente-immatriculations-france/>
2. [Bolloré](http://www.bolloré.com/en-us/activities/electricity-storage-and-solutions/electric-vehicles) at <http://www.bolloré.com/en-us/activities/electricity-storage-and-solutions/electric-vehicles>
3. [European Commission. EU launches clean fuel strategy.](http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/kallas/headlines/news/2013/01/clean-fuel-strategy_en.htm) At [http://ec.europa.eu/commission\\_2010-2014/kallas/headlines/news/2013/01/clean-fuel-strategy\\_en.htm](http://ec.europa.eu/commission_2010-2014/kallas/headlines/news/2013/01/clean-fuel-strategy_en.htm)
4. [HIS CERA. Natural gas vehicles poised to penetrate U.S. long haul trucking fleet.](http://press.ihs.com/press-release/energy-power/natural-gas-vehicles-poised-penetrate-us-long-haul-trucking-fleet-ihs-cer) At <http://press.ihs.com/press-release/energy-power/natural-gas-vehicles-poised-penetrate-us-long-haul-trucking-fleet-ihs-cer>
5. [MAN](http://www.bus.man.eu/global/en/city-buses/man-lions-city-hybrid/overview/Overview.html) at <http://www.bus.man.eu/global/en/city-buses/man-lions-city-hybrid/overview/Overview.html>
6. [Mckinsey & Company. Battery technology charges ahead.](http://www.mckinsey.com/insights/energy_resources_materials/battery_technology_charges_ahead) At [http://www.mckinsey.com/insights/energy\\_resources\\_materials/battery\\_technology\\_charges\\_ahead](http://www.mckinsey.com/insights/energy_resources_materials/battery_technology_charges_ahead)
7. [Marketwatch. More Than 1.4 Million Autogas Vehicles Will be Sold Annually Worldwide by 2020, Forecasts Pike Research.](http://www.marketwatch.com/story/more-than-14-million-autogas-vehicles-will-be-sold-annually-worldwide-by-2020-forecasts-pike-research-2013-02-20) At <http://www.marketwatch.com/story/more-than-14-million-autogas-vehicles-will-be-sold-annually-worldwide-by-2020-forecasts-pike-research-2013-02-20>
8. [National Geographic. The new truck stop: Filling up with natural gas for the long haul.](http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2013/03/130318-natural-gas-truck-stops/) Published 18/3/2013. At <http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2013/03/130318-natural-gas-truck-stops/>
9. [NIST \(National Institute of Standards and Technology\). Smart Grid: A Beginner's Guide.](http://www.nist.gov/smartgrid/beginnersguide.cfm) At <http://www.nist.gov/smartgrid/beginnersguide.cfm>
10. [NREL](http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/ultracapacitors.html) at <http://www.nrel.gov/vehiclesandfuels/energystorage/ultracapacitors.html>
11. [U.S DoE](http://www.afdc.energy.gov/data/tab/vehicles/data_set/10300) at [http://www.afdc.energy.gov/data/tab/vehicles/data\\_set/10300](http://www.afdc.energy.gov/data/tab/vehicles/data_set/10300)
12. [U.S DoE](http://www.afdc.energy.gov/laws/matrix/tech) at <http://www.afdc.energy.gov/laws/matrix/tech>
13. [U.S DoE](http://www.fueleconomy.gov/feg/findacar.shtml) at <http://www.fueleconomy.gov/feg/findacar.shtml>
14. [U.S. DoE](http://www.afdc.energy.gov/fuels/electricity_infrastructure.html) at [http://www.afdc.energy.gov/fuels/electricity\\_infrastructure.html](http://www.afdc.energy.gov/fuels/electricity_infrastructure.html)
15. [U.S. DoE](http://www.afdc.energy.gov/fuels/stations_counts.html) at [http://www.afdc.energy.gov/fuels/stations\\_counts.html](http://www.afdc.energy.gov/fuels/stations_counts.html)
16. [UN-Energy. Ethanol fuel in Brazil.](http://www.un-energy.org/stories/38-ethanol-fuel-in-brazil) At <http://www.un-energy.org/stories/38-ethanol-fuel-in-brazil>
17. [Sinautec](http://www.sinautecus.com/) at <http://www.sinautecus.com/>
18. [www.bloomberg.com. GM's Chevy Volt Outsold Nissan Leaf Last Year, BNEF Says.](http://www.bloomberg.com/news/2013-03-12/gm-s-chevy-volt-outsold-nissan-leaf-last-year-bnef-says.html) At <http://www.bloomberg.com/news/2013-03-12/gm-s-chevy-volt-outsold-nissan-leaf-last-year-bnef-says.html>
19. [www.greencarcongress.com](http://www.greencarcongress.com)
20. [www.thebioenergysite.com](http://www.thebioenergysite.com)
21. <http://www3.ttc.ca/> -אתר רשות התחבורה של טורונטו
22. [www.sfmta.com](http://www.sfmta.com) -אתר רשות התחבורה של סן פרנסיסקו

## 9. נספחים

### 9.1. נספח א' - גז טבעי נוזלי (LNG)

#### 9.1.1. רקע

בזכות מצב הצבירה הנוזלי של הגז הטבעי (או תחליפו), ריכוז האנרגיה בו גבוה פי 2.4 לעומת CNG (גלון LNG שווה 0.41 gge ו-0.6 מתכולת האנרגיה של דיזל), מה שמאפשר טווח נסיעה גבוה יותר, והשימוש העיקרי ב-LNG הוא לרכבים בינוניים עד כבדים. לשם השוואה, הטווח של משאית עם מיכל דלק בנפח ל-150 גלון (570 ליטר) שיכולה לנסוע 1450 ק"מ על דיזל, מתקצר לפחות ל-500 ק"מ על CNG, ועולה מעט ל-640 ק"מ על LNG. הנזלת הגז מקלה על שינועו לשווקים, שם הוא בד"כ מוחזר למצב צבירה גזי ולשימוש כ-CNG, אך ניתן להשתמש בו גם במצבו הנוזלי. העלויות הגבוהות של מתקני ההנזלה (והחזרה למצב גזי), והציוד לשמירתו בטמפרטורות נמוכות מאוד הם שמונעים את הפיכת השימוש בו לנרחב יותר.

#### 9.1.2. תשתיות

המרכיב המשמעותי ביותר בתשתית LNG הוא מתקן ההנזלה. הובלת הגז נעשית במכליות ייעודיות על מנת לשמור עליו בטמפרטורה נמוכה.

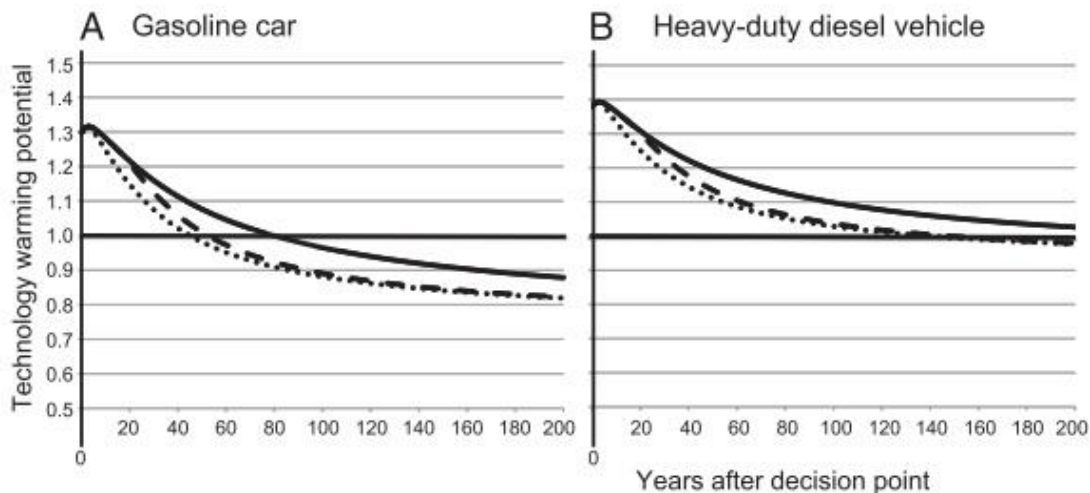
תחנות לתדלוק ב-LNG די דומות לתחנות דלק רגילות, כאשר הדלק מוזן למיכל הרכב בצורתו הנוזלית, בלחץ 120-75 PSI. מאחר והדלק קר מאוד יש צורך בכפפות מגן בעת התדלוק. חישוב של ה-EIA האמריקאי העריך את עלות ההקמה של תחנה לתדלוק ב-LNG בין 1 ל-4 מיליון דולר. עלות ציוד האחסון והאגירה לבד, ללא עלויות השטח והבנייה, מוערכות ב-\$350,000 עד מיליון דולר, זאת בהשוואה ל-\$150,000 בעבור תחנת תדלוק רגילה (NAP 2013). ישנה גם האפשרות למכליות תדלוק ניידות, מה שלא אפשרי עם CNG.

#### 9.1.3. מאפיינים סביבתיים

הגז חסר צבע וריח, אינו רעיל ואינו קורוסיבי, אולם הוא כן עשוי לגרום לחנק. הממשל האמריקאי מעריך שהשימוש בגז בכלי רכב יכול להפחית את פליטות גזי החממה בשיעור נמוך יחסית, של 6%-11% בהשוואה לבנזין. מעבדות Argonne האמריקאיות העריכו של-LNG יתרון בעניין זה על CNG, והינו בעל פוטנציאל להפחתת פליטות גזי חממה של 15%-11% בהשוואה לרכב בנזין בטווח הקרוב, ובעתיד שיעור זה עשוי לעבור את ה-20% (Argonne 1999), אך חשוב לציין שהבחינה הייתה עבור רכבי נוסעים ולא עבור משאיות. דליפות מתאן בתהליכי הפקת ועיבוד הגז, כמו גם בתשתית התדלוק, מהווים מקור לדאגה מאחר והמתאן הינו גז חממה אפקטיבי פי 25 מ-CO<sub>2</sub> (National Geographic, 2013). ה-EPA העריך שבשנת 2009 2.4% מהגז הטבעי בארה"ב דלף. מחקר בנושא (Alvarez et al., 2012) העריך שהשימוש בגז טבעי לתחבורה עשוי בטווח הקצר להחמיר את תרומת כלי הרכב להתחממות הגלובלית, ואת התועלת

נתחיל לראות רק 20 שנה לאחר הסבת רכבי בנזין, ורק 80 שנה לאחר הסבת משאיות דיזל (ראה תרשים 21 להלן).

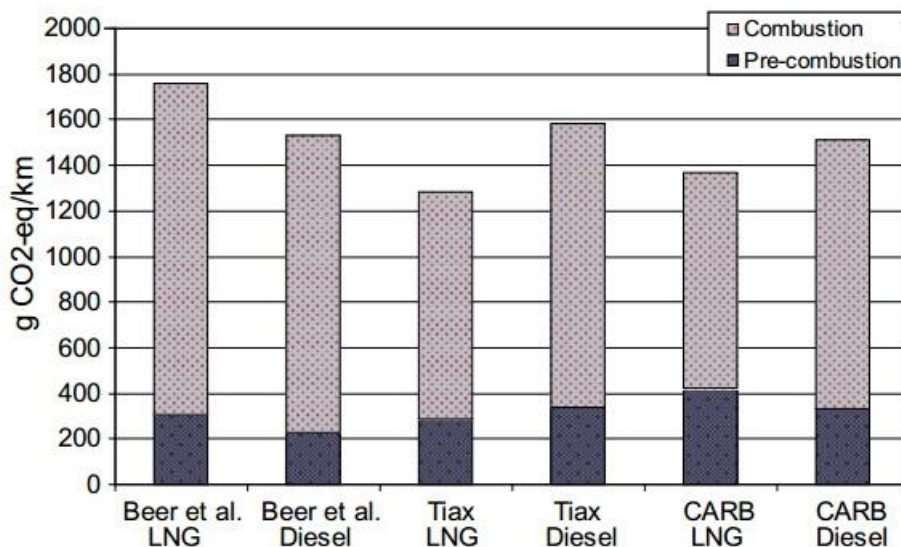
**תרשים 21 - האפקט המחמם של דליפות מתאן מכלי רכב בטווח הקצר**



מקור: Alvarez et al. (2012)

על פי מחקר שהשווה בין הפליטות לאורך מחזור החיים של LNG ושל דיזל (Arteconi et al. 2010) במשאיות כבדות, בשלב הנסיעה ל-LNG יתרון משמעותי והוא פולט 1.4 ק"ג CO<sub>2</sub>eq לק"מ לעומת 1.635 בדיזל. החישוב הכולל של פליטות ה-CO<sub>2</sub> לאורך מחזור החיים העריך 1.664 ק"ג לק"מ עם LNG, לעומת 1.856 עם דיזל (ראה תרשים 22). לעומת זאת, אותו מחקר מצא שפליטת תחמוצות החנקן של LNG גבוהה בשיעור משמעותי משל דיזל, 0.02 לעומת 0.014 גרם לק"מ. שימוש ב-LNG ברכבי נוסעים יכול להפחית פליטות VOC בשיעור 50%-60% ואת פליטות ה-CO בשיעור שבין 20%-ל-40% (Argonne 1999).

**תרשים 22 - ניתוח LCA של פליטות CO<sub>2</sub> של LNG ודיזל לפי מחקרים שונים**



מקור: Arteconi et al. (2010)

#### 9.1.4. חדירה לשווקים

ב-2010 היו בארה"ב 3,354 (U.S. DoE) כלי רכב ו-53 תחנות לתדלוק LNG (ב-2012, לעומת למעלה מ-1000 תחנות לתדלוק CNG), יותר ממחציתן פרטיות וללא גישה לכלי רכב פרטיים ו-70% מהן בקליפורניה (EIA 2012). תחנות התדלוק ב-LNG בארה"ב מהוות בערך מחצית מסך כל התחנות בעולם (במדינות ה-EU היו בתחילת 2013 38 תחנות LNG). היתרון היחסי של LNG על CNG הוא טווח הנסיעה הגדול יותר, ומחירו נמוך ב-30% מדיזל. בתחילת 2013, כשמחיר גאלון דיזל בארה"ב היה \$4.16, עלה גלון LNG \$2.92, וה-EIA צופה שמחירי ה-LNG יהיו נמוכים בכ-40% ממחירי הדיזל ב-30 השנים הבאות.

תשתיות התדלוק צפויות לגדול בשיעור משמעותי בטווח הקרוב. חברת Shell הודיעה על כוונתה להקים תשתית לתדלוק משאיות ב-LNG לאורך 900 מייל במערב קנדה, וב-100 תחנות בארה"ב, החל מ-2013. חברת Clean Energy מתכוונת להקים רשת LNG במרווחים של 250 מייל לאורך צירי המשאיות הראשיים (National Geographic 2013). ההערכות בארה"ב הן שעד 2016, צי הרכבים מונעי הגז הטבעי (CNG ו-LNG ביחד) יגדל בקצב של 8% בשנה, וקצב הגידול של תחנות התדלוק יהיה בערך 5% (NAP 2013).

#### 9.1.5. תחבורה ציבורית

תדלוק אוטובוסים ב-LNG הוא עניין חדש יחסית ועדיין קורה בסדר גודל מצומצם בעולם. ב-2011 היו בארה"ב כ-1600 אוטובוסים, בשרות חברות תחבורה ציבורית ובתי ספר (NREL 2011).

#### 9.1.6. משאיות

השימוש הנפוץ ביותר כרגע ב-LNG הוא במשאיות זבל ובסמי-טריילרים, 1,100 ו-850 בהתאמה, היו בארה"ב ב-2011 (NREL 2011).

#### 9.1.7. חסמים

- תשתיות ההנזלה יקרות מאוד
- השמירה על הגז במצב נוזלי מצריכה השקעה גדולה של אנרגיה ומורכבות טכנית
- תשתית התדלוק עדיין מצומצמת, רק כ-50 תחנות LNG בארה"ב וכ-40 במדינות ה-EU.
- עלות משאית המונעת ב-LNG גבוהה ב-\$40,000-\$75,000 מעלות משאית מונעת דיזל, וחישוב שערכה חברת IHS (IHS CERA, 2012) מצא שבהנחה שכל משאית נוסעת לפחות 120,000 מייל בשנה, בזכות ההפרש במחירי הדלק ניתן יהיה להחזיר את ההשקעה בה בתוך כשלוש שנים, ללא צורך בתמריצים ממשלתיים. חישובי ה-EIA מפורטים יותר ומעריכים את העלות השולית של משאית LNG לעומת דיזל עפ"י גודל המשאית כדלקמן (EIA 2012):

1. משאית במשקל 3.5-7 טון : \$9,750-\$36,000

2. משאית במשקל 7-13 טון : \$34,150-\$69,250

3. משאית במשקל מעל 13 טון : \$49,000-\$86,125

- טווח הנסיעה עם LNG נמוך מטווח הנסיעה עם דיזל. על מנת לאפשר טווח נסיעה זהה יש להגדיל את נפח מיכל הדלק. עלות מיכל הגז של המשאית היא משמעותית, ונעה סביב \$475 לגלון, כשהמשמעות למשאיות מעל 7 טון היא 14-52 אלף דולר. טכנולוגיית האחסון של הגז נחשבת די בשלה ולא צפויה ירידה משמעותית בעתיד. מלבד המחיר יש משמעות גם למשקל הכבד של מכלי הדלק.

### 9.1.8 תמריצים ורגולציה

- הוועדה האירופאית ניסחה טיוטה להצעת חוק שתחייב הקמת תחנת LNG בכל 400 ק"מ לאורך רשת הכבישים המרכזית באירופה, עד שנת 2020 (European Commission, 2013).
- בארה"ב, עד סוף 2013 ניתן לקבל זיכוי במס של 30% ועד לגובה \$30,000 על ציוד לתדלוק בגז טבעי (CNG או LNG). בנוסף ציי רכב זכאים להחזר מס בגובה 50 סנט לכל גלון דלק אלטרנטיבי, בכלל זה גז טבעי.

### 9.1.9 סיכום מאפייני LNG

טבלה 22 - סיכום מאפייני LNG (משאית בעלת מיכל דלק בנפח 570 ליטר, השוואה לדיזל ול-CNG)

דלק	ק"מ לליטר דלק	מחיר ליטר דלק (ארה"ב 1.2013)	עלות ק"מ	טווח נסיעה (ק"מ)	פליטות CO <sub>2</sub> (מהמפלט, g/km)	מחיר בארה"ב	כלי רכב (כולל שנימכרו LDV בארה"ב)
דיזל	2.54	\$1.02	\$0.40	1,450	1.635	מחיר הייחוס	עשרות מיליונים
CNG	0.88	\$0.55	\$0.63	500	1.3	\$80,000-\$40,000 יותר מדזל	100-200 אלף
LNG	1.12	\$0.77	\$0.68	640	1.4	\$75,000-\$40,000 יותר מדזל	אלפים בודדים

### 9.1.9.1 ניתוח SWOT רכבי LNG

טבלה 23 - ניתוח SWOT רכבי LNG

יתרונות	חסרונות	הזדמנויות	אימים
<ul style="list-style-type: none"> <li>התכולה האנרגטית גבוהה משל CNG ומאפשרת טווח נסיעה גדול יותר</li> <li>אין צורך להפוך את ה-LNG שהובל במיכליות בחזרה למצב צבירה גזי פליטת חלקיקים נמוכה מאוד</li> <li>מספר אוקטן גבוה</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>דרושה השקעה גדולה של הון ואנרגיה בקירור הגז ואגירתו</li> <li>מחיר המשאיות גבוה באופן משמעותי ממשאיות דיזל</li> <li>התשתיות עדיין מצומצמות או לא קיימות</li> <li>דליפות מתאן עשויות לתרום לאפקט החממה הרבה יותר מ-CO<sub>2</sub></li> <li>פליטות NO<sub>x</sub> ברמה גבוהה יותר מדזל</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>אפשרות לנצל את משאבי הגז הטבעי של ישראל לצרכי תחבורה (ביחד עם CNG)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ביודיזל עשוי להיות פתרון קל וזול יותר ליישום תאונות בטיחותיות עלולות לפגוע במוניטין של הטכנולוגיה</li> </ul>

## 9.2. נספח ב' - גז פחמימני מעובה (גפ"מ)

### 9.2.1. רקע

גפ"מ, שמכונה במקומות שונים גם בשמות LPG, autogas, ופרופאן, הוא תערובת נוזלית של בוטאן ופרופאן הדחוסה בלחץ נמוך יחסית (כ-10 אטמוספרות). הגפ"מ הינו תוצר לוואי של עיבוד גז טבעי וזיקוק נפט (40%-60% מהתפוקה העולמית, בהתאמה), וכיום ניתן להפיקו גם מביומסה, כתוצר לוואי של זיקוק ביו-דלקים. במקור הגז הינו חסר צבע וריח, לכן לפני השיווק מוסיפים לו ריח שיהיה ניתן לזיהוי במקרה של דליפה. מאחר ורוב הרכבים הנוסעים על גפ"מ הוסבו על בסיס רכבי בנזין קונבנציונליים, הם יכולים לפעול במצב משולב (dual mode) בו המנוע פועל על בנזין וגפ"מ בו-זמנית, וכאשר נגמר הגז ניתן לעבור לשימוש בבנזין בלבד (ע"י מתג בורר בתא הנוסעים). יתרונה של מערכת כזו הוא שהיא מאריכה את טווח הנסיעה של הרכב, ומאפשרת לנהג גמישות בהתאם לזמינות תחנות התדלוק או השינויים במחירי הדלקים. בתהליך ההסבה מותקנים מיכל גז (בד"כ בתא המטען) ומערכת דלק מקבילה למערכת הבנזין, ונעשות התאמות במנוע.

בזכות מספר אוקטן גבוה יותר, השימוש בגפ"מ מפחית מן הבלאי של המנוע ומוזיל את עלויות התחזוקה שלו (WLPGA 2012). מספר האוקטן הגבוה משפר את היעילות האנרגטית של המנוע ומפחית פליטות. מאחר וצפיפות האנרגיה של גפ"מ נמוכה משל בנזין, צריכת הדלק של רכב גפ"מ (בליטרים) גבוהה בכ-20% בהשוואה לרכב מונע בנזין (Flor et al., 2003), מה שמצריך מיכל דלק גדול יותר על מנת לנסוע טווח זהה. ישנה גם האפשרות הפחות נפוצה של רכב bi-fuel, שבו המנוע מוזן בבנזין או בגז, בהתאם להגדרות מערכת הבקרה של הרכב (ניתן להגדיר שישתמש קודם בגז מאחר והוא זול יותר) או עפ"י בחירת הנהג. מיכל הגז הנוסף מוסיף מעט משקל לרכב ועשוי לתפוס מקום משמעותי בתא המטען.

בעקבות העלייה בביקושים בעולם, בשנים האחרונות יצרני המכוניות העלו את מספר הרכבים שיועדו במקור לגפ"מ והם יעילים ונקיים יותר בהשוואה לרכבי בנזין מוסבים (Flor et al., 2003). מחיר רכבי גפ"מ (שניתן לתדלק גם בבנזין) גבוה בעד 2,000 יורו בהשוואה לרכב רגיל, ונמוכה יותר בשווקים בהם כבר יש חדירה משמעותית (future transport fuels 2011). עלות ההסבה של רכב בנזין לרכב מונע גפ"מ בישראל היא כ-10,000 ש"ח (כיום אין בארץ ייבוא סדיר של רכבים דואליים ייעודיים), ועלות ליטר גפ"מ בתחנת הדלק היא כ-60%-50% מעלות ליטר בנזין, בזכות שיעור מס בלו נמוך מאוד.

### 9.2.2. תשתיות

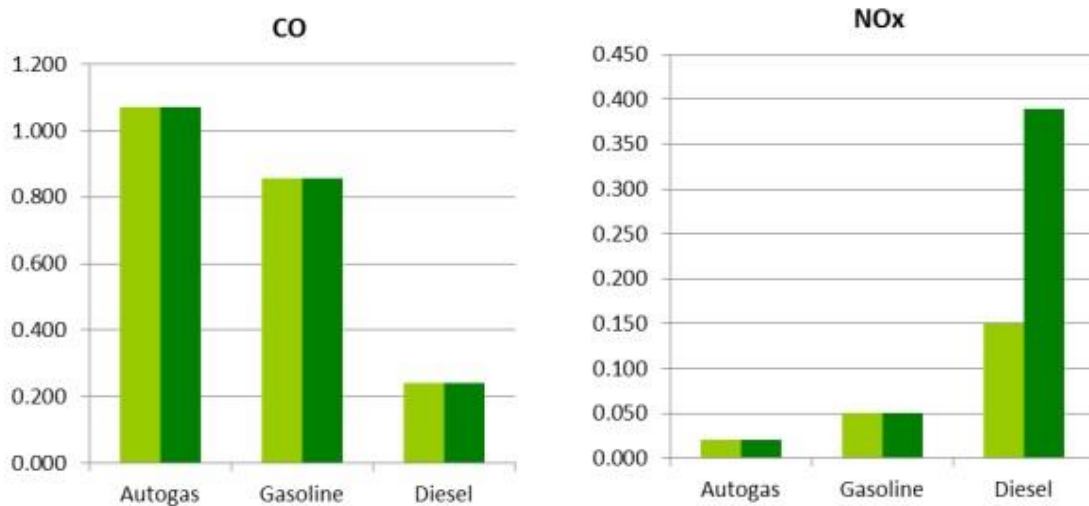
התשתית הנדרשת לגפ"מ דומה לתשתית הנדרשת לבנזין או לדיזל, אך כל מרכיב מותאם ספציפית לגפ"מ. ישנן מכליות ייעודיות להובלת גפ"מ וכך גם מיכל האגירה, אשר ניתן לקבוע מתחת או מעל לאדמה (בישראל נהוג לקבור את מכלי הגז בדומה למכלי דלק קונבנציונליים). הן במכלית והן במכל האגירה הגז נשמר בלחץ על מנת לשמור עליו במצב צבירה נוזלי. כמו כן ישנם משאבות ואקדחי תדלוק ייעודיים שנועדו לשמור על הלחץ גם בעת התדלוק למיכל הרכב. עלות הקמת תחנת התדלוק נעה בין 400,000 ל-500,000 ש"ח (הערכות של חברת דור אלון גז). עלויות התחזוקה משתנות בהתאם לנפח הנמכר בתחנות,

וכיום יש בישראל כ-65 תחנות דלק שמוכרות גפ"מ.

### 9.2.3. מאפיינים סביבתיים

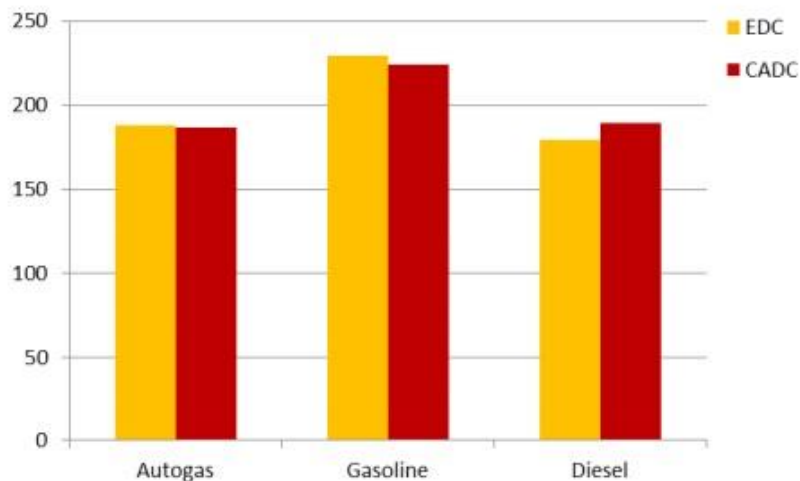
בניתוח LCA, רכבי גפ"מ פולטים 14% פחות CO<sub>2</sub> בהשוואה לרכבי בנזין, ו-10% פחות בהשוואה לרכבי דיזל (Future transport fuels 2011). פליטות תחמוצות החנקן נמוכות יותר משל רכבי בנזין, ונמוכות בהרבה משל רכבי דיזל, ורמה הפליטה של חלקיקים נשימים היא זניחה. פליטות החומרים המסרטנים אצלטדהיד, פורמלדהיד ובנון גם הן נמוכות יותר בהשוואה לרכב מונע בנזין. יתכן וככל שיוחמרו הקריטריונים לפליטות של רכבים קונבנציונליים בעתיד, יתרונותיו של הגפ"מ יצטמצמו.

#### תרשים 23 - פליטות מזהמים של רכבי גפ"מ (Autogas) בהשוואה לבנזין ולדיזל



מקור: WLPGA (2012)

#### תרשים 24 - פליטות CO<sub>2</sub> של רכבי גפ"מ על בסיס WTW בהשוואה לבנזין ולדיזל



Note: EDC = European driving cycle; CADC = Artemis cycle, which simulates actual driving conditions.

מקור: WLPGA (2012)

#### 9.2.4. חדירה לשווקים

ב-2010 השווקים הגדולים ביותר של רכבי הגפ"מ היו טורקיה, עם 2.4 מיליון רכבים (כ-18% מרכבי הנוסעים), דרום קוריאה (כ-12% מרכבי הנוסעים) ופולין עם 2.3 מיליון (כ-14% מרכבי הנוסעים), איטליה עם 1.7 מיליון ורוסיה עם 1.3 מיליון רכבי גפ"מ. ב-2011 גפ"מ היה הדלק האלטרנטיבי בשימוש נרחב ביותר באירופה, וסיפק כ-3% מתמהיל הדלקים לתחבורה לכ-5 מיליון רכבים. באותה שנה היו באירופה כ-27,000 תחנות לתדלוק בגפ"מ. בעקבות העלייה בהפקת הגז הטבעי בעולם, ההיצע צפוי לגדול באופן משמעותי, וחלקו של הגפ"מ בתמהיל הדלקים האירופאי עשוי להגיע ל-10% ב-2020 (future transport fuels, 2011). השימוש בגפ"מ לכלי רכב שכיח באופן יחסי גם באוסטרליה, מקסיקו, הודו ויפן, ומחקר של Marketwatch (2013) העריך שעד 2020 יימכרו בעולם כ-1.4 מיליון רכבי גפ"מ בשנה.

בישראל היו ב-2011 כ-10,000 כלי רכב מונעי גפ"מ, רובם רכבי נוסעים והשאר מסחריים, וישנה מגמת עלייה יציבה מהשנתיים הקודמות (למ"ס, 2012).

#### 9.2.5. תחבורה ציבורית

מחירו של אוטובוס מונע גפ"מ גבוה ב-\$25,000-\$50,000 בהשוואה לאוטובוס דומה מונע דיזל (SMP, 2004). בקופנהגן, החל מ-1996 החלו לשלב אוטובוסים מונעי גפ"מ בצי העירוני, וב-2007 הם היוו כרבע מתוך 575 האוטובוסים בעיר. בשנים האחרונות הוצאו האוטובוסים האלה מהשרות והוחלפו באוטובוסים שעמדו בתקנים סביבתיים מחמירים יותר. בעיר Suceava ברומניה יש 30 אוטובוסים מונעי גפ"מ. בעיר Ploiesti הוסבו 25 אוטובוסים מונעי דיזל לגפ"מ בשנים 2005-2009; רמות זיהום האוויר ירדו, אך מהבחינה הכלכלית החיסכון היה שולי, מאחר וצריכת הדלק של הגפ"מ הייתה כמעט כפולה ביחס לדיזל.

ב-2001 הוצע לנהגי המוניות בהונג קונג מענק חד-פעמי כדי שיחליפו את מוניות הדיזל במוניות גפ"מ. המהלך היה מוצלח והחל מ-2003 כל המוניות העיר מונעות ע"י גפ"מ. בארה"ב היו ב-2011 כ-1,500 אוטובוסים מונעי גפ"מ, רובם בשרות בתי ספר (NREL 2011).

#### 9.2.6. משאיות

משאיות מונעות גפ"מ נפוצות היום בשווקים הגדולים – טורקיה, דרום קוריאה, פולין ורוסיה. פורד מציעה כיום 10 דגמים מונעי גפ"מ בארה"ב, וחברות נוספות בשוק הן קרייזלר וג'נרל מוטורס. על ההתאמות במנוע, מערכת הדלק ומיכל הגפ"מ מוסיפים הלקוחות כ-\$10,000. משאיות שנוסעות 160,000 ק"מ בשנה ומעלה מחזירות את ההשקעה בתוך שנתיים, ונראה שהמכירות בשנים האחרונות עולות בשיעור משמעותי, גם אם הן עדיין בסדר גודל קטן יחסית. בארה"ב היו ב-2011 כ-1,500 משאיות ללא נגרר ומעט מאוד סמי-טריילרים (NREL 2011).

#### 9.2.7. חסמים

לכאורה, הסבת רכב קונבנציונלי לתדלוק בגפ"מ אינה יקרה מדי, אך יש לזכור כי התכולה האנרגטית של הגפ"מ וצפיפותו נמוכות בהרבה מאלה של בנזין. למרות זאת, ניתן לשער כי כל עוד לא יוגדל שיעור הבלו

על הגפ"מ, ההשקעה מחזירה את עצמה תוך זמן יחסית קצר (תלוי בכמות השימוש ברכב). אם כך, מה שמונע את השימוש הנרחב בגפ"מ הוא רשת תחנות הדלק המצומצמת. נכון לנובמבר 2012 פעלו בישראל כ-65 תחנות לתדלוק בגפ"מ, מתוך כ-1,000 תחנות דלק בסה"כ.

ישנו סיכון בטיחותי בשימוש בגז דחוס, במקרה של תאונה שבה ייפגע מיכל הדלק. סיכון בטיחותי נוסף נובע מהעובדה שהגפ"מ כבד מהאוויר ובמקרה של דליפה יצטבר על הקרקע, אך זהו סיכון שדומה במהותו לשימוש בבנזין. בישראל אסור לרכב מונע גז, ובכלל זה גפ"מ, לחנות ברוב החניונים הסגורים, מחשש שבמקרה של דליפה יצטבר גז בחניון ויהווה מפגע בטיחותי. לעומת זאת, באיטליה וביפן אין הגבלה כזאת, ובצרפת ובגרמניה ההנחיות משתנות ממקום למקום. לגז טבעי יש יתרון על גפ"מ מבחינה זו, כי מתאן קל מהאוויר ובמקרה של דליפה מתנדף ואינו מצטבר.

חשוב לזכור שגפ"מ אינו מקור אנרגיה נוסף. דלק זה מיוצר מנפט גולמי, כמו בנזין, סולר ודלקים קונבנציונליים אחרים.

### 9.2.8. רגולציה

ב-1999 הוכנה תמ"א 32, תכנית מתאר ארצית למשק הגפ"מ, שהוכנה במטרה לייעד שטחים עבור התשתיות הדרושות ולקבוע הוראות בטיחות ותכנון לנושא. תקנים נקבעו לאיכות הדלק (ת"י 5202) ולתחנות התדלוק בגפ"מ (5512). "ת"י 5202 דלק לרכב מנועי-גפ"מ (דרישות ושיטות בדיקה)" דורש את אישור יצרן הרכב להתאמתו לתדלוק בגפ"מ, קובע שתחנות התדלוק חייבות למכור גפ"מ באוקטן גבוה ואיכותי, לכן הגפ"מ הנמכר בישראל לכלי רכב מיובא ברובו. עוד יש לדאוג לסימון "גפ"מ" בחלק הקדמי של הרכב, במקום בולט לעין, ויש לסמן את פיית התדלוק ב"גפ"מ בלבד".

כלי רכב שאינם מותרים להפעלה בגפ"מ (משרד התחבורה):

- אוטובוסים (רק לאחר אישור משטרת ישראל)
- כלי רכב המובילים חומרים ומטענים מסוכנים שדרגת הרעילות והיציבות שלהם היא 4 לפי סיווג התקן האמריקאי לבטיחות באש NFPA704.
- כלי רכב להובלת חומרי נפץ, גזים, חומר מתלקח מוצק, חומרים מתחמצנים וחומרים רדיואקטיביים.
- כלי רכב המובילים חומרים המסומנים ומוגדרים בעלי "סיכונים מיוחדים".

### 9.2.9. תמריצים

#### 9.2.9.1. בישראל

- שיעור מס הבלו הנמוך – 12 אגורות לליטר גפ"מ בהשוואה ל-3 ש"ח על ליטר בנזין, שומר על מחיר הגפ"מ נמוך מאוד בהשוואה למחיר הבנזין ומהווה תמריץ לשימוש בו. מס הרכישה על גפ"מ הוא נמוך מאוד או מבוטל לחלוטין ברוב העולם.

#### 9.2.9.2. בעולם

- במספר ערים בסין, על מנת להפחית את זיהום האוויר, הוסבו כל המוניות וחלקים משמעותיים ממערך האוטובוסים לשימוש בגפ"מ. בין הערים שנגחאי, הונג קונג וגואנגז'ו. בצרפת, בצעד פחות

דרסטי, מאז 1999 מחויבים ציי רכב שלפחות 20% מהרכבים הוותיקים מעל 3.5 טון יוחלפו ברכבי גפ"מ או CNG.

- עוד בצרפת, בשנים 2010-2012 ניתן זיכוי ממס בגובה 2,000 יורו לרכישת רכב גפ"מ מהיצרן בעל פליטות נמוכות מ-136 גרם CO<sub>2</sub> לק"מ, או להסבת רכב בנזין בעל פליטות נמוכות מ-155 גרם CO<sub>2</sub> לק"מ. ההטבה בוטלה לבסוף מסיבות תקציביות. רכב גפ"מ עדיין זכאי בצרפת להחזר בגובה 300-5,000 יורו במסגרת ההטבה לרכבים שפולטים פחות מ-105 גרם CO<sub>2</sub> לק"מ. ברישום רכב מונע גפ"מ ניתן לקבל הנחה בשיעור 50%-100% מגובה האגרה (WLPGA 2012). בחלק מהערים, כולל בפריז, רכבי גפ"מ של ציי רכב זכאים לתעריף חנייה מוזל.
- באיטליה, בה הוכפל צי רכבי הגפ"מ בשנים האחרונות והוא כיום מהגדולים בעולם, עד 2009 היה ניתן לקבל מענק ממשלי בגובה 1,500-3,500 יורו לרכישת רכב גפ"מ ייעודי, ו-350-500 יורו להסבת רכב בנזין (גובה המענק תלוי ברמת פליטות ה-CO<sub>2</sub> של הרכב). בנוסף, מענק בגובה 4,000 יורו ניתן עבור רכישת רכבים מסחריים כבדים, שהותנה בגריטת רכב ישן. המענקים, שהופסקו מסיבות תקציביות, חודשו ב-2011. במספר ערים מוסבים בהדרגה ציי התחבורה הציבורית.
- ביפן, בשנים 2003-2012 הממשלה העניקה החזרים על עלות ההחלפה או ההמרה של רכב מונע דיזל ברכב גפ"מ, בגובה 50% מההפרש בין עלות רכב דיזל לרכב גפ"מ עד \$2,500 לרכב נוסעים ועד \$3,125 למשאית או אוטובוס. בנוסף, הממשלה היפנית עודדה הקמת תחנות תדלוק באמצעות מימון 50% מעלות ההקמה והתפעול שלהן, עד לגובה \$390,000 עבור ההקמה ו-\$26,000 לשנה עבור התפעול.
- בדרום קוריאה, אחד השווקים הגדולים בעולם לרכבי גפ"מ, ב-2009 הממשלה הובילה תכנית להחלפת 30,000 משאיות מונעות דיזל במשאיות גפ"מ.
- בהולנד, מס הרכישה על רכבי גפ"מ נמוך מעל רכבי דיזל, אבל זהה למס המוטל על רכבי בנזין.

### 9.2.10. סיכום מאפייני גפ"מ

טבלה 24 - סיכום מאפייני גפ"מ (הערכה, השוואה לפולקסווגן גולף 2.0)

מספר יחידות שנמכרו	מחיר הסבת רכב רגיל לגפ"מ	פליטות CO <sub>2</sub> לק"מ (גרם לק"מ)	טוח נסיעה (ק"מ)	עלות ק"מ (ליטר גפ"מ = 3.89 ₪)	ק"מ לליטר (דלק 20% פחות מבנזין)	יעילות המנוע
בעולם יש בערך 17 מיליון, בארץ כ-10,000	8,000 ₪ - 10,000 ₪	140	370	0.53 ₪	7.36	20%









### 9.2.11. ניתוח SWOT רכבי גפ"מ

טבלה 25 - ניתוח SWOT רכבי גפ"מ

יתרונות	חסרונות	הזדמנויות	איומים
<ul style="list-style-type: none"> <li>יש פריסה של תחנות תדלוק בארץ</li> <li>יש שווקים מפותחים בעולם</li> <li>עלות הסבת רכב קונבנציונלי נמוכה</li> <li>עלות דלק נמוכה משמעותית מבנזין</li> <li>פליטות CO<sub>2</sub> נמוכות בהשוואה לבנזין ודיזל</li> <li>פליטות NO<sub>x</sub> נמוכות מאוד</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>הגבלות על חנייה</li> <li>תוצר לוואי של זיקוק דלקים פוסיליים</li> <li>הציבור חושש מהסיכונים בשימוש בגז</li> <li>רשת תדלוק קטנה</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ניתן להפיקו כתוצר לוואי של עיבוד גז טבעי</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>העלאת המיסוי על הגפ"מ</li> <li>מכוניות קונבנציונליות בעלות יעילות גבוהה ורמת זיהום נמוכה מצמצמות את היתרונות של הגפ"מ</li> </ul>

### 9.3. נספח ג' - מחירים וצריכת דלק של רכבים נבחרים מסוג HEV, PHEV, BEV ו-FCEV

טבלה 26 - מחירים וצריכת דלק של רכבים נבחרים מסוג HEV, PHEV, BEV ו-FCEV

מקור	טווח מקס'	צריכת דלק (משולב בעיר+ מחוץ לעיר) <sup>11</sup>	מחיר <sup>10</sup>	מע' הנעה	שנת מודל	יצרן / מודל	
(Toyota)		50 מייל/גלון	\$24,200	1.8L Gas / Electric hybrid	2013	Toyota / Prius Two	
(Toyota)		50 מייל/גלון 95 שווה-ערך מייל/גלון	\$32,000		2013	Toyota / Prius Plug-in	
(Chevrolet)	82 מייל	119 שווה-ערך מייל/גלון	\$26,685	Electric	2014	Spark EV / Chevrolet <sup>12</sup>	
(FIAT USA)		116 שווה ערך מייל/גלון	\$31,800	Electric 83kw/111hp, 24kWh Lithium-Ion bat.	2013	500e / FIAT <sup>13</sup>	
(Nissan USA, 2013)	75 מייל	115 שווה ערך מייל/גלון	\$28,800	Electric 80kw/107hp 24kWh Lithium-Ion bat.	2013	LEAF / Nissan	
(Ford Motor Company, 2013)		105 שווה-ערך מייל/גלון	\$35,200	Electric 107kw/107hp 23kWh Lithium-Ion bat.	2014	Focus Electric / Ford	
(Tesla Motors, 2013)	232 מייל	95 שווה-ערך מייל/גלון	\$71,250	Electric 60kWh Lithium-Ion bat.	2013	Model S / Tesla	
(American Honda Motor co., 2013)	240 מייל	60 מייל/ק"ג	<sup>14</sup> \$21,600	Fuel Cell Electric 100kw/134hp, Lithium-Ion Bat.		FCX Clarity / Honda <sup>4</sup>	

מקור: (fuelconomy.gov, 2013)

<sup>10</sup> מחיר מחירון (MSRP) (manufacturer suggested retail price) כפי שמוצע בניו-יורק, ניו-יורק, ארה"ב לדגם הבסיסי. המחיר לא כולל מיסוי, זיכוי מס, רישוי, דמי טיפול, שילוח, עמלות סוכן, מימון.

<sup>11</sup> הערכת צריכה של ה-EPA

<sup>12</sup> דגם זה זמין רק במדינות אורגון וקליפורניה, ארה"ב

<sup>13</sup> זמין רק במדינת קליפורניה, ארה"ב

<sup>14</sup> רק 200 רכבים הוצעו למכירה, בחכירה (ליסינג) ל-36 חודשים בעלות של \$600 לחודש (לא כולל יתר העלויות בהתאם למצוין ב-1)

### 9.3.1. מקורות

- [/http://automobiles.honda.com/fcx-clarify](http://automobiles.honda.com/fcx-clarify) מתוך *Honda FCX Clarity Overview*. (2013 8 19). American Honda Motor co
- <http://www.chevrolet.com/spark-ev-electric-vehicle.html> מתוך *Chevy Spark EV 2014*. (אין תאריך). Chevrolet
- [/http://www.fiatusa.com/en/2013/500e](http://www.fiatusa.com/en/2013/500e) מתוך *FIAT 500e 2013*. (אין תאריך). FIAT USA
- [/http://www.ford.com/cars/focus/trim/electric](http://www.ford.com/cars/focus/trim/electric) מתוך *Ford Focus Electric Car 2014*. (2013 8 19). Ford Motor Company
- [/Fuel Economy: http://www.fueleconomy.gov](http://www.fueleconomy.gov) מתוך *fueleconomy.gov*. (2013 8 19).
- [/http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf](http://www.nissanusa.com/electric-cars/leaf) מתוך *Nissan LEAF Electric Car: 100% electric. Zero gas. Zero tailpipe*. (2013 8 18). Nissan USA
- <http://www.teslamotors.com/models> מתוך *Model S*. (2013 8 19). Tesla Motors
- <http://www.toyota.com/prius-plug-in/#!/Welcome> מתוך *Prius Plug-in Hybrid 2013*. (אין תאריך). Toyota
- <http://www.toyota.com/prius/#!/Welcome> מתוך *Toyota Prius 2013 | Hybrid car*. (אין תאריך). Toyota