



تأثیر کند بودن سنسور اکسیژن قبل از کاتالیست روی آلایندگی و مصرف سوخت خودرو

محمدامین شیخ نظری^۱، میثم صالحی^۲، امین راه چمنی^۳

M_sheikhnazari@ip-co.com

Me_salehi@ip-co.com

A_rahchamani@ip-co.com

^۱ کارشناس کالیبراسیون واحد کنترل الکترونیک شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو (ایپکو)

^۲ رئیس اداره آلایندگی شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو (ایپکو)

^۳ کارشناس کالیبراسیون واحد کنترل الکترونیک شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایرانخودرو (ایپکو)

چکیده

سنسور اکسیژن قبل از کاتالیست عضو اصلی کنترل سوخت در سامانه مدیریت موتور خودرو است. این سنسور به واحد کنترل الکترونیکی اعلام می‌کند که مخلوط فقیر یا غنی است و به تبع آن واحد کنترل الکترونیکی اقدام به کم یا زیاد کردن سوخت می‌کند. این سنسور که می‌تواند از نوع پهن باند یا باریک باند باشد ممکن است به دلایل گوناگون کند شود. این کندی بر عملکرد موتور اثر گذاشته و موجب افزایش آلایندگی یا مصرف سوخت می‌شود. در این مطالعه یک خودرو سورن با موتور EF7 TC با سنسور سالم و سنسوری که با استفاده از دستگاه شبیه ساز خطا سنسور اکسیژن چند درجه مختلف کند شده، مورد آزمون آلایندگی قرار می‌گیرد. نتایج نشان داد که با کند کردن بیشتر سنسور، آلایندگی افزایش می‌یابد. این افزایش در سنسورهای خیلی کند، چشمگیر است. علت این اتفاق غنی بودن طولانی مدت موتور به دلیل پاسخ کند سنسور است.

کلیدواژه‌ها: سنسور اکسیژن، آلایندگی، سنسور اکسیژن کند، موتور EF7



Effect of Upstream Oxygen Sensor Slow Response on Vehicle Exhaust Emissions and Fuel Economy

Mohammad Amin Sheikhnazari¹, Meisam Salehi², Amin Rahchamani³

¹ Calibration Engineer, Iran Khodro Powertrain Company (IPCO)

M_sheikhnazari@ip-co.com

² Head of emission department, Iran Khodro Powertrain Company (IPCO)

Me_salehi@ip-co.com

³ Calibration Engineer, Iran Khodro Powertrain Company (IPCO)

A_rahchamani@ip-co.com

Abstract

The upstream oxygen sensor plays a critical role in fuel control within the engine management system. It provides the electronic control unit with information on whether the air-fuel mixture is lean or rich, enabling the ECU to adjust fuel injection accordingly. Depending on various factors, this sensor—whether wideband or narrowband—may exhibit delayed response. Such delays can adversely affect engine performance, leading to increased emissions and fuel consumption. In this study, a Samand Soren equipped with an EF7 TC engine was tested to evaluate emissions under two conditions: using a fully functional sensor and sensors artificially slowed at multiple levels via hardware. The results indicate that increasing sensor response delay significantly elevates exhaust emissions. The pronounced increase observed with severely delayed sensors is attributed to prolonged engine operation under a rich mixture due to the sensor's slow response.

Keywords: Oxygen sensor, Emissions, Slow oxygen sensor, EF7 engine



مقدمه

سنسور اکسیژن بالادست یک عضو مهم در سامانه مدیریت موتور خودروهای امروزی است. این قطعه نقش اصلی را در کنترل نسبت هوا به سوخت موتور ایفا می‌کند. واحد کنترل الکترونیک خودرو با پاسخی که از این سنسور دریافت می‌کند اقدام به کم یا زیاد کردن سوخت کرده تا مخلوط در محدوده استوکیومتریکی باقی بماند. این فرآیند در واحد کنترل الکترونیک اصطلاحاً کنترل حلقه بسته سوخت نام دارد. سنسور اکسیژن بالادست خودرو می‌تواند از نوع پهن باند¹ که خروجی آن مقدار واقعی لامبدا (نسبت هوا به سوخت واقعی تقسیم بر نسبت هوا به سوخت استوکیومتریکی) است یا از نوع باریک باند² که خروجی آن ولتاژ است (تنها حالت صفر و یک دارد که بیان می‌کند مخلوط غنی است یا فقیر)، باشد. در این مقاله به تأثیر عملکرد نادرست این سنسور بر آلاینده‌گی خودرو می‌پردازیم.

در باره موضوع مورد بحث قبلاً مطالعاتی نیز انجام شده است. مطالعه Li & Chen [۱] و Zhang et al [۲] رابطه مستقیمی بین زمان پاسخ سنسور اکسیژن و کارایی کاتالیست در خودروهای اشتعال جرقه ای را بررسی می‌کند. این مقاله نشان می‌دهد که کند شدن سنسور — چه به دلیل فرسایش، آلودگی یا پیر شدن — منجر به تأخیر در کنترل نسبت هوا به سوخت می‌شود و در نهایت توانایی کاتالیست در کاهش آلاینده‌هایی مانند HC، CO و NOx را کاهش می‌دهد. Kalita [۳] تأکید می‌کند که زمان پاسخ سنسور اکسیژن از مؤلفه‌های کلیدی در سیستم OBD-II بوده و تأخیر در سوئیچ غنی-فقیر باعث می‌شود واحد کنترل الکترونیک نتواند به موقع به انحراف λ واکنش نشان دهد و به دنبال آن کنترل سوخت نادرست شده و آلاینده‌گی افزایش یابد. همچنین از دیدگاه فنی یک بررسی در سال ۲۰۲۰ (Dynojet University) [۴]، پیر شدن و کندی پاسخ سنسور اکسیژن باعث افت دقت کنترل نسبت هوا به سوخت می‌شود، مخصوصاً در شرایط گذرا (مثل شتاب گیری سریع)، که معمولاً منجر به افزایش محسوس CO و اغلب افت در عملکرد سوخت‌رسانی و راندمان موتور می‌شود. به علاوه در گزارشات عمومی و تجربی نیز این موضوع بررسی شده است. مطابق گزارش‌های تجربی کاربران و تکنسین‌های محلی (مثلاً در BobIsTheOilGuy [۵])، پیر شدن سنسور O₂ منجر به کند شدن پاسخ و بالا رفتن انتشار آلاینده به‌ویژه CO می‌گردد، تا حدی که در بسیاری از آزمون‌های آلاینده‌گی تعویض سنسور ضروری می‌شود. سرعت پاسخ می‌تواند بر مصرف نیز اثر گذار باشد. Najjar et al [۶] نشان داده‌اند که استفاده از سنسور اکسیژن پهن باند با پاسخ‌دهی سریع‌تر منجر به کاهش مصرف سوخت (BSFC) تا ۱۱.۶٪ نسبت به سنسور باریک باند می‌شود، که اهمیت سرعت پاسخ در کنترل مؤثر نسبت هوا به سوخت و بهبود راندمان احتراق را برجسته می‌کند.

بدنه اصلی مقاله

سنسور اکسیژن بالادست، که قبل از کاتالیست نصب می‌شود، مهم‌ترین ورودی برای کنترل حلقه بسته نسبت سوخت به هوا (λ) است. این سنسور با تغییر ولتاژ خود، وضعیت "غنی" یا "فقیر" بودن مخلوط را به واحد کنترل الکترونیک اطلاع می‌دهد و واحد کنترل الکترونیک با تنظیم زمان پاشش انژکتور، مخلوط را در نزدیکی $\lambda=1$ (استوکیومتریکی) نگه می‌دارد. در این شرایط کاتالیست بیشترین بازده در کاهش HC، CO و NOx را دارد. کندی سنسور به معنی کاهش سرعت تغییر سیگنال خروجی در پاسخ به تغییر غنی/فقیر مخلوط است. به‌طور معمول، یک سنسور سالم باید در محدوده زمانی کمتر از ۱۰۰ میلی‌ثانیه بتواند تغییر وضعیت را گزارش دهد. وقتی سنسور کند می‌شود، سیگنال آن با تأخیر نسبت به تغییر واقعی نسبت هوا به سوخت حرکت می‌کند. کندی سنسور از راه‌های زیر بر کنترل سوخت اثر می‌گذارد:

- واحد کنترل الکترونیک که بر اساس سیگنال این سنسور عمل می‌کند، دیگر نمی‌تواند سریع و دقیق مخلوط را در $\lambda \approx 1$ نگه دارد.
 - این موضوع باعث ایجاد انحرافات طولانی‌تر و بزرگ‌تر در نسبت هوا به سوخت می‌شود (مخلوط برای مدت بیشتری غنی یا فقیر باقی می‌ماند).
 - در نتیجه نوسانات نسبت هوا به سوخت شدیدتر شده و کنترل حلقه بسته سوخت عملاً کیفیت خود را از دست می‌دهد. علاوه بر این کند بودن سنسور بر میزان آلاینده‌ها خروجی از خودرو نیز اثر می‌گذارد. این افزایش آلاینده‌گی به سه دلیل اتفاق می‌افتد:
 - در حلت غنی طولانی، HC و CO به شدت افزایش پیدا می‌کنند زیرا سوخت نسوخته از اگزوز خارج می‌شود.
 - در حالت فقیر طولانی، دمای احتراق بالاتر رفته و تولید NOx بیشتر می‌شود.
 - چون مخلوط حول استوکیومتری پلیدار نمی‌ماند، راندمان کاتالیست افت کرده و توانایی آن در کاهش همزمان HC، CO و NOx کاهش می‌یابد.
- خودرویی که برای این بررسی انتخاب شده است، سورن با موتور EF7 TC دوگانه سوز است. این خودرو با یک کاتالیست ثابت و مشخص در آزمایشگاه خودرو مرکز تحقیقات موتور ایرانخودرو مورد آزمون‌های متعدد آلاینده‌گی قرار گرفت تا تأثیر کندی سنسور مشخص شود. ابتدا خودرو به صورت عادی مورد آزمون قرار می‌گیرد تا میزان آلاینده‌گی آن به دست آید. سپس با اعمال فیلترهای مختلف توسط دستگاه مخصوص، یا به عبارت دیگر کند کردن سنسور با درجات مختلف میزان آلاینده‌گی بررسی می‌شود. ۴ درجه فیلتر مختلف انتخاب شده است: فیلتر سبک، با ثابت زمانی ۵۰۰ میلی‌ثانیه، فیلتر متوسط ۱

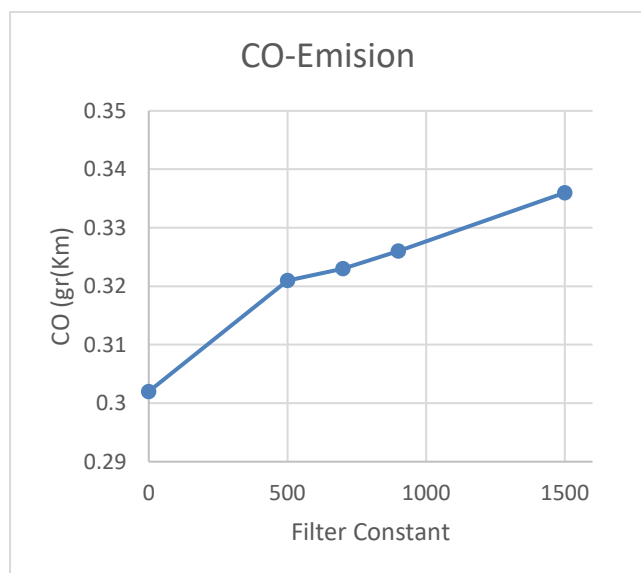
² Narrow-banded

¹ Wide-banded

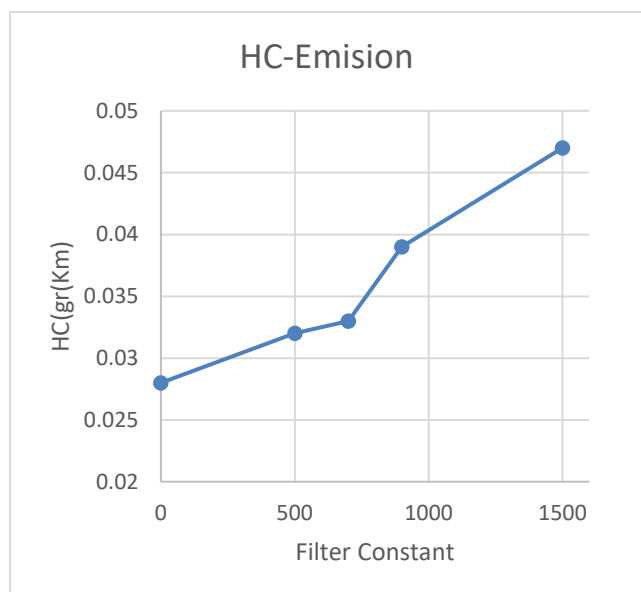


بحث بر روی نتایج

همانطور که ذکر شد آزمون های آلاینده های در ۵ حالت انجام شد. این پنج حالت شامل عادی (فیلتر صفر)، فیلتر ۵۰۰، فیلتر ۷۰۰، فیلتر ۹۰۰ و فیلتر ۱۵۰۰ است که نتایج آلاینده های خودرو بر حسب میلی گرم بر کیلومتر در شکل های ۳ تا ۵ آمده است.



شکل ۳: آلاینده کربن مونوکسید در درجات مختلف کندی سنسور

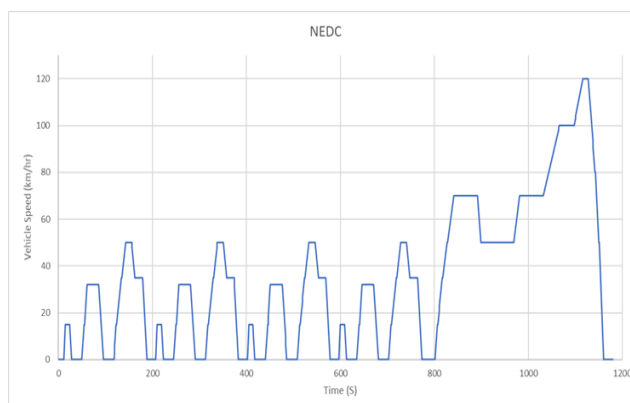


شکل ۴: آلاینده HC در درجات مختلف کندی سنسور

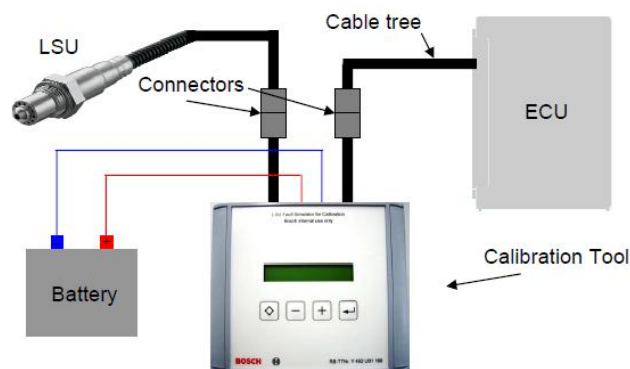
با ثابت زمانی ۷۰۰، فیلتر متوسط ۲ با ثابت زمانی ۹۰۰ و فیلتر سنگین با ثابت زمانی ۱۵۰۰. این دستگاه باید بین ECU و سنسور اکسیژن از طریق کانکتور سنسور و دسته سیم خودرو وصل شده و از طریق باتری خودرو تغذیه گردد تا بتواند فیلتر زمانی روی پاسخ سنسور بیاندازد. این دستگاه شیب تغییرات لامبدا را کند می کند. با احتساب حالت عادی، ۵ مرتبه آزمون انجام شده است. شرایط آزمون دقیقاً مانند استاندارد آلاینده های اروپا یورو ۵ است. آزمون ها در آزمایشگاه خودرو مرکز تحقیقات موتور ایران خودرو انجام شده است و مقادیر آلاینده های از خروجی تجهیزات این آزمایشگاه استخراج شده اند. در جدول ۱ شرایط یکسانی که برای تمامی آزمون ها استفاده شده است آمده است:

جدول ۱: مشخصات آزمون ها

خودرو	سورن + دوگانه سوز ۶ دنده با موتور EF7 TC
سیکل رانندگی	سیکل ملی اروپا NEDC
دمای محیط آزمون	25°C
رطوبت نسبی محیط	50%
فشار هوا	88 kPa
سوخت	بنزین سوپر
نوع سنسور اکسیژن	پهن باند



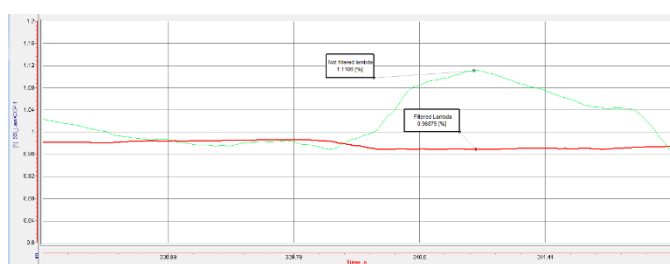
شکل ۱: سیکل رانندگی ملی اروپا



شکل ۲: دستگاه شبیه ساز خطا و نحوه اتصال آن به سنسور

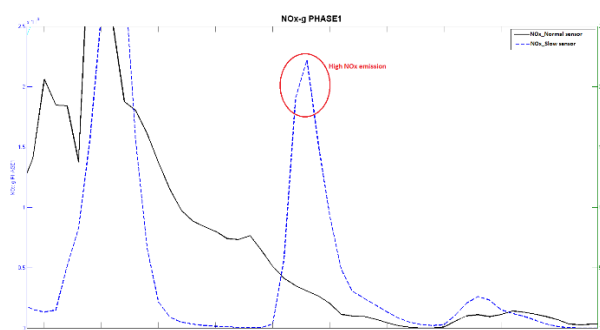


برای بررسی دقیق تر علت افزایش NOx قسمتی از سیکل را مطابق شکل زیر بزرگنمایی می‌کنیم. یعنی یک بازه زمانی ۲ ثانیه ای یکسان در دو تست را بررسی می‌کنیم. در این شکل می‌بینیم که هنگامی که لامبدای فیلتر نشده فقیر شده است، لامبدای کند غنی شدن را دیرتر می‌فهمد. این باعث می‌شود که در کنترل حلقه بسته، واحد کنترل الکترونیک فقیر را دیرتر بفهمد، مدت زمان بیشتری فقیر بماند و در نتیجه NOx بیشتری تولید کند. در شکل ۶ مشخص است که سنسور حتی ۲ ثانیه بعد که لامبدای بدون فیلتر کاملاً فقیر (۱/۱۲) شده است، فقیر شدن را نفهمیده است.



شکل ۷: لامبدای فیلتر شده و خام در نمای نزدیک

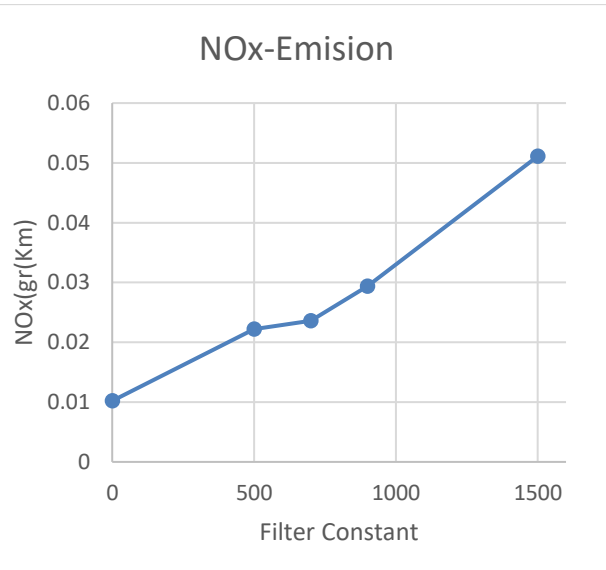
شکل ۸ همین قسمت از سیکل را در نتیجه آلاینده‌گی نشان می‌دهد. در نقطه مذکور NOx افزایش چشمگیری نسبت به سنسور سالم داشته است.



شکل ۸: افزایش اکسید های نیتروژن در سنسور کند در سیکل

کندی سنسور در حالت غنی شدن مخلوط نیز وجود دارد. این اتفاق در شکل ۹ دیده می‌شود. در حالت غنی شدن طولانی آلاینده های HC و CO زیاد می‌شوند. اما این افزایش در آزمون ها به میزان NOx نبود. دلیل آن این است که در آزمون ها آلاینده بعد از کاتالیست اندازه گیری می‌شود و امکان بررسی آلاینده‌گی خام وجود ندارد. کاتالیست توانایی بیشتری در کاهش آلاینده های ناشی از غنی شدن نسبت به فقیر شدن دارد.

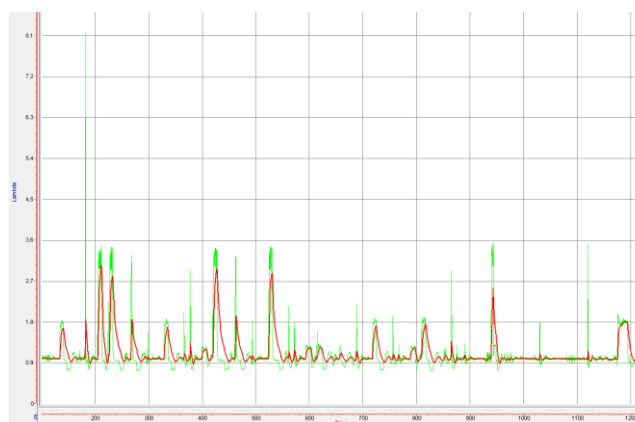
اما علت این که آلاینده HC افزایش خیلی کمتری نسبت به CO داشت، این است که در حالت غنی احتراق ناقص تر شده و نسبت اکسیژن کافی برای سوزاندن همه ی سوخت وجود ندارد. HC خام تولید شده توسط موتور بالا می‌رود اما بخشی از آن در دمای بالای



شکل ۵: آلاینده NOx در درجات مختلف کندی سنسور

مطابق شکل بیشترین مقدار آلاینده‌گی در حالت سنگین ترین فیلتر به دست آمده است. مقدار افزایش آلاینده‌گی برای NOx بیشتر از بقیه آلاینده ها است. به گونه ای که سنگین ترین فیلتر نسبت به آزمون پایه ۵ برابر NOx بیشتری دارد. میزان افزایش برای آلاینده CO بسیار اندک است و در سنگین ترین فیلتر ۱۰٪ نسبت به حالت پایه افزایش دارد. آلاینده HC نیز ماکزیمم افزایش ۶۷ درصدی دارد. افزایش آلاینده‌گی در فیلتر های سنگین نسبت به فیلتر های میانی شیب تند تری دارد.

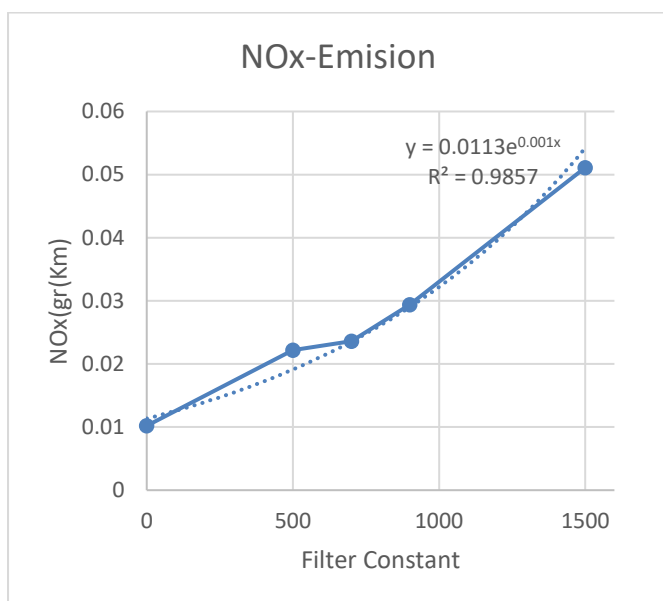
برای بررسی این تفاوت ها داده های آزمون فیلتر ۱۵۰۰ که بیشترین آلاینده‌گی را داشت بررسی می‌کنیم. شکل زیر لامبدای فیلتر شده حین آزمون با دستگاه شبیه ساز خطا و لامبدای بدون فیلتر در تست عادی را نشان می‌دهد. در تمامی نمودار ها گراف قرمز رنگ لامبدای فیلتر شده و گراف سبز رنگ لامبدای بدون فیلتر است.



شکل ۶: لامبدای فیلتر شده و عادی در کل سیکل



در آزمون‌ها آلاینده‌گی که با سنسور کنده شده چه برای امور تحقیقاتی و چه برای کسب مجوز استاندارد خودرو انجام می‌شود، آلاینده NOx افزایش بیشتری داشته و محل اصلی بحث این آلاینده می‌باشد. لذا به دست آوردن رابطه‌ای بین فیلتر اعمال شده بر سنسور و آلاینده NOx خروجی می‌تواند مفید و حائز اهمیت باشد. لذا با داشتن داده‌های تست‌های مختلف و تست بدون فیلتر می‌خواهیم یک منحنی روی داده‌ها فیت کنیم. با توجه به ماهیت پدیده به نظر می‌رسد یک تابع نمایی پیشنهاد مناسبی باشد پس یک تابع نمایی را روی منحنی مورد نظر می‌اندازیم.



شکل ۱۱: مدل کردن آلاینده اکسید نیتروژن

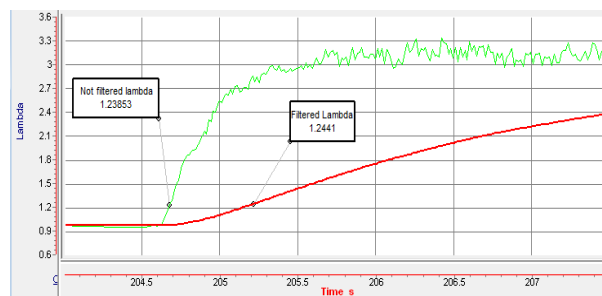
مطابق با شکل ۱۱ رابطه $N = 0.0113e^{0.001T}$ که در آن N میزان آلاینده‌گی اکسید های نیتروژن در سیکل و در واحد gr/km و T ثابت زمانی فیلتراسیون دستگاه با واحد میلی ثانیه است، با دقت خوبی رابطه بین NOx و شدت فیلتر کردن را مدل می‌کند. ضریب تعیین یا R-Square برابر با ۰.۹۷ شده که حاکی از دقت نسبتاً خوب مدل ریاضی است.

نتیجه‌گیری

با بررسی خودرو سورن با موتور EF7 TC مشخص شد که کند بودن سنسور اکسیژن بالادست تأثیری روی مصرف سوخت ندارد. اما این کندی اثر منفی روی آلاینده‌گی دارد. این تأثیرات به صورت زیر جمع بندی می‌شود:

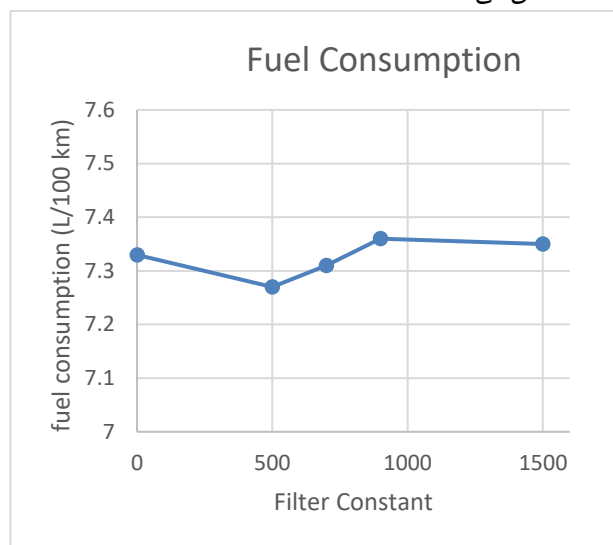
- با افزایش مقدار کندی سنسور آلاینده NOx افزایش زیادی دارد. این افزایش با فیلتر سنگین بسیار زیاد است.

کاتالیست سوخته و تبدیل به کربن دی اکسید می‌شود. از آنجا که در این آزمون‌ها امکان گزارش آلاینده خام (قبل از تصفیه توسط کاتالیست) وجود ندارد، ما افزایش HC کمتری مشاهده کردیم. CO چون محصول میانی احتراق ناقص است، کاتالیست در شرایط غنی طولانی نمی‌تواند همه ی آن را به CO₂ تبدیل کند و در نتیجه افزایش خواهد داشت.



شکل ۹: لامبدای خام و فیلتر شده در حالت غنی شدن

در کنار آلاینده‌گی، تأثیراتی که کندی سنسور بر مصرف سوخت می‌گذارد نیز قابل بررسی است. برای این منظور مصرف بنزین خودرو سورن در سیکل NEDC و در واحد Lit/100 km بررسی می‌شود. شکل ۱۰ مصرف سوخت خودرو را با فیلترهای مختلف در سیکل NEDC نشان می‌دهد.



شکل ۱۰: مصرف بنزین خودرو با فیلترهای مختلف

همان‌طور که شکل ۱۰ نشان می‌دهد، کند کردن سنسور اکسیژن تأثیر ناچیزی روی مصرف خودرو دارد. علت آن این است که سنسور هم غنی بودن و هم فقیر بودن را با تأخیر می‌فهمد. یعنی هم مدت زمان نسبتاً طولانی فقیر است و هم غنی. این دو حالت اثرات یک دیگر را خنثی کرده و برآیندشان تأثیر کمی روی مصرف سوخت دارد. همچنین چون مدت زمان کندی خیلی زیاد نیست تأثیر غنی شدن و فقیر شدن به تنهایی نیز کم است.



مراجع و منابع

- [1] Li, X., & Chen, Y. (2018). Catalyst system and oxygen sensor performance in automobile exhaust emissions. *International Journal of Engineering and Modern Technology*, 10(9), 19–29
- [2] Zhang, H., Liu, J., & Wang, P. (2021). Investigation of oxygen sensor response characteristics and their impact on catalyst efficiency. *Journal of Automotive Engineering*, 235(6), 1024–1035
- [3] Kalita, A. (2016). OBD-II and oxygen sensor: Review of the I.C engine emissions-related performance. *International Journal of Computer Engineering in Research Trends*, 3(2), 81–86
- [4] Dynojet University. (2025). Oxygen sensors in EFI tuning: Narrowband vs. wideband explained. Retrieved from <https://www.dynojetuniversity.com/>
- [5] BobIsTheOilGuy. (2018). Oxygen sensors: How they work & basic diagnosis. Retrieved from <https://bobistheoilguy.com/>
- [6] Najjar, Y. S. H., Abu-Ein, S., & Al-Muhtaseb, A. H. (2019). Comparison of performance using wide-band versus narrow-band oxygen sensors in gasoline engines. *Case Studies in Thermal Engineering*, 14, 100427

- افزایش هیدروکربن‌های نسوخته و اکربن مونوکسید کمتر از اکسیدهای نیتروژن است. افزایش هیدروکربن‌های نسوخته ناچیز است.
- میزان افزایش در آلاینده NOx از سایر آلاینده‌ها بیشتر است. در فیلتر سنگین تا حدود ۵ برابر آزمون پایه افزایش می‌یابد. از آن‌جا که آلاینده‌گی‌ها پس از کاتالیست بررسی می‌شوند، دلیل این اتفاق را باید در ماهیت کاتالیست جست و جو کرد. علت احتمالی این است که این کاتالیست توانایی کمتری در کاهش NOx نسبت به CO دارد.
- از آنجا که NOx آلاینده مهم در تست‌های سنسور کند که در آزمون‌های استلندارد به آن آزمون پایش لامبدا گفته می‌شود مهم‌تر است، سعی شد مدلی برای آن به دست آید. بر این اساس NOx در این آزمون‌ها با رابطه $N = 0.0113e^{0.01T}$ مدل می‌شود.