

## تولید سولکتال از گلیسیرین به عنوان افزودنی سوخت بنزین: سنتز، خواص فیزیکی و شیمیایی، عملکرد موتور و آلاینده‌های حاصل از احتراق

محسن کشاورزی<sup>۱</sup>، مرتضی آغباشلو<sup>۲\*</sup>، میثم طباطبایی<sup>۳</sup>، علی حاجی احمد<sup>۴</sup>، هاجر رستگاری<sup>۵</sup>، پویا محمدی<sup>۶</sup>

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران، Mohsen.keshavarzi@ut.ac.ir

۲- دانشیار، مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران، maghbashlo@ut.ac.ir

۳- استاد، مرکز عالی مؤسسه عالی، مؤسسه آبی‌پروری و شیلات گرمسیری، دانشگاه مالزی ترنگانو، ۲۱۰۳۰ کوالا نروس، ترنگانو، مالزی،

meisam.tabatabaei@umt.edu.my

۴- استادیار، مهندسی ماشین‌های کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج، ایران، hajiahmad@ut.ac.ir

۵- استادیار، مرکز عالی مؤسسه عالی، مؤسسه آبی‌پروری و شیلات گرمسیری، دانشگاه مالزی ترنگانو، ۲۱۰۳۰ کوالا نروس، ترنگانو، مالزی،

ha\_ra353@yahoo.com

۶- دانشجوی دکتری، مرکز عالی مؤسسه عالی، مؤسسه آبی‌پروری و شیلات گرمسیری، دانشگاه مالزی ترنگانو، ۲۱۰۳۰ کوالا نروس، ترنگانو، مالزی،

mohamadi\_pouya@yahoo.com

\*نویسنده مخاطب

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۸/۰۶، دریافت آخرین اصلاحات: ۱۴۰۱/۰۹/۲۳، پذیرش: ۱۴۰۱/۱۰/۱۸)

**چکیده:** نیروی محرکه خودروهایی شهری رایج معمولاً توسط موتورهای اشتعال جرقه‌ای که با سوخت بنزین کار می‌کنند، تولید می‌شوند. احتراق سوخت بنزین در موتورهای اشتعال جرقه‌ای منجر به آلودگی هوای مناطق شهری و همچنین کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی می‌شود. افزودن اتانول به دلیل ساختار زیستی آن، یکی از گزینه‌های کاهش میزان آلاینده‌های سوخت بنزین توأم با جایگزین منابع فسیلی است. اگرچه وجود اتانول سبب احتراق بهتر سوخت و کاهش آلاینده‌های حاصل از احتراق می‌شود، افزایش میزان اکسیدهای نیتروژن یکی از مشکلات زیست‌محیطی استفاده از درصد ترکیب بالای اتانول در سوخت است. از طرف دیگر، گلیسیرین به‌عنوان محصول جانبی فرایند تولید بیودیزل یک عامل محدودکننده در تولید انبوه بیودیزل است. در این مطالعه با تبدیل گلیسیرین به سولکتال و اختلاط آن با سوخت بنزین حاوی اتانول، ترکیب افزودنی منحصربه‌فرد از سوخت‌های زیستی برای سوخت بنزین با بهینه‌ترین عملکرد و کمترین میزان آلاینده‌های معرفی می‌شود. نتایج این مطالعه نشان داد که افزودن ۵٪ حجمی سولکتال به سوخت بنزین حاوی ۲۰٪ حجمی اتانول دارای بهترین عملکرد موتور است به طوری که میزان توان ترمزی بهبود قابل ملاحظه‌ای مخصوصاً در دور موتورهای بالا در مقایسه با سوخت بنزین حاوی ۲۰٪ اتانول است. علاوه بر آن مصرف سوخت ویژه ترمزی با سوخت حاوی ۵٪ سولکتال در گشتاورهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ به ترتیب در حدود پنج، دو و هفت دهم درصد کاهش داشته است. همچنین افزودن ۵٪ سولکتال علاوه بر حفظ تأثیرات مثبت افزودن اتانول در کاهش آلاینده‌های خروجی موتور، سبب کاهش معنی‌دار انتشار اکسیدهای نیتروژن تا حدود ۹۰٪ که از معایب افزودن اتانول به سوخت است، می‌شود.

**کلیدواژه‌گان:** اتانول، سولکتال، بنزین، گازهای خروجی اگزوز، عملکرد موتور

### مقدمه

امروزه تقریباً ۸۵ درصد از سوخت مصرفی در کل جهان از سوخت‌های فسیلی به دست می‌آید [۱]. تحقیقاتی که در سراسر دنیا انجام شده نشان می‌دهد که بخش حمل‌ونقل جاده‌ای بیشترین مصرف‌کننده هیدروکربن‌های فسیلی و در نتیجه منبع اصلی آلودگی هوا در مراکز شهری و نیمه‌شهری است [۲]. بر همین اساس انتظار می‌رود که تعداد وسایل نقلیه تا سال ۲۰۳۰

به ۱/۳ میلیارد، و تا سال ۲۰۵۰ به ۲ میلیارد افزایش پیدا کند، و این تعداد بیشتر از کشورهای در حال توسعه منشأ می‌گیرد [۳]. قیمت‌های افزایشی و ناپایدار سوخت در کنار ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، لزوم بالابردن کارایی موتورهای درون‌سوز<sup>۱</sup> (ICE) را مطرح کرده است [۴].

بنزین ماده‌ای است که به‌عنوان سوخت در وسایل نقلیه و سایر وسایلی که از موتور استفاده می‌کنند، به مصرف می‌رسد. موتورهای بنزینی به‌عنوان موتورهای احتراق جرقه‌ای، یکی از مهم‌ترین موتورهای مورد استفاده در بخش حمل‌ونقل جاده‌ای است؛ بنابراین، با افزایش جمعیت و نیازهای جامعه جهانی بر استفاده از انرژی بیشتر، میزان تولید و مصرف بنزین در جهان رو به افزایش است [۵]. آلودگی‌هایی که توسط بخش حمل‌ونقل جاده‌ای تولید می‌شوند، از جمله ذرات معلق<sup>۲</sup>، هیدروکربن‌های نسوخته<sup>۳</sup>، مونواکسید کربن<sup>۴</sup> و اکسیدهای نیتروژن<sup>۵</sup> تأثیر بسیاری بر کیفیت هوای شهری دارد [۶]. از آنجا که احتراق در موتورهای احتراق جرقه‌ای به طراحی موتور و همچنین کیفیت سوخت بستگی دارد [۷]، می‌توان با تغییر کیفیت سوخت مصرفی در جهت کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی گام برداشت. آلودگی محیطی شدیدی که توسط منابع سوخت محدود فسیلی و غیر تجدیدپذیر ایجاد می‌شود، موجب شده که جستجوها به سمت منابع انرژی تجدیدپذیر و سالم سوق داده شود [۸]. باتوجه به پتانسیل قابل‌توجه کشاورزی در تولید انرژی زیست‌توده، می‌توان آن را به‌عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر موردتوجه قرار داد. سوخت‌های زیستی انواع مختلفی دارند که می‌توانند از زیست‌توده به روش‌های مختلف تولید شوند [۹] و به‌عنوان سوخت یا افزودنی سوخت مصرف شوند.

استفاده از سوخت‌های بنزینی حاوی افزودنی سال‌ها موردتوجه پژوهشگران بوده و در این مدت افزودنی‌های بسیاری به سوخت بنزین مورد آزمایش قرار گرفته است. اغلب تمرکزها بر روی افزودن اتانول، ترکیبات هیدروژن‌دار، ترکیبات اکسیژن‌دار، ترکیبات الکلی و غیره به بنزین بوده است. مطالعات زیادی در زمینه سوخت‌های اکسیژنه مانند متانول، اتانول، مشتقات گلیسرول یا دیگر سوخت‌های الکلی در موتورهای جرقه‌ای یا موتورهای اشتعال تراکمی وجود دارد [۱۰-۱۳]. در بین الکل‌های مختلف، اتانول و متانول به دلیل ارزان بودن و داشتن خواص مشابه بنزین بالاترین پتانسیل استفاده در بخش حمل‌ونقل را دارند [۹، ۱۴]. از آنجایی که استفاده از اتانول خالص به‌عنوان سوخت در موتورها نیاز به تغییراتی در موتور دارد، از مخلوط اتانول و بنزین به‌عنوان سوخت استفاده می‌شود [۱۵]. ترکیب اتانول و بنزین باعث افزایش عدد اکتان تحقیقاتی (RON) می‌شود، به طوری که ترکیب ۳۰ درصد اتانول در بنزین باعث افزایش RON از ۹۲ تا ۱۰۰ می‌شود که برابر با عدد اکتان ایزو اکتان است [۱۶]. علاوه بر این، ترکیب فوق می‌تواند در بهبود عملکرد موتور مؤثر باشد. افزودن اتانول به بنزین با درصد‌های مختلف باعث افزایش گشتاور خروجی از موتور و میزان مصرف سوخت می‌شود [۱۷].

بیشتر تحقیقات تجربی نشان می‌دهند که افزودن اتانول به سوخت بنزین می‌تواند میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مونواکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته در موتورهای اشتعال جرقه‌ای در شرایط کاری گوناگون را کاهش می‌دهد [۱۸]. اما بعضی تناقض‌ها در مورد انتشار اکسیدهای نیتروژن توسط تعداد زیادی از پژوهشگران گزارش شده است. محققان آژانس حفاظت از محیط‌زیست (EPA)، از اکسیدهای نیتروژن به‌عنوان یکی از آلاینده‌های مهم که می‌تواند بر سیستم تنفسی تأثیر منفی بگذارد نام برده‌اند. به دلیل افزایش مصرف اتانول و استفاده از آن به‌عنوان افزودنی به سوخت بنزین در موتورهای احتراق داخلی، تولید بیش‌تر اکسیدهای نیتروژن مشاهده شده است و لذا می‌تواند یک مانع مهم برای گسترش بازار اتانول باشد [۱۹، ۲۰]. به همین منظور به نظر می‌رسد می‌توان از مواد دیگر جهت ترکیب با سوخت استفاده کرد.

1. Internal Combustion Engines  
2. PPM  
3. UHC  
4. CO  
5. NOx

بیودیزل یک سوخت جایگزین برای سوخت‌های فسیلی است که از نظر فنی مناسب، از لحاظ اقتصادی با صرفه، بادوام و سازگار با محیط‌زیست است. این سوخت زیستی تجدیدپذیر بیشتر با استفاده از ترانس استرئیکاسیون<sup>۱</sup> اسیدهای چرب بلند زنجیره‌ای بر پایه حیوانات و الکل‌های کوتاه زنجیره‌ای مانند متانول و اتانول تولید می‌شوند [۲۱-۲۲]. محصولات فرایند ترانس استرئیکاسیون متیل/اتیل استر و گلیسرول هستند [۲۳]. گلیسرول به‌عنوان محصول تولیدشده در فرایند تولید بیودیزل حدود ۱۰ درصد وزنی از کل محصولات را تشکیل می‌دهد. در سال‌های اخیر، افزایش تقاضا برای بیودیزل باعث انباشته شدن مقادیر زیادی گلیسرول در بازار، کاهش قیمت آن و مشکلات اقتصادی صنعت بیودیزل شده است؛ بنابراین، تبدیل گلیسرول به یک ماده‌ی با ارزش با استفاده از فرایندهای کارآمد، تولیدی و پایدار برای تقویت صنعت بیودیزل ضروری است. گلیسرول به‌دست‌آمده از بیودیزل همچنین می‌تواند به‌عنوان سوخت مشعل مورد استفاده قرار گیرد و برای تولید گرما و برق سوزانده شود. باین‌حال، ارزش حرارتی کم و احتراق ناکارآمد گلیسرول خام و همچنین تولید اکرولین<sup>۲</sup> بسیار سمی از احتراق آن، مانع کاربرد آن به‌عنوان سوخت می‌شود. به‌منظور حل کردن این مشکلات، گلیسرول به‌دست‌آمده از بیودیزل به مواد افزودنی برای سوخت تبدیل می‌شود. مواد افزودنی به‌دست‌آمده نه‌تنها می‌توانند محتوای انرژی گلیسرول را بازیابی کنند؛ بلکه به دلیل وجود اکسیژن ساختاری (وجود اکسیژن در ساختار آن) می‌توانند انتشار گازهای خطرناک را کاهش دهند [۲۴].

گلیسرول را می‌توان با استفاده از فرایندهای مختلف از جمله استری کردن، تولید استال، استرئیزاسیون و کتالیزه کردن، به مواد افزودنی برای سوخت اکسیژن تبدیل کرد. در میان افزودنی‌های مختلف سوخت که از گلیسرول به دست می‌آید، سولکتال<sup>۳</sup> یا<sup>۴</sup> (۲ و ۲ دی متیل، ۱ و ۳ دی اکسلان، ۴-متانول) تولیدشده از طریق فرایند کتالیزاسیون می‌تواند به‌عنوان بهبود دهنده گرانروی سوخت و دمای احتراق به کار گرفته شود [۲۴]. اخیراً پژوهش‌های مختلفی در خصوص تولید سولکتال انجام شده است. در مطالعه‌ی فرایند کتالیزاسیون گلیسرول با تمرکز بر فناوری‌های نو و بالقوه برای تولید پایدار سولکتال در هر دو رآکتور پیوسته و ناپیوسته مورد بحث قرار گرفته است و عملکرد برخی از کاتالیزورهای رایج در آن مقایسه شده است [۲۵].

در مطالعه‌ی جزئیات خواص سوخت سولکتال-بنزین بر اساس استاندارد EN228 مورد بررسی قرار گرفته است و بنزین خالص و ترکیب شامل ۹ درصد سولکتال به‌عنوان سوخت استفاده شده است. با استفاده از یک دینامومتر عملکرد موتور و مشخصات آلاینده‌ی را مورد آزمون قرار داده و بر اساس نتایج آزمون، با افزودن سولکتال به سوخت موجب افزایش عدد اکتان و چگالی ترکیب شده است درحالی‌که باعث کاهش حالت چسبندگی شده است. با افزودن سولکتال مصرف ویژه سوخت نسبت به بنزین خالص استفاده‌شده افزایش داشته است. نتایج انتشار نشان داده که تولید مونواکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته کاهش داشته درحالی‌که اکسیدهای نیتروژن و دی‌اکسیدکربن افزایش داشته است [۲۶].

علی‌رغم تأثیرات مطلوب استفاده از الکل‌ها، در جهت بهبود عملکرد موتور و کاهش آلاینده‌ی خروجی از موتور، افزایش میزان اکسیدهای نیتروژن به‌عنوان یک آلاینده مضر مشاهده شده است که مزایای استفاده از افزودنی الکی را تحت الشعاع قرار داده است. بنابراین با هدف غلبه بر این کاستی، باید از مواد افزودنی دیگر جهت ترکیب با سوخت بنزین استفاده شود. لذا، در پژوهش حاضر از سولکتال به عنوان یک افزودنی جدید به سوخت بنزین به‌منظور ارزیابی پارامترهای عملکردی و انتشار آلاینده‌های خروجی از موتور استفاده شده است.

## مواد و روش‌ها

در این مطالعه از سنتز گلیسیرین که یک محصول جانبی در فرایند تولید بیودیزل است، سولکتال تولید و جهت استفاده از

---

1. Transesterification  
2. Acrolein  
3. Solketal  
4. 2,2-dimethyl-1,3-dioxolan-4-methanol

سولکتال به‌عنوان افزودنی سوخت بنزین، امولسیون<sup>۱</sup> آن تشکیل و پایداری آن بررسی شد. به‌منظور بررسی ویژگی‌های عملکردی و گازهای حاصل از احتراق موتور، خواص شیمیایی و فیزیکی ترکیب‌های مختلف آن ارزیابی و مورد آزمون قرار گرفت.

### مواد مورد استفاده جهت سنتز

گلیسرین، استون و سولکتال (درصد خلوص بالاتر از ۹۹) از شرکت Sigma-Aldrich آمریکا خریداری شده است. اتانول مطلق از شرکت HmbG Chemicals مالزی (درصد خلوص بالاتر از ۹۹/۸) و آمبرلیست ۳۵ از شرکت Rohm and Hass آمریکا تهیه و قبل از استفاده به مدت ۱۲ ساعت در خشک‌کن در دمای ۱۰۰°C خشک شد. مشخصات فیزیکی و شیمیایی کاتالیزور در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱- مشخصات فیزیکی و شیمیایی آمبرلیست ۳۵

Table 1- Physical and chemical characteristics of Amberlyst 35.

Physical and chemical characteristics	unit	amount
Acidity <sup>1</sup>	Equivalent/kg	5
Particle size	Micrometer	490
Average pore size <sup>2</sup>	Nanometer	30
Maximum temperature tolerance <sup>3</sup>	°C	150
Pore volume <sup>2</sup>	ml/gr	0.35
Area <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /gr	50

1 Measured by TPD method

2 Measured by nitrogen absorption isotherm method at -196.15 °C

3 Reported by the manufacturer

### روش سنتز سولکتال

برای سنتز سولکتال از یک بالن سه دهانه با حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر به‌عنوان ظرف واکنش استفاده شد و واکنش تحت شرایط رفلکس (شکل ۱) در دمای محیط (۲۴°C) انجام شد. قبل از شروع آزمایش به ترتیب مقادیر ۲۲/۸۳، ۱۸/۱۱، و ۹/۰۶ گرم استون، گلیسرین، و اتانول مطلق مخلوط شدند و مخلوط واکنش تا تشکیل یک فاز همگن در دمای محیط هم زده شد. به دلیل ناهمگن بودن ترکیب گلیسرین و استون، از اتانول مطلق به‌عنوان کمک حلال استفاده شد. پس از تشکیل یک فاز همگن، مقدار ۰/۱۸۱۱ گرم کاتالیزور به مخلوط واکنش اضافه شد و واکنش به مدت ۵ ساعت در دمای محیط انجام شد. به کمک دستگاه تبخیرکننده دوار (Rotavapor R-300, Buchi) در دمای ۷۰°C، استون و اتانول باقی‌مانده در محصول و همچنین آب تولیدشده، جدا شده و سولکتال خالص شده مورد آنالیز قرار گرفت [۲۵].



Figure 1- The reactor used for Solketal synthesis  
شکل ۱- ظرف واکنش مورد استفاده برای سنتز سولکتال

### روش آنالیز سولکتال تولیدشده

در این پژوهش از دستگاه کروماتوگرافی گازی (GC-MS) مجهز به ستون HP-5 (قطر داخلی ۰/۲۵ میلی‌متر، طول ۳۰ متر، و ضخامت فیلم ۰/۲۵ میکرومتر) به همراه گاز حامل آرگون و آشکارساز FID استفاده شد. دمای محفظه تزریق و آشکارساز به ترتیب در مقادیر ۲۹۰ و ۳۰۰ درجه سلسیوس تنظیم و جداسازی ترکیبات با استفاده از برنامه دمایی گزارش شده در جدول ۲ انجام شد [۲۷]. آنالیز کیفی محصول سنتز شده با استفاده از کروماتوگرافی گازی مجهز به آشکارساز MS صورت گرفت.

جدول ۲- برنامه دمایی استفاده شده برای آنالیز محصولات

Table 2- Temperature program used for product analysis

Characteristic	Unit	Set value
Program start temperature	°C	80
Initial temperature retention time	min	3
The rate of temperature rise	°C/min	3
Middle temperature	°C	90
Final temperature	°C	280
The rate of temperature rise	°C/min	35
Retention time	min	5

### انحلال سولکتال در سوخت بنزین و تهیه امولسیون سوخت

اگرچه در مطالعه آلپتکین و کاناکی با انحلال ۹٪ سولکتال (خریداری شده با درصد خلوص ۹۷٪) در سوخت بنزین، تأثیر آن بر روی عملکرد موتور بررسی شده است، اما با سولکتال تولید شده، امکان تهیه یک امولسیون پایدار وجود نداشت و تنها در درصدهای پایین امولسیون پایداری برای مدت‌زمان محدود ایجاد می‌شد [۲۶]. ابتدا در این پژوهش با استفاده از متغیرهای فیزیکی مانند دما، همزنی و افزایش مدت‌زمان واکنش سولکتال تولید شده در سوخت بنزین حل شد. عدم انحلال سولکتال در سوخت بنزین منجر شد که از کمک حلال برای انجام فرایند انحلال و پایداری سوخت ترکیبی تولید شده استفاده شود. استون، متانول و اتانول در درصدهای ترکیبی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند.

در بین کمک حلال‌های مورد بررسی، اتانول با یک درصد ترکیبی خاص، توانست ترکیب سوختی پایداری تشکیل دهد. مقدار سولکتال قابل‌حل در سوخت بنزین به‌شدت وابسته به میزان کمک حلال بود. جهت رسیدن به بیشترین میزان انحلال سولکتال در سوخت، بررسی‌ها در سوخت حاوی ۲۰ درصد اتانول انجام شد. بر اساس پژوهشی که توسط آقای نجفی و همکاران صورت گرفته، گزارش شد که E20 در سرعت‌های مختلف بیشترین کارایی حرارتی را از خود نشان داده است به همین دلیل از E20 در پژوهش حاضر استفاده شده است [۲۸]. به‌طوری که ابتدا سولکتال در اتانول حل شده و سپس به نسبت به مشخص به سوخت بنزین اضافه شد. بیشترین مقدار سولکتال قابل‌حل که محلول پایداری تشکیل دهد ۷/۵ درصد به دست آمد. لازم به ذکر است که مقادیر بیشتر سولکتال در انحلال اولیه امکان‌پذیر است؛ ولی باگذشت زمان منجر به ته‌نشینی و دو فاز شدن امولسیون سوخت شد.

انبارداری نمونه‌های تولید شده جهت اطمینان از پایداری امولسیون تولید شده به روش ارزیابی بصری<sup>۱</sup> برای مدت ۲ ماه بررسی شده است. نتایج بررسی‌ها نشان داد که نمونه‌هایی که در ظرف در بسته قرار داشتند، در پایان بازه زمانی دوماهه کاملاً پایدار باقی‌مانده و دچار ته‌نشینی نشده‌اند. ولی در مورد نمونه‌های با درب باز، به‌دلیل فرآیند اتانول، بخشی از سولکتال حل شده در ظرف نمونه ته‌نشین شدند. از این‌رو نگهداری سوخت در شرایطی که اجازه فرار به اتانول داده نشود، در انبارداری سوخت ترکیبی تولیدی حائز اهمیت است.

### خواص فیزیکی و شیمیایی سوخت

خواص فیزیکی و شیمیایی سوخت اعم از چگالی، گرانروی، ارزش حرارتی و نقطه اشتعال مربوط به سولکتال و ترکیبات سوختی مورد آزمایش اندازه‌گیری شد. چگالی نمونه‌های سوختی توسط دستگاه اندازه‌گیری چگالی DMA 501, Anton Paar GmbH، گرانروی توسط ویسکومتر Brookfield DV-II+Pro، ارزش حرارتی توسط یک بمب کالری متر Labtron LBC-C22 و نقطه اشتعال توسط دستگاه اندازه‌گیری نقطه اشتعال PMA 5, Anton Paar GmbH اندازه‌گیری شدند.

### فرایند انجام آزمون موتور

جهت بررسی پارامترهای عملکردی موتور و گازهای خروجی حاصل از احتراق ترکیب سوختی، ۴ سطح ۰، ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد از سولکتال در سوخت بنزین حاوی ۲۰٪ اتانول (E20) در مقایسه با سوخت بنزین خالص به مجموعه آزمون موتور واقع در مرکز توسعه خودرو (Automotive Development Center) دانشگاه UTM مالزی تزریق شد. این مجموعه متشکل از موتور ۴ سیلندر ۱۶ سوپاپ CAMPRO 1.6 IAFM ساخت شرکت Proton مالزی با مشخصات فنی جدول ۳، کوپل شده با یک دستگاه دینامومتر جریان ادی ساخت شرکت DYNomite آمریکا مجهز به سیستم خنک‌کاری با آب جهت اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی به موتور است. واحد الکترونیکی کنترل موتور (ECU) و همچنین واحد داده‌برداری آن توسط سیستم مدیریت موتور طراحی شده توسط شرکت MoTeC مالزی است. برای اندازه‌گیری میزان گازهای خروجی حاصل از احتراق، دستگاه آنالیزور گازهای خروجی EMS model 5002 ساخت شرکت Emission Systems Inc. آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. آزمون‌ها برای هر نمونه ترکیب سوختی، در ۵ سطح سرعت (۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ دور بر دقیقه<sup>۲</sup>) و ۳ سطح گشتاور (۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ گشتاور بیشینه) در سه تکرار انجام شدند. سوخت بنزین مورد استفاده (E97) از جایگاه‌های سوخت محلی شرکت Petron در شهر جوهور مالزی تهیه شد. همچنین از یک دستگاه فلومتر دیجیتال DF-313 ساخت شرکت ONO SOKKI ژاپن جهت اندازه‌گیری مقدار سوخت مصرفی استفاده شده است.

1. Visual inspection  
2. rpm

جدول ۳- مشخصات فنی موتور مورد آزمون

Table 3- Technical specifications of the tested engine

Characteristic	Unit	Value
Cylinder diameter	cm	6.7
Piston stroke	cm	8.8
Displacement volume	cc	1597
Compression ratio	-	10:1
Maximum power	kW@6500 rpm	82
Maximum torque	N.m@1000-4000 rpm	148

### محاسبه پارامترهای عملکرد موتور

توان به صورت کار انجام شده در واحد زمان یا گشتاور اعمال شده در سرعت زاویه‌ای تعریف می‌شود. توان ترمزی را می‌توان میزان قدرتی که در محل فلاپیول موتور قابل دسترس است و می‌تواند صرف به حرکت درآوردن اتومبیل شود، تعریف کرد. این میزان قدرت برابر است با میزان قدرتی که از احتراق حاصل می‌شود منهای قدرتی که برای غلبه بر اصطکاک داخلی، خنک کاری موتور و گرداندن متعلقات موتور، صرف می‌شود. البته تلفات حرارتی نباید نادیده گرفته شوند. توان ترمزی موتور بر حسب کیلووات به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۲۹].

$$P_b = \frac{2\pi \cdot \omega \cdot T}{1000} \quad (1)$$

که در آن  $\omega$  سرعت زاویه‌ای بر حسب رادیان بر ثانیه و  $T$  گشتاور ترمزی بر حسب نیوتن متر است. از آنجایی که فشار داخل سیلندر یک موتور در طی یک چرخه، به طور پیوسته در حال تغییر است، فشار مؤثر متوسط تعریف می‌شود. فشار مؤثر متوسط ترمزی  $^1$  (bmep) پارامتر خوبی برای مقایسه طراحی، گشتاور و یا توان خروجی موتورهایست، زیرا مستقل از اندازه و سرعت دورانی موتور است. این پارامتر بر حسب پاسکال از رابطه ۲ محاسبه می‌شود [۲۹].

$$bmep = \frac{P_b \cdot n_r}{V_d \cdot \omega} \times 10^3 \quad (2)$$

$n_r$  تعداد دور میل لنگ برای یک سیکل کامل در موتور است که برای موتورهای چهارزمانه ۲ است.  $V_d$  حجم کل یا حجم جاروب شده سیلندرها بر حسب دسی مترمکعب است.

مقدار سوختی که در ازای حصول توان در یک مدت زمان مشخص مصرف می‌شود مصرف سوخت ویژه ترمزی  $^2$  (bsfc) نامیده شده و از طریق رابطه (۳) بر حسب گرم بر کیلووات ساعت محاسبه می‌شود [۲۹].

$$bsfc = \frac{\dot{m}_f}{P_b} \times 10^3 \quad (3)$$

اینجا  $\dot{m}_f$  دبی جرمی سوخت بر حسب کیلوگرم بر ساعت است. بازده میانگین ترمزی، یک پارامتر بدون بعد است که در ترمودینامیک برای اندازه‌گیری عملکرد یک وسیله که از انرژی گرمایی استفاده می‌کند تعریف می‌شود. بازده حرارتی ترمزی  $^3$  (bte) موتور احتراق داخلی از رابطه (۴) محاسبه می‌شود [۲۹].

$$bte = \frac{P_b}{\dot{m}_f \cdot Q_{LHV}} \times 3600 \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $Q_{LHV}$  به عنوان حداقل ارزش حرارتی سوخت بر حسب مگاژول بر کیلوگرم تعریف شده است.

1. Brake mean effective pressure
2. Brake specific fuel consumption
3. Brake thermal efficiency

## آلاینده‌های حاصل از احتراق

به دلیل اینکه میزان توان دریافت شده از موتور، بسته به میزان مخلوط سوخت مصرفی که شامل سوخت ترکیبی و هوا است، در میزان آلاینده‌های خروجی تأثیر دارد، جهت بررسی دقیق‌تر میزان آلاینده‌های کلیه آلاینده‌ها که به صورت درصد یا ppm اندازه‌گیری شده بودند، در مقیاس گرم بر کیلووات-ساعت به معنای میزان جرم آلاینده منتشر شده در ازای هر کیلووات توان تولیدی موتور در مدت یک ساعت، محاسبه و مورد مقایسه قرار گرفتند.

## تحلیل آماری

تأثیر سرعت و محتوای سولکتال در گشتاورهای مختلف و تأثیر گشتاور و محتوای سولکتال در سرعت‌های مختلف به طور مجزا بر روی عملکرد موتور و میزان آلاینده‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. در تحلیل آماری آنالیز ترکیبی به علت از بین بردن برهم‌کنش سولکتال-سرعت و سولکتال-گشتاور نیز بررسی شد. مجموعه اول برای بررسی اثر محتوای سولکتال بر روی عملکرد موتور و آلاینده‌ها در هر سطح سرعت و مجموعه دوم به منظور مطالعه اثر سرعت بر روی پارامترهای موتور در هر سطح محتوای سولکتال تعریف شد. به طور مشابه آنالیز ترکیبی برای برهم‌کنش گشتاور-محتوای سولکتال انجام گرفت. آزمون‌های آماری به صورت آنالیز واریانس<sup>۱</sup> جهت مقایسه مقادیر میانگین و محاسبه پارامتر انحراف معیار جهت بررسی پراکندگی داده‌ها و آزمون دانکن جهت کلاسه‌بندی مقادیر باهدف میزان معنی‌داری اختلاف‌ها در نرم‌افزار PASW Statistics 18 مورد بررسی قرار گرفتند.

## نتایج و بحث

### ترکیب شیمیایی سولکتال

منحنی کروماتوگرام نمونه سولکتال تولیدشده در شکل (۲)، نشان داده شده است. پیک‌های مشاهده شده در زمان‌های بازداری ۵/۶، ۶/۱ و ۱۰/۱ دقیقه به ترتیب مربوط به (۲و۲- دی متیل ۱ و ۳-دی‌اکسولان-۴-یل) متانول (سولکتال)، ۲و۲-دی‌متیل-۵-هیدروکسی-۱و۳-دی‌اکسان، و گلیسرین هستند.

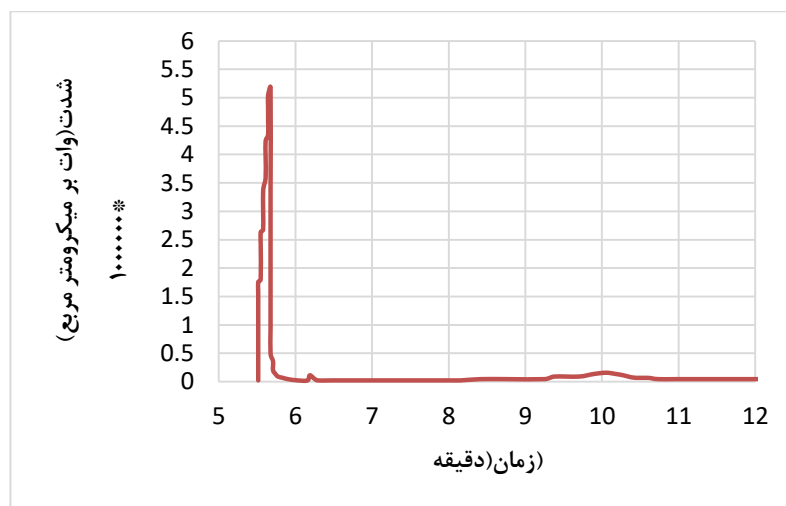


Figure 2- Chromatogram diagram of Solketal sample produced using gas chromatography device  
شکل ۲- منحنی کروماتوگرام نمونه سولکتال تولیدشده با استفاده از دستگاه کروماتوگرافی گازی



## خواص فیزیکی ترکیبات سوخت

خواص فیزیکی ترکیبات سوختی مورد آزمون در جدول ۴ گزارش شده‌اند. افزودن اتانول و همچنین سولکتال به سوخت بنزین سبب افزایش میزان چگالی سوخت می‌شود. از طرف دیگر، به‌واسطه ارزش حرارتی کمتر اتانول و سولکتال نسبت به سوخت بنزین ارزش حرارتی سوخت کاهش پیدا می‌کند. از آنجایی که سیستم سوخت‌رسانی خودرو بر اساس نرخ حجمی، سوخت را تزریق می‌کند، با حاصل‌ضرب چگالی در ارزش حرارتی، مشاهده می‌شود که اثر منفی سولکتال بر روی ارزش حرارتی حجم مشخصی از سوخت، به‌واسطه چگالی بیشتر کاهش پیدا می‌کند.

اختلاف زیاد گرانشی سولکتال با سوخت بنزین، سبب افزایش میزان گرانشی سوخت ترکیبی می‌شود. این افزایش میزان گرانشی، بخصوص در ترکیب ۷/۵ درصد سولکتال، به دلیل طراحی انژکتور متناسب با گرانشی بنزین، ممکن است منجر به عدم پاشش صحیح سوخت و یا افزایش اندازه ذرات سوخت پاشیده شده در محفظه احتراق شود که به‌تبع آن افزایش آلایندگی‌های مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته را به همراه خواهد داشت.

اگرچه میزان نقطه اشتعال بنزین بسیار پایین است و عملاً در سردترین شرایط آب‌وهوایی نیز به‌سهولت قابل اشتعال است و در شرایط انبارداری بنزین شاید تأثیر چندانی نداشته باشد، ولی افزودن ۲/۵، ۵ و ۷/۵٪ سولکتال به همراه ۲۰٪ اتانول، به سوخت بنزین سبب افزایش دمای نقطه اشتعال سوخت بنزین از ۴۲- به ۲۸-، ۲۵- و ۲۳- درجه سلسیوس شده است که می‌تواند به نوبه خود در سطح ایمنی مخازن ذخیره بنزین تأثیر داشته باشد.

## آزمون موتور

داده‌های دریافت شده از آزمون موتور که همگی دارای ۳ تکرار بودند، برای محاسبه پارامترهای عملکردی بکار برده شدند. نتایج پارامترهای عملکردی محاسبه شده و همچنین آلایندگی‌های حاصل از احتراق مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت.

جدول ۴- خواص فیزیکی ترکیبات نمونه سوخت‌های مورد بررسی

Table 4- Physical properties of fuel sample compounds

Fuel sample	Abbreviation	Density at 15 °C (kg/L)	Low Heating Value (kJ/kg)	Viscosity at 25 °C (mPa.s)	Flashpoint (°C)
Gasoline	G	0.737	43400	0.6	-42
Gasoline containing 20% ethanol	E20	0.747	40060	0.68	-31
Gasoline containing 20% ethanol+ 2.5% Solketal	E20+S1	0.755	39411	19.3	-28
Gasoline containing 20% ethanol+ 5% Solketal	E20+S2	0.763	38762	37.91	-25
Gasoline containing 20% ethanol+ 7.5% Solketal	E20+S3	0.771	38113	56.52	-23
Method	-	ASTM D4052	ASTM D240	ASTM D4287	ASTM D93A

## پارامترهای عملکردی موتور

### توان ترمزی

همان‌طور که اشاره شد، توان حاصل‌ضرب سرعت و گشتاور است. بدیهی است با افزایش سرعت یا گشتاور، توان متعاقباً افزایش خواهد داشت. نمودار تغییرات توان ترمزی موتور مورد آزمون برای سوخت‌های مختلف حاوی افزودنی سولکتال در سرعت و بارهای وارد شده بر موتور در شکل (۳) نشان داده شده است. نتایج آزمایشات نشان داد سوخت بنزین حاوی ۲۰ درصد اتانول (E20) در دوره‌های بالا و به‌خصوص سرعت‌های بالای آن، باعث کاهش توان ترمزی شده است که علت این امر را می‌توان به

کاهش ارزش حرارتی سوخت بنزین حاوی ۲۰٪ اتانول نسبت به بنزین دانست [۳۰]. افزودن سولکتال تا نرخ معینی (۲/۵ و ۵ درصد) سولکتال به E20 منجر به افزایش توان ترمزی شده است که علت این پدیده را می‌توان وجود اکسیژن در ساختار افزودنی حاوی اکسیژن دانست که موجب می‌شود تا اکسیژن موجود در ترکیب سوخت بیشتر و در نتیجه فرایند احتراق بهبود یافته و به سمت احتراق کامل‌تر پیش برود [۳۱]. برای سوخت حاوی ۷/۵ درصد سولکتال، تقریباً در کلیه شرایط کاری موتور افت اندکی نسبت به سوخت‌های حاوی ۲/۵ و ۵ درصد مشاهده می‌شود.

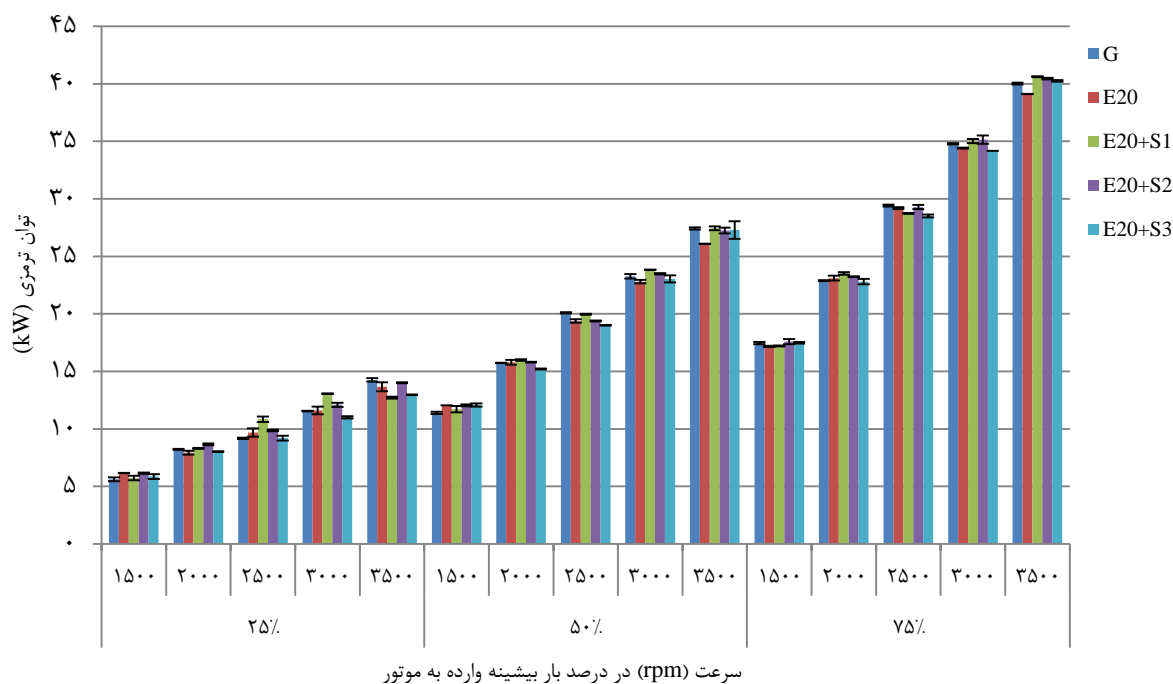


Figure 3- variations in braking power resulting from the combustion of fuel compounds containing different amounts of Solketal at different speeds and loads applied to the engine under test

شکل ۳- تغییرات توان ترمزی حاصل از احتراق ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون

### فشار مؤثر میانگین ترمزی

طبق رابطه (۲)، با ساده‌سازی، مشاهده می‌شود که bmep یک ضریب ثابتی از گشتاور بر حجم جاروب شده است، پس وقتی گشتاور تغییر می‌کنند bmep نیز به تناسب تغییر خواهد کرد (شکل ۴). مقدار bmep برای سوخت بنزین دارای ۲۰ درصد اتانول (E20) در کلیه شرایط کاری مورد آزمون به جز سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه در بارهای ۲۵ و ۵۰ درصد، کمتر از سوخت بنزین مشاهده می‌شود. اگرچه در اکثر سرعت‌ها، در هر سطح گشتاور، تغییرات bmep کاملاً معنی‌دار نیست، ولی افزایش میزان bmep برای سوخت‌های حاوی ۲/۵ و ۵ درصد سولکتال نسبت به سوخت E20 به‌علت داشتن نسبت مستقیم با توان ترمزی مشهود است. بررسی وضعیت سوخت حاوی ۷/۵ درصد سولکتال نشان می‌دهد که این ترکیب سوختی نسبت به بقیه سوخت‌های حاوی سولکتال، bmep کمتری دارد.

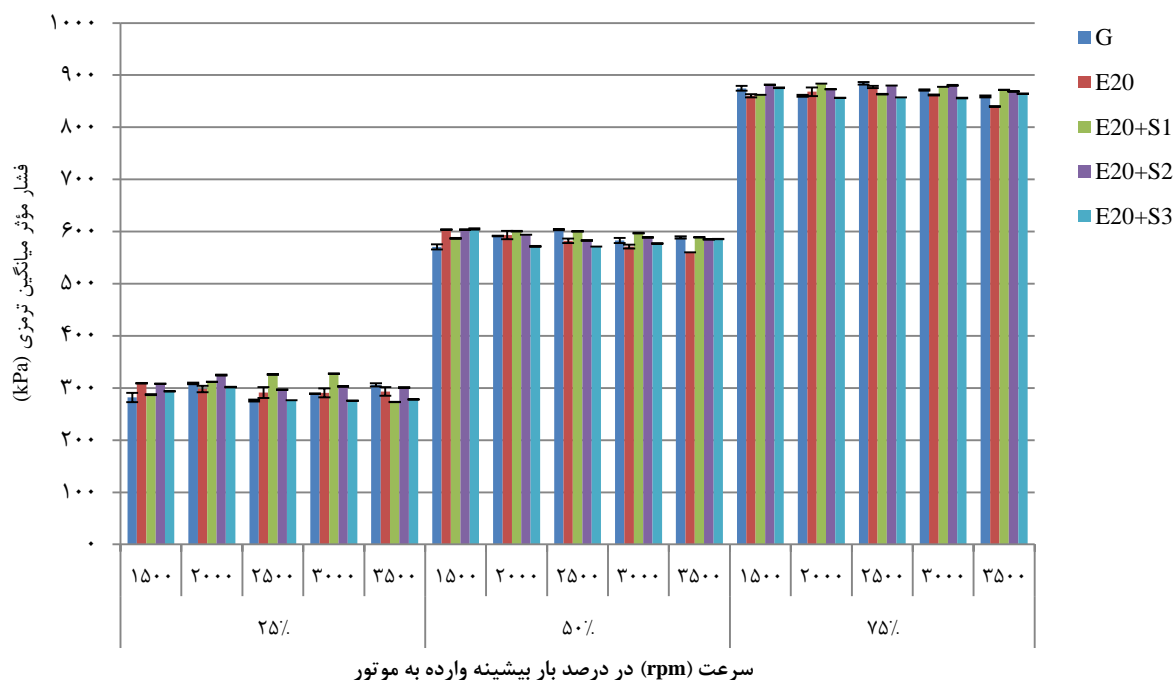


Figure 4- variations in bmep resulting from the combustion of fuel compounds containing different amounts of Solketal at different speeds and loads applied to the engine under test

شکل ۴- تغییرات فشار ویژه میانگین ترمزی حاصل از احتراق ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون

#### مصرف سوخت ویژه ترمزی

مقادیر محاسبه شده مصرف سوخت ویژه ترمزی برای ترکیبات سوختی مختلف، در سطوح مختلف سرعت و بار وارده بر موتور در شکل ۵ نشان داده شده است. افزودن ۲۰٪ اتانول به سوخت بنزین سبب تغییر میزان bsfc به طور میانگین در ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ بار وارد شده بر موتور به اندازه ۳/۱-، ۳/۶ و ۴/۶ درصد شده است. در بیشتر شرایط کاری موتور، سوخت حاوی ۵٪ سولکتال توانسته است سبب کاهش میزان bsfc شود به طوری که ۵/۰۹، ۱/۹۳ و ۰/۶۶ درصد کاهش به ترتیب برای گشتاورهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ نسبت به سوخت E20 داشته است. این در حالی است که به طور کلی ترکیبات سوختی سولکتال نسبت به سوخت بنزین مصرف سوخت ویژه ترمزی بیشتری دارند که با یافته‌های آلپتکین و کاناک [۲۶] که شرایط کاری خودرو را در چند شرایط خاص و با سوخت بنزین حاوی ۹٪ سولکتال بررسی کرده بودند مطابقت دارد. در نمودار فوق با افزایش دور موتور bsfc در حال افزایش است، از آنجا که با افزایش دور موتور میزان اصطکاک درونی موتور افزایش می‌یابد لذا میزان bsfc نیز متناسب با آن در جهت اطمینان از عملکرد و پایداری موتور افزایش می‌یابد [۳۱]. همچنین این افزایش به علت بهبود زمان تزریق سوخت موتور است که باعث افزایش سرعت احتراق و کاهش تأخیر در احتراق می‌شود [۳۲].

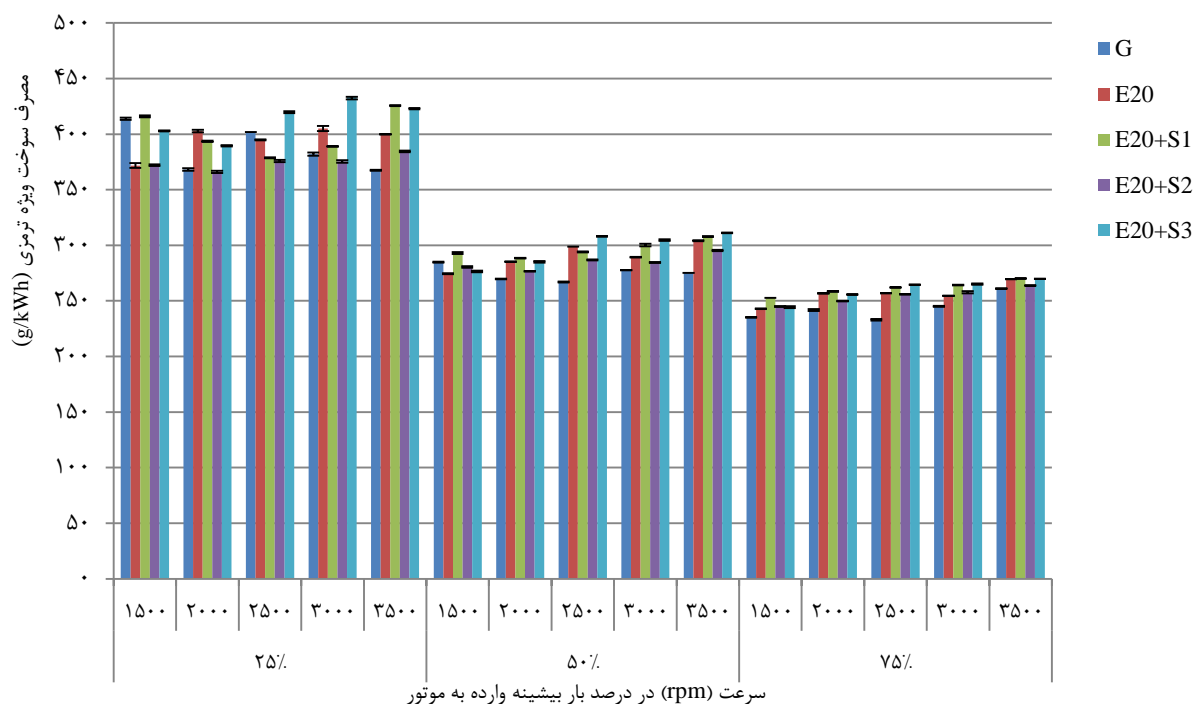


Figure 5- variations in bsfc resulting from the combustion of fuel compounds containing different amounts of Solketal at different speeds and loads applied to the engine under test

شکل ۵- تغییرات مصرف سوخت ویژه ترمزی حاصل از احتراق ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون

### کارایی حرارتی ترمزی

تغییرات کارایی حرارتی ترمزی حاصل از احتراق ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال به همراه سوخت بنزین خالص و دارای ۲۰٪ اتانول، در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون در شکل (۶) نشان داده شده است. اگرچه در شرایط متفاوت کاری موتور، مقدار کارایی حرارتی سوخت حاوی ۲۰٪ اتانول نسبت به سوخت بنزین رفتار متفاوتی داشته است، به طور کلی می‌توان گفت که افزودن سولکتال سبب افزایش میزان کارایی حرارتی سوخت شده است. افزایش میزان bte به گونه ایست که سوخت حاوی ۵٪ سولکتال سبب افزایش ۳/۵، ۱۳/۹، ۸/۸، ۱۱/۷ و ۷/۷ درصد در بار ۲۵٪ و ۱/۴، ۶/۸، ۷/۸، ۵/۳ و ۶/۶ درصد در بار ۵۰٪ و ۲/۷، ۶/۴، ۳/۹، ۲/۳ و ۵/۸ درصد در بار ۷۵٪ به ترتیب برای سرعت‌های ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰، ۳۰۰۰ و ۳۵۰۰ دور در دقیقه نسبت به سوخت E20 شده است. در مطالعه آلپتکین و کاناک (۲۰۱۷) که عملکرد خودرو در دو توان متفاوت با سه سطح سرعت خودرو برای سوخت حاوی ۹٪ سولکتال بررسی شده است، کاهش میزان bte در سرعت ۲۷۰۰ دور بر دقیقه و افزایش در سرعت‌های ۳۵۰۰ و ۴۳۰۰ دور بر دقیقه برای هر دو توان ۱۰ و ۲۰ کیلووات، با افزودن سولکتال نسبت به سوخت بنزین گزارش شده است [۲۶].

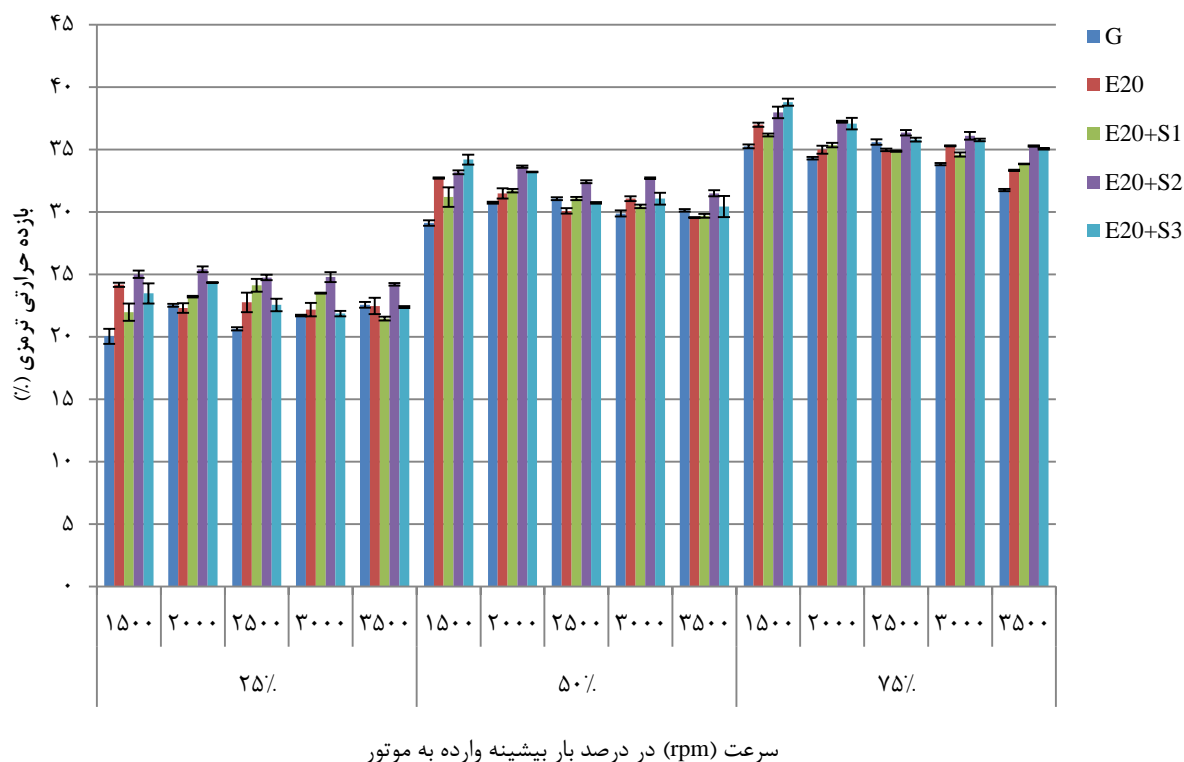


Figure 6- Variations in bte resulting from the combustion of fuel compounds containing different amounts of Solketal at different speeds and loads applied to the engine under test

شکل ۶- تغییرات بازده حرارتی ترمزی حاصل از احتراق ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون

## گازهای خروجی حاصل از احتراق

### دی اکسید کربن (CO<sub>2</sub>)

همان گونه که در شکل (۷)، مشاهده می شود، افزودن اتانول به سوخت بنزین در سرعت کم (۱۵۰۰ دور بر دقیقه) و سرعت زیاد (۳۵۰۰ دور بر دقیقه) سبب افزایش میزان دی اکسید کربن به اندازه ۷۵/۲، ۱۸۳/۶ و ۲۱۴/۲ درصد و ۱۷/۵، ۱۵/۱ و ۱۳/۹ به ترتیب در بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ شده است. در سرعت های میانی، علاوه بر این که میزان تغییرات دی اکسید کربن به اندازه دور پایین و بالا نیست، روند تغییرات به صورت هارمونیک مشاهده نمی شود. افزودن اتانول به سوخت بنزین موجب رقیق شدن مخلوط سوخت و افزایش اکسیژن بیشتر به محفظه احتراق می شود و همچنین احتراق در دور پایین موتور به علت داشتن زمان کافی برای احتراق، احتراق کامل تری صورت می گیرد و موجب افزایش دی اکسید کربن و کاهش مونوکسید کربن می شود [۳۱]. افزودن سولکتال مخصوصاً در دورهای ۵۰ و ۷۵٪ به سوخت بنزین حاوی اتانول، سبب کاهش مقدار CO<sub>2</sub> شده است. به طوری که در دور ۳۵۰۰ دور بر دقیقه مقدار CO<sub>2</sub> به اندازه ۵/۴، ۴/۲ و ۹/۹ درصد در بار ۵۰٪ و ۳/۹، ۲/۶ و ۶/۷ در بار ۷۵٪ به ترتیب برای سوخت حاوی ۲/۵، ۵ و ۷/۵ درصد سولکتال شده است.

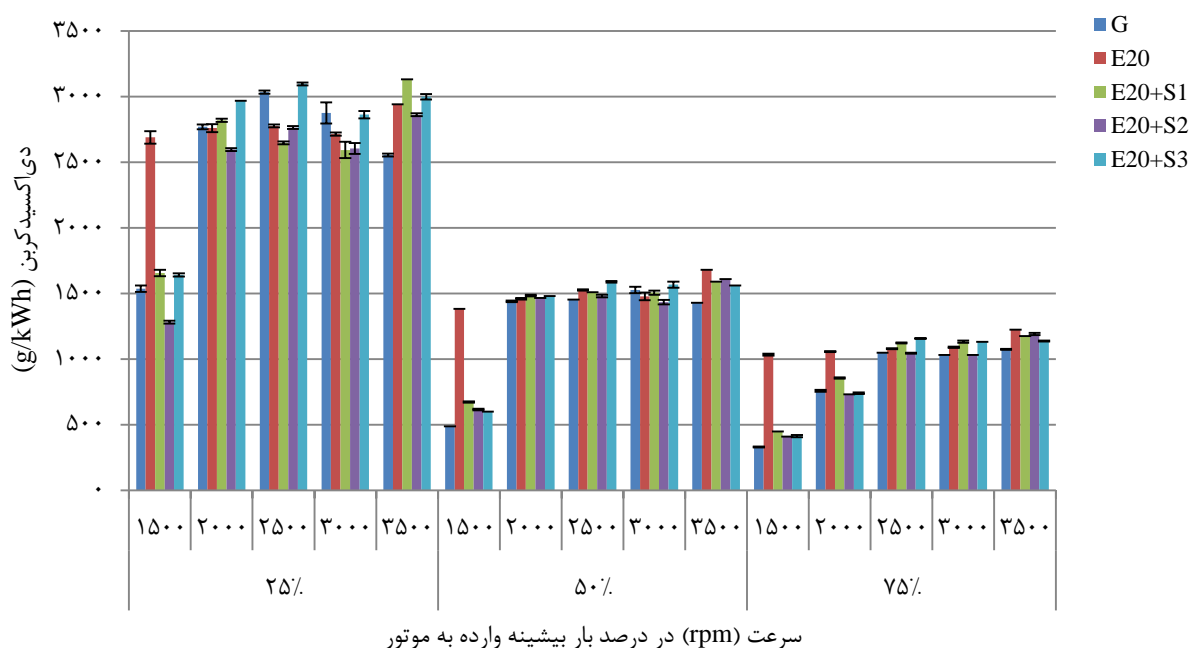


Figure 7- Variations in emitted Carbon dioxide resulting from the combustion of fuel compounds containing different amounts of Solketal at different speeds and loads applied to the engine under test

شکل ۷- تغییرات دی اکسید کربن منتشر شده از احتراق ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون

### مونوکسید کربن (CO)

با وجود اینکه در اکثر شرایط کاری موتور، در گازهای خروجی سوخت بنزین خالص، مونوکسید کربن مشاهده می‌شود، تأثیر مثبت افزودن اتانول به سوخت بنزین در نمودار میله‌ای میزان مونوکسید کربن منتشر شده (شکل ۸) کاملاً مشهود است به گونه‌ای که در تمامی شرایط کاری موتور میزان CO منتشر شده حاصل از احتراق E20 صفر است. یافته‌های الفاساخانی، آگاروال و همکاران، و هسیه و همکاران نیز عملکرد مثبت وجود الکل اعم از متانول و اتانول در سوخت بنزین به دلیل افزایش میزان اکسیژن سوخت و بهبود شرایط احتراق که منجر به کاهش آلاینده‌ها به خصوص مونوکسید کربن و هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود، گزارش شده است [۳۳-۳۵]. موتور تحت شرایط کاری ۲۵ و ۵۰٪ از بار کامل و دور بالا با سوخت حاوی ۲/۵٪ سولکتال منجر به افزایش انتشار CO شده است. علت این پدیده را می‌توان به دلیل چگالی و گرانیوی بالای سوخت حاوی سولکتال که منجر به عدم اختلاط مناسب سوخت و هوا و در نتیجه تشکیل احتراق ناقص می‌شود، نسبت داد. در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و بار ۲۵٪ کاهش مقدار CO<sub>2</sub> برآورد می‌شود، که احتراق ناقص صورت گرفته و نتیجه به صورت افزایش CO و همچنین HC مشاهده شده است. در سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه و بار ۵۰٪ علی‌رغم افزایش مقدار CO<sub>2</sub>، افزایش میزان CO مشاهده می‌شود، که می‌توان علت آن را در افزایش میزان bsfc مشاهده نمود. عملاً افزایش میزان سوخت تزریقی سبب احتراق ناقص شده و نتیجه احتراق به صورت افزایش CO و همچنین HC مشاهده می‌شود. از طرف دیگر عدم مشاهده آلاینده NO<sub>x</sub> (شکل a-۱۰) و کاهش اکسیژن خروجی (شکل ۱۱) برای هر دو حالت اشاره شده، نیز دلایل دیگری هستند که تأیید می‌کنند، اکسیژن کافی در مخلوط سوختی برای احتراق وجود نداشته است. از طرفی مونوکسید کربن با سوخت حاوی ۵٪ سولکتال تنها در دوره‌های میانی در بارهای مختلف مشاهده می‌شود و برای سوخت حاوی ۷/۵ درصد سولکتال تنها در شرایط بار ۲۵٪ و سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه انتشار CO مشاهده می‌شود.

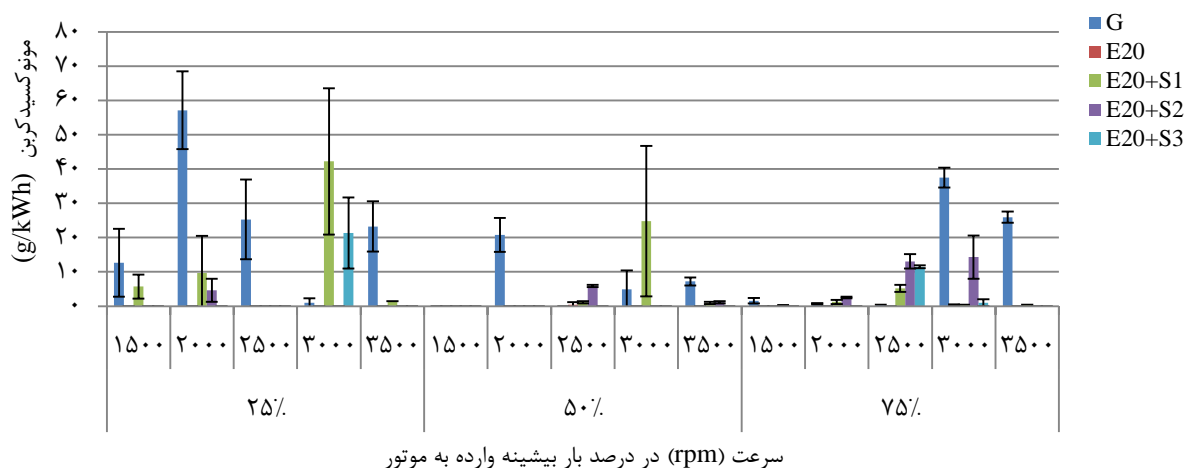


Figure 8- Variations in emitted Carbon monoxide resulting from the combustion of fuel compounds containing different amounts of Solketal at different speeds and loads applied to the engine under test

شکل ۸- تغییرات مونوکسید کربن منتشر شده از احتراق ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون

### هیدروکربن‌های نسوخته (UHC)

همان‌طور که در شکل ۹ قابل مشاهده است، افزودن ۲۰٪ اتانول به سوخت بنزین سبب کاهش معنی‌دار UHC در شرایط کاری مختلف موتور شده است. این به دلیل وجود اکسیژن موجود در اتانول که منجر به بهبود احتراق نسبت به سوخت بنزین خالص می‌شود. در دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه که بیشترین مقدار انتشار هیدروکربن نسوخته برای سوخت بنزین خالص مشاهده می‌شود، افزودن ۵٪ سولکتال به سوخت E20 سبب کاهش میزان UHC به اندازه ۹۵/۹، ۹۵/۷ و ۶۸/۳٪ به ترتیب برای بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ بار کامل وارد شده به موتور اندازه‌گیری شده است. در دور بالای موتور (۳۵۰۰ دور بر دقیقه) نیز انتشار هیدروکربن‌های نسوخته از احتراق سوخت حاوی ۲/۵٪ سولکتال به میزان ۹۵/۷، ۵۶/۳ و ۹۰/۵٪ و از احتراق سوخت حاوی ۵٪ سولکتال به میزان ۵۳/۰، ۷۴/۸ و ۷۱/۳٪ به ترتیب برای بارهای ۲۵، ۵۰ و ۷۵٪ نسبت به سوخت بنزین کاهش داشته است که می‌تواند به علت کاهش زمان انتقال حرارت از موتور باشد که با افزایش دمای دیواره محفظه احتراق، خاموشی شعله کاهش می‌یابد. در واقع علاوه بر اتانول که دارای اکسیژن است، سولکتال که حاوی یک‌سوم وزنی اکسیژن است، میزان اکسیژن موجود در سوخت را افزایش داده و به احتراق بهتر سوخت کمک می‌کنند که در نتیجه آن، کاهش میزان هیدروکربن‌های نسوخته مشاهده می‌شود [۲۶]. با توجه به نمودار مشاهده شد که افزودن سولکتال به سوخت E20 باعث افزایش هیدروکربن‌های نسوخته شده است که علت این امر را می‌توان به ارزش حرارتی پایین‌تر سوخت E20 حاوی سولکتال که منجر به انرژی حرارتی آزاد شده کمتر و در نتیجه کاهش دمای محفظه احتراق نسبت داد.

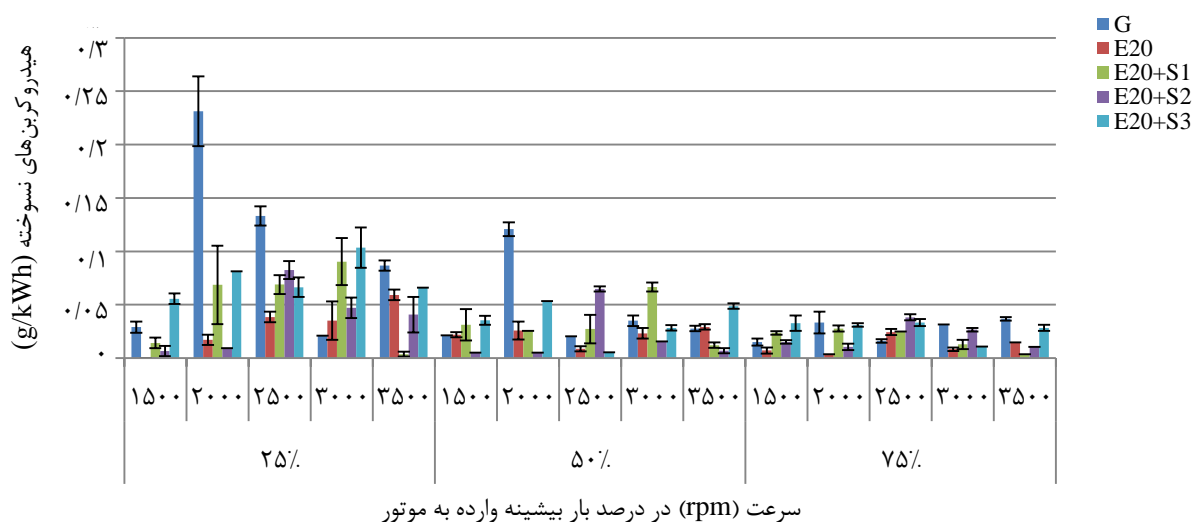


Figure 9- variations in emitted unburned hydrocarbons resulting from the combustion of fuel compounds containing different amounts of Solketal at different speeds and loads applied to the engine under test

شکل ۹- تغییرات هیدروکربن نسوخته منتشر شده از احتراق ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون

### اکسیدهای نیتروژن (NOx)

علی‌رغم تأثیر مثبت افزودن اتانول به سوخت بنزین در کاهش آلاینده‌های CO، CO<sub>2</sub>، UHC و افزایش چندین برابری میزان اکسیدهای نیتروژن منتشر شده از احتراق سوخت حاوی اتانول نسبت به سوخت بنزین خالص در نمودار شکل a - ۱۰ مشاهده می‌شود. نتایج مشابهی توسط گراولوس و همکاران [۲۰] در افزایش میزان اکسیدهای نیتروژن با افزودن اتانول به بنزین گزارش شده است. عوامل اصلی تشکیل آلاینده NOx، افزایش اکسیژن موجود در مخلوط سوختی و افزایش دمای محفظه احتراق است [۳۶]. شکل b - ۱۰ تغییرات دمای گازهای خروجی محفظه احتراق را نشان می‌دهد. در بررسی وضعیت سوخت حاوی اتانول مشاهده می‌شود که علی‌رغم کاهش دمای محفظه احتراق توسط اتانول، میزان آلاینده NOx افزایش پیدا کرده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که وجود اکسیژن در سوخت، که به میزان ۳۵٪ برای اتانول گزارش شده است، در این شرایط دمایی سبب تشکیل آلاینده NOx شده است. علاوه بر موارد اشاره شده، بالا بودن عدد اکتان، پایین بودن ارزش حرارتی، بالا بودن گرمای تبخیر، پایین بودن عدد کربن و همچنین سرعت بالای پیشروی شعله اتانول در مقایسه با بنزین، مواردی هستند که در شرایط کاری مختلف موتور سبب تغییرات NOx می‌شوند [۳۷]. به همین دلیل نمی‌توان تغییرات NOx را متناسب با تغییرات سرعت و گشتاور موتور مشاهده کرد. اگرچه تأثیر کاهشی سوخت حاوی ۲/۵ و ۷/۵٪ سولکتال بر روی میزان اکسیدهای نیتروژن در برخی شرایط کاری موتور مشاهده می‌شود، افزودن ۵٪ سولکتال به سوخت B20 به طور کاملاً معنی‌داری سبب کاهش NOx در بیشتر شرایط کاری موتور شده است. اگرچه افزایش اکسیدهای نیتروژن در شرایط کاری موتور در سرعت ۱۵۰۰ و ۲۵٪ از نظر تحلیل آماری معنی‌دار مشاهده شد، در سرعت ۳۰۰۰ بار ۵۰٪ تفاوت معنی‌دار نبود. در بقیه شرایط کاری موتور، کاهش معنی‌دار میزان آلاینده اکسیدهای نیتروژن نسبت به سوخت E20 مشاهده شده است که دلیل این رفتار می‌تواند به علت ارزش حرارتی کمتر سوخت حاوی سولکتال نسبت به E20 باشد. این میزان کاهش در سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه و بارهای ۵۰ و ۷۵٪ به صورت ۸۵/۴ و ۹۹/۳٪ و در سرعت ۳۰۰۰ و بارهای ۲۵ و ۷۵٪ به صورت ۴۴/۹ و ۹۱/۳٪ است. برای سرعت‌های ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۵۰۰ دور بر دقیقه نیز به ترتیب به صورت ۱۰۰، ۳۶/۶ و ۴۳/۷٪ در بار ۲۵٪، ۷۸/۸ و ۲۱/۵٪ در بار ۵۰٪ و ۹۵/۹، ۹۶/۶ و ۵۷/۵٪ در بار ۷۵٪ نسبت به سوخت E20 کاهش آلاینده NOx مشاهده



شده است. با استدلال مشابه کاهش ارزش حرارتی، کاهش سرعت پیشروی شعله به واسطه افزایش ویسکوزیته در مقایسه با E20، و همچنین افزایش میزان چگالی که منجر به افزایش اکسیژن در اختیار در حجم ثابت سوخت تزریقی می‌شود، مواردی هستند که در شرایط کاری مختلف موتور سبب تغییرات NOx می‌شوند [37]. از طرفی افزایش دمای احتراق حاصل از سوخت‌های حاوی درصد مختلف سولکتال نسبت به E20 (شکل 10-b) شرایط بهتری را برای تشکیل NOx فراهم می‌کند.

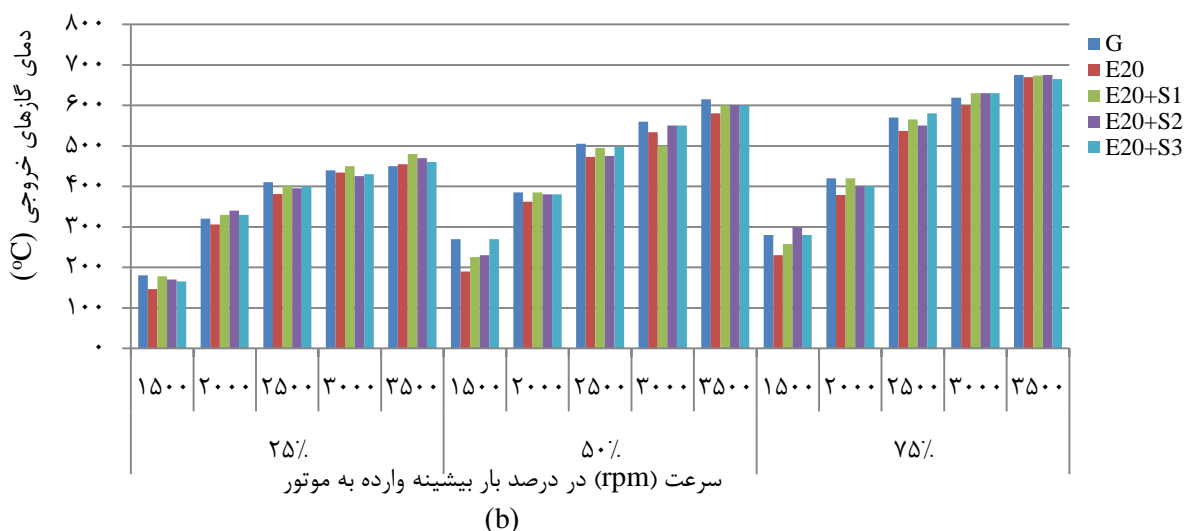
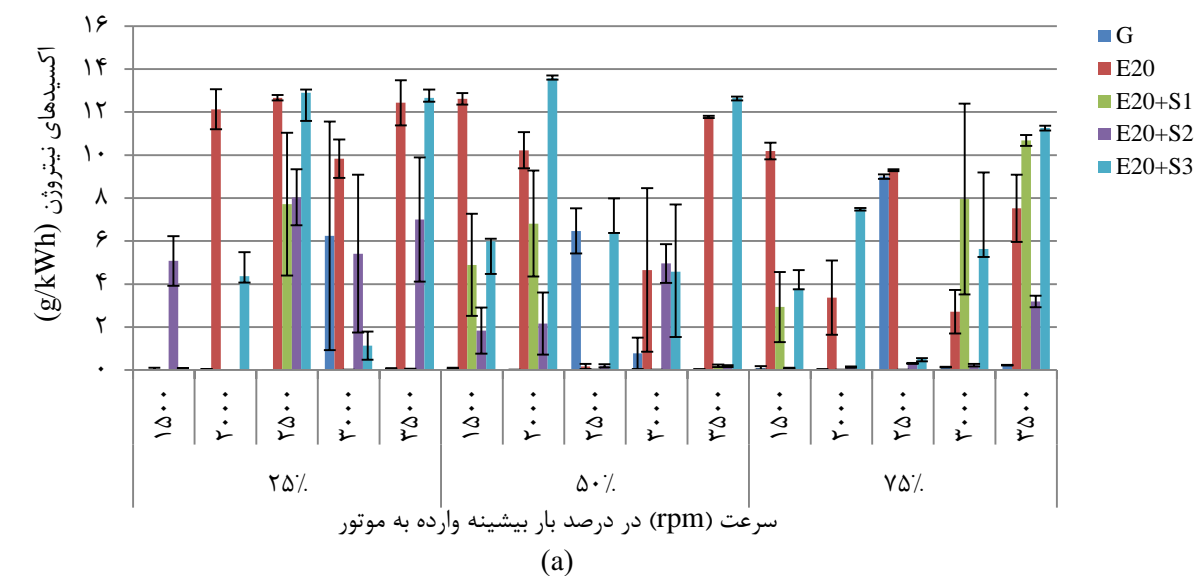


Figure 10- Variations in emitted Nitrogen oxides resulting from the combustion and exhaust gas temperature of fuel compounds containing different amounts of Solketal at different speeds and loads applied to the engine under test

شکل 10- تغییرات اکسیدهای نیتروژن منتشر شده از احتراق و دمای گازهای خروجی ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون

### اکسیژن ( $O_2$ )

باوجود اینکه سوخت اتانول دارای اکسیژن است، میزان اکسیژن منتشر شده از سوخت حاوی 20٪ اتانول کمتر از سوخت بنزین خالص است که نشانگر اکسیداسیون بهتر است که منجر به احتراق بهتر می‌شود. افزودن سولکتال به سوخت حاوی

اتانول، سبب کاهش تأثیر وجود اتانول بر روی احتراق و انتشار گاز اکسیژن خروجی، در دور پایین موتور شد. در سرعت‌های بالاتر میزان تأثیر وجود سولکتال بر روی انتشار اکسیژن به مراتب کمتر بود. ولی با این وجود، به‌طور کلی میزان اکسیژن خروجی از احتراق سوخت‌های حاوی سولکتال کمتر از احتراق بنزین خالص بود.

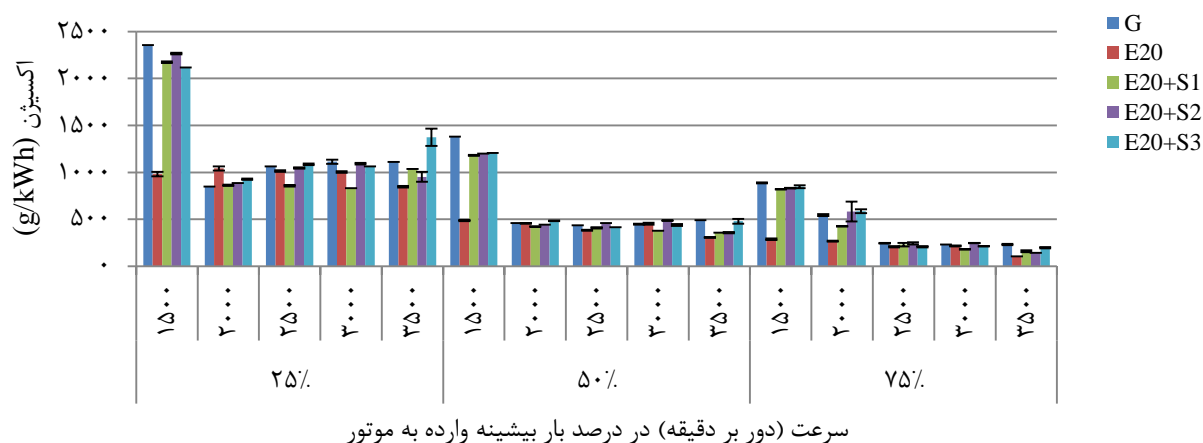


Figure 11- Variations in emitted oxygen resulting from the combustion of fuel compounds containing different amounts of Solketal at different speeds and loads applied to the engine under test

شکل ۱۱- تغییرات اکسیژن منتشر شده از احتراق ترکیبات سوختی حاوی مقادیر مختلف سولکتال در سرعت و بارهای مختلف وارده بر موتور مورد آزمون

## تحلیل آماری

آنالیز واریانس (ANOVA) برای مقادیر پارامترهای عملکردی موتور و آلاینده‌های حاصل از احتراق به‌زای پارامترهای مستقل میزان سولکتال موجود در سوخت، سرعت موتور و بار وارده بر موتور به‌طور مجزا و همچنین برهم‌کنش هر سه پارامتر صورت گرفت. مقادیر مجموع مربعات، میانگین مربعات، آماره F و همچنین میزان معنی‌داری آن‌ها در آنالیز واریانس، در جدول ۵ گزارش شده است. از آنجایی‌که کلیه مقادیر معنی‌داری کمتر از ۰/۰۵ محاسبه شده‌اند ( $p < 0/05$ )، می‌توان اذعان داشت که تأثیر میزان سولکتال افزوده به سوخت، دور موتور و بار وارده بر موتور و همچنین اثر متقابل هر سه پارامتر بر روی پراکندگی کلیه پارامترهای عملکردی بررسی شده و گازهای خروجی اندازه‌گیری شده، معنی‌دار است.

جهت بررسی مقادیر میانگین پارامترهای محاسبه شده عملکرد موتور و آلاینده‌های منتشر شده از احتراق سوخت‌های مقادیر مختلف سولکتال در سطوح مختلف سرعت و بار وارده بر موتور، آزمون دانکن در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ بررسی شد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول ۶ خلاصه شده‌اند.

برای سوخت حاوی ۰/۵٪ سولکتال، مقادیر میانگین  $P_b$ ،  $b_{mep}$  و  $b_{te}$  محاسبه شده به‌طور معنی‌دار از مقادیر میانگین متناظر دیگر سوخت‌ها با درصد‌های مختلف سولکتال، بیشتر بودند. از طرف دیگر همین ترکیب سوختی حداقل مقدار میانگین  $bsfc$  با اختلاف معنی‌دار از سوخت E20 را دارا است. در بررسی مقادیر میانگین آلاینده‌های خروجی حاصل از احتراق سوخت‌های مختلف توسط آزمون دانکن، مشخص شد که از احتراق سوخت E20 حاوی ۰/۵٪ سولکتال با اختلاف معنی‌دار، حداقل کربن اکسید و اکسیدهای نیتروژن منتشر می‌شود.

جدول ۵- نتایج آنالیز واریانس (ANOVA) برای ارزیابی تأثیر نمونه سوخت، سرعت و بار وارده بر موتور بر روی پارامترهای عملکردی و آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت‌های حاوی درصد‌های مختلف

سولکتال

Table 5- The results of analysis of variance (ANOVA) to evaluate the effect of fuel sample, speed and engine load on performance parameters and Exhaust emissions containing different percentages of solketal

parameter	The amount of addition of Solketal to the fuel(df=3)				Engine speed(df=4)				Engine load(df=2)				Solketal amount*speed*load (df=24)			
	sum of square	mean square	F	significance level	sum of square	mean square	F	significance level	sum of square	mean square	F	significance level	sum of square	mean square	F	significance level
performance parameters Engine																
Pb	10.1	3.4	65.68	0.00	5119.9	1280.0	2.5E4	0.00	1.1E4	5400.1	1.0E5	0.00	10.8	0.4	8.8	0.00
bmep	83.4	27.8	54.97	0.00	52.1	13.0	25.7	0.00	1.1E5	5.3E4	1.0E5	0.00	84.1	3.5	6.9	0.00
bsfc	9157.3	3052.4	4257.4	0.00	9937.1	2484.3	3464.9	0.00	6.2E5	3.1E5	4.3E5	0.00	4091.9	170.5	237.8	0.00
bte	97.8	32.6	194.52	0.00	105.9	26.5	158.1	0.00	4513.9	2406.9	1.4E4	0.00	13.8	0.6	3.4	0.00
Exhaust emission																
CO <sub>2</sub>	1.48E6	4.63E5	1115.27	0.00	1.63E7	4.09E6	9250.3	0.00	8.9E7	4.4E7	1.0E5	0.00	8.5E5	3.5E4	79.7	0.00
CO	879.8	293.3	9.53	0.00	1725.8	431.4	14.0	0.00	201.9	101.0	3.3	0.04	2343.9	97.7	3.2	0.00
UHC	0.016	0.005	50.36	0.00	0.011	0.003	26.2	0.00	0.027	0.013	129.0	0.00	0.013	0.001	5.3	0.00
NO <sub>x</sub>	1042.7	347.6	110.06	0.00	300.2	75.1	23.8	0.00	46.1	23.1	7.3	0.01	887.2	37.0	11.7	0.00
O <sub>2</sub>	1.55E6	5.16E	770.91	0.00	1.20E7	2.99E6	4468.9	0.00	2.2E7	1.1E7	1.7E4	0.00	9.4E5	3.9E4	58.8	0.00

جدول ۶- نتایج آزمون دانکن در مقایسه مقادیر میانگین پارامترهای عملکردی و آلاینده‌های حاصل از احتراق سوخت‌های حاوی درصد‌های مختلف سولکتال در شرایط مختلف درصد افزودن سولکتال به سوخت، و سرعت و بار وارده بر موتور

Table 6- The results of Duncan test comparing the average values of performance parameters and exhaust emissions containing different percentages of Solketal in different conditions of the percentage of Solketal added to the fuel, and the speed and load

parameter	The amount of addition of Solketal to the fuel (%)				Engine speed(rpm)					Engine load (%)		
	0	2.5	5	7.5	1500	2000	2500	3000	3500	25	50	75
Engine performance parameters												
Pb	19.21 <sup>a</sup>	19.64 <sup>b</sup>	19.63 <sup>b</sup>	19.13 <sup>a</sup>	11.77 <sup>a</sup>	15.70 <sup>b</sup>	19.42 <sup>c</sup>	23.31 <sup>d</sup>	26.82 <sup>e</sup>	9.88 <sup>a</sup>	19.48 <sup>b</sup>	28.85 <sup>c</sup>
bmep	60.74 <sup>b</sup>	61.83 <sup>c</sup>	61.93 <sup>c</sup>	60.36 <sup>a</sup>	61.76 <sup>c</sup>	61.76 <sup>c</sup>	61.13 <sup>b</sup>	61.13 <sup>b</sup>	60.30 <sup>a</sup>	31.24 <sup>a</sup>	61.51 <sup>b</sup>	90.89 <sup>c</sup>
bsfc	313.78 <sup>b</sup>	319.64 <sup>c</sup>	304.65 <sup>a</sup>	323.61 <sup>d</sup>	306.1 <sup>a</sup>	309.0 <sup>b</sup>	316.4 <sup>c</sup>	318.5 <sup>d</sup>	327.1 <sup>e</sup>	396.0 <sup>a</sup>	292.3 <sup>b</sup>	258.0 <sup>c</sup>
bte	29.63 <sup>a</sup>	29.55 <sup>a</sup>	31.37 <sup>c</sup>	30.46 <sup>b</sup>	31.33 <sup>d</sup>	30.83 <sup>c</sup>	30.05 <sup>b</sup>	29.95 <sup>b</sup>	29.11 <sup>a</sup>	23.35 <sup>a</sup>	31.61 <sup>b</sup>	35.80 <sup>c</sup>
Exhaust emissions												
CO <sub>2</sub>	1791.8 <sup>d</sup>	1622.0 <sup>b</sup>	1540.5 <sup>a</sup>	1656.0 <sup>c</sup>	1065.2 <sup>a</sup>	1698.0 <sup>b</sup>	1813.1 <sup>d</sup>	1776.1 <sup>c</sup>	1910.0 <sup>e</sup>	2614.6 <sup>c</sup>	1383.7 <sup>b</sup>	959.5 <sup>a</sup>
CO	0.05 <sup>a</sup>	6.22 <sup>c</sup>	2.78 <sup>b</sup>	2.25 <sup>b</sup>	0.49 <sup>a</sup>	1.50 <sup>a</sup>	3.10 <sup>a</sup>	8.70 <sup>b</sup>	0.34 <sup>a</sup>	4.25 <sup>b</sup>	1.72 <sup>a</sup>	2.51 <sup>ab</sup>
UHC	0.021 <sup>a</sup>	0.033 <sup>c</sup>	0.026 <sup>b</sup>	0.046 <sup>d</sup>	0.02 <sup>a</sup>	0.03 <sup>b</sup>	0.04 <sup>c</sup>	0.04 <sup>c</sup>	0.03 <sup>b</sup>	0.05 <sup>c</sup>	0.03 <sup>b</sup>	0.02 <sup>a</sup>
NO <sub>x</sub>	7.98 <sup>c</sup>	2.76 <sup>a</sup>	2.59 <sup>a</sup>	6.87 <sup>b</sup>	3.96 <sup>a</sup>	5.02 <sup>b</sup>	4.86 <sup>b</sup>	3.93 <sup>a</sup>	7.47 <sup>c</sup>	5.58 <sup>b</sup>	5.20 <sup>b</sup>	4.37 <sup>a</sup>
O <sub>2</sub>	536.7 <sup>a</sup>	688.7 <sup>b</sup>	749.1 <sup>c</sup>	776.3 <sup>d</sup>	1200.0 <sup>d</sup>	615.3 <sup>c</sup>	546.3 <sup>b</sup>	550.45 <sup>b</sup>	526.5 <sup>a</sup>	540.2 <sup>c</sup>	540.2 <sup>b</sup>	349.8 <sup>a</sup>

\*حروف انگلیسی یکسان نشاندهنده عدم معنی داری اختلاف مقادیر میانگین در سطح ۰/۰۵ است.

## نتیجه‌گیری

در این مطالعه باهدف کاهش اثرات نامطلوب استفاده از اتانول در ترکیب سوخت بنزین، از سنتز گلیسیرین که محصول جانبی فرایند تولید بیودیزل است، سولکتال تولید و در درصد‌های مختلف به سوخت بنزین افزوده شد. جهت پایداری ترکیب سوختی، از اتانول به‌عنوان کمک حلال استفاده شد. خواص فیزیکی و شیمیایی سوخت مورد بررسی قرار گرفت و جهت بررسی نمونه افزودنی سوخت تولید شده بر روی پارامترهای عملکردی موتور و آلاینده‌های حاصل از احتراق، در درصد ترکیبات مختلف به موتور اشتعال جرقه‌ای مورد آزمون تزیق شد. بررسی نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که افزودن ۲/۵ و ۵٪ سولکتال به سوخت بنزین حاوی ۲۰٪ اتانول، سبب تقویت پارامترهای عملکردی موتور می‌شود. اگرچه برای E20 در دوره‌های بالای موتور، کاهش توان ترمزی مشاهده می‌شود؛ ولی با افزودن سولکتال به مخلوط سوخت این کاهش توان ترمزی جبران می‌شود. همچنین افزودن ۲/۵ و ۵٪ سولکتال به سوخت باعث افزایش bmep می‌شود. از آنجا که افزودن ۲۰٪ اتانول به بنزین باعث افزایش مصرف سوخت ویژه ترمزی می‌شود، سوخت حاوی ۵٪ سولکتال میزان bsfc تا ۵ درصد کاهش را نشان می‌دهد. باتوجه‌به داده‌های دریافتی افزودن ۵٪ سولکتال علاوه بر حفظ تأثیرات مثبت افزودن اتانول در کاهش آلاینده‌های خروجی موتور، سبب کاهش معنی‌دار انتشار اکسیدهای نیتروژن که از معایب افزودن اتانول به سوخت است، در بیشتر شرایط کاری موتور می‌شود. همچنین به دلیل اکسیژن ساختاری سولکتال و اتانول احتراق مخلوط سوخت بهتر انجام شده که به کاهش میزان هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود.

## تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از دانشگاه تهران برای حمایت از پژوهش حاضر قدردانی به عمل می‌آید.

## منابع

- [1] Ü. Ağbulut, S. Sarıdemir, and S. Albayrak, "Experimental investigation of combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel–biodiesel–alcohol blends," *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, vol. 41, no. 9, 2019.
- [2] J. E. Tibaquirá, J. I. Huertas, S. Ospina, L. F. Quirama, and J. E. Niño, "The Effect of Using Ethanol-Gasoline Blends on the Mechanical, Energy and Environmental Performance of In-Use Vehicles," *Energies*, vol. 11, no. 1, pp. 1–17, 2018.
- [3] M. Balat and H. Balat, "Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel," *Appl. Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 2273–2282, 2009.
- [4] M. Mohebbi, M. Reyhanian, V. Hosseini, M. F. Muhamad Said, and A. A. Aziz, "Performance and emissions of a reactivity controlled light-duty diesel engine fueled with n-butanol-diesel and gasoline," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 134, no. pp. 214–228, February 2018.
- [5] K. Zhang and S. Batterman, "Near-road air pollutant concentrations of CO and PM2.5: A comparison of MOBILE6.2/CALINE4 and generalized additive models," *Atmos. Environ.*, vol. 44, no. 14, pp. 1740–1748, 2010.
- [6] A. M. Liaquat, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, and M. H. Jayed, "Potential emissions reduction in road transport sector using biofuel in developing countries," *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 32, pp. 3869–3877, 2010.
- [7] H. Sharudin, N. R. Abdullah, A. M. I. Mamat, N. H. Badrulhisam, and R. Mamat, "Application of Alcohol Fuel Properties in Spark Ignition Engine : A Review," *Jurnal Kejuruteraan.*, vol. 1, no. 7, pp. 37–47, 2019.
- [8] A. Elfakhany, "Engine performance evaluation and pollutant emissions analysis using ternary bio-ethanol–isobutanol–gasoline blends in gasoline engines," *J. Clean. Prod.*, vol. 139, pp. 1057–1067, 2016.
- [9] A. A. Yusuf and F. L. Inambao, "Progress in alcohol-gasoline blends and their effects on the performance and emissions in SI engines under different operating conditions," *International Journal of Ambient Energy*, vol. 42, no. 4, pp. 465–481, 2021.
- [10] P. Mukhopadhyay and R. Chakraborty, "Effects of Bioglycerol Based Fuel Additives on Diesel Fuel Property, Engine Performance and Emission Quality: A Review," in *Energy Procedia*, vol. 79, pp. 671–676, 2015.
- [11] H. Liu, Z. Wang, Y. Long, S. Xiang, J. Wang, and M. Fatouraie, "Comparative study on alcohol-gasoline and gasoline-alcohol Dual-Fuel Spark Ignition (DFSI) combustion for engine particle number (PN) reduction," *Fuel*, vol. 159, pp. 250–258, 2015.
- [12] M. K. Balki and C. Sayin, "The effect of compression ratio on the performance, emissions and combustion of an SI (spark ignition) engine fueled with pure ethanol, methanol and unleaded gasoline," *Energy*, vol. 71, pp. 194–201, 2014.
- [13] E. Alptekin, M. Canakci, A. N. Ozsezen, A. Turkcan, and H. Sanli, "Using waste animal fat based biodiesels-bioethanol-diesel fuel blends in a di diesel engine," *Fuel*, vol. 157, pp. 245–254, 2015.
- [14] H. H. Balla, S. Abdullah, E. A. J. Al-Mulla, W. M. F. W. Mahmood, R. Zulkifli, and K. Sopian, "Effect of Reynolds number on heat transfer and flow for multi-oxide nanofluids using numerical simulation," *Res. Chem. Intermed.*, vol. 39, no. 5, pp. 2197–2210, 2013.
- [15] P. Sakthivel, K. A. Subramanian, and R. Mathai, "Experimental study on unregulated emission characteristics of a two-wheeler with ethanol-gasoline blends (E0 to E50)," *Fuel*, vol. 262, p. 116504, 2020.
- [16] P. Sakthivel, K. A. Subramanian, and R. Mathai, "Comparative studies on combustion, performance and emission characteristics of a two-wheeler with gasoline and 30% ethanol-gasoline blend using chassis dynamometer," *Applied Thermal Engineering*, vol. 146, pp. 726–737, 2019.
- [17] D. J. Dorney, H. C. Flitan, D. E. Ashpis, and W. J. Solomon, "The effects of blade count on boundary layer development in a low-pressure turbine," *Int. J. Turbo Jet Engines*, vol. 18, no. 1, pp. 1–13, 2001.
- [18] P. Iodice and M. Cardone, "Ethanol/gasoline blends as alternative fuel in last generation spark-ignition engines: a review on CO and HC engine out emissions," *Energies*, vol. 14, no. 13, p. 4034, 2021.
- [19] M. Canakci, A. N. Ozsezen, E. Alptekin, and M. Eyidogan, "Impact of alcohol-gasoline fuel blends on the exhaust emission of an SI engine," *Renew. Energy*, vol. 52, pp. 111–117, 2013.
- [20] I. Gravalos, D. Moshou, T. Gialamas, P. Xyradakis, D. Kateris, and Z. Tsiropoulos, "Emissions characteristics of spark ignition engine operating on lower-higher molecular mass alcohol blended gasoline fuels," *Renewable Energy*, vol. 50, pp. 27–32, 2013.
- [21] S. Hosseinpour, M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, and E. Khalife, "Exact estimation of biodiesel cetane number (CN) from its fatty acid methyl esters (FAMES) profile using partial least square (PLS) adapted by artificial neural network (ANN)," *Energy Convers., Manag.*, vol. 124, pp. 389–398, 2016.
- [22] M. Hajjari, M. Tabatabaei, M. Aghbashlo, and H. Ghanavati, "A review on the prospects of sustainable biodiesel production: A global scenario with an emphasis on waste-oil biodiesel utilization," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, pp. 445–464, 2017.
- [23] M. Aghbashlo, S. Hosseinpour, M. Tabatabaei, and A. Dadak, "Fuzzy modeling and optimization of the synthesis of biodiesel from waste cooking oil (WCO) by a low power, high frequency piezo-ultrasonic reactor," *Energy*, vol. 132, 2017.
- [24] M. Aghbashlo, M. Tabatabaei, H. Rastegari, H. S. Ghaziaskar, and T. Roodbar Shojaei, "On the exergetic optimization of solketalacetin synthesis as a green fuel additive through ketalization of glycerol-derived monoacetin with acetone," *Renew. Energy*, vol. 126, pp. 242–253, 2018.
- [25] M. R. Nanda, Y. Zhang, Z. Yuan, W. Qin, H. S. Ghaziaskar, and C. C. Xu, "Catalytic conversion of glycerol for

- sustainable production of solketal as a fuel additive: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1022–1031, 2016.
- [26] E. Alptekin and M. Canakci, “Performance and emission characteristics of solketal-gasoline fuel blend in a vehicle with spark ignition engine,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 124, pp. 504–509, 2017.
- [27] H. S. Ghaziaskar and Y. M. Gorji, “Synthesis of solketalacetin as a green fuel additive via ketalization of monoacetin with acetone using silica benzyl sulfonic acid as catalyst,” *Biofuel Res. J.*, vol. 5, no. 1, pp. 753–758, 2018.
- [28] G. Najafi, B. Ghobadian, T. Tavakoli, D. R. Buttsworth, T. F. Yusaf, and M. Faizollahnejad, “Performance and exhaust emissions of a gasoline engine with ethanol blended gasoline fuels using artificial neural network,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 5, pp. 630–639, 2009.
- [29] J. B. Heywood, *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill Education, 2018.
- [30] M. V. Rodionova *et al.*, “Biofuel production: Challenges and opportunities,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 12, pp. 8450–8461, 2017.
- [31] M. K. Mohammed, H. H. Balla, Z. M. H. Al-Dulaimi, Z. S. Kareem, and M. S. Al-Zuhairy, “Effect of ethanol-gasoline blends on SI engine performance and emissions,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 25, no. p. 100891, February 2021.
- [32] A. A. Yusuf, F. L. Inambao, and A. A. Farooq, “Impact of n-butanol-gasoline-hydrogen blends on combustion reactivity, performance and tailpipe emissions using TGDI engine parameters variation,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 40, no. p. 100773, June 2020.
- [33] A. Elfasakhany, “Investigations on the effects of ethanol–methanol–gasoline blends in a spark-ignition engine: Performance and emissions analysis,” *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 18, no. 4. pp. 713–719, 2015.
- [34] A. K. Agarwal, H. Karare, and A. Dhar, “Combustion, performance, emissions and particulate characterization of a methanol-gasoline blend (gasohol) fuelled medium duty spark ignition transportation engine,” *Fuel Process. Technol.*, vol. 121, pp. 16–24, 2014.
- [35] W.-D. Hsieh, R.-H. Chen, T.-L. Wu, and T.-H. Lin, “Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol–gasoline blended fuels,” *Atmos. Environ.*, vol. 36, no. 3, pp. 403–410, 2002.
- [36] P. Mohammadi, A. M. Nikbakht, M. Tabatabaei, K. Farhadi, A. Mohebbi, and M. Khatami far, “Experimental investigation of performance and emission characteristics of DI diesel engine fueled with polymer waste dissolved in biodiesel-blended diesel fuel,” *Energy*, vol. 46, no. 1, pp. 596–605, 2012.
- [37] P. Iodice, A. Amoresano, and G. Langella, “A review on the effects of ethanol/gasoline fuel blends on NOX emissions in spark-ignition engines,” *Biofuel Res. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 1465–1480, 2021.

## English Abstract

# Solketal production from glycerin as a gasoline fuel additive: Synthesis, physical and chemical properties, engine performance and emissions

Mohsen Keshavarzi<sup>1</sup>, Mortaza Aghbashlo<sup>2\*</sup>, Meisam Tabatabaei<sup>3</sup>, Ali Hajiahmad<sup>4</sup>, Hajar Rastegari<sup>5</sup>, Pouya Mohammadi<sup>6</sup>

1- Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, Mohsen.keshavarzi@ut.ac.ir

2- Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, maghbashlo@ut.ac.ir

3- Higher Institution Centre of Excellence (HICoE), Institute of Tropical Aquaculture and Fisheries (AKUATROP), Universiti Malaysia Terengganu, 21030 Kuala Nerus, Terengganu, Malaysia, meisam.tabatabaei@umt.edu.my

4- Department of Mechanical Engineering of Agricultural Machinery, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran, hajiahmad@ut.ac.ir

5- Higher Institution Centre of Excellence (HICoE), Institute of Tropical Aquaculture and Fisheries (AKUATROP), Universiti Malaysia Terengganu, 21030 Kuala Nerus, Terengganu, Malaysia, ha\_ra353@yahoo.com

6- Higher Institution Centre of Excellence (HICoE), Institute of Tropical Aquaculture and Fisheries (AKUATROP), Universiti Malaysia Terengganu, 21030 Kuala Nerus, Terengganu, Malaysia, mohamadi\_pouya@yahoo.com

\*Corresponding author

(Received: 2022/10/28, Received in revised form: 2022/12/14, Accepted: 2023/01/08)

The driving force of typical urban vehicles is usually produced by spark-ignited internal combustion engines operating with gasoline as fuel. The combustion of gasoline fuel in spark ignition engines leads to air pollution in urban areas and also to the reduction of fossil fuel reserves. Due to the biological structure of the fuel, using ethanol as a blend with gasoline, along with other alternatives to fossil sources, is one of the solutions to decrease gasoline-based air pollution. Even though adding ethanol compounds allows better fuel combustion and reduces pollutants, these compounds lead to an elevated emission of nitrogen oxides into the air when used at higher percentages in blended with fuel. On the contrary, glycerin, a byproduct of the biodiesel production process, acts as a restricting factor in the mass production of biodiesel. Taking these into account, this study proposes a novel blend of biofuels for gasoline fuel by converting glycerin into solketal and then injecting it into ethanol-containing gasoline fuel. The proposed fuel blend provides optimal performance and comes with the least emission of pollutants. The results showed that adding 5% by volume of solketal to gasoline fuel containing 20% by volume of ethanol resulted in the best engine performance and lower air pollution compared with the combustion of pure gasoline alone and gasoline fuel containing 20% ethanol. In addition, brake specific fuel consumption with fuel containing 5% solketal at 25, 50 and 75% torques has decreased by five, two and seven tenths of percent, respectively. Also, the addition of 5% solketal, in addition to maintaining the positive effects of adding ethanol in reducing engine exhaust emissions, causes a significant reduction in the emission of nitrogen oxides by about 90%, which is one of the disadvantages of adding ethanol to fuel.

**Keywords:** Ethanol; Solketal; Gasoline; Exhaust emissions; Engine performance