Archive of SID

تعیین ضرایب تصحیح آلاینده‌های NOx و PM موتورهای درون‌سوز دیزلی نسبت به شرایط سطح دریا

جعفر پاشایی*
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات شرکت موتورسازان
pashaei.jafar@gmail.com

سیداسماعیل سیدرضوی
دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز
razavi@tabrizu.ac.ir

سیدمهدی لشکرپور
کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، مرکز تحقیقات شرکت موتورسازان
lashkarpour@gmail.com

* نویسنده مسئول/تاریخ دریافت: ۹۰/۰۳/۱۷ پذیرش نهایی مقاله: ۹۰/۰۶/۳۰

چکیده

شرایط گرماپویایی هوای محیط (فشار، دما و رطوبت)، تابعی از ارتفاع محل از سطح دریا و شرایط اقلیمی محیط است به‌طوری‌که چگالی و مشخصات فیزیکی هوا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرفی استانداردهای متعلق به عملکرد و آلایندگی موتورهای درون‌سوز در شرایط سطح دریا (به‌عنوان شرایط مرجع از نظر دما ، فشار و رطوبت) وضع شده اند لذا یکی از مشکلات آزمون عملکرد و آلایندگی موتورهای درون‌سوز، عدم وجود شرایط استاندارد سطح دریا از نظر دما و فشار و رطوبت محیط در محل آزمون است. در کار حاضر ابتدا سامانه‌ای به منظور تأمین هوای مطلوب احتراق از نظر فشار، دما و رطوبت هوای ورودی موتور طراحی و ساخته شده، سپس با استفاده از این سامانه، آزمون‌های آلایندگی(13Mode & 8Mode) بر روی پنج موتور دیزلی نمونه، در شرایط گرماپویایی مختلف هوای ورودی، اجرا شده است. در نهایت با ایجاد یک همبستگی بین آلاینده‌های موتورهای درون‌سوز و شرایط گرماپویایی هوای ورودی، ضرایب تصحیح برای آلاینده‌های NOx و PM به دست آمد. با توجه به تعداد زیاد آزمون‌های اجرا شده و اطمینان از صحّت و دقت نتایج، با تحلیل خطا محدودهٔ دقت ضرایب تصحیح مشخص شده است.

کلیـد واژه‌ها: ضرایب تصحیح، استانده‌های آلایندگی، فشار، دما، رطوبت، اکسیدهای نیتروژن، دوده، موتور دیزلی

۱- مقدمه

یکی از متغیّرهای کلیدی در موتورهای درون‌سوز، هوای ورودی است که در ترکیب با سوخت، احتراق را تشکیل می‌دهد. مقدار هوا، نسبت هوا به سوخت، نحوهٔ حرکت هوا و شرایط گرماپویایی آن تأثیر زیادی بر کیفیت احتراق، انرژی آزاد شدهٔ احتراق و آلاینده‌های خروجی از موتور دارد[۱]. از طرفی شرایط گرماپویایی هوای محیط (فشار، دما و رطوبت)، تابعی از ارتفاع محل از سطح دریا و شرایط اقلیمی محیط بوده و چگالی و مشخصات فیزیکی هوا را تحت تأثیر قرار می‌دهد. با افزایش رطوبت هوا میزان درصد وزنی آب در ترکیبات هوا نیز افزایش می‌یابد. جرم هوا تابعی از شرایط دمایی و فشاری هوا بوده و با افزایش رطوبت نسبی هوا در شرایط یکسان دما و فشار، جرم هوای خشک کاهش پیدا می‌کند. خواص گرماپویایی و سیالاتی هوا نظیر ظرفیت‌های گرمایی، ثابت آیزنتروپیک، لزجت و ضریب هدایت حرارتی با تغییر فشار، دما و رطوبت دستخوش تغییر قرار می‌گیرند. بررسی چگونگی این تغییرات، منجر به شناخت تأثیر تغییرات خواص سیال هوا بر احتراق موتور درون‌سوز و به تبع آن تأثیر بر

www.SID.ir

Archive of SID

عملکرد و آلاینده‌های موتور خواهد شد [۱،۲و۱۶].

نتایج آزمون‌های عملکرد و آلایندگی از محلی به محل دیگر متفاوت است. سازمان ملل متحد که تا سال ۲۰۰۶ میلادی در حدود ۱۲۲ استانده در مورد وسایط نقلیه موتوری وضع کرده است، برای برطرف کردن مشکل فوق، شرایط استانده سطح دریا را از نظر فشار و دما و رطوبت محیط، به‌عنوان شرایط مرجع در آزمون عملکرد و آلایندگی موتورهای درون‌سوز انتخاب کرده است [۳و۴].

شرکتهایی مثل AVL اتریش، FEV آلمان برای برطرف کردن مشکل فوق، اقدام به ساخت دستگاهی کرده اند که فشار، دما و رطوبت هوای ورودی موتور را به مقادیر دلخواه تغییر داده و شرایط محیطی مختلف را شبیه سازی می‌کنند. اما با توجه به حجم دستگاه، هزینه گران آن و عدم امکان استفاده از چنین دستگاهی در هر مکانی، استفاده از آن بیشتر حالت تحقیقاتی دارد .

مور و همکارانش تأثیر رطوبت بر آلایندهٔ NOx را در موتورهای اشتعال تراکمی به‌صورت تجربی بررسی کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که به ازای افزایش یک درصد وزنی بخار آب در هوای ورودی، دمای بیشینه شعله هوا- هیدروژن و هوا-اتیلن، ۲/۲ درجهٔ سلسیوس کاهش پیدا می‌کند و آن نیز به نوبه خود باعث کاهش ۲۵ درصدی آهنگ تولید اولیه NOx می‌شود [۵].

براون و همکارانش برای بررسی تأثیر فشار ورودی هوا بر موتور، از یک دمنده گریز از مرکز سرعت متغییر که قابلیت تولید هوا با فشار و دبی بالایی را دارد، استفاده کردند. با افزایش فشار هوای ورودی، توان موتور افزایش یافته و مقدار دوده اندازه‌گیری شده با واحد Bosch Number کاهش یافت [۶].

داج و همکارانش در مرکز تحقیقات جنوب غرب آمریکا، نرم‌افزاری بنام ALAMO-ENGINE را برای پیش‌بینی مقدار NOx خروجی از موتورهای دیزل، نوشتند. که شرایط و ترکیب هوای ورودی را برای تولید NOx پیش‌بینی می‌کند [۷].

شرکت Bosch، سازندهٔ انواع تلمبه‌های افشانه، برای جلوگیری از افزایش نسبت سوخت به هوای موتور دیزل در فشار هوای کم محیط، تلمبهٔ افشانه‌های خود را مجهز به سامانهٔ جبران‌کنندهٔ فشار در اثر تغییر ارتفاع کردکه این سامانه با کاهش چگالی هوا مقدار سوخت را نیز کاهش می‌دهد تا مخلوط غنی‌تری تشکیل نشود [۸].

فریتز با بررسی آلایندهٔ NOx در موتورهای جاده‌ای مجهز به پرخوران وخنک‌کن میانی هوا، رابطه‌ای را برای اصلاح NOx از نظر دما و رطوبت محیط پیشنهاد داد [۹].

لذا به منظور برطرف کردن مشکلات ناشی از تغییرات شرایط گرماپویایی محیط، باید ضرایب تصحیحی ایجاد شوند تا با اعمال آن ضرایب، نتایج آزمون‌های عملکرد و آلایندگی موتورهای درون‌سوز مشابه نتایج همان آزمون‌ها در شرایط استانده سطح دریا باشند.

۲- استانده‌های آلایندگی

امروزه استانده‌های معتبر مختلفی در مورد موتورهای درون‌سوز وضع شده است که می‌توان از DIN[4]، ISO[3]، JIS[2]، SAE[1] و ECE/UN[5] نام برد، اساس کار ما بر مبنای استانده‌های وضع شدهٔ سازمان ملل و اتحادیهٔ اقتصادی اروپا (ECE/UN) و آخرین تغییرات آنها در سال۲۰۰۶میلادی است.

استانده ECE/R49 در مورد آلایندگی موتورهای جاده‌ای و استانده ECE/R96 درمورد آلایندگی موتورهای غیر جاده‌ای وضع شده‌اند که بخشی از این استانده‌ها متعلق به تصحیح شرایط محیط از نظر دما، فشار و رطوبت برای آلاینده‌های اصلی موتور است. شرایط مرجع محیطی برای این استانده‌ها بدین‌صورت است:

$$(P_{s0} = 101.3kPa)(T_0 = 298K)(\phi = 60\%)$$

شرایط لازم برای اعتبار آزمون‌های آلایندگی عبارت است از:

الف- برای موتورهای درون‌سوز دیزلی با تنفس طبیعی

$$f = (\frac{99}{P_S}) * (\frac{T}{298})^{0.7} \quad (۱$$

ب- برای موتورهای درون‌سوز دیزلی با پرخوران

$$f = (\frac{99}{P_S})^{0.7} * (\frac{T}{298})^{1.5} \quad (۲$$

$$P_S = P - P_V$$

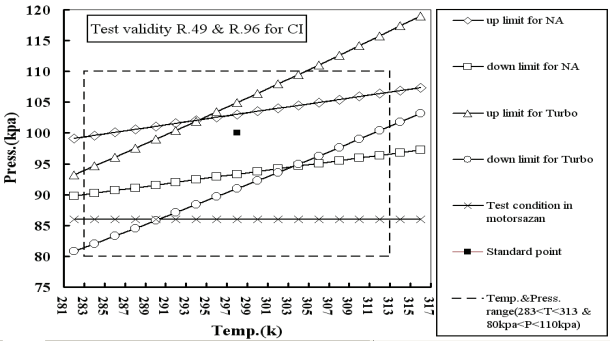
$$P_V = (0.0064 \times T^2 - 0.1128 \times T + 1.890) \times \frac{\phi}{100}$$

که P_S فشار هوای خشک محیط بر حسب کیلو پاسکال P_V فشار بخار اشباع آب بر حسب کیلوپاسکال، $\emptyset$ رطوبت نسبی بر حسب درصد و T دمای محیط بر حسب کلوین است. به منظور اعتبار آزمون‌ها مقدار f باید در بازه $0.96 \le f \le 1.06$ قرار داشته باشد[۳و۴]. شکل(۱) محدودهٔ اعتبار آزمون‌های آلایندگی و را به‌صورت نموداری از دما و فشار محل آزمون نشان می‌دهد.

۱- Society Automotive Engineering
۲- Japanese Industrial Standards
۳- International Standard Organization
٤- Deutsches Institut Normung
٥- European Commission Economic / United National

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۱ محدودهٔ اعتبار آزمون‌های آلایندگی موتورهای دیزل[۳،۴]

۳- روش اجرای کار

برای اجرای آزمون‌ها از پنج موتور دیزلی نمونه که مشخصات آنها در جدول (۱) آمده است، استفاده شده است.

جدول ۱ مشخصات موتورهای آزمون شده

	Engine NO.1	Engine NO.2	Engine NO.3	Engine NO.4	Engine NO.5
قطر mm	100	98.4	101	100	100
تعداد استوانه	4	4	4	4	6
حجم lit	3.99	3.86	4	4	6
نسبت تراکم	17.5	16	16	17.5	16
تنفس	پرخوران	طبیعی	طبیعی	پرخوران	طبیعی
سامانهٔ احتراقی	پاشش مستقیم	پاشش مستقیم	پاشش مستقیم	پاشش مستقیم	پاشش مستقیم
گشتاورmax	315) (-340	230) (-256	270) (-290	414) (-458	413) (-457
توان (max H.P)	(79-82)	(82 73)	(70-76)	136-) (140	102) (-113
شروع پاشش	12° BTDC	23° BTDC	24° BTDC	17° BTDC	17° BTDC

آزمون‌ها در اتاق‌های آزمون مرکز تحقیقات شرکت موتورسازان اجرا شده است. این اتاق‌ها مجهز به دینامومتر از نوع ادی کارنت (eddy current) با دقت اندازه‌گیری گشتاور $\pm 2n.m$ و ثابت نگه داشتن دور با دقت $\pm 5rpm$ است که با ایجاد میدان مغناطیسی نیروی ترمزی در برابر چرخش موتور ایجاد کرده و خنک کاری آن توسط آب اجرا می‌شود. همچنین با استفاده از سامانه‌های پایشی، دور، گشتاور و دسته گاز موتور مدیریت می‌شود و متغیّرهای مختلف موتور را هر لحظه نمایش می‌دهد.

حسگرهای مختلف دما و فشار و رطوبت بر حسب نیاز به قسمت‌های مختلف موتور و دینامومتر متصل شده و وضعیت موتور و دینامومتر را در هر لحظه نشان می‌دهند. حسگر رطوبت مورد استفاده از نوع حالت جامد است که از لایه‌های بسیار نازک پلیمر به‌عنوان اجزای مقاومتی یا خازنی استفاده می‌شود و میزان مقاومت یا بار خازن با تغییر میزان رطوبت نسبی، تغییر می‌کند و دقت اندازه‌گیری آن $\pm 2\%$ است. حسگرهای فشار از نوع پیزو است که در اثر اعمال فشار بر سطح آنها، علامت الکترونیکی فرستاده و این سیگنال در مدار الکترونیکی مربوطه با فشار معادل‌سازی می‌شود به‌طوری‌که دقت اندازه‌گیری این حسگرها $\pm 1kpa$ است. حسگرهای دما از نوع دماسنج مقاومتی که سیم پیچ آنها از پلاتین خالص ساخته شده، می‌باشند. این حسگرها زینه‌بندی خود را برای مدت طولانی حفظ کرده و میزان مقاومت پایه آنها حدود ۱۰۰ اهم است. چون اتاق‌های آزمون تحقیقاتی موتورسازان مجهز به مدارالکتریکی مخصوص بوده و مقاومت را در حسگر مربوطه سریعاً به ولتاژ تبدیل می‌کند لذا پاسخ‌پذیری حسگرهای دما در حد مطلوب بوده و دقت آنها $\pm 1k$ است. برای اندازه‌گیری NOx بر حسب PPM ازدستگاه آلاینده سنج AVL Dicom4000 با دقت $\pm 10ppm$ و برای اندازه‌گیری PM از دستگاه دوده‌سنج ساخت شرکت AVL با دقت $\pm 10mg/m^3$ استفاده شده است [۱۳و۱۴].

برای ایجاد شرایط دلخواه هوای ورودی موتور از نظر فشار، دما و رطوبت، سامانهٔ تأمین هوای مطلوب احتراق، طراحی و ساخته شد. برای ایجاد فشارهای مختلف از سامانهٔ هوای فشرده موجود در کارخانه به همراه صافی‌های آبگیر و شیرهای تنظیم هوایی(پنوماتیکی) و الکترونیکی استفاده شده است. گرمایش و سرمایش مورد نیاز سامانه، را مدارهای آب داغ و سرد که از سامانهٔ حرارت مرکزی کارخانه تغذیه می‌شوند تأمین می‌کند. گرمایش ممکن است برای گرم کردن کل جریان هوا یا قسمتی از آن و یا گرم کردن هوا به منظور پایش رطوبت اجرا شود. با توجه به حفظ کارایی مبدل، جهت جریان آب خلاف جهت جریان هوا در نظر گرفته شده است. برای تأمین رطوبت مورد نیاز از تزریق آب به داخل محفظهٔ آرامش هوا استفاده شده که در این روش یک لوله که روی آن پر از روزنه‌های ریز است، درون مجرا یا محفظهٔ هوا نصب شده و با یک شیر تنظیم، آب وارد لولهٔ روزنه‌دار و از آنجا به داخل محفظهٔ هوا تزریق می‌شود. لوله روزنه دار در حالتی قرار گرفته که تا حد امکان آب تزریق شده به هوا رطوبت همگن ایجاد کند. تزریق آب به سامانهٔ به‌کمک حسگر رطوبت‌سنج پایش می‌شود. در این سامانهٔ هر رطوبت نسبی تا اشباع کامل قابل دستیابی است.

www.SID.ir

Archive of SID

سامانهٔ پایشی استفاده شده از نوع مدار بسته تناسبی است به‌طوری‌که خروجی حسگر مستقیماً بر روی ابزار پایشی اثر می‌گذارد. بیان ریاضی پایش تناسبی به‌صورت معادلهٔ (۳) است.

$$O = A + K_p e \qquad (۳)$$

که در آن ورودی o کنترلر، A مقدار ثابت که برابر با مقدار خروجی کنترلر در حالت بدون خطا است، K_p ثابت بهره تناسبی و e مقدار خطا برابر با اختلاف نقطهٔ تنظیمی و مقدار اندازه‌گیری شده متغیر کنترلی است[۱۵]. واحد پایش سامانه در هر لحظه از خروجی آن، که مخزن آرامش هوا است، به‌کمک حسگرهای فشار، دما و رطوبت، خروجی گرفته و دستورات لازم را صادر می‌کند خروجی‌های دما، فشار و رطوبت سامانهٔ طراحی شده با دقت $\pm 2\%$ قابل اعتماد است.

نحوهٔ آزمایش بدین‌صورت بود که بعد از بستن هر کدام از پنج موتور دیزلی در اتاق آزمون، ابتدا موتور به مدت ۳۰ دقیقه گرم می‌شد تا از نظر دمای آب ورودی و خروجی و دمای روغن به حالت پایا برسد. سپس شرایط گرماپویایی هوای ورودی به موتور از نظر دما، فشار و رطوبت، مطابق جدول(۲) تغییر داده می‌شد. تغییر هر یک از سه متغیّر دما، فشار و رطوبت، همراه با ثابت نگه داشتن دو متغیّر دیگر اجرا می‌شد.

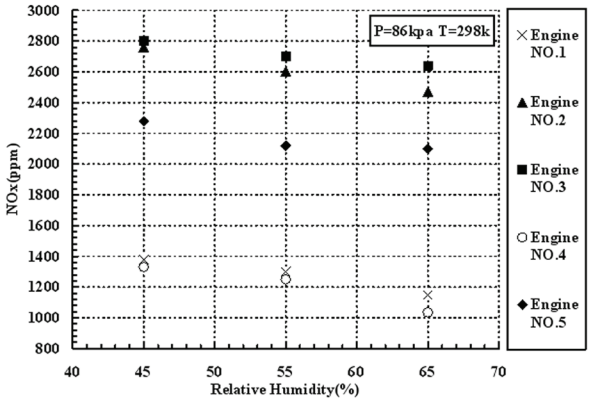
جدول ۲ شرایط هوای ورودی موتور

حالت	فشار(کیلو پاسکال)	دما(درجهٔ سلسیوس)	رطوبت نسبی (درصد)
۱	۷۵	۲۵	۵۵
۲	۸۰	۲۵	۵۵
۳	۸۶	۲۵	۵۵
۴	۹۰	۲۵	۵۵
۵	۹۵	۲۵	۵۵
۶	۱۰۰	۲۵	۵۵
۷	۸۶	۱۰	۵۵
۸	۸۶	۱۵	۵۵
۹	۸۶	۲۰	۵۵
۱۰	۸۶	۳۰	۵۵
۱۱	۸۶	۳۵	۵۵
۱۲	۸۶	۲۵	۴۵
۱۳	۸۶	۲۵	۶۵

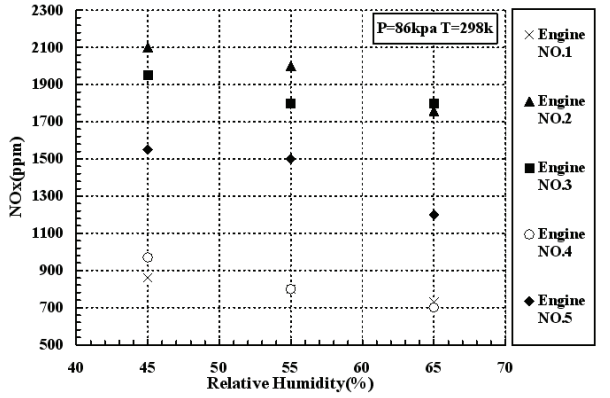
با توجه به جدول (۲)، هرکدام از موتورها در سیزده حالت مختلف هوای ورودی آزمایش شدند و با توجه به پایداری لگام‌ترمز برای ثابت نگهداشتن دور موتور در سرعت معینی، مقادیر آلاینده‌های NOx و PM در دو حالت بار کامل- دور گشتاور بیشینه و بار کامل- دور توان بیشینه، اندازه‌گیری شده است. برای اندازه‌گیری آلاینده‌ها، لوله نازک فلزی متصل به اگزوز خروجی موتور به دستگاه آلاینده سنج وصل شده و به مدت پنج دقیقه دراین حالت باقی می‌ماند به‌طوری‌که یادداشت آلاینده‌ها در نیم دقیقه آخر صورت گرفته است[۳و۴]. به منظور افزایش دقت آزمایش‌ها و حذف خطاهای آزمایش، هر کدام از آزمون‌ها، سه بار تکرار گردیده است. همچنین با در نظر گرفتن خطاهای دستگاههای آزمون و اندازه‌گیری، با اجرای تحلیل خطا محدودهٔ دقت ضرایب تصحیح مشخص شده است [۱۶و۱۷].

٤- نتایج تجربی

شکل‌های (۲) و (۳) نتایج حاصل از آزمون پنج موتور دیزلی نمونه را در شرایط مختلف رطوبت هوای ورودی نشان میدهند. آزمون‌ها در دو حالت گشتاور بیشینه و توان بیشینه و باز بودن کامل دریچهٔ گاز، به ازای فشار و دمای هوای محیط ثابت اجرا شده است.



شکل ۲ تأثیر رطوبت بر آلایندهٔ NOx در حالت بار کامل و گشتاور MAX



شکل ۳ تأثیر رطوبت بر آلایندهٔ NOx در حالت بار کامل و توان MAX

www.SID.ir

Archive of SID

با استفاده از روش درون‌یابی لاگرانژ، چند جمله‌ای که، رفتار آلایندهٔ NOx را در هر موتور نسبت به تغییرات رطوبت هوای ورودی در شکل‌های (۲) و (۳) تقریب می‌زند، بدست می‌آید. چند جمله‌ای در حالت کلی به شکل $C_1 + C_2 \times H + C_3 \times H^2$ است. جدول (۳) ضرایب متعلق به این چند جمله‌ای‌ها را برای هر موتور نشان می‌دهد.

جدول ۳ ضرایب چندجمله‌ای تقریب زده شده برای هر موتور

Engine NO.	C_1	C_2	C_3
۱	۸۷۳	۲۷	−۰,۳۵
۲	۳۸۵۱	−۳۱	۰,۱۵
۳	۳۷۴۵	−۳۰	۰,۲
۴	۱۱۵۶	۱۰۷	−۱,۱۵
۵	۴۷۳۲	−۸۶	۰,۷

در مرحله بعد، با استفاده از چند جمله‌ای‌های بدست آمده برای هر موتور، مقادیر آلایندهٔ NOx به ازای رطوبت‌های مختلف را به‌دست می‌آید.

جدول ۴ تأثیر رطوبت بر آلایندهٔ NOx با استفاده از چندجمله‌ای‌های تقریب زده شده

Engine NO.	H=٪۴۵	H=٪۵۰	H=٪۵۵	H=٪۶۰	H=٪۶۵	H=٪۷۰	H=٪۷۵
۱	۱۳۷۹	۱۳۴۸	۱۲۹۹	۱۲۳۳	۱۱۴۹	۱۰۴۸	۹۲۹
۲	۲۷۶۰	۲۶۷۶	۲۵۹۹	۲۵۳۱	۲۴۶۹	۲۴۱۶	۲۳۷۰
۳	۲۸۰۰	۲۷۴۵	۲۷۰۰	۲۶۶۵	۲۶۴۰	۲۶۲۵	۲۶۲۰
۴	۳۶۴۲	۳۶۳۱	۳۵۶۲	۳۴۳۶	۳۲۵۲	۳۰۱۱	۲۷۱۲
۵	۲۲۸۰	۲۱۸۲	۲۱۲۰	۲۰۹۲	۲۱۰۰	۲۱۴۲	۲۲۲۰

با توجه به اینکه رطوبت‌نسبی $H=\%60$ را به‌عنوان رطوبت‌نسبی استانده در دمای $T=298k$ در نظر گرفته‌ایم. لذا ضریب اصلاح $R_H = \frac{NO_X @ H=60\%}{NO_X @ H_{Observation}}$، در جدول (۵) برای هر موتور و در هر رطوبت نسبی به دست می‌آید.

جدول ۵ ضرایب تصحیح آلایندهٔ NOx برای پنج موتور دیزلی در رطوبت‌های نسبی مختلف

Engine No.	H=٪۴۵	H=٪۵۰	H=٪۵۵	H=٪۶۰	H=٪۶۵	H=٪۷۰	H=٪۷۵
۱	۰,۸۹۴	۰,۹۱۴	۰,۹۴۹	۱	۱,۰۷۳	۱,۱۷۶	۱,۳۲۷
۲	۰,۹۱۷	۰,۹۴۵	۰,۹۷۳	۱	۱,۰۲۵	۱,۰۴۷	۱,۰۶۸
۳	۰,۹۵۱	۰,۹۷۰	۰,۹۸۷	۱	۱,۰۰۹	۱,۰۱۵	۱,۰۱۷
۴	۰,۹۴۳	۰,۹۴۶	۰,۹۶۴	۱	۱,۰۵۶	۱,۱۴۱	۱,۲۶۷
۵	۰,۹۱۷	۰,۹۵۸	۰,۹۸۶	۱	۰,۹۹۷	۰,۹۷۷	۰,۹۴۵
Avg.	۰,۹۲۴	۰,۹۴۶	۰,۹۷۱	۱	۱,۰۳۲	۱,۰۷۱	۱,۱۲۴

با توجه به جدول (۵)، چندجمله‌ای که بهترین تقریب را برای میانگین ضرایب تصحیح رطوبت، ارائه دهد، به‌صورت معادلهٔ (۴) به دست می‌آید که این رابطه را ضریب اصلاح آلایندهٔ NOx، نسبت به رطوبت هوای ورودی موتور دیزل می‌نامیم.

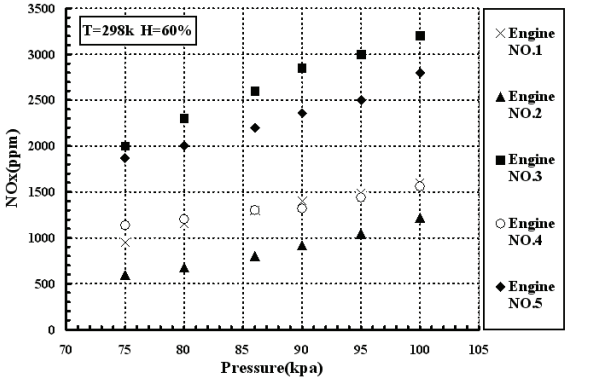
$$R_H = 1.0043 - 0.0067 \times H + 0.0001 \times H^2 \qquad (۴$$

معادلهٔ(۴) در گستره رطوبت نسبی *75%-45%* در دمای *298k* که معادل گستره رطوبت مطلق $10.3(\frac{grH_2O}{KgDryAir}) - 17.4(\frac{grH_2O}{KgDryAir})$ است، با گستره خطای *6%-4%* معتبر است.

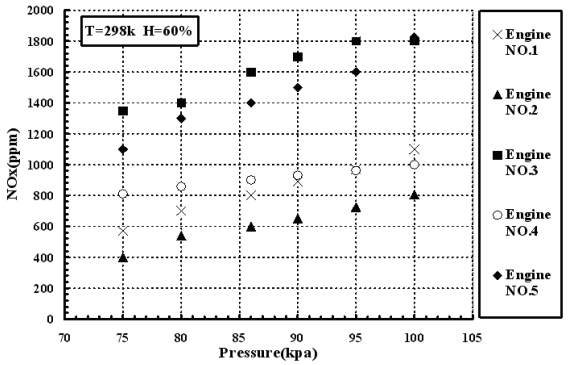
شکل‌های (۴) و (۵) تأثیر فشار بر آلایندهٔ NOx موتورهای مورد آزمایش را در حالت گشتاور بیشینه و توان بیشینه نشان می‌دهد. چندجمله‌ای که بهترین تقریب را برای میانگین ضرایب تصحیح فشار ارائه دهد، به‌صورت معادلهٔ (۵) به دست می‌آید. این رابطه را ضریب اصلاح آلایندهٔ NOx، نسبت به فشار هوای ورودی موتور دیزل می‌نامیم.

$$R_P = 3.1356 - 0.0217 \times P \qquad (۵)$$

رابطه(۵)در گستره فشار هوای محیط *75kpa-100kpa* با گستره خطای *8%-5%* معتبر است.



شکل ۴ تأثیر فشار بر آلایندهٔ NOx در حالت بار کامل و گشتاور MAX



شکل ۵ تأثیر فشار بر آلایندهٔ NOx در حالت بار کامل و توان MAX

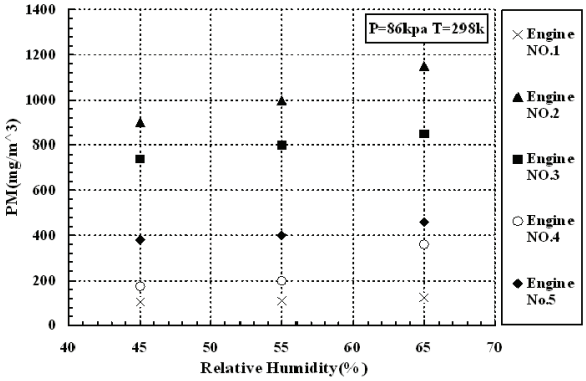
www.SID.ir

Archive of SID

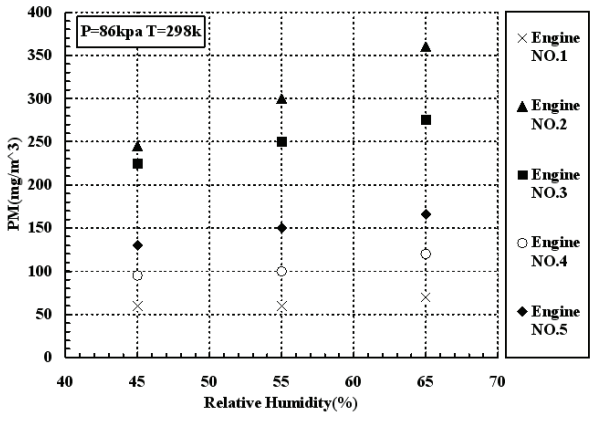
شکل‌های (۶) و (۷) تأثیر فشار بر آلایندهٔ PM موتورهای مورد آزمایش را در حالت گشتاور بیشینه و توان بیشینه نشان می‌دهد. چندجمله‌ای که بهترین تقریب را برای میانگین ضرایب تصحیح رطوبت، ارائه دهد، به‌صورت معادلهٔ (۶) به دست می‌آید که این رابطه را ضریب اصلاح آلایندهٔ PM، نسبت به رطوبت هوای ورودی موتور دیزل می‌نامیم.

$$R_H = 2.0197 - 0.017 \times H \qquad (۶)$$

معادلهٔ(۶) در گستره رطوبت نسبی *75%-45%* در دمای *298k* که معادل گستره رطوبت مطلق $10.3(\frac{grH_2O}{KgDryAir}) - 17.4(\frac{grH_2O}{KgDryAir})$ است، معتبر است.



شکل ۶ تأثیر رطوبت بر آلایندهٔ PM در حالت بار کامل و گشتاور MAX

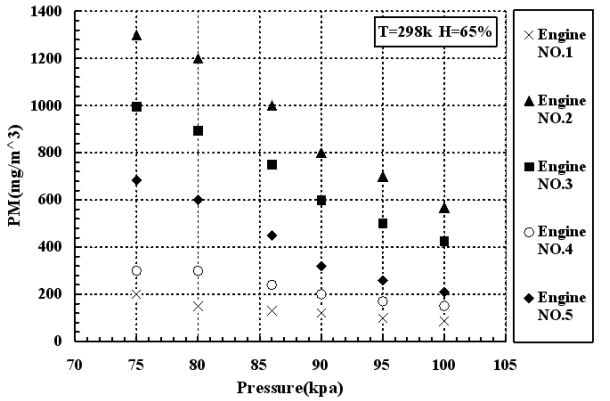


شکل ۷ تأثیر رطوبت بر آلایندهٔ PM در حالت بار کامل و توان MAX

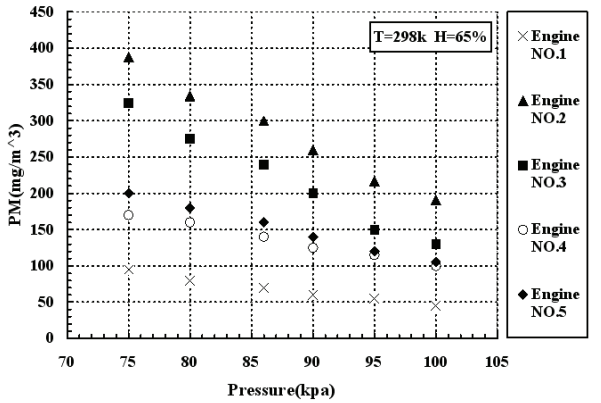
شکل‌های (۸) و (۹) تأثیر فشار بر آلایندهٔ PM موتورهای مورد آزمایش را در حالت گشتاور بیشینه و توان بیشینه نشان می‌دهد. چند جمله‌ای که بهترین تقریب را برای میانگین ضرایب تصحیح فشار ارائه دهد، به‌صورت معادلهٔ (۷) به دست می‌آید که این رابطه را ضریب اصلاح آلایندهٔ PM، نسبت به فشار هوای ورودی موتور دیزل می‌نامیم.

$$R_P = 2.4188 - 0.0646 \times P + 0.0005 \times P^2 \qquad (۷)$$

معادلهٔ (۷) در گسترهٔ فشار هوای محیط *75kpa-100kpa* با گستره خطای *8%-5%* معتبر است. به‌طوری‌که برای موتورهایی که آلایندهٔ PM آنها کم است، خطا زیاد است و برای موتورهایی با آلایندهٔ PM زیاد، مقدار خطا کم است.



شکل ۸ تأثیر فشار بر آلایندهٔ PM در حالت بار کامل و گشتاور MAX



شکل ۹ تأثیر فشار بر آلایندهٔ PM در حالت بار کامل و توان MAX

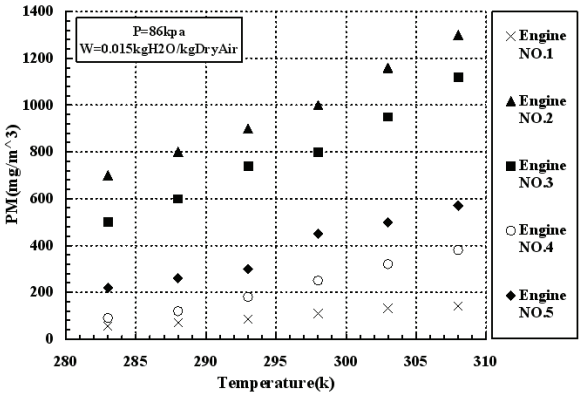
شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تأثیر دما بر آلایندهٔ PM موتورهای مورد آزمایش را در حالت گشتاور بیشینه و توان بیشینه نشان می‌دهد. معادلهٔ (۸) ضریب اصلاح آلایندهٔ PM، نسبت به دمای هوای ورودی موتور دیزل را نشان می‌دهد.

www.SID.ir

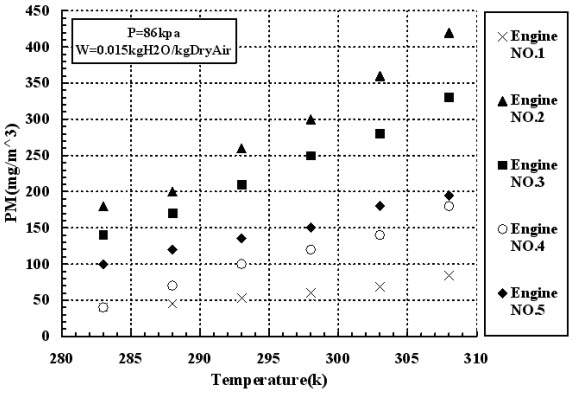
Archive of SID

$$R_T = 14.971 - 0.0466 \times T \qquad (۸)$$

معادلهٔ(۸) درگستره دمای هوای محیط *283k-313k* و با گستره خطای *6%-4%* معتبر است.



شکل ۱۰ تأثیر دما بر آلایندهٔ PM در حالت بار کامل و گشتاور MAX

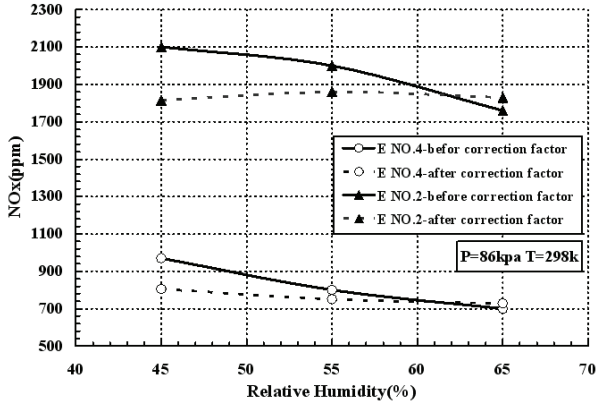


شکل ۱۱ تأثیر دما بر آلایندهٔ PM در حالت بار کامل و توان MAX

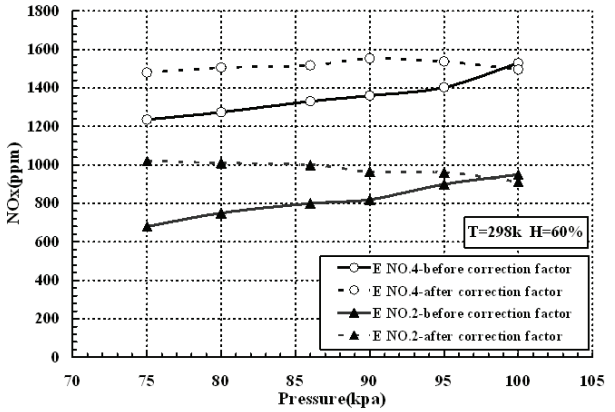
به منظور اصلاح آلاینده‌های موتور از شرایط محیطی آزمون به شرایط محیطی استانده از معادلهٔ زیر استفاده می‌کنیم.

$$Emission_{STD} = Emission_{OBS} \times R_P \times R_T \times R_H \qquad (۹)$$

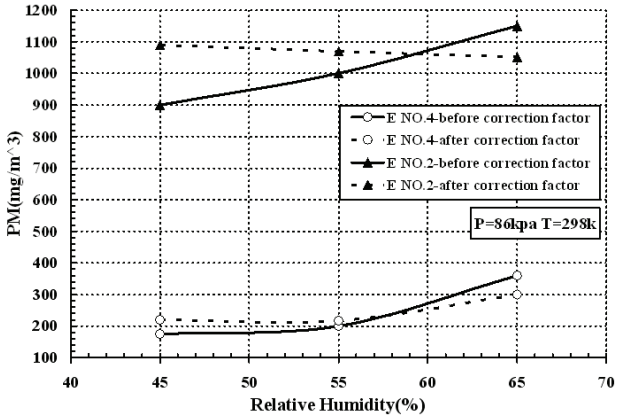
که‌در آن، *RH, RT, RP* کمیت‌های بی‌بعد و به‌ترتیب ضرایب تصحیح‌اند برای فشار، دما و رطوبت. در شکل‌های (۱۲)، (۱۳)، (۱۴)، (۱۵) و (۱۶) ضرایب تصحیح استخراج شده آلاینده‌های NOx و PM بر روی موتورهای شماره ۲ و ۴ (به عنوان مثال) اعمال شده و نتایج در دو حالت بدون اعمال ضرایب تصحیح و با اعمال ضرایب تصحیح مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با اعمال ضرایب تصحیح مقدار آلاینده‌های NOx و PM منتشر شده از موتور تابعی از شرایط گرماپویایی محیط نیست و همواره مقدار تقریبا ثابتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲ اعمال ضریب تصحیح رطوبت بر آلایندهٔ NOx



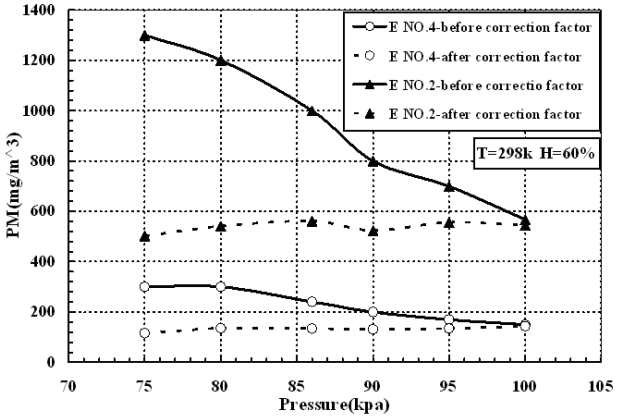
شکل ۱۳ اعمال ضریب تصحیح فشار بر آلایندهٔ NOx



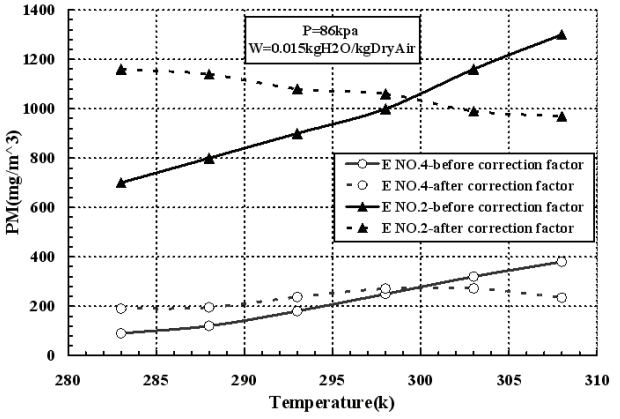
شکل ۱۴ اعمال ضریب تصحیح رطوبت بر آلایندهٔ PM

www.SID.ir

Archive of SID

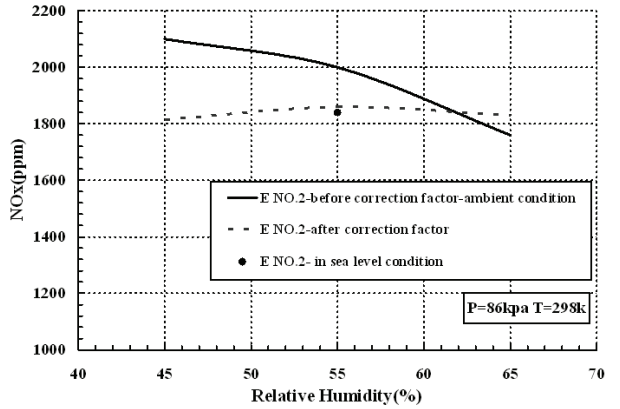


شکل ۱۵ اعمال ضریب تصحیح فشار بر آلایندهٔ PM

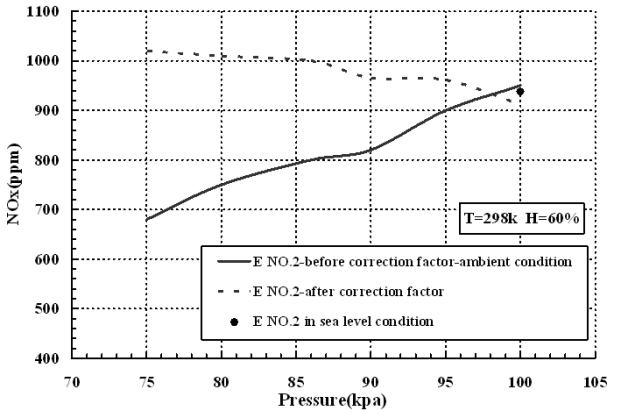


شکل ۱۶ اعمال ضریب تصحیح دما بر آلایندهٔ PM

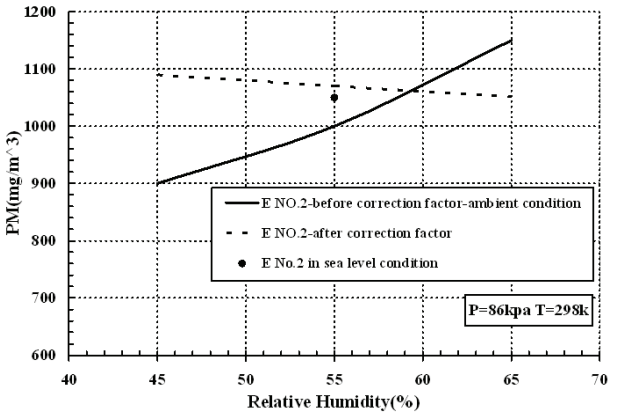
شکل‌های (۱۷)، (۱۸)، (۱۹)، (۲۰) و (۲۱) نتایج صحّه‌گذاری ضرایب تصحیح بدست آمده را نشان می‌دهد. صحّه‌گذاری به این صورت اجرا شده است که با ایجاد شرایط سطح دریا برای هوای ورودی توسط "دستگاه تأمین هوای مطلوب احتراق" آلاینده‌های PM و NOx موتور شماره ۲ اندازه‌گیری شد سپس همان موتور شماره ۲ در شرایط واقعی هوای ورودی مورد آزمون قرار گرفت و آلاینده‌های PM و NOx اندازه‌گیری و سپس ضرایب تصحیح به دست آمده بر روی آنها اعمال شد. نتایج آلاینده‌های اصلاح شده با نتایج حاصل از آزمون در شرایط استانده سطح دریا مقایسه گردید که تطابق خوبی بین آنها وجود داشت و صحت و اعتبار ضرایب تصحیح را تصدیق می‌کرد



شکل ۱۷ نمودار صحه گذاری معادلهٔ (۴)



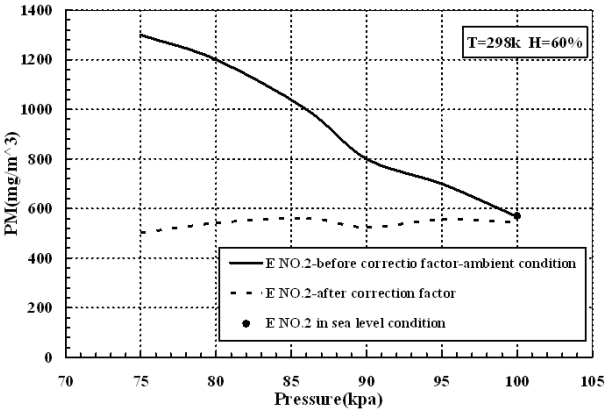
شکل ۱۸ نمودار صحه گذاری معادلهٔ (۵)



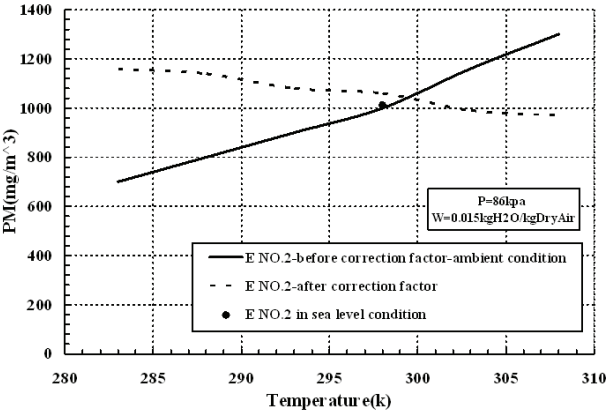
شکل ۱۹ نمودار صحه گذاری معادلهٔ (۶)

www.SID.ir

Archive of SID



شکل ۲۰ نمودار صحه گذاری معادلهٔ (۷)



شکل ۲۱ نمودار صحه گذاری معادلهٔ (۸)

۵- نتیجه‌گیری

۱- با افزایش رطوبت هوای ورودی موتورهای دیزلی، آلایندهٔ NOx کاهش و PM افزایش پیدا می‌کند. افزایش رطوبت هوای ورودی، باعث افزایش ظرفیت گرمایی هوا می‌شود. گرمای لازم برای تجزیهٔ مولکول‌های درشت آب از مخلوط سوخت و هوا گرفته می‌شود و در نتیجه باعث کاهش بازده حرارتی داخلی موتور می‌شود و به تبع آن فشار مؤثر متوسط داخلی (Imep) را کاهش می‌دهد. همچنین افزایش رطوبت هوای ورودی، به‌علت کاهش غلظت اکسیژن هوا و کاهش دمای هوا، منجر به افزایش مهلت شیمیایی در اشتعال می‌شود و دمای بیشینهٔ شعله را کاهش می‌دهد.کاهش دمای بیشینهٔ شعله منجر به کاهش آلایندهٔ NOx،که در دماهای گرم محفظهٔ احتراق افزایش می‌یابد، می‌شود. رطوبت زیاد، حرکت منطقه‌ای شعله را کند می‌کند و گاهی منجر به خاموشی مناطقی از شعله می‌شود. و این عامل روند اکسیداسیون هیدروکربن‌های سوخت را مختل کرده باعث احتراق ناقص هیدروکربن‌های سوخت شده و آلایندهٔ PM منتشر شده از موتور را افزایش می‌دهد.

۲- با افزایش فشار هوای ورودی موتورهای دیزلی، آلایندهٔ NOx افزایش و PM کاهش پیدا می‌کند. افزایش فشار هوای محیط باعث افزایش چگالی هوا، فقیرتر شدن مخلوط و افزایش بازده تنفسی و گرمایی می‌شود که آن نیز به نوبهٔ خود منجر به افزایش فشار مؤثر متوسط داخلی، و افزایش توان داخلی و کاهش مصرف سوخت ویژه موتور دیزلی می‌شود. در موتور دیزلی با افزایش فشار هوای ورودی، فرآیند احتراق در نسبت هوا به سوخت بزرگتری رخ می‌دهد لذا با توجه به وجود هوای اضافی، احتراق بهتر و کامل‌تر می‌شود و نرخ رهایی انرژی را افزایش می‌دهد که این امر فشار و دمای بیشینهٔ احتراق را زیاد کرده و باعث افزایش آلایندهٔ NOx و کاهش آلایندهٔ PM می‌شود. هر چه فشار هوای ورودی به محفظهٔ احتراق بیشتر شود، با توجه به فرآیند پلی‌تروپیک در مرحلهٔ تراکم، فشار هوای داخل محفظه در لحظهٔ شروع پاشش سوخت، افزایش می‌یابد و مولکول‌های سوخت و هوا فشرده تر شده و فاصله آزاد بین مولکول‌ها کاهش خواهد یافت در اثر این عمل برخورد مولکول‌های سوخت و هوا بیشتر و آهنگ واکنش نیز بیشتر می‌گردد. با سریع تر شدن آهنگ واکنش، زمان تکامل واکنش کاهش می‌یابد و مهلت اشتعال کمتر می‌شود.

۳- با افزایش دمای هوای ورودی موتورهای دیزلی، آلایندهٔ PM افزایش پیدا می‌کند ولی رفتار آلاینده‌های NOx در تمام موتورهای مورد آزمون، یکسان نبود. لذا هیچ چند جمله‌ای که رفتار NOx موتورهای آزمون شده را تقریب بزند، به دست نیامد. به منظور حل این مشکل، باید بازهٔ دمایی را که موتورها در آن بازهٔ آزمون شده اند به بازه‌های کوچک‌تر تقسیم کرد و با زیاد کردن تعداد موتورهای آزمون شده، ضریب تصحیح نسبت به دمای هوای ورودی را، برای هر یک از بازه‌های دمایی، جداگانه به دست آورد.

با افزایش دمای هوای ورودی موتور دیزل، نرخ انتقال حرارت بین قطرهٔ مایع پاشیده شده و هوای مجاور به‌خوبی صورت می‌گیرد و فرآیند تبخیر سریع تر می‌شود از طرفی با افزایش دما، آهنگ واکنش پیش اشتعالی افزایش می‌یابد که آن عوامل باعث کاهش مهلت شیمیایی و فیزیکی در اشتعال می‌شود و نقطهٔ اوج منحنی رهایی گرما را در مرحلهٔ پیش آمیخته پایین می‌آورد و این امر باعث افزایش احتراق اشاعه می‌شود و باعث کاهش آلایندهٔ NOx و افزایش آلایندهٔ PM می‌شود. کاهش چگالی هوا در نتیجه افزایش دمای هوای محیط، باعث کاهش

www.SID.ir

Archive of SID

بازده تنفسی موتور، کاهش رقّت و فقیرتر شدن مخلوط می‌شود که این مساله بر کاهش توان و گشتاور تولیدی موتور و افزایش مصرف سوخت ویژه تأثیر زیادی دارد. افزایش دما همچنین باعث افزایش تجزیه حرارتی هیدروکربن‌ها شده و منجر به تشکیل دوده می‌شود. از آنجایی‌که در موتورهای پرخوران بدون خنک‌کن میانی دمای هوای ورودی موتور تا ۲۰۰ درجهٔ سلسیوس نیز بالا می‌رود لذا هیدروکربن‌های سبک‌تر سوخت در برخورد با هوای داغ درون موتور سریع‌تر تبخیر شده و محترق می‌شوند و هیدروکربن‌های سنگین تر با کمی تاخیر این فرآیند را طی میکنند لذا اجزا سوخت دیزل به صورت لایه لایهٔ تبخیر شده و منجر به تغییرات روند احتراق از چرخه‌ای به چرخهٔ دیگر می‌شوند.

٦- سپاس‌گذاری

نویسندگان این مقاله از مرکز تحقیقات مهندسی شرکت موتورسازان نهایت تشکر و قدردانی را داریم. همچنین از خداوند متعال برای زنده یاد دکتر وهاب پیروزپناه که زندگی خود را وقف علم و دانش کردند، علو درجات را خواستاریم.

نمادها

فشار مرجع هوای خشک محیط	P_{S0}
دمای مرجع هوای محیط	T_0
فشار هوای خشک محیط	P_S
دمای هوای محیط	T
رطوبت نسبی مرجع هوای محیط	φ
رطوبت نسبی هوای محیط	H
ثابتهای رابطه	C_i
فاکتور متعلق به شرایط اتمسفریک	f
ضریب تصحیح رطوبت محیط	R_H
ضریب تصحیح فشار محیط	R_P
ضریب تصحیح دمای محیط	R_T

References:

1. Heywood, J.B. Internal Combustion Engine Fundamental. New York: McGraw-Hill, 1988.
2. Marker G.P., et all. Simulating Combustion. Springer Inc, 2004.
3. European Commission Economic/United National, Regulation NO.49, Revision3-Amendment2, 31 January 2003.
4. European Commission Economic/United National, Regulation NO.96, Amendment5, 12 August 2004.
5. Moore J. ”The Effect of Atmospheric Moisture on Nitric Oxide Production.“Paper presented in fall meeting, combustion Institute, June, 1985: Atlanta, Georgia, USA
6. Brown R., Narasaki J., Brown W., Busman L., Brown T. "Combustion Air Conditioning Systems." SAE Paper, NO.930260 (1993).
7. Dodge L., et all. "A PC-Based Model for predicting NOx Reduction in Diesel Engines." SAE Paper, NO. 962060 (1996).
8. shoke H., et all. Diesel Engine Management (translation).Iran: urmia university publication,1379.
9. Fritz S.”Heavy-duty Diesel EngineNOx correction Factor.“ SWRI Final Report08-2597, March, 1996.
10. Krause S.R. "Effect of Engine Intake-Air Humidity, Temperature, and Pressure on Exhaust Emissions." SAE Paper, NO.710835 (1971).
11. Krause S.R. ”Humidity And Temperature Correction Factors For NOx Emissions From Diesel Engines.“ SWRI Project NO.03.30.10.06599, July, 2003.
12. Patterson D.J., Henein N.A. Emissions From Combustion Engines And Their Control. Ann Arbor: Science Publishers Inc, 1972.
13. Operating Manual, AVL Dicom4000 Gas Analyzer.
14. Operating Manual, AVL Smoke Meter.
15. Haines R.W., Hittle D.C. Control Systems for Heating, Ventilating and Air Conditioning. New York: McGraw-Hill, 2005.
16. Velosa J. "Error Analysis of the Vehicle Exhaust Emission Measurement Systems." SAE Paper, NO. 930393 (1993).
17. Zhao H., Ladammatos N. Engine Combustion Instrumentation and Diagnostics. SAE Inc., 2001.
18. EuropeanCommission Economic/United National Regulation NO.85 , Amendment2, 14 May 2003
19. EuropeanCommission Economic/United National Regulation NO.120, Amendment2, 6 April 2005
20. Jianwen L., et all. "Effect of Composition on Combustion and Emission Characteristics of DI Diesel Engine at High Intake Pressure." SAE Paper NO.970322 (1997).
21. Reid R.C., Pravsnitz J.M., and Sherwood T.K. The property of Gases and Liquids. New York: McGraw-Hill, 1990.

www.SID.ir