



מערכות הנעה ברכבים: ניתוח טכני ורגולטורי

איגוד יבואני הרכב בישראל ע"ר
Israel Vehicle Importers Association



בשנים האחרונות, מגזר התחבורה העולמי חווה מהפכה משמעותית, המונעת על ידי פיתוחים מהירים של טכנולוגיות הנעה, גידול במודעות הסביבתית, והקשחת תקנות הרגולציה.

לא עוד מנועי בעירה פנימית בלבד, אלא קשת רחבה של מערכות הנעה, מהיברידיות ועד חשמליות ומימניות.

לאור התפתחויות אלו, מצאנו לנכון לרכז את המידע המקצועי תחת מסמך אחד שיציג את מכלול החלופות הקיימות כיום, על יתרונותיהן וחסרונותיהן תוך הצגה מעמיקה של המאפיינים הטכניים שלהן ואופן יישומן בשוק הרכב העולמי.

השיח הטכנולוגי הולך ונעשה מורכב ומערכות ההנעה ברכב, מעבר להיותן עניין טכני, הופכות לאבן יסוד במדיניות תחבורה, אנרגיה וסביבה. מערכת ההנעה של כלי רכב מהווה גורם מכריע בקביעת יעילות האנרגיה, פרופיל הפליטות, וביצועיו הכוללים, ולכן נמצאת בליבת המאמצים לפיתוח ניידות בת-קיימא.

היסטורית, מנועי בעירה פנימית (ICE) שלטו בשוק בזכות צפיפות האנרגיה הגבוהה, עמידותם, וזמינות תשתיות התדלוק הנרחבות. עם זאת, העלייה במודעות להשפעות פליטת גזי החממה, התלות בדלקים מאובנים (פוסיליים) וזיהום האוויר האורבני האיזו את הפיתוח ואת הטמעתן של מערכות הנעה חלופיות, הכוללות רכבים היברידיים (HEV), רכבים היברידיים נטענים (PHEV), רכבים חשמליים (BEV), רכבי מימן ותאי דלק (FCEV), וכן מערכות הנעה מבוססות דלקים חלופיים. טכנולוגיות חדשות אלו מייצרות הן הזדמנויות והן אתגרים הנדסיים, הדורשים חדשנות בתחום אגירת האנרגיה, תשתיות הטעינה, ייצור הדלק, ולוגיסטיקה של שרשרת האספקה.

מסמך זה, הנו תוצאה של עבודה מעמיקה, ניסיון מקצועי ואמונה שהבנה טכנית עמוקה היא הבסיס להבנת שוק הרכב העתידי וליכולותינו לנסות ולחזות תהליכים עתידיים ולהיערך אליהם.

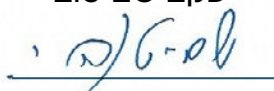
מערכות ההנעה מסווגות בהתאם ליישומן בקטגוריות שונות של כלי רכב, כולל רכבי נוסעים, משאיות מסחריות, אוטובוסים לתחבורה ציבורית, ציוד חקלאי וכלי רכב להנדסה אזרחית, שלכל אחד מהם דרישות ביצועיות ותפעוליות ייחודיות.

בעבודה זו ביקשנו לחבר בין עולם ההנדסה לעולם המדיניות ולגשר בין הידע המדעי לבין קובעי הדרך בשטח כמו גם אנשים אשר שוק הרכב ומגמת התפתחותו מעניין אותם.

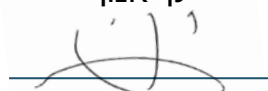
אנו מקווים כי מסמך זה ישמש ככלי עזר לאנשי תעשייה, רגולטורים ובעלי עניין המחפשים מידע מהימן ומעודכן אשר יזרוק אור על הנושא ויספק נקודת מבט רחבה יותר על ההווה והעתיד של מערכות ההנעה ברכב.

בכבוד רב,

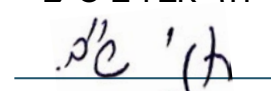
יעקב שם טוב



יקי אנוך



חזי אבירם שייב



3	הקדמה
6	תקציר מנהלים
7	מנוע בעירה פנימית (ICE) - מערכות הנעה
7	מנועי בנזין ודיזל
7	1. מבנה ועקרונות תפעול
11	2. נצילות אנרגטית וצריכת דלק במנועי בעירה פנימית
13	3. יתרונות וחסרונות של מנועי בעירה פנימית (ICE) (מנועי בנזין ודיזל)
14	4. שיקולים סביבתיים ורגולטוריים
15	5. דלקים חלופיים ודלק מתחדש - מסגרת רגולטורית והשלכות טכנולוגיות
17	מנועי הנעה בגז טבעי דחוס (גט"ד)
17	1. מבנה, עקרונות פעולה ואחסון הדלק
17	2. יתרונות וחסרונות של מערכות הנעה באמצעות גז טבעי דחוס
18	3. יישום באוטובוסים, משאיות וציוד מכני הנדסי
18	4. חישובי יעילות
19	5. תקנים ותקנות
19	6. סיכום
20	רכבים חשמליים (EV)
20	1. מבנה ועקרונות פעולה
21	2. חישובי טווח ויעילות
21	3. תשתיות טעינה ואנרגיה
22	4. סיכום
23	הנעה חשמלית היברידית (Hybrid Electric Propulsion) והיברידית פלאג-אין
	1. מערכת היברידית חשמלית (EHS - Electric Hybrid System):
23	מערכת הנעה משולבת בעלת ביצועים גבוהים
24	2. סוגי תצורות הנעה היברידיות
25	3. יתרונות וחסרונות של הנעה היברידית חשמלית

26	מערכות הנעת מימן ותאי דלק (FCEV)
26	1. עקרונות פעולה
28	2. יתרונות וחסרונות
28	3. תקנות בטיחות מערכות הנעה מימן ותאי דלק
29	4. פריסה גלובלית של רכבי מימן
30	5. פריסה גלובלית של תחנות טעינת מימן
31	6. פרויקט משאיות מימן בישראל
32	7. אתגרים ותחזית עתידית
33	שיתוף פעולה בין קובעי מדיניות, מהנדסים ובעלי עניין בתעשייה
35	שיעורי אימוץ של מערכות ההנעה השונות ושילובן בשוק העולמי
37	ישראל - מגמות רישום כלי רכב
39	טכנולוגיות וחידושים עתידיים
40	סיכום מערכות הנעה ברכבים ומבט אל העתיד
41	מקורות

ענף התחבורה העולמי נתון בעיצומו של מהפך טכנולוגי ואסטרטגי, הנובע מהצורך הדחוף להפחתת פליטות גזי חממה, עמידה ביעדי אקלים, שיפור איכות האוויר באזורים אורבניים, והתמודדות עם משברים גיאופוליטיים בשוקי האנרגיה. בעידן זה, מערכות ההנעה ברכב הפכו ממנגנון מכני פשוט יחסית לרכיב קריטי בשיקולים סביבתיים, הנדסיים ורגולטוריים של מדינות, יצרנים וצרכנים כאחד.

מאמר זה נכתב במטרה לספק מיפוי שיטתי של כלל מערכות ההנעה הקיימות והמתפתחות ברכב המודרני. הוא מציג ניתוח הנדסי מקיף של עקרונות הפעולה, יתרונות, חסרונות, ביצועים, והשפעות סביבתיות של כל טכנולוגיה, תוך התייחסות לרמות מוכנות טכנולוגיות (TRL), תשתיות תומכות ועמידה בתקנים בינלאומיים.

הפרק הראשון עוסק בהנעה הקלאסית - מנועי בעירה פנימית (ICE), המבוססים על מחזורי אוטו ודיזל. נבחנות השפעות מבנה המנוע, יחס דחיסה, מערכות הזרקה וניהול שסתומים על היעילות התרמית, פליטות מזהמים ותצרוכת הדלק. לצד זאת נדונים האתגרים הכרוכים בעמידה בתקני זיהום בינלאומיים ומעבר ההדרגתי מדלקים פוסיליים לדלקים חלופיים.

בהמשך, המאמר מציג סקירה של דלקים חלופיים ממקור בלתי מתחדש - גז טבעי דחוס (CNG), גפ"מ (LPG) ודלקים סינתטיים - המהווים פתרון מעבר זמני לשימוש באנרגיה מתחדשת.

חלקו המרכזי של המאמר מוקדש לרכבים היברידיים וחשמליים - HEV, PHEV, BEV - ולרכבים מבוססי תאי דלק מימניים (FCEV). כל טכנולוגיה נבחנת על פי עקרונות הפעולה, מערכות ההינע, אופטימיזציית אנרגיה, מערכות בקרה מתקדמות, נצילות, ביצועי טעינה, אורך חיי הסוללה או תא הדלק.

בנוסף, נדונים אתגרי התשתית - פריסת תחנות טעינה ציבוריות (AC/DC), תחנות תדלוק מימן (HRS), לוגיסטיקה ואינטגרציה של מערכות אלה במדינות שונות. המאמר מציג נתונים עכשוויים עם חלוקה לפי תחומי יישום: רכב פרטי, מסחרי, תחבורה ציבורית, וציוד הנדסי ומקרי מבחן מייצגים בארץ ובעולם.

לקראת סיום, המאמר מתייחס למגמות רגולטוריות ולשילובם באסטרטגיות תעשייתיות, לאתגרי מימוש הקשורים לשרשראות אספקה של חומרים והצורך בהסדרה רב-תחומית מצד רגולטורים, יצרנים וספקיות אנרגיה.

לסיכום, המאמר ממקם את מערכות ההנעה בלב מהפכת התחבורה והאנרגיה של המאה ה-21. הוא מציג תמונת מצב עבור העוסקים בגיבוש מדיניות תחבורה, הנדסת רכב, קיימות וטכנולוגיה. בעזרת מידע טכני, מתודולוגיות הערכה וניתוחים השוואתיים, המאמר מתווה כיוונים מעשיים ליישום מערכות הנעה מתקדמות, תוך שמירה על איזון בין חדשנות הנדסית, היתכנות כלכלית, ותרומה סביבתית.

מנוע בעירה פנימית (ICE) - מערכות הנעה

מנועי בנזין ודיזל

1. מבנה ועקרונות תפעול

מנועי **בעירה פנימית (ICE)** מייצרים אנרגיה מכנית באמצעות בעירה של תערובת דלק-אוויר בתוך תא סגור, אשר יוצרת גזים בטמפרטורה גבוהה המניעים בוכנות המחוברות לגל הארכובה. תהליך זה מבוסס על המרת האנרגיה הכימית האצורה בדלק לאנרגיה קינטית באמצעות בעירה מבוקרת, תוך אופטימיזציה של איזון בין תפוקת ההספק ליעילות האנרגטית. מחזור הפעולה הבסיסי של מנוע בעירה פנימית מוגדר על פי **מחזור אוטו** (למנועי בנזין) או **מחזור דיזל** (למנועי דיזל), כאשר כל אחד מהם פועל לפי רצף תרמו דינמי ייחודי.

מחזור אוטו, המיושם בעיקר במנועי בנזין בעלי הצתה באמצעות ניצוץ, פועל עם יחס דחיסה קבוע ותזמון הצתה מבוקר באמצעות מצתים. לעומתו, **מחזור דיזל**, המשמש במנועי הצתה בדחיסה, מתאפיין ביחס דחיסה גבוה יותר ומסתמך על הצתה ספונטנית של הדלק תחת תנאי לחץ גבוהים, מה שמוביל ליעילות תרמית משופרת. מחזורי פעולה אלו מותיבים את מאפייני הביצועים של המנוע, את צריכת הדלק ופרופיל הפליטות, ובכך משפיעים על התקדמות טכנולוגית ועמידה בתקנים רגולטוריים מחמירים.

מחזור אוטו (מנועי בנזין)

מהלך היניקה (Intake Stroke):

במהלך היניקה, שסתום היניקה נפתח ומאפשר לתערובת מדודה ומדויקת של אוויר ודלק להיכנס לתא הבעירה, כאשר הלחץ האטמוספרי דוחף את התערובת לתוך הצילינדר. במנועי בנזין מודרניים, תהליך זה משופר באמצעות מערכות תזמון שסתומים משתנה **Variable Valve Timing (VVT)** אשר מתאימות את פעולת השסתומים לשיפור זרימת האוויר והיעילות האנרגטית. בנוסף, מנועים מסוימים עושים שימוש במגדישי טורבו (**Turbochargers**) או במדחסים (**Superchargers**) על-מנת להגדיל את לחץ היניקה ולשפר את היעילות הנפחית. במנועי הזרקת דלק ישירה **Direct Injection (GDI)** הדלק מרוסס ישירות לתוך תא הבעירה בדיוק רב, מה שמאפשר שיפור בתערובת, בעירה יעילה יותר, צמצום פליטות ושיפור בהספק המנוע.

מהלך הדחיסה (Compression Stroke):

במהלך הדחיסה, התערובת נדחסת לנפח קטן יותר, מה שמעלה את הלחץ ואת הטמפרטורה שלה ומגביר את האנרגיה הפוטנציאלית התרמית. במנועי בנזין, תהליך זה תורם לשיפור יעילות הבעירה כאשר המצת מצית את התערובת. בנוסף, מנועים מודרניים מצוידים במנגנוני **יחס דחיסה משתנה variable compression ratio (VCR)** המאפשרים אופטימיזציה של צריכת הדלק והביצועים בהתאם לעומסים המשתנים.

מהלך העבודה (Power Stroke):

במהלך העבודה, מצת מצית את תערובת הדלק והאוויר הדחוסה, מה שמוביל לבעירה מהירה ולעלייה חדה בלחץ בתוך הצילינדר. כתוצאה מכך, הבוכנה נדחפת כלפי מטה בעוצמה, ממירה את האנרגיה הכימית לאנרגיה מכנית. תנועת הבוכנה מסובבת את גל הארכובה, אשר בסופו של דבר מניע את גלגלי הרכב. יעילות התהליך מושפעת מגורמים כמו יחס אוויר-דלק, תזמון ההצתה, ועיצוב תא הבעירה. במנועים עתירי ביצועים, טכנולוגיות כמו **הזרקת דלק ישיר (GDI)** ו**תזמון שסתומים משתנה (VVT)** ממקסמות את תהליך הבעירה, משפרות את ההספק ומפחיתות את צריכת הדלק. בנוסף, במנועים עם **מגדשי טורבו או מחדסים על**, הלחץ המוגבר בכניסת האוויר משפר את צפיפות תערובת הדלק-אוויר, מה שמוביל ליעילות בעירה גבוהה יותר וליצירת מומנט גבוה יותר.

מהלך הפליטה (Exhaust Stroke):

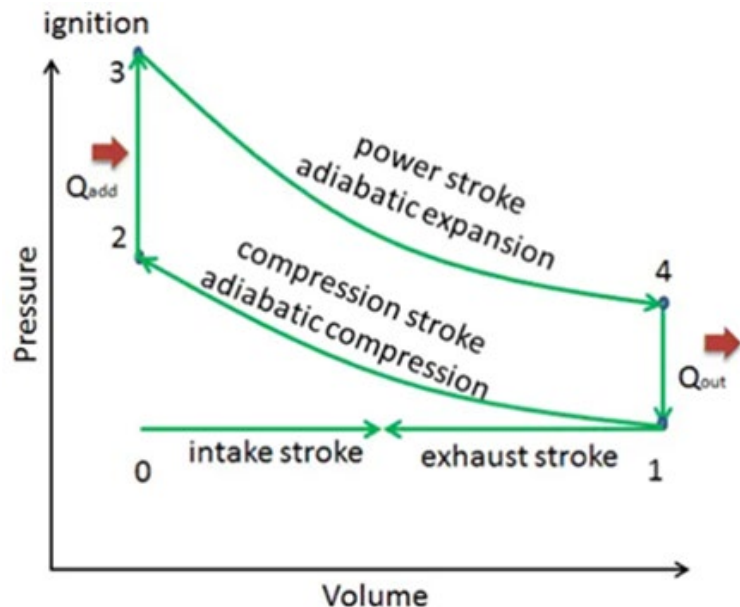
במהלך הפליטה, גזי הבעירה נפלטים החוצה כהכנה למחזור הפעולה הבא. שסתום הפליטה נפתח, והגזים השרופים בלחץ גבוה נדחפים מחוץ לצילינדר על ידי תנועת הבוכנה כלפי מעלה. פינוי גזי הפליטה ביעילות הוא קריטי לשמירה על ביצועי המנוע, שכן שאריות גזים עלולות לדלל את תערובת האוויר-דלק במחזור הבא ולפגוע ביעילות הבעירה. מנועים מודרניים משלבים **מערכות תזמון שסתומים משתנה (VVT- Variable Valve Timing)** ומחזור גזי פליטה (EGR) לשיפור התהליך, מה שמסייע בשליטה על פליטות המזהמים ובשיפור נצילות הדלק. במנועים עתירי ביצועים, סעפת פליטה מתואמת ומגדשי טורבו משמשים לשיפור תהליך הפליטה, להקטנת לחץ נגדי ולהגברת תגובתיות המנוע.

מהלך היניקה (1 → 2):
תערובת אוויר-דלק נכנסת
לצילינדר

מהלך הדחיסה (2 → 3):
התערובת נדחסת ומגבירה
הלחץ

מהלך העבודה (3 → 4):
מתרחשת הצתה, והגזים
המתרחבים דוחפים את הבוכנה

מהלך הפליטה (4 → 1):
גזים שרופים נפלטים

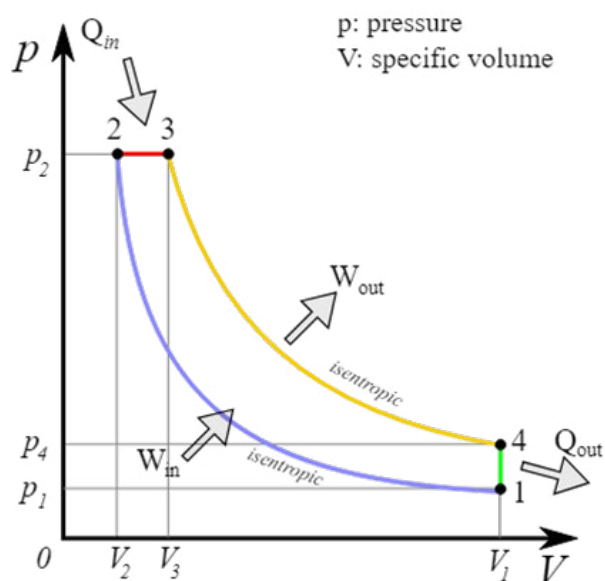


דיאגרמת PV של מחזור אוטו. השטח התחום על ידי קווי המסלול של המחזור השלם מייצג את סך העבודה שניתן לבצע במהלך מחזור אחד.

בניגוד למנועי בנזין, מנועי דיזל אינם מסתמכים על הצתה חיצונית באמצעות מצתים (Spark Ignition). במקום זאת, הם פועלים על עקרון הצתה בדחיסה (Compression Ignition), במסגרתו יחס הדחיסה הגבוה (הנע בדרך כלל בין 14:1 ל-25:1) מעלה את טמפרטורת האוויר בתוך הצילינדר לרמה שבה הדלק מתלקח באופן ספונטני בעת הזרקתו. תהליך דחיסה זה מוביל ליעילות תרמית גבוהה משמעותית בהשוואה למנועי בנזין, מכיוון שהלחצים הגבוהים מאפשרים בעירה מלאה יותר של הדלק. מבנה זה ממקסם את מיצוי האנרגיה מכל יחידת דלק, מה שמוביל לצריכת דלק נמוכה יותר ומקדם חיסכון משמעותי בצריכת האנרגיה. כדי לשפר עוד יותר את היעילות והביצועים, מנועי דיזל מודרניים משלבים מערכות מתקדמות לניהול הזרקת הדלק, כגון: שליטה מדויקת בתזמון ההזרקה (Injection Timing Control), מערכות הזרקה רב-שלביות (Multi-Stage Fuel Injection) ומגדשי טורבו (Turbocharging). טכנולוגיות אלו משפרות את ניצולת האנרגיה, מפחיתות פליטות מזהמים, ומאפשרות הפקת הספק גבוה יותר מיחידת נפח נתונה.

מנועי דיזל מציעים נצילות תרמית גבוהה יותר בהשוואה למנועי בנזין, מה שמיתרגם לצריכת דלק חסכונית יותר ולפליטה פחותה של CO_2 לכל יחידת אנרגיה מופקת. עם זאת, הטמפרטורות והלחצים הגבוהים בתהליך הבעירה מגבירים את יצירת תחמוצות החנקן (NO_x) וחלקיקים מזהמים (PM). כדי לעמוד בתקני הפליטה המחמירים כגון Euro 6 והתקנות העתידיות Euro 7, מנועי דיזל מצוידים במערכות לטיפול לאחר בעירה (After-Treatment Systems), מסנני חלקיקים דיזל (DPF - Diesel Particulate Filters), מסננים חלקיקים מוצקים כדי לצמצם פליטת (PM), מערכות הפחתת פליטת NO_x באמצעות קטליזטור סלקטיבי (SCR - Selective Catalytic Reduction) ומיחזור של גזי פליטה (EGR - Exhaust Gas Recirculation). שיפורים מתמשכים באסטרטגיות הזרקת הדלק, טכנולוגיות מגדשי טורבו מתקדמות, ואופטימיזציה של הבעירה מאפשרים הפחתה נוספת של מזהמים תוך שמירה על יתרונות היעילות התרמית והביצועים של מנועי דיזל.

- מהלך דחיסה* אדיאבטית (1 ← 2):
הבוכנה עולה ודוחסת את האוויר ללא חילוף חום, הלחץ והטמפר' עולים במידה ניכרת
 - מהלך בעירה בלחץ קבוע (2 ← 3):
הבוכנה מגיעה לנקודה העליונה שלה והדלק מוזרק. הבעירה מתרחשת בלחץ קבוע בזמן שנפח תא הבעירה גדל
 - מהלך התפשטות אדיאבטית (3 ← 4):
הגזים השרופים מתרחבים ודוחפים את הבוכנה כלפי מטה
 - מהלך דחיית חום בנפח קבוע (4 ← 1):
הבוכנה עולה שוב ומוציאה את גזי הפליטה. תהליך זה מתרחש בנפח קבוע
- *מהלך אדיאבטי- מצב בו אין חילוף חום בין המערכת לסביבה.



⊙ **בלוק צילינדרים וראש מנוע:** בלוק הצילינדרים מהווה את המבנה המרכזי של מנוע בעירה פנימית, בו שוכנים הבוכנות, תאי הבעירה ותעלות הקירור. הוא מיוצר לרוב מסגסוגות אלומיניום או ברזל יצוק, על מנת לאזן בין חוזק מבני, עמידות תרמית, יכולת פיזור חום אופטימלית. ראש המנוע, המורכב על הבלוק, מכיל את שסתומי היניקה והפליטה, מצתים (במנועי בנזין) או מזרקי דלק (במנועי דיזל). בנוסף, ראש המנוע כולל תעלות קירור ושימון, אשר מבטיחות ויסות טמפרטורת העבודה והפחתת שחיקה. עיבוד שבבי מדויק של ראש הצילינדרים חיוני ליצירת איטום מלא בתהליך הדחיסה, לשיפור ניצולת הבעירה, ולהפחתת הפסדי חיכוך - מרכיבים קריטיים לשיפור ביצועי המנוע, צמצום פליטות מזהמים, והארכת אורך החיים התפעולי.

⊙ **גל הארכובה (Crankshaft) ומוטות החיבור (Connecting Rods):** גל הארכובה ומוטות החיבור מהווים את הממשק המרכזי בין תנועת הבוכנות הלינארית לבין הסיבוב של המנוע, אשר מניע את מערכת ההינע של הרכב. מוטות החיבור (Connecting Rods) מחברים את הבוכנות לגל הארכובה וממירים את התנועה הקווית לתנועה סיבובית. גל הארכובה (Crankshaft) בנוי לרוב מפלדה מחושלת או ברזל יצוק, תוך התאמה לעומסים מכניים גבוהים הנוצרים בתהליך הבעירה. המבנה כולל מסבים וצירי איזון מדויקים, שתפקידם להפחית רעידות ושחיקה ולשפר את פעולת המנוע. תעלות שימון משולבות בגל הארכובה מאפשרות סיכה אופטימלית והפחתת הפסדי חיכוך, ובכך תורמות לעמידות ארוכת טווח של המנוע. במנועים עתירי ביצועים, נעשה שימוש בסגסוגות טיטניום, פלדות מתקדמות, או חומרים מרוכבים (Carbon Composites) עבור מוטות החיבור, כדי להפחית מסה סיבובית, לשפר יחס חוזק-משקל, ולייעל את נצילות האנרגיה.

⊙ **גל הזיזים (Camshaft) ומערכת השסתומים (Valve Train):** גל הזיזים ומערכת השסתומים אחראים לבקרת זרימת האוויר לתוך הצילינדרים ומחוצה להם, ובכך משפיעים ישירות על יעילות הבעירה והפקת ההספק של המנוע. גל הזיזים (Camshaft) פותח וסוגר את שסתומי היניקה והפליטה בתזמון מדויק בהתאם למחזור הפעולה של המנוע. מערכות מתקדמות לניהול תזמון השסתומים, כגון תזמון שסתומים משתנה **Variable Valve Timing (VVT)** והרמת שסתומים משתנה (Variable Valve Lift - VVL), מאפשרות התאמה דינמית של זווית ותזמון פתיחת השסתומים. טכנולוגיות מתקדמות, כמו מערכת תזמון כפול עם שני גלי זיזים עיליים (Dual Overhead Camshaft - DOHC), שינוי מופע גל הזיזים (Cam Phasing), ומעבר בין **פרופילי גלי זיזים** (Cam Profile Switching), משפרות את זרימת האוויר, מפחיתות הפסדי שאיבה, ומשפרות את תגובת המצערת. במנועים עתירי ביצועים ויעילות גבוהה, קיימת נטישה של מנגנוני גל זיזים מכניים לטובת מערכות מתקדמות כגון הפעלה **אלקטרומגנטית או אלקטרו-הידראולית של השסתומים**, המאפשרות שליטה ורסטיליות על מחזורי השסתומים ללא הפסדים מכניים מיותרים, מה שמשפר משמעותית את היעילות האנרגטית והביצועים.

⊙ **מערכת הזרקת דלק (Fuel Injection System):** מערכת הזרקת הדלק אחראית לאספקה מדויקת של דלק בכמויות מחושבות ביותר, תוך הקפדה על יעילות בעירה אופטימלית, הפקת הספק מקסימלית, ובקרת פליטות מזהמים. במנועים מודרניים נעשה שימוש במערכות הזרקה בלחץ גבוה כגון **הזרקה ישירה במסילה משותפת** (Common Rail Direct Injection - CRDI) במנועי דיזל, ו**בהזרקה ישירה לבנזין** (Gasoline Direct Injection - GDI) במנועי בנזין, המאפשרות: **אוטומיזציה** משופרת של הדלק

(Fuel Atomization) - יצירת טיפות דלק עדינות יותר לשיפור איכות הבעירה, שליטה מדויקת בהזרקה - אופטימיזציה של כמות הדלק, תזמון ההזרקה, וצורת ההתזה, המאפשרת יעילות אנרגטית גבוהה יותר והפחתת פליטות מזהמים, מזעור הפסדי דלק בלתי שרוף - מקטין את פליטת הפחמן ותחמוצות החנקן. במנועי דיזל, מערכות CRDI פועלות בלחצים אולטרה-גבוהים של עד 2,500 בר, מה שמאפשר ערפול דלק עדין במיוחד וערבוב הומוגני יותר עם האוויר, אשר משפר את שלמות הבעירה ומפחית את פליטת החלקיקים (PM). במנועי בנזין, מערכת GDI מזריקה את הדלק ישירות לתא הבעירה ולא לסעפת היניקה, מה שמאפשר: תגובת מצערת חדה יותר (Throttle Response) ומעבר כוח מהיר יותר. יחסי דחיסה גבוהים יותר ללא סכנת הצתה מוקדמת (Knocking), שתורמים לשיפור ביצועים וליעילות דלק משופרת. חידושים טכנולוגיים מתקדמים במערכות הזרקה כוללים: **הזרקה רב-שלבית** (Multi-Stage Injection) - לשיפור רציפות הבעירה להפחתת רעש וזיהום, **מזרקים פיאזואלקטריים** (Piezoelectric Injectors) - הפועלים במהירות גבוהה ומספקים שליטה מקרומטרית בדיוק ההזרקה ואסטרטגיות **ריבוד דלק** (Fuel Stratification) - המשפרות עוד יותר את היעילות, ומאפשרות שליטה מדויקת על תזמון ההזרקה, כמות הדלק ודפוסי הריסוס כדי ליעל את אספקת הכוח והפחתת הפליטות.

🕒 **מגדשי טורבו ומגדשי-על (Turbocharging and Supercharging):** מערכות הגדשת אוויר נועדו להגדיל את היעילות הנפחית של המנוע על ידי הגדלת מסת האוויר הנכנסת לתאי הבעירה, מה שמאפשר בעירת כמות דלק גדולה יותר והפקת הספק גבוה יותר מבלי להגדיל את נפח המנוע. מגדשי טורבו עושים שימוש באנרגיית גזי הפליטה להנעת טורבינה, אשר דוחסת את האוויר הנכנס לפני שהוא מוזרם לתאי הבעירה.

🕒 יתרונות השימוש בטורבו: שיפור בצפיפות האוויר - יותר חמצן לתהליך הבעירה, יעול בעירה והפחתת פליטות מזהמים - שיפור יחס הדלק-אוויר והקטנת פליטות CO₂, שיפור בצריכת הדלק - מאפשר **הפקת כוח רב יותר ממנועים קטנים** (Downsizing).

מגדשי-על (Superchargers): לעומת זאת, מונעים מכנית על ידי חיבור ישיר לגל הארכובה של המנוע, מה שמספק תוספת כוח מיידי ללא **השהיית טורבו** (Turbo Lag), אך חסרונם הוא באובדן נצילות בשל העומס המכני המוגבר. כדי למזער חסרונות תפעוליים ולשפר ביצועים, מנועים מתקדמים משלבים טכנולוגיות מתקדמות להגדשת אוויר: **מגדשי טורבו דו-תאיים** (Twin-Scroll Turbochargers) להפרדה בין גזי הפליטה בהתאם לפאזת הפעולה של הצילינדרים ולשיפור תגובת הטורבו, **מגדשי טורבו בגיאומטריה משתנה** (Variable Geometry Turbochargers - VGT) לשינוי זרימת גזי הפליטה בהתאם לעומס המנוע ולשיפור הביצועים בכל טווחי הסל"ד, **מגדשי-על חשמליים** (Electric Superchargers) לשימוש במקור אנרגיה חשמלי כדי לספק דחיסה מיידי של האוויר הנכנס ולמנוע השהיית טורבו.

2. נצילות אנרגטית וצריכת דלק במנועי בעירה פנימית

מנועי בעירה פנימית חווים הפסדי אנרגיה משמעותיים כתוצאה מפיזור חום, חיכוך מכני, ובעירה לא מושלמת. חלק ניכר מהאנרגיה הכימית של הדלק מתבזבז כחום במקום להפוך לעבודה מכנית שימושית, מה שמוביל לחוסר יעילות. פיזור החום מתרחש דרך בלוק המנוע, מערכת הקירור, וגזי הפליטה, כאשר מנועי בנזין טיפוסיים מאבדים כ-70%-75% מאנרגיית הדלק בתהליכים אלו. חיכוך מכני בין רכיבים נעים כגון בוכנות, מסבים, ומערכת השסתומים, מפחית אף הוא את היעילות האנרגטית. בעירה לא שלמה, במיוחד במנועים ישנים או שאינם מכוונים היטב, מובילה לפליטות פחמימנים לא שרופים

(HC) ותחמוצת פחמן (CO). טכנולוגיות מתקדמות כגון הזרקת דלק בלחץ גבוה, תזמון הצתה מדויק, חומרים בעלי חיכוך נמוך, ועזרים היברידיים משולבים, נועדו למזער הפסדים אלו ולשפר את יעילות ההמרה האנרגטית הכוללת.

במנועי בנזין (Gasoline Engines)

- ⊙ יעילות תרמית טיפוסית נעה בין 25-30%, כאשר מרבית ההפסדים נגרמים מפיזור חום דרך מערכת הקירור והפליטה. טכנולוגיות לשיפור היעילות במנועי בנזין מודרניים כוללות:
- ⊙ מגדשי טורבו (Turbocharging), הזרקת דלק ישירה (Gasoline Direct - GDI Injection), ותזמון שסתומים משתנה (Variable Valve Timing - VVT) לאופטימיזציה של זרימת האוויר בהתאם לעומס המנוע.
- ⊙ ובנוסף, מערכות ניצול חום פליטה (Waste Heat Recovery Systems - WHRS) להחזרת חום מבוזבז לשימוש חוזר להגברת היעילות, שימוש בציפויי בוכנות מתקדמים כגון Diamond-Like Carbon (DLC) ושמינים מתקדמים להפחתת חיכוך מכני.
- ⊙ צריכת הדלק משתנה בהתאם לנפח המנוע, תנאי העומס וטכניקות אופטימיזציה של מערכת ההינע כגון:
- ⊙ נטרול צילינדרים (Cylinder Deactivation) על ידי כיבוי צילינדרים בתנאי עומס נמוך לשיפור צריכת הדלק, מערכות מיקרו-היברידיות (Mild Hybridization) המשלבות מנוע חשמלי קטן לסיוע בהאצות והקטנת הדרישה מהמנוע התרמי.
- ⊙ ובנוסף, בקרת מנוע מתקדמת להתאמת תערובת דלק-אוויר בזמן אמת, תזמון שסתומים רציף (CVVT), ומערכות עצור-סע (Start-Stop) הפחתת צריכת הדלק בסרק.
- ⊙ הפחתת הפסדים מכניים באמצעות חידושים כמו ציפוי בוכנה בחיכוך נמוך, רכיבי מנוע קלים ומערכות ניהול תרמיות אופטימליות ממלאות גם הן תפקיד מכריע במזעור צריכת הדלק.

במנועי דיזל (Diesel Engines)

- ⊙ יעילות תרמית גבוהה יותר של 35-40% הודות ליחסי דחיסה גבוהים יותר, המאפשרים מיצוי אנרגיה גדול יותר מהדלק. יחסי דחיסה גבוהים מובילים ללחצי צילינדרים מוגברים, התורמים לבעירה מלאה יותר, לצריכת דלק נמוכה יותר ולפליטות CO₂ מופחתות לכל יחידת אנרגיה.
- ⊙ בנוסף, טכנולוגיות לשיפור בעירה ונצילות במנועי דיזל כוללות:
- ⊙ מערכות הזרקת דלק רב-שלבית (Multi-Stage Injection) לשיפור רציפות הבעירה והפחתת מזהמים, הגדשה מתקדמת (Advanced Turbocharging) ומערכות מסילה משותפת בלחץ גבוה (Direct Injection Common Rail - CRDI).
- ⊙ חידושים אלה תורמים לשיפור הביצועים תוך שמירה על עמידה מחמירה בדרישות לפליטות מזהמים שהוגדרו בתקינה הבינלאומית.

⊙ לחצי הזרקת דלק של מעל 2000 בר משפרים את תהליך הבעירה, ומובילים לבערה אחידה ויעילה יותר, הממזערים את פליטת פחמימנים לא שרופים (HC) ופליטת פחמן חד חמצני (CO). בנוסף, המדידה המדויקת של הדלק בלחצים קיצוניים אלו מייעלת את אספקת הכוח, מפחיתה את צריכת הדלק ומשפרת את תגובת המצערת. מערכות מתקדמות כגון מזרקים פיזואלקטריים ואירועי הזרקה מרובים בכל מחזור בעירה מחדדים את התהליך הזה עוד יותר על ידי מתן שליטה עדינה יותר על תזמון ההזרקה ודפוסי הריסוס, הפחתת רעש, רעידות ופליטות תוך מקסום צריכת דלק ואריכות ימים של המנוע.

3. יתרונות וחסרונות של מנועי בעירה פנימית (ICE) (מנועי בנזין ודיזל)

✓ יתרונות מערכות הנעה ICE

- ⊙ **זמינות רחבה של דלקים**
בנזין ודיזל זמינים בכל העולם, עם תשתית הפצה מבוססת, מה שהופך כלי רכב מנועי ICE לנגישים ביותר.
- ⊙ **טכנולוגיה מוכחת ובשלה**
טכנולוגיית ICE פותחה ושוכללה במשך למעלה ממאה שנה, וכתוצאה מכך מנועים אמינים, עמידים ויעילים.
- ⊙ **עלויות ייצור נמוכות יחסית**
הייצור ההמוני של רכבי ICE מותאם היטב, ומפחית את עלות הייצור ליחידה בהשוואה לטכנולוגיות הנעה חדשות יותר כמו מנועים חשמליים או מימן.
- ⊙ **צפיפות אנרגיה גבוהה של דלק**
לבנזין ודיזל יש צפיפות אנרגיה גבוהה, המאפשרת לרכבי ICE להגיע לטווחי נסיעה ארוכים מבלי להידרש לתדלוק תכוף.
- ⊙ **זמן תדלוק מהיר**
תדלוק רכב ICE לוקח דקות ספורות בלבד, בניגוד לרכבי סוללה חשמליים (BEV), הדורשים זמני טעינה ארוכים משמעותית.
- ⊙ **מערכת אקולוגית תחזוקה ותיקון מפותחת**
עם מיליוני רכבי ICE בפעולה, קיימת רשת נרחבת של מכונאים, חלקי חילוף ומומחיות לתיקונים ותחזוקה.
- ⊙ **ביצועים טובים יותר בקור קיצוני**
רכבי ICE נוטים לתפקד טוב יותר במזג אוויר קר בהשוואה לרכבים חשמליים, שחווים יעילות סוללה מופחתת בטמפרטורות נמוכות.
- ⊙ **יכולת גרירה ועבודה כבדה יותר (במיוחד עבור מנועי דיזל)**
מנועי דיזל מציעים מומנט גבוה בסל"ד נמוך, מה שהופך אותם לאידיאליים עבור יישומים כבדים, כגון: משאיות, אוטובוסים וכלי רכב תעשייתיים.
- ⊙ **גמישות באפשרויות הדלק**
מנועי ICE מסוימים יכולים לפעול על דלקים חלופיים, כגון אתנול, ביו-דיזל או גז טבעי, מה שעשוי להפחית את ההסתמכות על דלקים מאובנים.

- ⊙ **פליטת מזהמים** (HC, CO₂, NO_x, PM) מנועי ICE פולטים גזי חממה (CO₂) ומזהמים מזיקים כמו תחמוצות חנקן (NO_x), חלקיקים (PM) ופחמימנים (HC), התורמים לזיהום אוויר ושינויי אקלים.
- ⊙ **יעילות נמוכה יותר בהשוואה למערכות חשמל ומימן** למנועי ICE יש בדרך כלל יעילות תרמית הנעה בין 25-40%, כלומר חלק ניכר מהאנרגיה מדלק אובד כחום. לעומת זאת, למנועים חשמליים יש רמות יעילות של מעל 90%.
- ⊙ **תלות בדלקים מאובנים** (פוסיליים) ההסתמכות על בנזין ודיזל תורמת לדאגות לאבטחת אנרגיה והופכת את רכבי ה-ICE לרגישים לתנודות במחירי הדלק וחוסר יציבות גיאופוליטית.
- ⊙ **עלויות תפעול גבוהות יותר עקב צריכת דלק ותחזוקה** החלפות שמן תכופות, תחזוקת מנוע ועלויות דלק הופכים את רכבי ה-ICE ליקרים יותר לתפעול לאורך חייהם בהשוואה לרכבים חשמליים, הדורשים פחות תחזוקה.
- ⊙ **רעש ורטט** מנועי ICE מייצרים רעש ורעידות משמעותיים, ומפחיתים את נוחות הנסיעה בהשוואה לפעולה שקטה של כלי רכב חשמליים.

4. שיקולים סביבתיים ורגולטוריים

מנועי בעירה פנימית (ICEs) מבוססים על דלקים פוסיליים, ולכן הם מהווים גורם מרכזי בפליטת גזי חממה (GHG) ובזיהום אוויר. תהליך הבעירה של דלקי בנזין ודיזל משחרר כמויות משמעותיות של פחמן דו-חמצני (CO₂), תחמוצות חנקן (NO_x), תחמוצות גופרית (SO_x) וחלקיקים מזהמים (PM) - מזהמים המובילים להתחממות הגלובלית, מחלות נשימה, ולפגיעה במערכות אקולוגיות. כדי לצמצם את השפעותיהם הסביבתיות, גובשו רגולציות מחמירות הכוללות תקני פליטות מתקדמים, וחקיקה למעבר לדלקים נקיים יותר. מדינות וארגונים בינלאומיים מתווים מדיניות להפחתת השימוש במנועי בעירה פנימית, במקביל להאצת האימוץ של מערכות הנעה חשמליות ומימניות, כחלק ממעבר ארוך טווח לתחבורה מקיימת.

תקני פליטות Euro 6, 7 של האיחוד האירופי ו-EPA של ארה"ב

- ⊙ **תקני פליטות של מדינות האיחוד האירופי מגבילים את פליטת המזהמים על ידי הצבת גבולות מחמירים יותר ל: תחמוצות חנקן (NO_x), תחמוצת הפחמן (CO), חלקיקים מזהמים (PM), גזי חממה (GHGs).** תקן Euro 6, שנכנס לתוקף באיחוד האירופי, דרש הפחתת פליטות מרכבי דיזל ובנזין והוביל לשימוש נרחב בטכנולוגיות טיפול בגזי פליטה באמצעות מסננים קטליטיים סלקטיביים (Selective Catalytic Reduction - SCR), מסנני חלקיקים (Diesel Particulate Filters - DPF). בארה"ב, סוכנות הגנת הסביבה (EPA) מסדירה את תקני הפליטות האמצעות תקני Tier, תוך התמקדות בהפחתת CO₂ ו-NO_x ושיפור צריכת הדלק. נהלי בדיקת כלי רכב קלים (WLTP) אומצו ברחבי העולם כדי להחליף מחזורי בדיקות מיושנים ולספק ייצוג מדויק יותר של צריכת דלק ופליטות בתנאי נהיגה אמיתיים. תקנות אלו ממלאות תפקיד קריטי בעיצוב טכנולוגיות הנעה נמוכות פליטות ועידוד יצרניות רכב להשקיע בחלופות לרכב היברידי וחשמלי.

⊙ מסננים קטליטיים סלקטיביים (SCR) - Selective Catalytic Reduction - משתמשות בתמיסה מבוססת אוריאה (AdBlue) כדי להמיר פליטות NOx לחנקן ואדי מים בלתי מזיקים, מה שמפחית משמעותית את ההשפעה הסביבתית של מנועי דיזל. כהשלמה מסנני חלקיקים (Diesel Particulate Filters - DPF) לוכדים חלקיקים ועוברים מעת לעת רגנרציה כדי לשרוף פיה מצטבר וכדי לשמור על יעילות המסנן. חידושים נוספים כדוגמת מערכת מחזור פליטה (Exhaust gas recirculation - EGR) וזרזי חמצון משפרים עוד יותר את בקרת הפליטות, ומבטיחים עמידה במסגרות רגולטוריות שהוגדרו.

⊙ תקנות פליטת יורו 7: תקני יורו 7, האמורים להיות מיושמים על דגמי רכב חדשים לקראת סוף שנת 2026 ושנה לאחר מכן על כל רכב חדש, מייצגים תקנות מחמירות ביותר של האיחוד האירופי עד כה, במטרה להפחית משמעותית את תחמוצות החנקן (NOx), פחמן דו חמצני (CO₂) ופליטת חלקיקים ממנועי בנזין ודיזל כאחד. התקנות החדשות הללו יכפו ספי פליטה מותרים נמוכים יותר, דרישות בדיקת פליטות נהיגה בעולם האמיתי (Real Driving Emissions - RDE) מחמירות יותר כדי להבטיח עמידה בדרישות לאורך חיי הרכב. יורו 7 יציג גם בקורות הדוקות יותר על פליטת מזהמים לא מצינור הפליטה, אלא גם משחיקת בלמים וצמיגים, תוך התייחסות לנושאים סביבתיים רחבים יותר. יישום התקנות הללו ירחיק את יצרניות הרכב להאיץ את האימוץ של טכנולוגיות נקיות יותר, כולל ממירים קטליטיים מתקדמים, מערכות הנעה היברידיות-חשמליות וכלי רכב חשמליים, כדי לעמוד ביעדי הפליטה המחמירים.

⊙ תקני צריכת דלק ממוצעת של יצרני רכב (CAFE) בארה"ב

מחייב שיפורי יעילות של כלל הצי המיוצר על ידי יצרן כדי לרסן את צריכת הדלק ופליטת CO₂ על ידי קביעת יעדי צריכת דלק מחמירים יותר ויותר ודרישות הפחתת פליטות ליצרניות רכב. תקנות אלה מעודדות פיתוח של טכנולוגיות חסכוניות בדלק, כגון מנועי טורבו מוקטנים, מערכות הנעה היברידיות מתקדמות וחומרי רכב קלים. יצרניות הרכב חייבות לעמוד בתקני צריכת הדלק הממוצעת של החברה Corporate Average Fuel Economy - CAFE באמצעות שילוב של התקדמות הנדסית, אימוץ דלק חלופי ואווירודינמיקה משופרת. בנוסף, קנסות משמעותיים על אי-עמידה בתקנים מדרבנים את המעבר לרכבים חשמליים ולרכבים עם פליטת מזהמים נמוכה (Low-Emission Vehicles, LEVs).

5. דלקים חלופיים ודלק מתחדש - מסגרת רגולטורית והשלכות טכנולוגיות

בעידן שבו תחומי האנרגיה והתחבורה ניצבים בחזית המאבק בשינויי האקלים, גבר הצורך בפיתוח פתרונות ביניים ברי-יישום אשר יאפשרו מעבר הדרגתי ממערכות הנעה מבוססות דלקים מאובנים (fossil fuels) מסורתיים, כדוגמת בנזין וסולר, אל טכנולוגיות הנעה נקיות. תקן הדלקים האלטרנטיביים (AFD) של האיחוד האירופי ותקן הדלקים המתחדשים (RFS) בארצות הברית מהווים יוזמות רגולטוריות מרכזיות, שנועדו להאיץ את המעבר למקורות אנרגיה מתחדשים בתחום התחבורה באמצעות רגולציות מחייבות, תמריצים כלכליים ומנגנוני אכיפה. שלב המעבר מאופיין בשילוב של דלקים אלטרנטיביים מתחדשים כדוגמת: ביו-גז, דלקים ביולוגיים נוזליים וביודיזל, ושל דלקים אלטרנטיביים שאינם מתחדשים כדוגמת: גז טבעי, דלקים סינתטיים ושמינים מוקשים. תפקיד הדלקים האלטרנטיביים בתחבורה מקיימת להוות גשר ושלב ביניים טכנולוגי, המקדם שיפור מדורג של איכות האוויר, מפחית את טביעת הרגל הפחמנית ומכשיר את הקרקע למעבר עתידי מלא למקורות אנרגיה מתחדשים. שלב הביניים מתמודד עם אתגרים כגון הרחבת יכולות הייצור, כדאיות כלכלית, ואחידות רגולטורית הממתנים את השפעתם בשוק האנרגיה.

⊙ דלקים חלופיים מתחדשים

דלקים מתחדשים המופקים מביומסה (חומר אורגני שמקורו ביצורים חיים או בפסולת אורגנית) הופיעו כמרכיב במעבר למערכות אנרגיה בת קיימא. דלקים אלו, המופקים מחומרים אורגניים כגון: שאריות חקלאיות (גזם, קליפות תירס, קש, פסולת גידולים), שאריות תעשייתיות (פסולת מעץ, נסורת, פסולת נייר), שאריות עירוניות (פסולת אורגנית ממטבחים או מזבלות), גידולים ייעודיים לאנרגיה (קנה סוכר, תירס או עצים מהירי צמיחה ופסולת בעלי חיים (גללים), מציעים פוטנציאל להפחתה משמעותית את פליטת גזי חממה תוך שמירה על תאימות לתשתית הקיימת מבוססת בעירה.

1. ביו-דלקים (אתנול וביודיזל)

⊙ **אתנול (C_2H_5OH):** מופק מתסיסת חומר אורגני כגון: תירס וקנה סוכר ומשולב באופן נרחב עם בנזין (למשל 10% - E10 אתנול, או E85) לצורך הפחתת פליטות CO_2 נטו ושיפור יעילות הבעירה.

⊙ **ביודיזל (Fatty Acid Methyl Esters - FAME):** מיוצר משמנים צמחיים, שומנים מן החי, או שמנים ממוחזרים, ומשולב לרוב עם דיזל פוסילי (למשל B20 - תערובת של 20% ביודיזל). הביודיזל מפחית פליטות תחמוצות גופרית (SO_x) וחלקיקים מזהמים (PM), תוך שמירה על תאימות למנועי דיזל קיימים.

2. דלקים סינתטיים (E-Fuels) - דלקים נזליים נייטרליים פחמנית

דלקים המסונתזים באמצעות טכנולוגיית Power-to-Liquid (PtL) ומתאימים לשימוש כדלק קונבנציונלי. לדלקים אלו תאימות מלאה לתשתיות הדלק והטכנולוגיות הקיימות במנועי שריפה פנימית ולהן יתרון בפליטות CO_2 נטולות פחמן (Net-Zero Emissions).

3. שמנים צמחיים מוקשים (HVO) - חלופות דיזל מתקדמות

שמנים צמחיים מוקשים (Hydrogenated Vegetable Oils - HVO) מהווים חלופת ביודלק מתקדמת, אשר עוברת טיפול לשיפור יעילות הבעירה והיציבות הכימית. משמש כתחליף ישיר לדיזל ללא צורך בהתאמות מנוע מיוחדות. מפחית פליטות NO_x וחלקיקים מזהמים (PM) בהשוואה לדיזל קונבנציונלי.

⊙ דלקים אלטרנטיביים שאינם מתחדשים

דלקים אלטרנטיביים שאינם מתחדשים הם נושאי אנרגיה שאינם נגזרים ממשאבים מתחדשים, אך שונים מדלקים רגילים מבוססי נפט בהרכבם, בתהליך הייצור או בביצועיהם הסביבתיים. דלקים אלו מפותחים לרוב כדי לשמש כתחליף נקי יותר או יעיל יותר לדלקים מאובנים מסורתיים, תוך מינוף טכנולוגיות תשתית ומנועים קיימות. למרות שמקורם ממשאבי טבע סופיים (כגון גז טבעי, פחם או תוצרי לוואי של נפט), הם מתוכננים כדי להפחית מזהמים ספציפיים או לשפר את היעילות התפעולית. דוגמאות לדלקים שאינם מתחדשים: גז טבעי דחוס (CNG), גז טבעי נזלי (LNG), גז נפט נזלי (LPG).

מנועי הנעה בגז טבעי דחוס (גט"ד)

גז טבעי דחוס (CNG) הופיע כדלק חלופי בר-קיימא להנעת כלי רכב, במיוחד במגזרים כמו תחבורה ציבורית, הובלות מטענים ובנייה. היישום שלו באוטובוסים, משאיות וכלי רכב לבניית תשתית מציע יתרונות סביבתיים וכלכליים כאחד.

1. מבנה, עקרונות פעולה ואחסון הדלק

גז טבעי דחוס מורכב בעיקר ממתאן (CH_4), דחוס לפחות מ-1% מנפחו ומאוחסן בלחצים הנעים בין 20 ל-25,900 MPa (עד 3,600 psi). אחסון בלחץ גבוה זה מחייב שימוש במכלים חזקים, גליליים או כדוריים, המיוצרים בדרך כלל מפלדה או חומרים מרוכבים, כדי להבטיח בטיחות ועמידות.

שינויים במנוע

כלי רכב המונעים על ידי גז טבעי דחוס יכולים להשתמש במנועי בעירה פנימית שעברו שינוי והתאמה לפעול על גז טבעי. מנועים אלה עשויים להיות מותאמים לשימוש בגז טבעי בלבד או לשימוש משולב עם דלקים רגילים אחרים כמו בנזין או דיזל. השינויים העיקריים כוללים תושבות שסתומים מחוזקות ומזרקי דלק מיוחדים כדי להתאים את מאפייני הבעירה המובהקים של מתאן.

מערכת אספקת דלק

תשתית אספקת הדלק ברכבים העושים שימוש בגז טבעי כוללת קווי לחץ גבוה, ווסתי לחץ ומזרקים המותאמים לדלק גזי. המערכת מתוכננת באופן שהיא מבטיחה מדידת דלק מדויקת והיא שומרת על רמות לחץ אופטימליות במעבר ממכלל האגירה לתאי הבעירה, מה שמקל על בעירה יעילה ונקייה.

2. יתרונות וחסרונות של מערכות הנעה באמצעות גז טבעי דחוס

✓ יתרונות

⊙ **יתרונות סביבתיים** - פליטות מופחתות, שריפת גז טבעי גורמת לפליטות נמוכות יותר של פחמן חד חמצני (CO), תחמוצות חנקן (NO_x), חלקיקים (PM) ופחמימנים לא שרופים בהשוואה למנועי בנזין או דיזל. בנוסף, הגז הטבעי פולט כ-20-29% פחות CO_2 , מה שתורם להפחתת גזי חממה.

⊙ **יתרונות כלכליים** - חיסכון בעלויות דלק, מה שמוביל להפחתת עלויות התפעול עבור ציים המונעים בגז טבעי דחוס, ועלויות אחזקה נמוכות יותר בגלל אופי הבעירה הנקי של גז טבעי דחוס.

✗ חסרונות

⊙ **אתגרי צפיפות אנרגיה ואחסון** - לגז טבעי דחוס צפיפות אנרגיה נפחית נמוכה יותר בהשוואה לדיזל, מה שמחייב שימוש במכלי אחסון גדולים או מרובים כדי להשיג טווח רכב דומה.

⊙ **דרישות נפח אחסון** - האופי המגושם של גלילי אחסון הגז הטבעי בלחץ גבוה עלול לבוא על חשבון מטען או נוסעים, מה שמציב אתגרים עיצוביים, במיוחד בכלי רכב שהוסבו לשימוש בגז טבעי דחוס.

⊙ **תשתית תדלוק** - זמינות מוגבלת עקב מחסור בתחנות תדלוק של גז טבעי, במיוחד באזורים מסוימים עלול להגביל את טווח הפעולה והנוחות של רכבי אלה. בישראל, למרות תוכניות עבר ממשלתיות וכוונות להקמת תחנות תדלוק בפריסה ארצית, פועלת נכון להיום תחנת תדלוק ציבורית אחת במתחם אלון תבור בצפון. חברות אוטובוסים כדוגמת אגד, מטרופולין, סופרבוס, דן ואחרות המתפעלות אוטובוסים מונעי גז"ד עושות שימוש בתחנות תדלוק ניידות (Mobile Refueling Units - MRU) במתחמי התפעול שלהן.

3. יישום באוטובוסים, משאיות וציוד מכני הנדסי

אוטובוסים

אוטובוסים המונעים בגז טבעי דחוס משמשים בתחבורה הציבורית העירונית בשל היתרונות הסביבתיים שלהם ועלויות תפעול מופחתות. עיריות ברחבי העולם אימצו אוטובוסים אילו כדי לשפר את איכות האוויר ולעמוד בתקנות הפליטה.



משאיות

בתחום ההובלה, משאיות המונעות בגז טבעי דחוס מציעות חלופה נקייה יותר לכלי רכב המונעים בדיזל. בעוד שצפיפות האנרגיה הנמוכה יותר של הגז הטבעי מחייבת תדלוק תכוף יותר או מכלי אחסון גדולים יותר. התקדמות בטכנולוגיית המנוע ואחסון הדלק הפחיתה את האתגרים הללו, והפכה את משאיות אלה לאופציה ריאלית עבור הובלות קצרות עד בינוניות.



ציוד מכני הנדסי

היישום של מנועים המונעים בגז טבעי דחוס בכלים כגון: מלגזות ומחפרים, משמש כאסטרטגיה להפחתת פליטות באתרי עבודה. היצרנים מפתחים מכונות כבדות תואמות כדי לעמוד בתקנות סביבתיות מחמירות ולספק את הדרישה ההולכת וגוברת לשיטות בנייה בת קיימא.



4. חישובי יעילות

יעילות מנוע

מנועי גז טבעי דחוס (CNG) יכולים להגיע ליעילות תרמית דומה ואף עדיפה במקצת בהשוואה למנועי בנזין. דירוג האוקטן הגבוה של מתאן (RON 120) מאפשר שימוש ביחסי דחיסה גבוהים יותר ללא סכנת הצתה מוקדמת (Knocking), דבר שיכול לתרום לשיפור הנצילות התרמית. עם זאת, צפיפות האנרגיה הנמוכה של גז טבעי דחוס עלולה להפחית את טווח הנסיעה של הרכב, אלא אם כן נעשה שימוש במכלי אחסון גדולים יותר או מרובי נפח לצורך פיצוי אנרגטי.

שימוש בגז טבעי דחוס יכול להוביל להפחתה משמעותית של פליטת חלקיקים (NO_x) - עד 50%) בהשוואה למנועי דיזל. הפחתות אלו חיוניות לעמידה בתקני פליטה מחמירים ולשיפור איכות האוויר העירונית.

5. תקנים ותקנות

תקנים ותקנות של האיחוד האירופי

תקני בטיחות - רגולציה UNECE R115 של הוועדה הכלכלית של האו"ם לאירופה קובעת הוראות אחידות לאישור מערכות הנעה מונעות גז טבעי דחוס המותקנות על רכבים.

תקני פליטה - רכבי CNG באיחוד האירופי חייבים לעמוד בתקני פליטה מחמירים שמטרתם הפחתת מזהמים. תקני Euro VI שהוטמעו בשנת 2014 עבור כלי רכב כבדים קובעים מגבלות על תחמוצות חנקן (NO_x), פחמימנים (HC), פחמן חד חמצני (CO) וחלקיקים (PM). מנועי CNG בדרך כלל מייצרים פליטות NO_x ו-PM נמוכות יותר בהשוואה למנועי דיזל, מה שמקל על עמידה בתקנים אלה.

תקנים ותקנות של ארצות הברית

תקני בטיחות - ארה"ב קבעה תקני בטיחות פדרליים לכלי רכב ספציפיים (FMVSS) הרלוונטיים לרכבי CNG:

⊙ FMVSS 303: מתייחס לתקינות מערכת הדלק של רכבי CNG, ומבטיח שמערכת הדלק יכולה לעמוד בהתרסקות מבלי לדלוף.

⊙ FMVSS 304: נוגע לתקינותם של מכלי דלק CNG והמחייב את עמידותם בקריטריונים ספציפיים של מחזורי לחץ וחוזק התפרצות כדי למנוע תקלות בתנאי תקינות ותאונות.

תקני פליטה - הסוכנות להגנת הסביבה של ארה"ב (EPA) קובעת תקני פליטה ובכלל זה גם לרכבי CNG. התקנים קובעים הגבלות על NO_x , פחמימנים שאינם מתאן, CO ו-PM. תקני Tier III של ה-EPA, שהוכנסו בהדרגה בין 2017 ל-2025, מחמירים עוד יותר את המגבלות הללו כדי להפחית את זיהום האוויר ולהגן על בריאות הציבור.

6. סיכום

גז טבעי דחוס מציג אלטרנטיבה לדלקים קונבנציונליים להנעת רכב, במיוחד ביישומים כבדים כמו אוטובוסים, משאיות וציוד מכני הנדסי ומהווה שלב במעבר להנעת רכבים מאופסי פליטות.

הצורך הגובר להתמודד עם אתגרי הסביבה ובראשם פליטת גזי חממה, זיהום אוויר והתחממות גלובלית מהווה גורם מאיץ לחיפוש אלטרנטיבות ברות קיימא למנועי הבעירה הפנימית. המעבר להנעה חשמלית שאינה פולטת מזהמים במהלך הנסיעה, תורמת לשיפור איכות האוויר, בעיקר באזורים העירוניים, מפחיתה רעש תחבורתי ומצמצמת את התלות בדלקים פוסיליים, מסתמנת כאלטרנטיבה ברת השגה ועדיפה לשנים הבאות.

התקדמות משמעותית במרכיבים הכימיים של סוללות, באגירת אנרגיה וכן בפיתוח תשתיות טעינה, הייתה חיונית להתמודדות עם חסמים טכנולוגיים ולוגיסטיים בדרך ליישום תחבורה בת-קיימא. בנוסף, ממשלות ובעלי עניין בתעשייה ממלאים תפקיד מרכזי בקידום טכנולוגיות הנעה נקיות באמצעות תמריצים רגולטוריים, תקני פליטה והשקעות בתשתיות תומכות. פרק זה מציג את עקרונות הפעולה והטכנולוגיות שנכנסו בשנים האחרונות לשימוש ברכבים חשמליים (EVs).

1. מבנה ועקרונות פעולה

רכבים חשמליים עושים שימוש במנועים חשמליים הממירים אנרגיה חשמלית לתנועה מכנית בהתבסס על עקרונות אלקטרומגנטיים. בשונה ממנועי בעירה פנימית (ICEs), הפועלים על שריפת דלק ליצירת עבודה, מנועים חשמליים מנצלים את האינטראקציה בין שדות מגנטיים לזרמים חשמליים על מנת להפיק תנועה סיבובית. תהליך זה אינו דורש רכיבים מכניים מורכבים כגון ארכובות, בוכנות או מערכות פליטה, ובכך מפחית הפסדי אנרגיה ובלאי מכני. למנועים חשמליים יש יכולת מסירה מיידית של מומנט (Instant Torque Delivery), המאפשרת האצה חדה ותגובתיות גבוהה יותר לעומת מנועים תרמיים מסורתיים.

שלושת הסוגים העיקריים של מנועים חשמליים ברכב חשמלי

⊙ מנוע השראה (אינדוקציה) AC (AC Induction Motor) / מנוע אסינכרוני

מנועים אלה פועלים על בסיס השראה אלקטרומגנטית המאפשרת הפיכת אנרגיה חשמלית האגורה בסוללות לאנרגיה מכנית המתורגמת לסיבוב ציר המנוע החשמלי וגלגלי הרכב.

מנועי השראה זוכים להערכה נרחבת בשל העמידות הטובה שלהם, חוסר התלות בחומרים נדירים והיותם חסכוניים. למרות יעילותם הפחותה יחסית עיצובם פשוט, דרישות התחזוקה שלהם נמוכות והם בעלי יכולת לפעול בטווח רחב של מהירויות. מאפיינים אלו הובילו לאימוץ שלהם בדגמי רכב חשמליים שונים, כולל רכבי טסלה מוקדמים וכמה פתרונות תחבורה חשמליים מסחריים.

⊙ מנוע סינכרוני עם מגנטים קבועים (Permanent Magnet Synchronous Motor)

מנועים אלו משלבים מגנטים קבועים המבטיחים יעילות ושליטה מדויקת. המנועים פועלים עם סיבוב מתואם המביא לאובדן אנרגיה מינימלי וליעילות כללית גבוהה יותר של כ-95% בתנאים אופטימליים. בנוסף, מנועים סינכרוניים מספקים תפוקות כוח גבוהות יותר בגודל קומפקטי, מה שהופך אותם לאידיאליים עבור כלי רכב חשמליים מודרניים. עם זאת, שימוש במגנטים קבועים מחומרים נדירים, כגון ניאודימיום ודיספרסיום, מציב אתגרים בשרשרת האספקה ותנודות בעלויות. כדי להפחית את

התלות ביסודות נדירים תוך שמירה על ביצועים, חוקרים בוחנים חלופות של מגנטי פריט (Ferrite Magnets) המבוססים על תחמוצות ברזל עם חומרים נוספים כמו בריום ומגנטים היברידיים (Hybrid Magnets) המשלבים מגנטי פריט עם מגנטים ניאודימיום.

⊙ מנועים חשמליים נטולי מברשות (Brushless DC Motors - BLDC)

מנועים אלה עושים שימוש בבקר אלקטרוני (Controller) שתפקידו להחליף את כיוון הזרם בסלילים בהתאם למיקום הרוטור ובכך ליצור שדה מגנטי לסיבוב ציר המנוע. למנועים אלה יעילות משופרת ביחס למנועי DC עם מברשות (Brushed DC Motor), תחזוקה נמוכה יותר ותוחלת חיים תפעולית ארוכה.

בנוסף, מנועי BLDC מציגים בקרת מומנט וצפיפות הספק מעולה, מה שהופך אותם לאידיאליים עבור כלי רכב חשמליים הדורשים האצה מדויקת ויעילות אנרגטית. העיצוב הקומפקטי והעמידות שלהם הובילו לשימוש נרחב בהם בכלי רכב דו-גלגליים חשמליים, וברכיבי עזר כגון מאווררי קירור ומערכות הגה כוח.

2. חישובי טווח יעילות

⊙ **יעילות של מנועים חשמליים:** מנועים חשמליים מציגים בדרך כלל שיעורי יעילות בין 85% ל-95%. ביצועיהם טובים יותר ממנועי בעירה פנימית, הפועלים ביעילות של כ-40%-25%. יעילות גבוהה יותר זו נובעת מביטול הפסדים מכניים הקשורים לבעירה, כגון: פיזור חום, חיכוך בחלקים נעים ואיבודי אנרגיה בפליטה. שלא כמו במנועי בעירה פנימית, הדורשים שלבי המרה מרובים מאנרגיה כימית למכנית, מנועים חשמליים ממירים ישירות אנרגיה חשמלית לתנועה עם הפסדים מינימליים. אלגוריתמי בקרה מתקדמים, הפקת אנרגיה חשמלית בעת בלימה או האטה של הרכב ואלקטרוניקה אופטימלית משפרים עוד יותר את היעילות על ידי ניהול דינמי של אספקת החשמל, הפחתת בזבז אנרגיה ושיפור ביצועי המערכת הכוללים.

⊙ **שיקולי טווח:** טווח הנסיעה של רכבי רכב חשמליים תלוי במספר גורמים, כולל קיבולת סוללה (נמדדת בקוט"ש), יעילות אנרגטית, מערכות בלימה מתחדשות, התנהגות נהיגה, תנאי שטח, אווירודינמיקה, משקל הרכב ותנאי סביבה כגון: טמפרטורה והתנגדות רוח. צפיפות אנרגטית גבוהה יותר של הסוללה וניהול כוח יעיל תורמים לטווחים מורחבים, בעוד שההתקדמות בניהול תרמי וכימיה של סוללות, כגון: סוללות ליתיום-יון ומצב מוצק, ממלאות תפקיד מכריע בהגדלת מרחק הנסיעה הכולל לכל טעינה. בנוסף, אופטימיזציה של תוכנת הרכב, הכוללת חלוקת אנרגיה חכמה ואלגוריתמים חזויים של צריכת אנרגיה, משפרת את היעילות של מערכות הנעה חשמליות, ומגדילה את הטווח בתנאי נסיעה משתנים.

3. תשתיות טעינה ואנרגיה

⊙ **טעינה ביתית AC לעומת טעינה מהירה DC:** מטענים ביתיים (AC) פועלים ברמות הספק נמוכות יותר (22-3 קילוואט), הם אידיאליים לטעינת לילה ומספקים פתרון חסכוני ונוח לצרכי נסיעה יומיומיים. עם זאת, הם דורשים מספר שעות לטעינה מלאה של מצבר שהתרוקן, בהתאם לקיבולת המצבר של הרכב ולתפוקת הכוח של המטען. לעומת זאת, מטענים מהירים DC (350-50 קילוואט) מאפשרים טעינה מהירה תוך דקות, מצמצמים משמעותית את זמן ההשבתה והופכים נסיעות למרחקים ארוכים לאפשריים יותר עבור בעלי הרכב. המטענים המהירים הללו ממירים את הספק AC מהרשת למתח DC,

שמסופק ישירות למצבר הרכב, עוקף את המטען המשולב ומאיץ את תהליך הטעינה. למרות היתרונות שלהם, מטעני DC מהירים יקרים יותר להתקנה ולתפעול, ולעתים קרובות דורשים חיבורי רשת בעלי קיבולת גבוהה וניהול תרמי מתקדם כדי למנוע התחממות יתר של הסוללה. בנוסף, שימוש תכוף בטעינה מהירה יכול להוביל לבלאי מהיר יותר של הסוללה עקב ייצור חום מוגבר וזרמי טעינה גבוהים יותר ומשפיע על אורך חיי הסוללה.

⊙ **הרחבת רשת הטעינה הציבורית:** הביקוש הגובר לכלי רכב חשמליים הוביל להשקעה משמעותית בפריסת עמדות טעינה על ידי גופים ציבוריים ופרטיים כאחד. ממשלות ברחבי העולם מציעות סובסידיות ותמריצים כדי להאיץ את הפיתוח של רשתות טעינה מהירה, בעוד חברות מתחרות על הקמת נגישות נרחבת לתשתיות טעינה. עם זאת, פערים בתשתיות נותרו בין האזורים, כאשר אזורים עירוניים חווים התרחבות מהירה יותר עקב שיעורי אימוץ רכבים חשמליים גבוה יותר, בעוד אזורים כפריים ובלתי מפותחים מפגרים מאחור. גורמים כמו קיבולת רשת החשמל, זמינות קרקע, אישורים רגולטוריים וכדאיות עסקית ממלאים תפקידים מכריעים בקצב ההרחבה. בנוסף, בעיות פעולה הדדית בין רשתות טעינה ומערכות תשלום שונות יוצרות אתגרים נוספים בהשגת חווית טעינה חלקה ונגישה אוניברסלית עבור המשתמשים.

⊙ **ניהול השפעות ועומסים ברשת:** אימוץ נרחב של רכבים חשמליים מחייב התקדמות בניהול רשת חכמה, אינטגרציה של רכב לרשת (V2G) ופתרונות אחסון אנרגיה. הביקוש המוגבר לחשמל ממיליוני רכבים חשמליים הנטענים בו זמנית מציב אתגרים משמעותיים לתשתית הרשת הקיימת, הדורשים איזון עומסים בזמן אמת ומערכות חלוקת אנרגיה דינמיות. רשתות חכמות חייבות לשלב טכנולוגיות מתקדמות של תגובה לביקוש, תוך מינוף ניתוחים מונעי בינה מלאכותית כדי לייעל את לוחות הזמנים של הטעינה ולהפחית עומסי שיא. טכנולוגיית V2G מאפשרת לרכבים חשמליים לתפקד כיחידות אחסון אנרגיה מבוזרות, להזין חשמל בחזרה לרשת בתקופות שיא הביקוש, ובכך לשפר את עמידות הרשת. בנוסף, פתרונות אחסון אנרגיה מבוזרים, כגון: סוללות נייחות ושילוב אנרגיה מתחדשת, יכולים לתמוך ברשת על ידי אספקת כוח גיבוי וייצוב תנודות מתח.

4. סיכום

כלי רכב חשמליים (EV) מייצגים שינוי טרנספורמטיבי בנוף הרכב, הם מציעים אלטרנטיבה נקייה יותר, יעילה, עם אפס פליטות בצינור, הסתמכות מופחתת על דלקים מאובנים ושיפור מתמיד של טכנולוגיות הסוללה. רכבי החשמל הם בחזית הניידות בת-קיימא. ככל שתשתית גלובלית מתפתחת ומסגרות מדיניות ממשיכות לתמוך בחשמל, כלי רכב חשמליים מוכנים לא רק להפחית את ההשפעה הסביבתית אלא גם להגדיר מחדש את עתיד התחבורה האישית והמסחרית.

הנעה חשמלית היברידית (Hybrid Electric Propulsion) והיברידית פלאג-אין

הנעה היברידית היא שיטת הנעה של כלי רכב המשלבת שני סוגי מנועים, לרוב מנוע בעירה פנימית (ICE) עם מנוע חשמלי אחד או יותר. המטרה בשילוב המנועים היא קבלת נצילות טובה יותר של הדלק, חיסכון בעלות נסיעה, ופליטת מזהמים מופחתת. הרכבים ההיברידיים משתמשים בבלימה מתחדשת (Regenerative braking) ובסיוע של כוח חשמלי כדי להפחית את עומס העבודה ממנוע הבעירה הפנימית ולשפר את יעילות המערכת הכוללת. בלימה מתחדשת לוכדת אנרגיה קינטית שהייתה מתפזרת כחום במהלך האטה והופכת אותה לאנרגיה חשמלית, המאוחסנת בסוללה לשימוש מאוחר יותר. סיוע בכוח חשמלי משפר את יעילות הדלק על ידי השלמה של תפוקת המנוע במהלך האצה והפחתת התלות במנוע הבעירה הפנימית בתרחישי עומס נמוך, כגון תנועת עצירה ונסיעה (stop-and-go). שילוב זה של מקורות אנרגיה חשמליים ומכניים לא רק מפחית פליטות אלא גם מאריך את אורך החיים של רכיבי ICE על ידי הפחתת הלחץ והבלאי המכניים.

מקובל לסווג כיום את הרכבים ההיברידיים לשתי קבוצות עיקריות, רכבים היברידיים הנטענים עצמית (Hybrid Electric Vehicle - HEV) ורכבים המשלבים אפשרות לטעינה חיצונית (Plug-in Hybrid Electric Vehicle - PHEV).

רכבים היברידיים פלאג-אין (PHEV): כלי רכב אלה כוללים סוללה גדולה משמעותית מהיברידיות קונבנציונליות (HEV), מה שמאפשר פעולה ממושכת חשמלית בלבד לפני הפעלת מנוע הבעירה הפנימית (ICE). רכבים אלה נועדו למקסם את הנהיגה החשמלית תוך מתן הגמישות של מאריך טווחים המופעל על מנוע הבנזין, מה שהופך אותם מתאימים לנהגים המחפשים תלות מופחתת בדלק ללא חרדת טווח. ניתן להטעין את הסוללה באמצעות מקורות חשמל חיצוניים, כמו עמדות טעינה ביתיות או תשתית טעינה ציבורית, מה שמפחית את צריכת הדלק והפליטה הכוללת. כמו ברכבי HEV גם ברכבי PHEV נהנים מבלימה רגנרטיבית הלוכדת מחדש אנרגיה קינטית במהלך האטה, ומשפרת עוד יותר את היעילות. היכולת לפעול הן במצב חשמלי לחלוטין והן במצב היברידי מספקת רבגוניות, מה שהופך את PHEVs לטכנולוגיית מעבר לקראת חשמול מלא תוך מינוף תשתית קיימת.

1. מערכת היברידית חשמלית (Electric Hybrid System - EHS): מערכת הנעה משולבת בעלת ביצועים גבוהים

המערכת ההיברידית החשמלית (EHS) היא מערכת הנעה היברידית מתקדמת המשלבת בצורה חלקה מנועים כפולים במהירות גבוהה, בקרים כפולים וטכנולוגיית קירור שמן מתקדמת כדי לשפר את צפיפות ההספק, היעילות והביצועים הכוללים. מערכת חדשנית זו תוכננה במיוחד עבור כלי רכב חשמליים היברידיים (HEVs) וכלי רכב היברידיים חשמליים פלאג-אין (PHEVs), המאפשרת ניהול אנרגיה מיטבי בין מנוע הבעירה הפנימית (ICE) ורכיבי ההנעה החשמלית.

מרכיבים טכנולוגיים מרכזיים של EHS

🔗 **מנועים כפולים במהירות גבוהה** - שימוש בשני מנועים חשמליים מהירים הפועלים במהירויות של עד 15,000 סל"ד ומשמשים הן כיחידות הנעה ראשוניות והן כמערכות בלימה רגנרטיביות, מייעלות את השימוש באנרגיה ומפחיתות את התלות בדלקים

מאובנים. למנועים המהירים יתרון ביחס הספק למשקל משופר: העיצוב הקומפקטי מאפשר תפוקת מומנט גבוהה יותר ליחידת מסה, **ביעילות המרת אנרגיה מוגברת**: הפחתת הפסדים הקשורים בפיתולי מנוע ובזמן תגובה מהיר יותר: אידיאלי עבור יישומי רכב היברידי, המאפשר מעבר חלק בין כוח בעירה חשמלית ופנימית.

⊙ **בקרים כפולים לניהול אנרגיה חכם** - הבקרים הכפולים ממלאים תפקיד מכריע בתיאום חלוקת הכוח בין ה-ICE, הסוללה והמנועים החשמליים. פונקציית הבקרים הכפולה כוללת **חלוקת מומנט בזמן אמת** בהתאם לתנאי הנהיגה, **בקרת בלימה רגנרטיבית אופטימלית** ללכידת אנרגיה ביעילות וניהול טעינה ופריקה של הסוללה להבטחת יעילות ואריכות ימים מרבית. בקרים מתקדמים אלה מייעלים את זרימת האנרגיה כדי להבטיח את האיזון הטוב ביותר בין כוח החשמל לבעירה.

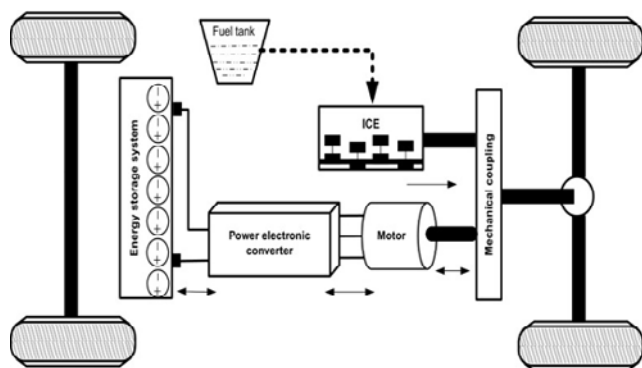
⊙ **טכנולוגיה מתקדמת לקירור שמן** - שלא כמו מערכות מסורתיות מקוררות אוויר או מקוררות מים, טכנולוגיית קירור שמן מציעה פיזור חום מעולה תוך שמירה על יציבות תרמית ביישומים בעלי ביצועים גבוהים. לקירור שמן יתרונות **ביעילות מנוע משופרת**: מונע התחממות יתר, מה שמאפשר למנוע לשמור על תפוקת שיא הספק לתקופות ממושכות, **בלאי מופחת של רכיבים**: מאריך את תוחלת החיים של רכיבים חשמליים ומכאניים על ידי מזעור השפעה תרמית ואמינות **מערכת משופרת**: מאפשרת פעולה בתנאי טמפרטורה קיצוניים, אידיאלית לכלי רכב היברידיים בעלי ביצועים גבוהים.

⊙ **שילוב מנועים מהירים, בקרים וטכנולוגיית קירור שמן מספק יתרונות משמעותיים - בחוויית נהיגה משופרת**: האצה חלקה עקב אספקת מומנט מהירה מהמנועים החשמליים, מעבר חלק בין מצבי EV למצב היברידי, נהיגה מעודנת ונוחה ורמות רעש ורעידות מופחתות, **בבלימה רגנרטיבית משופרת** והשבת אנרגיה ובתאימות לרכבים היברידיים ופלאג-אין היברידיים.

יישומים בעולם האמיתי ופוטנציאל עתידי

מערכת EHS מיושמת באופן נרחב בכלי רכב היברידיים מודרניים בשל יכולתה למקסם את הביצועים תוך שמירה על יעילות דלק גבוהה. יצרניות הרכב ממנפות את הטכנולוגיה הזו כדי לעמוד בתקנות הפליטה המחמירות. התקדמות עתידית בצפיפות האנרגיה של הסוללה וביעילות המנוע תידחף ככל הנראה מערכות EHS להשיג רמות יעילות גבוהות עוד יותר תוך הפחתת משקל ועלות המערכת.

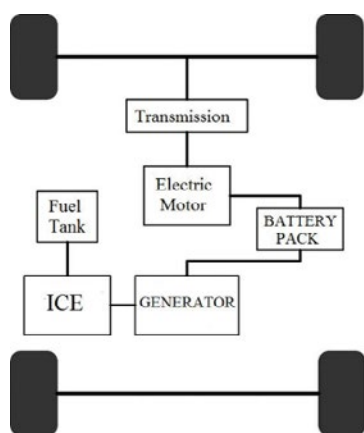
2. סוגי תצורות הנעה היברידיות



תצורה היברידית מקבילה

היברידית מקבילה: מנוע הבעירה הפנימית (ICE) והמנוע החשמלי פועלים במקביל כדי לשפר את יעילות הדלק, להפחית פליטות ולשפר את ביצועי הרכב. בתצורה זו, גם ה-ICE וגם המנוע החשמלי יכולים לספק כוח לגלגלים בו זמנית, באופן עצמאי או בשיתוף פעולה, בהתאם לתנאי הנהיגה. המנוע החשמלי מסייע ל-ICE במצבי האצה ועומס גבוה, ומפחית את צריכת הדלק ואת עומס המנוע. בלימה רגנרטיבית תורמת עוד יותר ליעילות על ידי לכידה ואגירה

של אנרגיה קינטית שאחרת תאבד כחום. עיצוב זה נמצא בשימוש נפוץ בכלי רכב היברידיים כדי למקסם את החיסכון בדלק ללא צורך בטעינה חיצונית, מה שהופך אותו לאופציה אטרקטיבית עבור צרכנים המחפשים יעילות משופרת מבלי לעבור באופן מלא לניידות חשמלית.



תצורה היברידית טורית

היברידית טורית: בתצורה זו, המנוע החשמלי הוא האחראי הבלעדי להנעת גלגלי הרכב, בעוד שמנוע הבעירה הפנימית (ICE) מתפקד רק כגנרטור לטעינת המצבר בעת הצורך. בניגוד להיברידיות מקבילות, שבהן ה-ICE יכול להניע ישירות את מערכת ההנעה, היברידיות בתצורה טורית מסתמכות לחלוטין על הנעה חשמלית, משפרת את היעילות הכוללת ומפחיתה את הפליטות. עיצוב זה מאפשר צריכת דלק מיטבית מאחר וה-ICE יכול לפעול בטווח ההספק היעיל ביותר שלו ללא חיבור מכני ישיר לגלגלים. בנוסף, ניתן לשלב תצורה היברידית זו עם יכולות טעינה פלאג-אין, להפחית עוד יותר את התלות בדלקים מאובנים ולהרחיב את טווח הנסיעה החשמלי לפני הפעלת ה-ICE.

3. יתרונות וחסרונות של הנעה היברידית חשמלית

יתרונות ✓

- ⊙ **יעילות דלק משופרת** - המנוע החשמלי מסייע ל-ICE במהלך האצה ונסיעה במהירות נמוכה, ומפחית את צריכת הדלק. בלימה רגנרטיבית משחזרת אנרגיה קינטית ומטעינה את הסוללה, ומגבירה את היעילות הכוללת.
- ⊙ **פליטות מופחתות** - רכבים היברידיים חשמליים מייצרים פחות פליטות גזי חממה (GHG) באופן משמעותי מאשר רכבי ICE קונבנציונליים, במיוחד בתנועה עירונית גם אם הם מצוידים במערכות עצור וסע. חלק מהמכוניות ההיברידיות עומדות בתקני פליטת פחמן נמוכה (Ultra Low Emission Vehicle - ULEV) או תקני פליטת פחמן סופר נמוכה (SULEV).
- ⊙ **ביצועים משופרים** - מנועים חשמליים מספקים מומנט מיידי, ומשפרים את ההיענות לתאוצה. הקטנת נפח המנוע אפשרי מבלי לוותר על הביצועים.
- ⊙ **טווח נהיגה מורחב** - משלב את הטווח הארוך של רכבי ICE עם היעילות של מנועים חשמליים, ומפחית את חרדת הטווח הנפוצה ברכבי EV טהורים.

✗ חסרונות של הנעה חשמלית היברידית

- ⊙ **עלות ראשונית גבוהה יותר** - מערכת ההנעה הכפולה (ICE + מנוע חשמלי + סוללה + מערכות בקרה) מגדילה את המורכבות ועלויות הייצור. עשוי להוביל למחירים קמעונאיים גבוהים יותר בהשוואה לרכבים רגילים.
- ⊙ **דרישות תחזוקה מורכבות** - מערכת הנעה מורכבת יותר דורשת כישורי אבחון ותיקון מיוחדים. רכיבים כמו ערכות סוללות, ממירים הם יקרים להחלפה.

מערכות הנעת מימן ותאי דלק (FCEV)

כלי רכב המונעים על ידי תאי דלק (FCEV) הם סוג של רכבים חשמלים המשתמש בתא דלק כדי להמיר מימן לחשמל. בניגוד לרכבים חשמליים המונעים על ידי סוללות (BEV) ואוגרים חשמל בסוללה, כלי רכב המונעים על ידי FCEV מייצרים חשמל לפי דרישה ממכל דלק מימן ומתא דלק.

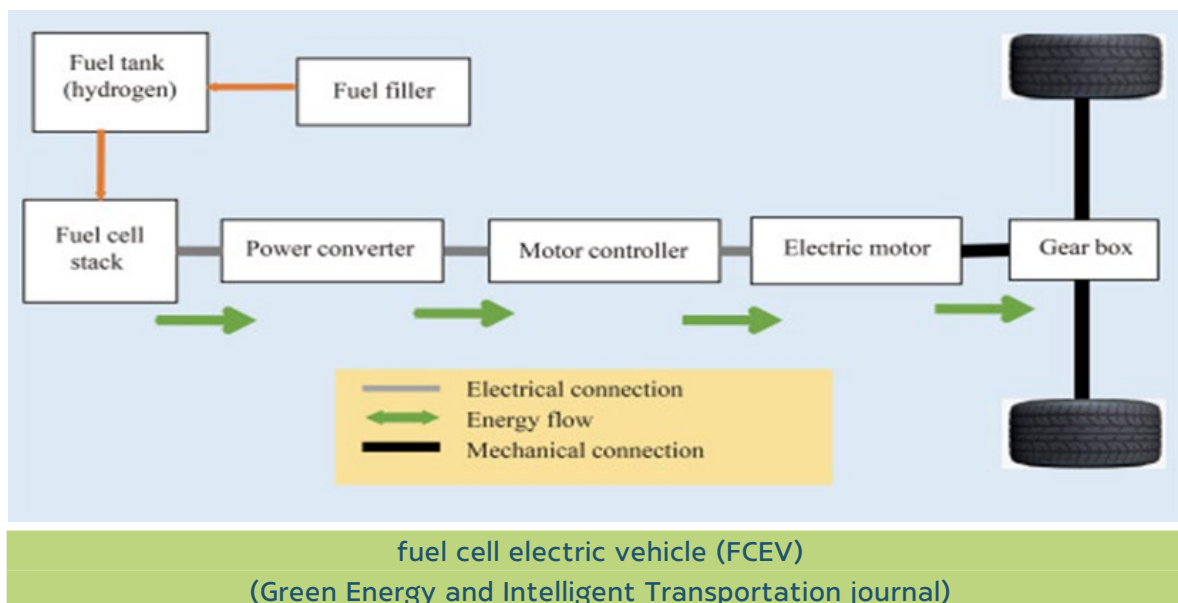
כלי רכב אלה הם דוגמא לרכבים נטולי פליטת מזהמים. טכנולוגיה זו תסייע להגיע ליעד השאיפה של נייודות חשמלית עם אפס פליטות מזהמים. מערכות אלה חיוניות במיוחד במצבים שבהם הלקוחות דורשים טווחי נסיעה ארוכים יותר, בעתים נדרש ברכבים החשמליים נפח סוללות גדול ומגושם ומשך טעינה שגוזל זמן רב.

1. עקרונות פעולה

🕒 **טכנולוגיית תאי דלק מימן:** כלי רכב המונעים על ידי FCEV מאחסנים גז מימן דחוס במיכל ברכב (Hydrogen Tank). המימן מוזן לצבר תאי דלק (Fuel Cell Stack), אשר ממיר את האנרגיה הכימית של המימן לחשמל באמצעות תהליך הנקרא אלקטרוליזה הפוכה. החשמל המופק על ידי תא הדלק מפעיל מנוע חשמלי (Electric Motor), המניע את הרכב. תוצר הלוואי היחיד של תהליך זה הוא **אדי מים**, הנפלטים דרך צינור הפליטה.

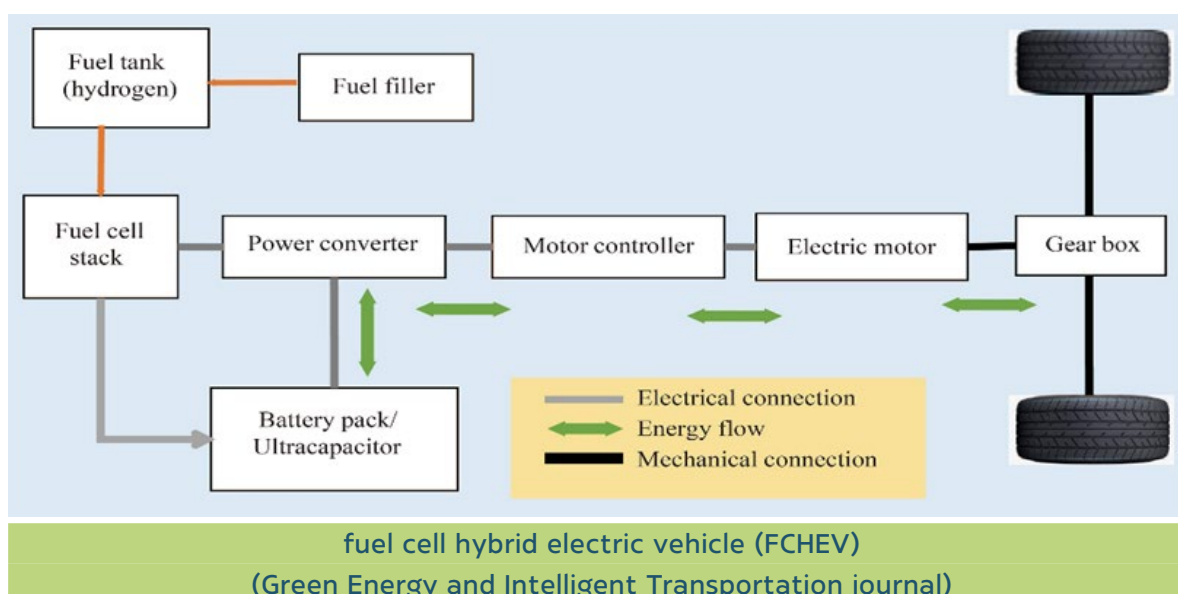
🕒 **תהליך תדלוק ותשתית:** תחנות תדלוק מימן חיוניות לאימוץ מערכות הנעה של מימן ותאי דלק. הן דורשות השקעה משמעותית בטכנולוגיות ייצור, הפצה ואחסון. התשתית לתדלוק מימן כוללת שלבים מרובים, כולל ייצור מימן, הובלה ואחסון בתחנות תדלוק. ניתן להפיק מימן באמצעות אלקטרוליזה על ידי מקורות אנרגיה מתחדשים (מימן ירוק) או להפיק מגז טבעי (מימן אפור וכחול). לכל שיטה קיימות השלכות סביבתיות ועלויות שונות. הובלת מימן מציבה אתגרים לוגיסטיים, שכן היא דורשת דחיסה בלחץ גבוה, נזילות קריוגנית (ייצור והתנהגות של חומר בטמפרטורות נמוכות מאוד) או נשאים כימיים כדי להבטיח הפצה בטוחה ויעילה. לאחר המסירה לתחנות תדלוק, המימן מאוחסן במכלי לחץ גבוה ומוזרם לרכב בלחצים הנעים בדרך כלל בלחצים שבין 350 ל-700 בר. הרחבת תשתית תדלוק המימן תלויה במידה רבה בתמריצים ממשלתיים, השקעות במגזר הפרטי והתקדמות בטכנולוגיית אחסון ותחבורה של מימן. בנוסף, סטנדרטיזציה של פרוטוקולי תדלוק ושיתוף פעולה בינלאומי חיוניים כדי להקל על כלכלת מימן גלובלית ליישומי תחבורה.

🕒 רכיבים מרכזיים במערכות הנעת מימן ותאי דלק מדגם fuel cell electric vehicle (FCEV):



🕒 תוספת רכיב במערכות הנעת מימן ותאי דלק מדגם fuel cell Hybrid electric vehicle (FCHEV):

השוני העיקרי בין תצורת ה-FCEV וה-FCHEV הוא בתוספת הסוללה (Battery Pack). הסוללה משתרת תפקיד עזר קריטי בארכיטקטורת ההנעה תאי דלק מימן. בניגוד לכלי רכב חשמליים, שבהם הסוללה היא מקור האנרגיה הבלעדי, צורת הנעה זו משלבת צבר של תאי דלק מימן ליצירת חשמל באמצעות תגובות אלקטרוכימיות - עם סוללת ליתיום-יון במתח גבוה. הסוללה ב-FCHEV מתפקדת בעיקר כמאגר כוח המספק אנרגיה משלימה בתנאי ביקוש גבוה כגון האצה מהירה או עליות תלולות, וסופגת אנרגיית בלימה מתחדשת במהלך האטה. עיצוב זה מאפשר להקטין את צבר תאי הדלק, ליעיל את עלות המערכת, המשקל והיעילות. בנוסף, הסוללה בעלת מהירות תגובה לשינויים בצריכה, יכולת התאוששות ומסירת אנרגיה מהירה, המבטיחה אספקת חשמל חלקה ויעילות כללית משופרת של מערכת ההנעה. ניהול תרמי וטעינה נכונה של הסוללה חיוניים לאריכות ימים, בטיחות וביצועים של המערכת בתנאי פעולה משתנים.



✓ יתרונות

- ⊙ זמני תדלוק מהירים (3-5 דקות), מצמצמים משמעותית את זמן השבתת הרכב בהשוואה לטעינת הסוללה, מה שהופך את רכבי תאי הדלק המימן למתאימים יותר לנסיעות בינעירוניות ויישומים מסחריים שבהם תדלוק מהיר הוא קריטי.
- ⊙ טווח נסיעה ארוך יותר מאשר רכבי EV רגילים מה שהופך את כלי הרכב של תאי דלק מימן ליתרון במיוחד עבור יישומים הדורשים מרחקי נסיעה ארוכים, כגון הובלת מטענים, אוטובוסים בין עירוניים ורכבי חירום. היכולת לנסוע מרחקים כאלה ללא תדלוק תכופ משפרת את היעילות התפעולית ומצמצמת את זמן ההשבתה, מה שהופך את ההנעה באמצעות מימן ותאי דלק לחלופה תחרותית לרכבים חשמליים בסוללות במגזרים שבהם פעולה רציפה היא קריטית.

✗ חסרונות

- ⊙ תשתית מוגבלת לתדלוק מימן מהווה חסם משמעותי לאימוץ נרחב של כלי מימן עם תאי דלק (FCEVs). העלויות הגבוהות הכרוכות בהקמת מתקני ייצור מימן, הובלת מימן בצורה בטוחה והתקנת תחנות תדלוק תורמות להתרחבות האיטית של טכנולוגיה זו. בניגוד לרשתות טעינת רכב חשמלי, שיכולות למנף רשתות חשמל קיימות, תשתית מימן דורשת מערכות אחסון וניפוק מיוחדות בלחץ גבוה, מה שמגדיל את המורכבות. בנוסף, פערים אזוריים בזמינות המימן והצורך בסטנדרטיזציה בשווקים שונים מעכבים עוד יותר את הנגישות.
- ⊙ עלויות ייצור ואחסון גבוהות נובעות מהסתמכות על חומרים נדירים ויקרים, כגון פלטינה המשמשת תאי דלק, המורכבות של טכנולוגיות נזילות מימן ואחסון בלחץ גבוה. בנוסף, יתרונות הגודל המוגבלים בייצור מימן תורמות למחירו הגבוה ליחידת אנרגיה בהשוואה לדלקים פוסיליים קונבנציונליים וחלופות סוללות חשמליות.

3. תקנות בטיחות מערכות הנעה מימן ותאי דלק

תקני בטיחות למערכות הנעה במימן ותאי דלק כוללים הנחיות קפדניות לניהול סוללות, הגדלת הנצילות התרמית, התקנה ברכבים, אחסון מימן ופרוטוקולי בטיחות בתאונות. בין התקנים שפורסמו על ידי מדינות האיחוד האירופאי:

UNECE R134 - Safety-related performance of Hydrogen Fueled Cells Vehicles

דן באישור מערכות אחסון מימן דחוס, רכיבים ספציפיים במערכת אחסון מימן דחוס ואישור סוגי רכב.

UNECE R100 - Specific requirements for the electric power train

מתאר אמצעי בטיחות חשמליים עבור ערכות סוללות, כולל התנגדות בידוד, ניהול תרמי והגנה מפני אש.

Regulation (EC) No 79/2009 - type-approval of hydrogen-powered motor vehicles

מתווה דרישות בטיחות לכלי רכב המונעים בגז טבעי דחוס תוך התמקדות ברכיבים כמו מכלי דלק וצינורות הדלק כדי להבטיח שהם עומדים בלחצים גבוהים הקשורים לגזים הדחוסים.

Regulation (EU) No 406/2010 - type-approval of hydrogen-powered motor vehicles
מפרט הוראות לאישור כלי רכב מנועיים ורכיביהם בכל הנוגע להנעת מימן.

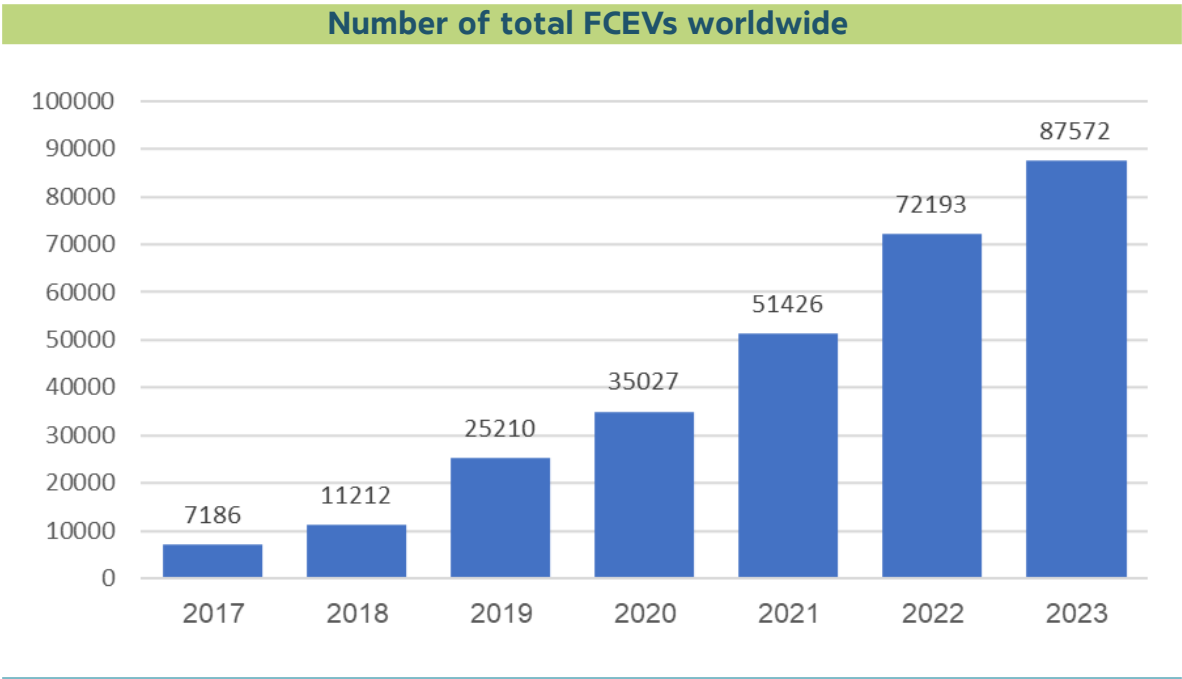
כמו כן, פורסמו תקני בטיחות בינלאומי:

SAE-J2344 - Guidelines for Electric Vehicle Safety (including Fuel Cell Vehicles)
נהלי בטיחות בטיפול בכלי רכב המכילים מתח גבוה

ISO 19880 - Gaseous hydrogen - Fueling stations
נהלי טיפול, אחסון ותדלוק בטוחים ומפחיתים סיכונים הקשורים למכלי מימן בלחץ גבוה.

4. פריסה גלובלית של רכבי מימן

מספר כלי הרכב החשמליים המונעים בתאי דלק (FCEVs) נמצא בעליה לאורך השנים אם כי מספרם ביחס לרכבים המונעים בשיטות הנעה אחרות עדיין קטן ביותר. על פי נתוני מחקר שפורסמו על ידי Advanced Fuel Cells Technology Collaboration להלן גרף צמיחה של מספר רכבי FCEV בעולם בחלוקה לשנים:



ובאשר לחלוקה לסוגי רכבים על פי המחקר נכון לשנת 2023:

מכוניות נוסעים -

מלאי עולמי של: כ-65,760 רכבים, המהוות כ-75% מכלל צי כלי הרכב המונעים בתאי דלק. מתוכם 33,591 רכבים בקוריאה הדרומית ו-17,940 רכבים בארה"ב.



אוטובוסים -

מלאי עולמי: כ-8,043 אוטובוסים, המהוות כ-9% מכלל צי הרכבים המונעים בתאי דלק. מתוכם 6,632 אוטובוסים בסין ו-651 אוטובוסים בדרום קוריאה



משאיות (מסחריות, קלות וכבדות) -

מלאי עולמי: מוערך בכ-13,769 משאיות, המהוות כ-15.7% מכלל צי הרכבים החשמליים המונעים בתאי דלק. מתוכם 13,181 משאיות בסין שמהווים כ-95.7% מצי המשאיות המונעות בתאי דלק ומשקף את התמקדותה בהפחתת פחמן בתחבורה כבדה.



התפלגות זו מדגישה את שיעורי האימוץ ואת המיקודים האסטרטגיים בין המדינות, כאשר אסיה מובילה הן בפריסת כלי רכב לנוסעים והן למסחר.

5. פריסה גלובלית של תחנות טעינת מימן

בהתאם לנתוני קבוצת המחקר Interact Analysis הפועלים בבריטניה ארה"ב ואסיה נכון לסוף שנת 2024, הפריסה העולמית של תחנות תדלוק מימן (Hydrogen Refueling Stations - HRS) התרחבה משמעותית, עם כ-1,369 תחנות פעילות ב-44 מדינות. צמיחה זו משקפת מאמץ מרוכז של מדינות שונות לתמוך באימוץ כלי רכב המונעים בתאי דלק מימן (FCEV) ולפתח את התשתית הדרושה למערכת של תחבורה מבוססת מימן.

תפוצה עולמית של תחנות תדלוק מימן

תחנות התדלוק מרוכזות במידה רבה במספר מצומצם של מדינות, כאשר סין, דרום קוריאה, יפן, צרפת וגרמניה מהוות יחד כמעט 80% מסך התחנות העולמי.

אזור אסיה-פסיפיק -

סין: מובילה בעולם עם כ-450 תחנות, ממשיכה להשקיע רבות בתשתית מימן כדי לתמוך בצי הגדל של כלי רכב המונעים בתאי דלק.



דרום קוריאה: עם כ-200 תחנות, דרום קוריאה הרחיבה במהירות את הרשת שלה, כולל פריסת תחנות מימן נוזלי.



יפן: מפעילה כ-160 תחנות, ומתחזקת תשתית מימן חזקה, התומכת הן ברכבי נוסעים והן ברכבי מסחר.



גרמניה: מובילה את אירופה עם כ-115 תחנות, ממשיכה להיות שחקנית מרכזית בפיתוח תשתית המימן של היבשת.



צרפת: עם כ-130 תחנות, צרפת הרחיבה באופן פעיל את הרשת שלה, ולאחרונה עקפה את גרמניה במספר התחנות הפועלות.



בסך הכל באירופה עד סוף שנת 2024 היו 412 תחנות תדלוק מימן ב-27 מדינות.

צפון אמריקה -

ארצות הברית: עם 86 תחנות, מתוכן 73 בקליפורניה, ארה"ב חוותה התרחבות והתכווצות בתשתית המימן שלה, המשקפות את אופיו הדינמי של השוק.

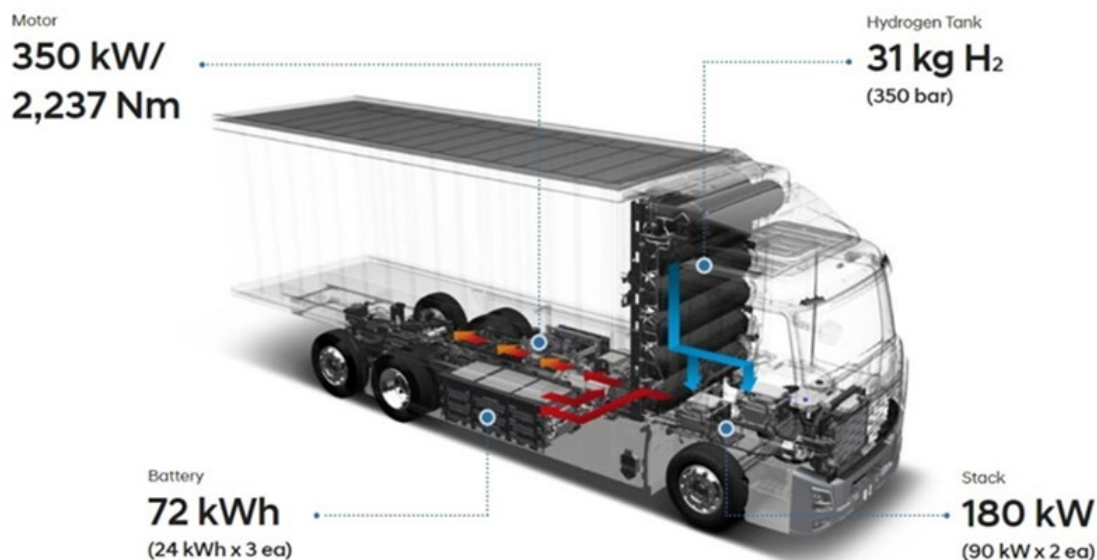


לסיכום, הנוף העולמי של תחנות תדלוק במימן מתפתח, עם השקעות משמעותיות ותמיכה במדיניות המניעות את הרחבת התשתית הנדרשת לאימוץ נרחב של רכבים המונעים בתאי דלק מימן.

6. פרויקט משאיות מימן בישראל

בשנת 2022 יובאו למדינת ישראל 3 משאיות יונדאי מונעות מימן ותאי דלק על ידי חברת כלמוביל, יבואנית משאיות יונדאי בישראל, בסיוע חברות בזן וסונול, וכן בתמיכה רגולטורית של משרד התחבורה ובתמיכה כספית של משרד האנרגיה, לצורכי פיילוט תפעולי. מטרת הפרויקט היתה לבחון את היבטי התפעול השונים בישראל ובהם: אספקת המימן, תחנות התדלוק, אופן האחזקה במוסכים, בטיחות, התאמה לאזורי השינוע ועוד.

השאפה היא שפיילוט זה יוביל בשנים הקרובות את מגמת החדירה של טכנולוגיית המימן לשוק הרכב הישראלי, יאיץ את הקמת תחנות התדלוק, ובעקבותיהם תתרחב הטכנולוגיה גם לכלי רכב פרטיים מונעי מימן.



Hyundai XCIENT H2 FCEV/Truck 2023

7. אתגרים ותחזית עתידית

למרות ההתקדמות בכל הנושאים הקשורים ברכבים המונעים מימן ותאי דלק, האימוץ הנרחב של רכבים אלה מתמודד עדיין עם אתגרים, לרבות עלויות ייצור גבוהות, תשתיות תדלוק מוגבלות ותחרות מכלי רכב חשמליים סוללות. עם זאת, השקעות מתמשכות במחקר ופיתוח, יחד עם מדיניות ממשלתית תומכת ושיתופי פעולה בינלאומיים, צפויות להתמודד עם מכשולים אלו. תחזיות מצביעות על קצב צמיחה שנתי של כ-95.4% בין 2020 ל-2030, כאשר צי ה-FCEV העולמי עשוי להגיע לכ-13 מיליון יחידות עד 2030.

שיתוף פעולה בין קובעי מדיניות, מהנדסים ובעלי עניין בתעשייה

המעבר למערכות הנעה בנות קיימא מחייב מאמץ מתואם בין מחזיקי עניין מרובים, כולל קובעי מדיניות, מהנדסים ומנהיגי תעשייה. לכל קבוצה תפקיד מכריע בעיצוב העתיד של טכנולוגיות ההנעה לרכב

🕒 **קובעי מדיניות:** ממשלות וגופים רגולטוריים חייבים ליישם מדיניות ברורה מבוססת מדע התומכת באימוץ טכנולוגיות הנעה בעלות פליטה נמוכה. הדבר כולל קביעת יעדי הפחתת פליטות שאפתניים (כגון הדרישה לעמידה בתקני יורו 7), אכיפת תקנים מחמירים לחסכון בדלק, ותמריץ לפיתוח ואימוץ של מערכות הנעה חלופיות. מדיניות אפקטיבית צריכה לספק גישה מאוזנת בין רגולציה וחדשנות מונעת שוק, להבטיח שהמעבר לתחבורה נקייה יותר יישאר כדאי כלכלית. לקובעי מדיניות יש תפקיד מכריע בהקמת תוכניות מימון למחקר ופיתוח (מו"פ), תמיכה במיזמי פיילוט וטיפול שיתוף פעולה בין גופים ציבוריים ופרטיים. בנוסף, השקעות בתשתיות, כגון הרחבת רשתות טעינת EV ותחנות תדלוק מימן, הן קריטיות להאצת האימוץ הנרחב. המדיניות חייבת לתת את הדעת גם לפליטות מזהמים לאורך מחזור החיים של הרכב, ולפליטות מזהמים הנוצרות במסגרת שרשרת אספקה. ולבסוף, נדרש שיתוף פעולה בין קובעי המדיניות ליצירת סטנדרטיזציה גלובלית כדי ליצור מעבר חלק לפתרונות ניידות ברי קיימא בקנה מידה בינלאומי.

🕒 **מהנדסים וחוקרים:** תעשיית הרכב מסתמכת על מהנדסים בפיתוח מערכות הנעה מהדור הבא שהינן יעילות אנרגטית, שממזערות השפעות סביבתיות ומשפרות את יחס העלות-תועלת. אנשי מקצוע אלו ממלאים תפקיד מכריע בתכנון טכנולוגיות מתקדמות של מערכת הנעה, כגון מערכות הנעה חשמליות ביעילות גבוהה, מערכות תאי דלק ומנועי בעירה פנימית המותאמים לדלקים סינתטיים. במיוחד, מהנדסים מתמקדים בשיפור הכימיה של הסוללות כדי לשפר את צפיפות האנרגיה, מחזורי הטעינה והבטיחות, מה שהופך את כלי הרכב החשמליים למעשיים ואמינים יותר. פתרונות אחסון מימן הם גם תחום מפתח של חדשנות, המתמודדים עם אתגרים הקשורים לעמידות תאי דלק, יעילות ייצור מימן ותשתית הפצה. בנוסף, אופטימיזציה של מערכת הנעה היברידית כוללת חידוד אלגוריתמי ניהול אנרגיה, הפחתת הפסדי מערכת הנעה ושילוב מערכות בלימה מתחדשות כדי למקסם את היעילות. מהנדסים וחוקרים נדרשים לעבוד בשיתוף פעולה הדוק עם קובעי מדיניות ומנהיגים בתעשייה כדי להבטיח שטכנולוגיות חדשות מתאימות לדרישות הרגולטוריות ולדרישות השוק, ומקדמות את מגזר הרכב לעבר עתיד בר-קיימא.

דוגמא לשיתוף פעולה בין קובעי מדיניות, מהנדסים וחוקרים ניתן לראות בקבוצת העבודה Working Party on Pollution and Energy Harmonization of Vehicle Regulations שמקום מושבה בג'נבה ותפקידה לקדם תקנים ודרישות בתחום פליטות מזהמים מכלי רכב.

🕒 **תעשיות רכב ואנרגיה:** יצרני רכב וספקי אנרגיה חייבים לשתף פעולה כדי ליצור תשתית איתנה לטכנולוגיות הנעה חדשות. שיתוף הפעולה הזה מתרחב מעבר לייצור כלי רכב וכולל הקמת פתרונות אנרגיה משולבים התומכים באימוץ ארוך טווח של מערכות

הנעה חלופיות. השקעה ברשתות טעינה מהירה חיונית לאימוץ רכב חשמלי (EV), המחייבת התקדמות בניהול רשתות, עמדות טעינה חכמות ויכולות טעינה מהירה במיוחד כדי להפחית את זמן ההשבתה. כמו כן, תחנות תדלוק מימן חייבות להיפרס באופן אסטרטגי כדי לתמוך ברכבים חשמליים של תאי דלק (FCEVs), מה שמחייב ייצור מימן בקנה מידה גדול, פתרונות אחסון יעילים והובלה. מגזר הדלק הסינטי ממלא גם תפקיד מרכזי בהפחתת פחמן של מנועי בעירה פנימית קיימים, הדורש חדשנות בשיטות ייצור כגון כוח לנוזל (PtL) וניצול לכידת פחמן (CCU). שיתוף פעולה כלל תעשייתי בין יצרני רכב, ספקי אנרגיה ומפתחי תשתיות הוא חיוני כדי להבטיח שניתן להגדיל את טכנולוגיות ההנעה החדשות ביעילות תוך שמירה על יציבות הרשת, עלות סבירות ונגישות לצרכנים ברחבי העולם.

🕒 **אקדמיה ומוסדות מחקר:** אוניברסיטאות ומעבדות מחקר עצמאיות ממלאות תפקיד מפתח בקידום טכנולוגיית ההנעה באמצעות מחקר יסודי, פיתוח אבי טיפוס ובדיקות של חומרים ומערכות חדשות. מוסדות אלה עורכים מחקרים חלוציים על מקורות דלק חלופיים, טכנולוגיות של סוללות מהדור הבא, טעינה חשמלית מהירה ופתרונות אחסון מימן, המסייעים להניע חדשנות במגזר התחבורה. מחקר אקדמי גם תורם לשיפור יעילות האנרגיה, הפחתת פליטות וייעול ביצועי מערכת ההינע באמצעות מודלים ניסיוניים, סימולציות ובדיקות מעבדה. מאמצי שיתוף פעולה בין אוניברסיטאות, מנהיגים בתעשייה וסוכנויות ממשלתיות מקלים על חילופי ידע, מה שמוביל להתקדמות המגשרת על הפער בין מושגים תיאורטיים ליישומים בעולם האמיתי. יתר על כן, האקדמיה ממלאת תפקיד מכריע בהכשרת הדור הבא של המהנדסים והמדענים, מצייד אותם במיומנויות הדרושות לפיתוח טכנולוגיות הנעה מתקדמות ופתרונות ניידות ברי קיימא.

דוגמא למעורבות האקדמיה, תעשיית הרכב ומימון ממשלתי בקידום טכנולוגיות חדשות ניתן לראות במחקר שבוצע על ידי אוניברסיטת פרדו, אינדיאנה ארה"ב, בשיתוף פעולה עם חברת Cummins, המעבדה הלאומית Walmart-Oak Ridge, לפיתוח מערכת טעינה אלחוטית בעלת הספק גבוה למשאיות כבדות חשמליות. הפרויקט שואף ליצור פתרון טעינה אלחוטי של 750 קילוואט, המאפשר למשאיות להיטען ביעילות ללא מחברים פיזיים. טכנולוגיה זו נבדקת עבור פעולות צי רכב בעולם האמיתי, עם פוטנציאל לאימוץ מסחרי נרחב.

http://www.purdue.edu/research/features/stories/purdue-researchers-collaborate-with-cummins-to-develop-wireless-charging-technology-for-heavy-duty-vehicles/?utm_source=chatgpt.com

לסיכום, גישה שיתופית של כל הגורמים כולל תמריצים ממשלתיים חיונית להאצת פיתוח ואימוץ טכנולוגיות חדשות ומערכות הנעה נקיות.

שיעורי אימוץ של מערכות ההנעה השונות ושילובן בשוק העולמי

כלי רכב פרטיים: המעבר למערכות הנעה חשמליות והיברידיות ממשיך לשלוט בשוק רכבי הנוסעים, מונע על ידי התקדמות בטכנולוגיית הסוללות, מודעות סביבתית גוברת ומדיניות ממשלתית תומכת. יצרניות הרכב מרחיבות את היצע ה-EV וההיברידיות שלהן כדי לעמוד בתקנות פליטת מזהמים מחמירות ובשינוי העדפות הצרכנים. הפיתוח של סוללות בעלות קיבולת גבוהה יותר, שיפורים בתשתית הטעינה והופעת דגמי EV חסכוניים, הופכים את ההנעה החשמלית לנגישה יותר לקהל הרחב. בנוסף, יצרניות הרכב משקיעות באופטימיזציה של יעילות רכב, באינטגרציה של תוכנה ובאווירודינמיקה כדי לשפר עוד יותר את הטווח והביצועים של רכבים חשמליים, מה שמבטיח כי ניידות מחושמלת תהפוך לבחירה המרכזית לתחבורה פרטית.



משאיות כבדות: מגזר התחבורה המסחרי עובר מהפך משמעותי, המשלב מערכות הנעה חשמליות ומבוססות מימן, בכדי לשפר את היעילות ולהפחית פליטות. מפעילי צי" רכב מאמצים יותר ויותר משאיות חשמליות העושות שימוש בסוללות ליישומי משלוח לטווחים קצרים ועירוניים, נהנים מעלויות תפעול נמוכות יותר ואפס פליטות. משאיות תאי דלק מימן מופיעות כחלופה בת קיימא עבור הובלה ארוכת טווח ומטענים כבדים, ומציעות תדלוק מהיר וטווח מורחב בהשוואה למשאיות מקבילות חשמליות. במקביל, שיפורים בטכנולוגיות דלק ביולוגי מתקדם ודיזל סינטיטי מבטיחים שמנועי בעירה מסורתיים יישארו חלק מהמעבר להובלת מטענים בת קיימא. האימוץ הנרחב של טכנולוגיות אלו תלוי בהרחבת תשתיות הטעינה והתדלוק, תמיכה רגולטורית והתקדמות מתמשכת ביעילות הסוללה ותאי הדלק.



תחבורה ציבורית (אוטובוסים): החשמול של צי" התחבורה הציבורית צובר תאוצה בעולם, מונע על ידי יוזמות ממשלתיות, יעדי הפחתת פליטות והתקדמות בטכנולוגיית הסוללה והטעינה. ערים ברחבי העולם משקיעות באוטובוסים חשמליים בסוללות ובאוטובוסים של תאי דלק מימן כדי להחליף צי" רכב מסורתיים המונעים בדיזל, תוך הפחתת זיהום אוויר עירוני ועלויות תפעול. המעבר לאוטובוסים חשמליים נתמך על ידי שיפורים בתשתית הטעינה המהירה, מערכות של סוללות חסכוניות באנרגיה ותמריצי מדיניות לקידום תחבורה ציבורית בת קיימא. עם זאת, אתגרים כמו עלויות השקעה ראשוניות גבוהות, מגבלות קיבולת רשת והצורך בתשתית טעינה נרחבת נותרו חסמים לאימוץ נרחב. מדינות רבות מיישמות תוכניות פיילוט והשקה מדורגת כדי להעריך היתכנות ולייעל אסטרטגיות אינטגרציה ארוכות טווח עבור פתרונות תחבורה ציבורית ללא פליטות. דוגמא לתוכנית שכזו ניתן לראות בשיקגו ארה"ב שבה רשות התחבורה המקומית (CTA) חשפה בשנת 2022 תוכנית מקיפה למעבר כל צי האוטובוסים שלה, המונה למעלה מ-1800 אוטובוסים, לאוטובוסים חשמליים עד שנת 2040. תוך השקעה בתשתיות.



<https://www.transitchicago.com/cta-unveils-first-ever-roadmap-for-conversion-to-an-all-electric-bus-system-by-2040/>

ובישראל, נכון לתחילת שנת 2025 על פי נתוני משרד התחבורה פועלים כבר כ-2000 אוטובוסים חשמליים. יעד הרשות לתחבורה ציבורית לשנת 2035 הוא מעבר מלא להפעלה של אוטובוסים עירוניים חשמליים.

🕒 **כלי רכב חקלאיים וציוד מכני הנדסי (צמ"ה):** המעבר למערכות הנעה היברידיות ודלק חלופי בכלי רכב חקלאיים וצמ"ה מונע על ידי הצורך להפחית פליטות, לשפר את יעילות הדלק ולעמוד בתקנות הסביבתיות המתפתחות. חשמול והכלאה של מכוניות כבדות נבדקות יותר ויותר כדי להוזיל עלויות תפעול ולמזער את התלות בסולר. ההתקדמות בטכנולוגיית סוללות, תאי דלק מימן ודלק ביולוגי מקלות על המעבר הזה, כאשר יצרנים רבים משקיעים במחקר ופיתוח כדי לשפר את תפוקת הכוח והעמידות בסביבות עבודה תובעניות. השילוב של מערכות ניהול אנרגיה חכמות ואוטומציה משפר עוד יותר את היעילות, ומבטיח שתעשיות אלו יכולות להסתגל לטכנולוגיות הנעה ברות קיימא תוך שמירה על רמות גבוהות של פרודוקטיביות.

ישראל - מגמות רישום כלי רכב

נתח רכבי בנזין נמצא במגמת ירידה בשוק הרכב הישראלי, עם ירידה משמעותית מ-65% בתחילת שנת 2020 ל-44.9% ברבעון הרביעי של 2024. מגמה זו מובחנת גם ברכבי דיזל עם ירידה מ-14% ברבעון האחרון של שנת 2020 לכ-7% מכלל הרכבים שנרשמו ברבעון הרביעי של שנת 2024.

לעומת זאת, כלי רכב חשמליים (EV) מציגים את הצמיחה המשמעותית ביותר מבין כל סוגי ההנעה מכ-1% ברבעון הראשון של שנת 2021 ל-24.8% ברבעון הרביעי של 2024. עליה זו מדגישה שינוי בולט לקראת ניידות חשמלית.

כלי רכב היברידיים (HEV), לאחר שחוו כמה תנודות במהלך השנים, מראים עלייה מחודשת ברבעון הרביעי של 2024 ל-21.8% מ-20.6% ברבעון השלישי של 2024.

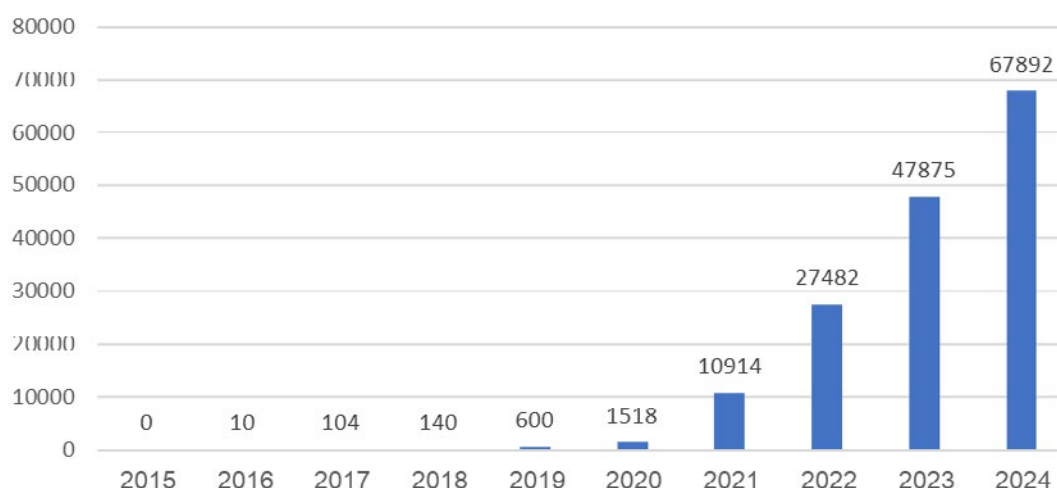
כלי רכב היברידיים פלאג-אין (PHEV) חוו ירידה בנתח השוק מכ-6.5% ברבעון האחרון של שנת 2023 לכ-2.6% ברבעון האחרון של שנת 2024. ייתכן וירידה זו נבעה לאור שינוי במיסוי שהושת על סוג רכבים זה בישראל, עם זאת בשלושת החודשים הראשונים של שנת 2025 מובחן שינוי במגמה שמוסבר מכניסתם לאחרונה של רכבי PHEV עם טווחי נסיעה חשמלית משופרים.

בתחום האוטובוסים נתח השוק של מנועי דיזל הוא עדיין הגבוה ביותר עם 91.8%, אוטובוסים חשמליים עם נתח שוק של 5.4% ואוטובוסים מונעי גז"ד 2.8%.

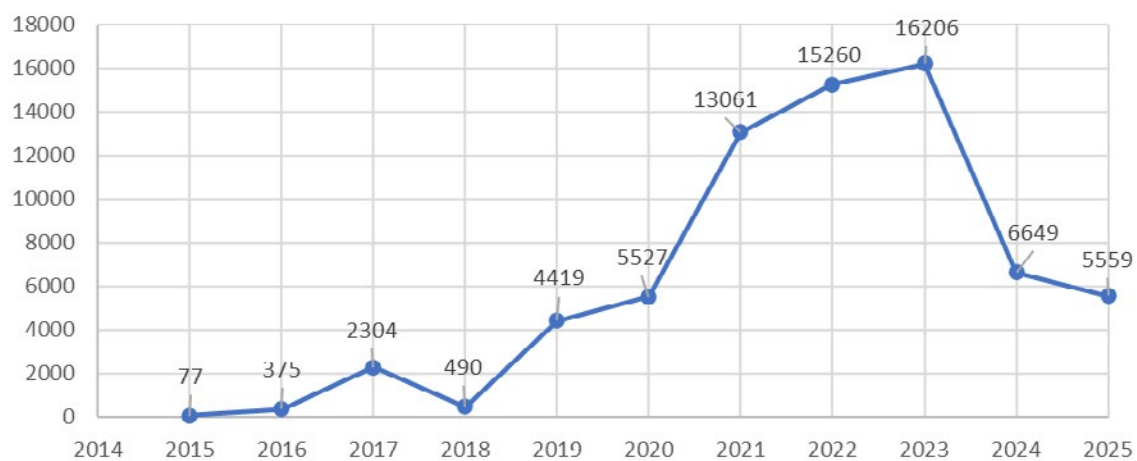
רכבי המשא עם הנעת דיזל מהווים את הנתח המשמעותי ביותר עם 96% ויתר 4% הם רכבי משא המונעים חשמלית.

כאמור, לצורכי פיילוט נרשמו בישראל 3 משאיות מונעות מימן ותאי דלק.

מספר רכבים חשמליים שנרשמו בישראל בחלוקה לשנים



מספר רכבים היברידיים פלאג-אין שנרשמו בישראל בחלוקה לשנים



נתוני שנת 2025 מתייחסים לסך הרכבים ההיברידיים שנרשמו ברבעון הראשון בלבד.

⊙ **סוללות במצב מוצק (Solid-State Batteries (SSB):** טכנולוגיית סוללות במצב מוצק מייצגת התקדמות גדולה באחסון אנרגיה, ומציעה צפיפות אנרגיה גבוהה משמעותית, זמני טעינה מהירים יותר ובטיחות משופרת בהשוואה לסוללות ליתיום-יון קונבנציונליות. בניגוד לסוללות מסורתיות המשתמשות באלקטרוליטים נוזליים, סוללות במצב מוצק משתמשות באלקטרוליטים מוצקים, המשפרים יציבות ומגדילים את הנצילות התרמית. צפיפות האנרגיה המוגברת הצפויה (עד פי 2.5) תאפשר טווח גדול יותר בכלי רכב חשמליים מבלי להגדיל את גודל הסוללה, בעוד שיעילות הטעינה והפריקה המשופרת ממזערת את הפסדי האנרגיה. בראייה של מחזור חיים, סוללת ה-SSB אמורה להיות פשוטה יותר לשימוש ומזהמת פחות. יתר על כן, היעדר מרכיבים נוזליים דליקים תשפר את הבטיחות הכללית, מה שהופך את SSB לאופציה אטרקטיבית עבור הדור הבא של כלי רכב חשמליים. עם זאת, עדיין יש לטפל באתגרים כמו עלויות ייצור גבוהות, זמינות חומרים ויכולת להגדלת תפוקת הייצור (scalability) לפני אימוץ מסחרי נרחב.

⊙ **רכבים המונעים על ידי שמש:** שילוב פאנלים פוטו-וולטאיים (PV) בכלי רכב מייצג התקדמות מבטיחה בתחבורה בת קיימא. כלי רכב המונעים על ידי שמש רותמים אנרגיה מאור השמש באמצעות תאים סולאריים בעלי יעילות גבוהה, הממירים את קרינת השמש לכוח חשמלי שיכול לשמש לתמיכה בפונקציות עזר או, במקרים מסוימים, לתרום ישירות להנעה. בעוד שהטכנולוגיה הנוכחית מגבילה את המידה שבה אנרגיה סולארית יכולה להחליף את שיטות הטעינה המסורתיות, התקדמות ביעילות פאנלים סולאריים, חומרים קלים ופתרונות אחסון אנרגיה מרחיבים את ההיתכנות של רכבי חשמליים להסתייע באנרגיית השמש. מחקר על תאים סולאריים גמישים ובעלי תפוקה גבוהה נועד למקסם את ניצול שטח הפנים בחלק החיצוני של הרכב, ובכך להגביר את לכידת האנרגיה ולשפר את יעילות הרכב הכוללת. פיתוחים עתידיים בתחום הפוטו-וולטאים המשולבים ברכב (vehicle-integrated photovoltaics - VIPV) עשויים לאפשר נהיגה חלקית או מלאה באמצעות אנרגיה סולארית בתנאים ספציפיים, להפחית את ההסתמכות על תשתית טעינה חיצונית ולשפר את האוטונומיה של הרכב.

⊙ **ניהול אנרגיה חכם (V2G, טעינה חכמה):** ניהול אנרגיה חכם במערכות אקולוגיות של רכב חשמלי עשויות למנף אינטראקציות מתקדמות ברשת כדי לשפר את יעילות האנרגיה, להפחית עלויות תפעול ולשפר את קיימות האנרגיה הכוללת. טכנולוגיית Vehicle-to-Grid (V2G) תאפשר זרימת אנרגיה דו-כיוונית בין הרכבים החשמליים לרשת, ותאפשר לרכבים להחזיר חשמל לרשת בתקופות שיא של ביקוש ולהטעין בתקופות ביקוש נמוך, ובכך לייצב את התשתית החשמלית. טעינה חכמה, המשלבת אלגוריתמים מונעי בינה מלאכותית וניטור רשת בזמן אמת, תייעל את לוחות הזמנים של הטעינה כדי למנוע עומס יתר ברשת ולמקסם את השימוש במקורות אנרגיה מתחדשים. חידושים אלו יתרמו להפצת אנרגיה גמישה ויעילה יותר, ויועילו גם לבעלי הרכבים וגם לספקי שירות על ידי שילוב פתרונות אחסון אנרגיה ומערכות דינמיות לניהול עומסים.

סיכום מערכות הנעה ברכבים ומבט אל העתיד

תחום הנעת רכבים נמצא בנקודת פיתול קריטית, המאזנת בין הסתמכות מתמשכת על טכנולוגיית מנועי בעירה פנימית (ICE) עם התקדמות מהירה של פתרונות חשמול ותאי דלק. בעוד שכלי רכב המונעים על ידי ICE צפויים להישאר בשימוש עוד שנים רבות עבור יישומים ספציפיים כגון הובלה ארוכת טווח ומכונות כבדות, המעבר הגלובלי לעבר ניידות דלת פחמן ואפס פליטות הוא הכרחי ובלתי נמנע. יישום מוצלח של טכנולוגיות הנעה ברות קיימא דורש גישה משולבת הכוללת התקדמות ביעילות ההנעה, פיתוח תשתיות ותמיכה רגולטורית רחבה.

שיתוף פעולה בין קובעי מדיניות, מהנדסים ובעלי עניין בתעשייה הוא הכרחי כדי להאיץ את המעבר וכדי להבטיח שמסגרות רגולטוריות, חידושים טכנולוגיים ותשתיות אנרגיה יתפתחו במקביל. ממשלות חייבות להשקיע באופן מתמשך בטכנולוגיות הנעה מתקדמות, קובעי מדיניות חייבים להמשיך לחוקק וליישם רגולציה מתקדמת שתאפשר אימוץ אנרגיה נקייה, בעוד שיצרני רכב וספקי אנרגיה חייבים להשקיע בפתרונות מדרגיים וחסכוניים. בנוסף, מחקר מתמשך בשיטות אחסון אנרגיה, התקדמות בפיתוח תאי דלק מימן ודלקים סינתטיים ישחק תפקיד חיוני בעיצוב העתיד של תחבורה ברת קיימא. על ידי טיפוח שיתוף פעולה חוצה מגזרים, יישור מדיניות בינלאומית ותיעדוף השקעות בטכנולוגיות מתפתחות, תעשיית הרכב יכולה להשיג איזון בין ביצועים, קיימות וכדאיות כלכלית, ולסלול את הדרך לאקו-מערכת ניידות גלובלית נקייה ויעילה.

- ⦿ Internal Combustion Engine Fundamentals - J. B. Heywood
- ⦿ Bosch Automotive Handbook - 9th Edition
- ⦿ U.S. Department of Energy
- ⦿ United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) website
- ⦿ Biofuel Definition, Types, & Pros and Cons Britannica www.britannica.com. 18 March 2024. Retrieved 2 April 2024
- ⦿ Fuel cell-based hybrid electric vehicles - Green Energy and Intelligent Transportation journal December 2023
- ⦿ Advanced Fuel Cells Technology Collaboration - ieafuelcell.com/
- ⦿ Interact analysis - interactanalysis.com/insight/80-of-global-hydrogen-refueling-stations-are-located-in-just-five-countries/?utm_source=chatgpt.com

⦿ אתר משרד התחבורה - נתוני רישום רכבים בישראל



איגוד יבואני הרכב בישראל ע"ר
Israel Vehicle Importers Association

