



משרד האנרגיה והמים

שילוב רכב חשמלי והיברידי לסוגיו במערך

התחבורה בישראל

שלב ב': ניתוח כלכלי וניתוח מחזור חיים



מוגש למשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים, מנהלת
תחליפי נפט

מכרז 53/12

מרץ 2014

כתבו וערכו:

פרופ' אופירה אילון
עידן ליבס

גדי רוזנטל
דנה גבאי

מוסד שמואל נאמן
למחקר מתקדם במדע וטכנולוגיה



כיוון
אסטרטגיה, כלכלה ופיתוח עסקי

יועץ לענייני תחבורה - ד"ר ליאוניד טרטקובסקי - טכניון

תוכן עניינים

4	מבוא	.1
5	רקע ומבנה העבודה	.2
6	מטרת ומבנה המסמך	.2.1
7	ניתוח כלכלי	.3
8	הנחות התחשיב	.3.1
8	הנחות כלליות	3.1.1.
9	עלות הרכישה	3.1.2
11	עלות הנסיעה	3.1.3
13	תוצאות התחשיב	.3.2
13	רכב בעירה פנימית (ICE)	3.2.1
13	רכב היברידי (HEV)	3.2.2
14	היברידי פלאג-אין (PHEV)	3.2.3
14	רכב חשמלי (EV)	3.2.4
15	סיכום תוצאות	3.2.5
16	בדיקות רגישות	3.2.6
20	ניתוח מחזור חיים למערכות הנעה חשמליות	.4
20	רקע	.4.1
20	אפיון היקף ושלבנים בניתוח	.4.2
20	הבסיס השוואתי למערכות הנעה שונות - צריכה אנרגטית ופליטות	.4.3
22	מתודולוגיית הניתוח	.4.4
23	ניתוח מחזור חיים "מהבאר לגלגל" למערכות הנעה חשמליות והיברידיות	4.5.
23	מערכות הנעה במודל	4.5.1
23	התאמות של תמהיל החשמל במודל	4.5.2
26	תוצאות ומסקנות	4.5.4
31	סיכום	.5

רשימת תרשימים

- תרשים 1 - תחזיות ה-IEA להתפלגות היצע הרכבים הקלים (בנוסף לנתוני עבר), 2010-2050..... 6
- תרשים 2 - רכיבי עלות הבעלות הכוללת על רכב..... 8
- תרשים 3 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ (אג' לק"מ נסועה)..... 15
- תרשים 4 - השוואת התפלגות עלות הבעלות הכוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ..... 16
- תרשים 5 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 25 אלף ק"מ, (אג' לק"מ נסועה)..... 17
- תרשים 6 - השוואת התפלגות עלות הבעלות הכוללת, בנסועה שנתית של 25 אלף ק"מ..... 17
- תרשים 7 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 70 אלף ק"מ (אג' לק"מ נסועה)..... 18
- תרשים 8 - סימולציית פליטות וצריכה אנרגטית של מערכות הנעה חשמליות לסוגיהן לעומת ICE, במצב הנוכחי ובתרחיש עתידי..... 21
- תרשים 9 - תמהיל חשמל מייצג לישראל ל-2015 ו-2020, מקורות אנרגיה (שיעור בייצור) ופליטות (ק"ג לשעט"ן)..... 25
- תרשים 10 - עלות אנרגטית במערכות הנעה שונות, "מהבאר לגלגל", שנת 2015 לעומת 2020 (מגה-גיאול/ק"מ)..... 28
- תרשים 11 - פליטות גזי חממה במערכות הנעה שונות, "מהבאר לגלגל", שנת 2015 לעומת 2020 (גרם/ק"מ)..... 29
- תרשים 12 - עלויות חיצוניות של פליטות במערכות הנעה שונות, "מהבאר לגלגל", שנת 2015 לעומת 2020 (ש/ק"מ)..... 30
- תרשים 13 - סיכום עלות הבעלות כולל עלויות חיצוניות, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ (אג' לק"מ נסועה)..... 31
- תרשים 14 - סיכום התפלגות עלות הבעלות כולל עלויות חיצוניות, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ..... 32

רשימת טבלאות

- טבלה 1 - נתוני צריכת דלק וטווח של רכבים בעלי מערכות הנעה חשמלית מסוגים שונים..... 9
- טבלה 2 - מחירי רכישה רכבים בעלי מערכות הנעה חשמליות, אלפי ₪ (ללא מיסוי)..... 9
- טבלה 3 - נתוני צריכת דלק (ו/או חשמל) לדגמים שנבחנו..... 11
- טבלה 4 - עלות התדלוק לרכב חשמלי בתחנות הטעינה מהירה המוקמות בישראל..... 12
- טבלה 5 - עלויות תחזוקה (אג' / ק"מ נסועה)..... 12
- טבלה 6 - תזרים עלויות הבעלות לצרכן, רכב בעירה פנימית (ש)..... 13
- טבלה 7 - תזרים עלויות הבעלות לצרכן, רכב היברידי (ש)..... 13
- טבלה 8 - תזרים עלויות הבעלות לצרכן, רכב היברידי פלאג-אין (ש)..... 14
- טבלה 9 - תזרים עלויות הבעלות לצרכן- רכב חשמלי (ש)..... 14
- טבלה 10 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ (אג' לק"מ נסועה)..... 15
- טבלה 11 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 25 אלף ק"מ, (אג' לק"מ נסועה)..... 16
- טבלה 12 - השוואת עלות בעלות כוללת והתפלגות העלויות, בנסועה שנתית של 70 אלף ק"מ..... 18
- טבלה 13 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ ובשיעור פחת מואץ לרכבים חשמליים..... 19
- טבלה 14 - עלות בעלות כוללת לק"מ נסועה, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ ובשיעור הוזלה של 20% במחיר הרכבים חשמליים..... 19
- טבלה 15 - פירוט עלויות מוכרות לפליטות מסוגים שונים, במגזרי התעשייה, חשמל ותחבורה (ש/גרם)..... 27
- טבלה 16 - עלויות חיצוניות של פליטות במערכות הנעה שונות, "מהבאר לגלגל" (ש/ק"מ)..... 30
- טבלה 17 - סיכום עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ, כולל עלויות חיצוניות (אג' לק"מ נסועה)..... 31
- טבלה 18 - סיכום תוצאות סופיות בתרחישים השונים, (אג' לק"מ נסועה)..... 32

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 2011¹ בדבר הפעלת תכנית לאומית להפחתת התלות העולמית בנפט, ובהמשך להחלטת ממשלה נוספת משנת 2013² בנושא הפחתת התלות הישראלית בנפט לתחבורה, מקדמת יחידת המדען הראשי, מחקר מעמיק בשני הכיוונים לעיל.

מסמך זה הינו חלק ממערך דוחות שנועדו לתת מענה לצרכי המחקר הללו והוא מוגש למנהלת תחליפי נפט במשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים, 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 ב' עבור הפרק השני הן במערכות הנעה חשמליות.

¹ מספר 2790 מיום 30.1.2011
² מספר 5327 מיום 13.1.2013

2. רקע ומבנה העבודה

מערכות הביקושים וההיצע לאנרגיה בכלל וזו לתחבורה בפרט, אינן מושתתות כיום על עקרונות כלכליים וסביבתיים בני קיימא. על פי ה-IEA (Road map 2011), ללא פעולות אקטיביות ומוכוונות מטרה, פליטת גזי החממה ומזהמים נוספים מסקטור האנרגיה יותר מתוכפל עד שנת 2050. זאת, תוך התמודדות עם קשיי היצע דלקים הולכים וגוברים³. הדרך להימנע מגורל זה היא להחדיר טכנולוגיות הנעה חלופיות נקיות ויעילות יותר.

בשנת 2010 נערך מחקר עבור המשרד להגנת הסביבה שמטרתו, בין היתר, הייתה לאמוד על פי מצאי הפליטות של המשרד להגנת הסביבה, את כמויות הפליטה (במונחי טון מזהם נפלט בשנה) של סקטורי האנרגיה השונים בארץ ובכללם סקטור התחבורה ("חישוב העלויות החיצוניות מזהום אוויר מתחבורה ותעשייה בישראל", בקר וכיוון, 2012). מטרה נוספת של הדו"ח הייתה לאמוד, על פי מחקרים דומים בעולם, את העלות החיצונית⁴ מפליטת מזהמים בישראל (במונחי ש/טון נפלט). על פי המחקר, סך כמות הפליטה בגין סקטור התחבורה בשנת 2010, של המזהמים שנבחנו ($VOC, NO_x, PM_{2.5}, CO$) נאמדה בכ- 178,745 טון בשנה, שהינם 31% מסך פליטת המזהמים הארצית. 72% מסך הפליטות מתחבורה נפלטות במרכז הארץ, כאשר חמישית מפליטה זו מקורה בגוש דן.

מלבד גזי החממה (אשר השפעתם אינה תלויה במקור או מקום הפליטה), סקטור התחבורה שונה במאפייני הפליטה שלו מסקטורי אנרגיה אחרים: העלות החיצונית – או במילים אחרות, מידת הפגיעה בציבור – של פליטת גרם מזהם מסוים הנפלט מרכב, שונה משמעותית מהעלות של אותו גרם מזהם שנפלט מסקטור אחר (תעשייה או אנרגיה). הסיבה לכך נובעת מגובה ה-"ארובה", הנמוכה משמעותית ברכבים (עשרות סנטימטרים מעל פני הקרקע) מאשר בסקטור התעשייה (עשרות מטרים) ובטח מזה של האנרגיה (לעיתים מעל 250 מטר). מובן כי ככל שהפליטה מתרחשת קרוב יותר ונמוך יותר, הפגיעה בבריאות הציבור גבוהה יותר. יתרה מכך, פליטה באזור צפוף (כמו גוש דן), תהיה עלות זו "יקרה" הרבה יותר מאשר אותה פליטה בשטח פתוח.

אחת האסטרטגיות שאומצה באירופה להפחתת פליטות הפחמן דו-חמצני (CO_2 , פד"ח), היא עידוד מעבר לרכבי דיזל, הידועים ביעילותם הגבוהה יחסית לרכבי בנזין בכל הנוגע לפליטת גזי חממה. רכבי דיזל פולטים פחות CO_2 ושאריות דלקים פחמימניים (HC ו- CO). לעומת זאת יש הטוענים כי הם רועשים יותר ומעלים באופן משמעותי את פליטות תחמוצות החנקן (NO_x) והחלקיקים (PM).

מגמה נוספת המתפתחת בתעשיית הרכבים, מהווה גם היא תפקיד חשוב בניסיון הפחתת כמות כלל המזהמים לאוויר, והיא הניסיון להגביר את יעילות צריכת הדלק (במונחי ק"מ לליטר) של מערכת הבעירה הפנימית הקונבנציונאלית. לכך צפויה השפעה ניכרת על מערכת היתרונות היחסיים (הכלכליים והסביבתיים) של כלל הרכבים המשלבים מערכות אלו ($PHEV, HEV, ICE$, יפורט בהמשך).

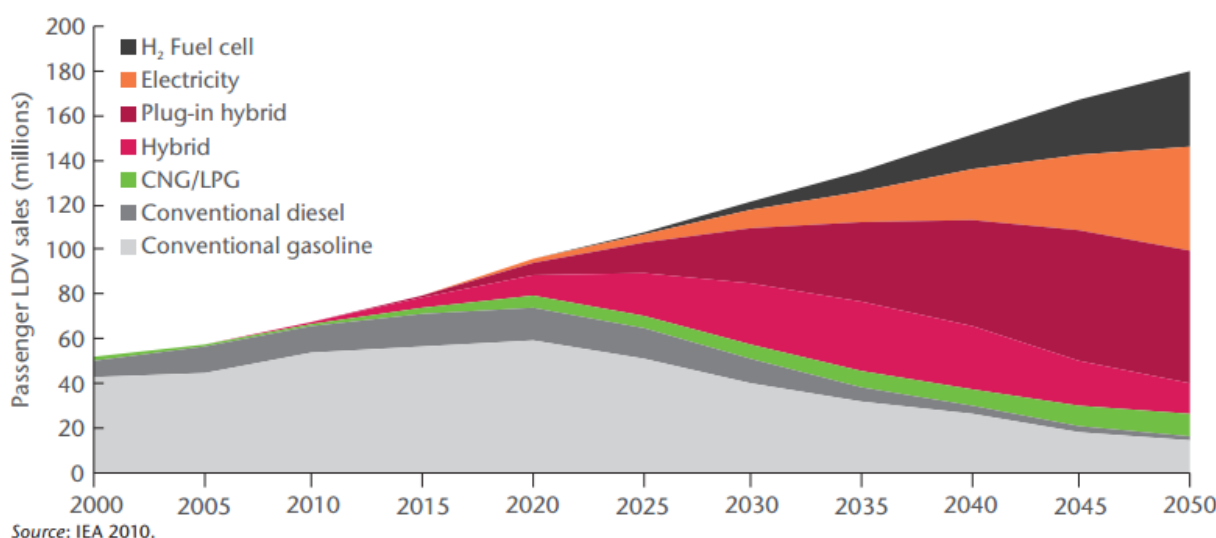
³ תחליפי הדלקים לתחבורה, בשונה מסקטורי אנרגיה אחרים, מוגבלים בטווח הקצר (וכנראה הבינוני), לדלקים נזליים או גזיים. בעוד שלמוצרי אנרגיה אחרים (כגון חום או חשמל) יש מקורות מתחדשים חלופיים ומתחדשים כגון אנרגיה סולארית, רוח, הידרו וכיוצא בזה. לכך השפעה ניכרת על מידת תלותו בבנזין וסולר.
⁴ העלות משקפת את הפגיעה בבריאות הציבור והסביבה במונחים מוניטאריים.

2.1. מטרת ומבנה המסמך

הצורך להפחית את פליטת המזהמים ולהקטין את תלותו של סקטור האנרגיה בדלקים פוסיליים הוביל למאמצי מדיניות ורגולציה רבים. הם ועוד הובילו לפיתוחם של טכנולוגיות הנעה חלופיות שהינן בעלות יתרון משמעותי בכל הקשור לצריכת הדלקים ולפליטות מזהמים.

קבוצות הרכבים העומדות על הפרק בתכניות התכנון ארוכות הטווח של ממשלות וגופי מחקר מובילים בעולם, נחלקים לחמש קבוצות (מלבד הרכבים הקונבנציונאליים) כאשר קבוצות הרכבים החשמליים וההיברידיים מהווה חלק עיקרי מהם. בתרשים הבא מפורטת מדיניות התכנון ארוכת הטווח של ארגון האנרגיה הבינלאומי (IEA), שיישומה הינו תנאי הכרחי לעמידה ביעדי הפחתת פליטת גזי החממה:

תרשים 1 - תחזיות ה-IEA להתפלגות היצע הרכבים הקלים (בנוסף לנתוני עבר), 2010-2050



מקור: IEA - Electric and plug-in hybrid electric vehicles -Technology Roadmap (2011)

כפי שניתן לראות, קבוצת הרכבים החשמליים וההיברידיים מהווה שיעור ניכר מהיצע מערכות ההנעה החלופיות כיום ובעתיד (על פי תחזיות ה-IEA).

מסמך זה הינו המשך ישיר של סקירת ספרות מקיפה שנערכה בשלב א' לדוח הכולל⁵ ומטרתו לספק ראייה כוללת בנוגע לכדאיותם הכלכלית והסביבתית של רכבים המשלבים מערכת הנעה חשמלית: רכבים היברידיים (HEV – Hybrid Electric Vehicle), רכבים היברידיים פלאג-אין (Plug-in Hybrid Electric Vehicle – PHEV) ורכבים חשמליים (EV – Electric vehicles).

הפרק הבא יעסוק בניתוח הכלכלי של כל דגם נבחן כשתחילה יפורטו ההנחות הכלליות של המודל ולאחר מכן יוצגו התוצאות לכל סוג רכב בנפרד. הפרק שלאחר מכן יעסוק בניתוח מחזור החיים של הרכבים הנבחרים.

⁵ "שילוב רכב חשמלי והיברידי לסוגיו במערך התחבורה בישראל- סקירת ספרות" - המסמך הוגש בספטמבר 2013.

3. ניתוח כלכלי

הפרק יעסוק בעלות הכלכלית לק"מ נסועה של כל אחד משלושת סוגי הרכב החשמליים וההיברידיים שנבחנו. תרחיש הבסיס יתייחס לרכבים פרטיים (מסוג משפחתית-סדאן) ויתבסס על ביצועי **דגם מייצג** לכל אחד מסוגי הטכנולוגיות. זאת על פי נתוני 2013⁶ של מאגר המידע fuel economy של המשרד להגנת הסביבה האמריקאי (EPA).

מטרתו של פרק זה היא לייצר אומדן כלכלי ראשוני לשרשרת העלויות הנוצרת בעת השימוש בכל אחד מסוגי הרכב שנבחנו (במונחי ש"ח לקילומטר נסועה), תוך ניכוי אמצעי מדיניות קיימים (כלומר ללא מיסוי). אומדנים אלו יאפשרו להשוות בין ביצועיהם הכלכליים של הרכבים ההיברידיים והחשמליים לעומת רכבי מנועי בעירה פנימית (ICE) מונעי בנזין⁷.

נדגיש כי התחשיב מתבסס על סט מחירים ונתונים פסיקאליים הנכונים למועד כתיבת העבודה (מחירי דלקים, תמחיל ייצור החשמל, מחירי המכוניות, נתוני צריכת הדלק). כמו כן, הנתונים והתחשיבים להלן מתייחסים לדגמי רכב ספציפיים שמאפייניהם עשויים להשתנות עם עדכון הדגם ולהיות שונים ביחס לדגמים מתחרים⁸. לפיכך, חשוב יהיה לעדכן בעתיד את הפרמטרים העיקריים כמו גם להעמיק מתודולוגית את הניתוח (יורחב בהמשך).

נקודה חשובה נוספת היא שהתחשיב אינו כולל מיסוי ולכן אינו משקף את המציאות הקיימת בפועל מבחינת רמות המחירים מולן ניצב הצרכן הסופי. עם זאת, ניכוי המס מאפשר לחזות בעלויות הנסועה של הרכבים השונים בהתבסס על מחירי שוק נטולי מדיניות ישירה או עקיפה ובכך לנטרל השפעות חיזוניות.

על מנת לכמת את כלל היבטי השימוש ברכב לכדי מספר בודד (ש"ח/ק"מ נסועה) נדרש לאפיין שרשרת אספקה המורכבת מרכיבי העלויות בה. רכיבים אלו כוללים שלוש קבוצות של עלויות, שמקובל להתייחס לסכומן **כעלות הבעלות הכוללת**:

- **עלות רכישה** - היוון תזרים עלות רכישת הרכב פחות הערך השיורי של הרכב (בתום תקופת הבעלות). ערכו הנוכחי של תזרים העלויות מחולק בנסועה הכוללת לאורך כל תקופת הבעלות יניב את עלות הרכישה במונחי ש"ח/ק"מ נסועה.
- **עלות הנסיעה** - עלות הדלק (ו/או החשמל) במונחים של ש"ח/ק"מ נסועה ועלות התדלוק.
- **עלויות תחזוקה** - עלות תחזוקה שוטפת של הרכב (ש"ח/ק"מ נסועה)

על עלויות אלו מתווספות **עלויות חיזונית**, אשר יבחנו ויוצגו בפרק 4.

עלות הרכישה הינה קבועה במובן שהיא אינה תלויה בהיקף הנסועה השנתי. עלות הנסיעה ועלות התחזוקה, לעומת זאת, תלויות באופן ישיר בהיקף הנסועה (עלויות משתנות).

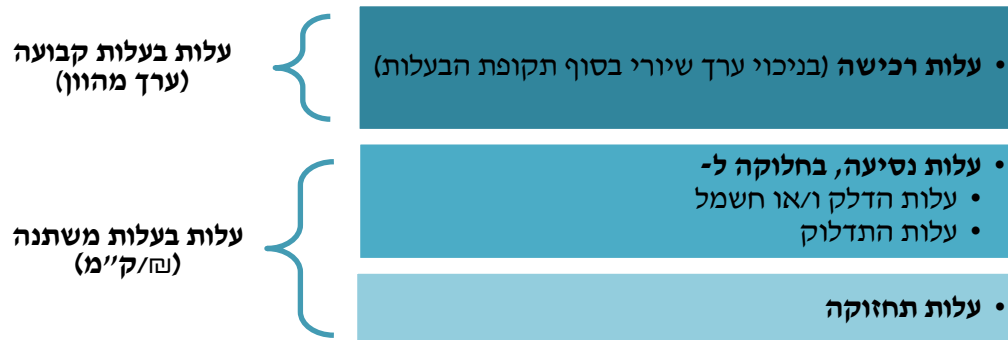
⁶ עבור דגמי 2014 קיים מידע חלקי ביותר המקשה על ההשוואה

⁷ בנוגע לרכבים היברידיים בעלי מנועי דיזל, בחינת מאגרי המידע והשוק העלתה כי תחום הדיזל-ההיברידי מפותח כיום הרבה פחות מיתר החלופות ואין כרגע בנמצא דגם רכב אשר עונה לחתך המיינסטרים ואשר מיוצר בייצור סדרתי שניתן לבחון בהשוואה ליתר הרכבים שנבחנו. גם בהינתן נתונים חיזוניים, לא תהיה משמעות רבה לממצאי השוואה בשל השוני במתודולוגיות ובהנחות הבסיס. לפיכך מערכת הנעה מסוג זה לא נבחנה במסגרת הניתוח הכלכלי.

⁸ במסגרת העבודה יוגש למשרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים כלי ממוחשב שיאפשר את עדכוןם של הפרמטרים העיקריים שיוצגו תוך עדכון התוצאות על פיו.

התרשים להלן ממחיש את רכיבי עלות הבעלות הכוללת (ללא עלויות היצוניות):

תרשים 2 - רכיבי עלות הבעלות הכוללת על רכב



בסעיפים הבאים יוצגו ההנחות שבבסיס התחשיב לצד מערכת הנתונים והפרמטרים שהוצבו כפי שפורסמו במאגר המידע של ה-EPA עבור דגמי 2013. הדגמים שנבחרו לייצג את כל אחת מהטכנולוגיות הינן מכוניות מקטגוריית ה"משפחתיות": טיוטה קורולה (כרכב בסיס ICE), טיוטה פריוס (HEV), טיוטה פריוס פלאג-אין (PHEV) וניסאן לייף (EV).⁹

3.1 הנחות התחשיב

הנחות התחשיב יוצגו על פי רכיבי העלות העיקריים כפי שהוצגו בסעיף הקודם. מקורות הנתונים הינם:

- מסדי נתונים של משרד האנרגיה האמריקאי: אתר fueleconomy.gov ומחקרים שביצע עבורם ארגון הרכב האמריקאי (American Automobile Association - AAA).
- נתוני הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה, מנהל הדלק וחברת החשמל.

3.1.1 הנחות כלליות

- הנתונים המוצגים הינם ברמת המחירים 2013 וללא מיסוי.
- תקופת הבעלות המונחת בתחשיב הינה 5 שנים.
- על פי נתוני הלמ"ס, אומדן הנסועה השנתית לסך הרכבים הפרטיים בישראל, עמד בשנת 2012 על כ-36,865 מיליון ק"מ בשנה כשמספר המכוניות באותה שנה הוערך בכ-2.25 מיליון כלי רכב פרטיים ← 16.4 אלף ק"מ נסועה ממוצעת¹⁰ לרכב פרטי בשנה. חשוב לזכור כי קיימת שונות גבוהה יחסית בין רכבים פרטיים לרכבי ליסינג/השכרה ו/או בבעלות חברה שנתוני הנסועה שלהם גבוהים משמעותית ומגיעים ללמעלה מ-25 אלף ק"מ בשנה. הנחת התחשיב, בתרחיש הבסיס, תהיה נסועה של 16.4 אלף ק"מ בשנה. שינוי בהנחה זו ייבחן במסגרת בדיקת רגישות. נדגיש כי הניתוח אינו מפנים את השונות הקיימת במאפייני הנסיעה, בשל מגבלות היקף העבודה¹¹.
- נתוני fueleconomy.gov אודות הדגמים המייצגים מוצגים להלן:

⁹ דגם Nissan Leaf שייך לקטגוריית ה"סופר-מיני", אך נכון לעת כתיבת עבודה זו הינו הרכב החשמלי "הטהור" הנפוץ והמתאים ביותר לחתך הרכבים הנבחנים.

¹⁰ ממוצע חשבוני

¹¹ מובן כי עם התקדמות המחקר נדרש יהיה להתאים את המודל למאפייני הנסועה היומיים של כל קבוצת רכב ולהעמיק את הניתוח (עדכון זה רלוונטי בעיקר עבור רכבי PHEV שצורכים חשמל ודלק במקביל)

טבלה 1 - נתוני צריכת דלק וטווח של רכבים בעלי מערכות הנעה חשמלית מסוגים שונים

טווח נסיעה (כולל ק"מ)	100 kWh ל-100 ק"מ נסיעה	ק"מ לליטר	דלק	דגם	סוג מנוע
555		12.3	בנזין	Toyota Corolla 1.8L 2013	ICE
863		21.3	בנזין	Toyota Prius 1.8L 2013	HEV
869 (*17.5)		21.3	בנזין	Toyota Prius 1.8L Plug-in Hybrid 2013	PHEV
	18.01		חשמל		
121	18.01		חשמל	Nissan Leaf 2013	EV

* טווח בהנעה חשמלית, בשימוש במצב "EV Mode" ובמהירות של עד 100 קמ"ש מקור: fuelconomy.gov

נזכיר כי מאפייניהם של הרכבים השונים, החל ממחירי רכישה וכלה בצריכת אנרגיה משתנים בקצב מהיר מאוד ולכן יש לעדכן את הממצאים באופן שוטף (כולל, כאמור במבוא, רכבי הבעירה הפנימית).

בסעיפים הבאים יוצגו ההנחות הרלוונטיות לכל רכיב עלות שנבחן.

3.1.2. עלות הרכישה

בשונה מעלות הנסיעה והעלויות החיצוניות, עלות הרכישה היא קבועה, אינה תלויה בהיקף הנסועה ומהוות לערכה הנוכחי. מקדם ההיוון שישמש להיוון תזרים ההוצאות יעמוד על כ-4.7%¹².

עלות הרכישה תחושב על פי תזרים המזומנים הצפוי לצרכן בעת רכישת הרכב ומכירתו בסוף תקופת הבעלות (ייבחן על פי שיעורי פחת משתנים) שתימשך כאמור על פני 5 שנים.

- **מחיר רכישה** - שוק הרכב הישראלי נסמך רובו ככולו על ייבוא, לפיכך עלויות הייצור הן העלויות הרלוונטיות. את עלויות הייבוא הוחלט שלא להכליל בחישוב, מכיוון שאין בהם מידע "תוספתי" חשוב על מערכת היתרונות והחסרונות בהשוואה בין הדגמים (במידת הצורך ניתן לגלם זאת במחיר הרכב). מחירי הרכבים המוצגים הינם המחירים המומלצים לצרכן (Manufacturer's Suggested Retail Price - MSRP) לפברואר 2014, שאינם כולל מיסים, מרווחי שיווק ועלויות תוספתיות נוספות (כגון "עלות מסירה" וכיו"ב).

טבלה 2 - מחירי רכישה רכבים בעלי מערכות הנעה חשמליות, אלפי ₪ (ללא מיסוי)

סוג מנוע	דגם	מחיר בארה"ב (MSRP)*, אלפי ₪
ICE	Toyota Corolla 1.8 2013	63.36
HEV	Toyota Prius 1.8 2013	95.04
PHEV	Toyota Prius Plug in Hybrid 2013	123.2
EV	Nissan Leaf 2013	109
EV	Tesla model S	281

* היכן שצוין טווח עלויות (בשל אפשרויות הגיר השונות) נלקח המחיר הממוצע מקור: (2013) Fuel economy

מהנתונים עולה כי הרכב ההיברידי עולה כ-50% יותר מרכב קונבנציונאלי כיום. רכבי הפלאג-אין מאמירים לעלות רכישה של 95% יותר מזו של רכב בעירה פנימית (פי 2).

¹² בדומה להנחות מודלים קיימים בידי המשרד. שינוי פרמטר זה יתאפשר באמצעות הכלי שיוגש.

פחת - הפחת נועד לשקף את "ערך השימוש" בתקופת הזמן הנבחנת או במילים אחרות את שיעור ירידת הערך של הרכב במשך תקופת הבעלות. סביר כי לאחר תום תקופת הבעלות ימכור בעל הרכב בשוק הרכבים המשומשים בערך חיובי כלשהו (ערך שיורי). מאחר ושוק יד שנייה לרכבים אלו טרם החל בישראל לא ניתן לגזור נתונים מהשטח. במסגרת החשבונאות נהוג לשקף את ירידת הערך של נכס כלשהו במסגרת הפחת בדוח הרווח וההפסד לצרכי מיסוי אך הוא אינו תמיד משקף את המציאות בפועל. לדוג': בישראל שיעור הפחת, בהתאם לתקנות מס הכנסה - פחת 1941¹³, הינם כ-15% עבור רכב פרטי קונבנציונלי וכ-25% לרכבים היברידיים. המשמעות היא שלאחר 4 שנות שימוש ברכב, הרכב מאבד את ערכו ולכך כמובן אין סבירות.

הפחת ישמש בתחשיב לצורך שיקוף ירידת הערך בשווי הרכב טרם מכירתו. על פי מחקר ה-AAA הפחת השנתי לרכבים קונבנציונליים עומד על כ-13.1 אלש"ח לשנה (כ-4.9% מעלות הרכב של רכב מסוג סדאן שנוסע כ-24 אלף ק"מ בשנה¹⁴). עם זאת, בנייתו משרד האנרגי האמריקאי אין התייחסות מפורטת לנושא הפחתת הערך בכל הנוגע לרכבים חשמליים¹⁵. מאחר ולאחר מכירת רכב חשמלי צפויות עלויות סוללה משמעותיות שאינן במסגרת האחריות (שכידוע הסוללה מהווה שיעור ניכר ממחיר הרכב) סביר להניח, בדומה לחשבונאות העסקית, שהפחת עבור רכבים חשמליים יהיה מואץ יותר מזה של רכבים קונבנציונליים. יש לזכור כי מעל לכל, הפרמטרים החשובים ביותר לקביעת ירידת הערך השנתית של רכב הם הביקוש לרכב וגודל השוק ולכן קשה לצפות את ערכם מראש של רכבים שטרם הוחדרו למערך התחבורה.

שיעור הפיחות השנתי שהונח הוא 5.5% עבור רכבים קונבנציונליים ו-10% עבור רכבים חשמליים (שינויים בהנחות אלו ייבחנו במסגרת בדיקות רגישות).

החלפה ותפעול סוללה - הנחת העבודה היא כי הצרכן קונה רכב חדש לתקופת בעלות מסוימת. רובם ככולם של הרכבים נמכרים עם אחריות יצרן מורחבת שעולה על משך התקופה הנבחנת בתחשיב¹⁶. לפיכך עלויות אלו לא נלקחו בחשבון בדומה למשרד האנרגיה האמריקאי שניתוחו מניחים גם כן כי עלות זו הינה חלק מעלות הרכב.

עם זאת, חשוב להדגיש כי לעלויות הצפויות בתפעול והחלפת הסוללות משמעות ניכרת על מחיר הרכב הצפוי בסוף תקופת הבעלות. ככל שיהיו אלה גבוהות יותר, כך קשה יותר יהיה לצרכן למכור את הרכב והערך השיורי בסוף תקופת הבעלות יהיה נמוך יותר. לפיכך, על מנת כן לגלם סיכון זה בתחשיב, נבחן במסגרת בדיקת הרגישות שיעור פחת מואץ עבור הרכבים החשמליים.

¹³ http://www.btl.gov.il/Laws1/02_0103_100026.pdf

¹⁴ <http://newsroom.aaa.com/2011/04/cost-of-owning-and-operating-vehicle-in-u-s-increased-3-4-percent-according-to-aaas-2011-your-driving-costs-study>

¹⁵ חישוביהם מניחים כי הצרכן רוכש את הרכב בהלוואה המוחזרת תוך 5 שנים וללא ערך שיורי בסוף תקופת הבעלות.

¹⁶ טויוטה (פריוס / פריוס פלאג-אין) – 8 שנים או 160,000 ק"מ (הקודם מבינים), טסלה (Model S) – 8 שנים או 200,000 ק"מ בדגם 60kWh, ללא הגבלה בדגם 85kWh.

3.1.3. עלות הנסיעה

עלות הנסיעה מתחלקת לשני רכיבים: מחיר הדלק (בנזין ו/או חשמל) ומחיר הטעינה החשמלית המהירה (עבור רכבי EV ו-PHEV). שני רכיבי עלות אלו תלויים במאפייני צריכת האנרגיה וקיבולת הסוללה של הרכב הנבחן (כפי שיפורט בהמשך).

- **מחירי הדלק** - עלות הדלקים הינה עלות המשתנה באופן תדיר ומושפעת באופן ניכר מתנאי היצע וביקוש דינמיים. לפיכך, נדרש לעדכן מעת לעת את הממצאים על פי המחירים העדכניים.
 - מחיר הבנזין ללא מס ופערי שיווק (מחיר שער בז"ן) נלקח כקבוע על פי מחירו בפברואר 2014 ועומד על כ-2.56 ש"ח/ליטר בנזין (מחיר מרבי).
 - מחיר החשמל הינו 54.03 אג"קוט"ש (ללא מיסים)
- **נתוני צריכת הדלק של הרכבים הנבחנו** - כאמור, נתוני צריכת הדלק נלקחו מתוך נתוני משרד האנרגיה העולמי¹⁷ עבור דגמי 2013. להלן נתוני צריכת הדלק ו/או החשמל של הדגמים הנבחנו:

טבלה 3 - נתוני צריכת דלק (ו/או חשמל) לדגמים שנבחנו

סוג מנוע	דלק	ק"מ לליטר	ליטר לק"מ	kWh לק"מ
ICE	בנזין	12.3	0.081300813	
HEV	בנזין	21.3	0.046948357	
PHEV*	בנזין	21.3	0.046948357	
	חשמל			0.18
EV	חשמל			0.18

* ברכב זה הצריכה היא במצב משולב של הנעה חשמלית ומנוע בעירה פנימית

כפי שניתן לראות בטבלה, רכבי ה-PHEV הם היחידים שצורכים הן חשמל (מהרשת) והן דלק. יתרה מכך, מאפייני צריכת האנרגיה עבור קבוצת רכב זו משתנים בהתאם לפרמטרים רבים כגון: מהירות הנסיעה, טווח הנסיעה החשמלי ומספר הטענות הסוללה ביום. כמו כן, יש לציין כי מרבית הדגמים כיום משלבים צריכת חשמל ודלק במקביל בחלק ממצבי הנסיעה. מובן כי ניתוח מדויק של קבוצת רכבים אלו יצריך ניתוח מעמיק ומורכב הרבה יותר. במסגרת התחשיב יונח עבור רכבי PHEV כי טווח הנסיעה החשמלית היא זו המדווחת ע"י היצרן תחת מצב נסיעה חשמלי בלבד. לאחר מכן יונע הרכב על ידי מנוע הבעירה בלבד (בדומה ועל פי מאפייני רכב היברידי רגיל).

- **מחירי תדלוק** - ישנן שתי צורות עיקריות המיושמות כיום לטעינת רכבים חשמליים. הראשונה היא טעינה ביתית, בה אין עלות תוספתית לתדלוק מלבד עלויות החשמל. השנייה היא מערכת טעינה מהירה. מחירי טעינה חשמלית מושפעים מאוד ממדיניות הפריסה, היצע הרכבים הקיים ותמריצי המיסוי שמעניקה הממשלה לקידום טכנולוגיות למערכות אלו. לפיכך, אין תועלת רבה מ"גיור" עלויות אלו בחו"ל והתאמתם לישראל מכיוון שפרמטרים רבים מידי אינם נלקחים כד בחשבון.

לאחרונה פורסם כי חברת קרסו מוטורס בע"מ וקבוצת פז חתמו על הסכם לשיתוף פעולה אסטרטגי במסגרתו תקים חברת קרסו עמדות טעינה מהירה לרכביה החשמליים בתחנות פז עמדות הטעינה יספקו מענה לדגם החשמלי הנבחן של ניסאן "ליף"¹⁸. על פי דיווח החברות בעיתונות תהליך הטעינה צפוי להימשך כ-20 דקות ולהטעין כ-80% מקיבולת הסוללה. עוד דווח כי עלות הטעינה הממוצעת (להטענת אותם 80%) תעמוד על כ-17 ש"ח (ללא מע"מ). מכאן עולה שהעלות להטענת קוט"ש הינה 88.5אג'. הפחתת עלות הקוט"ש תבודד את רכיב עלות התדלוק, כמופיע להלן:

טבלה 4 - עלות התדלוק לרכב חשמלי בתחנות הטעינה מהירה המוקמות בישראל

סך עלות הטענה ל-1kWh	88.542 אג'
עלות קוט"ש	54.030 אג'
עלות התדלוק	34.512 אג'

בתרחיש הבסיס ההנחה תהיה כי טעינת הסוללה היא ביתית ומתבצעת פעם ביום. במסגרת בדיקות הרגישות לנסועה השנתית, תיבחן המשמעות של טעינה נוספת (במערכת הטעינה מהירה). עבור רכבי ה-PHEV שכאמור צורכים הן חשמל והן דלק במקביל יש לכך חשיבות מהותית (במונחי צריכת חשמל/דלק ופליטת מזהמים).

▪ **עלות תחזוקה (ללא דלק) - עלות התחזוקה של רכבים חשמליים נמוכה משמעותית מזו של רכבים קונבנציונליים (בין היתר בשל מספר קטן בהרבה של חלקים נעים במנוע, העדר הצורך בהחלפת שמנים ופילטרים, עומס מופחת על מערכת הבלימה והצמיגים בשל מערכת השבת אנרגיה בבלימה ועוד).** יש לכך השפעה ניכרת במערכת היתרונות היחסיים בין סוגי הרכב. גם ברכבים ההיברידיים הכוללים מנוע בעירה פנימית, התחזוקה הנדרשת נמוכה לרוב משל רכב ICE.

עלויות תחזוקת רכבים בעלי מערכת הנעה חשמלית מתבססות על הנחות המודל שמריץ משרד האנרגיה האמריקאי על מנת לאמוד את עלות הנסיעה (תחת מודל מורכב הרבה יותר) אשר מקורן במחקר שביצע ה-AAA¹⁹, והן מוצגות להלן. עלות תפעול רכב קונבנציונאלי נלקחה מעבודה קודמת שהוגשה למשרד בנושא דומה, שהצריכה הנחה זו²⁰. להלן העלויות, במונחי אג' לק"מ:

טבלה 5 - עלויות תחזוקה (אג' / ק"מ נסועה)

EV	PHEV	HEV	ICE	עלות (אג' / ק"מ נסועה)
8.96	11.76	11.76	24	

מקורות: פארטו ו-DHV (2012); AFDC (Alternative Fuel Data Center)

¹⁸ <http://www.tashtiot.co.il/2014/02/12/%D7%9E%D7%9B%D7%95%D7%A0%D7%99%D7%AA-%D7%97%D7%A9%D7%9E%D7%9C%D7%99>

¹⁹ http://www.afdc.energy.gov/calc/cost_calculator_methodology.html

²⁰ "שילוב תחליפי נפט מבוססי גז טבעי במערך התחבורה בישראל", קבוצת פארטו ו-DHV, 2012, <http://energy.gov.il/Subjects/EGOilReplacement/Documents/ORStageB.pdf>

3.2. תוצאות התחשיב

בסעיפים הבאים יוצגו התוצאות הכלכליות לתחשיב שהנחותיו הוצגו לעיל. נחזור ונציין כי הנתונים מתייחסים לווקטור מחירים וביצועי צריכת אנרגיה נתון. ההתעדכנות המהירה של פרמטרים אלו תחייב עדכון שוטף של הממצאים להלן:

3.2.1. רכב בעירה פנימית (ICE)

▪ עלות רכישה

טבלה 6 - תזרים עלויות הבעלות לצרכן, רכב בעירה פנימית (נח)

שנה	0	1	2	3	4	5
עלות רכישה	-63,360					
ערך שיורי						47,750
ערך נוכחי של עלות הבעלות	-24,267					
עלות לק"מ (נח/ק"מ נסועה)	0.30					

מהתחשיב עולה כי עלות הרכישה המהוונת, עבור רכבי בעירה פנימית, עומדת על כ-30 אג' לק"מ נסועה, תחת הנחת נסועה שנתית של כ-16,400 ק"מ בשנה.

- **עלות נסיעה** - צריכת הדלק של דגם רכב הבעירה הפנימית הוא 12.3 ק"מ לליטר. בהנחת עלות דלק של 2.56 ₪ לליטר, עלות הנסיעה לקילומטר נסועה היא 20.8 אג'.
- **עלות תחזוקה** - כמוצג בטבלה 5, עלות התחזוקה של רכב בעירה פנימית הינה 24 אג' לק"מ נסועה.



עלות הבעלות הכוללת על רכב בעירה פנימית, תחת הנחות תרחיש הבסיס, מסתכמת לכ-74 אג' לק"מ

3.2.2. רכב היברידי (HEV)

▪ עלות רכישה

טבלה 7 - תזרים עלויות הבעלות לצרכן, רכב היברידי (נח)

שנה	0	1	2	3	4	5
עלות רכישה	-95,040					
ערך שיורי						56,120
ערך נוכחי של עלות הבעלות	-48,171					
עלות לק"מ (נח/ק"מ נסועה)	0.59					

עלות הרכישה המהוונת לרכב היברידי, עומדת על כ-59 אג' לק"מ נסועה (פי שתיים מהעלות עבור רכב בעירה פנימית), תחת הנחת נסועה שנתית של כ-16,400 ק"מ בשנה.

- **עלות נסיעה** - על פי נתוני צריכת הדלק של רכב היברידי ומחיר הדלק שהונח, עולה כי מחיר הדלק לק"מ נסועה הינו 12 אג' לק"מ.
- **עלות תחזוקה** - כמוצג בטבלה 5, עלות התחזוקה של רכב היברידי הינה כ-12 אג' לק"מ נסועה.



עלות הבעלות הכוללת על רכב היברידי, תחת הנחות תרחיש הבסיס, מסתכמת לכ-83 אג' לק"מ

3.2.3. היברידי פלאג-אין (PHEV)

עלות רכישה

טבלה 8 - תזרים עלויות הבעלות לצרכן, רכב היברידי פלאג-אין (ה)

שנה	0	1	2	3	4	5
עלות רכישה	-123,200					
ערך שיורי						72,748
ערך נוכחי של עלות הבעלות	-62,443					
עלות לק"מ (ה/ק"מ נסועה)	0.76					

עלות הרכישה המהוונת, עבור רכב היברידי פלאג-אין, עומדת על כ-76 אג' לק"מ נסועה, תחת הנחת נסועה שנתית של כ-16,400 ק"מ בשנה.

- עלות נסיעה** - על פי נתוני צריכת הדלק של רכב היברידי פלאג-אין ומחיר הדלק שהונח, עולה כי מחיר הדלק לק"מ נסועה הינו 12 אג' לק"מ בהנעה היברידיית וכ-9.7 אג' לק"מ בהנעה חשמלית בלבד. לצורך התחשיב יונח כי בעל רכב היברידי פלאג-אין הנוסע נסועה יומית ממוצעת של 45 ק"מ ביום (על פי 16.4 אלף ק"מ בשנה), מטעין את הסוללה פעם ביום. כמו כן יונח כי הרכב נוסע תחילה ע"י הנעה חשמלית בלבד את מלוא הטווח האפשרי ורק לאחר מכן מופעל מנוע הבעירה. על פי נתוני היצרן²¹, הטווח החשמלי ("EV MODE") של הדגם שנבחן הינו 18 ק"מ (40% מכמות הנסועה היומית הממוצעת). לפיכך עלות הנסיעה תהא בתרחיש הבסיס ממוצע משוקלל של עלויות הדלק והחשמל על פי משקלות אלו, 13 אג' לק"מ נסועה; בהנחת הטענה מהירה יתווספו כ-6 אג' לעלות זו.

- עלות תחזוקה** - כמוצג בטבלה 5, עלות התחזוקה של רכב PHEV הינה כ-12 אג' לק"מ נסועה.



עלות הבעלות הכוללת לנסיעה ברכב PHEV, תחת הנחות תרחיש הבסיס, מסתכמת לכ-99 אג' לק"מ

3.2.4. רכב חשמלי (EV)

עלות רכישה

טבלה 9 - תזרים עלויות הבעלות לצרכן- רכב חשמלי (ה)

שנה	0	1	2	3	4	5
עלות רכישה	-109,120					
ערך שיורי						64,434
ערך נוכחי של עלות הבעלות	-55,307					
עלות לק"מ (ה/ק"מ נסועה)	0.67					

- עלות נסיעה** - עלות הנסיעה עבור רכב חשמלי הינה 9.73 אג' לק"מ, תחת הנחת נסועה שנתית של כ-16,400 ק"מ בשנה; בהנחת הטענה מהירה יתווספו כ-6.2 אג' לעלות זו.
- עלות תחזוקה** - כמוצג בטבלה 5, עלות התחזוקה עבור רכב חשמלי הינה כ-9 אג' לק"מ נסועה.



עלות הבעלות הכוללת לנסיעה ברכב חשמלי, תחת הנחות תרחיש הבסיס, מסתכמת לכ-86 אג' לק"מ

²¹ <http://www.toyota.com/prius-plug-in/features.html#!/mpg/1235/1237>

3.2.5. סיכום תוצאות

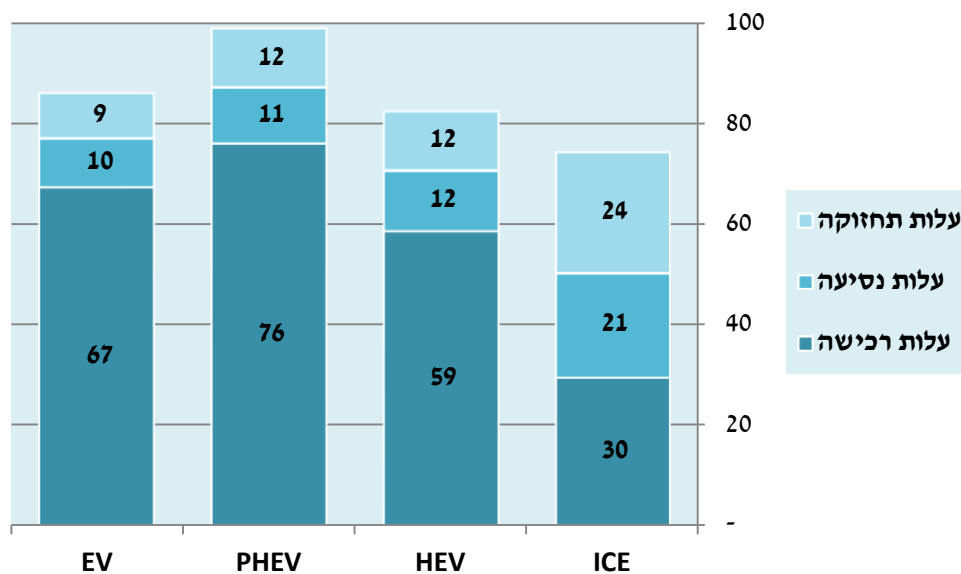
להלן ריכוז התוצאות שהוצגו לעיל, עבור תרחיש הבסיס:

טבלה 10 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ (אג' לק"מ נסועה)

EV	PHEV	HEV	ICE	
67	76	59	30	עלות רכישה
10	11	12	21	עלות נסיעה
9	12	12	24	עלות תחזוקה
86	99	83	74	סה"כ עלות הבעלות

* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית

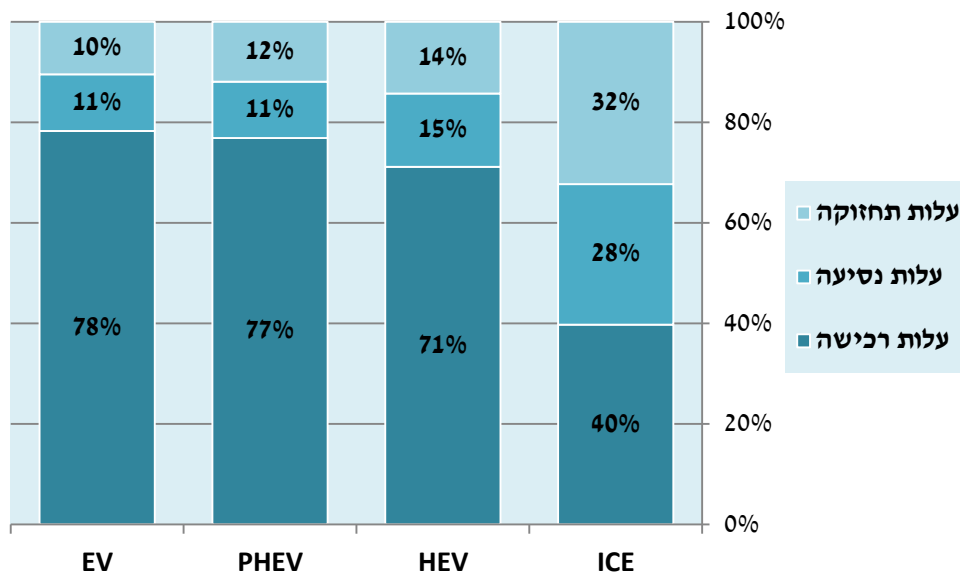
תרשים 3 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ (אג' לק"מ נסועה)



* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית

- עלות הנסיעה הגבוהה ביותר היא ברכב הבעירה פנימית. עם זאת, עלות הרכישה ברכב זה זולה משמעותית מאלו של הרכבים החשמליים, כמו גם שיעור ההפחתה שלו. לכן, התוצאה הכוללת היא שעלות הנסיעה ברכב זה היא הזולה מבין הדגמים שנבדקו (תחת סט הנתונים הקיים).
- הרכבים ההיברידיים מניבים את עלות הבעלות הכוללת הזולה ביותר מבין הרכבים החשמליים. מעניין להבחין כי על אף שמחיר הרכב ההיברידי יקר בכ-50% מרכב הבעירה פנימית, עלות הבעלות יקרה רק בכ-12%. זאת הודות לתועלות המשמעותיות בצד עלויות הנסיעה והתחזוקה.
- סך העלות לק"מ נסועה ברכב ההיברידי פלאג-אין גבוהה מזו של יתר הרכבים בשל מחירו הגבוה של הרכב, אשר לא מקוזז בירידה משמעותית בעלויות הנסיעה והתחזוקה.

תרשים 4 - השוואת התפלגות עלות הבעלות הכוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ



* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית

ניתן לראות כי עלות הנסיעה הולכת ומהווה שיעור נמוך יותר מעלות הנסיעה ככל שהרכב מסתמך יותר על הנעה חשמלית. מנגד, עולה משמעותית שיעור עלות הרכישה מסך העלות הכוללת של הרכבים החשמליים (עד פי 2 מזה של רכב בעירה פנימית). כמו כן, עולה כי עלות התחזוקה מהווה שליש מעלות הבעלות הכוללת של רכב בעירה פנימית, בעוד שעבור רכבים חשמליים שיעור זה נמוך משמעותית.

3.2.6. בדיקות רגישות

בסעיפים הבאים יוצגו בדיקות רגישות שיספקו תמונה כוללת על רגישות התחשיב לחלק מהפרמטרים שהוצבו. נדגיש כי בעת בדיקות הרגישות, שונתה בכל פעם רק הנחה אחת כשהיתר נותרו בעינם כבתרחיש הבסיס.

היקף נסועה

מובן כי ככל שנסועת הרכב גבוהה יותר כך יעלו יתרונם של הרכבים החשמליים על חסרונם (מחיר הרכב) ועלות הבעלות תהיה זולה משמעותית. כמו כן, תחת נתוני נסועה גבוהים גוברים יתרונותיהם של הרכבים על חסרונותיהם במונחים כלכליים.

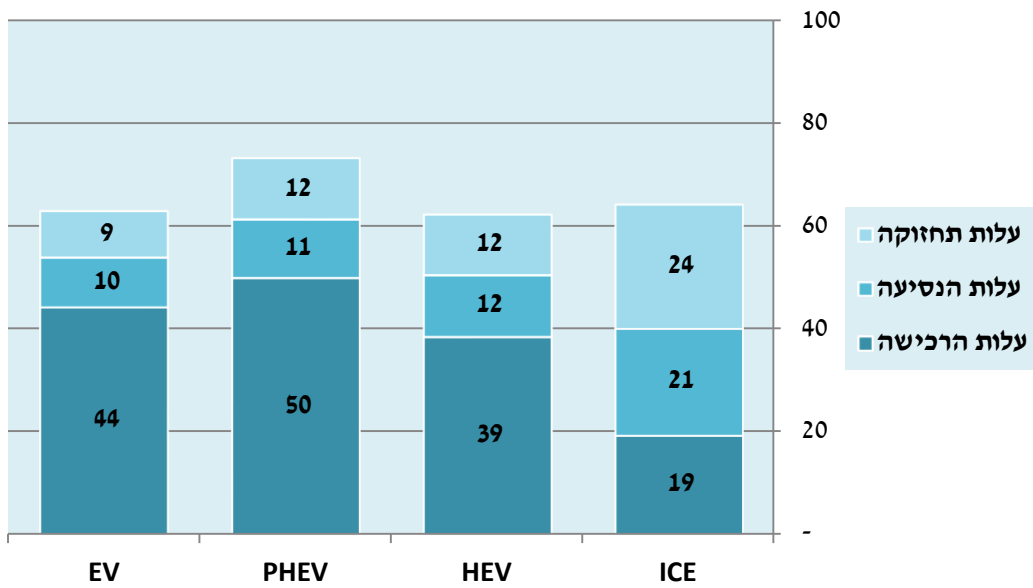
תחת הנחה של 25 אלף ק"מ נסועה שנתית, ניתן לראות בטבלה הבאה כי דירוג העלויות בין הרכבים משתנה והרכב ההיברידי הופך לזול ביותר (62 אג' לק"מ, 22% זול יותר מתרחיש הבסיס), אחריו הרכב החשמלי, רכב הבעירה הפנימית ולבסוף רכב הפלאג-אין שנותר היקר ביותר (73 אג' לק"מ נסועה).

טבלה 11 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 25 אלף ק"מ, (אג' לק"מ נסועה)

EV	PHEV	HEV	ICE	
44	50	39	19	עלות רכישה
10	11	12	21	עלות נסיעה
9	12	12	24	עלות תחזוקה
63	73	62	64	סה"כ עלות הבעלות

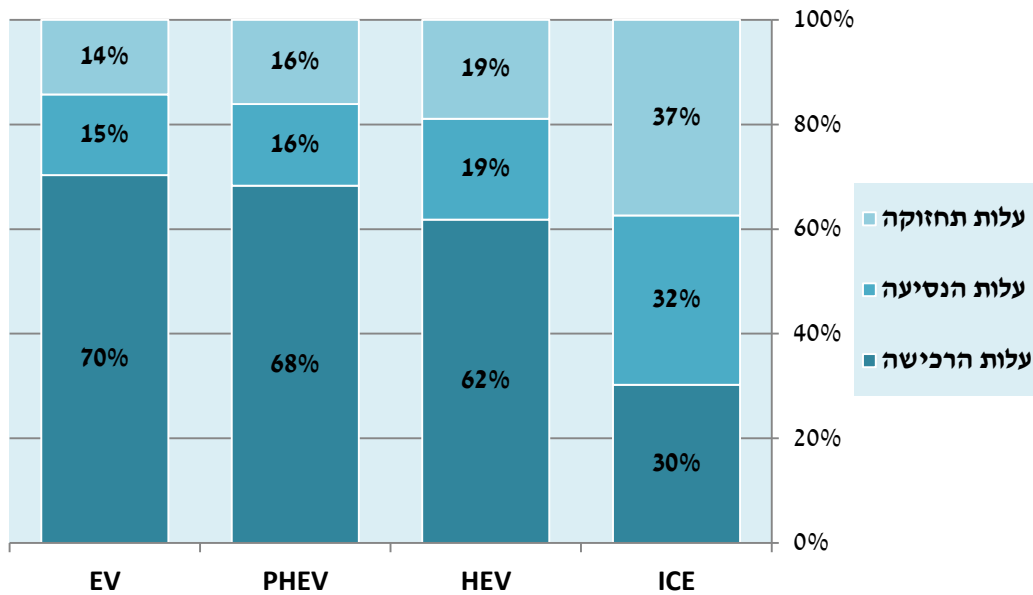
* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית

תרשים 5 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 25 אלף ק"מ, (אג' לק"מ נסועה)



* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית

תרשים 6 - השוואת התפלגות עלות הבעלות הכוללת, בנסועה שנתית של 25 אלף ק"מ



* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית

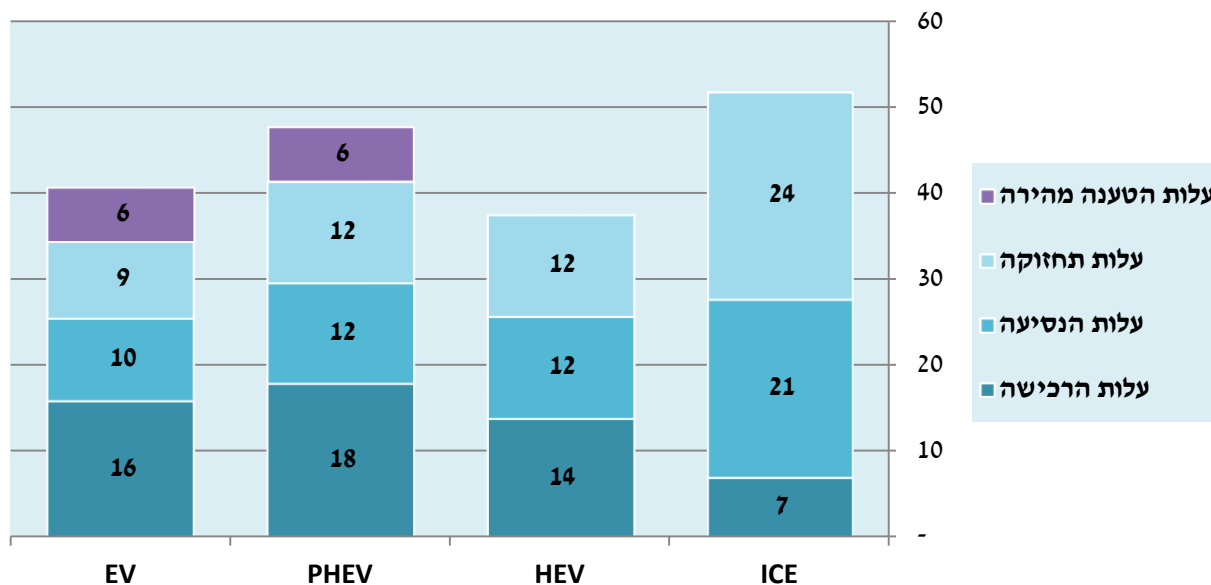
התחשיב הבא מציג את תוצאות התחשיב עבור נסועה גבוהה הרבה יותר המאפיינת מוניות וסובבת סביב 70 אלף ק"מ בשנה. רמת נסועה זו תצריך טעינה יומית נוספת (טעינה מהירה) ברכב חשמלי, בעלות של 6 אג' לק"מ נסועה²². גם בעבור רכב ההיברידי פלאג-אין הנחת התחשיב היא כי הנהג ידרש להטעין את הסוללה פעמיים ביום (טעינה ביתית + מהירה). הנחה זו חשובה מכמה היבטים: בלעדיה, ישתנה מנגנון צריכת האנרגיה של רכב זה ויידמה לזה של רכב היברידי רגיל (לאחר מיצוי הטווח החשמלי, יתר הקילומטרים יונעו באמצעות בנזין בלבד). על מנת להקטין השפעה זו, הונחה ההנחה האמורה כי נהג טיפוסי בתרחיש זה יטעין לפחות פעם ביום את הרכב במערכת טעינה מהירה (בנוסף לזו הביתית). זוהי הנחה סבירה ביותר לסוג זה של צי מכוניות. לפיכך, הוספו עלויות הטענה מהירה לרכב ההיברידי פלאג-אין ולרכב החשמלי תחת תרחיש זה; עבור יתר הרכבים הנחות הבסיס נותרות בעינן.

טבלה 12 - השוואת עלות בעלות כוללת והתפלגות העלויות, בנסועה שנתית של 70 אלף ק"מ

EV		PHEV		HEV		ICE		
%	אג' לק"מ	%	אג' לק"מ	%	אג' לק"מ	%	אג' לק"מ	
39%	16	37%	18	37%	14	13%	7	עלות הרכישה
24%	10	25%	12	32%	12	40%	21	עלות הנסיעה
22%	9	25%	12	31%	12	46%	24	עלות תחזוקה
15%	6	13%	6	0%	-	0%	-	עלות הטענה מהירה
100%	41	100%	48	100%	38	100%	52	סה"כ עלות הבעלות

* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית וטעינה מהירה אחת נוספת ליום

תרשים 7 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 70 אלף ק"מ (אג' לק"מ נסועה)



* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית וטעינה מהירה אחת נוספת ליום

תחת נסועה של 70 אלף ק"מ בשנה הרכב ההיברידי מספק את עלות הבעלות הנמוכה ביותר (בדומה לתרחיש הקודם). מעניין להבחין כי בהיקף נסועה זה הופכת עלות הבעלות הכוללת של רכבי הבעירה הפנימית ליקרה ביותר מבין סוגי הרכב שנבחנו.

²² כפי שפורט בהנחות: 34.5 אג' לק"מ (עלות תדלוק) x 0.18 קוטי"ש/ק"מ.

פחת מואץ

שיעור הפיחות השנתי שהונח בתרחיש הבסיס הוא 5.5% עבור רכבים קונבנציונאליים ו-10% עבור מכוניות חשמליות. על מנת לגלם סיכוני עלות תחזוקה והחלפת סוללה לאחר תקופת הבעלות, כמו גם סיכונים נוספים, נבדקו התוצאות בהנחת שיעור פחת שנתי של 15% לרכבים חשמליים.

טבלה 13 - השוואת עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ ובשיעור פחת מואץ לרכבים חשמליים

EV		PHEV		HEV		ICE		
%	אג' לק"מ	%	אג' לק"מ	%	אג' לק"מ	%	אג' לק"מ	
81%	82	80%	93	75%	72	40%	30	עלות רכישה
10%	10	10%	11	13%	12	28%	21	עלות נסיעה
9%	9	10%	12	12%	12	32%	24	עלות תחזוקה
100%	101	100%	116	100%	95	100%	74	סה"כ עלות הבעלות

* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית

העלאת שיעור הפיחות השנתי של הרכבים החשמליים מ-10% ל-15%, ייקרה את עלות הבעלות הכוללת בכ-15% עבור כלל הרכבים החשמליים אך דירוג העלויות נותר זהה לזה שבתרחיש הבסיס.

מחירי רכבים

הוזלת מחירי הרכבים החשמליים ב-20% מורידה את עלות רכישתם בשיעור של בין 12% ל-15%. מבחינת סה"כ עלות הבעלות לק"מ נסועה הרכב ההיברידי הפך לזול ביותר, כשאחרי הרכב החשמלי והקונבנציונאלי בפער קטן יחסית. רכב הפלאג-אין נותר היקר ביותר.

טבלה 14 - עלות בעלות כוללת לק"מ נסועה, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ ובשיעור הוזלה של 20% במחיר הרכבים חשמליים

EV		PHEV		HEV		ICE		
%	אג' לק"מ	%	אג' לק"מ	%	אג' לק"מ	%	אג' לק"מ	
74%	54	73%	61	66%	47	40%	30	עלות הרכישה
14%	10	13%	11	17%	12	28%	21	עלות הנסיעה
12%	9	14%	12	17%	12	32%	24	עלות תחזוקה
100%	73	100%	84	100%	71	100%	74	סה"כ עלות הבעלות

* ללא עלויות חיצוניות ובהנחת טעינה ביתית

הנתונים ממחישים את חשיבות הוזלת עלויות הרכבים החשמליים (בעיקר HEV ו-EV) על מנת להחזירם לשווקים ולהתחרות בביצועיו ומחיריו של הרכב הקונבנציונאלי.

4. ניתוח מחזור חיים למערכות הנעה חשמליות

4.1. רקע

ניתוח מחזור חיים (נמ"ח) היא גישה כוללת לאומדן של צריכת המשאבים, הפליטות הנגזרות וההשפעות הסביבתיות המיוחסים לטובין או שירותים, תוך לקיחה בחשבון של כל מחזור חייהם מעריסה ל'קבר'. תוצר הניתוח הינו חיזוי כמותי של סך ההשפעה – או "המחיר הסביבתי" – עקב יישום תהליך ייצור המוצר פר יחידת מידה (משקל, נפח, אנרגיה וכיו"ב), לרוב במונחי כמות פליטות (גזי-חממה, מזהמים) וניצול משאבים (צריכת אנרגיה, מים וניצול קרקע לדוג'). לפיכך, גישה זו מאפשרת בחינה השוואתית של חלופות שונות של תהליכים ומערכות והשלכות הצפויות בעת יישומן. במסגרת עבודה זו, היקף ניתוח מחזור החיים יכלול ויגבל לפליטות וצריכה אנרגטית, ויבחן את החלופות השונות הן בתחום הדלקים מפסולת והן במערכות הנעה חשמליות אל מול החלופה הקונבנציונאלית.

4.2. אפיון היקף ושלבם בניתוח

ניתוח מחזור-חיים של תחבורה מקיף מספר תהליכים, חלקם עוקבים וחלקם מתרחשים במקביל. מתודולוגיות שונות מגדירות את היקף הניתוח בהתאם לאופיין ומטרותיהן כאשר לדוגמא, תהליכי ייצור הרכב עצמו לא נמדדים במסגרת נמ"ח – כפי שאכן מוצג בדו"ח זה.

ככלל, מקובל לחלק נמ"ח בתחבורה לשתי שרשראות תהליכים, המשיקות זו לזו :

- **מהבאר למיכל, Well-to-Tank (WTT)** או לחליפין Well-to-Pump (WTP). ב-WTT מתייחסים לנתיב הדלק עצמו – הפקה, הובלה, ייצור, אכסון וחלוקה – לרוב במונחי אנרגיה, נפח או משקל של הדלק הנוצר בתהליך.
- **מהמיכל לגלגל, Tank-to-Wheel (TTW)** או לחליפין Pump-to-Wheel (PTW). ב-TTW מתייחסים למערכת ההנעה שברכב ולשימוש בדלק לפעולתה – לרוב במונחי צריכה ליחידת נסועה.

חלוקה זו למקטעים מאפשרת ניתוח השוואתי בין דלקים ומערכות הנעה שונות, ושילובים אפשריים שונים בין השניים. חיבור בין WTT ו-TTW מאפשר לקבל ניתוח המקיף את מחזור החיים **מהבאר לגלגל**,

Well-to-Wheel (WTW)

בשל המגוון הקיים הן בנתיבי הדלקים (מהבאר למיכל) והן במערכות ההנעה (מהמיכל לגלגל), ישנו מספר גדול של קומבינציות דלק-מנוע. הצגת ניתוח מהבאר לגלגל לכלל השילובים האפשריים איננה פרקטית. לפיכך ובהתאם למבנה הפרקים בדו"ח, נבחרה גישה המחלקת את התהליכים לשני ניתוחים נפרדים, כאשר כל אחד מהם מהווה בסיס השוואתי בפני עצמו.

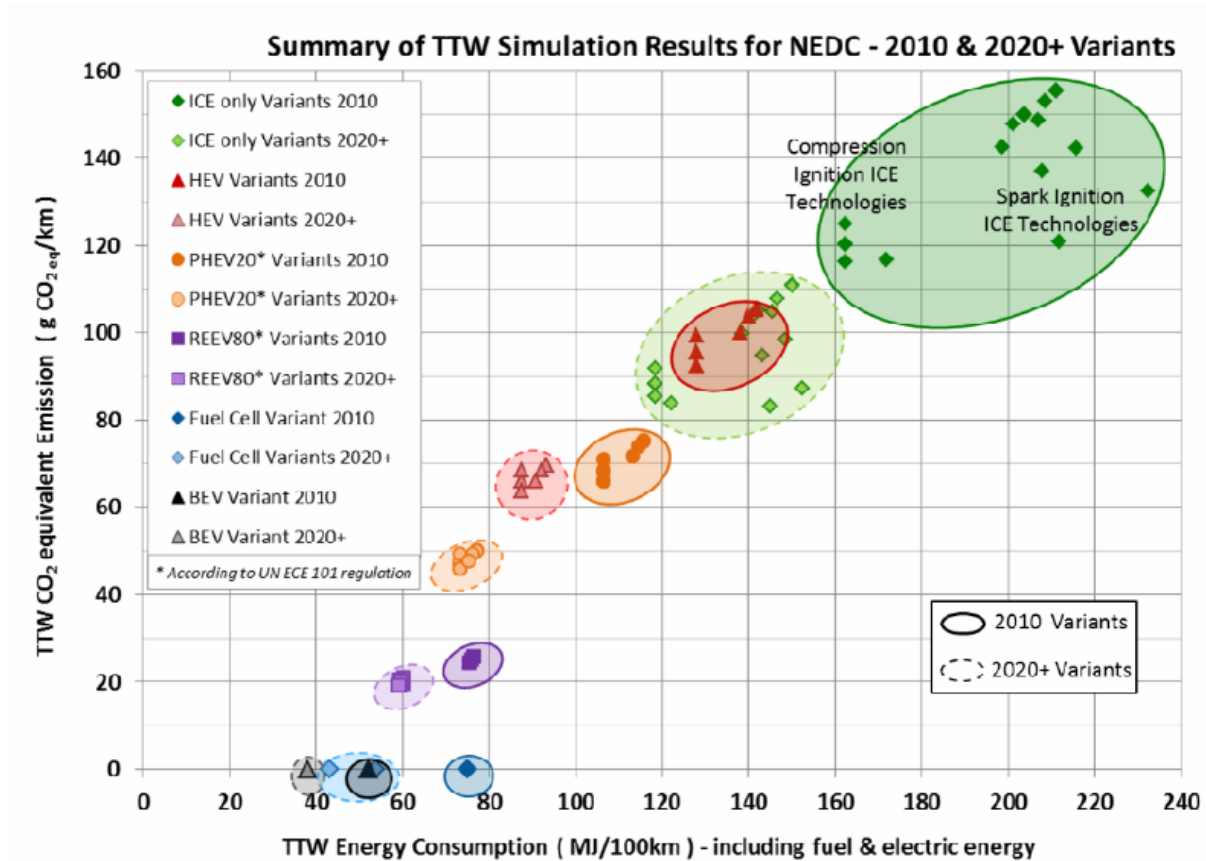
בדו"ח זה יוצגו ניתוחי מחזור חיים נפרדים בהתאם לשני הפרקים בדו"ח :

- נמ"ח מהבאר למיכל לפרק טכנולוגיות להפקת תחליפי דלקים לתחבורה מפסולת
- נמ"ח מהמיכל לגלגל לפרק שימוש ברכב חשמלי והיברידי לסוגיו

4.3. הבסיס ההשוואתי למערכות הנעה שונות - צריכה אנרגטית ופליטות

בחינה השוואתית של מערכות הנעה מסוגים שונים מתאפשרת כאשר משווים את כמות האנרגיה הנדרשת ואת תוצרי הפליטה לק"מ של נסועה. תרשים 8 מציג נתוני סימולציית פליטות וצריכת אנרגיה (מהמיכל לגלגל) לק"מ נסועה של רכבים בעלי מערכות הנעה חשמליות מסוגים שונים, כאשר לכל טכנולוגיה מוצגים הנתונים הנוכחיים (2010) והעתידיים (+2020).

תרשים 8 - סימולציית פליטות וצריכה אנרגטית של מערכות הנעה חשמליות לסוגיהן לעומת ICE, במצב הנוכחי ובתרחיש עתידי



מקור: JEC (2013)

ניתן לראות שהשיפורים הצפויים במנועי בעירה פנימית עד שנת 2020 יביאו אותם אל מאפייני הפליטה וצריכת האנרגיה של המנועים ההיברידיים הנוכחיים (2010). הפליטות וצריכת האנרגיה של מנועים היברידיים פלאג-אין (עם טווח חשמלי של 20 ק"מ) נמוכה אף יותר, בעוד שמנועי Range-extended EV (עם טווח חשמלי של 80 ק"מ) מתאפיינים ברמת פליטות וצריכת אנרגיה הנמוכה ביותר למערכת רכב הכוללת מנוע בעירה פנימית. ניתן גם לראות כי מערכות הנעה מסוג תא דלק וחשמלי מלא מתאפיינות בצריכת האנרגיה הנמוכה ביותר ואפס פליטות (בהתייחס ל-TTW בלבד).

4.4. מתודולוגיית הניתוח

על מנת לקבל תוצאות בעלות מהימנות גבוהה ואשר ניתן יהיה להשליך מהן לגבי רלוונטיות למשק הישראלי, נבחר מודל **GREET** (Greenhouse gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation)²³ כמקור בן-סמכה בתחום נמ"ח בתחבורה. מודל זה, אשר פותח ומתוחזק ע"י Argonne National Laboratory עבור משרד האנרגיה האמריקאי (DOE), מנתח את תשומות האנרגיה והפליטות הנובעים ממקורות, תוצרים ותהליכים בייצור ובשימוש בדלקים לתחבורה ברמה הפרטנית של כל תהליך, חומר גלם ומערכות הנעה שונות. במודל מובנה מאגר נתונים עדכניים הרלוונטיים למשק האמריקאי, הכולל תמהילי דלקים ומקורות אנרגיה, מקדמי פליטות ומאפיינים של מגוון מערכות הנעה. כלי זה הוא למעשה הסטנדרט בבחינת נמ"ח בתחום הרכב, וכאמור בבסיסו רלוונטי לשוק האמריקאי על מאפייניו. מתוך שילובי מערכות ההנעה והדלקים במודל, נבחרו אלו הרלוונטיים לעבודה זו, והם אלו שהוצגו.

מקור מידע זה מוטה מטבעו בשל היותו מושתת על נתונים הרלוונטיים לארה"ב, כגון תמהיל דלקים בחשמל, תמהיל מקורות הדלקים, מרחקי ואמצעי שינוע והולכה, אקלים, חקלאות וכיו"ב. מעבר להשפעה הישירה, למשתתנים אלו ישנה גם השפעה עקיפה על דלקים ומערכות הנעה אחרים בשל חלקם בתהליכי הייצור, ההולכה והחלוקה. כך, לדוגמא, תמהיל החשמל אינו רלוונטי רק לרכב חשמלי, אלא גם לגז טבעי דחוס – בשל החשמל הדרוש לדחיסת הגז לאורך מערך ההולכה והחלוקה. לפיכך, יש לנקוט בזירות הנדרשת כאשר מבקשים להשליך את התוצאות המובאות להלן על המקרה הישראלי.

מודל ה-GREET משלב בין תוצאות פליטות גזי החממה, פליטות המזהמים ותשומות האנרגיה של ניתוח "מהבאר למיכל" של הדלקים בנתיבים השונים, ובין אלו המתקבלות בניתוח "מהמיכל לגלגל" של מערכות הנעה העושות שימוש בתמהיל של דלקים אלו (לדוגמא בנזין וחשמל המניעים רכב PHEV). המודל מושתת על שני דגמי רכב תיאורטיים (בנזין ודיזל, הנבדלים בעפירה ע"י הצתה לעומת בעירה ע"י דחיסה), להם מקדמי הצריכה ופליטות נתונים וקבועים בהתאם לשנת המודל. בעבור כל מערכת הנעה נוספים על בסיס זה מקדמי התאמה לתמהילי דלקים אחרים, עפ"י מאפייני הדלקים המיוחסים להם. במערכות הנעה המשלבות הנעה חשמלית, מוגדרים שני מצבים פעולה – פריקה (charge depletion) וטעינה (charge sustaining). בהתאם לטווח החשמלי המודל מחשב את שיעור השימוש בחשמל (פריקה וטעינה) מתוך הנסועה הכללית.

כאמור, שנת מודל הרכב משמשת כפרמטר במודל GREET, ומשפיעה על מקדם נצילות הרכב (רכב חדש יותר הינו בעל נצילות גבוה יותר). על מנת לשקף את הגיל הממוצע של צי הרכבים הפעיל, המודל מניח "פער טכנולוגי" – המוגדר כ-5 שנים בברירת המחדל – ביחס לשנת המודל הכללי הנבחרת. דהיינו, כאשר שנת הבסיס במודל היא לדוגמא 2015, נצילות מערכות ההנעה השונות מתייחסת לרכבים תוצרת שנת 2010. בישראל, שרכבים מונעי בנזין הינם הרוב המוחלט בה, הנחה זו קרובה למצב בפועל²⁴. עם זאת, מאחר ושיעור הגידול הצפוי בחדירת רכבים בעלי הנעה המשלבת הנעה חשמלית בשנים הראשונות הינו

²³ שנת 2013, גרסה 1.1.0.9210.

²⁴ עפ"י [הלשכה המרכזית לסטטיסטיקה](#), הגיל הממוצע של כלי הרכב המנועיים בישראל הגיע בסוף 2012 ל-6.9 שנים, בדומה לשנים 2006-2011.

גבוה (היות וכיום הם מהווים נתח שוק מצומצם מאוד, מספרית), ניתן להעריך כי בפועל הגיל הממוצע של רכבים אלו יהיה נמוך יותר באופן משמעותי – כלומר שיעורי הנצילות בפועל יהיו גבוהים יותר.

תוצאת המודל היא צריכה של יחידת אנרגיה ופליטות ליחידת נסועה, הן מהשימוש הישיר ברכב עצמו ("מהמיכל לגלגל") והן בכלל התהליך ("מהבאר למיכל").

4.5. ניתוח מחזור חיים "מהבאר לגלגל" למערכות הנעה חשמליות והיברידיות

הניתוח להלן יעסוק במלוא מחזור החיים של השימוש ברכבים בעלי מערכת הנעה חשמלית או חשמלית-היברידית, דהיינו במכלול של מקטעי "מהבאר למיכל" ו"מהמיכל לגלגל" לכדי ניתוח מחזור חיים מלא. יודגש כי הניתוח עוסק בשימוש ברכב בלבד, להבדיל משלבי הייצור והגריטה.

4.5.1. מערכות הנעה במודל

מערכות ההנעה שנבחרו מהמודל מייצגות את הטכנולוגיות המרכזיות המשלבות הנעה חשמלית ואשר מסוקרות בעבודה זו. במערכות ההיברידיות הדלק שבשימוש הוא בנזין דל-גופרית; אעפ"י שישנן אפשרויות הנעה היברידיות המונעות ע"י דלקים לא-קונבנציונליים (כגון אתנול ומתנול), הן לא הוכנסו לניתוח זה – ועל כל פנים אינן נמצאות בשימוש נרחב, וחלקן אף אינן בשימוש כלל. בנוסף, נכללו בניתוח מערכות בנזין וגז טבעי, כנקודת ייחוס למצב הקיים והחזוי באשר סוגי מערכות ההנעה הצפויות להוות חלק משמעותי במשק הישראלי בשנים הקרובות.

מערכות ההנעה שנבחרו מהמודל, ומרכיבי הדלקים עליהם הן פועלות מפורטים להלן:

- **Gasoline Car - בנזין**
Conventional Gasoline - 50%, Reformulated or Low-Sulfur Gasoline - 50%
- **Bi-fuel CNGV on CNG Car - גז טבעי (דו-דלקי)**
Compressed Natural Gas - 100%, Gasoline - 0%
- **Dedicated CNGV Car - גז טבעי (ייעודי)**
Compressed Natural Gas - 100%, Gasoline - 0%
- **Grid-Independent SI HEV: CG and RFG Car - היברידי (בנזין)**
Conventional Gasoline - 50%, Reformulated or Low-Sulfur Gasoline - 50%
- **Grid-Connected SI PHEV: CG and RFG Car - היברידי פלאג-אין (בנזין)**
Conventional Gasoline - 50%, Reformulated or Low-Sulfur Gasoline - 50%
- **Hydrogen Fuel-Cell Car - תא-דלק מימני**
Gaseous Hydrogen - 100%
- **Electric Car - חשמלי**
Electricity - 100%

4.5.2. התאמות של תמהיל החשמל במודל

לתמהיל מקורות החשמל ישנה השפעה רבה על מאפייני הפליטות הנובעות משימוש ברכב, במקטע "מהבאר למיכל" – בדגש כמובן על רכב חשמלי ורכב היברידי פלאג-אין. לאור השינויים המהותיים המתרחשים והצפויים להתרחש בשנים הקרובות בתמהיל החשמל הישראלי, הותאם תמהיל החשמל במודל לשני תמהילי חשמל בשתי נקודות זמן – שנת 2015 ושנת 2020:

תמהיל ישראל 2015 - בהתאם להנחיית משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים, נבחר תמהיל מייצג לתמהיל הנוכחי המורכב מ-55% ייצור חשמל מפחם ו-45% מגז טבעי. שנת 2015 נבחרה בשל שיקולים טכניים במודל GREET ובהתחשב בסוגיית גיל צי הרכב כפי שצוין לעיל.

▪ **תמהיל ישראל 2020** - בהתאם להנחיית משרד התשתיות הלאומיות, האנרגיה והמים, תמהיל החשמל לשנת 2020 נבנה בהתאם להנחות המובאות בדו"ח הוועדה הבינמשרדית לבחינת מדיניות הממשלה בנושא משק הגז הטבעי בישראל ("דו"ח צמח"). בדו"ח מובעת ההערכה כי בשנת 2020 שיעור החשמל שמיוצר על בסיס פחם יעמוד על לפחות 30%, שיעור ייצור החשמל באמצעות אנרגיות מתחדשות יעמוד על 7%, והיתר (63%) על בסיס גז טבעי – בהתאם להנחה כי בטווח הארוך יהיה מקור זה לפחות 60% מסך ייצור החשמל במשק. יצוין כי לא נבחר התרחיש שבו בחרה הוועדה (75% גז) היות ותרחיש זה הוא תרחיש קיצוני, אשר נבחר ע"י הוועדה ע"מ לייצג עמדה שמרנית; לעניינה של עבודה זו, שיעור מוגבל בהיקפו של גז טבעי בתמהיל מייצג עמדה שמרנית, היות ושיעור גדול יותר מגדיל את הפליטות ואת העלויות החיצוניות, באופן שמדגיש את הפער שבין מערכות הנעה חשמליות לקונבנציונליות.

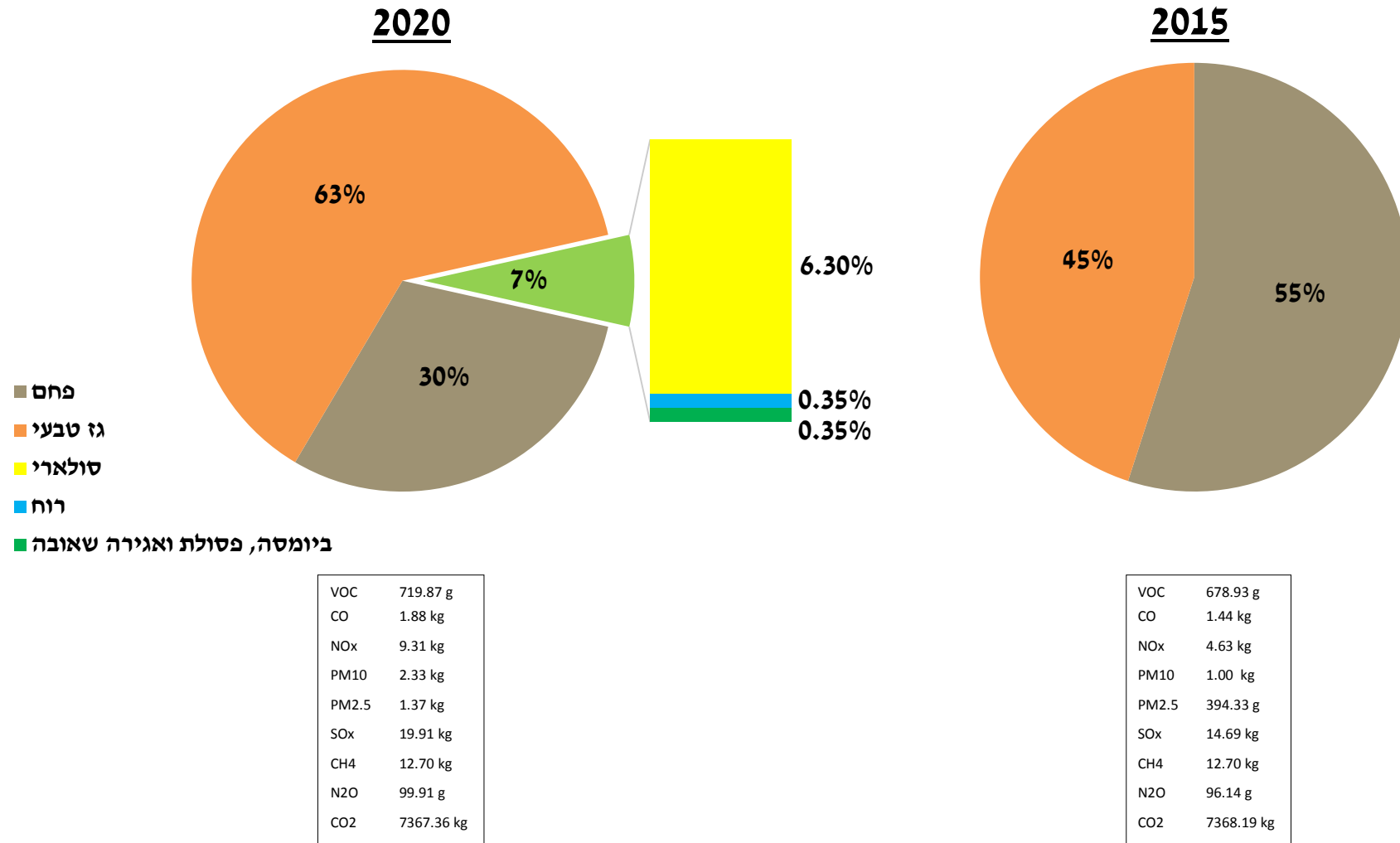
תמהיל האנרגיות המתחדשות המהוות 7% בתמהיל הכללי נקבע על 90% חשמל סולארי (PV), 5% אנרגיית רוח ו-5% של מקורות אחרים (פסולת ביומסה, אגירה שאובה וכיו"ב).

יתר המשתנים במודל לא שונו ונשארו מבוססים על המשק האמריקאי, בהתאם למגבלות שצוינו לעיל.

בתרשים 9 להלן מוצגים הרכבי התמהילים ונתוני הפליטות לשעט"ן:

שילוב רכב חשמלי והיברידי לסוגיו במערך התחבורה בישראל
 שלב ב': ניתוח כלכלי וניתוח מחזור חיים

תרשים 9 - תמהיל חשמל מייצג לישראל ל-2015 ו-2020, מקורות אנרגיה (שיעור בייצור) ופליטות (ק"ג לשע"ט"ן)



4.5.4. תוצאות ומסקנות

בתרשים 10 להלן מובאות תוצאות המודל לתשומות האנרגטיות במערכות ההנעה השונות, בחלוקה ל"מהבאר למיכל" ו"מהמיכל לגלגל", על פני השנים 2015 ו-2020 ובמונחי מגה-ג'אול לק"מ נסועה. ניתן לראות כי בעוד בכל המערכות צפויה ירידה בעלות האנרגטית בין 2015 ל-2020, רכב היברידי מאופיין בתשומות האנרגטיות הנמוכות ביותר ביחס ליתר הרכבים מונעי הבנזין, ובפער קטן יחסית מרכב חשמלי; בשנת 2020, בה תמהיל החשמל משתנה, הופך הרכב החשמלי לצרכן האנרגיה הנמוך ביותר לק"מ. כמו-כן, ניכר הפער שבין רכב היברידי פלאג-אין המאופיין בעלות אנרגטית גבוהה מזו של רכב היברידי עצמאי (ללא טעינה מרשת החשמל); הסיבה לכך נעוצה בעובדה שהתשומות האנרגטיות במקטע "מהבאר למיכל" בהנעה חשמלית הן גבוהות יחסית, ורכב היברידי פלאג-אין למעשה נושא בעלויות משני המקורות.

בתרשים 11 מוצגות פליטות גזי החממה במערכות ההנעה השונות, בחלוקה ל"מהבאר למיכל" ו"מהמיכל לגלגל", על פני השנים 2015 ו-2020 ובמונחי גרם לק"מ נסועה. סך פליטות גזי החממה מהשימוש ברכב בנזין הוא הגבוה ביותר ביחס ליתר החלופות, גם ב-2015 וגם ב-2020. מבין הרכבים ההיברידיים, רכב היברידי פלאג-אין פולט יותר גזי חממה, כאשר ב-2020 הפער מצטמצם עם המעבר לתמהיל חשמל "נקי" יותר. ניכר שיעור הפליטות הגבוה יחסית המיוחס לרכב חשמלי בשנת 2015, שהינו גבוה אף משיעור הפליטות מרכב היברידי. יש לציין כי מלוא הפליטות ברכב החשמלי מקורן במקטע "מהבאר למיכל" – דהיינו ייצור החשמל; בשל כך, שיעור הפליטות יורד באופן משמעותי ב-2020 עם המעבר לתמהיל חשמל עתיר גז טבעי והכולל אנרגיות מתחדשות, על חשבון ייצור מבוסס חשמל.

בתרשים 12 וטבלה 16 מוצגות עלויות חיצוניות של פליטות במערכות הנעה שונות, בחלוקה ל"מהבאר למיכל" ו"מהמיכל לגלגל", על פני השנים 2015 ו-2020 ובמונחי ש"ח לק"מ נסועה. עלויות אלו מתבססות על ערך העלויות החיצוניות של זיהום אויר מייצור חשמל, תעשייה ותחבורה המוכרות ע"י המשרד להגנה הסביבה²⁵, המוצגות בטבלה 15 להלן, במונחי ש"ח לגרם פליטות. הניתוח הוא תחת ההנחה שהעלויות הנוכחיות קבועות, כלומר העלויות לשנת 2015 ושנת 2020 זהות לעלויות המוכרות הנוכחיות ללא שינוי. פליטות במקטע "מהבאר למיכל" חושבו עפ"י העלויות במגזר התעשייה, למעט בעבור רכב חשמלי בו הן חושבו בהתאם לעלויות במגזר ייצור החשמל, וברכב היברידי פלאג-אין בו שוקללו עלויות מגזר התעשייה והחשמל בהתאם לחלקם היחסי בצריכה האנרגטית שבתפעול הרכב. פליטות במקטע "מהמיכל לגלגל" חושבו עפ"י העלויות במגזר התחבורה.

²⁵ העלויות העדכניות למועד עבודה זו, מתאריך 29/4/2013 -

http://www.sviva.gov.il/subjectsEnv/SvivaAir/Documents/airexternalcost/COairpollution290413_1.xls

שילוב רכב חשמלי והיברידי לסוגיו במערך התחבורה בישראל
 שלב ב': ניתוח כלכלי וניתוח מחזור חיים

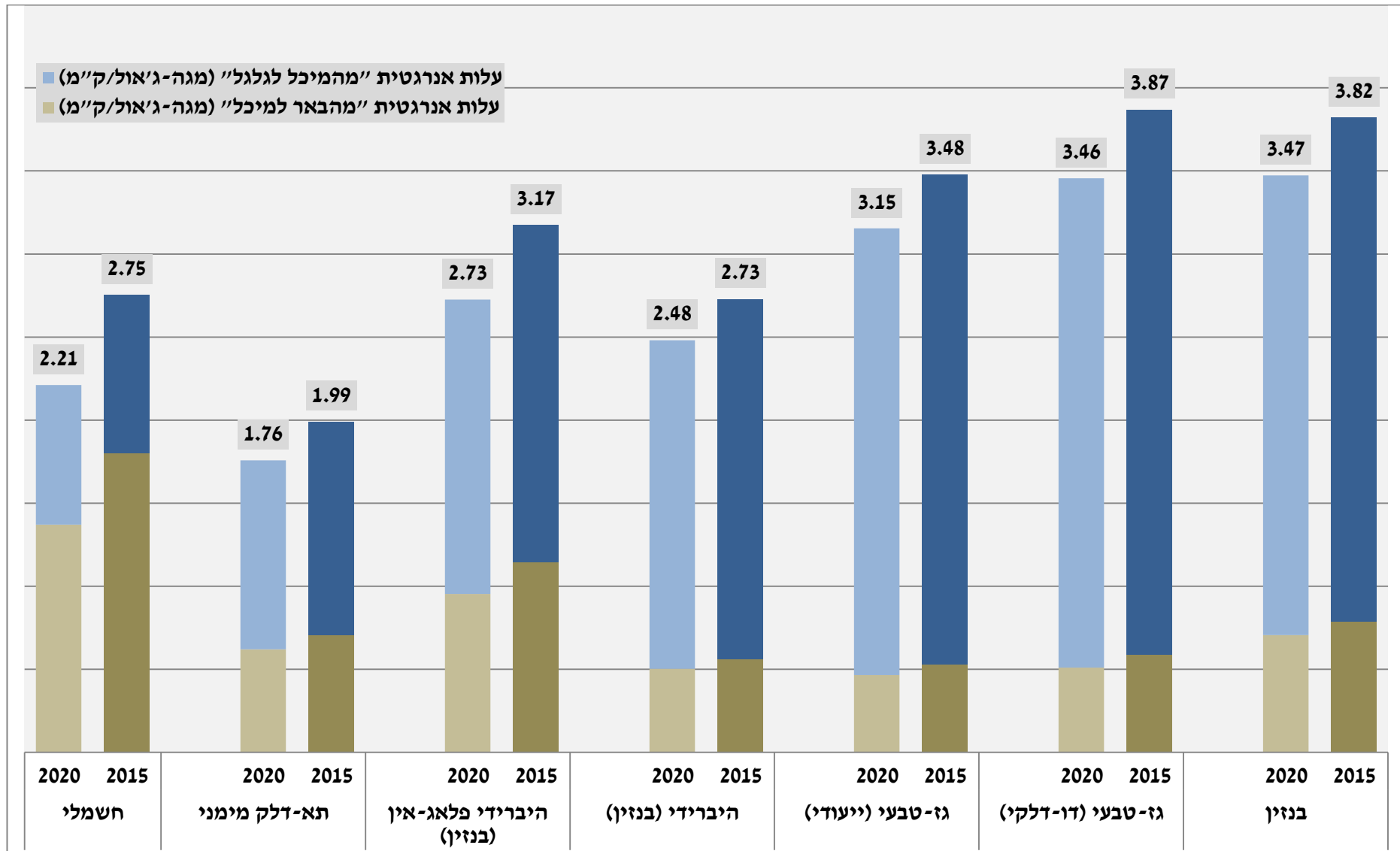
טבלה 15 - פירוט עלויות מוכרות לפליטות מסוגים שונים, במגזרי התעשייה, חשמל ותחבורה (ש"ח/גרם)

עלויות חיצוניות (ש"ח/גרם)			פליטות (ש"ח/גרם)
תחבורה	חשמל	תעשייה	
ש"ח 0.021454		ש"ח 0.016615	VOC
ש"ח 0.001042			CO
ש"ח 0.075461	ש"ח 0.020144	ש"ח 0.031724	NO _x
ש"ח 0.094707	ש"ח 0.049648	ש"ח 0.077142	PM ₁₀
ש"ח 0.145772	ש"ח 0.069645	ש"ח 0.119254	PM _{2.5}
	ש"ח 0.034783	ש"ח 0.044633	SO _x
ש"ח 0.002575	ש"ח 0.002575	ש"ח 0.002575	CH ₄
ש"ח 0.000103	ש"ח 0.000103	ש"ח 0.000103	CO ₂

מהתוצאות עולה כי העלות החיצונית הגבוהה ביותר לק"מ נסועה היא ברכב בנזין, גם ב-2015 וגם ב-2020. ברכב היברידי ב-2015 העלות החיצונית היא הנמוכה ביותר ביחס ליתר הרכבים מונעי בנזין ו/או חשמל, והעלות ברכב היברידי פלאג-אין ורכב חשמלי זהות. בשנת 2020 יורדות העלויות החיצוניות לק"מ נסועה ברכב חשמלי באופן משמעותי והופכות לנמוכות ביותר (פחות ממחצית העלויות לרכב בנזין ב-2015); כמו כן עלות הפליטות מרכב היברידי פלאג-אין יורדת אל מתחת לעלות הפליטות מרכב היברידי רגיל.

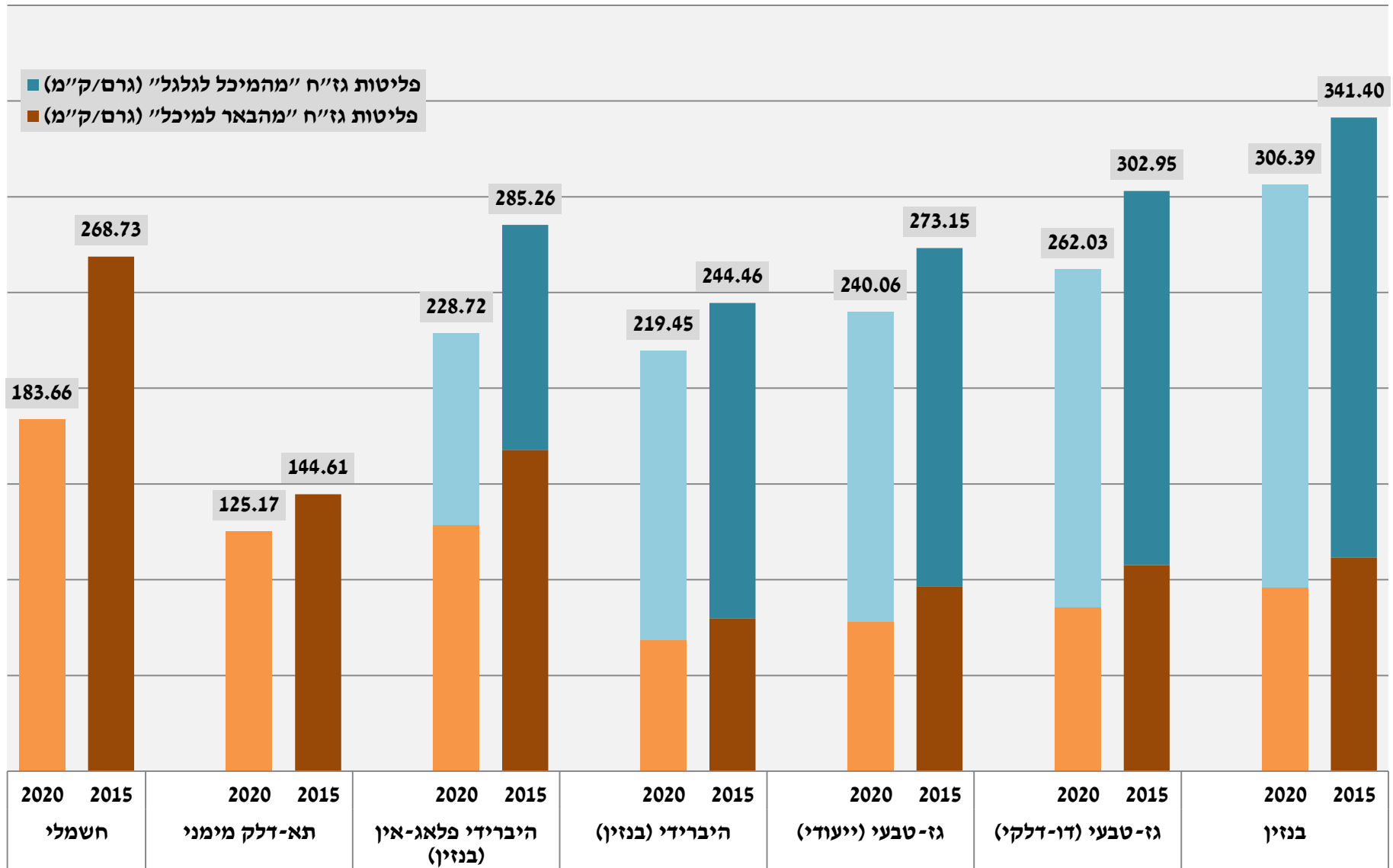
שילוב רכב חשמלי והיברידי לסוגיו במערך התחבורה בישראל
שלב ב': ניתוח כלכלי וניתוח מחזור חיים

תרשים 10 - עלות אנרגטית במערכות הנעה שונות, "מהבאר לגלגל", שנת 2015 לעומת 2020 (מגה-ג'אול/ק"מ)

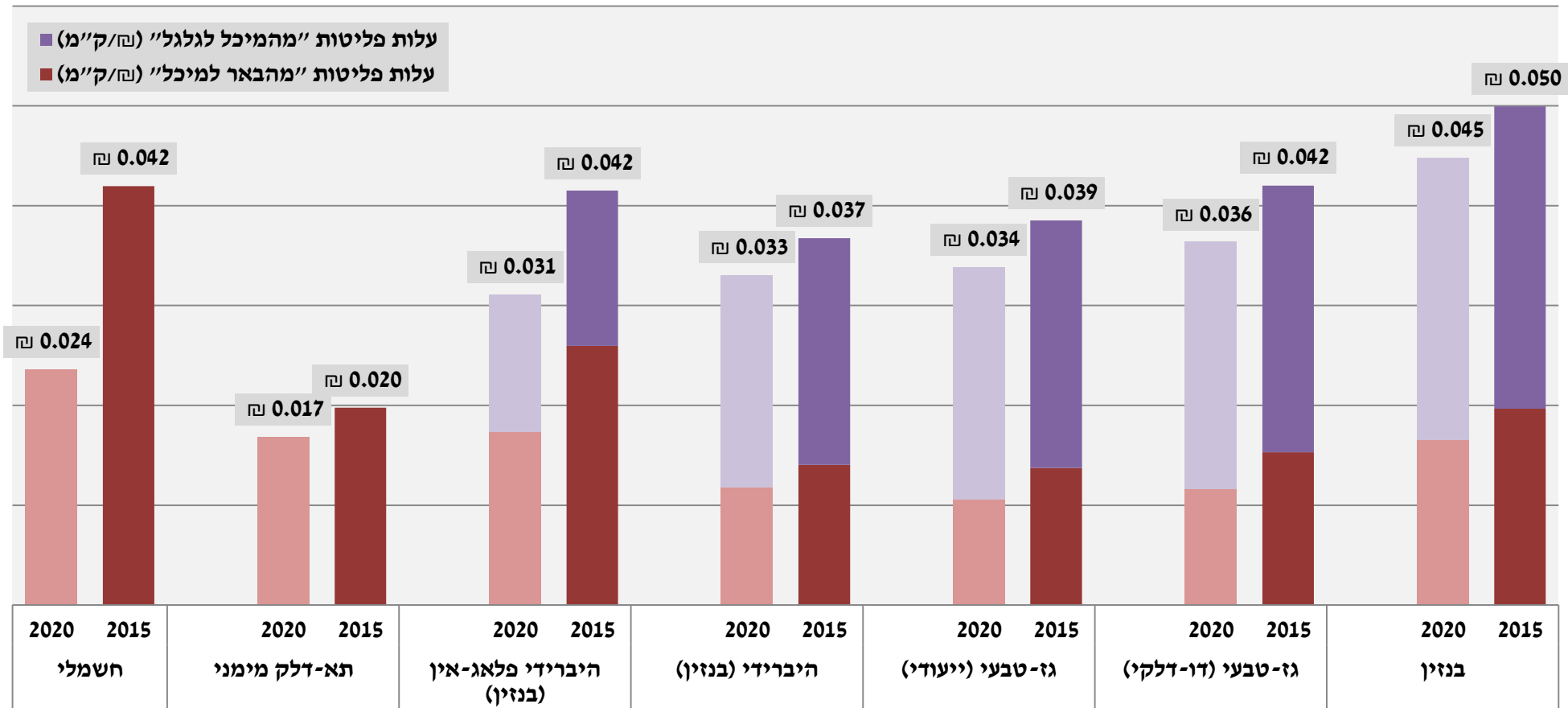


שילוב רכב חשמלי והיברידי לסוגיו במערך התחבורה בישראל
 שלב ב': ניתוח כלכלי וניתוח מחזור חיים

תרשים 11 - פליטות גזי חממה במערכות הנעה שונות, "מהבאר לגלגל", שנת 2015 לעומת 2020 (גרם/ק"מ)



תרשים 12 - עלויות חיצוניות של פליטות במערכות הנעה שונות, "מהבאר לגלגל", שנת 2015 לעומת 2020 (ש/ק"מ)



טבלה 16 - עלויות חיצוניות של פליטות במערכות הנעה שונות, "מהבאר לגלגל" (ש/ק"מ)

חשמלי		תא-דלק מימני		היברידי פלאג-אין (בנזין)		היברידי (בנזין)		גז-טבעי (ייעודי)		גז-טבעי (דו-דלקי)		בנזין		עלות פליטות (ש/ק"מ)
2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	2020	2015	
0.024	0.042	0.017	0.020	0.017	0.026	0.012	0.014	0.011	0.014	0.012	0.015	0.017	0.020	"מהבאר למיכל"
-	-	-	-	0.014	0.016	0.021	0.023	0.023	0.025	0.025	0.027	0.028	0.030	"מהמיכל לגלגל"
0.024	0.042	0.017	0.020	0.031	0.042	0.033	0.037	0.034	0.039	0.036	0.042	0.045	0.050	סה"כ עלות פליטות

5. סיכום

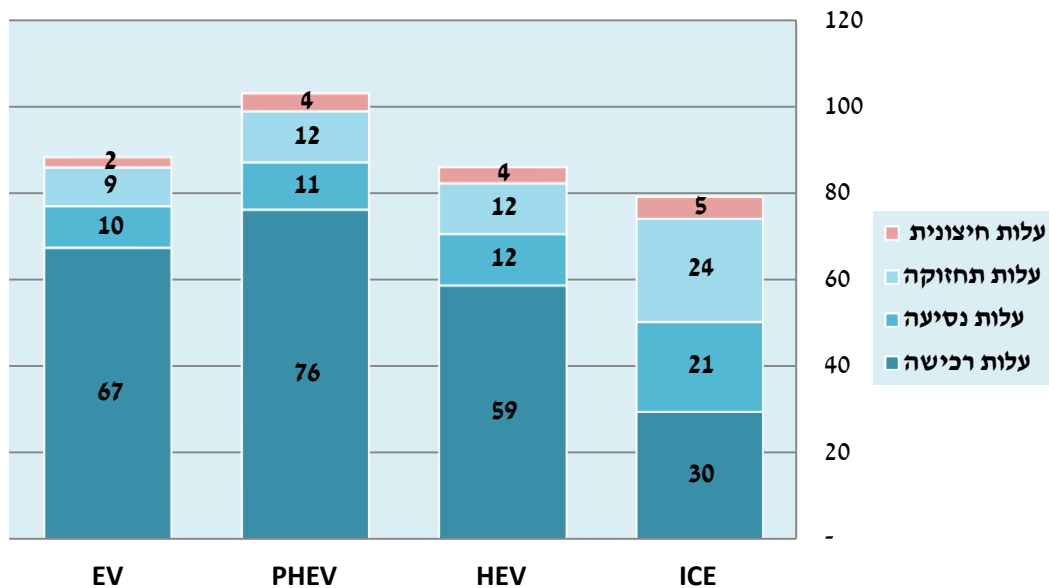
תחת הנחות תרחיש הבסיס נמצא כי עלות הבעלות הכוללת לק"מ נסועה הזולה ביותר, היא של רכב הבעירה הפנימית (הרכב הקונבנציונאלי). גם הפנמת העלויות החיצוניות שהוצגו בפרק הקודם אינה משנה את מערך היתרונות היחסיים שבתרחיש הבסיס. בטבלה הבאה מוצגות התוצאות הסופיות עבור תרחיש הבסיס, כולל עלויות חיצוניות:

טבלה 17 - סיכום עלות בעלות כוללת, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ, כולל עלויות חיצוניות (אג' לק"מ נסועה)

EV	PHEV	HEV	ICE	
67	76	59	30	עלות רכישה
10	11	12	21	עלות נסיעה
9	12	12	24	עלות תחזוקה
2	4	4	5	עלות חיצונית
89	103	86	79	סה"כ עלות בעלות

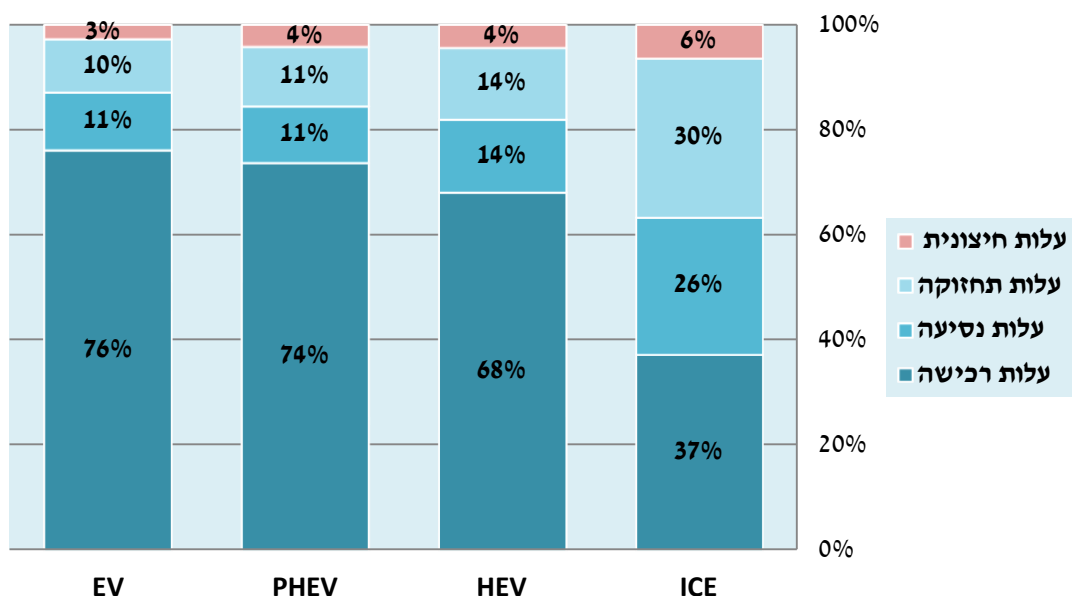
* בהנחת טעינה ביתית

תרשים 13 - סיכום עלות הבעלות כולל עלויות חיצוניות, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ (אג' לק"מ נסועה)



* בהנחת טעינה ביתית

תרשים 14 - סיכום התפלגות עלות הבעלות כולל עלויות חיצוניות, בנסועה שנתית של 16.4 אלף ק"מ



* בהנחת טעינה ביתית

התפלגות רכיבי עלות הבעלות מדגישה את פערי המחירים של הרכבים החשמליים (על סוגיהם) ביחס לרכב הבעירה הפנימית תחת סט המחירים כיום. עוד עולה כי ככל שהרכב מבוסס יותר על הנעה חשמלית, כך קטנים שיעורי עלויות הנסיעה, התחזוקה והעלות החיצונית (כמו גם ערכם האבסולוטי) מסך עלות הבעלות הכוללת.

מבחינה הרגישות שנערכו נחלקים לשני סוגים: אלו הקשורים להיקף השימוש ברכב ואלו הקשורים ישירות או באופן עקיף למחיר הרכב. להלן התוצאות הסופיות עבור התרחישים שנבחנו בעבודה, כאשר העלויות הזולות והיקרות ביותר מסומנות בירוק ואדום, בהתאמה:

טבלה 18 - סיכום תוצאות סופיות בתרחישים השונים, (אג' לק"מ נסועה)

EV	PHEV	HEV	ICE	רכב
86	99	83	74	בסיס
101	116	95	74	פחת מואץ על רכבים חשמליים
73	84	71	74	הוזלת רכבים חשמליים
63	73	62	64	נסועה של 25 אלף ק"מ
41	48	38	52	נסועה של 70 אלף ק"מ

ניתן להבחין, באמצעות הטבלה, בעיקרי החסמים וההזדמנויות בקבוצות הרכב שנבחנו. תרחיש הבסיס ותרחיש הפחת המואץ מגלמים את חסרונותיהם העיקריים של משפחת הרכבים החשמליים כיום – מחיר הרכישה הגבוה ועלויות התפעול והטיפול בסוללה לאחר תקופת הבעלות. האחרון מגולם בערכם השיורי של הרכבים החשמליים (שהוא מעין מחיר רכישה עתידי בשוק הרכבים המשומשים), שכן ככל שצרכנים יחששו מעלויות תפעול הרכב (מעבר לתקופת הבעלות הכלולה בתקופת האחריות) מחירו השיורי יהיה נמוך יותר, קרי שיעור הפחת בפועל יהיה גבוה יותר. בתרחישים אלו נמצא כי הרכב בו עלות הבעלות היא הזולה ביותר הוא רכב הבעירה פנימית והיקרה ביותר הוא הרכב ההיברידי פלאג-אין.

שלושת התרחישים התחתונים בטבלה מעלים את קרנם של הרכבים החשמליים – ביחוד את זה של הרכב ההיברידי, המספק את עלות הבעלות הוזלה ביותר בשלושתם. בעוד שבתרחיש ההוזלה (של מחיר הרכב), מוסר למעשה חלק מחסם המחיר ממנו סובלים הרכבים הללו ולכן מצבם משתפר, שני התרחישים התחתונים בטבלה עוסקים בהיבט אחר של השוק והוא התנהגות הצרכן. אין ספק כי ככל שהנסועה גבוהה יותר, כך גוברים יתרונותיהם של הרכבים החשמליים על חסרונותיהם מנקודת מבטו של הצרכן שכן הק"מ השולי הופך זול יותר (בשל היחלקות העלות הקבועה במספר ק"מ נסועה גבוה יותר). עוד עולה מהטבלה כי הרכב ההיברידי פלאג-אין הינו בעל עלות הבעלות הגבוהה ביותר ובפער ניכר מיתר הרכבים בכל ארבעת התרחישים הראשונים ושרק כאשר הנסועה גבוהה מאוד, מצליחה משפחת רכבים אלו לפרוץ את מחסום מחירה הגבוה (אם כי היא עדיין נותרת יקרה יותר מיתר הרכבים החשמליים).

נדגיש כי התחשיב מתבסס על סט מחירים ונתונים פסיקאליים הנכונים למועד כתיבת העבודה בלבד (מחירי דלקים, תמהיל ייצור החשמל ומחירו, מחירי המכוניות, נתוני צריכת הדלק וכו'). כמו כן, בשל מגבלות היקף העבודה, ישנן לא מעט העמקות מתודולוגיות שידרשו בעתיד על מנת לדייק את הממצאים ולהתאימם למשק הישראלי. נחזור על כך שהנתונים אינם משקפים בפועל את סט המחירים הקיים בשוק, היות והתחשיב לא כלל אמצעי מדיניות כלכליים כלל (מיסוי על דלק, מכוניות וכו'). לפיכך, יש להתייחס לנתונים כניתוח ראשוני גרידא, המאיר אור על מדרג העלויות ומערך היתרונות והחסרונות של קבוצות הרכבים שנבחנו, תחת תרחישים שונים.

המלצותינו למחקר עתידי כוללות את ההיבטים הבאים:

- הפנמת דפוסי הנהיגה בישראל (נסיעה עירונית/בין עירונית), מאפייני הנסועה והתייחסות לקבוצות רכבים שונות (משאיות, אוטובוסים, ציי מכוניות).
- הבנת והפנמת ההשפעות המשקיות של חדירת רכבים חשמליים בהיבטים של מאזן האנרגיה (חסכון בדלקים, עלייה בביקושים לחשמל, משטר טעינה) והיבטים כלכליים משקיים נוספים.
- הערכת פוטנציאל חדירת רכבים חשמליים לשוק בהיבטים של אפשרויות טעינה פרטיות (בהתאם לבניה צמודת קרקע / עם חניה צמודה), טעינה בשטחי מסחר וציי רכב.
- תרחישי פריסת נקודות טעינה מסוגים שונים בהיבטים של מאפייני נסועה, עלות/תועלת כלכלית, וכתשתית לאומית או פרטיות.
- השלכות סביבתיות משקיות רחבות יותר בהיבטים של שינוי בהיקף ובמאפייני הפליטות (מזהמים וגז"ח), שינוי בזיהום קרקע ע"י דליפות דלקים, שינויים בזיהום רעש, מיחזור / השבה / שימוש נוסף / הטמנה של סוללות היוצאות משימוש וכו'.
- השלכותיהם של פיתוחים טכנולוגיים נוספים כגון סוללות מתקדמות, קבלי-על, תאי-דלק מסוגים שונים (והיבטים תשתיתיים כגון תשתיות תדלוק מימן), טעינה אלחוטית וכיו"ב.