استفاده از نیروی هوای فشرده در خودرو

امیر کریمی

کارشناس‌ارشد بهبود روش‌های حمل‌ونقل

چکیده

تغییر سبد انرژی با توجه به آثار مخرب آلایندگی زیست‌محیطی در کشور که تحمیل‌کننده هزینه‌های اجتماعی، زیست‌محیطی و درمانی جبران‌ناپذیری به شهروندان خصوصاً کلان‌شهرها شده است یکی از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر است. یکی از راهکارهایی که امروزه مورد توجه دولت‌ها قرار گرفته است استفاده از وسایل نقلیه با سوخت پاک به عنوان یکی از فناوری‌های جایگزین فناوری‌های موجود در صنعت خودروسازی است.

در این گزارش به استفاده از سوخت پاک هوا در حمل‌ونقل پرداخته شده است و پارامترهای مهم تحلیل یک سوخت که شامل عملکرد، هزینه و آلایندگی می‌باشد را مورد بررسی قرارگرفته و نمونه‌های تجاری موجود در بازار معرفی می‌گردد.

طبق بررسی انجام شده مشاهده می‌شود با وجود اینکه هوا یک سوخت ارزان و پاک می‌باشد، هزینه فشرده‌سازی آن و بازدهی عملکرد موتور آن باعث می‌شود استفاده از هوای فشرده در حمل‌ونقل با چالش‌هایی روبرو باشد و تنها بتوان آن را در مسافت‌های کم و خودروهای کوچک به کار گرفت هرچند در این حالت نیز با در نظرگرفتن هزینه فشرده‌سازی، نسبت به سوخت‌های دیگر گران‌تر خواهد بود. شاید در حال حاضر استفاده از هوای فشرده را فقط در حالت هیبرید یا ترکیبی در کنار موتور احتراقی بتوان توجیه‌پذیر دانست که نمونه‌هایی از آن هم ساخته شده و به نتایج قابل قبولی نیز رسیده است.

مقدمه

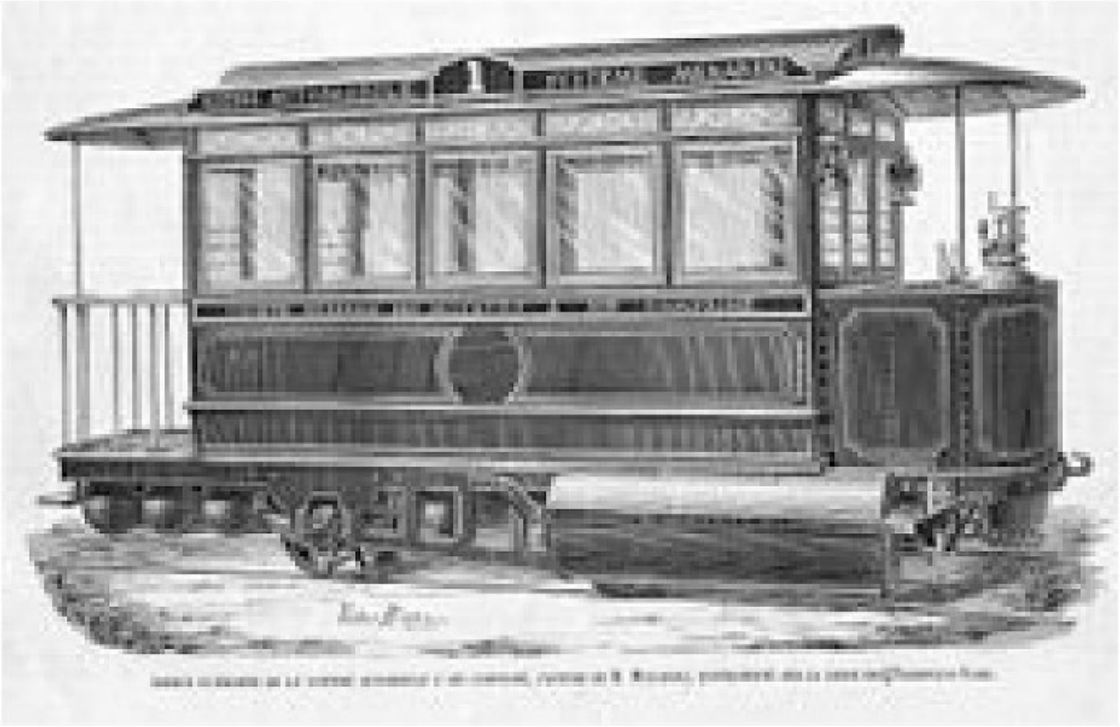
استراتژی آینده در تعهد به حفاظت از محیط زیست، خودروهای با موتورهای احتراقی را به سمت حذف‌شدن آن‌ها سوق می‌دهد. پروتکل‌ها و تدابیر زیست‌محیطی به منظور تضمین کیفیت هوا سبب شده تا در سال‌های آینده شاهد حذف تدریجی وسایل نقلیه مجهز به موتورهای احتراقی باشیم. در این چارچوب، اتومبیل‌های بنزینی و دیزلی در آخرین مرحله از حیات خود قرار دارند. تولیدکنندگان خودرو با افزایش تنوع در سبد سوخت حمل و نقل برای تغییری اساسی آماده می‌شوند اما برای ایجاد این تغییر با چالش‌های جدی‌ای مانند نیاز به ارتقا تکنولوژی، قیمت بالا و سلیقه مشتریان روبه‌رو هستند.

به طور مثال اتحادیه اروپا در نظر دارد تا سال ۲۰۵۰میلادی انتشار گازهای گلخانه‌ای را به صفر برساند که این به معنی کنار گذاشتن زغال سنگ، نفت و گاز، تغییر سریع در سامانه های تولید انرژی (اصطلاحا انرژی سبز)، تولید وسایل نقلیه بدون انتشار گازهای گلخانه‌ای است. اقداماتی که مستلزم هزینه‌کرد و سرمایه‌گذاری میلیاردها یورویی است. قسمت اعظم سبد سوخت خودروی آینده در کوتاه و بلندمدت متعلق به سوخت‌های الکتریکی خواهد بود اما استفاده از راهکارهایی برای افزایش راندمان خودروها می‌تواند نیل به هدف کربن-صفر را آسان‌تر کند. یکی از این راهکارها استفاده از هوا در سیستم مولد انرژی خودرو می‌باشد.

طراحی و ساخت خودروهایی که با انرژی هوا حرکت می‌کند از یک قرن پیش ذهن بسیاری از مهندسان را به خود مشغول کرده و به عنوان معمایی مطرح بود که مهندسان در دنیا در تلاش بودند برای آن پاسخ قابل قبولی بیابند. اما محدودیت‌هایی که امروزه بشر در زمینه استفاده از سوخت‌های فسیلی با آن مواجه شده، موجب شد هوا به عنوان رقیبی جدی در برابر دیگر انواع سوخت های جایگزین مطرح شود. هوا انرژی ای است که مزیت‌های آن در مقابل دیگر منابع انرژی بر هیچ کس پوشیده نیست؛ منبعی پاک و عاری از هر گونه آلودگی که مهم‌ترین مزیت آن را می‌توان رایگان بودنش دانست، اما آنچه در استفاده از هوا به عنوان منبعی برای تامین انرژی مطرح است ضرورت نیاز به استفاده از انرژی برای ذخیره انرژی در مولکول‌های هواست. اگر بخواهیم از هوا به عنوان منبعی برای تامین انرژی استفاده کنیم باید هوا را فشرده یا متراکم کنیم که این ویژگی محدودیت بزرگی در طراحی و ساخت خودروهایی است که با انرژی هوا کار می‌کنند و این همان معمایی است که محققان برای حل آن با یکدیگر در رقابت هستند.

تاریخچه

استفاده از هوای فشرده در حمل‌ونقل ابتدا در سال 1890 در لکوموتیوی که توسط شرکت هارمن طراحی شد به کار گرفته شد این لکوموتیو با یک سیلندر و نیروی هوای فشرده حرکت می‌کرد، هوای فشرده توسط آب داغ گرم و به سیلندر هدایت می‌شد. در شکل زیر شکل این لکوموتیو آورده شده است:



شکل1 – استفاده از هوای فشرده در قرن 19 در لکوموتیوها

تا سال‌های بعد استفاده از هوای فشرده در حمل‌ونقل محدود به لکوموتیوها شده بود که در سال 1930 به علت به‌کارگیری موتورهای احتراق فسیلی، هوای فشرده بازار خود را از دست داد و موتورهای بنزینی- گازوییلی جایگاه خود را به عنوان تنها مولد انرژی در حمل و نقل تثبیت کرده بودند. در سال 1970 به علت مسایل اقتصادی و زیست محیطی بار دیگر تحقیقات بر روی هوای فشرده شروع شد.

اولین خودرو بادی ترویان نام داشت که قدرت خود را از فلای ویل و هوای فشرده در یک سیستم بسته تامین می‌کرد، این خودروی بادی در ارتش آمریکا و ناسا نیز مورد استفاده قرار گرفت. مخترعان دیگری نیز در آن سال‌ها بر روی خودروی بادی کار کردند که در جدول زیر آورده شده است:

Inventions of compressed air propulsion system during the 1970s.

	Inventor	Year	Nation
1	Joseph P. Troyan	The 1970s	USA
2	Willard Truitt	The 1970s	USA
3	Russel R. Brown	1974	USA
5	Vittorio Sorgato	1975	Italy
6	Ray Starbard	1976	USA
7	Terry Miller	1979	USA

موتورهای هوای فشرده، موتورهایی با ساختار ساده، ایمن، با قابلیت اطمینان بالا و ارزان هستند. اولین خودروی تجاری با موتور هوای فشرده، در دهۀ 1990 و توسط مخترع فرانسوی با نام Guy Negre ، که بنیان‌گذار شرکت معروف Moteur Developpment International (MDI) در کشور لوگزامبورگ است، ساخته شد. به جز این شرکت، شرکت‌های مهم و مستقل دیگر به نام‌های Energine ، Energine Air، K'Airmobiles، Quasiturbine، Regusci، Team Psycho-Active و ... نیز در همین حوزه مشغول فعالیت می‌باشند.

یکی از مهم‌ترین مزایای موتورهای هوای فشرده، سادگی آنهاست؛ بگونه‌ای که برخلاف موتورهای احتراق داخلی، تولید آنها با امکانات و تجهیزات اندکی میسر می‌شود. همین امر، مهمترین چالش پیش روی صنعت نوپای موتورهای هوای فشرده نیز محسوب می‌شود؛ زیرا سادگی بیش از حد این موتورها ممکن است باعث خارج‌شدن تعداد زیادی از خودردوسازی جهان از گردونه رقابت شود. به همین دلیل، شرکت‌های بزرگ خودروسازی سعی می‌کنند تا حتی‌الامکان تجاری شدن چنین خودروهایی را به تاخیر بیاندازند به طور کلی مزایای این نوع موتورها شامل موارد زیر می‌شود:

1- به لحاظ مکانیکی بسیار ساده بوده و صنایع ساخت موتور را دچار تحول عظیمی خواهند نمود.

2- بسیار سبک بوده (ازجنس آلومینیوم) و اضافه وزن ناشی از محفظۀ مورد نیاز ذخیره‌سازی هوای فشرده را جبران می‌کنند. البته در برخی تکنولوژی‌های جدید هوای فشرده در خود خودرو تولید شده (با بالانس تولید و مصرف هوای فشرده) و دیگر نیاز به ذخیره‌سازی آن نخواهد بود.

3- منجر به حذف سیستم‌های تهویۀ مطبوع، سرمایش موتور، شمع و استارتر، تعلیق و صداگیر در خودروها می‌شود. این امر، علاوه بر کاهش قیمت خودرو و بهبود کیفیت سیستم تهویه مطبوع، موجب کاهش انتشار گازهای

گلخانه‌ای نیز می‌شود. بویژه در نقاط گرم‌سیر، به دلیل استفاده مستقیم از سرمایش حاصله از منبسط‌شدن هوای فشرده، راندمان خودرو بهبود قابل توجهی خواهد یافت.

4- هزینهٔ تعمیر و نگهداری و قیمت خودروها به شدت کاهش می‌یابد.

5- میزان انرژی قابل احیاء در حین ترمزها، بسیار بالا و تا حدود 60٪ گزارش شده است. بعلاوه، سیستم احیای انرژی ترمزی در این خودروها بسیار ساده و ارزان قیمت است. بویژه در اتوبوسها و سایر وسایط حمل و نقل عمومی، که تعداد توقفها بسیار بالاست، می‌توان با پیاده‌سازی این سیستمهای احیای انرژی ترمز، بازده استفاده از سوخت را افزایش چشم‌گیری داد. بدین ترتیب، بازدهی بخش حمل و نقل عمومی افزایش قابل توجهی یافته و به کاهش آلودگی کلانشهرها کمک شایانی خواهد شد.

6- با توجه به احتراقی‌نبودن موتور و ساختار مکانیکی بسیار سادهٔ آن، انرژی تنها در هنگام فشردن پدال گاز تولید شده و لذا خودروهای با سوخت هوای فشرده، درترافیک‌ها و توقف‌های متعدد پشت چراغ راهنمایی انرژی مصرف نمی‌کند.

یکی از نکاتی که ممکن است به صورت غیر مستقیم اهمیت موتورهای هوای فشرده و خودروهای مبتنی بر آن را نشان دهد، سرمایه‌گذاری گستردهٔ کشور هند در این حوزه است. کشور هند، کشوری است که در آن لابی‌گری قدرت‌مندی برای تأثیرگذاری بر سیاست‌های بلند مدت ندارد. لذا، سرمایه‌گذاری گسترده کشور هند در زمینه ساخت موتور و خودروهای هوای فشرده را می‌توان به عنوان یک نشانه از اهمیّت قابل توجه موضوع در نظر گرفت.

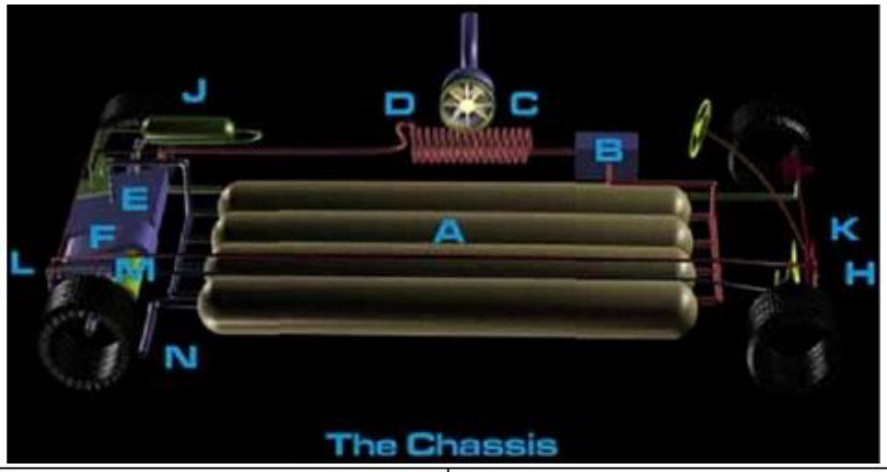
البته کشور هند دارای ویژگی‌هایی خاصی هم است که استفاده از موتورهای هوای فشرده و خودروهای مبتنی بر آن را برای این کشور بسیار جذاب نموده است. جمعیت بالای هند، فقر عمومی و استقبال عمومی از خودروهای ارزان قیمت، ترافیک بسیار زیاد خیابان‌ها و مقررات وضع شده در خصوص محدودیت سرعت در بیشتر آنها، ارزانی و منطبق‌بودن خودروهای هوای فشرده با مقررات زیست‌محیطی، منطبق‌بودن هوای گرم کشور هند با ویژگی تولید فرآیندی هوای خنک در موتورهای هوای فشرده و سیاست‌های هند در توسعهٔ سریع انرژی‌های تجدیدپذیر از جملهٔ این ویژگی‌ها می‌باشند.

فناوری خودروی Air compressed(هوای فشرده)

خودروی هوای فشرده (Compressed air cars) خودرویی است که با موتورهایی که از هوای فشرده استفاده می‌کنند، کار می‌کند. این در حالی است که در اتومبیل‌های معمولی سوختی از جنس بنزین یا گاز عادی استفاده می‌شود. خودروی هوای فشرده می‌تواند در شکل‌های مختلف طراحی گردد، کمپرسور می‌تواند در خودرو تعبیه شود و هوا را فشرده کند یا اینکه از مخزن هوای فشرده استفاده شود و در ایستگاه سوخت‌گیری توسط کمپرسور، مخزن تعبیه شده در خودرو پر شود.

موتوری که در یک خودرو با این فناوری نصب شده است، از هوای فشرده‌ای که در مخزن اتومبیل با فشار 4500 psiیا حدود ۳۱۰ بار ذخیره می‌شود، استفاده می‌کند. فناوری استفاده شده در موتورهای هوایی کاملا متفاوت با فناوریی است که در خودروهایی با سوخت معمولی استفاده می‌شود. آن‌ها از فشار ایجاد شده توسط گسترش هوای فشرده برای به راه انداختن پیستون استفاده می‌کنند. این فرایند سبب می‌شود آلودگی ایجاد نشود؛ چرا که هوا تنها ماده‌ای است که توسط موتور برای تولید انرژی استفاده می‌شود و ماده‌ی دورریختنی نیز خود هوا است.

در شکل زیر یک نمونه از موتور خودروی بادی نشان داده شده است:

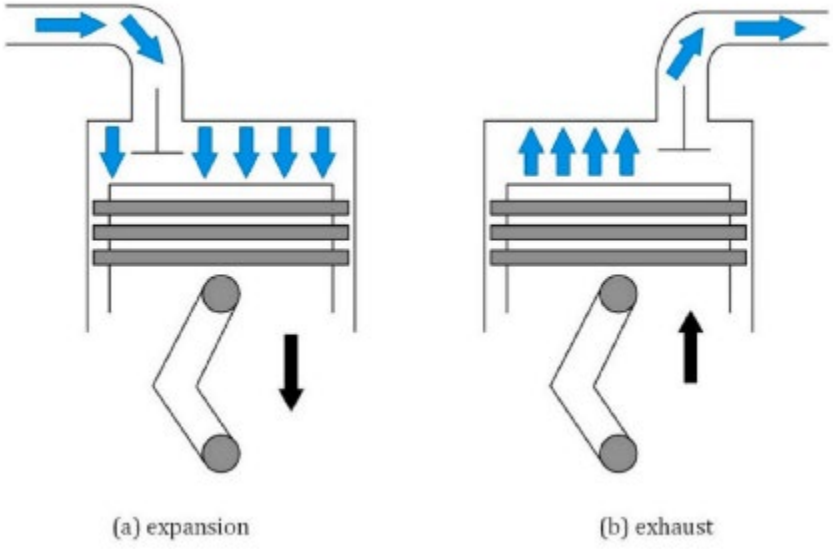


A – تانک فیبر کربنی	H – پدال گاز
B – تبدیل کننده	J – بازیافت کننده انرژی
C – مبدل حرارتی	K – ترمز موتور
D – دستگاه	L – ترمز هیدرولیک
E – موتور	M – کمپرسور
F – تبدیل	N – محل بارگیری هوای فشرده
G – محور	

شکل2 – اجزای یک نمونه موتور هوای فشرده

مهندسان مخزن ذخیره‌سازی را از فیبر کربن طراحی کرده‌اند تا وزن ماشین را کاهش دهد و در صورت برخورد مستقیم از انفجار جلوگیری نماید. مخازن فیبر کربن قادرند فشار هوای تا حدود 4500 psi را تحمل کنند؛ فشاری که مخازن فولادی قادر به تحمل آن نیستند. برای پر کردن مخزن ماشین با هوا، کمپرسور مورد استفاده باید به ماشین متصل شود. این کمپرسور از هوای اطراف برای پر کردن مخزن هوای فشرده استفاده می‌کند.

هوای فشرده که از مخزن ذخیره هوا و یا کمپرسور تعبیه شده در خودرو (بستگی به نوع فناوری استفاده شده) وارد سیلندر شده و موجب به حرکت درآوردن پیستون و در نهایت چرخ‌ها می‌شود و در نهایت به اتمسفر تخلیه می‌شود.



شکل3– کارکرد هوای فشرده در سیلندر خودروی بادی

هوای فشرده شده در نقطه مرگ بالا وارد شده پیستون را به پایین حرکت می‌دهد و در نقطه مرگ پایین دریچه اگزوز باز شده و هوا خارج می‌شود.

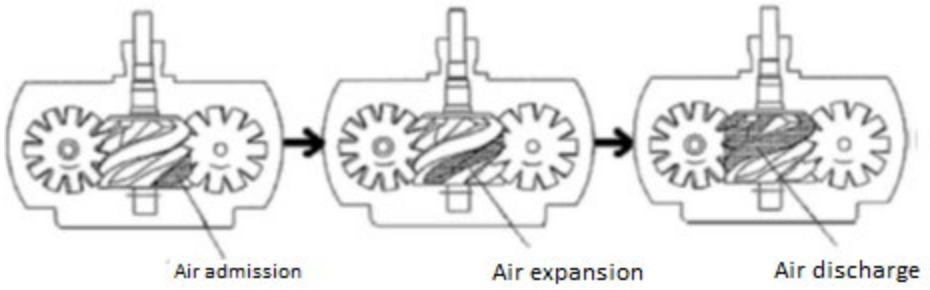
یک تیم تحقیقاتی در دانشگاه بیجینگ و چند دانشمند بر روی تاثیر دما در موتور هوایی فعالیت کردند و پیشنهاد دادند به علت افت دمای زیاد طی فرایند انبساط نیاز است از مبدل حرارتی برای گرم کردن هوا استفاده شود تا از یخزدگی جلوگیری شود و انجام این کار موجب افزایش 30 درصدی راندمان موتور خواهد شد.

غیر از موتور پیستونی حالت هایی دیگری نیز برای موتور بادی مورد بررسی قرار گرفته است که خلاصه نتایج در جدول زیر آورده شده است:

Compressed air engines with different types of expansion machines.

Item	Year	Author	Type[a]	Engine type	Conclusions
1	2009	Shen et al.	E	vane type air motor	The efficiency is above 70% when the motorcycle speed is over 20 km/h. The power consumption is about 0.073 kWh per kilometre compared to 0.127 kWh per kilometre for conventional d internal combusting engine motorcycle. Transportation distance should be improved.
2	2010	He et al.	E	single screw expander	The highest overall efficiency is 55%, the largest torque is nearly 100 N m, the biggest power output is about 22 kW and the lowest gas consumption is about 60 kg/kW h.
3	2012	Zhang et al.	E	scroll expander	The maximum air mass consumption rate is 800 kg/h, the maximum power is 8.112 kW, and the maximum efficiency is only 0.26
4	2015	Xu et al.	N	twin rotor piston engine	The maximum output torque is 100 N m at 450 r/min under the gas pressure of 0.6 MPa.

در جدول بالا E به معنای آزمایشگاهی و N به معنای مدلسازی عددی می‌باشد و بازده‌های اشاره شده بازده فرایند انبساط هوا می‌باشد. به علت مشکلات موتور پیستونی مانند بازده پایین، آلودگی صوتی بالا، ساختار پیچیده و استهلاک بالا موتور اسکرو را جایگرین موتور پیستونی شد:

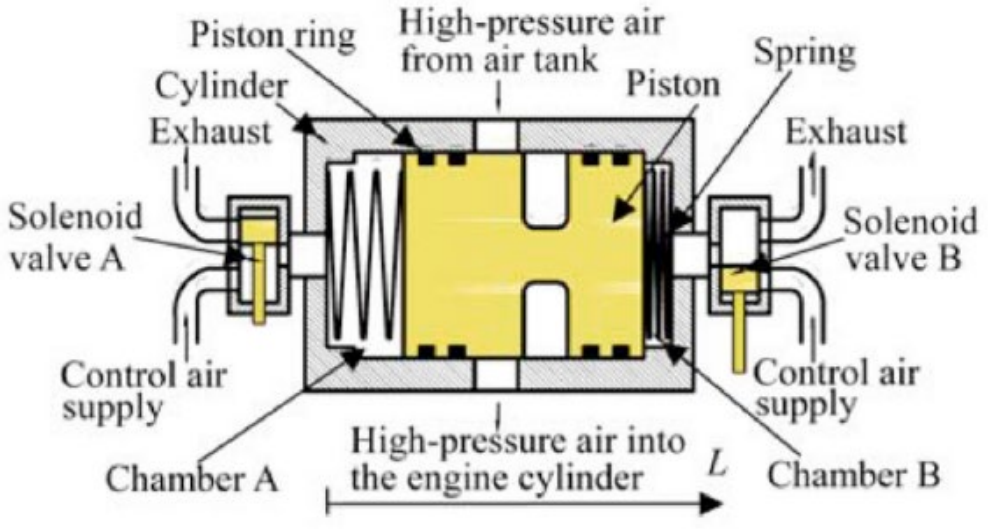


شکل4 – استفاده از هوای فشرده در موتور اسکرو

در حالت آزمایشگاهی در فشار 1.5 مگا پاسکال بازدهی این موتور حداکثر 55 درصد اندازه‌گیری شد.

فرایند تراکم و انبساط هوا تعیین‌کننده میزان بازدهی موتورهوایی خواهد بود بنابراین کنترل جریان هوا در این فرایند الزامی می‌باشد. در بررسی‌ها مشخص شد استفاده از اکسپندر برای انبساط هوا به‌جای تراتلینگ می‌تواند راندمان را تا 40 درصد افزایش دهد. محققان زیادی بر روی دریچه ورودی هوا کار کردند و اثر آن بر بازدهی موتور هوایی را بسیار تعیین‌کننده اعلام کردند.

استفاده از FVVA (Full Variable Valve Actuation) برای تنظیم زمان و فشار هوای ورودی متناسب با کارکرد موتور می‌تواند راندمان موتور را تا 50 درصد افزایش دهد در زیر شماتیک این سیستم نشان داده شده است:



شکل5 – شماتیک شیرFVVA جهت تنظیم هوای ورودی به موتور

نمونه‌های تولیدشده

1-خودروی بادی شرکت MDI

شرکت توسعه موتور لوکزامبرگ در سال 1996از یک منبع فراوانی که تمام‌شدنی نیست الهام گرفت و حال شرکت MDI در روند توسعه این طرح خودرویAirpod را با همکاری تاتاموتورز طراحی کرده است که می‌تواند از هوای فشرده برای حرکت و قدرت استفاده کند. این خودروی هوازی با ظرفیت 3 سرنشین مانند بازی‌های کامپیوتری با یک جوی استیک کنترل می‌شود. مخزن 175 لیتری این ماشین هوازی در حدود یک و نیم دقیقه پر می‌شود.این خودرو 220 کیلوگرم وزن دارد و با فشار 350 بار کار می‌کند و حداکثر سرعت آن 45 کیلومتر بر ثانیه است.

AIR

شکل6- تصاویر خودرو Airpod

شرکت تاتاموتورز و MID قصد دارند فروش این خودروی هوازی را با قیمت 10 هزار دلار در میان طرفداران خودروهای خاص شروع کنند.

MDI دو نوع خودروی بادی طراحی کرده است که نوع اول آن کاملا بادی و نوع دوم به صورت هیبریدی با موتور احتراقی می‌باشد. این شرکت ادعا کرده است در حالت کاملا بادی برنامه دارد در آینده نزدیک با ارتقا تکنولوژی حداکثر این خودرو می‌تواند در مناطق شهری 140 کیلومتر را با یک بار سوختگیری طی کند و هم‌چنین در اتوبان‌ها با سرعت 110 کیلومتر در ساعت تا حداکثر مسافت 80 کیلومتر طی کند.

شرکت MDI چند مدل بر اساس ظرفیت نفرات ارایه کرده است که از سه نفره تا 6 نفره را شامل می‌شود این خودروها به علت **سیستم مکانیکی ساده‌تر و تجهیزات کمتر** زیر 900 کیلوگرم وزن دارند(مدل 6 نفره آن) و هزینه ساخت آن 20 درصد ارزان‌تر می‌باشد.

از معایب این خودروها به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

1- محدودبودن توان تولیدی و هزینه فشرده‌سازی هوا از معایب اصلی بوده و انرژی که صرف فشرده‌سازی هوا می‌شود در طی پروسه انبساط و تزریق به موتور هدر می‌رود.

2- پر کردن مخزن ذخیره هوا در خانه ممکن است تا 4 ساعت طول بکشد، البته با کمپرسورهای پیشرفته در ایستگاه‌های سوخت‌گیری این زمان 3 دقیقه خواهد بود.

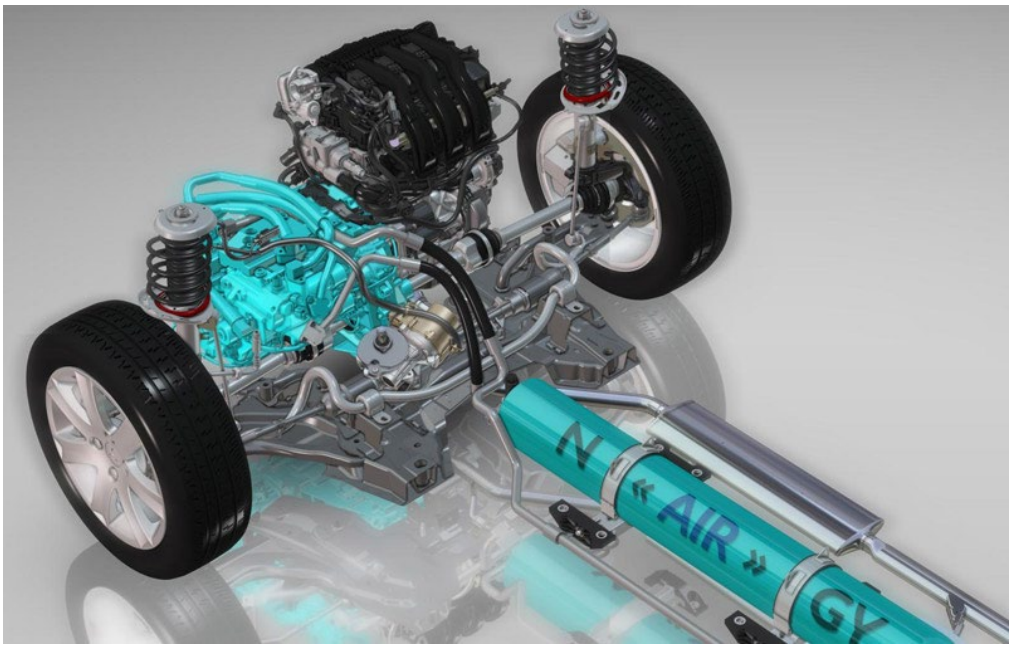
3-گرم شدن هوا در حین پر کردن مخزن تحت فشار هواست که موجب کاهش ظرفیت ذخیره‌سازی می‌شود.

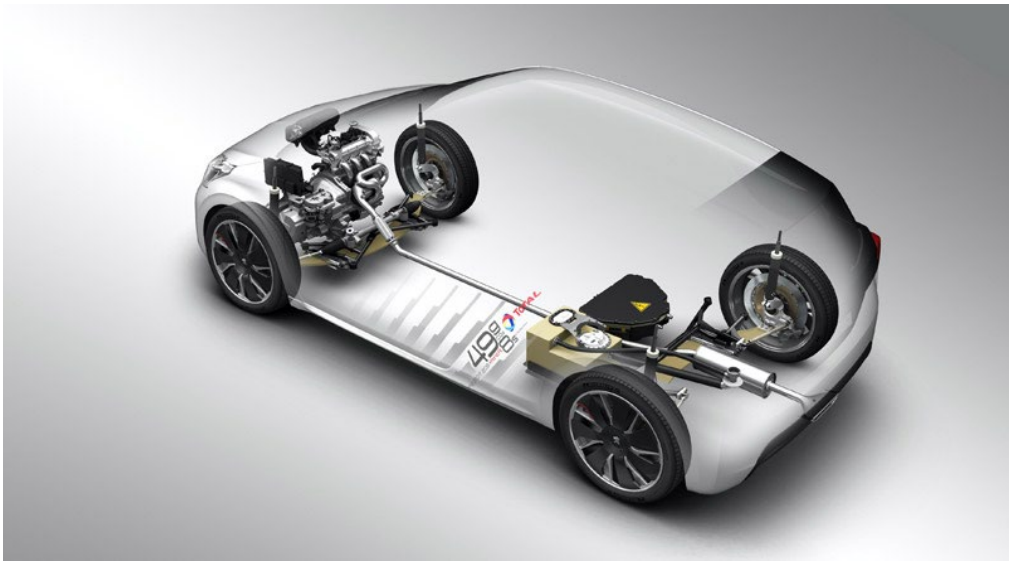
2- پژو 208 هیبرید FE

برای اولین بار در سال ۲۰۱۶، پژو یک مدل هیبرید ایر با کمک هوای فشرده را به بازار معرفی کرد. پژو ۲۰۸ هیبرید ایر.(HYbrid Air 2L) . در نتیجه استفاده از مواد سبک‌وزنی چون انواع کامپوزیت فیبر کربن و آلومینیوم، وزن این خودرو ۱۰۰ کیلوگرم کمتر از مدل استاندارد است و به ۸۶۰ کیلوگرم رسیده است، خودرویی با مصرف ۱٫۷۴ لیتر و میزان آلایندگی تنها ۴۹ گرم در هر ۱۰۰ کیلومتر.

موتور استاندارد مورد استفاده یک موتور سه سیلندر ۱٫۲ لیتری از سری ۸۲ اسبی است که با یک گیربکس ۵ سرعته دستی جفت می‌شود؛ نکته جالب این خودرو، پیشرانه کمکی آن است. یک مخزن هوای فشرده با فشار 4300 پوند بر اینچ‌مربع در زیر بدنه و یک مخزن کم‌فشار در نزدیکی محور عقب (به‌عنوان محفظه انبساط) قرار می‌گیرند. یک سیستم هیدرولیک با موتور و پمپ در قسمت پیشرانه موتور قرار می‌گیرد. وظیفه سیستم هیدرولیکی فوق ایجاد یک تعادل مناسب بین منابع انرژی و همچنین تأمین نیروی لازم برای سیستم تعویض دنده اتوماتیک می‌باشد.

این خودرو می‌تواند در سه حالت انرژی لازم را تامین کند، حالت اول بدون استفاده از موتور احتراقی و در حالت آلایندگی صفر است که توسط هوای فشرده و موتور هیدرولیک در سرعت‌های زیر 70 کیلومتر خودرو نامین می‌شود، حالت دوم فقط موتور احتراقی در مدار قرار دارد که در رانندگی برونشهری که به سرعت‌های بالا نیاز است فعال می‌شود و حالت سوم حالت ترکیبی است که انرژی مورد نیاز از هوای فشرده و موتور احتراقی همزمان تامین می‌گردد که در مواقعی که به شتاب بالا نیاز است استفاده می‌گردد. مخزن هوای فشرده از انرژی ترمز برای شارژ خود استفاده می‌کند.


N
AIR
GY



شکل7- تصاویر خودرو پژو هیبریدی

قیمت این خودرو 26 هزار دلار است که از هم‌رده خود حدود 7000 دلار ارزان‌تر می‌باشد. به گفته محققان این سیستم که «هیبرید هوایی» نام دارد، انقلاب بزرگی در صنعت خودرو به شمار می‌آید و نخستین سیستمی است که می‌تواند بنزین را با هوای فشرده ترکیب کند. افزایش و کاهش سرعت خودرو در فشرده‌سازی و آزادسازی هوا نقش بسیار مهمی دارد. به این ترتیب به کمک این فناوری خودروهای هیبریدی دیگر به باتری‌های گرانقیمت نیازی ندارد و می‌تواند با استفاده از بنزین و هوای فشرده حرکت کند. برآوردهای انجام شده نشان می‌دهد ساخت این سیستم هیبرید هوایی به مراتب بسیار ارزان‌تر از خودروهای هیبریدی کنونی خواهد بود.

3- خودرو هواسوز ایرانی قاصدک

«قاصدک« خودرو کوچکی شبیه به یک باگی فاقد در، سقف و شیشه است. داخل بدنه 2 کپسول هوای فشرده 100 و 120 لیتری با فشار بیشینه 200بار قرار گرفته که یکی تماما از جنس فولاد ضد زنگ و دیگری از جنس فولاد ضدزنگ و کامپوزیت (فیبرکربن) است. هوای خالص متراکم پیشرانه را به‌کار انداخته و نیروی حاصل با استفاده از یک جعبه‌دنده تک سرعته (جلو و عقب) به چرخ‌ها می‌رسد. این مجموعه در شرایط بهینه و درصورت دورگرفتن به مقدار کافی، می‌تواند به سرعتی حدود 40 کیلومتر در ساعت دست یافته و مسافت 30 الی 60 کیلومتر را پشت سر بگذارد. همچنین بسته به وزن افراد، ظرفیت حمل 3 یا 4 نفر را دارد. این خودرو حاصل همجوشی فناوری و قطعات هواپیمایی و شاکله یک خودرو بوده و فعلا به‌عنوان یک پروتوتایپ مفهومی شناخته می‌شود.

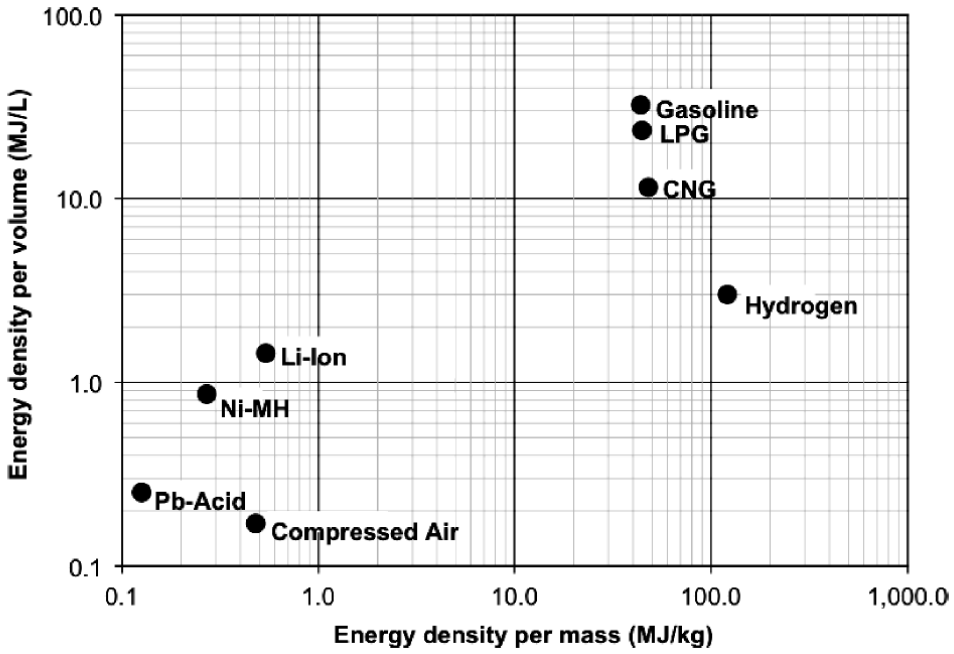
مخترع آن در آینده قصد دارد با تلفیق فناوری آن با خودروهای بنزینی دیفرانسیل جلو و خلق یک مجموعه هایبرید هوا-بنزین را طراحی کند؛ بدین ترتیب که محور جلو به دیفرانسیل جلو و بلوک بنزینی متصل شود و محور عقب با تکیه بر پیشرانه هواسوز به حرکت درآید. با استفاده از این روش می‌توان برد مسافت واقعی را به میزان قابل‌توجهی افزایش داد و همزمان، به مصرف سوخت (بنزین) بسیار کمتری نیاز است. همچنین در صورت برقراری زمینه‌های لازم، امکان بهره‌گیری از زیرساخت‌های پمپ‌های CNG کنونی برای تأمین هوای فشرده موردنیاز خودروها وجود دارد و نیاز به صرف هزینه‌های اضافی و احداث پمپ‌های جدید نخواهد بود.

شکل8- تصاویر خودرو قاصدک

مقایسه هوای فشرده با سوخت‌های دیگر

برای مقایسه سوخت‌های مختلف پارامترهای کارایی و بازدهی، چگالی انرژی و آلایندگی مورد توجه قرار می‌گیرد، برای این مقایسه از 2 دیدگاه می‌توان مقایسه را انجام داد، دیدگاه اول اینست که انرژی را از مخزن یا پمپ تا چرخ تحلیل کرد(Pump to Wheel) و دیدگاه دیگر تحلیل انرژی از تولید آن تا چرخ تحلیل کرد (well to wheels).

در شکل زیر مقایسه چگالی انرژی سوخت‌های مختلف آورده شده است:



شکل9- مقایسه چگالی انرژی سوخت‌های مختلف

همانطور که از شکل بالا مشخص است چگالی انرژی هوای فشرده(فشار 300 بار) حدود 370 کیلوژول بر کیلوگرم است که در مقایسه با چگالی انرژی سوخت‌های فسیلی که حدود 35 مگاژول بر کیلوگرم است تقریبا یک دهم می‌باشد، در طراحی خودرو مساله محدودیت فضا بسیار اهمیت دارد و نیاز است از سوختی استفاده شود که بر واحد حجم چگالی انرژی بالایی داشته باشد. چگالی انرژی هوای فشرده 180 کیلوژول بر لیتر، باتری لیتیومی 1.5 مگاژول بر لیتر و سوخت‌های فسیلی نیز حدود 30 مگاژول بر لیتر است که نشان‌دهنده چگالی انرژی بسیار پایین هوای فشرده در مقایسه با سوخت‌های دیگر دارد. با فرض یک مخزن 300 لیتری کل انرژی قابل دسترس در خودروی بادی با توجه به شکل بالا 54 مگاژول خواهد بود که معادل 1.8 لیتر بنزین می‌شود که عدد بسیار کمی می‌باشد.

از بررسی بالا فهمیده شد هوای فشرده انرژی کمی در اختیار کاربر قرار می‌دهد و به همین علت استفاده به تنهایی از آن برای تامین انرژی خودروها محدود به مسافت‌های کم خواهد شد. البته با افزایش تکنولوژی و طراحی مخازنی که بتواند فشارهای چندین برابر 300 بار را تحمل کند، می‌توان این محدودیت را برطرف کرد. هر چند افزایش فشار تلفات را نیز افزایش می‌دهد، بر اساس اصول ترمودینامیک بازدهی فرایند انبساط هوا در سیلندر **حداکثر 53 درصد** می‌باشد(تامین انرژی از انبساط هوا در فرایند آدیاباتیک نسبت به انرژی در دسترس فرایند آیزنتروپیک)

بازدهی کمپرسور ایستگاه سوخت 70 درصد و بازدهی موتور و سیستم انتقال قدرت 40 درصد فرض شده است در نتیجه بازدهی کل PTW(Pump to Wheel) نسبت انرژی ورودی کمپرسور به انرژی چرخ‌ها برابر **15 درصد** خواهد بود.

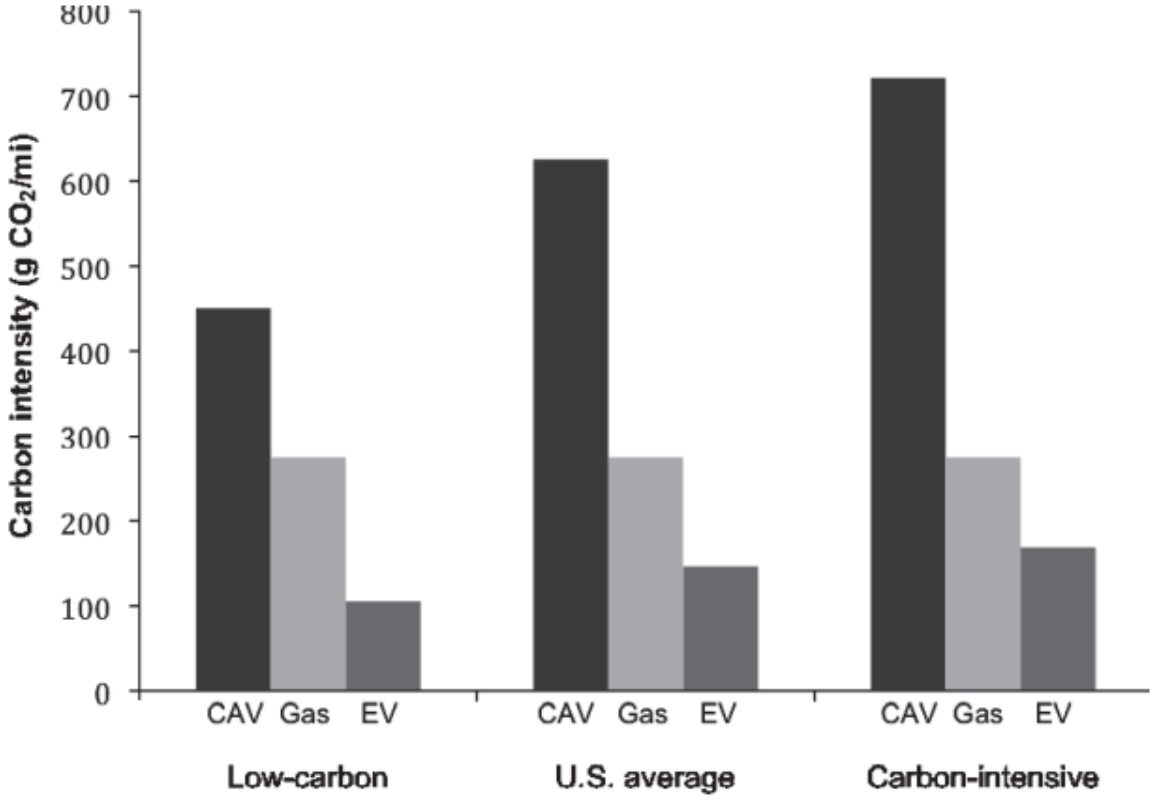
برای یک خودرو متوسط با فرض مصرف 6 لیتر در 100 کیلومتر که معادل انرژی 180 مگاژول در 100 کیلومتر می‌باشد(راندمان موتور بنزینی 40 درصد فرض شده است). مصرف معادل هوای فشرده برای تامین همین مقدار انرژی با در نظر گرفتن بازدهی انبساط(50 درصد) و بازدهی موتور(40) درصد و بازدهی کمپرسور(70 درصد)، نزدیک 520 مگاژول انرژی ورودی کمپرسور لازم است که معادل 145 کیلووات ساعت خواهد شد. در جدول زیر خلاصه مقایسه مصرف و هزینه سوخت خودرو بنزینی و بادی آورده شده است با این توضیح که قیمت بنزین 46 سنت بر لیتر و قیمت برق 6 سنت بر کیلووات ساعت فرض شده است:

نوع	حداکثر میزان ذخیره انرژی	میزان مصرف انرژی در 100 کیلومتر	هزینه سوخت در یک کیلومتر
بنزینی	**1200 مگاژول (باک 40 لیتری)**	**180 مگاژول**	**2.76 سنت**
بادی	**54 مگاژول(مخزن 300 لیتری)**	**520 مگاژول**	**8.7 سنت**

جدول 1- مقایسه موتور بنزینی و موتور هوای فشرده

با توجه به جدول بالا می‌بینیم با در نظر گرفتن راندمان موتور بادی و برق مورد نیاز برای فشرده‌سازی هوا این سوخت گران‌تر از موتور بنزینی خواهد بود.

برای مقایسه آلایندگی استفاده از سوخت‌های مختلف در حمل‌ونقل تحلیلی در مجله Journal of the Transportation Research Board توسط Andrew Papson انجام شد که خلاصه مقایسه آن در شکل زیر آورده شده است:



شکل10- مقایسه آلایندگی خودورهای مختلف در سه سناریو

در شکل بالا Gas خودروی بنزینی، CAV خودروی بادی و EV خودرو الکتریکی می‌باشد، هم‌چنین نحوه تولید برق در 3 سناریو Low-Carbon(تولید برق در نیروگاه گازی) U.S average (تولید برق با توجه به سبد انرژی آمریکا) و Carbon-Intensive (تولید برق با نیروگاه زغال‌سنگ) فرض شده است. می‌بینیم که در طول زنجیره تولید انرژی، خودروهای بادی بیشترین سطح آلایندگی را ایجاد خواهند کرد.

در این بخش دیدیم سوخت بادی هم از لحاظ اقتصادی و هم آلایندگی توجیه‌پذیر نمی‌باشد. البته استفاده از سوخت بادی در سیستم هیبرید که برای فشرده سازی هوا از کمپرسور استفاده نشود مانند آن‌چه در خودرو 208 پژو هیبریدی می‌بینیم، موجب کاهش مصرف سوخت و توجیه‌پذیر بودن آن خواهد بود.

جمع‌بندی

در مقایسه با منبع‌های انرژی دیگر مانند سوخت‌های فسیلی و الکتریکی، هوای فشرده برای پیدا کردن بازار خود در حمل‌ونقل موانع زیر را پیش رو خواهد داشت:

1- به علت چگالی پایین انرژی هوای فشرده در مقایسه با سوخت‌های دیگر، از این منبع انرژی نمی‌توان برای طی کردن مسافت‌های طولانی و یا سرعت بالا استفاده کرد. چگالی انرژی هوای فشرده در فشار 20 مگاپاسکال حدود Kg/Kj370 می‌باشد که در مقایسه با نفت‌گاز و بنزین بسیار پایین است و برای جبران این نقیصه باید از مخزنی با حجم بالای هوای فشرده استفاده کرد که به طراحی خودرو لطمه وارد خواهد کرد.

2- فرایند انتقال هوای فشرده از مخزن به علت فرآیند اختناق به سیلندر بازدهی کمی دارد که موجب می‌شود به صورت کلی بازدهی موتور هوایی بازدهی زیر 20 درصد داشته باشد. برای افزایش چگالی انرژی هوا فشار آن را باید افزایش داد که همین مساله باعث افزایش هدررفت انرژی در شیرها و دریچه‌ها شود، هم‌چنین احتمال نشتی نیز بالا می‌رود.

3- بازدهی زیر20 درصد موتورهوایی نسبت به موتورهای احتراقی و الکتریکی بازدهی کمی محسوب شده که این مساله باعث می‌شود استفاده از این منبع انرژی توجیه‌پذیر نباشد. با ذکر این نکته که ایجاد هوای فشرده نیاز به الکتریسیته دارد که تامین الکتریسیته نیز با راندمان نیروگاهی سیکل ترکیبی 50 درصدی تامین می‌شود. بنابراین اگر کل زنجیره تامین انرژی را در نظر بگیریم به بازدهی 10 درصدی خروجی توان خودرو به ورودی گاز نیروگاه خواهیم رسید.

4- دمای پایین فرایند تراتلینگ(اختناق) موجب ایجاد یخزدگی در لوله‌ها و شیرها می‌شود که این استفاده از گرم‌کن را الزامی می‌کند.

با مشکلات اشاره شده در بالا می‌بینیم استفاده‌ی تنها از هوای فشرده در حمل و نقل محدود به خودروهای سبک و مسافت‌های کم می‌شود که بازار محدودی را شامل خواهد شد، اما استفاده از هوای فشرده به عنوان منبع تامین انرژی ثانویه یا هیبرید در کنار موتور احتراقی می‌تواند توجیه‌پذیر باشد که نمونه موفق آن را خودروسازی پژو در 208 پیاده سازی کرد . مصرف سوخت را تا زیر 2 لیتر بر 100 کیلومتر کاهش داد. در این خودرو بدون نیاز به

کمپرسور یا تزریق هوای فشرده، هوا توسط سیستم ترمز و چرخش چرخ‌ها متراکم شده و در مواقع نیاز(سرعت‌های کم) مورد استفاد قرار می‌گیرد.