بسم الله الرحمن الرحیم

پیشگفتار

با توجه به فرصت‌های موجود جهت کاهش روند رشد بالای مصرف فرآورده‌های نفتی در بخش حمل و نقل و افزایش کارایی مصرف سوخت در بخش مذکور و نیز ملاحظات زیست‌محیطی، سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور از بدو تأسیس، طرح CNGسوز کردن خودروهای کشور را در دستور کار قرار داده‌است.

از آنجاکه طرح تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی یک طرح فراسازمانی و ملی می‌باشد، ضروری است تا همزمان با انجام امور اجرایی و ستادی مربوط به این طرح، سطح دانش و اطلاعات کارشناسان و محققین در این بخش، با آخرین یافته‌های جهانی یکسان گردد و فرهنگ‌سازی مربوط به آن در سطح جامعه و دانشگاه فراگیر شود.

همزمان با برگزاری اولین همایش سراسری سوخت جایگزین (CNG) و خودروهای گازسوز به‌منظور ارتقاء سطح دانش عمومی در صنعت CNG مجموعه‌ای در ۵ جلد تحت عناوین:

۱. آلودگی
۲. ایستگاه‌های سوخت‌رسانی CNG
۳. کیت‌های تبدیل CNG
۴. مخازن CNG
۵. موتورهای گازسوز

تهیه شده تا علاقه‌مندان و پژوهشگران گرامی با کلیات مسائل مربوط به صنعت CNG آشنا گردند. در نگارش این مجموعه‌ها سعی شده که در هر مجموعه، مطالب به‌گونه‌ای بیان شوند تا خواننده پس از مطالعه آنها، به یک دیدگاه کلی از وضعیت موجود رسیده و با معایب و مزایای خودروهای CNGسوز آشنا گردد.

همچنین سعی شده تا از پرداختن به مطالب، به‌صورت صرفاً تخصصی خودداری شود و بدین ترتیب مخاطبین بیشتری بتوانند از مجموعه حاضر استفاده نمایند.

امید است مجموعه حاضر بتواند قدمی مثبت در جهت بالا بردن سطح اطلاعات و دانش فنی کارشناسان و محققین گرامی جهت اجرای موفقیت‌آمیز طرح ملی تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی باشد.

وحید اصفهانیان

رئیس موسسه عالی پژوهشی خودرو، سوخت و محیط زیست

و دبیر علمی همایش

فهرست مطالب

۱- مقدمه ۱
۲- سیکل‌های استاندارد هوایی اتو و دیزل ۲
۲-۱- سیکل استاندارد هوایی اتو ۳
۲-۲- سیکل استاندارد هوایی دیزل ۶
۳- پدیدهٔ کوبش ۹
۴- مشخصات گاز طبیعی ۱۰
۴-۱- خواص شیمیایی ۱۳
۴-۲- ارزش حرارتی سوخت ۱۴
۴-۳- ارزش حرارتی حجم مخلوط استوکیومتریک ۱۷
۴-۴- خواص ضدکوبش ۱۷
۴-۵- تمایل به پیش‌اشتعالی ۱۹
۴-۶- شاخص وب ۱۹
۴-۷- سرعت شعله ۲۱
۵- مقایسهٔ قیمت تمام‌شدهٔ سوخت‌های مختلف ۲۲
۶- احتراق ۲۵
۶-۱- نسبت هوا به سوخت نسبی (λ) ۲۵
۶-۲- سیستم احتراق ۳۰
۶-۳- احتراق رقیق ۳۲
۶-۴- غنی‌سازی به‌وسیلهٔ هیدروژن ۳۳
۷- طبقه‌بندی خودروهای گازسوز ۳۵
۸- موتورهای OEM و موتورهای تبدیل یافته ۳۷
۹- موتورهای دوسوخته ۴۱
۹-۱- سیستم‌های سوخت‌رسانی در موتورهای دوسوخته ۴۶
۹-۲- موتورهای بنزینی تبدیل‌شده به دوسوخته ۴۸
۹-۳- موتورهای دیزل تبدیل‌شده به اختصاصاً گازسوز ۵۱
۹-۴- هزینهٔ تبدیل ۵۱
۹-۵- اثر استفاده از گاز طبیعی بر راندمان موتورهای اشتعال جرقه‌ای ۵۲
۹-۶- راندمان موتورهای دیزل تبدیل شده به اختصاصاً گازسوز ۵۵

۱۰- موتورهای دوگانه‌سوز ۵۵
۱۰-۱- کاربرد موتورهای دوگانه‌سوز ۵۹
۱۰-۲- سیستم‌های احتراق در موتورهای دوگانه‌سوز ۵۹
۱۰-۲-۱- موتورهای دوگانه‌سوز معمولی ۶۰
۱۰-۲-۲- موتورهای دوگانه‌سوز با آلایندگی NO_x کم ۶۲
۱۰-۲-۳- موتورهای دوگانه‌سوز با پاشش مستقیم ۶۳
۱۱- نتیجه‌گیری ۶۷
مراجع ۶۹
واژه‌نامه فارسی- انگلیسی ۷۱

۱ مقدمه

موتورهای احتراق داخلی گازسوز، مدت‌ها به‌عنوان موتورهای ثابت در کارخانجات استفاده می‌شدند. امروزه استفاده از این موتورها در وسایل نقلیه مورد توجه قرار گرفته‌است. فراوانی گاز طبیعی، کیفیت مطلوب و ارزان بودن آن از عوامل اصلی استفاده از آن در موتورهای احتراق داخلی می‌باشند. آلودگی کمتر گاز طبیعی نسبت به بنزین و گازوئیل نیز در این امر موثر است. موتورهایی که هم‌اکنون با گاز طبیعی کار می‌کنند، تبدیل‌یافتهٔ موتورهای بنزینی یا دیزل هستند که از طراحی بهینه برای این سوخت فاصله دارند.

با توسعه روزافزون صنعت خودروسازی و افزایش تعداد خودروهای در حال تردد، نیاز به سوختی بهتر و با آلودگی کمتر، بیشتر نمایان می‌شود. گاز طبیعی با خواص احتراقی خوب و آلودگی کمتر نسبت به دیگر سوخت‌های رایج، از بهترین انتخاب‌ها برای تأمین انرژی در ایران می‌باشد. علاوه بر این، ذخایر گاز طبیعی در ایران به وفور یافت می‌شود و در مقایسه با دیگر سوخت‌ها از قیمت ارزان‌تری برخوردار است.

سوخت گاز می‌تواند در هر دو نوع موتورهای احتراق تراکمی، که بر مبنای سیکل دیزل می‌باشند و احتراق جرقه‌ای، که برمبنای سیکل اتو کار می‌کنند، به‌کار گرفته شود. با این حال هیچ‌کدام از موتورهای دیزل یا جرقه‌ای که روی خودروهای معمولی وجود دارند، برای استفاده از سوخت گاز طبیعی، طراحی نشده‌اند.

بدون شک اصلی‌ترین موضوع مورد بحث در موتورهای احتراق داخلی، مسألهٔ احتراق می‌باشد. بیشتر مشخصات یک موتور درون‌سوز به احتراق درون سیلندر بستگی دارد. یک

احتراق مناسب می‌تواند تمامی مشخصات یک موتور از قبیل راندمان، انتقال حرارت، آلودگی و دیگر مسائل آن را تحت تأثیر قرار دهد.

برای داشتن یک درک کلی از عملکرد گاز طبیعی در موتورهای درون‌سوز، لازم است تا مسائلی از قبیل سیکل‌های هوایی در موتور، خواص سوخت و غیره مورد بررسی قرار گیرند. در ادامه، ابتدا به نکاتی پیرامون بررسی سیکل‌های موتور، خواص سوخت گاز طبیعی و مسأله احتراق می‌پردازیم. بعد از آن نکاتی پیرامون سیستم‌های مختلف موتورهای گازسوز و مسائل مربوط به آنها مطرح می‌گردد.

دراینجا پیش از ورود به مبحث اصلی، ضروری است تا به نکته‌ای اشاره شود. با بررسی کلی و اجمالی منابع و مراجع فارسی موجود در ارتباط با موتورهای گازسوز که توسط مؤلفین، محققین و مترجمین محترم کشور تهیه شده‌اند، می‌توان نوعی عدم هماهنگی را در نحوهٔ نام‌گذاری موتورهای گازسوز مشاهده نمود. از آنجا که لازم است تا در سطح ملی یک توافق همه‌جانبه دربارهٔ تعریف هر موتور گازسوز وجود داشته باشد، لذا در این مجموعه سعی شده تا اسامی هرکدام از موتورها با توجه به تعریف دقیق آنها در متن گنجانده شود.

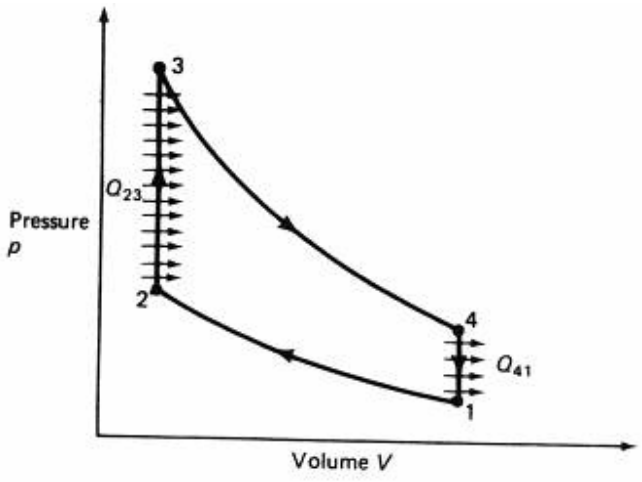
۲ سیکل‌های استاندارد هوایی اتو و دیزل

این سیکل‌ها بیانگر چرخه‌های ترمودینامیکی در موتورهای رفت و برگشتی با استفاده از سیستم‌های احتراق و سوخت متفاوت می‌باشند. در ادامه به توضیح سیکل‌های مختلف می‌پردازیم.

۲-۱ سیکل استاندارد هوایی اتو

سیکل استاندارد هوایی اتو یکی از سیکل‌های مهم در موتورهای احتراق داخلی می‌باشد که به سیکل SI [1] نیز معروف است.

سیکل موتورهای SI بیشتر شبیه سیکل استاندارد اتو می‌باشد. نسبت تراکم در این سیکل، توسط عدد اکتان سوخت و شرایط کارکرد موتور، محدود می‌شود. این سیکل در شکل ۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱: سیکل ایده‌آل هوایی اتو [۷].

سیکل اتو از چهار فرایند تشکیل شده‌است که عبارتند از:

۱. فرایند ۱ تا ۲: تراکم آیزنتروپیک

۲. فرایند ۲ تا ۳: افزودن گرما در حجم ثابت

[1] - Spark Ignition

۳. فرایند ۳ تا ۴: انبساط آیزنتروپیک

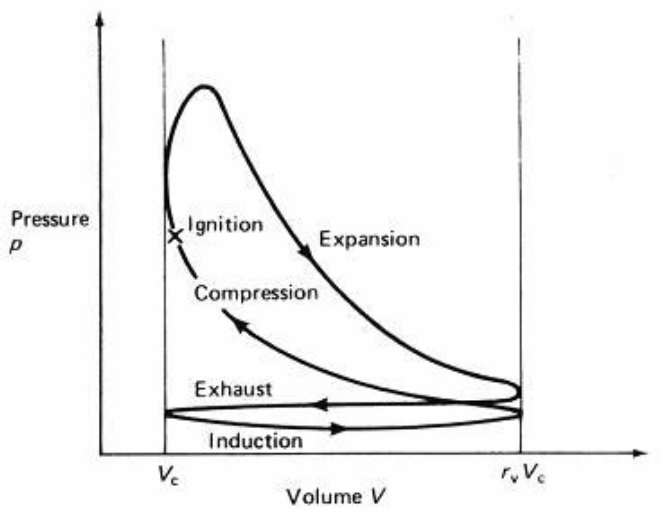
۴. فرایند ۴ تا ۱: گرفتن گرما در حجم ثابت

دقت شود که در یک سیکل ایده‌آل، از مراحل مکش و تخلیه صرف‌نظر می‌شود. راندمان این سیکل از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

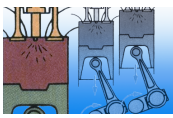
$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1}$$

که در آن r نسبت تراکم و γ نسبت گرماهای ویژه سیال عامل می‌باشد.

در عمل با درنظر گرفتن مراحل مکش و تخلیه، سیکل واقعی یک موتور به‌صورت شکل ۲ در می‌آید.



شکل ۲: نمودار سیکل واقعی یک موتور SI [۷].



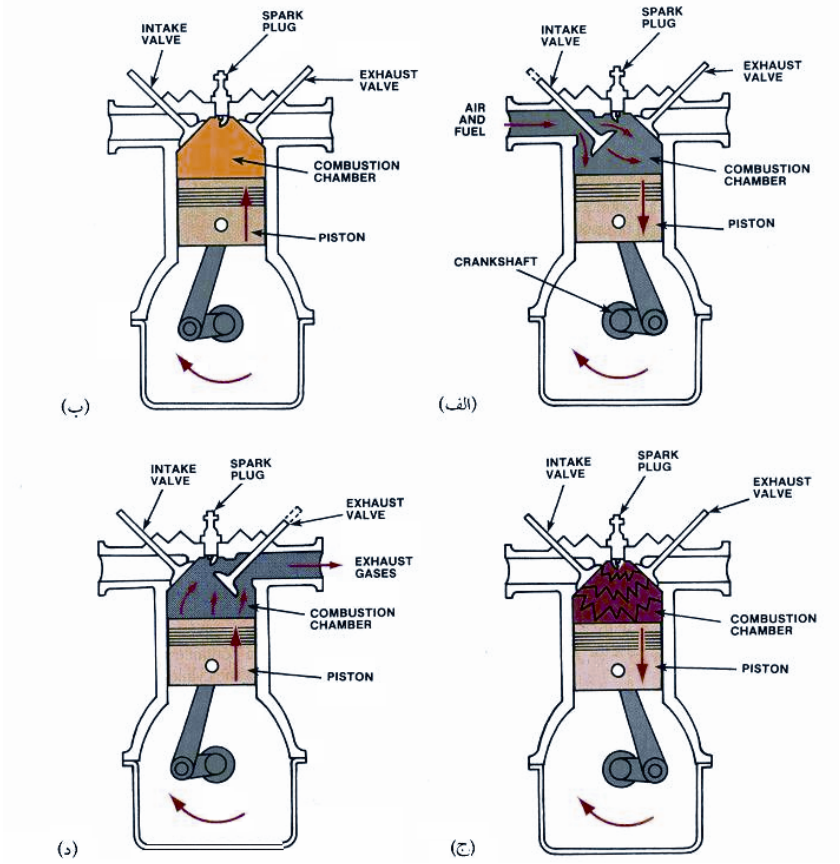
شکل ۳ مراحل سیکل یک موتور چهار زمانه SI را نشان می‌دهد. این مراحل عبارتند از:

الف: مرحله مکش

ب: مرحله تراکم

ج: مرحله انبساط یا قدرت

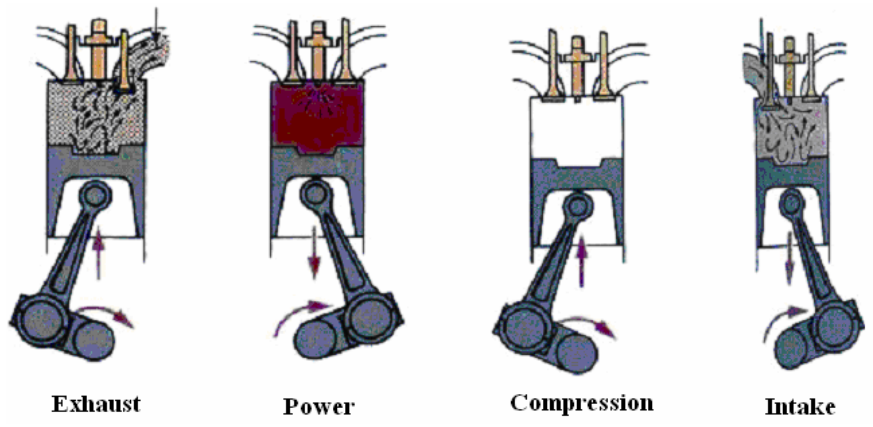
د: مرحله تخلیه



شکل ۳: مراحل کاری چهارگانه یک موتور چهارزمانه SI [۵].

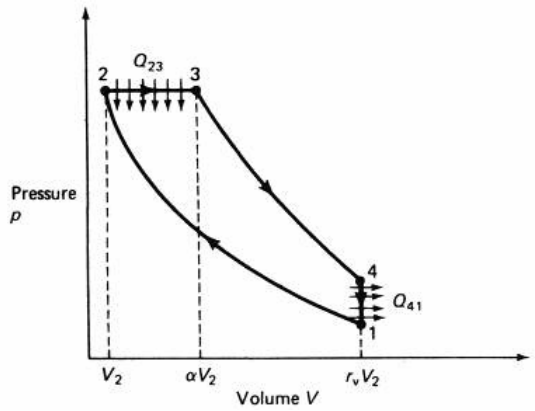
۲-۲ سیکل استاندارد هوایی دیزل

یکی دیگر از سیکل‌های استاندارد هوایی، سیکل دیزل می‌باشد. این سیکل به‌عنوان یکی از سیکل‌های بسیار مهم در موتورهای احتراق داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مراحل کار موتورهای دیزل چهارزمانه در شکل ۴ نشان داده شده‌است.



شکل ۴: مراحل چهارگانه کار یک سیکل دیزل [۵].

سیکل دیزل احتیاج به یک سوخت با خود اشتعالی بالا و زمان تأخیر اشتعال کم، دارد. کارکرد موتورهای دیزل معمولاً بر مبنای سیکل استاندارد هوایی دیزل است. شکل ۵ سیکل استاندارد هوایی دیزل را نشان می‌دهد.



شکل ۵: سیکل ایده‌آل هوایی دیزل [۷].

مراحل این سیکل عبارتند از:

۱. فرایند ۱ تا ۲: تراکم آیزنتروپیک

۲. فرایند ۲ تا ۳: اضافه کردن گرما در فشار ثابت

۳. فرایند ۳ تا ۴: انبساط آیزنتروپیک

۴. فرایند ۴ تا ۱: گرفتن گرما در حجم ثابت

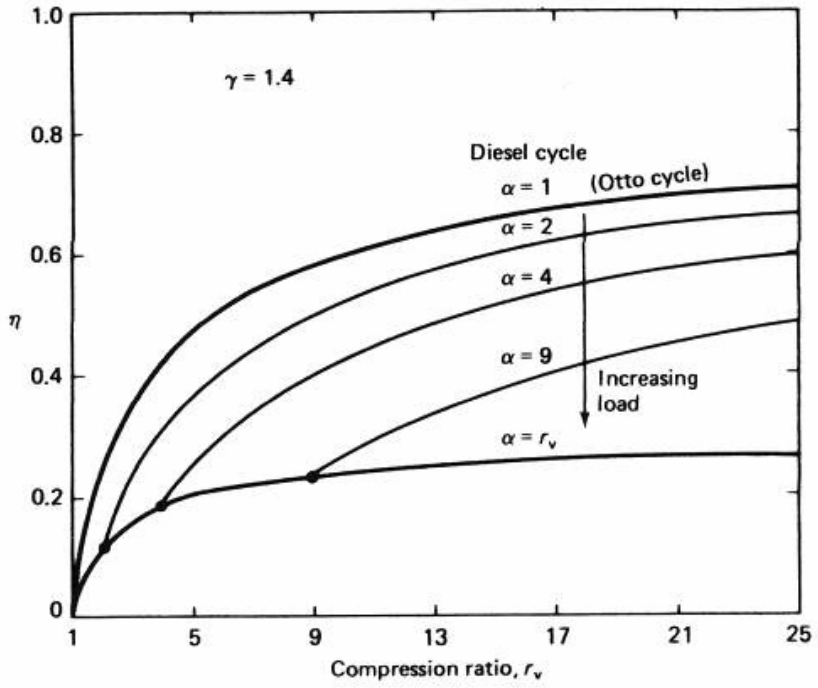
راندمان سیکل دیزل از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\gamma-1} \left\{ \frac{\alpha^{\gamma} - 1}{\gamma(\alpha - 1)} \right\}$$

که در آن α نسبت حجم بین نقاط ۳ و ۲، و γ نسبت گرماهای ویژه گاز می‌باشد.

گاز طبیعی می‌تواند در هر دو سیکل معروف دیزل و اتو کار کند. نحوهٔ عملکرد گاز در هر یک از این سیکل‌ها در قسمت‌های بعدی ارائه خواهدشد. با این‌حال این دو سیکل از نظر راندمان با یکدیگر تفاوت‌هایی دارند. اگر نسبت تراکم در دو سیکل اتو و دیزل مساوی باشد، راندمان سیکل اتو بیشتر خواهد بود. اما از آنجایی‌که در سیکل دیزل عملاً نسبت تراکم بالاتر است، راندمان موتورهایی که با این سیکل کار می‌کنند بالاتر از راندمان موتورهای SI است.

نمودار شکل ۶ تفاوت راندمان این دو نوع سیکل را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت تراکم، راندمان سیکل‌ها افزایش می‌یابد.



شکل ۶: مقایسه راندمان سیکل‌های اتو و دیزل برحسب نسبت تراکم [۷].

۳ پدیدهٔ کوبش

کوبش[۲] در محفظه احتراق به‌دلیل اشتعال خودبه‌خودی مخلوط سوخت و هوای پیش‌آمیخته، قبل از رسیدن جبهه شعله به آن، به‌وجود می‌آید. این پدیده در موتورهای SI اتفاق می‌افتد و هنگامی رخ می‌دهد که قسمتی از مخلوط سوخت و هوا که هنوز جبهه شعله به آن نرسیده‌است، بر اثر گرمای ناشی از تراکم و پیشروی جبهه شعله، به‌طور خودبه‌خود منفجر شود. این انفجار بسیار شدید بوده و می‌توان آن را کاملاً حجم ثابت فرض کرد. این مسأله باعث افزایش ناگهانی فشار در قسمتی از محفظه احتراق و به‌وجود آمدن یک موج فشاری شدید و حرکت آن در داخل محفظه احتراق می‌شود. عوامل مؤثر در پدیدهٔ کوبش به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱. عوامل مربوط به موتور
۲. عوامل مربوط به سوخت

عوامل موتوری که باعث افزایش احتمال کوبش می‌شوند عبارتند از:

- افزایش نسبت تراکم
- آوانس کردن زمان جرقه
- افزایش دمای مکش
- کم بودن آشفتگی جریان در هنگام احتراق
- کاهش دور موتور

[2] - Knock

اثر نوع سوخت در بروز پدیده کوبش، با عدد اکتان سوخت ارتباط دارد. مقاومت سوخت در برابر احتراق خودبه‌خودی را با عدد اکتان سوخت نمایش می‌دهیم. برای به‌دست آوردن عدد اکتان هر سوخت، قابلیت تحمل هر سوخت در برابر پدیدهٔ خود اشتعالی با سوخت‌های اکتان و هپتان نرمال مقایسه می‌شود. مقاومت سوخت اکتان در برابر خوداشتعالی بالاست و عدد اکتان آن را ۱۰۰ قرار می‌دهیم. ازسوی‌دیگر، هپتان نرمال در برابر خود اشتعالی مقاومت بسیار کمی داشته و عدد اکتان آن صفر است. بقیه سوخت‌ها عموماً بین این دو سوخت قرار می‌گیرند.

سوخت‌های گازی مانند گاز طبیعی، عدد اکتان بالای ۱۰۰ دارند. در مورد این‌گونه سوخت‌ها شاخص متان[۳] تعریف می‌شود. عدد اکتان سوخت، نسبت تراکم موتور را محدود می‌کند. به‌طور مثال بنزین در موتورهای معمولی در نسبت تراکم‌های حدود ۸ تا ۱۰ کار می‌کند، در حالی‌که گاز می‌تواند در نسبت تراکم‌های بالای ۱۲ نیز براحتی به‌عنوان سوخت مصرف شود. بالا بردن نسبت تراکم به بالا رفتن راندمان موتور می‌انجامد که استفاده از سوخت CNG این امکان را بهتر فراهم می‌کند.

۴ مشخصات گاز طبیعی

سوخت‌های بسیاری در موتورهای معمولی مورد استفاده قرار می‌گیرند که این امر بستگی زیادی به مشخصات جغرافیایی محل استفاده موتور و میزان فراوانی آن سوخت در آن منطقه دارد. مشخصات تعدادی از گازهای مورد استفاده در موتورها در جدول ۱ فهرست شده‌است.

[3] - Methane Index

جدول ۱: ترکیب گازهای مختلف [۳].

نوع سوخت	ترکیب شیمیایی	ارزش حرارتی خالص (kJ/m^3) (1atm, 15 °C)	توضیحات
Methane	CH_4	33900	اغلب گاز متان خالص به‌عنوان گاز مرجع برای عملکرد موتور به‌کار می‌رود. ویژگی خوب کوبش.
Propane	C_3H_8	86400	ویژگی ضعیف کوبش در مقایسه با متان.
HD-5	~90% C_3H_8 + other paraffin	~92000	به‌صورت مایع (تحت فشار) ذخیره می‌شود.
Commercial propane (LPG)	(70-90%) C_3H_8 + C_3H_6	~86000	اگر در یک کارخانه شیمیایی تولید شود، می‌تواند دارای C_4H_8 و C_3H_6 باشد. به‌صورت مایع ذخیره می‌شود.
Butane	C_4H_{10}	112400	ویژگی ضعیف کوبش.
Commercial butane (LPG)	(70-90%) C_4H_{10} + C_4H_8 + C_3H_8 + C_3H_6	~110000	به‌صورت مایع ذخیره می‌شود.
Natural gas (Pipeline /CNG)	CH_4 (90%)+heavier hydrocarbons + CO + N + CO_2	~34000-42000	ترکیب آن بسته به مکان چاه می‌تواند تغییر کند، اما بخش غالب آن متان می‌باشد. گاز طبیعی شهری عموماً از گازهای تصفیه‌شده ارزان‌تر می‌باشد.
Coal gas/town gas	H_2 (30-55%) + CH_4 (20-50%) +CO (5-15%) + CO_2 (4%)	~16000-19000 (30000 if CH_4 content is high)	روش سنتی تولید گاز از ذغال دارای راندمان تبدیل کم (۲۵٪) می‌باشد و نیازمند آن است که ذغال دارای محتوای گازهای فرار زیاد باشد.
Wellhead gas/ Field gas	CH_4 (60-95%)+heavier hydrocarbons +CO + N + CO_2 + H_2S	~30000-45000	می‌تواند مقدار کمی هم H_2S داشته باشد (در حدود ۱٪) که باید از گاز جدا گردد.
Digester gas (sludge/landfill/sewage/biogas)	CH_4 (~60-70%) + CO_2 (30+40%)+ H_2S (<1%)	~20000-23000	از تخمیر بی‌هوازی فاضلاب به‌دست می‌آید. بازده تبدیل معمولاً ۵۰٪ می‌باشد. تمایل به کوبش خوب به‌دلیل CO_2. ارزش حرارتی کم آن باعث افزایش مصرف سوخت نسبت به متان می‌شود. ارزش حرارتی یک مخلوط استوکیومتری از معادل گاز طبیعی آن کمتر است که طبیعتاً قدرت را برای موتورهای تنفس طبیعی به ۸۵٪ می‌رساند. گاز در فشار کمی بالاتر از فشار اتمسفر در دسترس است که می‌توان در موتورهای تنفس طبیعی به‌کار گرفته‌شود.

جدول ۱: ترکیب گازهای مختلف (ادامه)

نوع سوخت	ترکیب شیمیایی	ارزش حرارتی خالص (kJ/m^3) (15 °C, 1 atm)	توضیحات
Blast furnace gas (see Gasifier gas)	N_2 (50-60%) + CO (20-30%) + CO_2 (8-15%) + H_2 (2-4%)	~3000-4000	این گاز در اثر واکنش حرارتی مواد حاصل می‌شود.
Gasifier gas	N_2 (50-60%) + CO (10-25%)+ H_2 (5-15%) + CH_4 + CO_2	~3000-6000 (varies depending on feedstock)	معمولاً از مواد کربن‌دار مانند چوب، زغال یا ضایعات گیاهی تولید می‌شود. معمولاً روش تبدیل به گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. ویژگی خوب کوبش این گاز به‌علت حضور زیاد گازهای بی‌اثر می‌باشد. ارزش حرارتی مخلوط استوکیومتری در مقایسه با متان ۷۵ تا ۸۵ درصد می‌باشد که باعث یک کاهش ثانویه در خروجی بار کامل قابل دسترس موتور تنفس طبیعی می‌شود. گاز در فشار اتمسفر یا کمی بالاتر در دسترس است. راندمان تبدیل گاز حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد است.
Producer gas (see Gasifier gas)	N_2 (50-55%) + CO (30%) + H_2 (12%) + CO_2 (4%)	~3200-6500	هوا به داخل سوخت‌های گداخته‌ای مانند زغال کک، چوب و غیره کشیده می‌شود. راندمان‌های تبدیل بالا قابل دسترسی است (۹۰٪).
Refinery gas	C_3H_8 (18-34%) + C_4H_{10} (45%) + CH_4 (4-12%) + C_2H_6 (10-20%) + H_2 (<60%) + CO_2	32000-56000	نوع گاز بستگی زیادی به محل آن دارد.

همچنین خواص برخی از گازها در جدول ۲ آورده شده‌است. گاز طبیعی اساساً از متان تشکیل شده‌است. بسته به محل جغرافیایی چاه گاز، مقدار متان موجود در گاز طبیعی بین ۸۰ تا ۹۸ درصد می‌باشد (گاز طبیعی ایران تقریباً دارای ۹۶/۵ درصد متان است). بنابراین خواص این گاز بسیار مشابه با گاز متان است. همچنین نسبت ترکیبات دیگر گازها نیز در عملکرد گاز طبیعی مؤثر می‌باشد.

جدول ۲: خواص بعضی از سوخت‌های رایج [۳].

Gas type	Chemical Composition	Relative molecular mass	ρ(kg/m^3) (1 atm, 15 °C)	LCV (kJ/kg)	LHV (kJ/m^3)	Stoichiometric Air-fuel (kg/kg)	Stoichiometric Air-fuel (m^3/m^3)	Heat content of stiochiometric mixture (MJ/m^3) (1 atm, 15 °C)	Heat energy required to burn 1kg ideal air (kJ)	Methane number (MN)	Min auto-ignition temp. in air (K)
Methane	CH_4	16.04	0.6785	50040	33950	17.25	9.52	3.227	2900	100	813
Propane	C_3H_8	44.1	1.865	46338	86420	15.65	23.81	3.483	2960	35	723
Butane	C_4H_{10}	58.12	2.458	45732	112410	15.43	30.95	3.518	2964	10.5	678
Propene	C_3H_6	42.08	1.780	45758	81450	14.82	21.43	3.631	3087	20	733
Hydrogem	H_2	2.0	0.0853	119810	10220	34.18	2.38	3.023	3505	0	-
Carbon Monoxide	CO	28.0	1.185	10101	11970	2.46	2.38	3.54	4106	73	-
Natural gas	~90% CH_4+ others	17.5	~0.74	~46000	~34000	~17.0	~10.3	~3.01	~2705	~90	-
Digester gas	~65%CH_4 ~35%CO_2	~24.8	~1.05	~20000	~21100	~7.7	~6.6	2.78	~2600	~130	-
Gasifier gas	~55% N_2 ~25% CO ~10% H_2 + other	~26.0	~1.10	~4700	~5200	~1.23	~1.1	2.47	~3821	~130	-
Air	~79% N_2 ~21% O_2	28.96	1.225	-	-	-	-	-	-	-	-

۴-۱ خواص شیمیایی

در جدول ۳ فهرستی از ترکیبات مختلف گاز طبیعی در چاه‌های گاز معروف دنیا آورده شده‌است. به‌غیر از متان، مواد دیگر موجود در این گاز به‌ترتیب اهمیت عبارتند از:

۱. اتان (بین ۱ تا ۸ درصد)

۲. پروپان (تا ۲ درصد)

۳. بوتان و پنتان (کمتر از یک درصد)

همچنین موادی مانند نیتروژن (N_2) و دی‌اکسیدکربن (CO_2) نیز ممکن است در گاز طبیعی یافت شود. واضح است که درصدهای بیان‌شده به‌طور کلی صحیح می‌باشند ولی برای هر چاه گاز، باید ترکیب خاص آن را شناسایی کرد. به‌عنوان مثال در چاه گاز Uch در پاکستان بیش از ۴۰ درصد CO_2 و بیش از ۲۵ درصد نیتروژن وجود دارد.

شایان ذکر است که برای استفاده در موتور خودروها، از گاز طبیعی که بیش از ۸۰ درصد متان دارد استفاده می‌شود. البته بدیهی است که از سایر سوخت‌های گازی نیز می‌توان در موتورهای گازسوز استفاده کرد، اما عموماً این گازها تحت عنوان گاز طبیعی کم‌انرژی شناخته می‌شوند.

۲-۴ ارزش حرارتی سوخت

ارزش حرارتی یک سوخت که بر واحد جرم یا حجم بیان می‌شود، بیانگر مقدار انرژی آزادشده بر واحد جرم یا حجم سوخت در یک واکنش شیمیایی کامل، که فقط منجر به تولید CO_2 و H_2O می‌شود، می‌باشد. اگر در این واکنش شیمیایی H_2O به‌صورت مایع درنظر گرفته‌شود، مقدار انرژی آزادشده به‌نام ارزش حرارتی بالایی (HHV)[۴] یا ارزش حرارتی کلی (GHV)[۵] نامیده می‌شود. اگر مقداری از انرژی آزادشده صرف تبدیل آب مایع به بخار درنظر گرفته شود، به مقدار انرژی آزادشده ارزش حرارتی خالص (NHV)[۶] یا ارزش حرارتی پائینی (LHV)[۷] می‌گوییم.

[4] - Higher Heating Value
[5] - Gross Heating Value
[6] - Net Heating Value
[7] - Lower Heating Value

جدول ۳: ترکیب گاز طبیعی موجود در برخی از چاه‌های معروف دنیا [۲].

Constitutions	Groningue (Netherlands)	Lacq (France)	Parentis (France)	Ekofisk (Norway)	(Frigg) (Norway)	Hassi R'Mel (Algeria)	Ourengoi (CIS)	Uch (Pakistan)
Methane	81.3	69.0	73.6	83.3	95.7	83.7	85.3	27.3
Ethane	2.9	3.0	10.2	8.5	3.6	6.8	5.8	0.7
Propane	0.4	0.9	7.6	3.4	-	2.1	5.3	0.3
Butanes	0.1	0.5	5.0	1.5	-	0.8	2.1	0.3
C_5	0.1	0.5	3.6	1.0	-	0.4	0.2	-
Nitrogen	14.3	1.5	-	0.3	0.4	5.8	0.9	25.2
H_2S	-	15.3	-	-	-	-	-	-
CO_2	0.9	9.3	-	2.0	0.3	0.2	0.4	46.2

Constitutions	Kapuni (N. Zel.)	Los Angeles (US)	Viking-Kinsella (Canada)	Maracaibo (Venezuela)	Uthmaniyah (Saudi A.)	Burgan (Kuwait)	Kirkuk (Iraq)	Ardjuna (Indonesia)
Methane	45.6	86.5	91.9	82.0	55.5	74.3	56.9	65.7
Ethane	5.8	8.0	2.0	10.0	18.0	14.0	21.2	8.5
Propane	2.9	1.9	0.9	3.7	9.8	5.8	6.0	14.5
Butanes	1.1	0.3	0.3	1.9	4.5	2.0	3.7	5.1
C_5	0.8	0.2	-	0.7	1.6	0.9	1.6	0.8
Nitrogen	-	2.6	4.9	1.5	0.2	2.9	-	1.3
H_2S	-	-	-	-	1.5	0.1	3.5	-
CO_2	43.8	0.5	-	0.2	8.9	-	7.1	4.1

در مورد گاز طبیعی، متداول است که ارزش حرارتی برحسب کیلووات‌ساعت بر مترمکعب (kWh/Nm^3) تحت شرایط نرمال فشار و دما (فشار ۱۰۱۳۲۵ پاسکال و دمای صفر درجه سانتی‌گراد) بیان شود[۸]. اما هنگامی‌که از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت موتور یاد می‌شود ترجیح داده می‌شود که مقادیر ارزش حرارتی خالص (NHV) و ارزش حرارتی کلی (GHV) برحسب مگاژول بر کیلوگرم (MJ/kg) بیان شوند.

در جدول ۴ مقادیر ارزش حرارتی خالص (NHV) برای برخی از گازهای استخراجی از چاه‌های مختلف آمده‌است. برای تبدیل انرژی بر واحد حجم به انرژی بر واحد جرم، لازم است تا چگالی گاز را که اغلب برحسب kg/m^3 می‌باشد، بدانیم[۹]. مقدار ارزش حرارتی جرمی خالص گاز طبیعی حدود ۱۰٪ از ارزش حرارتی جرمی خالص سوخت‌های مایع موجود بیشتر است. به‌همین دلیل میزان مصرف جرمی سوخت موتورهای گازسوز نسبت به مصرف جرمی سوخت موتورهای مشابه دیگر، کمتر می‌باشد. البته واضح است که مقدار ارزش حرارتی خالص گاز با زیاد شدن درصد گازهای بی‌اثر (N_2، CO_2 و غیره) کاهش می‌یابد.

ارزش حرارتی حجمی خالص (MJ/m^3) نیز بیان‌کننده حجم گاز مورد نیاز برای دسترسی به توان دلخواه می‌باشد. این مشخصه مقدار افزودن گاز به موتور را مشخص می‌کند. اهمیت این پارامتر هنگامی است که یک موتور می‌خواهد با گازهایی که از لحاظ ترکیب شیمیایی متفاوت

---

[۸] -حرف N در واحد ارزش حرارتی بیان کنندهٔ شرایط نرمال فشار و دما می‌باشد.

[۹] - ارزش حرارتی خالص می‌تواند هم به‌صورت جرمی (MJ/kg) و هم به‌صورت حجمی (MJ/m^3) بیان شود. ارتباط آنها از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$NHV_{\text{حجمی}} = NHV_{\text{جرمی}} \times \rho_g$$

که در آن ρ_g چگالی گاز می‌باشد.

هستند، کار کند. هرچه ارزش حرارتی خالص بر واحد حجم یک گاز کمتر باشد، باید حجم بیشتری از گاز به‌داخل موتور تزریق شود.

جدول ۴: ارزش حرارتی سوخت‌های چاه‌های مختلف [۲].

Origin of Gas	Density in the gaseous state (kg/m^3)	Stoichiometric ratio	NHV			
			(MJ/kg)	(kWh/kg)	(MJ/Nm^3)	(kWh/Nm^3)
Lacq	0.73	17.09	49.64	13.79	36.42	10.12
Algeria (Fos)	0.76	16.77	48.89	13.58	37.06	10.29
Algeria (Montoir)	0.80	16.79	48.95	13.60	39.40	10.94
North Sea	0.81	15.63	45.46	12.63	36.80	10.22
CIS	0.74	16.53	47.99	13.33	35.70	9.92
Groningue	0.82	13.87	40.27	11.19	33.17	9.21

۴-۳ ارزش حرارتی حجم مخلوط استوکیومتریک

این مشخصه بیان‌کنندهٔ مقدار مخلوط مورد نیاز برای تولید توان خروجی دلخواه می‌باشد. این مشخصه از اهمیت خاصی مخصوصاً برای موتورهایی که تنفس طبیعی دارند برخوردار می‌باشد، زیرا این عامل به‌طور مستقیم روی قدرت خروجی در حالت بار کامل تأثیر می‌گذارد. اما در موتورهای توربوشارژ اهمیت این مشخصه کمتر می‌شود و فقط جهت انطباق توربین و کمپرسور توربوشارژر اهمیت پیدا می‌کند. ارزش حرارتی حجم مخلوط استوکیومتریک برای همه سوخت‌های هیدروکربنی مشابه است اما مقدار آن به‌طور قابل ملاحظه‌ای در حضور گازهای خنثی کاهش می‌یابد. در جدول ۴ این مشخصه برای انواع گازهای طبیعی آمده‌است.

۴-۴ خواص ضدکوبش

این خاصیت، میزان تمایل به اشتعال خودبه‌خودی یک گاز را مشخص می‌کند. این پارامتر بستگی به فشار محلی گاز جلوی جبهه شعله دارد. همچنین ساختار شیمیایی گاز در این مشخصه از اهمیت بالایی برخوردار است.

خوداحتراقی یک گاز بستگی زیادی به ساختار شیمیایی آن دارد. به‌عنوان یک قاعده کلی، گازهایی که دارای زنجیره کربنی بلند هستند، مقاومت ضدکوبش کمی دارند. این مطلب به این معنی است که گازهای سنگین دارای خاصیت ضعیف ضدکوبش می‌باشند درحالی‌که گازهایی مانند CO و CH_4 دارای خواص بسیار خوب ضدکوبشی هستند.

روش‌های زیادی برای بیان تمایل یک گاز به کوبش وجود دارد که متداول‌ترین آنها مقدار عدد متان[10] گاز می‌باشد که بسیار مشابه با عدد اکتانی است که برای سوخت‌های بنزینی به‌کار می‌رود. هرچه عدد متان بالاتر باشد مقاومت گاز در برابر کوبش بیشتر خواهد بود. این عدد با عدد مرجع ۱۰۰ که برای متان خالص درنظر گرفته شده‌است، سنجیده می‌شود. تحقیقات وسیعی برای بررسی تأثیر ترکیب شیمیایی گاز (درموتورهای SI) توسط دو شرکت مهندسی ریکاردو و گاز توکیو در سال ۱۹۹۴ صورت گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که عدد متان را می‌توان به‌عنوان یک معیار خوب برای کوبش درنظر گرفت. اما مشاهده شده‌است که مقدار توان خروجی برای دو گاز که دارای عدد متان یکسان می‌باشند، می‌تواند اختلاف چشم‌گیری داشته باشند.

دما و فشار در داخل محفظه احتراق نیز به عوامل بسیار زیادی از مشخصات موتور مانند دور موتور، قطر سیلندر، نسبت تراکم، شکل محفظهٔ احتراق و همچنین متغیرهای احتراق مانند دمای هوا، زمان شروع احتراق، سرعت شعله و غیره بستگی دارند.

[10] - Methane Number

۴-۵ تمایل به پیش‌اشتعالی

این مشخصه بیان‌کننده تمایل سوخت به مشتعل شدن در نقاطی از محفظه که دارای دمای بالایی هستند و به "نقاط داغ[11]" معروف‌اند، می‌باشد. این نقاط معمولاً در نزدیک سوپاپ خروجی که دمای بالاتری دارند، به‌وجود می‌آیند و می‌توان اثرات آنها را با طراحی مناسب محفظه احتراق و سیستم خنک‌کاری برطرف نمود. به‌عنوان یک قاعدهٔ کلی، گازهایی که دارای مقاومت کمی دربرابر کوبش هستند، زودتر دچار پیش‌اشتعالی می‌شوند.

۴-۶ شاخص وب

شاخص وب[12] (W) مشخصه‌ای است که در طی سالیان متمادی برای مقایسه عملکرد حرارتی سیستم‌های احتراقی که از گاز به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنند به‌کار می‌رود. شاخص وب (W) از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید:

$$W = \frac{\mathrm{GHV}}{\sqrt{d}}$$

که در آن

GHV: ارزش حرارتی در دسترس برحسب $\mathrm{MJ/m^3}$

d: چگالی نسبی گاز (نسبت به هوا)

می‌باشند. همچنین می‌توان W را با نسبت هوا به سوخت استوکیومتری، A_s، مقایسه نمود (کاری که بین سازندگان موتور بسیار متداول می‌باشد). برای انجام این مقایسه پارامتری به‌نام توان احتراقی (Combustive power) که با P_C نمایش می‌دهند تعریف می‌شود. این توان

[11] - Hot Spots
[12] - Wobbe Index

معرف نسبت حجمی هوا و گاز به این نسبت در مخلوط استوکیومتری می‌باشد. این رابطه عبارت است از:

$$A_s = \frac{\rho_a}{\rho_g} P_C = \frac{P_C}{d} \qquad (۱)$$

که در آن ρ_a و ρ_g به‌ترتیب چگالی‌های هوا و گاز برحسب $\mathrm{kg/m^3}$ می‌باشند. با مروری بر جداول اطلاعات حرارتی گازهای مختلف می‌توان به این نتیجه رسید که نسبت‌های $\frac{\mathrm{NHV}}{\mathrm{GHV}}$ و $\frac{P_C}{\mathrm{NHV}}$ تقریباً ثابت می‌مانند، بنابراین:

$$\frac{\mathrm{NHV}}{\mathrm{GHV}} \approx 0.90 = \mathrm{cte} \qquad \frac{P_C}{\mathrm{NHV}} \approx 0.95 = k\ ,$$

که در آن P_C=k.cte.GHV و از رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$A_s = \frac{k.\mathrm{cte}.\mathrm{GHV}}{d}$$

از آن‌جاکه $W = \frac{\mathrm{GHV}}{\sqrt{d}}$ می‌باشد، نتیجه نهایی عبارت است از:

$$A_s = k.\mathrm{cte}.\frac{W}{\sqrt{d}}$$

این رابطه نشان می‌دهد که نسبت هوا به سوخت استوکیومتری با افزایش شاخص وب افزایش می‌یابد. اگر شاخص وب افزایش یابد (یعنی گاز به‌عنوان سیال عامل تغییر کند)، نسبت استوکیومتری و درنتیجه برای یک سیستم یکسان که برای کار با گاز طراحی شده‌است، نسبت هوا به سوخت نسبی افزایش می‌یابد. برای آن‌که بتوان از مخلوط استوکیومتری استفاده کرد، مخصوصاً برای آن‌که بخواهیم از عملکرد کاتالیست سه‌منظوره اطمینان حاصل کنیم، می‌باید در جریان سیال تصحیحاتی اعمال کنیم. بنابراین برای سازندگان موتور، شاخص وب و مخصوصاً

تغییرات آن بین نمونه‌های مختلف گازها جهت طراحی موتور و سیستم سوخت‌رسانی مهم می‌باشد.

۷-۴ سرعت شعله

انرژی جرقه لازم برای احتراق متان بیشتر از هیدروکربن‌های دیگر است. بنابراین در تبدیل موتورهای بنزینی معمولی به گازسوز، سیستم جرقه‌زنی باید قوی‌تر شود تا بتواند ۱۰۰ تا ۱۱۰ میلی‌ژول انرژی تولید کند (برای موتورهای بنزینی معمولی این مقدار ۳۰ تا ۴۰ میلی‌ژول می‌باشد.). همچنین متان قابلیت اشتعال بالاتری نسبت به هیدروکربن‌های دیگر دارد. این موضوع، قابلیت کار کردن موتور در مخلوط‌های رقیق را بالا می‌برد.

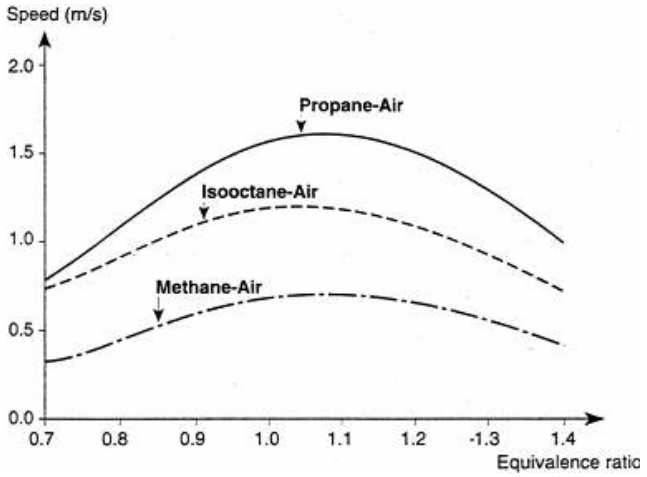
سرعت احتراق متان پایین می‌باشد. این مسأله باعث کاهش بازده موتور به دلیل افزایش انتقال حرارت به دیوارهٔ محفظه احتراق که ناشی از افزایش مدت احتراق است، می‌شود. این مشکل را می‌توان با افزایش آشفتگی بهبود بخشید. علی‌رغم تمامی این مشکلات، سرعت پایین احتراق متان باعث کاهش نویز احتراق به‌علت تغییرات کمتر فشار، می‌شود. در شکل ۷ سرعت شعله آرام برای بعضی از سوخت‌ها برحسب نسبت هم‌ارزی نمایش داده شده‌است.

سوخت‌هایی مانند هیدروژن دارای سرعت شعلهٔ بالایی می‌باشند. سرعت شعله آرام[۱۳] هیدروژن حدوداً هفت برابر سوخت‌هایی مثل متان یا گاز طبیعی می‌باشد. درحالی که Digester gas با نصف سرعت گاز طبیعی می‌سوزد.

اگر در محفظهٔ احتراق نقاط داغ ایجاد شود، ممکن است هنگامی‌که سوپاپ ورودی باز است، شعله درون ورودی کشیده شود. احتراق در گازهایی که دارای سرعت شعله کم می‌باشند، مانند گازهای طبیعی که درصد گازهای خنثی در آنها بالا می‌باشد، آن قدر به تأخیر می‌افتد که

[13] - Laminar Flame Speed

سوپاپ دود باز شده و باعث اتلاف انرژی بسیار زیادی می‌شود. حال اثر تمامی عوامل فوق در عملکرد یک موتور احتراق داخلی را به‌صورتی که در جدول ۵ آمده‌است، خلاصه می‌کنیم.



شکل ۷: سرعت شعله گازهای مختلف برحسب نسبت هم‌ارزی سوخت به هوا [۲].

۵ مقایسهٔ قیمت تمام‌شدهٔ سوخت‌های مختلف

قیمت تمام‌شده سوخت برای مصرف‌کننده، از مهمترین معیارها برای مصرف‌کننده می‌باشد. تعیین قیمت یک سوخت به پنج عامل زیر بستگی دارد:

۱. هزینهٔ تولید (Production Cost)
۲. هزینهٔ انتقال (Transportation Cost)
۳. هزینهٔ پالایش (Refining Cost)
۴. هزینهٔ توزیع (Distribution Cost)
۵. هزینهٔ فشرده کردن (Compression Cost)

جدول ۵: اثر خواص مختلف سوخت بر عملکرد موتور احتراق داخلی [۱۲].

عامل	پیامد
بالا بودن نسبت هیدروکربن (H/C)	• کاهش دی‌اکسید کربن (CO_2)
گازی‌شکل بودن سوخت	• اشغال حجم ورودی هوا • کاهش راندمان حجمی و به تبع آن کاهش عملکرد موتور • عدم نیاز به تبخیر سوخت در لحظه راه‌اندازی (کاهش آلاینده‌ها)
پائین بودن سرعت شعله و نرخ سوختن	• احتیاج به دوره احتراق طولانی‌تر و لذا افزایش پیشرسی جرقه • احتیاج به افزایش چرخش (Swirl)
اختلاط بهتر و یکنواخت‌تر با هوا	• سوختن کاملتر و کاراتر و به تبع آن کاهش گاز مونواکسید کربن (CO) و هیدروکربن‌های نسوخته (HC) • کاهش سرو صدا و آرام‌سوزی موتور • وجود مخلوط یکنواخت در دماهای پایین ورودی • راه‌اندازی مطلوب‌تر • دور آرام مطمئن و دقیق‌تر • شتاب ملایم‌تر
حذف گرمای نهان و افزایش دمای محفظه احتراق	• لزوم افزایش مقاومت حرارتی و سایشی سوپاپ‌ها و نشیمنگاه‌های آنها • احتمالاً افزایش اکسیدهای نیتروژن
بالا بودن تأخیر در اشتعال	• لزوم افزایش قدرت جرقه
بالا بودن عدد اکتان	• افزایش نسبت تراکم و به تبع آن ازدیاد کارائی چرخه موتور • کاهش مصرف سوخت
سبکتر بودن از هوا	• عدم تجمع آن در اطراف وسیله نقلیه
خشک بودن و عدم خاصیت روان‌کاری و خنک کنندگی	• لزوم بهبود روان‌کاری و مجموعه روغن‌کاری
میل به واکنش‌دهی پایین متان	• کاهش اثر تشکیل گاز ازن نسبت به سوخت‌های بنزین و گازوئیل
پایین بودن کربن نسوخته و تمیزتر سوختن متان	• عدم وجود رسوبات کربن و به‌تبع آن طولانی شدن عمر شمع‌ها • عدم اختلاط سوخت با روغن و لذا تأثیر کمتر بر کاهش لزجت (درنتیجه کاهش مصرف) روغن

جدول ۶ درصد هریک از هزینه‌های فوق را از کل قیمت تمام‌شده سوخت با هم مقایسه می‌کند (این جدول برای اروپای غربی با گاز تأمین‌شده از الجزایر و دریای شمال می‌باشد).

جدول ۶: درصد هزینه‌های مختلف در قیمت سوخت [۲].

عملیات	بنزین	گازوئیل	LPG	گاز طبیعی
استخراج	3.0	3.0	3.0	1.8
هزینه عملیات استخراج	1.0	1.0	1.0	-
انتقال	1.9	1.9	1.9	8.0
پالایش	12.5	6.5	3.5	-
هدر رفتن طی پالایش	0.3	0.1	0.1	-
توزیع	0.5	0.5	1.0	0.5
متراکم کردن	-	-	-	6.0
جمع کل	**19.2**	**13.0**	**10.5**	**16.3**

گاز طبیعی با هزینه فرآیند تولید حدود ۱۶ درصد در موقعیت بهتری نسبت به بنزین قرار دارد، با این حال سوخت دیزل از این دو به‌صرفه‌تر است. با این‌وجود در سالهای آینده، جایگاه گاز طبیعی به دو دلیل بهتر خواهد شد:

۱. پالایش‌هایی که در زنجیرهٔ انتقال-پخش-متراکم کردن انجام می‌شود، می‌تواند اتلاف را از ۱۶ به ۱۲ درصد کاهش دهد.

۲. قوانین محدودکنندهٔ سخت‌گیرانه‌تری که برای تولید بنزین و گازوئیل وضع می‌گردد، منجر به ترکیباتی می‌شود که کاهش انرژی حرارتی و افزایش مصرف این سوخت‌ها را در پی خواهد داشت.

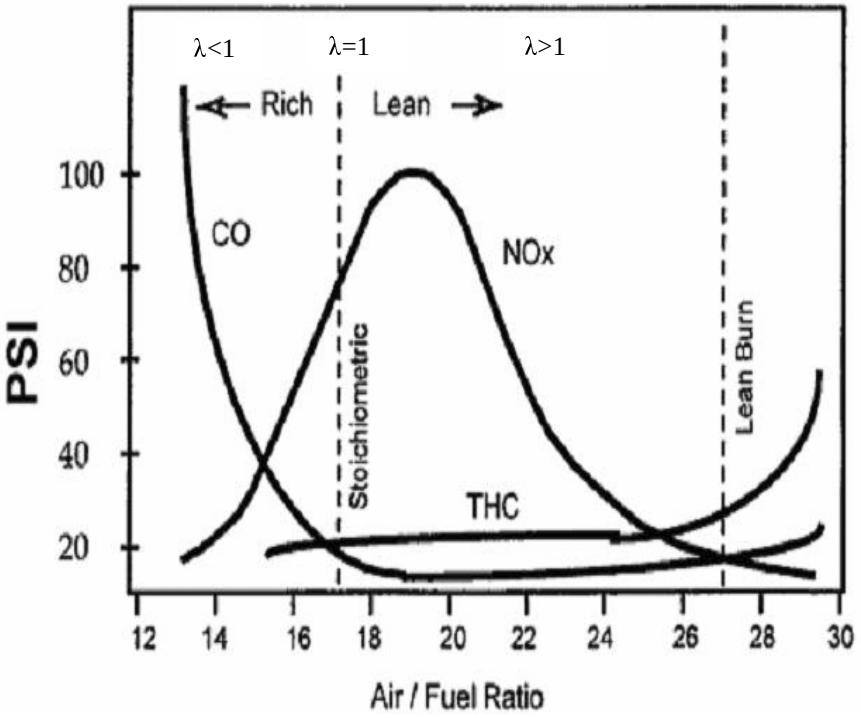
۶ احتراق

بدون شک احتراق، مهمترین پدیده در موتورهای احتراق داخلی می‌باشد. احتراق هنگامی آغاز می‌شود که سیال داخل سیلندر متراکم شده و آمادگی اشتعال را داشته باشد. در این مرحله با زدن یک جرقه یا با انجام پاشش سوخت، احتراق آغاز می‌شود. عوامل بسیار زیادی در احتراق مؤثر می‌باشند که از جمله می‌توان به میزان اختلاط سوخت و هوا، میزان آشفتگی سیال داخل سیلندر، زمان شروع احتراق و غیره اشاره نمود. تأثیر این عوامل با تغییر سوخت به گاز طبیعی، تغییر می‌کند. در این قسمت به‌طور اجمالی به بعضی از این عوامل اشاره می‌کنیم.

۶-۱ نسبت هوا به سوخت نسبی (λ)

نوع و مقدار آلاینده‌های خروجی از یک موتور احتراق داخلی جرقه‌ای، بشدت با نسبت هوا به سوخت تغییر می‌کند. شکل ۸ اثر این تغییر را به‌طور کلی نشان می‌دهد (واحد PSI در مجموعه مربوط به آلودگی توضیح داده شده‌است). معمولاً برای بیان غلظت مخلوط هوا و سوخت از کمیت λ که نسبت هوا به سوخت واقعی به نسبت هوا به سوخت استوکیومتری می‌باشد، استفاده می‌کنند که به نسبت هوا به سوخت نسبی معروف می‌باشد. عکس این کمیت را نسبت هم‌ارزی می‌نامند که معمولاً با ϕ نشان داده می‌شود. موتورهای گازسوز جرقه‌ای معمولاً به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱. موتورهای با احتراق استوکیومتری (λ=۱)
۲. موتورهای با احتراق رقیق‌سوز (λ≥۱/۵)
۳. موتورهای بهینه‌شده برای مصرف سوخت کم ($۱/۱ \leq \lambda \leq ۱/۳$)



شکل ۸: تغییرات آلاینده‌های خروجی با رقیق و غنی‌کردن مخلوط برای یک موتور جرقه‌ای

در گذشته، موتورهای گازسوز در حالت کمی رقیق ($۱/۳ \leq \lambda \leq ۱/۱$) جهت کاهش مصرف سوخت تنظیم می‌شدند که باعث افزایش NO_x تولیدی می‌شد. این‌گونه نگرش در کشورهایی که قوانین آلودگی سخت‌تری دارند، نمی‌تواند در خودروهای جدید مورد استفاده قرار گیرد و استفاده از موتورهای گازسوز در حالت استوکیومتری بیشتر مورد علاقه است.

موتورهای استوکیومتری معمولاً با سیستم سوخت‌رسانی مدار بسته[۱۴] و مبدل کاتالیستی سه‌منظوره طراحی می‌شوند که آلودگی بسیار کمی تولید می‌کنند. میزان آلایندگی این موتورها به راندمان کاتالیست و سیستم سوخت‌رسانی مداربسته بستگی دارد.

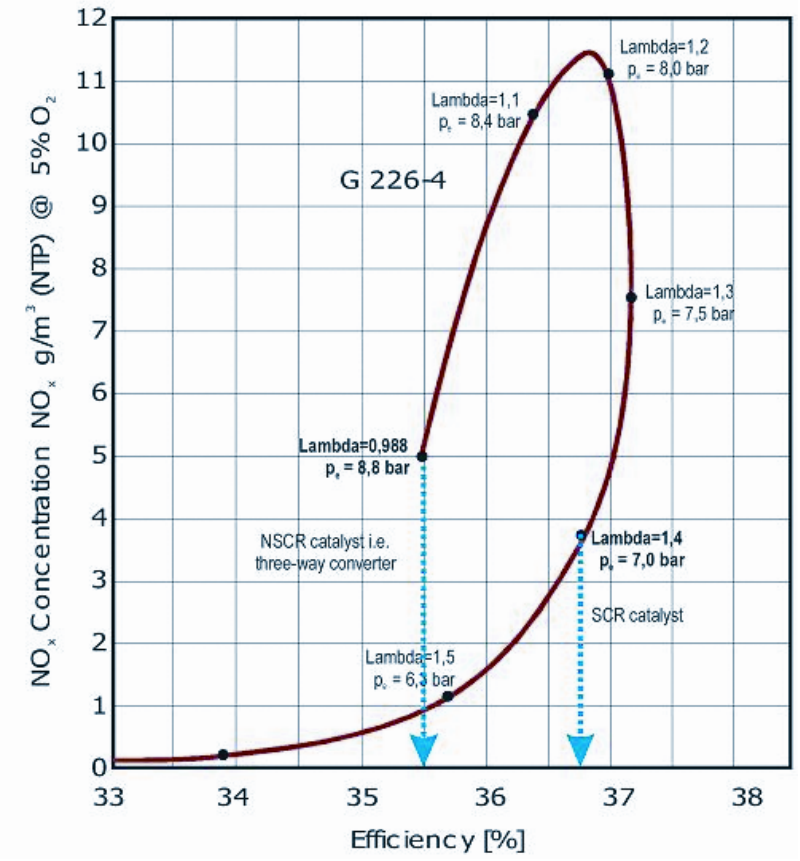
در موتورهای رقیق‌سوز، که نسبت هوا به سوخت نسبی آنها بین ۱/۵ تا ۱/۶ می‌باشد، تولید NO_x توسط خود فرایند احتراق کنترل می‌شود. این عمل با هوای اضافی و کمتر شدن دمای احتراق صورت می‌گیرد.

موتورهای دیزل نیز به‌صورت رقیق‌سوز می‌باشند و متوسط λ در آنها بین ۱/۵ تا ۲ است. موتورهای دیزل رقیق‌سوز به‌علت احتراق ناهمگن (در منطقهٔ شعله λ نزدیک به یک می‌باشد) با یک λ ثابت، NO_x بیشتری تولید می‌کنند. اکسید نیتروژن تولیدشده توسط موتورهای جرقه‌ای گازسوز با احتراق رقیق، تقریباً ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ موتورهای دیزل متناظر می‌باشند.

شکل ۹ رابطهٔ بین λ، تولید اکسیدنیتروژن و راندمان حرارتی را برای یک موتور جرقه‌ای گازسوز نشان می‌دهد. در این شکل فلش‌ها نشان می‌دهند که با استفاده از ابزارهای کاهش آلودگی در سیستم اگزوز می‌توان درصد NO_x را تا حدود صفر کاهش داد. راندمان حرارتی و NO_x در λ حدود ۱/۲ بیشینه است. در λ=۱/۵ یعنی جایی‌که NO_x در حد قابل قبولی است، راندمان حرارتی موتور هم در حد حالت استوکیومتری است (حدود ۳۶٪). همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، با استفاده از کاتالیست سه منظوره (TWC[۱۵]) در این حالت، آلودگی NO_x عملاً به تراز صفر می‌رسد. در λ حدود ۱/۵ تا ۱/۵۵، مقدار NO_x به کمتر از ۲ g/kWh

[14] - Closed-Loop
[15] - Three Way Catalyst

می‌رسد. واضح است که دو سیستم احتراق رقیق و استوکیومتری فواید و نقاط ضعف خود را دارند.



شکل ۹: مقدار NO_x برحسب نسبت هوا به سوخت و راندمان

فواید احتراق استوکیومتری

۱. امکان رسیدن به آلودگی بسیار پایین

۲. کارکرد موتور به‌صورت پایدار

۳. سیستم جرقه ساده و معمولی

۴. BMEP (فشار متوسط مؤثر ترمزی) بالا برای موتورهای تنفس طبیعی

نقاط ضعف احتراق استوکیومتری

۱. نیاز به سیستم سوخت‌رسانی مدار بسته و کاتالیست سه‌منظوره برای کنترل آلودگی

۲. بار حرارتی زیاد در مقایسه با دیزل و حالت رقیق‌سوز

۳. امکانات محدود برای استفاده از توربوشارژر

۴. افزایش مصرف سوخت نسبت به حالت رقیق‌سوز در بعضی موارد

۵. نامناسب بودن برای سوخت‌های با مقاومت کوبش پایین

فواید استفاده از احتراق رقیق

۱. مواد آلایندهٔ قابل قبول

۲. کنترل NO_x در طی فرآیند احتراق

۳. توان خروجی بالا هنگام استفاده از توربوشارژر

۴. بار حرارتی در حد موتورهای دیزل

نقاط ضعف احتراق رقیق

۱. برای رسیدن به توان بالا حتماً باید از توربوشارژر استفاده کرد.

۲. پاسخ نامناسب حالت گذرای سیستم

۳. نیاز به سیستم پیشرفته برای تولید جرقه

۴. تغییر زیاد در سیکل‌های مختلف

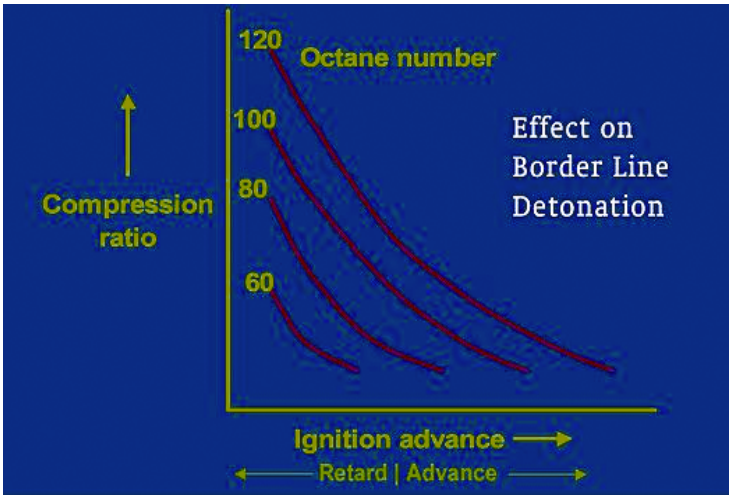
۵. بالابودن مقدار آلاینده متان تولیدی در هنگام استفاده از گاز طبیعی

۶. نیاز به کاتالیست برای کنترل آلاینده‌های CO و HC

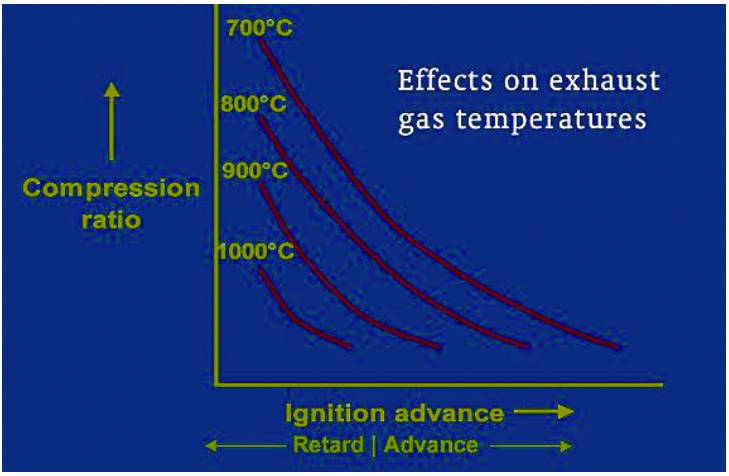
۶-۲ سیستم احتراق

یک سیستم احتراق سریع در موتورهای گازسوز می‌تواند راندمان موتور را افزایش دهد و از آلودگی بکاهد. این سیستم می‌تواند مدت زمان احتراق را کم کند و انتقال حرارت به دیواره را نیز کاهش دهد.

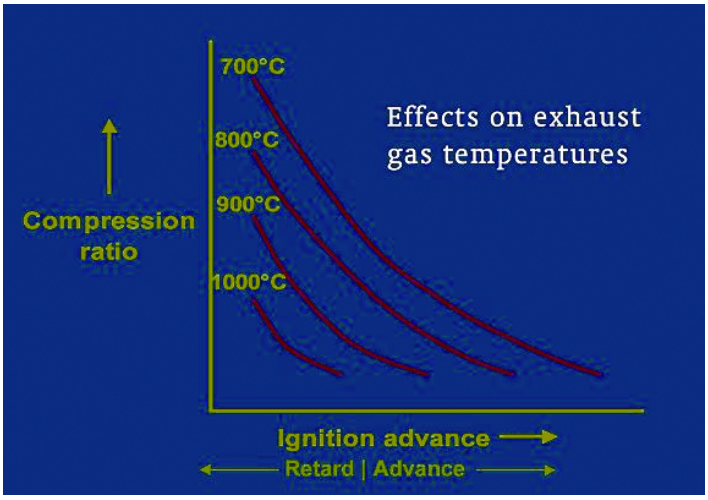
سرعت احتراق گاز طبیعی بسیار کمتر از بنزین است. سرعت پیشروی شعله برای گاز طبیعی حدود ۶۰ درصد سرعت شعله بنزین است. بنابراین زمان احتراق در موتورهای گازسوز افزایش می‌یابد. اگر زمان‌بندی جرقه مانند موتور بنزینی قرار داده شود، احتراق در دورهای بالا تا بازشدن سوپاپ دود ادامه می‌یابد. بنابراین زمان‌بندی سوپاپ‌ها نیز باید در سیستم‌های گازسوز تبدیل‌یافته، تغییر کند. با این حال با تغییر دادن زمان جرقه و نسبت تراکم برای بالا بردن راندمان موتور، محدودیت‌هایی به‌وجود می‌آید که در شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده‌اند. این محدودیت‌ها باعث محدود شدن افزایش راندمان موتور می‌شوند.



شکل ۱۰: تاثیر زمان جرقه و عدد اکتان بر نسبت تراکم مجاز [۸].



شکل ۱۱: تأثیر نسبت تراکم و زمان جرقه بر حد دمای گازهای خروجی [۸].



شکل ۱۲: اثر نسبت تراکم و زمان جرقه روی راندمان حرارتی [۸].

۳-۶ احتراق رقیق

استفاده از احتراق رقیق در موتورهای دیزل تبدیل‌شده به گازسوز به‌علت راندمان بالا و NO_x پایین، مورد توجه قرار گرفته‌است. چون در احتراق رقیق، سوخت با هوای اضافه سوزانده می‌شود (حدود ۶۰ درصد هوای اضافه)، دمای حداکثر سیکل و درنتیجه مقدار NO_x کاهش می‌یابد. علاوه بر این در حالت رقیق‌سوز می‌توان به نسبت تراکم‌های بالاتری رسید، چون در مخلوط‌های رقیق، احتمال کوبش کاهش می‌یابد.

با این وجود استفاده از احتراق رقیق معایبی نیز در بر دارد. در مخلوط‌های رقیق، سرعت انتشار شعله نیز کاهش می‌یابد. در این گونه مخلوط‌ها، با سیستم‌های جرقه‌زنی ساده، به احتراق کامل و پایداری نمی‌توان دست یافت که نتیجه آن راندمان پائین، قدرت کم و HC زیاد می‌باشد. برای احتراق رقیق، احتراق با آشفتگی بالا، طراحی محفظه احتراق با مسیر حرکت شعله کم و جرقه با انرژی بالا، مناسب می‌باشند.

توربوشارژرها معمولاً در موتورهای رقیق‌سوز به‌کار می‌روند. با طراحی درست سیستم توربوشارژر می‌توان به توانی در حد موتور دیزل رسید. این در حالی است که استفاده از توربوشارژر باعث افزایش دمای ورودی و افزایش چگالی مخلوط و آمادگی بیشتر برای ایجاد پدیدهٔ کوبش و نیز افزایش NO_x می‌شود. در برخی موارد می‌توان با استفاده از خنک‌کن میانی، دمای ورودی را کاهش داد.

معمولاً احتراق رقیق بیشتر مورد توجه تولیدکنندگان خودرو قرار می‌گیرد. این موضوع به‌دلیل کمتر بودن بار حرارتی و امکان دست‌یابی به توان خروجی بیشتر، می‌باشد. استفاده از

حالت استوکیومتری معمولاً با تغییراتی در مواد و طراحی قطعات موتور همراه است که هزینهٔ تبدیل موتور را بالا می‌برد.

تغییر در نوع سوخت، باعث تغییر سرعت احتراق و نیز افزایش λ موجب کاهش سرعت احتراق می‌شود. یعنی اگر یک موتور برای احتراق استوکیومتری تنظیم شده باشد، درصورت رقیق‌کردن مخلوط سوخت و هوا باید موتور را آوانس کرد. استفاده از بازخورانی گازهای خروجی (EGR[16]) باعث رقیق‌شدن مخلوط و کاهش سرعت احتراق می‌شود. توربوشارژر این مسأله را جبران می‌کند.

۴-۶ غنی‌سازی به‌وسیلهٔ هیدروژن

یکی از اصلاحاتی که روی گاز طبیعی فشرده معمولی یا به‌عبارتی متان خالص انجام می‌گیرد، افزودن درصدی از گاز هیدروژن به آن می‌باشد که بنابر نوع کاربرد وسیلهٔ نقلیه و شرایطی که موتور خودرو در آن قرار می‌گیرد، این درصد متفاوت خواهدبود.

اضافه‌کردن هیدروژن با درصدهای بالا، آلودگی منتشرشده از موتور خودرو را به‌طور قابل ملاحظه‌ای در مقایسه با سوخت‌های گازوئیلی پایین می‌آورد به‌طوری که علاوه بر کاهش دوده، اکسید نیتروژن نیز به حدود صفر می‌رسد. اگرچه افزودن هیدروژن سبب کاهش آلودگی و افزایش بازده موتور می‌شود، اما در کنار اینها سبب بالارفتن قیمت سوخت و کاهش قدرت خروجی موتور نیز می‌گردد. از آنجا که پایین نگه داشتن آلودگی موتور خودرو در حالت‌های گذرا مسألهٔ دشواری است، در هنگام تست سوخت‌های رقیق از آن صرف‌نظر می‌شود. هنگامی افزودن هیدروژن موفقیت‌آمیز محسوب می‌شود که آلودگی به میزان قابل ملاحظه‌ای از لحاظ

[16] - Exhaust Gas Recirculation

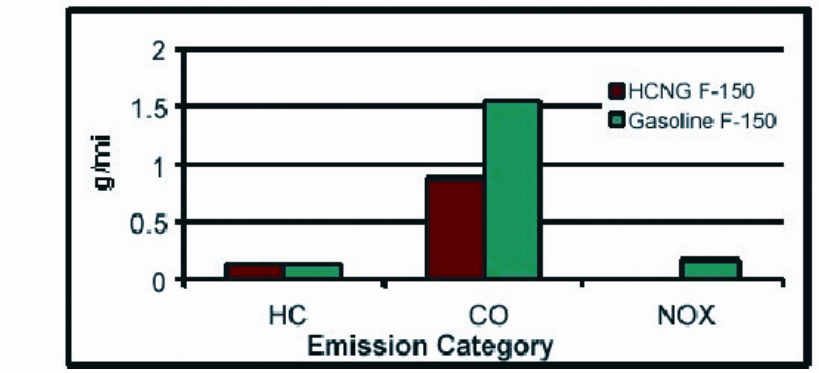
NMHC[۱۷]، NO_x و CO کاهش یابد و درضمن، این کاهش بدون درنظر گرفتن تأثیر کاتالیست‌های اگزوز سنجیده می‌شود. مطلب مهم دیگری که در مورد هیدروژن به‌عنوان یک افزاینده به گاز طبیعی، می‌توان یادآور شد آن است که هیچ‌گونه توسعهٔ تکنولوژی جدیدی برای احتراق آن نیاز نیست و تعمیر و نگهداری موتور و تجهیزات احتراق از لحاظ زیربنایی دستخوش تغییر نمی‌شوند.

پرسش دیگری که ممکن است در مورد افزودن هیدروژن مطرح گردد، تأثیر آن بر پایداری شعله در حالت مخلوط‌های رقیق سوخت و هوا است. برای مشخص کردن تأثیر هیدروژن بر پایداری احتراق در حالت مخلوط سوخت و هوای رقیق، مقادیر مختلفی از هیدروژن به مخلوط هوا و متان افزوده شده و اندازه‌گیری پایداری شعله در هر مورد تکرار شده‌است. به‌عنوان مثال نتایج یک آزمایش نشان می‌دهد که وقتی دمای آدیاباتیک T_{ad}=۱۱۷۰K است، افزودن ۴۱٪ هیدروژن سبب می‌گردد که این دما به مقدار T_{ad}=۱۰۵۸ K تغییر یابد. در جدول ۷ میزان کاهش آلاینده‌ها پس از افزودن هیدروژن به گاز آورده شده‌است. در شکل ۱۳ نیز مقایسه‌ای بین میزان آلودگی تولید شده توسط موتورهای بنزین‌سوز و گاز طبیعی غنی‌شده با هیدروژن ارائه شده‌است.

جدول ۷: کاهش در میزان آلاینده‌های CO و NO_x پس از افزودن هیدروژن

Emissions Standards and Goals			
	NMHC [g/bhp-hr]	CO [g/bhp-hr]	NOx [g/bhp-hr]
1998 U.S. EPA Standard for HDE	1.7	37.1	5
75% Reduction Goal	0.4	9.28	1.25

17 - هیدروکربن‌های غیرمتان



شکل ۱۳: مقایسه بین میزان آلودگی بنزین و گاز طبیعی فشرده غنی‌شده با هیدروژن

۷ طبقه‌بندی خودروهای گازسوز

به‌صورت اجمالی خودروهای گاز طبیعی، بسته به این که به چه صورت از گاز طبیعی استفاده می‌کنند، به سه دسته تقسیم می‌شوند. این تقسیم‌بندی عبارت است از:

۱. **صددرصد گازسوز**[18]: این خودروها از ابتدا برای کار با سوخت گاز طراحی شده‌اند. از آنجا که طراحی این خودورها برمبنای گاز بوده، تمام مسائل و مشکلات سوخت گاز در طراحی آنها مد نظر قرار گرفته است. بنابراین این خودروها از کیفیت و راندمان خوبی برخوردار می‌باشند.

۲. **دوسوخته**[19]: خودروهای دوسوخته، به آن دسته از خودروهایی اطلاق می‌شود که با استفاده از کیت تبدیل، از بنزین‌سوز به گازسوز تبدیل شده‌اند. در واقع طراحی اولیه

[18] - Dedicated
[19] - Bifuel

این خودروها برمبنای سوخت بنزین بوده است. نحوهٔ عملکرد این خودروها بدین گونه است که با استفاده از کیت گازسوز می‌توان به هنگام نیاز، سوخت را از بنزین به گاز تغییر داد. چون در این موتورها از دو نوع سوخت (بنزین یا گاز) استفاده می‌شود به این موتورها دوسوخته می‌گویند.

این مسأله که این موتورها برای کار با گاز طراحی نشده‌اند، بزرگترین مشکل آنها می‌باشد. زیرا در احتراق آنها مشخصات یک موتور گازسوز دیده نشده‌است و لذا باعث پایین آمدن راندمان به‌هنگام کار با سوخت گاز می‌شود. البته برخی تمهیدات برای غلبه بر مشکلات فوق به‌عمل آمده‌است که تا حدی عملکرد این موتورها را قابل قبول می‌کند.

۳. **دوگانه‌سوز**[۲۰]: این موتورها، موتورهایی هستند که اغلب از تبدیل یک موتور دیزل به گازسوز به‌دست می‌آید. در این‌گونه موتورها، ابتدا گاز با نسبت ۹۰ تا ۹۵٪ از کل انرژی وارد محفظهٔ احتراق می‌شود. هنگامی‌که مخلوط هوا و سوخت داخل محفظهٔ احتراق تا حد مناسب فشرده و آمادهٔ احتراق شد، مقدار کمی گازوئیل توسط انژکتور پاشیده می‌شود. این فرایند باعث می‌شود تا احتراق، آغاز شده و موتور فعال شود. گازوئیل در اینجا به‌جای شمع عمل می‌کند و لذا به آن سوخت پیلوت و یا سوخت آتش‌زنه می‌گویند. چون در این موتورها فرایند احتراق ابتدا به‌صورت اشتعال تراکمی و سپس احتراق شبیه مخلوط پیش‌آمیخته می‌باشد، لذا دو نوع "اشتعال" و "سوختن" متفاوت رخ می‌دهد. به‌همین دلیل به این‌گونه موتورها، موتورهای دوگانه‌سوز می‌گویند. در کلمهٔ "دوگانه‌سوز" پسوند "سوز" بیان‌کنندهٔ سوختن است

[20] - Dual Fuel

که در این موتورها دو نوع مختلف سوختن اتفاق می‌افتد. در ضمن کلمهٔ "Dual" در انگلیسی به معنای دوتایی می‌باشد، بدین معنی که هر کدام از اجزا به یکدیگر وابسته بوده و بدون یکدیگر نمی‌توانند عمل کنند. به‌همین صورت پیشوند "Bi" در انگلیسی به معنای "دوتا" می‌باشد که هر کدام می‌توانند مستقل از دیگری عمل کنند. موتورهای دوسوخته (Bifuel) می‌توانند با هر کدام از سوخت‌ها به طور مستقل کار کنند[۲۱].

دو روش اول مورد استفاده در خودروهای سبک بوده و روش سوم مخصوص خودروهای سنگین می‌باشد. تا سال ۱۹۹۹ مجموعاً یک میلیون دستگاه خودروی گازسوز در جهان با روش‌های فوق تولید شده‌اند. بدون شک بهترین وضعیت برای یک خودروی گازسوز این است که موتور از ابتدا برای سوخت گاز طبیعی طراحی و تولید گردد. اما با استفاده از کیت‌های تبدیل نیز می‌توان یک خودرو را گازسوز نمود.

۸ موتورهای OEM و موتورهای تبدیل‌یافته

موتورهایی که در خود کارخانهٔ سازندهٔ موتور، تجهیزات گازسوز روی آن نصب شده باشد، خواه به‌صورت اختصاصاً گازسوز و خواه به‌صورت دوسوخته یا دوگانه‌سوز، موتورهای OEM[۲۲] نامیده می‌شوند. تفاوت‌های بسیار زیادی بین موتورهای OEM و موتورهای تبدیل شده CNG وجود دارد که دو مورد زیر، از مهمترین آنها می‌باشند.

---

[۲۱] - در حال حاضر در صنایع خودروسازی، دو اصطلاح دوسوخته و دوگانه‌سوز سهواً به‌جای یکدیگر به‌کار برده می‌شوند.

[22] - Original Equipment Manufacturer

- مخزن گاز در این خودروها به‌طور مناسب جاسازی شده‌است و مشکلاتی که در موتورهای تبدیل یافته به‌وجود می‌آید، در این موتورها وجود ندارد. بعلاوه با حذف یا کوچک‌کردن مخزن بنزین (بسته به این‌که موتور اختصاصاً گازسوز یا دوسوخته باشد)، جانمایی این مخزن‌ها در خودرو بهتر می‌شود.
- تفاوت دوم در نسبت تراکم این موتورها می‌باشد. چون در موتورهای OEM اختصاصاً گازسوز، سازنده می‌تواند موتور را بر مبنای نسبت تراکم بهینه کند، راندمان این موتورها نسبت به موتورهای تبدیل یافته بسیار بهبود می‌یابد.

تغییر ساختار وسایل نقلیهٔ دیزلی و بنزینی به گازسوز را تبدیل[۲۳] می‌گوییم. هرچند تبدیل وسایل نقلیه به NGV پرهزینه می‌باشد، ولی به سه دلیل این تبدیل صورت می‌گیرد که عبارتند از:

- افزایش هزینه‌های سوخت‌های متداول
- افزایش آلودگی هوا و مسایل زیست محیطی
- تنوع و زیاد بودن منابع انرژی گاز طبیعی

هر دو نوع موتورهای دیزل و بنزینی می‌توانند به موتور گازسوز تبدیل شوند. تبدیل از موتور بنزینی به گازسوز بسیار ساده است و تنها احتیاج به یک کیت تبدیل برای سیستم سوخت‌رسانی دارد. در این تبدیل، تنها قسمت‌های بسیار کمی از موتور تغییر می‌کنند و در بعضی موارد تغییری اعمال نمی‌گردد.

برای تبدیل موتور دیزل به موتورهای جرقه‌ای گازسوز باید سیستم جرقه‌زنی در سرسیلندر

[23] - Conversion

موتور قرار داده شود. این امر به دلیل آن است که گاز طبیعی، یک سوخت خودسوز[۲۴] نیست و دمای خوداشتعالی آن بالا است. گاز طبیعی با عدد ستان ۲ باید تا دمای $1000^{o}C$ گرم شود تا خودبه‌خود منفجر شود. این به معنی نسبت تراکم ۳۲ در سیکل دیزل است که عملاً امکان‌پذیر نیست.

در مقایسه بین موتورهای OEM بنزین‌سوز و گازسوز در خودروهای مشابه، موتورهای گازسوز از راندمان بالاتری برخوردار هستند. چون عدد اکتان سوخت گاز بالاتر از بنزین می‌باشد (۱۳۰ در برابر ۹۵)، نسبت تراکم موتورهای گازسوز از بنزین‌سوز بالاتر می‌باشد، که منجر به افزایش راندمان حرارتی این موتورها می‌شود. این افزایش راندمان حدود ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد.

با این‌حال به‌علت ماهیت سوخت گازی، افت توان حدود ۱۰ درصد در این موتورها مشاهده می‌شود. اما با توجه به بهبود راندمان، خودروهای بهینه شده برای سوخت گاز، عملکرد مشابهی (شتاب، گشتاور و حداکثر سرعت) نسبت به خودروهای با سوخت بنزین دارند. باید توجه داشت که موتورهای گازسوز به‌علت ماهیت سوخت گازی، درحالت گذرای موتور مشکلاتی جزئی دارند. ولی مسایلی مانند شرایط استارت سرد و گرم شدن موتور که در موتورهای بنزینی به‌وجود می‌آید، در این موتورها حذف می‌شود. تفاوت‌های دیگری نیز بین این دو نوع خودرو وجود دارد که در جدول ۸ ذکر شده‌اند.

موتورهای اختصاصاً گازسوز که برای خودروهای سنگین استفاده می‌شوند، معمولاً از سیستم سوپرشارژ به‌همراه احتراق رقیق استفاده می‌کنند. با استفاده از این سیستم می‌توان به

[24] - Auto-Ignited

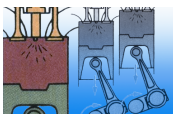
راندمان و توانی در حدود موتورهای دیزل هم حجم دست یافت. جدول ۹ مقایسه بین دو موتور دیزل و گاز طبیعی را نشان می‌دهد.

جدول ۸: اثر تغییر از بنزین به OEM گازسوز [۹].

تغییرات	اثر	مقدار
افزایش حجم ذخیره‌سازی انرژی	کاهش فضای دردسترس برای ذخیره‌سازی	قابل توجه
سوخت با اکتان بالاتر	بهبود مصرف سوخت، افزایش راندمان موتور	قابل توجه
افزایش وزن خودرو به‌علت وزن مخازن سوخت	افزایش کم در ساییدگی لاستیک‌ها و مصرف سوخت	قابل صرف‌نظر
قیمت سوخت	صرفه‌جویی در مصرف سوخت	بیش از ۴۰ درصد
صرفه‌جویی در تعمیر موتور	روغن تمیزتر	قابل توجه

جدول ۹: مقایسه دو موتور با سوخت‌های گازطبیعی و دیزل [۲].

مشخصات سوخت و متغیرهای کاری	نوع سوخت	
	گازوئیل	گاز طبیعی
NHV (kJ/kg)	42800	49100
سرعت (rpm)	1400	1260
گشتاور بیشینه (N-m)	1180	1000
توان (kW)	173	185
نسبت هم‌ارزی	0.56	0.61
ESFC (g/kWh)	204	186
راندمان کلی (%)	**41.2**	**39.4**



۹ موتورهای دوسوخته

همان‌طور که ذکر شد، موتورهای دوسوخته می‌توانند هم به‌صورت OEM و هم به‌صورت تبدیل یافته، باشند. وقتی یک موتور بنزینی با سیستم مکش معمولی، به موتور گازسوز تبدیل می‌شود، معمولاً بین ۸ تا ۱۵ درصد افت توان به‌وجود می‌آید. اصلی‌ترین دلیل این امر، حجم حدود ۱۰ درصد از هوای ورودی است که به‌وسیله گاز اشغال می‌شود. بعلاوه اثر تبخیر سوخت که باعث کاهش دمای ورودی و افزایش چگالی می‌شود، در سوخت گازی وجود ندارد. موارد دیگری مانند زمان‌بندی جرقه و سوپاپ‌ها، طراحی منیفولد و طراحی محفظهٔ احتراق، از جمله مسائلی می‌باشند که در هنگام تغییر نوع سوخت از بنزین به گاز باعث کاهش راندمان می‌شوند. تفاوت‌های اصلی و اثرات آنها در هنگام تبدیل از بنزین‌سوز به گازسوز در جدول ۱۰ فهرست شده‌است.

جدول ۱۰: اثرات اصلی در تبدیل موتور از بنزین‌سوز به گازسوز [۹].

تغییرات در تبدیل از بنزین سوز به گازسوز	اثر	مقدار
تغییر در سوخت	کاهش قدرت	۸ تا ۱۵ درصد
چگالی کمتر انرژی سوخت	کاهش برد	۴۰ درصد و بیشتر
افزایش حجم ذخیره‌سازی سوخت	کاهش فضای خودرو	زیاد
افزایش وزن ذخیره‌سازی	کاهش شتاب	قابل توجه
بهبود به‌دلیل استفاده از سوخت متان	بهبود آلاینده‌ها	زیاد
قیمت سوخت	صرفه‌جویی در قیمت سوخت	۳۰ درصد یا بیشتر
صرفه‌جویی در تعمیرات موتور	روغن تمیزتر و عمر بیشتر	قابل توجه

هنگام تبدیل یک موتور بنزینی به گازسوز، باید به نوع سیستم سوخت‌رسانی آن توجه خاصی مبذول داشت. اصولاً موتورهای بنزینی به دو دسته کاربراتوری و انژکتوری تقسیم می‌شوند. بسته به این‌که موتور در کدام دسته باشد باید نوع کیت مخصوص به خودش را اختیار نمود. کیت‌ها از قطعات مختلفی تشکیل می‌شوند. این قسمت‌ها عبارتند از:

- مخزن
- شیرها
- لوله‌ها
- رگلاتور
- سوئیچ تبدیل
- میکسر
- سیستم‌های کنترلی
- پیش‌انداز جرقه
- شبیه‌ساز
- مبدل‌های کاتالیستی

توضیح و نحوهٔ عملکرد هریک از این قسمت‌ها در مجموعهٔ مربوط به کیت‌های تبدیل، به‌طور کامل آورده شده است. به‌طور خلاصه نکات زیر باید هنگام تبدیل موردنظر قرار بگیرد:

أ. در موتورهای کاربراتوری، قرار دادن یک کیت تبدیل کافی است تا موتور به گازسوز تبدیل شود. این کیت شامل یک میکسر می‌باشد که روی کاربراتور قرار می‌گیرد و به‌جای بنزین، گاز را وارد منیفولد می‌کند. در بعضی از مدل‌های کیت، از خود دهانه کاربراتور برای اختلاط گاز با هوا استفاده

می‌کنند و دیگر نیازی به یک میکسر جداگانه نخواهد بود. دیگر قطعات کیت برای رساندن گاز به میکسر می‌باشد.

ب. برای آن‌که به مشکلات موجود در زمینه تبدیل موتورهای انژکتوری به گازسوز پی برده‌شود، لازم است تا مختصری دربارهٔ عملکرد این موتورها توضیح داده شود.

در موتورهای بنزینی انژکتوری، فرمان تزریق توسط یک ECU[۲۵] به انژکتورها صادر می‌شود. از آنجاکه عمل تزریق در موتورهای مختلف متفاوت می‌باشد، نحوهٔ تبدیل آنها نیز بسیار متفاوت می‌باشد. صدور فرمان تزریق توسط ECU به شرایط بسیار زیادی بستگی دارد که با توجه به برنامه‌ای که به ECU داده شده‌است و همچنین ورودی‌هایی که از نقاط مختلف موتور از طریق حسگرها دریافت می‌کند، نسبت به صدور فرمان تزریق اقدام می‌نماید.

برنامه داده‌شده به ECU وابسته به شرایط موتور و ساختار داخلی آن می‌باشد که به اصطلاح به آن نگاشت[۲۶] موتور می‌گویند. در واقع تمام شرایط کارکرد موتور در نگاشت آن موجود می‌باشد و ECU با شبیه‌سازی آن می‌تواند تشخیص دهد که چه زمانی باید عمل تزریق و جرقه‌زدن صورت بگیرد.

[25] - Electronic Control Unit
[26] - MAP

حال مشکل اصلی به هنگام تبدیل یک موتور انژکتوری به گازسوز را می‌توان بهتر درک کرد. این مشکل از آنجا ناشی می‌شود که اصولاً احتراق گاز با بنزین بسیار متفاوت می‌باشد. این تفاوت‌ها را می‌توان در دمای احتراق، سرعت شعله، نسبت هوا به سوخت و غیره دانست. بدیهی است برای آنکه یک موتور در شرایط بهینه کارکند، باید تمامی این عوامل مدنظر قرار گیرند. چیزی که به‌عنوان نگاشت موتور در ECU موجود می‌باشد، براساس اطلاعات یک موتور بنزین‌سوز می‌باشد و نه موتور گازسوز. هنگام تبدیل این موتور به گازسوز دیگر زمان‌بندی اعمال‌شده توسط ECU مناسب حال سوخت گاز نمی‌باشد و باید در زمان صدور دستور پاشش و جرقه تغییرات مناسبی صورت گیرد.

روش‌های متعددی برای اعمال این اصلاحات در برنامه ECU موجود می‌باشد که اهم آنها به شرح زیر می‌باشند:

- یکی از متداول‌ترین راه‌ها در تبدیل کارگاهی استفاده از ECU گاز به‌صورت اصلی- فرعی[۲۷] جهت ایجاد این تصحیح است. ECU گاز در این حالت حاوی اطلاعات کاملی نظیر الگوریتم‌های پیچیده کنترلی و نگاشت‌های موجود در ECU بنزین نمی‌باشد بلکه براساس سیگنال تولید شده توسط ECU بنزین برای پاشش سوخت، تصحیحات لازم را اعمال می‌کند. برای این منظور، مقدار گازی که باید از انژکتورهای

[27] - Master/Slave

گاز به داخل سیلندر وارد شود تا شرایط معادل به‌وجود آید، در ECU گاز محاسبه و سیگنال مناسب به انژکتورهای گاز فرستاده می‌شود. در این روش به‌منظور قطع سیگنال انژکتورهای بنزین بدون تولید کد خطا در ECU از شبیه‌ساز پاشش[۲۸] استفاده می‌شود. برای تصحیح میزان آوانس جرقه نیز باید یک پیش‌انداز جرقه در سیستم تعبیه گردد. این پیش‌انداز با آوانس‌کردن زاویه جرقه‌ای که ECU محاسبه می‌کند، زمان جرقه مناسب را برای عملکرد موتور با سوخت گاز ایجاد می‌نماید. در این روش فرمان تولیدشده در ECU گاز براساس پردازش اطلاعات در ECU بنزین است. لذا به این نحوهٔ ارتباط ECUها، اصلی- فرعی می‌گویند.

- روش دیگری که جدیداً مورد استفاده قرار می‌گیرد، استفاده از دو نگاشت مختلف برای موتور می‌باشد. روش کار چنین است که موتور را برای دو حالت سوخت بنزین و گاز مورد بررسی قرار می‌دهند و برای هر حالت یک نگاشت مناسب درنظر می‌گیرند. سپس هر دو نگاشت را وارد ECU می‌کنند. برای آنکه ECU بتواند تشخیص دهد که از کدام نگاشت باید استفاده کند، یک ورودی از کلید تعویض سوخت دریافت می‌کند. اگر سوئیچ روی سوخت بنزین باشد از نگاشت بنزینی

[28] - Injection Emulator

و اگر سوئیچ روی سوخت گاز باشد از نگاشت گازی استفاده می‌شود. در این وضعیت پردازش اطلاعات در ECU گاز مستقل از حالت کارکرد بنزین است. از این جهت این پیکربندی به پیکربندی مستقل[۲۹] موسوم است.

۹-۱ سیستم‌های سوخت‌رسانی در موتورهای دوسوخته

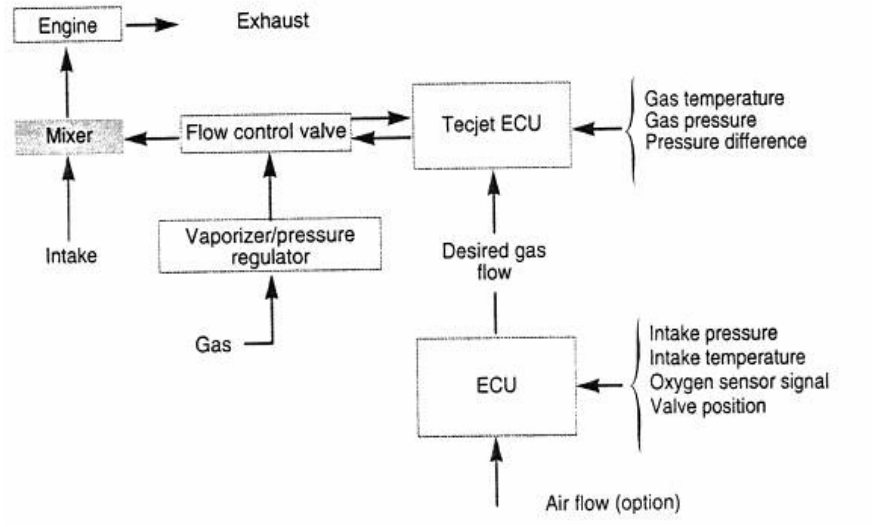
انواع روش‌های سوخت رسانی در موتورهای دوسوختهٔ گازسوز مورد استفاده قرار می‌گیرند که شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. سیستم‌های کاربراتوری
۲. سیستم‌های میکسری
۳. سیستم‌های تک نقطه‌ای پاشش سوخت
۴. سیستم‌های چند نقطه‌ای پاشش سوخت

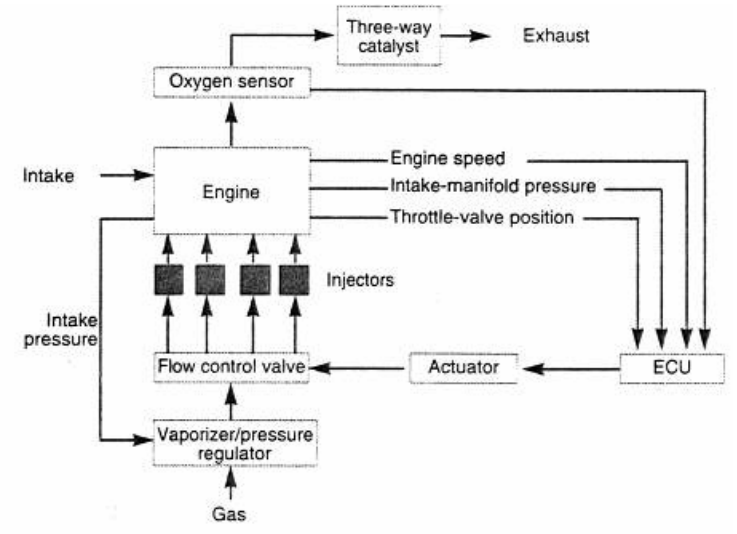
در شکل ۱۴ شماتیک سیستم‌های میکسری مشاهده می‌شود. شکل ۱۵ نیز یک طرح شماتیک از سیستم پاشش چند نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

تفاوت سیستم‌های کاربراتوری و میکسری در این است که در نوع کاربراتوری برای اختلاط گاز و هوا از همان کاربراتور که برای تأمین مخلوط بنزین و هوا تعبیه شده‌است، استفاده می‌گردد. اما در نوع میکسری برای این کار از میکسر استفاده می‌کنند. توضیحات هر یک از اجزای سیستم و نحوهٔ عملکرد آنها در مجموعهٔ کیت‌های گاز سوز به‌طور کامل آورده شده‌است. در جدول ۱۱ مقایسه اجمالی این سیستم‌ها را می‌بینیم.

[29] - Stand Alone



شکل ۱۴: سیستم سوخت‌رسانی میکسری [۲].



شکل ۱۵: سیستم سوخت‌رسانی پاشش چند نقطه‌ای [۲].

جدول ۱۱: مقایسه بین سیستم‌های مختلف سوخت‌رسانی.

Cost	Carburetor		Mixer	Single-point injection	Multipoint injection
	Mechanical	Variable electronic			
	+ +	+	+	-	-
Transient operation	- -	-	-	+	+
Distribution between cylinders	- -	- -	- -	- -	+ +
Intake pressure reduction	- -	- -	-	-	+
Flashback risk	- -	- -	- -	- -	+
+: Advantage; -: Disadvantage					

۲-۹ موتورهای بنزینی تبدیل‌شده به دوسوخته

برای تبدیل موتورهای بنزینی معمولی به گازسوز باید سیستم سوخت‌رسانی را اصلاح کنیم. بر مبنای این تغییرات، راندمان و آلودگی این موتورها نیز تغییر می‌کند که در ادامه بحث، به آن می‌پردازیم.

موتورهای اشتعال-جرقه‌ای که با بنزین کار می‌کنند با کمی اصلاحات، قابلیت کار با گاز طبیعی را نیز به‌دست می‌آورند. به‌همین دلیل بیشتر خودروهای گازسوز اشتعال-جرقه‌ای هستند. در این موتورها سیستم‌های تزریق سوخت برای دو سوخت بنزین و گاز طبیعی تفاوت چندانی ندارند. تغییر سیستم تأمین سوخت از بنزین‌سوز به گازسوز با کیت‌های تبدیل میسر می‌شود که آنها را به چهار نسل مختلف تقسیم می‌کنند.

نسل اول: در این نسل، سیستم سوخت‌رسانی بر مبنای تنظیم سوخت به کمک میکسر[۳۰] کار می‌کند و هیچ کنترلی بر مقدار نسبت سوخت به هوا وجود ندارد.

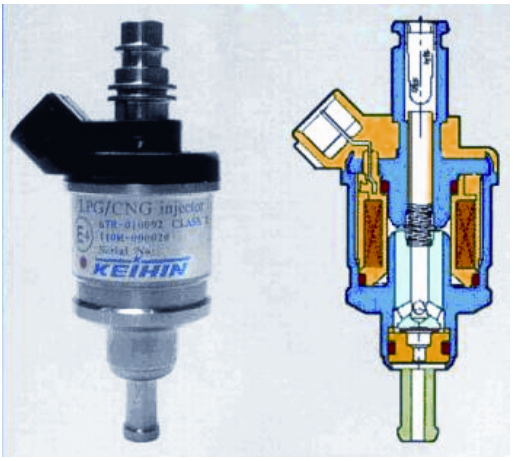
نسل دوم: در این نسل مانند سیستم‌های نسل اول، سوخت به کمک یک میکسر که در راهگاه‌های ورودی تعبیه می‌شود و مکشی که در پایین‌دست به‌وجود می‌آید به داخل ونتوری میکسر مکیده شده و با هوا مخلوط می‌گردد. در این سیستم برای کنترل مدار بستهٔ نسبت هوا به سوخت از یک موتور پله‌ای بر سر راه مسیر گاز به میکسر و نزدیک حسگر اکسیژن استفاده می‌شود.

نسل سوم: در این نسل پاشش سوخت به‌وسیلهٔ انژکتورها انجام می‌شود. لذا به‌صورت الکترونیکی و با دقت بالا قابل کنترل است. در این نوع سیستم‌ها ممکن است از یک یا چند انژکتور استفاده شود. همزمانی توزیع یا پاشش گاز از ویژگی‌های اصلی این نسل از کیت‌های تبدیل است. با این نسل از سیستم‌های سوخت‌رسانی می‌توان کنترل مدار بستهٔ دقیقی بر نسبت هوا به سوخت اعمال نمود.

نسل چهارم: این نسل از کیت‌های تبدیل که پیشرفته‌ترین نوع آنهاست امکان کنترل مداربسته بسیار دقیقی بر میزان پاشش سوخت را فراهم می‌کنند. در این سیستم به تعداد سیلندرهای موتور انژکتور پاشش سوخت وجود دارد که نحوهٔ پاشش آنها نوبتی[۳۱] است. یعنی هر انژکتور جداگانه کنترل می‌شود و مقدار سوخت پاشیده شده از آن مستقل از سایر انژکتورها تعیین می‌گردد. با حرکت از نسل اول به نسل چهارم، آلاینده‌ها کاهش و در ازای آن هزینه‌ها افزایش می‌یابد. در شکل ۱۶ نمونه‌ای از یک انژکتور که در موتورهای گازسوز به‌کار می‌رود،

30 - Mixer
31 - Sequential

دیده می‌شود. البته شایان ذکر است که در سیستم‌های کاربراتوری برای اختلاط سوخت و هوا به‌جای کاربراتور از میکسر استفاده می‌شود.



شکل ۱۶: یک نوع انژکتور که در موتورهای گازسوز استفاده می‌شود.

با تغییر موتور بنزینی به موتور گازسوز، آلایندهٔ CO تولیدی نسبت به سوخت بنزین کاهش می‌یابد که دلیل آن کمتربودن کربن موجود در متان است. تغییر میزان آلایندهٔ HC (هیدروکربن) به شرایط کارکرد موتور بستگی دارد. در دورهای بالا به‌علت سرعت پایین احتراق گاز، احتراق تا باز شدن سوپاپ دود ادامه می‌یابد که منجر به افزایش HC می‌شود. حدود ۸۵ درصد آلایندهٔ HC در این موتورها، متان می‌باشد.

اکسیدهای نیتروژن (NO_x) در موتورهای گازسوز افزایش می‌یابند. این به‌علت دمای بالا و زیاد بودن زمان احتراق است. متان نسبت گرمای ویژهٔ بالایی دارد که منجر به بالاتر بودن دمای

مخلوط سوخت و هوا در پایان مرحلهٔ تراکم نسبت به سایر سوخت‌های متداول می‌باشد. بعلاوه، آوانس کردن موتور برای گرفتن توان و بازدهٔ حرارتی بالاتر منجر به دماهای بالاتر می‌شود.

۹-۳ موتورهای دیزل تبدیل‌شده به اختصاصاً گازسوز

به‌دلیل نسبت تراکم بالا در موتورهای دیزل و بازده بهتر سیستم جرقه‌ای گازسوز در تمامی محدودهٔ کاری، موتورهای دیزل معمولاً به سیستم‌های جرقه‌ای مجهز می‌شوند تا برای کار با سوخت گاز طبیعی آماده شوند. این موتورها بیشتر برای خودروهای سنگین و نیمه‌سنگین مورد استفاده قرار می‌گیرند. آلودگی این گونه موتورها تقریباً مانند موتورهای بنزینی تبدیل‌شده است (به‌جز در مورد NO_x).

آلایندهٔ NO_x موتورهای گازسوز در حالت مخلوط‌های استوکیومتری و کمی رقیق، بیشتر از حالت احتراق رقیق است. این امر به دلیل افزایش دما و فشار بیشینه داخل سیلندر است. همچنین، آوانس کردن زمان جرقه و افزایش سرعت آزاد شدن گرما، دمای بیشینه را افزایش می‌دهد.

۹-۴ هزینهٔ تبدیل

هرچند هزینهٔ استفاده از گاز طبیعی از سوخت‌های متداول کمتر است اما هزینهٔ تبدیل هم، قابل توجه می‌باشد. هزینهٔ تبدیل خودروهای سبک به خودروهای گازسوز به سه عامل بستگی زیر دارد:

۱. نوع سوخت
۲. سطح تکنولوژی به‌کار گرفته شده
۳. اندازه و کیفیت مخازن سوخت

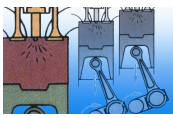
این هزینه بسته به نوع کیت به‌کار رفته بین ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ دلار متغیر است. لازم به ذکر است که پرهزینه‌ترین قسمت در تبدیل یک خودرو به خودروی گازسوز، مخازن آن می‌باشد.

۹-۵ اثر استفاده از گاز طبیعی بر راندمان موتورهای اشتعال جرقه‌ای

آلودگی و راندمان یک موتور احتراق داخلی وابسته به مشخصات سوخت می‌باشد. این مشخصات عبارتند از: احتراق خوب، سرعت احتراق مناسب، مقاومت در برابر کوبش و انرژی حرارتی زیاد مخلوط سوخت و هوا. هنگامی‌که از گاز طبیعی به‌عنوان سوخت استفاده می‌کنیم، موارد زیر در راندمان موتور مؤثر هستند:

- چگالی سوخت
- ارزش حرارتی سوخت
- نسبت سوخت به هوا در حالت استوکیومتری
- مقاومت در برابر کوبش

انرژی داخلی مخلوط سوخت و هوا بر مبنای نوع سوخت و λ مشخص می‌شود. تعیین λ مناسب در شرایط کاری موتور منجر به آلودگی کمتر و راندمان بهینه موتور می‌شود. رسیدن به راندمان بالاتر، با افزایش نسبت تراکم امکان‌پذیر است که نیازمند سوختی با مقاومت بالا در برابر کوبش می‌باشد. مقاومت گاز طبیعی در برابر کوبش از بنزین بیشتر است. موتورهایی که برای استفاده از گاز طبیعی طراحی شده‌اند، با نسبت تراکم بالاتر، راندمان بیشتری دارند.



برای بررسی راندمان موتورهای گازسوز باید نوع موتور، مورد ارزیابی قرار گیرد. موتورهای گازسوز می‌توانند به‌صورت گازسوز در کارخانهٔ سازنده تولید شده باشند (OEM) یا به‌صورت کارگاهی به موتورهای گازسوز تبدیل شده باشند. موتورهای تبدیل‌شده بر دو نوع می‌باشند:

- موتورهای بنزینی تبدیل شده
- موتورهای دیزل تبدیل شده

نتایج نشان می‌دهد که موتورهای بنزینی تبدیل‌شده به گازسوز حداکثر تا ۲۲ درصد کاهش توان و راندمان حرارتی از خود نشان می‌دهند. دلایل این امر را می‌توان به‌صورت زیر بیان کرد:

۱. چون این موتورها هم با بنزین و هم با گاز کار می‌کنند (نه به‌طور هم‌زمان) و به‌عبارتی دوسوخته هستند، نسبت تراکم آنها برای حالت بنزین‌سوز حفظ می‌شود، که این خود یکی از دلایل افت توان این موتورها در حالت گازسوز است.

۲. چگالی گاز بسیار کمتر از بنزین است، بنابراین گاز طبیعی نسبت به بنزین فضای بیشتری را اشغال می‌کند.

۳. ارزش حرارتی گاز طبیعی نسبت به بنزین در حالت استوکیومتری، کمتر است. این موضوع در جدول ۱۲ نشان داده شده‌است.

۴. سرعت احتراق در گاز طبیعی کمتر است که این امر باعث تغییر نقطهٔ MBT[۳۲] (بهترین زمان‌بندی جرقه به‌منظور حصول بالاترین گشتاور) می‌شود. پس اگر آوانس جرقه در موتورهای گازسوز تغییر نکند، حدود ۱۰٪ افت توان خواهیم داشت.

[32] - Minimum Advance for Best Torque

جدول ۱۲: مقایسه انرژی داخلی بنزین و CNG [۸].

	Petrol	CNG
Density [kg/m^3]	750	0.75-0.85
LHV (Hi) [MJ/m^3]	33	32-40
LHV (Hi) [MJ/kg]	44	40-50
Mixture heating value (stoich) [MJ/kg]	2.826	2.20-2.80
Mixture heating value (stoich) [MJ/m^3]	3.6738	3.25-3.45
Combustion limit [/]	0.7<lambda<1.15	0.9<lambda<1.6

بهبود بخشیدن به راندمان موتورهای بنزینی تبدیل‌شده با تغییرات ساده‌ای در این موتورها امکان‌پذیر است. به‌طور مثال تنظیم MBT و نسبت تراکم و استفاده از انژکتورهای گاز، از جملهٔ این تغییرات هستند. تنظیم MBT ساده‌ترین راه در بالا بردن راندمان است. در یک موتور گازسوز، درجه آوانس باید حدود ۷ تا ۱۸ درجه بیشتر باشد تا به شرایط موتور بنزینی برسد. دلیل این امر، سرعت احتراق پایین متان است، که باعث می‌شود زمان بیشتری برای رسیدن به قلهٔ فشار نیاز باشد. البته اثر منفی آوانس کردن، افزایش NO_x است.

بالا بردن نسبت تراکم، به افزایش توان و راندمان حرارتی می‌انجامد. چون عدد متان برای گاز طبیعی بالا است، این سوخت می‌تواند نسبت تراکمی تا حداکثر ۱۵ را تحمل کند. با این حال چون موتورهای بنزینی نمی‌توانند نسبت تراکم بالایی را تحمل کنند، تبدیل این موتورها با کاهش توان همراه خواهد بود. افزایش نسبت تراکم باعث بالارفتن آلاینده‌های NO_x و HC می‌شود.

استفاده از انژکتورهای گازی تأثیر زیادی در حالت گذرای[۳۳] موتور دارد. امروزه با افزایش طول منیفولدهای ورودی، کنترل حالت‌های گذرای موتورهای گازسوزی که با سیستم‌های

[33] - Transient

میکسری کار می‌کنند، بسیار مشکل شده‌است. با استفاده از انژکتور گاز، پاسخ حالت گذرای موتور بهبود می‌یابد.

۹-۶ راندمان موتورهای دیزل تبدیل‌شده به اختصاصاً گازسوز

توان خروجی از موتور دیزل تبدیل‌شده به گازسوز را می‌توان به همان اندازهٔ موتور دیزل رساند، به‌شرطی که تغییری در نسبت تراکم ایجاد نشود. اما به‌علت پدیدهٔ کوبش، نسبت تراکم این موتور باید به ۱۴ کاهش یابد (توجه کنید که در موتورهای دیزل تبدیل‌شده به‌علت وجود جرقه و ایجاد شعله، گاز زودتر به دمای خود اشتعالی خواهد رسید). بنابراین توان خروجی موتور گازسوز نسبت به دیزل کاهش می‌یابد. همچنین مصرف ویژهٔ سوخت نیز در موتور گازسوز افزایش می‌یابد.

عامل مهم دیگر، نسبت هوا به سوخت نسبی یعنی λ می‌باشد. راندمان موتور برای λهای واقع در محدودهٔ بین ۱/۰۵ تا ۱/۳۰ بیشینه است. متأسفانه در این محدوده مقدار NO_x خروجی افزایش می‌یابد.

علاوه بر تغییراتی که در موتور دیزل ایجاد می‌شود، تنظیم MBT و استفاده از سیستم انژکتور گاز می‌تواند راندمان این موتورها را افزایش دهد. در زمینهٔ بهینه‌کردن احتراق نیز می‌توان استراتژی‌های خاصی را به‌کار برد.

۱۰ موتورهای دوگانه‌سوز

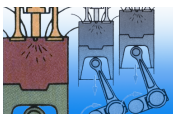
امروزه شمار روبه‌رشدی از خودروهای دوگانه‌سوز که سوخت مصرفی آنها گاز طبیعی و سوخت دیزل است، در سراسر دنیا مورد استفاده قرار می‌گیرند. این خودروها جایگزینی نسبتاً آسان و

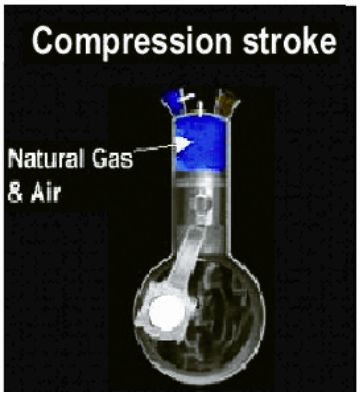
کم‌هزینه برای موتورهای دیزلی موجود که آلایندگی بالایی دارند، محسوب می‌شوند. میزان بازدهی این موتورها به استراتژی‌های موجود بر کنترل سوخت بستگی دارد. با این وجود کارآیی این موتورها در بسیاری از کشورهای دنیا معلوم گشته و سرمایه‌گذاری در این زمینه، به‌خصوص در مناطقی که آلایندگی سوخت دیزل مطرح باشد، در حال توسعه است.

اساس کار موتورهای دوگانه‌سوز، سیکل دیزل است و سوخت اصلی این موتورها گاز طبیعی می‌باشد. ولی طراحی آنها به‌گونه‌ای است که از سوخت دیزل به‌عنوان سوخت کمکی برای شروع احتراق گاز استفاده می‌نماید (شماتیکی از چهار مرحلهٔ کار یک موتور دوگانه‌سوز، درشکل ۱۷ نشان داده شده‌است).

اساس احتراق در این موتورها گرمای حاصل از تراکم است و این موتورها دارای شمع نمی‌باشند. این موتورها همچنین می‌توانند تنها با سوخت دیزل (بدون گاز طبیعی) کار کنند. موتور در هنگام استارت و در حالت بار سبک باید با سوخت دیزل کار کند (زیرا مخلوط هوا و سوخت گازی در این حالت بسیار رقیق است و امکان انتشار شعله در این مخلوط وجود ندارد). هنگامی‌که خودرو شروع به حرکت می‌کند با زیاد شدن بار اعمالی بر موتور نسبت گاز طبیعی به سوخت دیزل افزایش می‌یابد تا آنجا که این نسبت به ۸۰ ٪ و بیشتر نیز می‌رسد (شکل ۱۸).

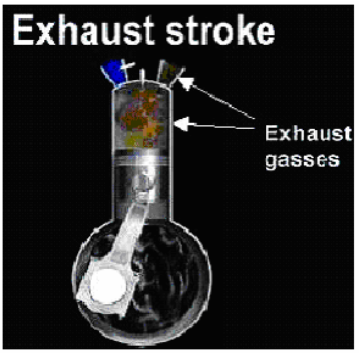
برخی از موتورهای دوگانه‌سوز، دریچهٔ گاز دارند و در مواقع نیاز به سرعت‌های بالاتر میزان گاز طبیعی را افزایش می‌دهند. در برخی دیگر از موتورهای دوگانه‌سوز، نسبت بهینهٔ گاز و سوخت دیزل با توجه به عملکرد و بار موتور، توسط کامپیوتر کنترل می‌شود. عملکرد و آلایندگی این موتورها، بسته به شرایط کاری و کارآمدی سیستم کنترل متفاوت می‌باشد، ولی عموماً از میزان آلایندگی بسیار کمتری در مقایسه با موتورهای دیزل، به‌خصوص از لحاظ NO_x و ذرات معلق، برخوردار می‌باشند.



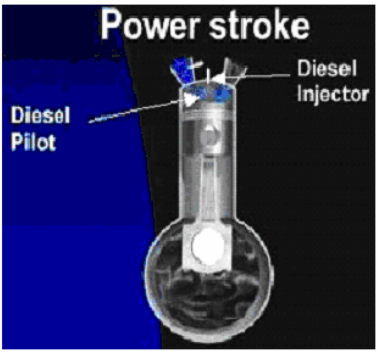


ب: مرحلهٔ تراکم

الف: مرحلهٔ تراکم



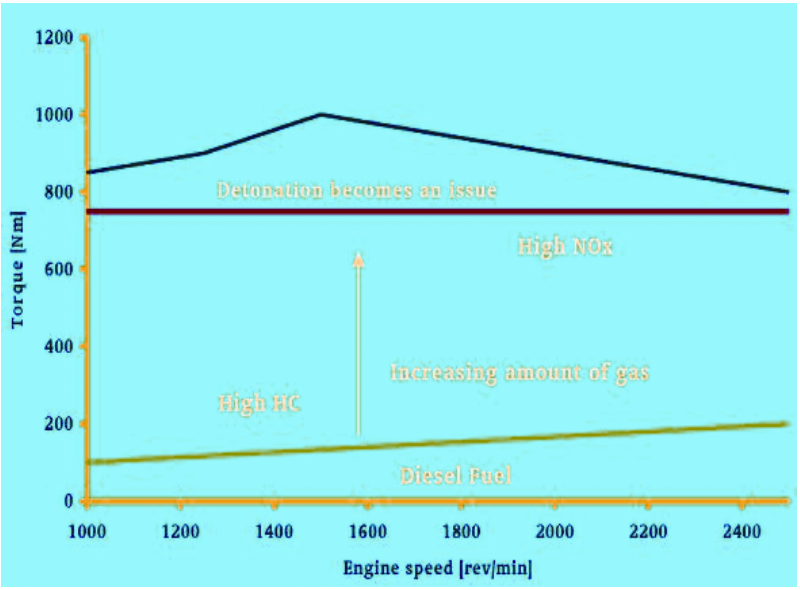
د: مرحلهٔ تخلیه



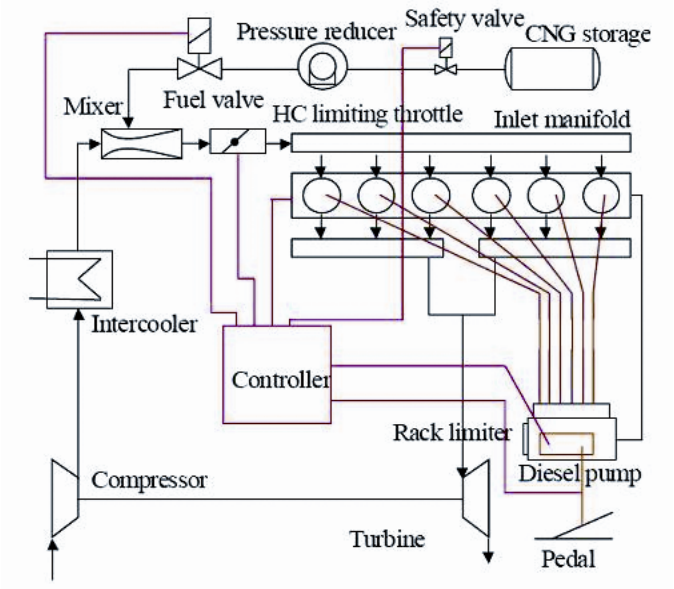
ج: مرحلهٔ احتراق

شکل ۱۷: چهار مرحله کار یک موتور دوگانه‌سوز

تبدیل موتور دیزل به موتور دوگانه‌سوز نسبتاً ساده می‌باشد. زیرا تغییراتی در نسبت تراکم، سرسیلندرها یا در سیکل کاری که موتور دیزل براساس آن کار می‌کند، صورت نمی‌پذیرد. حتی تکنولوژی سیستم کنترل کامپیوتری دوگانه‌سوز این موتورها به‌گونه‌ای در حال توسعه است که این سیستم را بتوان براحتی از موتور جدا نموده تا موتور به یک موتور دیزل معمولی تبدیل گردد. در شکل ۱۹ شمای کلی این موتورها نشان داده‌شده است.



شکل ۱۸: اثر افزایش مقدار گاز طبیعی در موتورهای دوگانه‌سوز



شکل ۱۹: شمای کلی از یک موتور دوگانه‌سوز

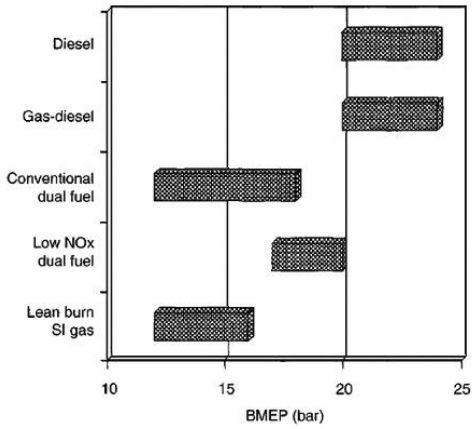
۱۰-۱ کاربرد موتورهای دوگانه‌سوز

استفاده از موتورهای دوگانه‌سوز در بسیاری از نقاط دنیا در حال توسعه می‌باشد. پرهزینه‌ترین و کارآمدترین سیستم‌های کنترل کامپیوتری این موتورها در آمریکای شمالی و استرالیا در حال معرفی است و در اروپا نیز این سیستم‌ها در حال آزمایش برای ورود به بازار می‌باشند. ولی استفاده از آنها در دیگر نقاط دنیا مانند آمریکای لاتین، هند، پاکستان، چین و دیگر قسمت‌های آسیا در حال توسعه می‌باشد و از این موتورها بیشتر در اتوبوس‌ها و ماشین‌های سنگین استفاده می‌کنند. ولی در موتور خودروهای دیزلی سواری نیز می‌توانند کارآیی داشته باشند. درنهایت مزایای موتورهای دوگانه‌سوز را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه نمود:

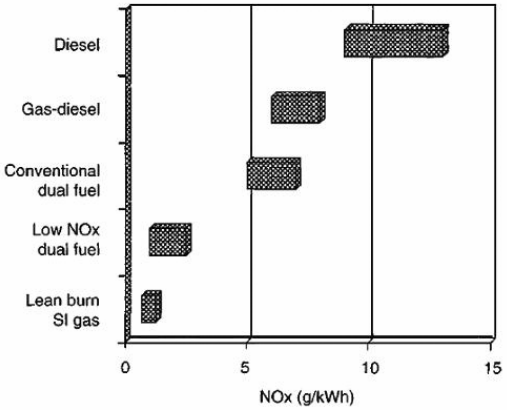
۱. تولید دود و ذرات معلق کمتر
۲. امکان تغییر وضعیت به حالت دیزل و استفاده از قدرت موتور دیزل
۳. عدم نیاز به اصلاحات در اجزای داخلی موتور
۴. هزینهٔ کمتر سوخت مصرفی
۵. گشتاور بالاتر موتور

۱۰-۲ سیستم‌های احتراق در موتورهای دوگانه‌سوز

به‌طور کلی سه نوع سیستم احتراق در موتورهای دوگانه‌سوز استفاده می‌شود. هرکدام از این سیستم‌ها نسبت به سیستم‌های دیگر دارای مزایا و معایبی می‌باشند. در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ عملکرد این طرح‌ها از نظر BMEP وآلایندهٔ NO_X با موتورهای دیزلی و SI مشابه مقایسه شده‌است.



شکل ۲۰: مقدار BMEP متداول برای برخی از موتورها [۳].



شکل ۲۱: مقدار NOx متداول برای برخی از موتورها [۳].

۱۰-۲-۱ موتورهای دوگانه‌سوز معمولی

اولین موتورهای دوگانه‌سوز، از نوع مکش طبیعی بودند و گاز به‌وسیله کاربراتور با هوا ترکیب می‌شد. اما موتورهای دوگانه‌سوز امروزی، از توربوشارژر استفاده می‌کنند و گاز درون راهگاه ورودی تزریق می‌شود. فشار تزریق گاز باید اندکی بالاتر از فشار مکش هوا باشد. بنابراین فشار

تقریبی تزریق درحدود bar ۵-۳ می‌باشد. برای تبدیل یک موتور دوگانه‌سوز، سیستم تزریق به‌جز اصلاحاتی که ممکن است روی پمپ انژکتور و شکل نازل‌ها ایجاد شود، احتیاج به تغییر خاصی ندارد. با توجه به ترکیب گاز مورد استفاده، نسبت تراکم ممکن است پایین‌تر بیاید تا پدیدهٔ کوبش اتفاق نیفتد. اما این مقدار نباید تا حدی باشد که خاصیت خود اشتعالی گازوئیل بی‌اثر شود. کمترین نسبت تراکم درحدود ۱۱ تا ۱۲ می‌باشد. حداکثر قدرت خروجی معمولاً ۱۰ تا ۲۰ درصد کمتر از موتور دیزل مشابه می‌باشد. این کاهش با خاصیت کوبش سوخت محدود می‌شود و به عدد متان گاز بستگی دارد.

در بارهای کم و هنگام راه‌اندازی، موتور روی سوخت گازوئیل کار می‌کند و هنگامی‌که نیاز به قدرت بیشتری می‌باشد، میزان سوخت گازوئیل کمتر شده (که تقریباً برابر حالت کارکرد درجا یا حتی کمتر از آن) و توان اضافی مورد نیاز با غنی کردن مخلوط ورودی (افزایش مقدار گاز) تـأمین می‌گردد. در این مرحله کاهش قدرت موتور نیز با رقیق کردن مخلوط ورودی (کاهش مقدار گاز) صورت می‌گیرد. برای ثابت نگه‌داشتن نسبت هم‌ارزی نیاز است تا یک کنترل‌کننده بر اساس دمای اگزوز خروجی تعبیه گردد.

نهایتاً مخلوط هوا و گاز توسط یک افشانهٔ کاملاً اتمیزه شدهٔ سوخت دیزل، که حدود ۵ تا ۸ درصد سوخت در حالت بار کامل را شامل می‌شود، مشتعل می‌گردد. با تنظیم سیستم کنترلی حاکم، می‌توان کاری کرد که موتور در حالت بار کامل هم به‌صورت یک موتور دوگانه‌سوز کار کند یا این‌که فقط سوخت دیزل مصرف کند. همچنین اگر گاز تمام شده باشد می‌توان موتور را روی سوخت دیزل تنظیم کرد که در این‌صورت موتور به یک موتور دیزل کامل تبدیل می‌شود. این امر بسیار مهم است زیرا در موتورهای دوگانه‌سوز ممکن است که مخزن گاز، تخلیه گردد و موتور روی سوخت گازوئیل به‌تنهایی به حرکت ادامه دهد. از آن جایی که این موتورها معمولاً

توربوشارژ هستند، نسبت هم‌ارزی در حدود ۰/۶ نگه داشته می‌شود تا از کاهش قدرت در اثر کوبش جلوگیری شود.

۱۰-۲-۲ موتورهای دوگانه‌سوز با آلایندگی NO_x کم

موتورهای دوگانه‌سوز با آلایندگی NO_x کم[۳۴] رقیق‌سوز می‌باشند (موتورهایی که در آنها نسبت هم‌ارزی کم است) و به‌علت پایین بودن دمای بیشینهٔ احتراق، دارای NO_x کمتری نسبت به موتورهای دیزل می‌باشند. در حالت دوگانه‌سوز، مقدار NO_x ایجاد شده بستگی به مقدار گازوئیل پیلوت دارد. بنابراین میزان آلاینده NO_x تولیدی درموتورهای دوگانه‌سوز بین موتورهای دیزل و بنزین رقیق‌سوز قرار می‌گیرد. اما دستیابی به NO_x خیلی کم نیازمند آن است که نسبت هم‌ارزی بسیار پایین (درحدود ۰/۴) باشد. کم شدن نسبت هم‌ارزی به‌معنای نیاز بیشتر به انرژی پیلوت (گازوئیل)، برای ایجاد احتراق مناسب و خوداشتعالی است. اما افزایش مصرف سوخت پیلوت (گازوئیل) به مفهوم افزایش NO_x می‌باشد. امروزه بعضی از شرکت‌های موتورسازی، سیستم‌هایی طراحی کرده‌اند که طی آن مصرف سوخت پیلوت بسیار کم می‌باشد. که باعث کاهش آلایندهٔ NO_x شده‌است.

همان‌طور که بیان شد، برای داشتن یک احتراق کامل و مطمئن، حداقل ۵٪ سوخت در حالت بار کامل به‌عنوان سوخت پیلوت نیاز می‌باشد. اما اگر سیستم تزریق سوخت پیلوت را جدا کنیم و آن را برای موتور بهینه نماییم، می‌توان این میزان را تا حدود ۲٪ کاهش داد که این مطلب به‌طور چشم‌گیری در کاهش NO_x، مؤثر می‌باشد. بهینه‌کردن پاشش سوخت پیلوت به‌معنای بالا بردن فشار تزریق و کاهش قطر سوراخ انژکتورها می‌باشد که باعث بالا رفتن قدرت

[34] - Low NO_x Dual Fuel Engines

نفوذ و اتمیزه شدن سوخت می‌باشد. درنتیجه یک سوخت پرانرژی مناسب درکل محفظهٔ احتراق آمادگی اشتعال خواهد داشت.

حتی می‌توان میزان سوخت پیلوت را از ۱ درصد نیز کمتر نمود. این کار با تزریق سوخت در یک پیش‌محفظه صورت می‌گیرد. با این کار، میزان انرژی احتراق در دسترس تقویت می‌شود و درنتیجه به سوخت پیلوت کمی برای انجام احتراق نیاز می‌باشد. با کنترل مناسب سوخت پیلوت و طراحی بهینهٔ محفظه احتراق، می‌توان به نسبت هم‌ارزی حدود ۰/۴ یا کمتر نیز دست یافت.

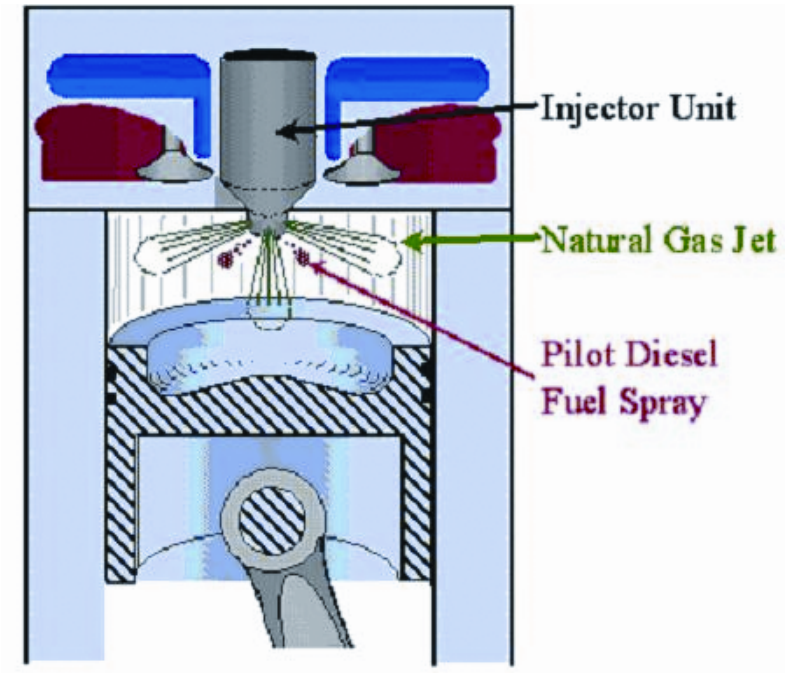
۱۰-۲-۳ موتورهای دوگانه‌سوز با پاشش مستقیم

از دیگر سیستم‌هایی که در آن از گاز طبیعی در موتورهای دیزل استفاده می‌شود، موتور دوگانه‌سوز با پاشش مستقیم می‌باشد که در آنها گاز و سوخت پیلوت (آتش‌زنه) به‌طور مستقیم و توأم به‌داخل سیلندر توسط انژکتور تزریق می‌شوند (شکل ۲۲). اگرچه مفهوم طراحی این موتورها ساده می‌باشد، اما در عمل این موتورها با مشکلات و پیچیدگی‌های خاص خود همراه هستند. اخیراً در برخی مراجع مانند مرجع [۳] به این نوع موتور دوگانه‌سوز، "دیزل- گاز" اطلاق می‌شود.

سوخت گازوئیل پیلوت برای شروع عمل احتراق، همانند موتورهای دوگانه‌سوز معمولی به داخل سیلندر تزریق می‌شود. مقدار سوخت پیلوت تزریق‌شده لازم در حدود ۳ تا ۵ درصد می‌باشد. میزان NO_x تولید شده همانند موتورهای دوگانه‌سوز می‌باشد. از آن‌جاکه احتراق در این موتورها از نوع پخشی[۳۵] است و نه پیش‌آمیخته، مشکلاتی مانند کوبش و کنترل نسبت هوا

[35] - Diffusion

به سوخت در حالت بار جزئی[۳۶] تا حد زیادی خودبه‌خود مرتفع شده‌است. همچنین راندمان بار جزئی و قدرت (BMEP) حالت تمام بار با تغییر وضعیت موتور از دیزل به دوگانه‌سوز با پاشش مستقیم تا حد زیادی بدون تغییر باقی می‌ماند و به تغییرات کیفیت گاز حساس نمی‌باشد. شکل ۲۲ نحوهٔ پاشش گاز و گازوئیل را در داخل سیلندر نشان می‌دهد. باید این مسأله را درنظر داشت که کیفیت گاز مصرفی در موتورهای دوگانه‌سوز با پاشش مستقیم تأثیر بیشتری بر راندمان، نسبت به موتورهای دوگانه‌سوز معمولی دارد.



شکل ۲۲: نحوهٔ پاشش گاز و گازوئیل در داخل سیلندر

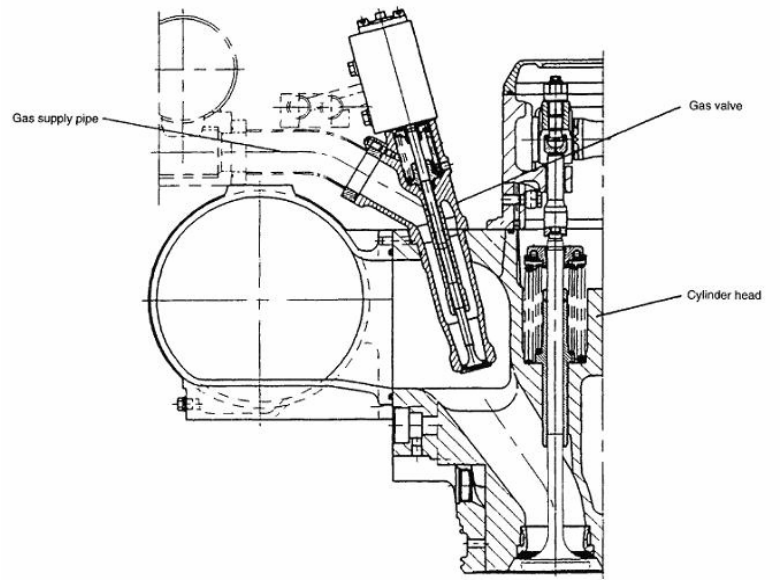
[36] - Part Load

اما این نوع سیستم بدون مشکل هم نخواهد بود. تزریق مستقیم گاز داخل محفظهٔ احتراق نیازمند آن است که فشار پاشش خیلی بالا باشد (در حدود bar ۳۵۰-۲۵۰). این موضوع دارای تبعاتی است که برخی از آن‌ها عبارتند از:

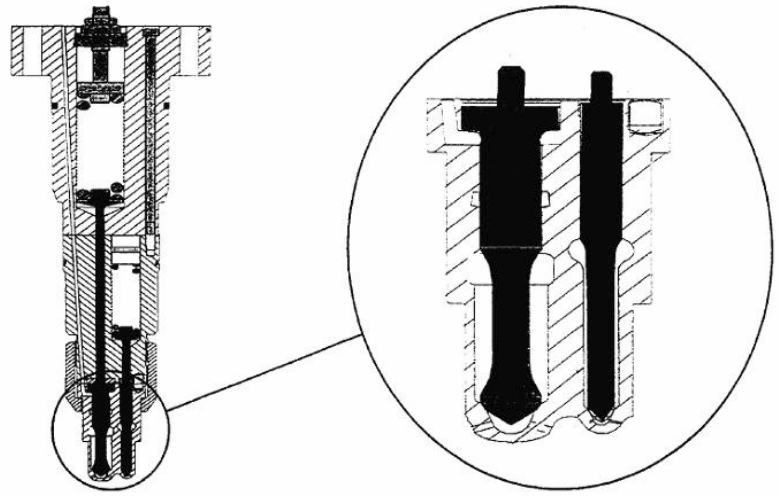
۱. هزینهٔ کمپرسور مورد نیاز برای پاشش سوخت بسیار زیاد خواهد شد که قسمت عمدهٔ افزایش قیمت این‌گونه موتورها از همین امر ناشی می‌شود.
۲. برای به حرکت درآوردن این کمپرسور، چیزی حدود ۵٪ از قدرت موتور صرف می‌شود.
۳. سیستم ایمنی لازم برای این کمپرسور بسیار پرهزینه می‌باشد.
۴. قدرت خروجی و راندمان بیشتر این موتور باعث بالا رفتن قیمت آن می‌گردد.

اما عملاً در مناطقی که سوخت گاز بمراتب ارزان‌تر از سوخت گازوئیل می‌باشد، ساخت این‌گونه موتورها مقرون به‌صرفه خواهد بود. برای تزریق گاز و گازوئیل از انژکتور استفاده می‌شود. یک نمونه از این انژکتورها با نازل دوگانه (برای پاشش هم‌زمان گاز و گازوئیل) و موقعیت قرارگیری آن در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ مشاهده می‌گردد.

تزریق گاز توسط یک مدار الکترونیکی کنترل می‌گردد. این کنترل‌کننده فرمان خود را به یک شیر هیدرولیکی می‌فرستد تا عمل مورد نظر که همان باز و بسته شدن شیر می‌باشد صورت گیرد. نازل مخصوص گازوئیل نیز به‌گونه‌ای طراحی شده‌است که هم مقادیر کم سوخت پیلوت را به‌صورت مناسبی اتمیزه کرده و قطرات آن به اندازه مناسب درآورد، هم این‌که برای حالت تمام بار با سوخت دیزل، کارایی مناسب را داشته باشد.



شکل ۲۳: موقعیت قرارگیری شیر هیدرولیکی گاز [۳].



شکل ۲۴: انژکتور دوگانه تزریق کننده گاز و سوخت مایع [۳].

۱۱ نتیجه‌گیری

برای درک مفاهیم مرتبط با موتورهای احتراق داخلی گازسوز و مسألهٔ احتراق گاز طبیعی می‌بایست طیف گسترده‌ای از مسائل را مورد توجه و بررسی قرار داد. در این مجموعه سعی شده تا به برخی از این نکات که از اهمیت بیشتری برخوردار هستند، به‌صورت مختصر اشاره شود. بعلاوه در مورد خواص سوخت گاز طبیعی نیز به‌صورت اجمالی نکاتی مطرح گردید. از آنجا که مسائل مربوط به آلودگی ناشی از موتورهای گازسوز، به‌صورت مشروح در مجموعهٔ مربوط به آلودگی مورد بحث قرار گرفته است، در اینجا فقط به‌صورت کوتاه به این مطلب پرداخته شده‌است.

کیفیت گاز طبیعی مورد استفاده در خودروهای گازسوز نیز می‌بایست مورد توجه دقیق قرار گیرد. به‌عنوان مثال، وجود درصد بالای رطوبت و گوگرد در گاز طبیعی موجب تخریب سریع سیستم گازسوز خواهد شد. ذکر این نکته ضروری است که باید از گاز طبیعی در خودروها به بهترین نحو استفاده شود. استفاده از گاز طبیعی در خودروهایی با موتورهای با نسبت تراکم کمتر از ۱۰ (درحالی‌که برای گاز طبیعی این نسبت می‌تواند تا ۱۴ افزایش یابد) حقیقتاً به‌معنی اسراف این گاز می‌باشد. در آینده بهتر است موتورهای دوسوختهٔ خودروهای گازسوز بر پایهٔ سوخت گاز طراحی شوند که راننده اکراه داشته باشد با سوخت بنزین کار کند، مگر در مواردی که برای رسیدن به ایستگاه‌های سوخت‌گیری CNG، احتیاج به سوخت بنزین داشته باشد.

معمولاً خودروهای گازسوز دو مشکل مهم افت توان و برد کم را دارند. به مسألهٔ افت توان در این مجموعه به‌طور کامل پرداخته شده‌است. امروزه با توسعهٔ تکنولوژی‌های جدید در صنعت موتورهای احتراق داخلی، این مشکل به‌طور کامل رفع شده‌است. مشکل دوم که برد کم

این‌گونه خودروها می‌باشد، با توسعهٔ تکنولوژی‌های جدید در ذخیره‌سازی سوخت و مخازن، درحال رفع شدن است و استفاده از این‌گونه خودروها دیگر با این مشکلات همراه نخواهد بود.

با توجه به فراوانی گاز طبیعی در کشور ما، گازسوز کردن خودروها، مخصوصاً برای خودروهای حمل و نقل عمومی، مزایای زیادی را در بر دارد. گازسوز کردن خودروهای موجود با استفاده از کیت تبدیل، امکان‌پذیر می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که در کشور ما، در حال حاضر تولید موتورهای گازسوز اکثراً به‌صورت تبدیل می‌باشد. برای بهره‌برداری از مزایای فراوان گازسوز کردن خودروها، می‌بایست هنگام تبدیل، اصول فنی و علمی تبدیل را مورد توجه قرار داد. برای حصول به این هدف علاوه بر نیاز به بالا بردن آگاهی عمومی و ارتقای فرهنگ جامعه، نیاز است تا اهرم‌ها و بسترهای لازم جهت کنترل کیفیت تولیدات مرتبط با صنعت گازسوز کردن خودروها، ایجاد شود.

مراجع

[1] Heywood, J. B., *Internal Combustion Engine Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 1988.

[2] Guibet, J.-C., Faure-Birchem, E., *Fuels and Engines*, Vol. 2, Revised Edition, Editions Technip, Paris, 1999.

[3] *Diesel Engine Reference Book*, Second Edition, Edited by B. Challen, R. Baranescu, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1999.

[4] Duan, S., Y., "Laboratory Experience with the Use of Natural Gas Fuel in IC Engines," IMechE Seminar: *Using Natural Gas in Engines*, Organized by the Combustion Engine Group of the Institution of Mechanical Engineers, IMechE Seminar Publication, 28 March 1996.

[5] Erjavec, J., *Automotive Technology, A Systems Approach*, 3rd Edition, Delmar, USA, 2000.

[6] *Automotive Handbook*, 4th Edition, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, 1996.

[7] Stone, R., *Introduction to Internal Combustion Engines*, 3rd Edition, Macmillan Press LTD, London, 1999.

[8] Tartarini CNG Training course, Nov., 2003.

[9] Stephenson, J., "Position Paper on Natural Gas Vehicles," IANGV, 1997.

[10] Http://www.dualcurve.com/56531.htm.

[۱۱] میرسلیم، سید مصطفی، جوادی راد، قاسم، غلامی فرد، حامد، حامدی، رحمت ا...، "ارزیابی فنی و اقتصادی موتورهای دوگانه‌سوز (دیزل-گازطبیعی) با پرخوران و دور متوسط" مجموعه مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده (CNG)، ۱۳۸۱.

[۱۲] پیروزپناه، وهاب، موسی‌زاده، مهدی، فیروزگان، علیرضا، رستمی، محمدرضا،"بررسی عملکرد، آلایندگی و مصرف سوخت در انواع مختلف خودروهای گاز طبیعی‌سوز" دومین همایش بین‌المللی موتورهای درون‌سوز، ۱۳۸۰.

[۱۳] پیروزپناه، وهاب، میرسلیم، سید مصطفی، جیحونی، یوسف، افقهی، سید محمد،"کاهش آلایندگی موتور دیزل OM-355 تا حد استاندارد EUROII با تبدیل به موتور گازسوز (دیزل + گاز طبیعی)"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده (CNG)، ۱۳۸۱.

[۱۴] جزایری، سید علی، ابراهیمی، رضا، موسویان، سید علیرضا،"بررسی عملکرد و آلایندگی تبدیل سوخت خودروهای سبک بنزینی به اختصاصاً گاز طبیعی‌سوز و دوسوخته گاز و بنزین"، مجموعه مقالات اولین کنفرانس تبدیل سوخت خودروها به گاز طبیعی فشرده (CNG)، ۱۳۸۱.

[۱۵] سهرابی، احمد علی، جزوهٔ درس موتورهای احتراق داخلی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکدهٔ مکانیک، ۱۳۸۲.

واژه‌نامه فارسی- انگلیسی

آ

آشفتگی	Turbulence
آوانس	Advance

ا

اتاقک فرعی	Prechamber
ارزش حرارتی خالص	Net Heating Value (NHV)
ارزش حرارتی پائینی	Lower Heating Value (LHV)
ارزش حرارتی کلی	Gross Heating Value (GHV)
ارزش حرارتی بالایی	Higher Heating Value (HHV)
اشتعال جرقه‌ای	Spark Ignition
انفجار ضربه‌ای	Detonation

ب

بار حرارتی	Thermal Load
بار جزئی	Part Load
بار کامل	Full Load
بازخورانی گازهای خروجی	Exhaust Gas Recirculation
بالادست	Upstream

پ

پاشش نوبتی	Injection Sequential
پرخورانی	Supercharging
پیش اشتعال	Preignition
پیش‌آمیخته	Premixed

ت

تبدیل	Conversion
تخلیه آنی	Blow Down
تمایل به پیش اشتعالی	Pre-Ignition Tendency
توان احتراقی	Combustive Power

ج

جریان خفه	Chocking Flow
جبهه شعله	Flame Front

چ

چرخه فشار ثابت	Constant Pressure Cycle

ح

حجم ثابت	Constant Volume
حسگر	Sensor

خ

خنک‌کن‌میانی	Inter Cooler
خواص ضد کوبش	Anti-Knock Properties
خود اشتعالی	Auto-ignition

د

دمای مکش	Intake Temperature
دمای مکش	Intake Temperature
دمای مکش	Intake Temperature
دور موتور	Engine Speed
دوسوخته	Bifuel
دوگانه‌سوز	Dual Fuel

ر

راندمان حرارتی	Thermal Efficiency
راهگاه ورودی	Intake Port
رقیق‌سوز	Lean Burn

س

سرعت شعله	Flame Speed
حسگر لاندا	Lambda Sensor
حسگر لاندا	Lambda Probe
سوپاپ دود	Exhaust Valve
سوپاپ ورودی	Intake Valve
سوخت پیلوت (آتش‌زنه)	Pilot Fuel
سیستم خنک‌کاری	Cooling System
سیستم جرقه	Ignition System
سیستم‌های کاربراتوری	Carburetor Systems
سیستم‌های تک نقطه‌ای یا میکسری	Single-Point or Mixer Systems
سیستم‌های چند نقطه‌ای پاشش سوخت	Multipoint Fuel Injection Systems
سیستم‌های پاشش مستقیم سوخت	Direct Fuel Injection Systems
سیکل SI	Spark Ignition Cycle
سیکل استاندارد هوایی اتو	Standard Otto Air Cycle
سیکل استاندارد هوایی دیزل	Standard Diesel Air Cycle

ش

شاخص وب	Wobbe Index
شکل محفظهٔ احتراق	Combustion Chamber Shape
شعله آرام	Laminar Flame

ع

عدد اکتان	Octane Number
عدد متان	Methane Number

ف

فشار موثر متوسط ترمزی	Brake Mean Effective Pressure (BMEP)

ق

قطر سیلند	Bore

ک

کاتالیست سه‌منظوره	3-way Catalyst
کارکرد حالت گذرا	Transient Operation
کوبش	Knock

گ

گاز طبیعی کم‌انرژی	Low-energy Gas
گازهای خنثی	Inert Gas

ل

لقی سوپاپ	Valve Play

م

ارزش حرارتی	Heating Value
محفظهٔ احتراق	Combustion Chamber
مدار بسته	Closed-Loop
مصرف سوخت ویژه	Specific Fuel Consumption
موتور چهار زمانه	Four Stroke Engine
موتورهای بنزینی تبدیل‌شده	Engines Converted from SI
موتورهای کم NO_x	Low NO_x Engines
موتورهای دیزل– گاز	Gas-Diesel Engines

موتور اشتعال جرقه‌ای (SI)	Spark Ignition Engine

ن

نسبت تراکم	Compression Ratio
نسبت هم‌ارزی	Equivalence Ratio
نسبت هوا به سوخت	Air-Fuel Ratio
نقاط داغ	Hot Spots
نقطه MBT	Minimum Advance for Best Torque

و

ونتوری	Venturi

ه

هزینهٔ انتقال	Transportation Cost
هزینهٔ تولید	Production Cost
هزینهٔ پالایش	Refining Cost
هزینهٔ توزیع	Distribution Cost
هزینهٔ فشرده کردن	Compression Cost