

بررسی اثر تغلیظ اکسیژن هوا با استفاده از فن آوری غشایی بر افزایش راندمان مصرف سوخت و کاهش آلودگی هوا

حسین تقدیسیان ، محمد سلطانیه

تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده‌ی مهندسی شیمی و نفت، صندوق پستی ۱۱۳۶۵ / ۹۴۶۵
h_taghdisian@yahoo.com

چکیده

در این مقاله اثر تغلیظ اکسیژن توسط غشاء بر روی فرایند احتراق و تأثیر آن بر مصرف سوخت و آلودگی هوا مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعات سینتیکی فرایند احتراق، از مدل‌های عمومی Westbrook و Dryer همراه با اثر تغلیظ اکسیژن استفاده شده و مطالعات ترمودینامیکی فرایند احتراق با نگرش خاص اثر تغلیظ اکسیژن بررسی شده است. مطالعات تجربی با نگرش خاص اثر تغلیظ اکسیژن نشان می‌دهد که استفاده از این فن آوری باعث افزایش راندمان احتراق و کاهش مصرف سوخت به میزان ۳۰٪، کاهش انتشار و رهایش هیدروکربن‌های نسوخته به میزان ۳۰-۴۰٪، مونوکسیدکربن به میزان ۵۰٪ و دوده به میزان ۵۰٪ می‌شود. همچنین به اختصار به مقایسه‌ی مزایای اقتصادی این فن آوری نسبت به دیگر روش‌های کاهش آلودگی پرداخته می‌شود که در مجموع ملاحظات اقتصادی، برتری این روش را نسبت به دیگر روش‌ها نشان می‌دهد.

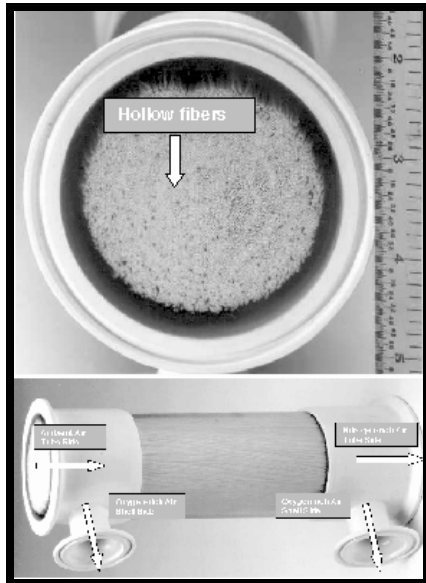
واژه‌های کلیدی: فرایند احتراق؛ هوای تغلیظ شده از اکسیژن؛ آلودگی هوا؛ مصرف سوخت

مقدمه

همان‌گونه که می‌دانیم مسئله‌ی مصرف سوخت امروزه به یکی از اساسی‌ترین و مهم‌ترین مسائل تبدیل شده است. این مشکل از دو جنبه قابل بررسی است. نخست آنکه هم اکنون اکثر قریب به اتفاق وسایل نقلیه از سوخت‌های فسیلی مانند بنزین و گازوئیل استفاده می‌کنند که این امر با توجه به هزینه‌های سرسام‌آور پالایش و تصفیه‌ی نفت آثار زیانبار اقتصادی بر کشور دارد. دوم آنکه مصرف بی‌رویه و فراوان سوخت‌های فسیلی مشکلات جانبی همچون آلودگی هوا را به همراه دارد که به پیامد آن بیماری‌های مختلف نیز افزایش می‌یابد. بنابراین با کاهش مصرف سوخت، تولید این آلاینده‌ها کاهش یافته و به پیامد آن از آثار زیانبار زیست محیطی نیز کاسته می‌شود.

بررسی فرایند احتراق

می‌دانیم که برای انجام عملیات احتراق، نیاز به مخلوط اکسیژن و سوخت به مقدار مناسبی می‌باشد. مثلاً برای بنزین به فرمول عمومی C_8H_{17} برای آنکه درحالت استوکیومتری احتراق انجام شود، مقدار $14/9$ مول هوا به ازای هر مول بنزین لازم است. از طرفی تنها اکسیژن موجود در هوا در فرایند احتراق شرکت می‌کند و نیتروژن هوا به صورت اضافی وارد سیستم می‌شود که همین امر باعث بروز مشکلاتی می‌گردد. چرا که نیتروژن موجود در هوا، در فرایند احتراق نقشی نداشته و تنها باعث خروج آنتالپی از محفظه‌ی احتراق می‌شود. درحقیقت از واحد سوخت مصرفی، کسری از انرژی صرف بالا بردن دمای نیتروژن می‌شود که موجب هدررفت انرژی به صورت گازهای داغ می‌شود. چنانچه



شکل ۱- غشاء طراحی شده برای تغلیظ اکسیژن در خودرو [۱۱]

همچنین می توان اثرات افزایش دما و فشار واکنشگرها را بر این موارد بررسی کرد. در شکل (۲) تغییرات دمای بی درروی شعله سه سوخت متان، پروپان و ایزواکتان نسبت به غلظتهای مختلف اکسیژن در نسبت تعادل ($\varphi=1$) و در فشار یک اتمسفر آمده است. مشاهده می شود با تغلیظ اکسیژن دمای شعله حداکثر به میزان تقریبی ۸۵۰ تا ۹۰۰ کلوین افزایش می یابد. در اشکال (۳) و (۴) نیز تغییر غلظت اجزاء اصلی و فرعی احتراق پروپان نسبت به تغییر غلظت اکسیژن در هوای ورودی و در فشار یک اتمسفر رسم شده است. همان گونه که مشاهده می شود، هر چه هوای ورودی نسبت به اکسیژن بیشتر تغلیظ شود، غلظت اجزاء اصلی مختلف نیز افزایش می یابد. دلیل این امر را از دو جنبه ی مختلف می توان بررسی کرد. نخست آنکه با افزایش غلظت اکسیژن، دمای بی درروی شعله افزایش می یابد و بدین ترتیب تجزیه ی حرارتی اجزاء اصلی مانند آب و دی اکسید کربن نیز شتاب بیشتری می گیرد. دوم آنکه با تغلیظ بیشتر اکسیژن، نقش ملکولهای اکسیژن در هوای به کار رفته در فرایند احتراق بیشتر و نقش نیتروژن کمتر و کمتر می شود. به این ترتیب تمامی واکنشهایی که به نوعی در آنها اکسیژن دخالت

بخوایم راندمان حرارتی را بیان کنیم رابطه ی زیر را خواهیم داشت:

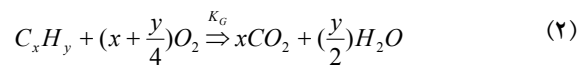
$$\eta = \frac{H_u - H_l}{H_u} = \text{Thermal Efficiency} \quad (1)$$

که در این رابطه H_u مقدار انرژی حاصل از احتراق سوخت و H_l مقدار انرژی خارج شده همراه با گازهای حاصل از احتراق می باشد. همان گونه که مشاهده می شود هر قدر مقدار H_l کمتر باشد، راندمان حرارتی به یک نزدیک تر می شود و با بالا رفتن راندمان حرارتی از مصرف سوخت کاسته شده و همچنین آلایندگی کمتری نیز تولید می شود. استفاده از غشاء برای تغلیظ اکسیژن در همین راستا صورت می گیرد. در حقیقت با استفاده از غشاء، هوای به کار رفته در فرایند احتراق نسبت به اکسیژن غنی تر شده و بدین ترتیب نیتروژن اضافی کمتری همراه با اکسیژن وارد محفظه ی احتراق می شود. بنابراین مقدار افت انرژی ناشی از خروج آنتالپی کاهش و راندمان حرارتی افزایش می یابد. معمولاً غشایی که برای جداسازی اکسیژن - نیتروژن به کار می رود غشاء پلیمری غیر متخلخل است که با مکانیزم نفوذ - انحلال کار می کند [۱، ۲، ۱۶، ۱۷]. از سوی دیگر سرعت نفوذ و انحلال اکسیژن از نیتروژن بیشتر می باشد، بنابراین اکسیژن با سرعت بیشتری نفوذ کرده و در طرف دیگر غشاء، هوا از اکسیژن تغلیظ می شود [۳، ۴، ۵]. در شکل (۱) یک غشاء واقعی که برای تغلیظ اکسیژن در خودروها طراحی شده است، نشان داده شده است [۶]. این غشاء از نوع الیاف توخالی بوده و جنس آن از پلی سولفون می باشد.

محاسبات ترمودینامیکی فرایند احتراق همراه با تغلیظ اکسیژن

در مجموع با کمک محاسبات ترمودینامیکی می توان بسیاری از موارد همچون دمای بی درروی شعله (Adiabatic Flame Temperature) و غلظت اجزاء در محصولات احتراق را مشخص کرد.

دی اکسید کربن باشند. معادله‌ی استوکیومتری این واکنش به صورت زیر می‌باشد:



Westbrook و Dryer رابطه‌ی سرعت مصرف سوخت را برای این واکنش به صورت زیر ارائه کرده‌اند [۷].

$$\frac{d[C_xH_y]}{dt} = -A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) [C_xH_y]^m [O_2]^n \quad (3)$$

با استفاده از این مدل عمومی، می‌توان محاسبات سینتیکی را برای انواع سوخت انجام داد. تغییرات سرعت اولیه نسبت به تغییر دما و فشار و در غلظت‌های مختلف اکسیژن و همچنین نرخ مصرف سوخت نسبت به تغییر نسبت تعادل، تغییر دما، تغییر فشار و تغییر غلظت اکسیژن از جمله مواردی است که می‌توان بررسی نمود. در شکل (۵) تغییرات سرعت اولیه‌ی احتراق پروپان نسبت به تغلیظ اکسیژن رسم شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با تغلیظ بیشتر اکسیژن سرعت اولیه‌ی احتراق نیز افزایش می‌یابد. با یک محاسبه‌ی سرانگشتی، این بدان معنی است که سرعت شعله افزایش یافته و ضخامت شعله نیز کم می‌شود. با افزایش سرعت شعله امکان پس زدن شعله (Flashback) نیز بیشتر می‌شود و به همین دلیل می‌بایست در قطر نازل‌های خروجی مخلوط سوخت و هوا تصحیحات لازم انجام شود تا از این امر جلوگیری شود. در غیر این صورت با پس زدن شعله امکان آسیب دیدن مشعل و در نهایت امکان انفجار منع احتراقی نیز افزایش می‌یابد. از سوی دیگر چنانچه از قطر نازل‌های خروجی بدون در نظر گرفتن میزان افزایش سرعت شعله کاسته شود، پرش شعله (Liftoff) اتفاق می‌افتد و از آنجا که در این حالت شعله بر روی سر مشعل پایداری به خصوصی ندارد، امکان انفجار بستر احراقی نیز افزایش می‌یابد. جدای از این، میزان رهایش آلاینده‌ها در این حالت به شدت افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش سرعت اولیه‌ی احتراق، کمترین انرژی جرعه (Minimum Ignition Energy) نیز کاهش می‌یابد و این بدان معنی است که چنین

دارد، راحت‌تر انجام شده و احتمال انجام و تکمیل چنین واکنش‌هایی افزایش می‌یابد. این امر به خوبی در شکل (۳) مشهود است. اما در مورد اجزاء فرعی که تغییرات غلظت آنها در شکل (۴) آمده است، وضعیت کمی متفاوت است. در این حالت دو اثر رقابتی مشاهده می‌شود. از یک سو به دلیل افزایش غلظت اکسیژن در هوای ورودی دمای شعله افزایش یافته و بدین ترتیب واکنش‌های گرماگیر پیشرفت می‌کنند و از طرف دیگر غلظت نیتروژن در هوای ورودی در حال کم شدن است و بدین ترتیب در اجزائی که نیتروژن در آنها وجود دارد، یک نوع حالت رقابتی مشاهده می‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای اجزائی همچون N ، NH_2 و NH_3 یک نقطه‌ی بیشینه وجود دارد. از یک سو غلظت نیتروژن به دلیل تغلیظ اکسیژن در حال کم شدن می‌باشد و از سوی دیگر غلظت نیتروژن به دلیل افزایش دمای بی‌درروی شعله و تجزیه‌ی بیشتر حرارتی افزایش می‌یابد و به همین دلیل برای چنین اجزاء فرعی یک نقطه‌ی بیشینه وجود دارد.

محاسبات سینتیکی فرایند احتراق همراه با تغلیظ اکسیژن

اگرچه تاکنون سازوکار دقیق و قابل قبولی که تمام جوانب اکسایش هیدروکربنها را در برگیرد، ارائه نشده است، با این همه سعی شده است یکسری روابط سینتیکی کلی و عمومی که وابسته به مراحل میانی نباشد، توسعه یابد. مدل‌هایی از این دست برای تقریب‌های سریع مهندسی بسیار مفیدند. برای نمونه Westbrook و Dryer یکسری روابط سینتیکی برای احتراق هیدروکربنها با سازوکار تک مرحله‌ای، دو مرحله‌ای و چند مرحله‌ای ارائه کرده‌اند که در آنها بدون در نظر گرفتن واکنش‌های میانی، ثوابت سرعت و دیگر متغیرها در معادله‌ی سرعت محاسبه شده است. در سازوکار احتراق تک مرحله‌ای فرض می‌شود که سوختی با فرمول C_xH_y به صورت مستقیم با اکسیژن واکنش داده و محصولات احتراقی نیز تنها آب و

مخلوطی از سوخت و هوای تغلیظ شده از اکسیژن برای احتراق نیاز به جرقه‌ی کوچکتر با انرژی کمتری دارد و این امر از لحاظ محاسبات فرایندی و ایمنی اهمیت دارد.

اثرات کاربرد فن آوری غشایی بر بهبود عملکرد سیستم احتراقی

اشکال (۶) الی (۱۳) آثار و نتایج برخی از مطالعات تجربی که با استفاده از سیستم تغلیظ اکسیژن توسط غشاء بر فرایند احتراق به دست آمده است، را نشان می‌دهد. شکل (۶) اثر استفاده از این فن آوری را بر مصرف سوخت نشان می‌دهد [۱۳]. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در دمای ۸۱۶ درجه‌ی سانتیگراد چنانچه غلظت اکسیژن از ۲۱٪ به ۳۰٪ برسد، میزان مصرف سوخت حدود ۱۳٪ کاهش خواهد یافت. با توجه به اینکه دمای ۸۱۶ درجه‌ی سانتیگراد در گازهای احتراقی دمای متعارف کوره‌های ذوب شیشه است، می‌توان تصور نمود که با تغلیظ اکسیژن تا مرز ۳۰٪ میزان مصرف سوخت در این کوره‌ها حدود ۱۳٪ کاهش می‌یابد. به بیانی دیگر تحت این شرایط چنانچه همان مقدار سوخت مصرف شود، ۱۳٪ بر میزان محصول افزوده می‌شود. همچنین در اشکال (۷)، (۸) و (۹) آثار استفاده از این فن آوری بر راندمان حرارتی موتورهای احتراق داخلی (از نوع دیزل)، قدرت نسبی آنها و زمان احتراق و جرقه زدن آنها نشان داده شده است [۸، ۹، ۱۰]. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش راندمان حرارتی، زمان احتراق کاهش و قدرت نسبی موتور افزایش یافته و به پیامد آن تولید آلاینده‌هایی مانند دوده، مونوکسید کربن و هیدروکربنهای نسوخته کاهش یافته است (اشکال (۱۰) الی (۱۲)). در این میان با توجه به افزایش دمای محصولات احتراقی، میزان تولید NO_x افزایش می‌یابد (شکل (۱۳)). برای حذف NO_x تولید شده، مؤسسه‌ی تحقیقاتی Argonne در ایالات متحده روشی را پیشنهاد کرده است که طرح کلی آن در شکل (۱۴) آورده شده است [۱۴]. همان گونه که مشاهده می‌شود در این روش از جریان

باقیمانده‌ی غشاء که از نیتروژن تغلیظ شده است برای حذف NO_x استفاده می‌شود. مشاهده می‌شود با عبور این جریان از یک قوس الکتریکی، ملکولهای نیتروژن به اتمهای نیتروژن تبدیل شده و سپس این جریان به گازهای خروجی از آگروز تزریق می‌شود. با واکنش نیتروژن اتمی (N^*) با NO_x ، این آلاینده به گازهای بی‌خطر نیتروژن (N_2) و اکسیژن (O_2) تبدیل می‌شود.

ملاحظات اقتصادی

در جداول (۱) و (۲) مقایسه‌ای بین قیمت انواع سیستمها برای کاهش آلودگی هوا در مقایسه با فن آوری غشایی آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود روش تغلیظ اکسیژن نسبت به دیگر روشها از قیمت پایین تری برخوردار است. جدای از این، این فن آوری مشکلات جانبی دیگر روشها را ندارد و به همین دلیل پیش‌بینی می‌شود که این فن آوری یکی از روشهای مهم و اساسی برای کاهش آلودگی و مصرف سوخت در سالیان آتی باشد. هم اکنون انجمن حفاظت محیط زیست ایالات متحده (USEPA) بر اساس این فن آوری استانداردهای جدیدی را برای خودروهای دیزل وضع نموده است. در جدول (۳) نیز هزینه‌ی ساخت یک نمونه‌ی غشاء پلیمری برای تغلیظ اکسیژن آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود هزینه‌ی کلی ساخت هر ماژول غشاء حدود ۱۳۱\$ در سال ۱۹۹۵ می‌باشد. این رقم نسبت به مزایای کلی استفاده از غشاء مانند کاهش آلودگی و افزایش قدرت موتور بسیار اندک است. لازم به توضیح است که در سالهای اخیر صنعت ساخت غشاء و دانش فنی لازم در این زمینه نیز توسعه‌ی فراوانی پیدا کرده است. چنانچه در شکل (۱۵) مشاهده می‌شود طی سالهای ۱۹۹۰ تا ۱۹۹۹ حجم ماژول غشاء برای واحد دبی گاز تقلیل محسوسی پیدا کرده است. این نمودار سرعت و پیشرفت سریع این فن آوری را می‌رساند که در طی ۹ سال حدود ۳۰ برابر از حجم غشاء برای همان کارایی کاسته شده است.

بحث و نتیجه گیری

در مجموع مزایای استفاده از این فن آوری را می توان در موارد زیر خلاصه کرد:

۱. با استفاده از این روش راندمان حرارتی افزایش می یابد.

۲. با استفاده از این روش از میزان مصرف سوخت چه در منابع احتراقی باز و چه در منابع احتراقی بسته کاسته می شود.

۳. با استفاده از این فن آوری میزان رهایش آلاینده های مختلف کاهش می یابد. کاهش رهایش مونوکسید کربن، هیدروکربنهای نسوخته، ذرات ریز معلق و دوده از جمله مواردی است که در این روش از میزان انتشار آنها کاسته می شود. تنها نکته منفی در این فن آوری افزایش غلظت اکسیدهای نیتروژن است که مؤسسه تحقیقاتی Argonne نیز برای آن راه حلی را ارائه داده است که این راه حل در بخش قبلی شرح داده شد.

۴. این فن آوری در مقایسه با فن آوریهای مشابه برای کاهش آلودگی بسیار ارزان تر می باشد. همچنین مشکلات جانبی دیگر روشها (مانند کلوخه شدن کاتالیستها در مبدل کاتالیستی) را نیز ندارد.

۵. این روش در مقایسه با روشهای مشابه، جامع تر می باشد.

۶. این روش از پیچیدگی خاصی برخوردار نیست و به راحتی می توان آنرا در سیستمهای احتراقی نصب کرد.

بنابراین به نظر می رسد که این فن آوری با توجه به جامعیت آن در آینده و در مقیاس انبوه مورد استفاده قرار گیرد. اگر چه هم اکنون استفاده از این فن آوری در برخی از ایالتهای

آمریکا به صورت آزمایشی آغاز شده است، اما با توجه به رشد سریع فن آوری غشائی از یک سو و ساخت غشاءهای کارا تر و ارزان تر از سوی دیگر، می توان پیش بینی نمود که در آینده نزدیک نصب ماژول غشائی در بیشتر خودروها اجباری شود.

تقدیر و تشکر

در انجام محاسبات ترمودینامیکی فرایند احتراق پروفیسور Steve Turns، استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه ایالتی پنسیلوانیا (Pennsylvania) و پروفیسور Chris Morley استاد دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه لیدز (Leeds) کمک فراوانی کرده اند که لازم است از این دو استاد برجسته تشکر کنم، به ویژه پروفیسور Morley که با راهنماییهای ارزنده موجب تسریع انجام محاسبات ترمودینامیکی شدند.

مراجع

1. D.R. Paul and W.J. Koros, J. of Polymer Sci. Polymer Phys. Ed., 14:675, 1976.
2. R.D. Present, "Kinetic Theory of Gases", McGraw-Hill, New York, p.61, 1958.
3. W.R. Vieth, J.M. Howell, and J.H. Hsieh, "Dual Sorption Theory", J. of Membrane Science, vol. 1, p. 177, 1976.
4. R.T. Chem, W.J. Koros, H.B. Hofferberg, and V.T. Stannet, "Materials Science of Synthetic Membranes", American Chemical Society, Washington, D.C., P.25, 1985.
5. W.J. Koros, and R.T. Chem, "Handbook of Separation of Process Technology", R.W. Rousseau, Ed., Wiley Inc., New York, p. 802, 1983.
6. Membrane-based air composition control for light-duty Diesel vehicles: A benefit & cost assessment, Argon National

- Diesel Vehicles: A Benefit and Cost Assessment”, Center for Transportation Research, Argonne National Laboratory, USA, ANL/ESD/TM-144, OCT. 1998.
13. S.G. Kimura, W.R. Browall, “Demonstration of Oxygen enrichment for Natural Gas Combustion” J. of Membrane Sci., pp. 69-77, 1986.
 14. “Technology Transfer at Argonne”, Argonne National Lab., 2001.
 15. Watson et al., “Oxygen Enrichment Membrane of Fuels”, United States Patent, No. 5117800, 1992.
 16. E. F. Vansant & R. Dewolfs, Gas Separation Technology, Proceeding of International Symposium on Gas Separation Technology, Elsevier Science Publishers, 1989.
 17. Watson et al., “Oxygen Enrichment Membrane of Fuels”, United States Patent, No. 5117800, 1992.
 - Laboratory, United States Department of Energy, (Chicago University).
 7. Westbrook, C.K., and Dryer, F.L., “Simplified Reaction Mechanism for the Oxidation of Hydrocarbon Fuels in Flames”, Combustion Science and Technology, 27, pp. 31-43, 1981.
 8. Ghojel et al., “Effect of Oxygen Enrichment on the Performance of IDI Diesel Engines”, SAE Paper No. 830245.
 9. Sekar, R.R, W.W.Marr, J.E. Schaus, R.L. Cole, 1990, “Diesel Engines Experiments with Oxygen Enrichment, Water Addition and Lower-Grade Fuel,”, Proceeding of the 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol. 4.
 10. Wartinbee, Jr., W.J., 1971, “Emissions Study of Oxygen Enriched Air”, SAE Paper No. 710606.
 11. “Technology Transfer at Argonne”, Argonne National Lab., 2001.
 12. K. Stork, R. Poola, “Membrane-Based Air Composition Control for Light- Duty

جدول ۱- هزینه کنترل و کاهش انواع آلاینده‌های تولید شده با استفاده از روشهای مختلف [۱۲،۶]

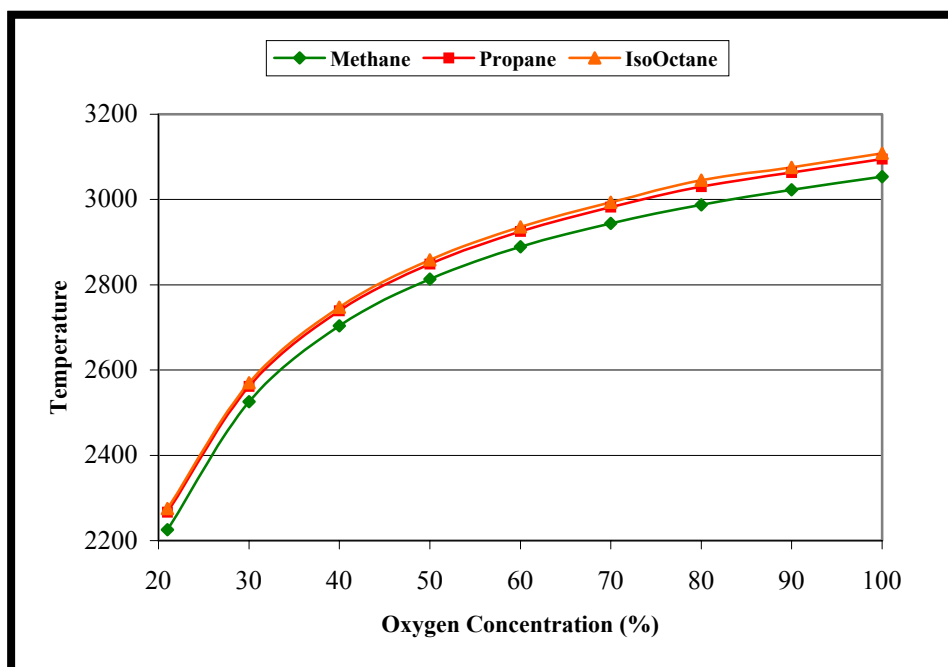
Technology	Approximate Cost
Lean NO _x Catalyst + EGR	\$300
PM Trap + Fuel Additives	\$200 + \$0.02/gal
LNC, EGR + PM Trap	\$500
Larger Engine	??? (Probably > 10% engine cost)

جدول ۲- هزینه کنترل و کاهش انواع آلاینده‌های تولید شده با استفاده از روش غشائی [۱۲،۶]

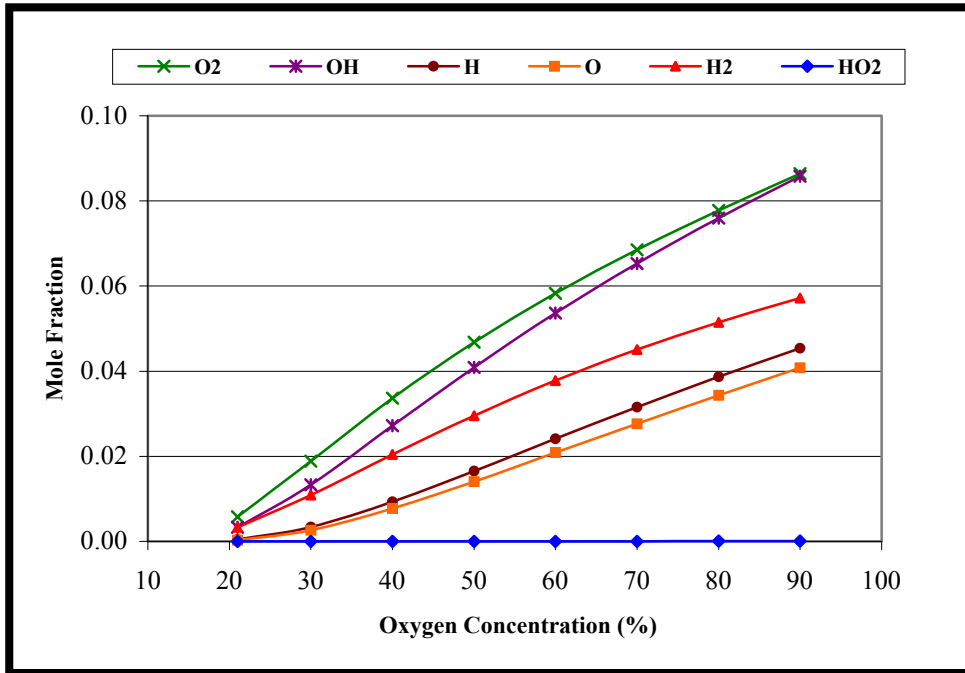
Case Description	Production Cost
NO _x control with Nitrogen Enrichment	\$75 – 110
PM control with Oxygen Enrichment	\$140 – 200
Power Enhancement with Oxygen Enrichment	\$180 – 260
Late-Cycle Oxygen Enriched Air Injection	\$100 – 120

جدول ۳- بررسی اقتصادی ساخت یک غشاء تغلیظ اکسیژن [۱۲،۶]

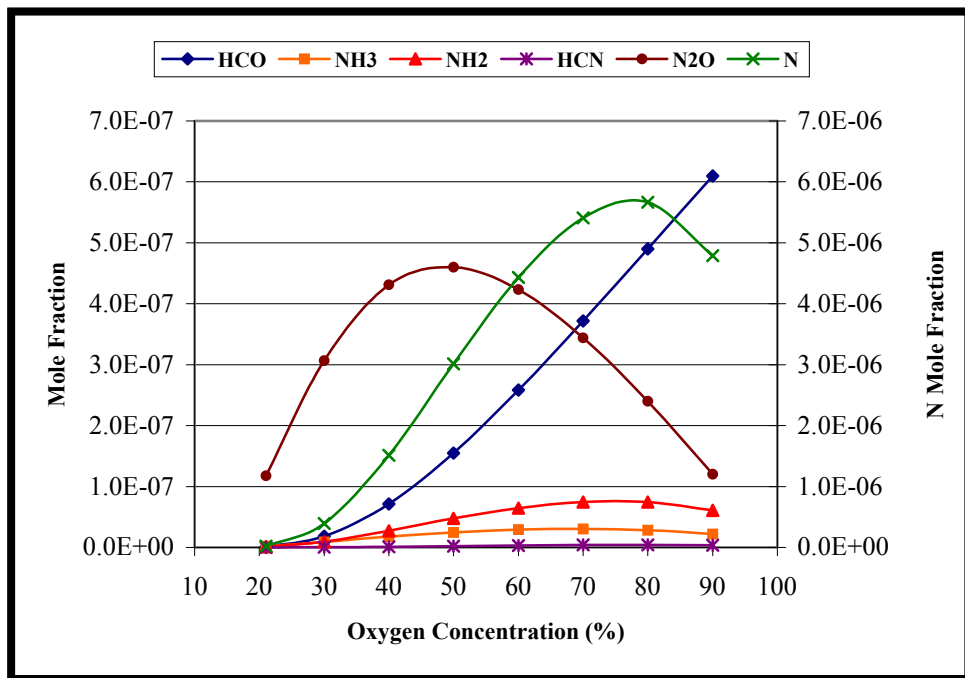
Variable	Amount Required	Cost	Cost per Year (\$)	Square Foot (\$)	Cost per Module
Material					
Polysulfone (for Fiber Support)	9275 lb/yr	\$3.92/lb	36287	0.04	3.63
Dimethyl acetamide solvent	24400 lb/yr	\$0.92/lb	22448	0.02	2.24
Waste solvent disposal	24400 lb/yr	\$0.50/lb	12200	0.01	1.22
Epon 826 resin	0.7 lb/module	\$1.31/lb	9301	0.01	0.93
Neopentyl glycol diglycidyl ether	0.1 lb/module	\$1.10/lb	880	0.00	0.09
Aluminum powder	0.5 lb/module	\$4.65/lb	24180	0.02	2.42
Tube sheet curing agent	0.1 lb/module	\$9.00/lb	5760	0.01	0.58
Defect repair solution	0.4 lb/module	\$1.50/lb	6000	0.01	0.06
Membrane coating material	10000 modules/yr	\$36.0/module	360000	0.36	36.00
Low pressure shells	10000 modules/yr	\$10.0/module	100000	0.1	10.00
Operating Cost					
Utilities			20000	0.02	2.00
Maintenance labor and material			42000	0.04	4.20
Labor			100000	0.10	10.00
Testing laboratory			120000	0.12	12.00
Plant overhead			115400	0.12	11.54
Depreciation, Taxes, Insurance			84000	0.08	8.40
Total Operating Cost			1058456	1.06	105.85
Capital Recovery (5 year at 10%)			250608	0.25	25.06
Total Cost			1309064	1.31	130.91



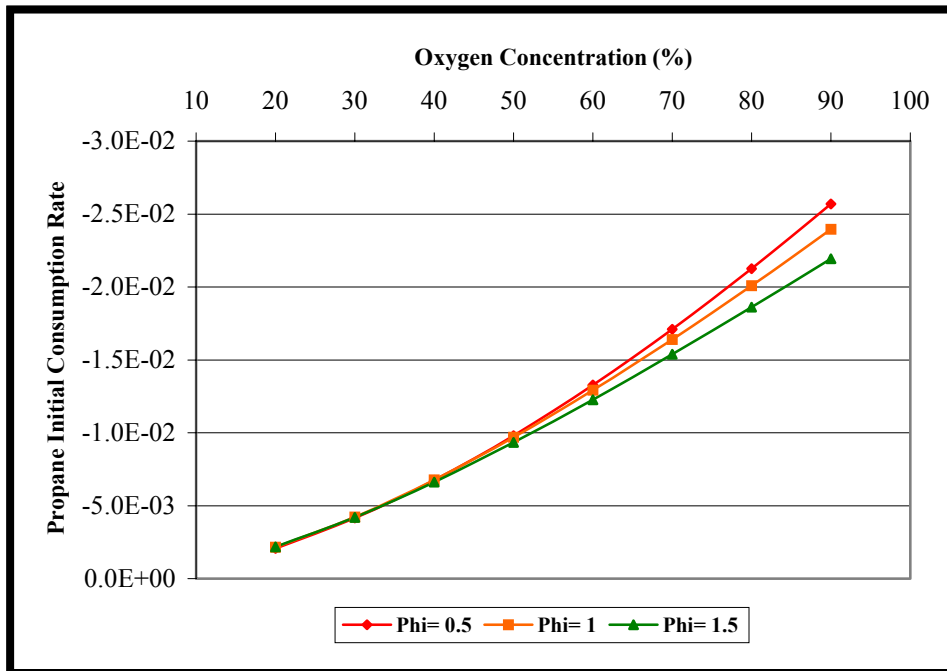
شکل ۲- تغییرات دمای شعله‌های متان، پروپان و ایزواکتان (کلوین) نسبت به درصد تغلیظ اکسیژن



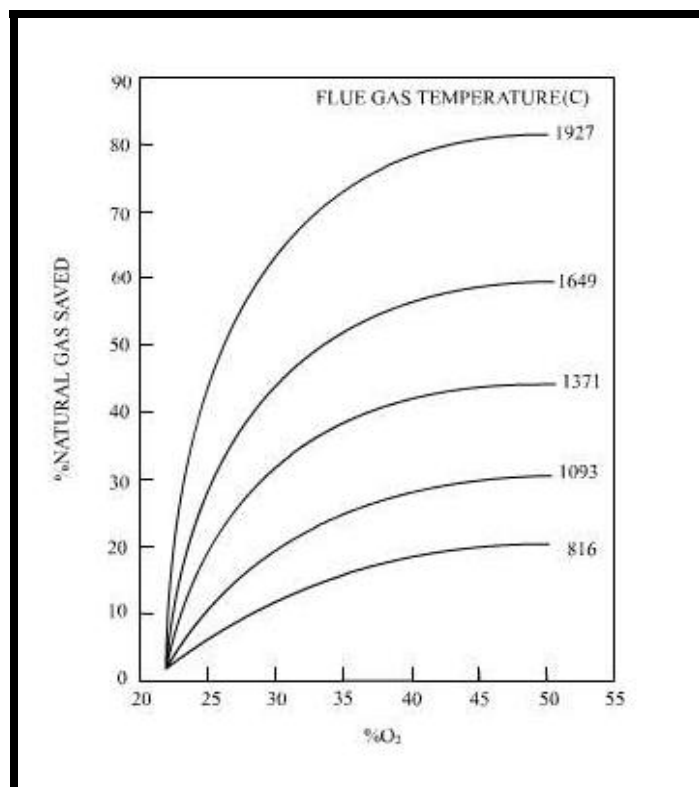
شکل ۳- تغییرات غلظت اجزاء اصلی احتراق پروپان نسبت به تغییر غلظت اکسیژن



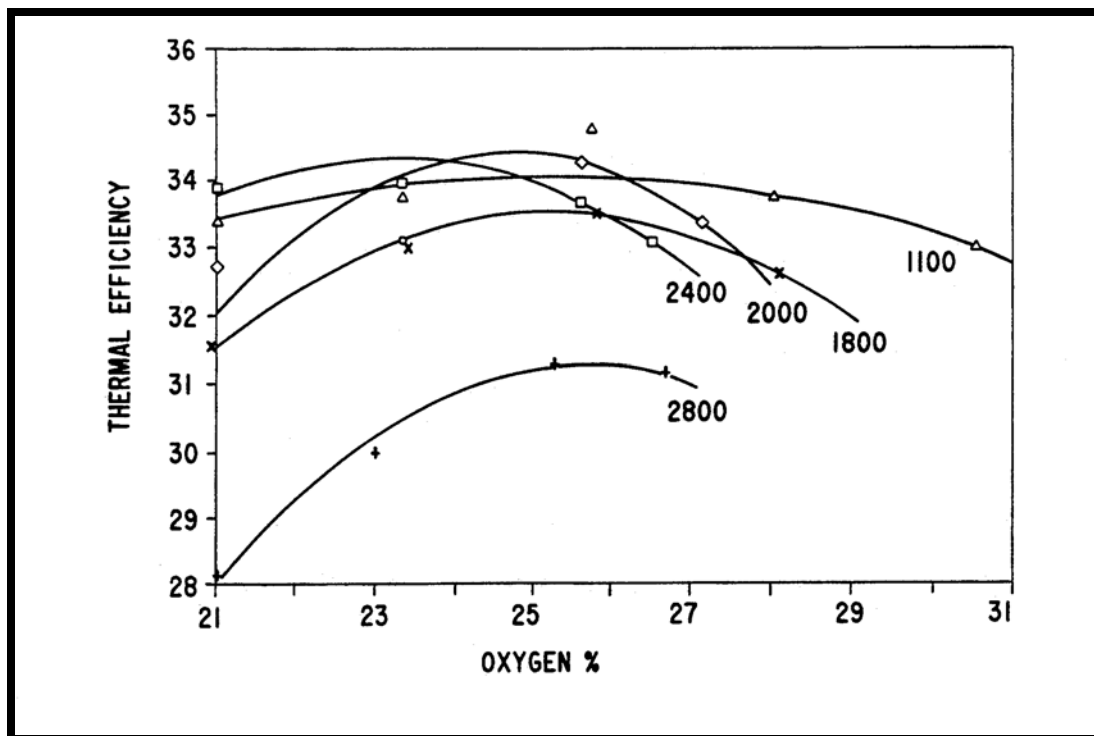
شکل ۴- تغییرات غلظت اجزاء فرعی احتراق پروپان نسبت به تغییر غلظت اکسیژن



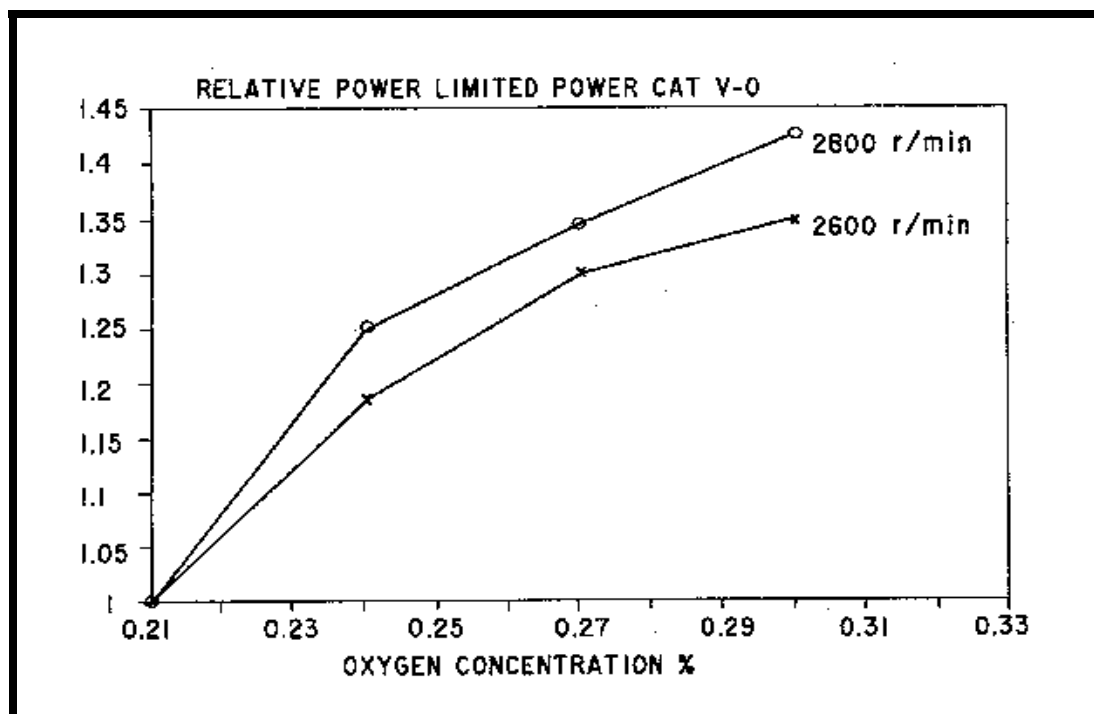
شکل ۵- تغییرات سرعت اولیه‌ی احتراق پروپان نسبت به تغلیظ اکسیژن در نسبت‌های تعادل مختلف



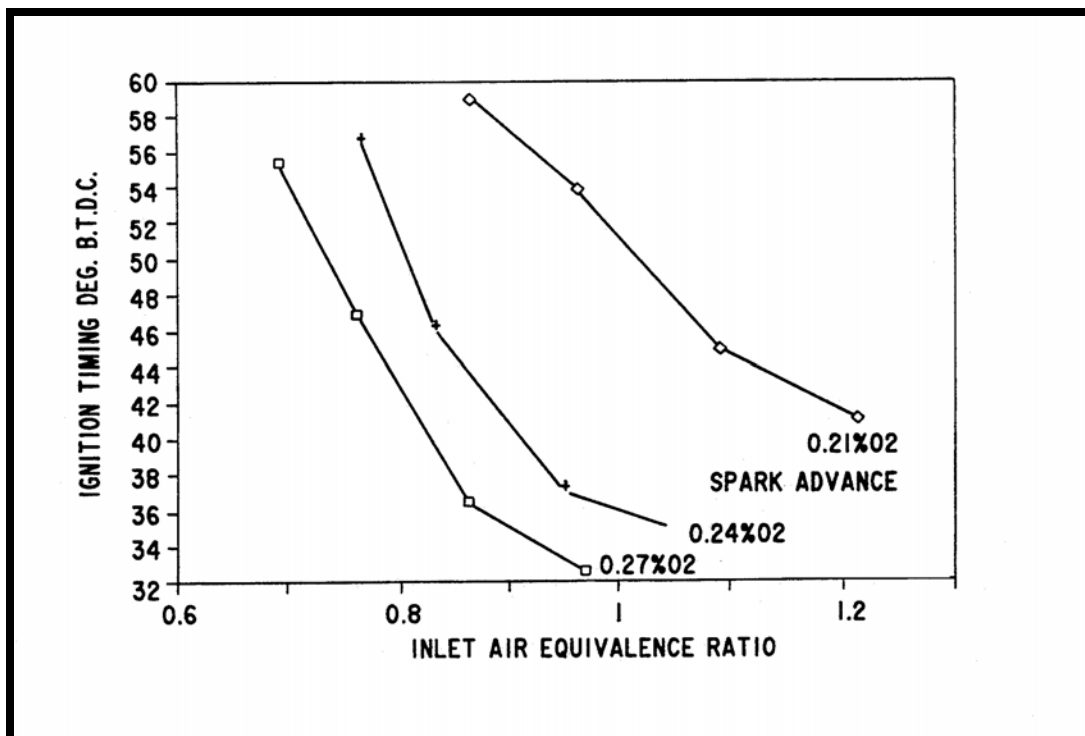
شکل ۶- اثر تغلیظ اکسیژن بر میزان صرفه جویی متان در فرایند احتراق [۱۳]



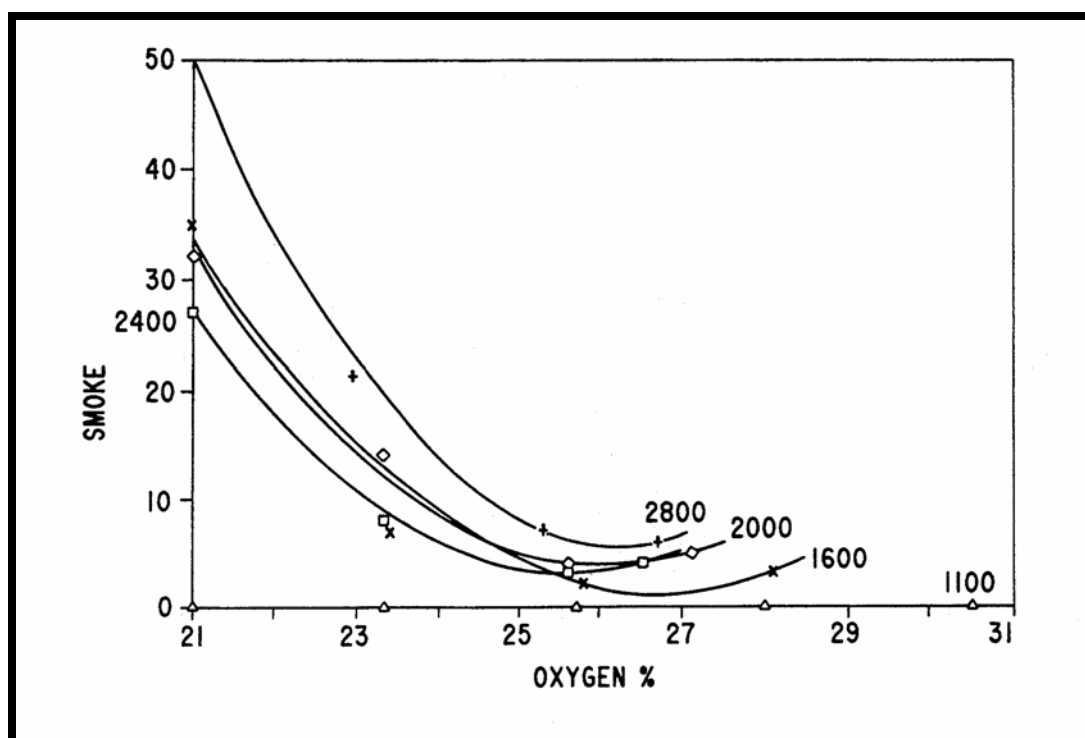
شکل ۷- تغییرات راندمان حرارتی موتور نسبت به هوای تغلیظ شده از اکسیژن در دورهای مختلف [۱۵]



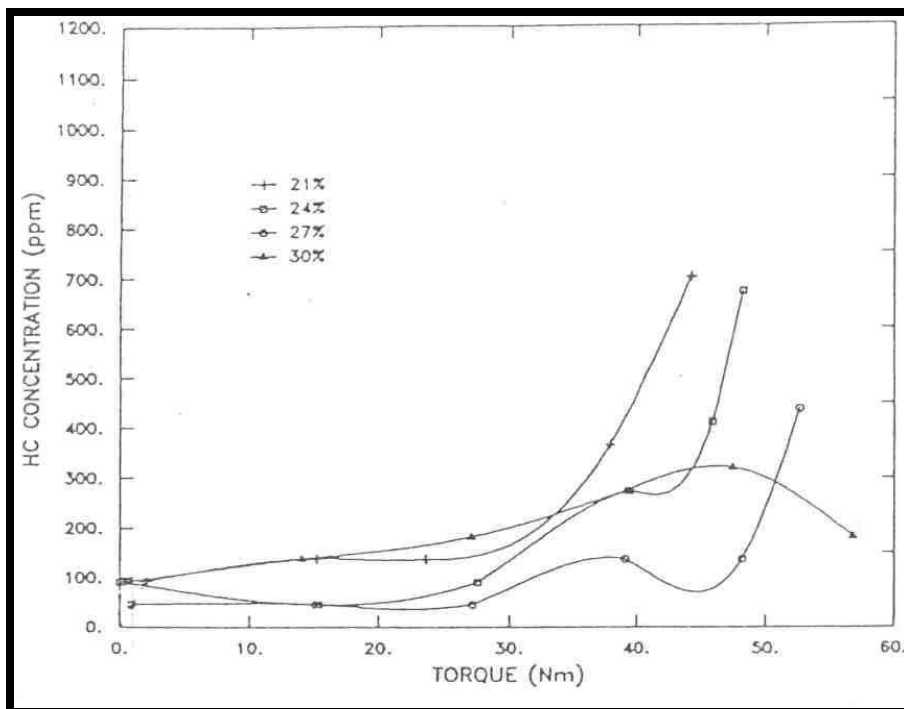
شکل ۸- تغییرات قدرت نسبی موتور نسبت به هوای تغلیظ شده از اکسیژن در دورهای مختلف موتور [۱۵]



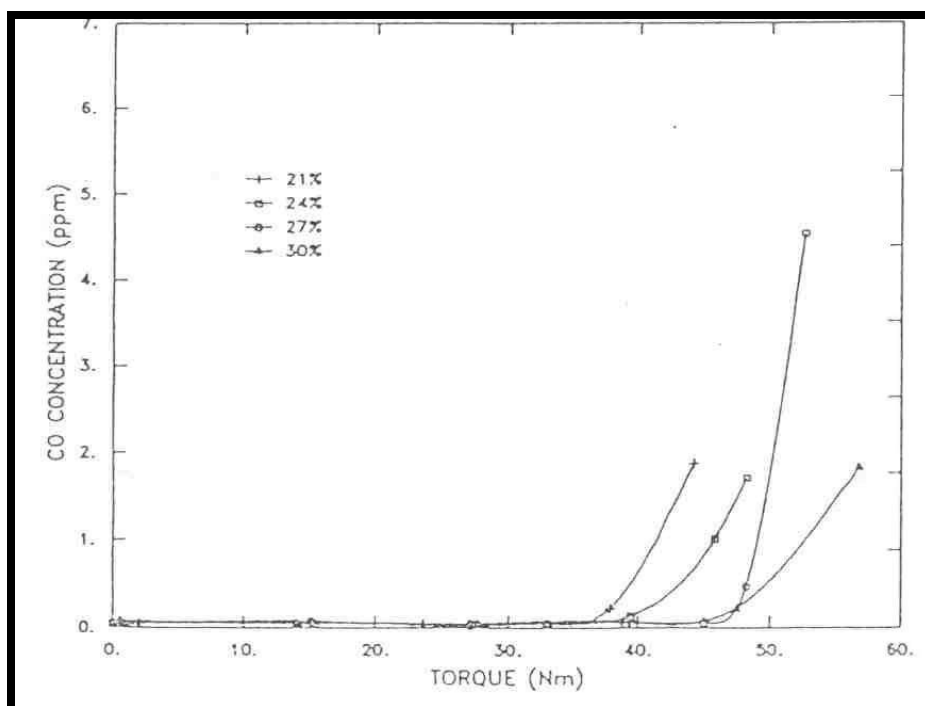
شکل ۹- تغییرات زمان احتراق و جرقه زدن نسبت به Equivalence Ratio در فرایند احتراق در غلظتهای مختلف اکسیژن [۱۵]



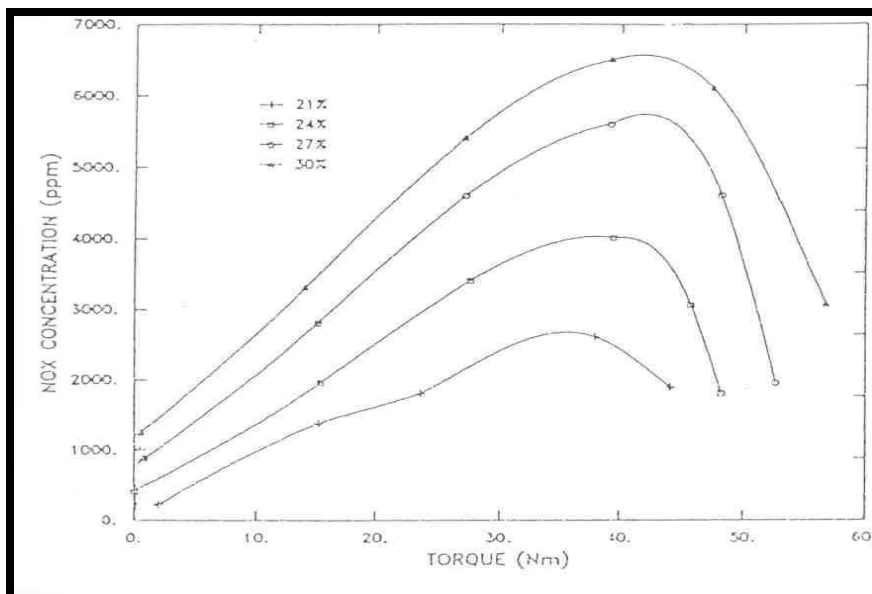
شکل ۱۰- مقدار کاهش رهایش دوده نسبت به هوای تغلیظ شده از اکسیژن در دورهای مختلف موتور [۱۵]



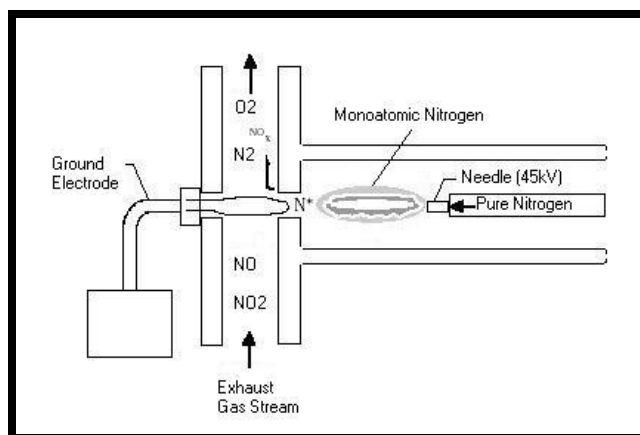
شکل ۱۱- رهایش هیدروکربنهای نسوخته در غلظتهای مختلف اکسیژن نسبت به گشتاورهای مختلف موتور [۸]



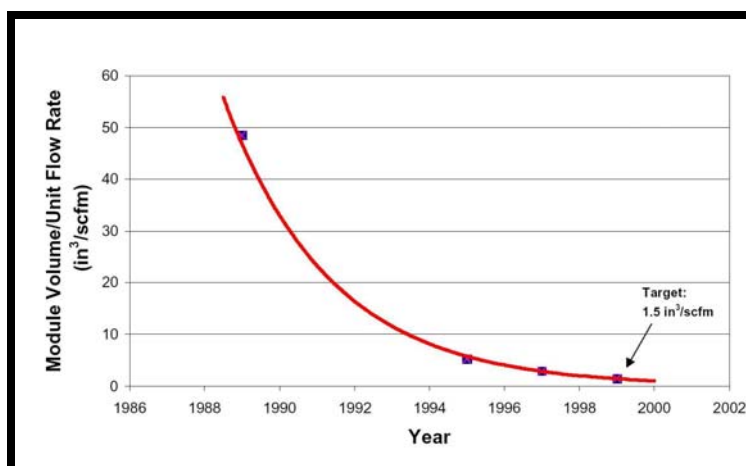
شکل ۱۲- رهایش مونوکسید کربن در غلظتهای مختلف اکسیژن نسبت به گشتاورهای مختلف موتور [۸]



شکل ۱۳- رهائش اکسیدهای نیتروژن در غلظتهای مختلف اکسیژن نسبت به گشتاورهای مختلف موتور [۸]



شکل ۱۴- طرح مؤسسه‌ی تحقیقاتی Argonne برای حذف NO_x تولید شده در روش تغلیظ اکسیژن [۶، ۱۲]



شکل ۱۵- پیشرفت ساخت غشاء طی سالهای ۱۹۹۰-۱۹۹۹ [۶، ۱۲]