مجله پژوهش و کاربرد در مکانیک دوره ۱۲ شماره ۴ سال ۱۴۰۱ (۲۰۲۲) ۷۶-۶۳

کاهش آلایندگی خودرو با به کار گیری تجهیزات اضافی (سوپرشارژر، توربوشارژر، EGR و SCR)

نیما راسخ صالح

[۱و۲]استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، واحد تهران شرق، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران،

کد پستی ۱۸۶۶۱۱۳۱۱۸

Nima_Saleh20@yahoo.com

چکیده

در این مقاله به کابرد تجهیزات اضافی برای کاهش آلایندگی موتورهای احتراق داخلی ICE[1] خودروها پرداخته شده است. برای این منظور چهار مورد از مهم‌ترین تجهیزات کاهنده آلودگی، شامل سوپرشارژر[۲]، توربوشارژر[۳]، سیستم بازخورانی گاز های خروجی EGR [۴]و سیستم کاهش آلایندگی کاتالیزوری انتخاب کننده SCR[۵] پرداخته شده است. عملکرد کلی هر یک از سیستم‌ها و اجزای هر یک تشریح شده است.

واژگان کلیدی: سوپرشارژر، توربوشارژر، اینترکولر، افترکولر، EGR و SCR

۱. مقدمه

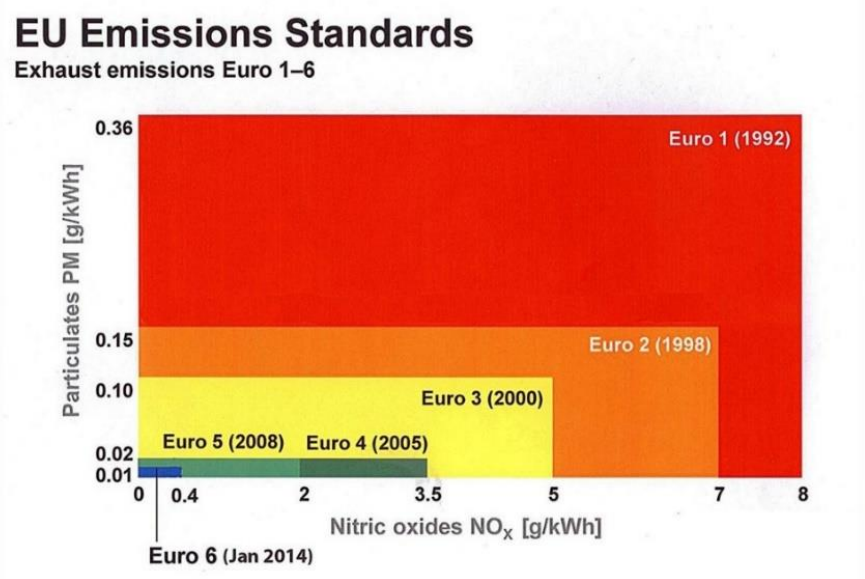
کاهش آلایندگی خودروها امروزه یک ضرورت است به گونه‌ای که استانداردهای آلایندگی تنها به خودروهایی اجازه تولید و تردد می‌دهند که استانداردها را رعایت نمایند. اگرچه برخی کشورها از استانداردهای آلایندگی‌ای که خود تدوین نموده‌اند استفاده می‌کنند، اما غالب کشورها از استانداردهای یورو[۶] پیروی می‌کنند. استاندارد اروپایی یورو در حقیقت بیانگر حد مجاز آلایندگی های خودروها می‌باشد که با پیشرفت فناوری، تا کنون ۶ نسل

---

1 Internal Combustion Engine
2 Supercharger
3 Turbocharger
4 Exhaust Gas Recirculation System
5 Selective Catalytic Reduction
6 Euro

از آن طبق جدول زیر ارایه شده که با بالا رفتن نسل، میزان مجاز آلایندگی های خودروها در هر نسل به شدت نسبت به نسل قبل کاهش می‌یابد

در شکل زیر، میزان حداکثرآلایندگی مجاز اکسیدهای نیتروژن و ذرات معلق[1] منتشره از موتور احتراقی بر حسب استاندارد های یورو نشان داده شده است. حداکثر مقادیر مجاز آلایندگی بر حسب «گرم بر کیلو وات ساعت» توان تولیدی اندیکاتوری خودرو در استانداردهای یورو۱ تا یورو۶ مقایسه شده‌اند.



شکل ۱. میزان حداکثرآلایندگی مجاز NO_x و PM از موتور احتراقی بر حسب استاندارد های یورو [1]

استاندارد آلایندگی یورو ۶ یک الزام قانونی را برای تولید کننده خودرو تعیین می کند که میانگین انتشار CO_2 کمتر از ۹۸ گرم در کیلومتر باشد. استاندارد یورو ۶ به ویژه بر محدود کردن انتشار NOx دیزل تمرکز دارد که همراه با ذرات معلق (PM)، از خطرناک ترین انتشارات در نظر گرفته می شود. همچنین استاندارد یورو هم برای خودرو های بنزینی و هم برای خودرو های دیزلی تعریف می شود [1].

بر اساس این توضیحات در خصوص لزوم کاهش آلایندگی‌ها، در این مقاله به معرفی مهم‌ترین تجهیزات اضافی[2] کاهنده آلودگی، شامل ۱-سوپرشارژر، ۲-توربوشارژر، ۳-سیستم بازخورانی گاز های خروجی EGR و ۴- کاهش آلایندگی کاتالیزوری انتخاب کننده پرداخته شده است.

این سیستم‌ها به قدری دارای اهمیت‌اند که تحقیقات متعدد برای بهبود کارایی آن‌ها با سرمایه‌گذاری‌های مختلف در جریان است. برای نمونه، در آخرین تحقیقات کاربردی Huichao Shang و همکاران، به مطالعه بر روی تطبیق

1 Particle Matters
2 Redundant

عددی سوپرشارژر موتور بنزینی بر اساس روش شرایط کاری سه خطی پرداخته‌اند [2]. Liu و همکاران در تحقیقی تجربی، به طراحی و بررسی تجربی یک توربوشارژر پشتیبان یاتاقان گازی شیاردار پرداخته‌اند[3] . Abd-Alla در تحقیقی کاربردی، بررسی سیستم‌های EGR را ارائه نمود که در آن به تجزیه و تحلیل دقیق نتایج قبلی و فعلی اثرات EGR بر انتشار و عملکرد موتورهای دیزل، موتورهای جرقه زنی و موتورهای سوخت دوگانه پرداخته شده است [4]. Thakar به بررسی تجربی برای بررسی ویژگی‌های احتراق و انتشار موتور دیزل با استفاده از EGR و هوای ورودی گرم شده پرداخته است [5]. Wu و همکاران در مقاله‌ای مروری، مکانیزم، عملکرد و روش‌های اصلاح کاتالیزورهای NH3-SCR را ارائه نمودند [6].

۲. روش کار

روش انجام کار، تحلیل کیفی بوده که از روش فراتحلیل ذیل تحلیل مضمون[1] به مکانیزم، عملکرد و اجزای هر یک از تجهیزات اساسی کاهنده آلاینده در موتورهای احتراق داخلی دستیابی صورت گرفته است.

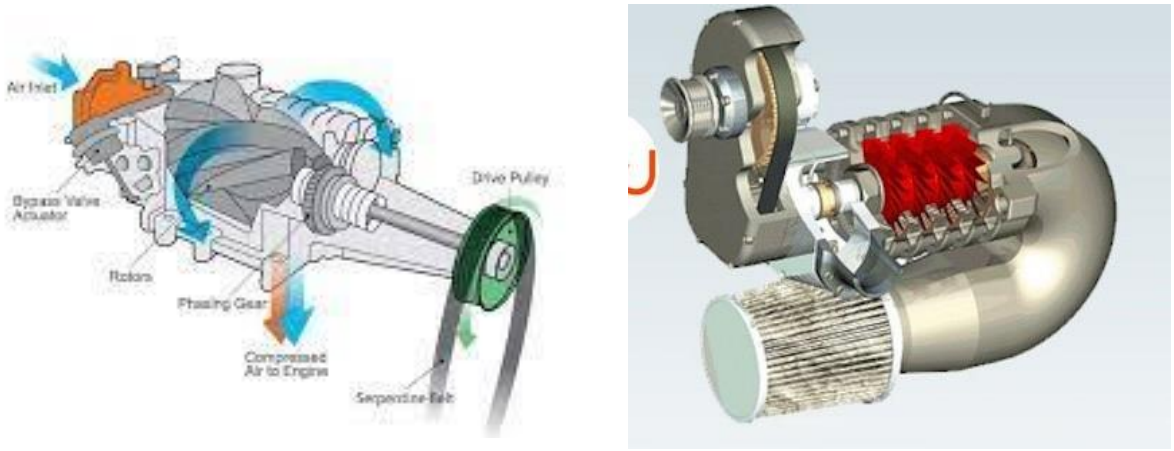
۲-۱- سوپرشارژر و توربوشارژر خودروها

در بسیاری از موتورهای جدید برای بالابردن راندمان عملکرد موتور، علاوه بر هوادهی طبیعی، از یک عامل خارجی دیگر موسوم به سیستم پرخوران نیز برای ورود هوای بیشتر به داخل سیلندر استفاده می‌کنند. با این کار می‌توان راندمان حجمی موتور را افزایش داد.از روش‌های مکمل که برای پرخورانی موتور و به تبع کاهش آلایندگی گازهای خروجی از اگزوز استفاده می‌شود، استفاده از توربو شارژر و سوپر شارژر در موتورها است.

سوپر شارژ یک کمپرسور هوا است که توان مورد نیاز خود را از سر میل‌لنگ گرفته و هوای فشرده را به داخل سیلندر هدایت می‌کند. سوپر شارژ نیروی خود را از میل‌لنگ گرفته و باعث اتلاف انرژی و قدرت موتور می‌شود ولی با ایجاد هوای ورودی اضافی برای موتور، باعث شرایط احتراقی نزدیک به احتراق کامل شده و به همین سبب کاهش آلایندگی گازهای ناقص احتراقی مانند CO را نتیجه خواهد داد. البته توربوشارژر برای خودروهای تجاری رده سنگین و خودروهای تجاری سنگین به کار می‌رود [7].

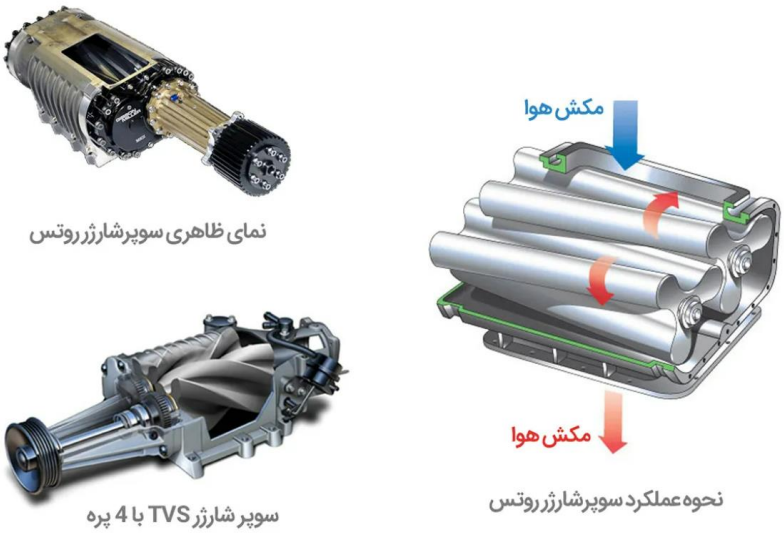
سوپرشارژ دارای مدل‌های مختلفی است که متداول ترین آنها سوپر شارژ گریز از مرکز(سانتریفیوژ)، سوپر شارژ روتس و سوپر شارژ مارپیچی اشاره نمود.

1 Thematic analysis



شکل ۲. دو نوع سوپر شارژر متداول [8]

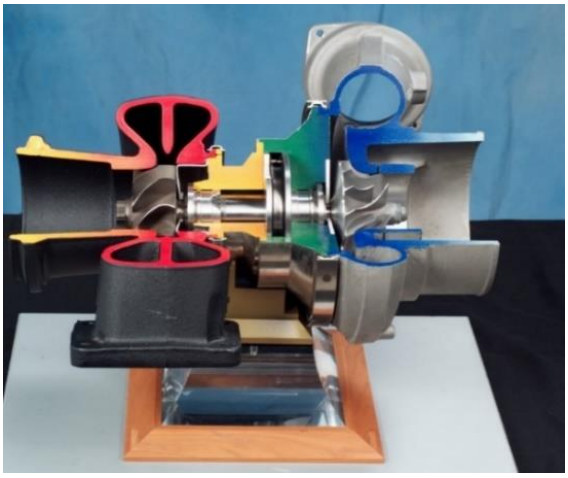
سوپرشارژر روتس از دو عدد روتور پره‌دار تشکیل شده است که در داخل یک هوزینگ (بدنه) قرار دارند. این روتورها توسط نیروی پیشرانه به چرخش درآمده و چرخش آن‌ها سبب گیر افتادن هوا در فاصله‌ی بین پره‌ها و بدنه‌ی سوپرشارژر می‌شود، به این ترتیب هوا به سمت پیشرانه پمپ می‌شود.



شکل ۳. سوپرشارژر روتس و سوپرشارژر ۴ پره TVS [9]

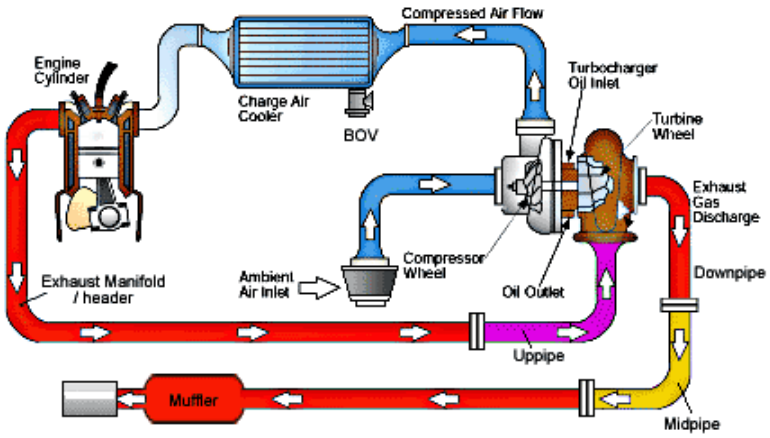
توربوشارژر معمولا به صورت یک توربین است که در مسیر دود خروجی قرار گرفته و محور متصل به کمپرسور را می‌چرخاند و باعث مکش هوای اضافی برای موتور می‌شود. در یک طرف محور توربوشارژ، کمپرسور و در طرف دیگر آن، توربین نصب شده است. توربین در مسیر گاز های خروجی از سیلندر ها قرار دارد، به طوریکه در هنگام خروج دود از مانیفولد دود،این توربین نیز به گردش در می آید. در اثر گردش توربین،محور متصل به آن و به تبع

آن کمپرسور که بر روی همین محور قرار گرفته است نیز به گردش در می آید و با متراکم سازی هوا، امکان ورود هوای بیشتر را امکان پذیر می سازد. با توجه به اینکه سرعت گردش محور توربوشارژ خیلی زیاد است(در حدود ۱۵۰۰۰ دور بر دقیقه)، به منظور حفظ و نگهداری یاتاقان های آن نیاز است که روغنکاری یاتاقان ها بطور پیوسته و توسط یک جریان یکنواخت روغن انجام پذیرد.



شکل ۴. توربوشارژر با شفت محوری متصل کننده توربین به کمپرسور [10]

همچنین که اگر فشار ایجاد شده توسط توربو شارژ، بیش از حد زیاد باشد،ممکن است باعث انفجار هایی بی موقع و زود هنگام گردد و یا به عبارتی دیگر،پدیده خود سوزی رخ دهد. این موضوع باعث عملکرد نامناسب موتور و آسیب دیدگی قطعات خواهد شد. برای جلوگیری از این اتفاق معمولا در توربو شارژ، یک مجرای تخلیه (Waste gate) در نظر می گیرند. بدین ترتیب در مواقعی که فشار بیش از حد زیاد است، قسمتی از جریان هوای خروجی از توربوشارژ به خارج از مسیر هدایت می گردد.



شکل ۵. قرار گیری توربوشارژر در مدار هوارسانی موتور احتراقی [11]

در جدول زیر، مقایسه‌ای بین سوپرشارژر و توربوشارژر انجام شده است:

جدول۱. مقایسه توربوشارژر و سوپرشارژر برای انواع سیستم پرخوران [12]

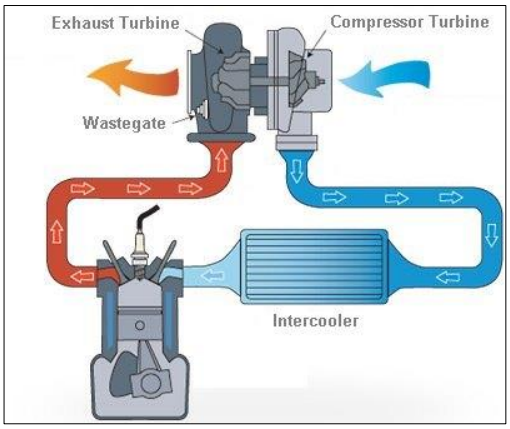
جنبه مقایسه	توربو شارژ	سوپرشارژ
وظیفه	سیستم های پرخوران با **فشرده کردن** هوای ورودی به موتور،این امکان را فراهم میکنند که بتوان **حجم بیشتری** از هوا را به درون موتور فرستاد و بدین شکل بازده موتور را افزایش داد.	
نحوه تامین انرژی	از انرژی گاز های خروجی (دود)	از سر میل لنگ
اثر نحوه تامین انرژی بر عملکرد موتور و سیستم پرخوران	تامین انرژی مورد نیاز توربو شارژ از انرژی گاز های خروجی سبب می شود مصرف سوخت کاهش یابد. با این حال وابستگی کارکرد توربو شارژ به کارکرد ترمودینامیکی موتور خودرو، سبب سرعت عکس العمل پایین‌تر به خصوص در شتابگیری است که به Turbo Lag موسوم است.	تامین انرژی مورد نیاز سوپر شارژ از سر میل لنگ سبب اتلاف انرژی می شود. اگر چه به دلیل وابستگی کارکرد سوپر شارژ به کارکرد مکانیکی موتور خودرو (کوپلینگ مکانیکی)، سوپرشارژ عکس العمل سریع تر به خصوص در شتابگیری دارد.

شکل ۶. توربوشارژر برای موتور بنزینی در مقابل سوپرشارژر برای موتور دیزل [12]

توربو شارژر و معمولاً یک مجموعه به همراه افتر کولر یا اینترکولر برای خنک کردن و بالابردن چگالی هوای اضافی ورودی به موتور است [13].

جدول۲. انواع سیستم خنک کننده هوای فشرده شده توسط توربو شارژ [13]

جنبه مقایسه	اینترکولر	افترکولر
هدف	هدف از استفاده از اینترکولر و افتر کولر، خنک کردن هوای فشرده شده توسط توربو شارژ، پیش از ورود به موتور می باشد.	
محل قرارگیری	جلوی رادیاتور	دهانه ورودی سیلندر
سیال خنک کننده	هوا	آب
نحوه کارکرد	هوای فشرده شده توسط توربو شارژ، در یک مسیر طولانی توسط هوا خنک می‌شود.	هوای فشرده شده توسط توربو شارژ، توسط آب خنک می شود.



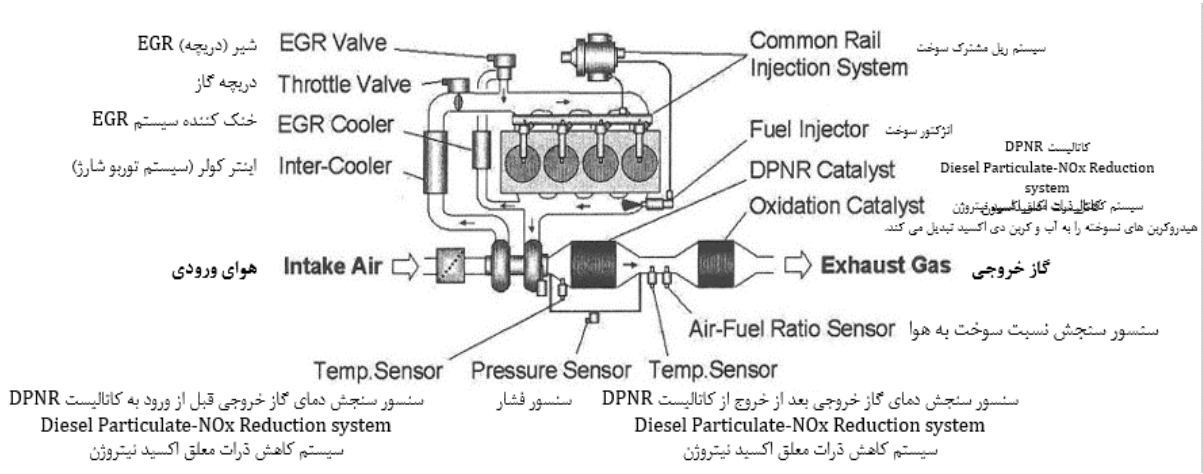
شکل ۷. اینترکولر و افتر کولر در سیستم توربوشارژر [13]

۲-۳-سیستم بازخورانی گاز های خروجی EGR

یکی از مکانیزم های جدیدی که به منظور کنترل میزان آلایندگی گاز های خروجی اگزوز طراحی گردیده است، سیستم بازخورانی گاز های خروجی EGR می باشد. این سیستم در کاهش مقدار اکسید های نیتروژنی (NO_x) که یکی از خطرناک‌ترین گاز های خروجی اگزوز می باشد، بسیار موثر است.

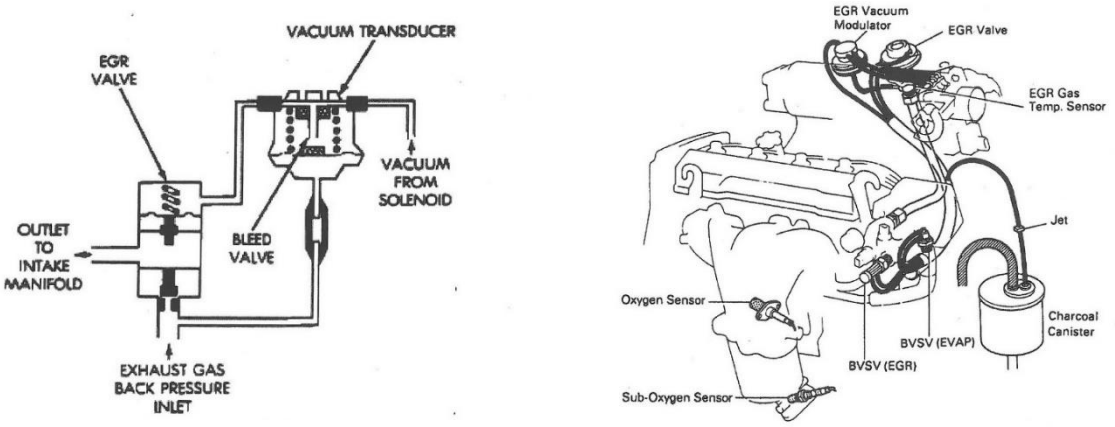
در سیستم EGR، یک لوله برگشت دود قرار داده شده است، بطوریکه قسمتی از گاز های خروجی اگزوز(حدود ۵٪ الی ۱۵٪) که در حال خروج از مانیفولد دود می باشند، از طریق یک مجرا، دوباره وارد مانیفولد هوا می گردند. ورود این مقدار دود به داخل هوایی که می خواهد وارد سیلندر ها شود،باعث کاهش مقدار اکسیژن ورودی می شود.کم بودن اکسیژن در مخلوط هوا-سوخت نیز در نهایت باعث کاهش راندمان حجمی موتور و کاهش دمای حاصل از احتراق می گردد.

از آنجایی که اکسید های نیتروژنی(NOx) بیشتر در هنگامی تولید می شوند که دمای احتراق زیاد است؛بنابراین با کاهش دمای احتراق،می توان از تولید NOx (تا حدود ۷۰ ٪)جلوگیری نمود. سیستم EGR نیز دقیقا همین کار را می کند.یعنی با برگرداندن مقداری از دود به داخل هوای ورودی و کم نمودن مقدار اکسیژن،باعث کاهش قدرت احتراق و دمای حاصل از آن می شود. هر چند که این کار باعث افزایش مقدار HC می شود و مقداری از قدرت موتور را نیز کاهش می دهد ولی در عوض به شدت مقدار گاز NOx تولید شده نیز کاهش می یابد. کاهش دمای گاز های اگزوز، در مجموع باعث کاهش میزان آلایندگی می شود [14].



شکل ۸. سیستم EGR با متعلقات اصلی آن [14]

در ضمن قابل ذکر است که استفاده از سیستم EGR، باعث کاهش مصرف سوخت و افزایش ظرفیت گرمایی ویژه هوای ورودی نیز می گردد.همچنین پیش گرم شدن هوای ورودی از مزایای این سیستم محسوب می گردد.



شکل ۹. قرارگیری EGR در منوفیلد خروجی و متعلقات اصلی آن روی موتور [15]

سیم پیچ یا سولنوئید یک نوع از انواع سیستم هایی است که برای فعالسازی سیستم EGR بکار می رود. وظیفه سیستم های فعال کننده، ایجاد فشار لازم برای باز و بسته کردن دریچه EGR (EGR Valve) می باشد. Vacuum Transducer برای تبدیل فشار اعمال شده (فشار مثبت یا منفی) به سیگنال الکتریکی استفاده می شوند. Vacuum Transducer ها از دو قسمت تشکیل شده اند. یک قسمت الاستیک که در اثر اعمال فشار تغییر شکل می دهد و یک قسمت الکتریکی که این تغییر شکل را تشخیص می‌دهد.

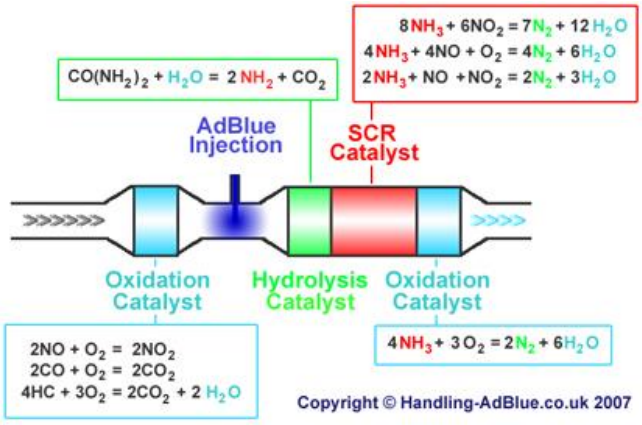
Bleed Valve نوعی شیر(Valve) است که از آن برای خارج نمودن مایع از درون یک لوله و یا به تعبیری دیگر برای خارج نمودن گاز از درون مایع استفاده می شود.

۲-۴- کاهش آلایندگی کاتالیزوری انتخاب کننده SCR

در این سیستم یک مخزن آمونیاک در نظر گرفته شده است که محلول آمونیاک (NH_3) موجود در آن توسط یک انژکتور به داخل لوله اگزوز پاشش می گردد.میزان پاشش محلول آمونیاک توسط واحد کنترل الکترونیکی موتور(ECU) کنترل می شود. برای این منظور یک سنسور اندازه گیری گاز (NO_X) در لوله خروجی اگزوز وسنسور اکسیژن(Oxygen Sensor) بر روی مانیفولد دود نصب گردیده است.این سنسور ها دائما در حال اندازه گیری مقدار گاز NO_X و اکسیژن می باشند.در مواقعی که مقدار گاز NO_X بیش از حد مجاز می گردد، واحد کنترل الکترونیکی موتور(ECU) دستور پاشش محلول آمونیاک را صادر می کند.

در اثر پاشش محلول آمونیاک (NH_3) به داخل لوله اگزوز،آمونیاک (NH_3)با اکسید های نیتروژنی(NO_X) ترکیب شده و واکنش شیمیایی انجام می دهد.این واکنش باعث تولید گاز نیتروژن(N_2) و بخار آب(H_2O) می‌گردد.

اصولا عملکرد کاتالیست SCR به گونه ای است که می تواند گاز های NO_X و HC و CO و ذرات معلق (PM) که بسیار خطرناک و آلاینده هستند را به گازهای بی خطری همچون نیتروژن (N_2)، دی اکسید کربن (CO_2) و بخار آب(H_2O) تبدیل نماید [14].



شکل ۱۰. واکنش‌های اکسایش در SCR جهت تبدیل اکسید نیتروژن به اکسیژن و نیتروژن [16]

اجزای تشکیل دهنده سیستم SCR عبارتند از [14] و [16]:

۱. مجموعه ای از کاتالیست ها شامل ۱-کاتالیست اکسیداسیون ۲-کاتالیست SCR

این دو کاتالیست در تمام سیستم های SCR وجود دارند.گاهی کاتالیست های دیگری نیز به این مجموعه اضافه می شوند، مانند کاتالیست هیدرولیز.

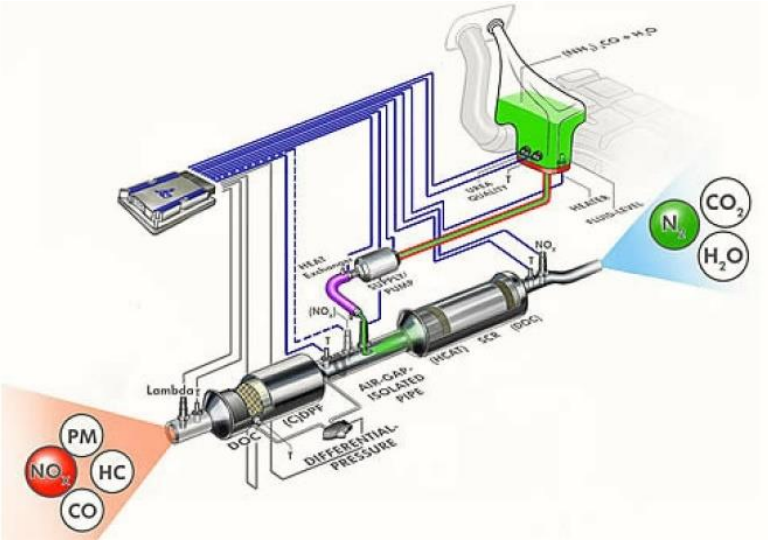
۲. سنسور های اندازه گیری ۱-مقدار اکسیژن ۲-مقدار اکسید های نیتروژن(NOx)

۳. واحد کنترل کننده الکترونیکی موتور ECU [1]

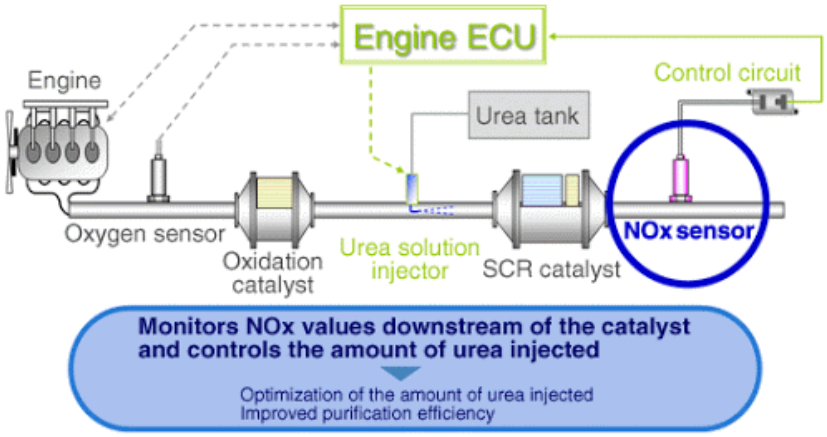
۴. مخزن محلول آمونیاک (Urea Tank)

۵. انژکتور تزریق کننده محلول آمونیاک (Urea Solution Injector)

[1] Electronic Control Unit

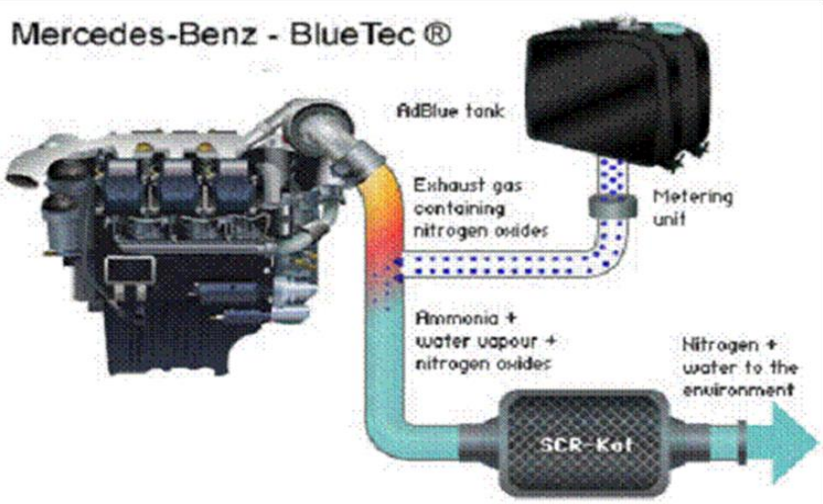


شکل ۱۱. اجزای اصلی سیستم SCR [16]

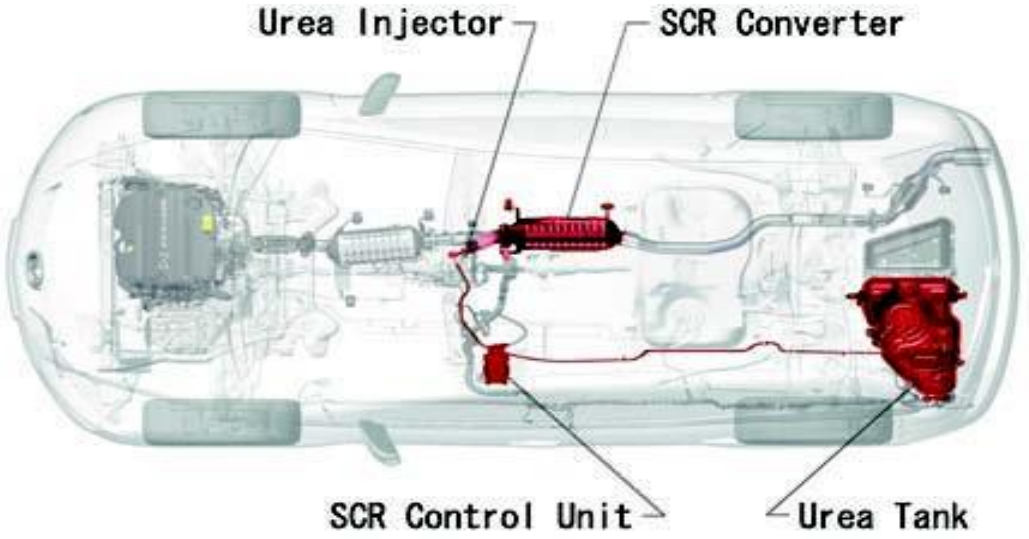


شکل ۱۲. سنسورهای اندازه گیری اکسید های نیتروژن در سیستم SCR [17]

سنسور اندازه گیری اکسید های نیتروژن(NOx) میزان اکسید های نیتروژن در پایین دست جریان کاتالیست SCR را اندازه گیری می کند و بر اساس آن مقدار آمونیاکی که به گاز های خروجی، قبل از ورودشان به کاتالیست SCR، تزریق می شود را کنترل می‌کند.



شکل ۱۳. شماتیک سیستم SCR روی مرسدس بنز برای کاهش آلایندگی [17]



شکل ۱۴. لی‌اوت سیستم SCR برای کاهش آلایندگی [18]

۳. بحث و نتیجه گیری

در این مقاله مروری، ضمن اشاره به ضرورت کاهش آلاینده‌های موتورهای احتراق داخلی خودروها بر اساس استانداردها، به مرور مکانیزم، اجزا و عملکرد مهم‌ترین تجهیزات اضافی کاهش آلایندگی شامل سوپرشارژر، ۲- توربوشارژر، ۳-سیستم بازخورانی گاز های خروجی EGR و ۴- کاهش آلایندگی کاتالیزوری انتخاب کننده پرداخته شد.

۱. سوپر شارژر با توجه به این که انرژی مورد نیاز را از سر میل لنگ تامین می‌کند، برای خودروهای سنگین دارای کاربرد است.
۲. برای خودروهای سبک از توربو شارژر که انرژی خود را از گازهای خروجی اگزوز تامین می‌کند، استفاده می‌گردد.
۳. برای خودرهای تجاری که حد واسط خودروهای سبک و سنگین هستند، با جرم بین ۱۳۰۵ تا ۱۷۶۰ کیلوگرم از توربوشارژر و با جرم ۱۷۶۰ تا ۳۵۰۰ کیلوگرم از سوپرشارژر استفاده می‌گردد.
۴. در خودروهای سبک یکی از تجهیزات موثر کاهنده آلایندگی NOX سیستم EGR است. در واقع بیشترین دما در کنار شمع تولید شده که باعث ترکیب اکسیژن و نیتروژن می‌شود. سیستم EGR با دوباره گرداندن بخشی از گازهای خروجی به داخل سیلندرها، باعث می‌شود دمای کمتری کنار شمع‌ها در فرآیند احتراق به وجود آید.
۵. سیستم کاهش آلایندگی کاتالیستی اتتخاب کننده، سیستم SCR است که علاوه بر دارا بودن کاتالیزورهای مرسوم، میزان دبی و زمان پاشش محلول آمونیاک جهت جداسازی نیتروژن را بر اساس داده‌های سنسورها و محاسبات صورت گرفته در واحد کنترل الکترونیک خودرو فراهم می‌کند.

٤. مراجع

[1] "https://www.rac.co.uk/drive/advice/emissions/euro-emissions-standards/," 2023. [Online].

[2] H. Shang, L. Zhang and Z. Li, "Numerical matching of supercharger for gasoline engine based on three-line working condition method," *Case Studies in Thermal Engineering,* vol. Volume 42, 2023.

[3] W. Li, K. Gjika and J. Schiffmann , "Design and experimental investigation of a herringbone grooved gas bearing supported turbocharger," *Mechanical Systems and Signal Processing,* vol. 186, 2023.

[4] G. Abd-Alla, "Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review," vol. Volume 43, no. 8, pp. 1027-1042, 2002.

[5] R. Thakar, "Experimental investigation to study combustion and emission characteristics of diesel engine by application of EGR and heated intake air," *Materials Today,* vol. Volume 72, no. Part3, pp. 687-693, 2023.

[6] Y. Wu, X. Zhou, Z. Hu, Q. Cai and Q. Lu, "Mechanism, performance and modification methods for NH3-SCR catalysts," *Elsevier, Fuel,* Vols. 331, Part2, 2023.

[7] A. Morga and K. K. Gupta, "A Review on New Technology in Internal Combustion Engine- HCCI engine," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020.

[8] "https://www.motortrend.com/how-to/turbocharger-vs-supercharger-whats-difference-types-explained," [Online].

[9] "https://automobilefarsi.com/news/technical/introduction-to-supercharger-performance-and-features," [Online].

[10] "https://en.wikipedia.org/wiki/Turbocharger," [Online].

[11] "https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/turbocharger-components-working-principles-and-types/," [Online].

[12] "https://www.mobil.com/en/sap/our-products/why-mobil/driving-performance-and-protection/turbochargers-vs-superchargers-how-they-work," [Online].

[13] "http://www.differencebetween.net/object/difference-between-aftercooler-and-intercooler/," [Online].

[14] S. D. Rudrabhate and S. V. Chaitanya, "Comparison between EGR & SCR Technologies," *Impact and Innovation in Mechanical Engineering*, vol. 5, no. 6, p. 856 to 861, 2017.

[15] "https://forum.ih8mud.com/threads/egr-vacuum-line-routing-correct.389631/," [Online].

[16] Q. Zhang, Y. Fan and W. Li, "Numerical simulation and experimental verification of chemical reactions for SCR DeNO x," *Frontiers of Chemical Engineering in China*, p. 523–528, 2010.

[17] P. Forzatti, "Present status and perspectives in de-NOx SCR catalysis," *Applied Catalysis A: General*, vol. 222, no. 1-2, pp. 221-236, 2001.

[18] X. Zhengxin, L. Jingping and F. Jianqin, "Experimental investigation on the urea injection and mixing module for improving the performance of urea-SCR in diesel engines," *canadian journal of chemical engineering*, vol. 96, no. 6, pp. 1417-1429, 2018.