



Investigating the effects of n-Butanol–Gasoline blends on the performance of the Iranian national engine

Shahaboddin Kharazmi^{1*}, Mohammad Parsa Shahabiniya¹, Aida FakhrAvar¹, Amirhossein Parivar²

1- Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Keywords:

Iranian National Engine
Gasoline
n-Butanol
Fuel Blends
Engine Performance

ABSTRACT

Considering the growing concerns regarding fossil fuel depletion and air pollution, investigating alternative fuels with cleaner combustion has become increasingly important. In this study, the effects of gasoline–n-butanol blends on the performance of the Iranian National Engine were experimentally evaluated. The tests were conducted under controlled laboratory conditions at engine speeds of 2000, 2500, and 3000 rpm across four engine load levels (25%, 50%, 75%, and 100%). The tested fuels included pure gasoline and three blends (NB5, NB10, and NB15) containing 5%, 10%, and 15% n-butanol by volume, respectively. The results indicated that at full load and 3000 rpm, the NB15 blend increased torque by 13.7% compared to pure gasoline. At medium loads, the NB10 blend exhibited the most stable combustion and uniform torque output. Furthermore, butanol addition reduced the exhaust gas temperature by approximately 4%-5%, indicating more controlled combustion and decreased thermal stress on the engine. The observed performance improvements are attributed to the higher octane number, molecular oxygen content, and high heat of vaporization of n-butanol, which collectively promote a more homogeneous air-fuel mixture and enhanced flame stability. Consequently, utilizing fuels with 10% and 15% n-butanol can effectively improve combustion quality and engine power, offering a viable step toward developing sustainable and efficient alternative fuels.



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* Corresponding author

E-mail address: Kharazmi@semnan.ac.ir (Sh. Kharazmi)

Received 8 November 2025; Accepted 28 April 2026

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

Cite this article: Kharazmi Sh, Shahabiniya MP, FakhrAvar A, Parivar A. Investigating the effects of n-Butanol–Gasoline blends on the performance of the Iranian national engine. The Journal of Engine Research. 2026 May 22;73(1):1-17. doi: [10.22034/ER.2026.2076346.1109](https://doi.org/10.22034/ER.2026.2076346.1109)

بررسی اثر مخلوط سوختی نرمال-بوتانول-بنزین بر عملکرد موتور ملی ایران

شهابالدین خوارزمی^{۱*}، محمد پارسا شهبابی نیا^۱، آیدا فخرآور^۱، امیرحسین پریور^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو)، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

کلیدواژه‌ها:

موتور ملی ایران
بنزین
نرمال بوتانول
سوخت‌های ترکیبی
عملکرد موتور

با توجه به نگرانی‌های فزاینده درباره کاهش منابع سوخت سنگواره‌ای و آلودگی هوا، بررسی سوخت‌های جایگزین با احتراق پاک‌تر اهمیت یافته است. در این پژوهش، اثر ترکیب‌های بنزین - نرمال بوتانول بر عملکرد موتور ملی ایران به صورت تجربی بررسی شد. آزمایش‌ها در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی، در دورهای ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ دد و چهار سطح بارگذاری ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد انجام شد. سوخت‌های مورد آزمون شامل بنزین خالص و سه ترکیب NB5، NB10 و NB15 با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد حجمی بوتانول بودند. نتایج نشان داد که در بار کامل و دور ۳۰۰۰ دد، ترکیب NB15 موجب افزایش ۱۳/۷ درصدی گشتاور نسبت به بنزین خالص شد. در بارهای متوسط، ترکیب NB10 پایدارترین احتراق و یکنواخت‌ترین گشتاور را نشان داد. همچنین افزودن بوتانول سبب کاهش دمای گازهای خروجی حدود ۴ تا ۵ درصدی شد که بیانگر احتراق کنترل شده‌تر و کاهش تنش حرارتی در موتور است. بهبود عملکرد مشاهده شده ناشی از عدد اکتان بالاتر، حضور اکسیژن در ساختار مولکولی و گرمای تبخیر زیاد بوتانول است که منجر به یکنواختی بیشتر مخلوط و پایداری شعله می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مخلوط‌های سوختی دارای ۱۰ و ۱۵ درصد نرمال بوتانول می‌تواند کیفیت احتراق و توان موتور را به طور مؤثر بهبود بخشد و گامی در جهت توسعه سوخت‌های پایدار و کارآمد باشد.



© 2026 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: Kharazmi@semnan.ac.ir (شهابالدین خوارزمی)

دریافت ۱۷ آبان ۱۴۰۴؛ پذیرش ۸ اردیبهشت ۱۴۰۵

شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۳۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

Cite this article: Kharazmi Sh, Shahabiniya MP, FakhrAvar A, Parivar A. Investigating the effects of n-Butanol-Gasoline blends on the performance of the Iranian national engine. The Journal of Engine Research. 2026 May 22;73(1):1-17. doi: 10.22034/ER.2026.2076346.1109

۱- مقدمه

رشد روزافزون تقاضای جهانی برای انرژی و اتکای شدید به سوخت‌های سنگواره‌ای، از مهم‌ترین چالش‌های عصر حاضر به شمار می‌رود [۱-۳]. منابع سنگواره‌ای نه تنها محدود و تجدیدنپذیرند، بلکه مصرف گسترده آن‌ها آثار زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری همچون افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا در مناطق شهری و تهدید سلامت انسان‌ها را به همراه دارد [۴-۷]. بخش حمل‌ونقل که سهم درخور توجهی در مصرف انرژی و تولید آلاینده‌ها دارد، به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین حوزه‌های نیازمند تحول شناخته می‌شود. افزایش تولید و تردد خودروهای مجهز به موتورهای درونسوز (احتراق داخلی)، فشار مضاعفی بر منابع انرژی و محیط‌زیست وارد کرده و بررسی راهکارهای کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده موتور را ضروری ساخته است [۸]. با توجه به اینکه تغییر کامل زیرساخت‌های حمل‌ونقل اقدامی بسیار زمان‌بر و پرهزینه است، بهبود عملکرد موتورهای موجود و بهره‌گیری از سوخت‌های جایگزین یا ترکیبی می‌تواند رویکردی مؤثر، سریع و مقرون‌به‌صرفه برای مدیریت این بحران جهانی باشد [۹-۱۲].

یکی از گزینه‌های مورد توجه در این زمینه، توسعه و استفاده از سوخت‌های زیستی و ترکیبی است. در میان انواع الکل‌ها، نرمال-بوتانول به دلیل ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مطلوب، توجه ویژه‌ای را در مطالعات علمی و صنعتی به خود معطوف کرده است [۱۳، ۱۴]. چگالی انرژی بالا، عدد اکتان مناسب، پایداری مطلوب در شبکه توزیع و سازگاری کافی با سامانه‌های سوخت‌رسانی موجود، از عواملی هستند که بوتانول را برای اختلاط با بنزین مناسب می‌سازند [۱۵]. افزون بر این، برخلاف اتانول که تمایل زیادی به جذب رطوبت دارد و محدودیت‌هایی در حمل‌ونقل و ذخیره‌سازی ایجاد می‌کند، نرمال-بوتانول رفتار پایدارتر و مناسب‌تری از خود نشان می‌دهد [۱۶]. از منظر احتراقی نیز به دلیل گرمای نهان تبخیر بالا و چگالی بیشتر نسبت به بنزین، استفاده از بوتانول در مخلوط سوختی می‌تواند بر بهبود اختلاط، کاهش دمای هوای ورودی و افزایش کیفیت احتراق اثرگذار باشد [۱۷-۱۹]. مجموعه این ویژگی‌ها سبب شده است که مخلوط‌های بنزین-بوتانول نه تنها به‌عنوان سوخت مکمل، بلکه به‌عنوان گزینه‌ای برای کاهش مصرف سوخت و انتشار آلاینده‌ها مطرح شوند.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی درباره عملکرد مخلوط‌های بنزین و نرمال-بوتانول در موتورهای اشتعال جرقه‌ای انجام شده است. ساهین در سال ۲۰۲۱ نشان داد که افزودن درصد‌های کم بوتانول موجب کاهش آلاینده‌گی و بهبود نسبی بازده ترمزی می‌شود [۲۰]. حسین در سال ۲۰۲۲ نیز گزارش کرد که استفاده از بوتانول می‌تواند توان و کارایی موتور بنزینی را افزایش دهد [۲۱]. در مطالعه یسیلیورت در سال ۲۰۲۲ روی موتورهای پاشش درگاهی، استفاده از نسبت‌های متوسط بوتانول به بهبود فرایند احتراق و کاهش آلاینده‌ها انجامید [۲۲]. ساندو در سال ۲۰۲۳ در بررسی یک موتور پرخوران بنزینی دریافت که هرچند افزودن ۱۵ درصد بوتانول باعث پایداری احتراق و کاهش آلاینده‌گی می‌شود، اما افت توان را نیز در پی دارد [۲۳]. در حوزه شبیه‌سازی، لیو در سال ۲۰۲۴ نشان داد که تنظیم فشار و زمان‌بندی پاشش در مخلوط نرمال-بوتانول و بنزین تأثیر چشمگیری بر بهبود احتراق دارد [۲۴]. همچنین، یوسف در سال ۲۰۲۴ کاهش آلاینده‌گی و بهبود بازده حرارتی را گزارش کرد [۲۵]. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اثرات بوتانول بسته به درصد اختلاط، نوع موتور و شرایط عملکردی می‌تواند متفاوت و حتی متناقض باشد. با وجود نتایج ارزشمند موجود، تاکنون مطالعه‌ای که عملکرد موتور ملی ایران را (که یکی از پرکاربردترین موتورهای کشور است) با استفاده از سوخت‌های ترکیبی نرمال-بوتانول و بنزین به‌صورت تجربی و در شرایط مختلف بار و دور موتور ارزیابی کند، گزارش نشده است. این خلأ پژوهشی، ضرورت انجام مطالعه حاضر را پررنگ‌تر می‌سازد.

مطالعه حاضر به بررسی اثر استفاده از مخلوط سوختی نرمال-بوتانول و بنزین بر عملکرد موتور تنفس طبیعی و اشتعال جرقه‌ای ملی ایران اختصاص دارد. در این پژوهش، با بهره‌گیری از آزمون‌های تجربی و تحلیل‌های عملکردی، رفتار موتور در بارها و دورهای مختلف، شامل تغییرات توان، گشتاور، دما و فشار گازهای خروجی بررسی می‌شود. استفاده از سوخت‌های ترکیبی می‌تواند زمینه‌ساز ارتقای پایدار فناوری موتورهای درونسوز و کاهش وابستگی به بنزین در مقیاس ملی باشد. چنین

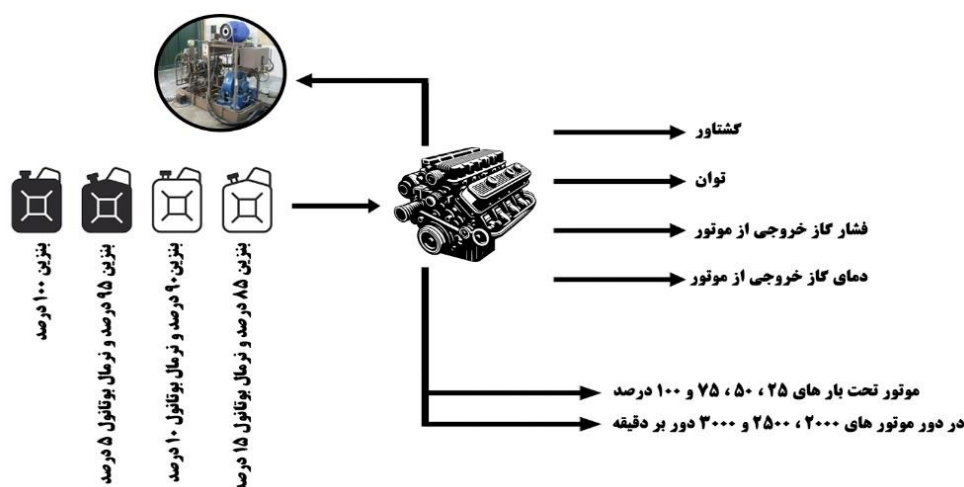
رویکردی با توجه به روند جهانی گذار انرژی اهمیت فراوانی دارد و می‌تواند نقش مهمی در کاهش هزینه‌های سوخت، بهبود بازده و کنترل انتشار آلاینده‌ها ایفا کند.

۲- روش پژوهش

پژوهش حاضر در آزمایشگاه آزمون موتور دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان و بر روی موتور ملی ایران انجام شده است. این موتور دارای چهار استوانه خطی، سامانه زمان‌بندی متغیر دریچه ورودی، حجم جابجایی ۱۶۴۹ سانتی‌متر مکعب و نسبت تراکم ۱۱ است. مشخصات موتور مذکور در جدول ۱ ذکر شده است. همچنین، نمای کلی روش پژوهش مورد استفاده در این مقاله در شکل ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱ مشخصات موتور آزمون این پژوهش

ویژگی	مقدار	واحد
حجم موتور	۱۶۴۹	cc
قطر استوانه	۷۸/۶	mm
طول جابجایی	۸۵	mm
نسبت تراکم	۱۱	-
بیشینه قدرت در دور ۵۷۵۰ rpm	۸۲	kW
بیشینه گشتاور در دور ۳۳۰۰ rpm	۱۵۰	N.m



شکل ۱ نمای کلی از روش پژوهش

در پژوهش حاضر، با توجه به شکل ۱، در گام نخست مخلوط‌های سوختی شامل بنزین خالص (به‌عنوان سوخت پایه) و درصد‌های حجمی مختلف از نرمال-بوتانول (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) تهیه شدند (مشخصات این مواد در جدول ۲ آمده است). نام‌گذاری و درصد ترکیب هریک از این سوخت‌ها نیز در جدول ۲ ارائه شده است. در گام بعدی، موتور ملی ایران با استفاده از سوخت‌های تهیه‌شده، تحت بارهای ۲۵، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ درصد و در دورهای متداول عملکردی ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ دور بر دقیقه آزمایش شد. شایان ذکر است پیش از شروع هر آزمون، برای رسیدن به شرایط پایدار، موتور به مدت ۱۵ دقیقه تحت بار ۵۰ درصد و دور ۲۰۰۰ دور بر دقیقه روشن نگه داشته شد تا دمای سیال خنک‌کننده، روغن، سوخت و سایر بخش‌های موتور به حالت پایدار برسد.

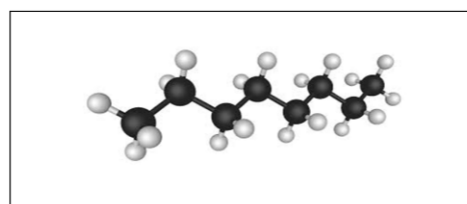
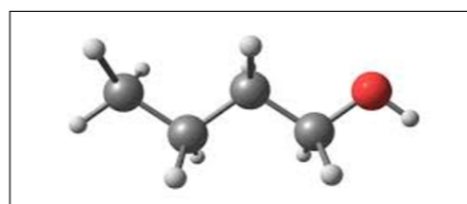
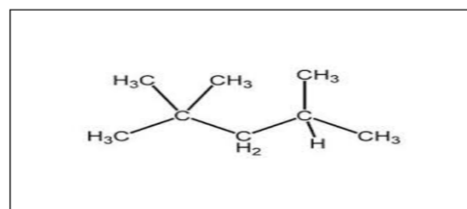
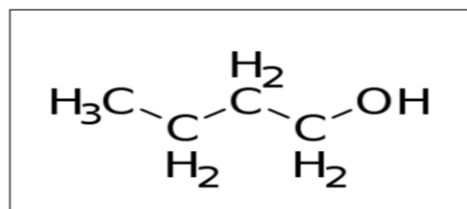
جدول ۲ سوخت‌های خالص و ترکیبی مورد استفاده در این پژوهش

ترکیبات	سوخت
۱۰۰ درصد بنزین خالص	G
۵ درصد نرمال بوتانول + ۹۵ درصد بنزین	NB5
۱۰ درصد نرمال بوتانول + ۹۰ درصد بنزین	NB10
۱۵ درصد نرمال بوتانول + ۸۵ درصد بنزین	NB15

در جدول ۳ مشخصات بنزین و نرمال بوتانول و در شکل ۲ ساختار سه بعدی آنها درج شده است. همچنین، معادله احتراق کامل بنزین و نرمال بوتانول در معادله‌های ۱ و ۲ درج شده است.

جدول ۳ ویژگی شیمیایی سوخت‌های مورد استفاده در این پژوهش

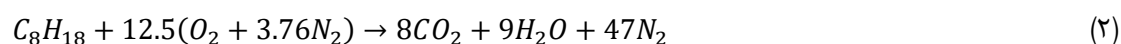
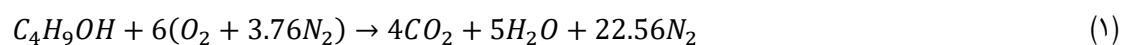
مشخصه	بنزین	نرمال بوتانول	واحد
عدد اکتان	۹۱	۹۶	-
جرم مولی	۱۱۴	۷۴	kg/kmol
چگالی در ۲۵ درجه سانتی گراد	۷۴۰	۸۱۰	kg/m ³
گرمای تبخیر	۳۵۰	۵۸۵	kJ/kg
ارزش حرارتی پایین جرمی	۴۴	۳۳	MJ/kg
ارزش حرارتی پایین مولی	۵۰۱۶	۲۴۴۲	MJ/kmol
دمای جوش	۲۲۵	۱۱۸	°C
نسبت اکسیژن در ساختار مولکولی	۰	۲۱.۶	%



نرمال بوتانول

بنزین

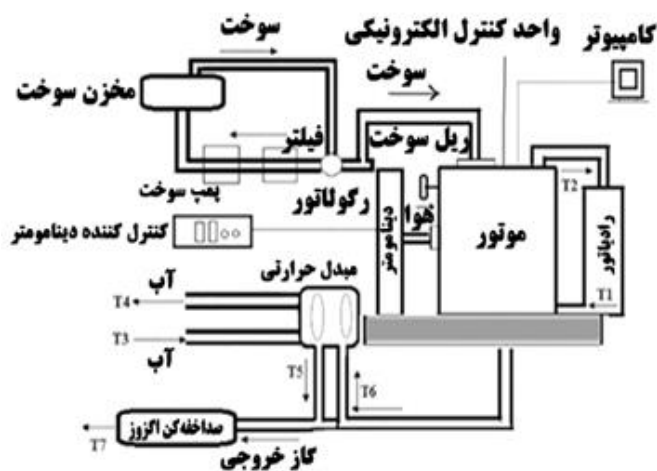
شکل ۲ تصویر سه بعدی از ساختار شیمیایی بنزین و نرمال بوتانول



واکنش‌های شیمیایی (۱) و (۲) بیانگر احتراق کامل نرمال-بوتانول و بنزین هستند. در این واکنش‌ها، تمامی اتم‌های کربن و هیدروژن سوخت بترتیب به دی‌اکسید کربن و بخار آب تبدیل می‌شوند و ازت هوا نیز به‌عنوان گازی بی‌اثر، بدون تغییر همراه با سایر محصولات احتراق خارج می‌شود. این واکنش‌های احتراق کامل، نشان می‌دهند که هوای مورد نیاز برای احتراق یک مول نرمال-بوتانول، ۴۸ درصد بنزین (یعنی نسبت ۶ به ۱۲/۵) است. از سوی دیگر، ارزش حرارتی پایین (LHV) نرمال-بوتانول بر مبنای مولی، ۴۹ درصد بنزین (یعنی ۲۴۴۲ مگاژول در مقایسه با ۵۰۱۶ مگاژول) است. به عبارت دیگر، در واکنش (۱) به ازای هر مول اکسیژن، $\frac{1}{3}$ مول نرمال-بوتانول می‌سوزد؛ درحالی‌که در واکنش (۲)، این میزان برابر با $\frac{1}{13/5}$ مول بنزین به ازای هر مول اکسیژن است. بنابراین، انرژی آزاد شده به ازای هر مول اکسیژن، برای واکنش (۱) (نرمال-بوتانول) معادل ۲۴۴۲ تقسیم بر ۶ مگاژول، و برای واکنش (۲) (بنزین) معادل ۵۰۱۶ تقسیم بر ۱۲/۵ مگاژول است. به بیان روشن‌تر، با مصرف یک مول اکسیژن در احتراق نرمال-بوتانول، ۴۰۷ مگاژول انرژی آزاد می‌شود؛ درحالی‌که این مقدار برای بنزین ۴۰۱/۲۸ مگاژول است. این بدان معناست که با مصرف مقدار یکسانی از اکسیژن، انرژی آزاد شده در احتراق نرمال-بوتانول ۱/۴۲ درصد بیشتر از بنزین است. در پایان، در شکل ۳، سامانه آزمون موتور در آزمایشگاه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان و طرح آن نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳ تصویری از سامانه میز آزمون: الف) آزمایشگاه آزمون موتور در دانشگاه سمنان، ب) طرح آزمایشگاه

با توجه به شکل ۲، در این آرایش آزمایشگاهی، سوخت از مخزن توسط تلمبه سوخت به مدار تغذیه ارسال شده و پس از عبور از صافی و تنظیم‌کننده فشار، وارد لوله افشانه‌ها می‌شود. رایانه موتور وظیفه تنظیم تزریق سوخت، زمان‌بندی جرقه و پایش سایر متغیرهای عملکردی را بر عهده دارد. موتور به یک لگام‌ترمز متصل است که امکان بارگذاری پیوسته و اندازه‌گیری دقیق توان و گشتاور ترمزی را فراهم می‌کند. سامانه خنک‌کاری، شامل مبدل و خنک‌کن مبدل حرارتی، به‌گونه‌ای طراحی شده است تا دمای موتور در شرایط آزمون پایدار بماند. گازهای خروجی پس از عبور از مبدل حرارتی و صداخفه‌کن تخلیه شده و دمای نقاط کلیدی سامانه به‌صورت پیوسته اندازه‌گیری می‌شود. این چیدمان آزمایشگاهی، ارزیابی دقیق فرایند احتراق، مشخصه‌های حرارتی و عملکرد موتور را ممکن می‌سازد. همچنین، مشخصات لگام‌ترمز و عدم‌قطعیت سامانه آزمون، بترتیب در جداول ۴ و ۵ ارائه شده‌اند. به‌منظور بررسی تکرارپذیری، هر آزمون دو بار تکرار شد.

جدول ۴ مشخصات دینامومتر

ویژگی	توضیحات / مقدار	ویژگی	توضیحات / مقدار
نوع	SE - 150 ساج	بیشینه توان	150 kW
نوع	EDDY CURRENT	بیشینه دور	۸۰۰۰

جدول ۵ عدم‌قطعیت اندازه‌گیری متغیرهای عملکردی موتور پژوهش حاضر

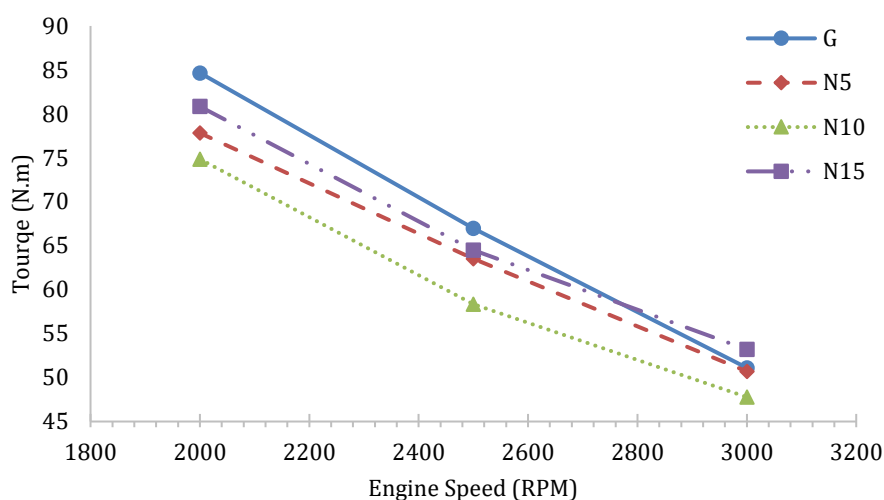
مشخصه	مقدار
گشتاور ترمزی	$\pm 1 \text{ N.m}$
سرعت موتور	$\pm 1 \text{ rpm}$
دمای گاز خروجی	$\pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$

۳- نتایج و بحث

در این بخش، نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی عملکرد موتور ملی ایران با مخلوط سوخت‌های بنزین-نرمال-بوتانول ارائه و تحلیل می‌شود. تحلیل‌ها با هدف بررسی اثر درصدهای مختلف بوتانول (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد حجمی) بر متغیرهای کلیدی عملکرد، از جمله گشتاور، توان، دما و فشار گازهای خروجی، انجام شده است. از آنجاکه نرمال-بوتانول دارای عدد اکتان بالاتر و گرمای تبخیر بیشتری نسبت به بنزین است، انتظار می‌رود افزودن آن به سوخت پایه باعث بهبود کیفیت احتراق، افزایش بازده حرارتی و تغییر رفتار گشتاور و توان موتور شود. به‌منظور تحلیل این اثرات، آزمایش‌ها در چهار سطح بارگذاری و سه سرعت مختلف موتور انجام شدند.

در شکل ۴، تغییرات گشتاور موتور تحت بارگذاری ۲۵ درصدی برای سوخت‌های مختلف نشان داده شده است. این نمودار مبنای تحلیل اولیه عملکرد مکانیکی موتور در حضور درصدهای متفاوت بوتانول است و به مقایسه مستقیم نتایج با سوخت بنزین خالص کمک می‌کند.

نتایج حاصل از شکل ۴ نشان می‌دهد که در شرایط بارگذاری ۲۵ درصد، سوخت بنزین خالص در دوره‌های پایین و متوسط گشتاور بالاتری نسبت به مخلوط‌های حاوی نرمال بوتانول تولید می‌کند. این پدیده را می‌توان به دلیل بهینه‌بودن زمان‌بندی جرقه برای سوخت‌های ترکیبی و همچنین کاهش سرعت شعله ناشی از حضور بوتانول دانست. به دلیل گرمای تبخیر بالاتر بوتانول، دمای مخلوط ورودی کاهش یافته و احتراق با تأخیر بیشتری آغاز می‌شود؛ در نتیجه، بخشی از انرژی در چرخه مؤثر آزاد نمی‌شود و گشتاور خروجی کاهش می‌یابد. میزان تغییرات درصدی گشتاور نسبت به بنزین خالص برای هر یک از ترکیب‌ها در جدول ۶ ارائه شده است.

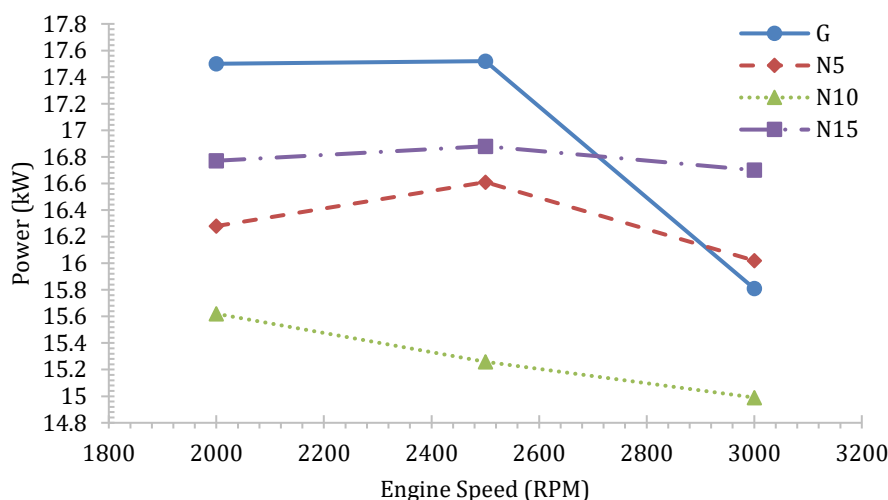


شکل ۴ مقایسه گشتاور موتور تحت بار گذاری ۲۵ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول

جدول ۶ مقایسه درصدی گشتاور تحت بار ۲۵ درصد نسبت به سوخت

سوخت	۲۰۰۰ ددد	۲۵۰۰ ددد	۳۰۰۰ ددد	واحد
NB5	-۸/۴	-۵/۱۸	-۰/۲۷	%
NB10	-۱۱/۹	-۱۲/۹۱	-۶/۵۲	%
NB15	-۴/۹	-۳/۷	۴/۰۹	%

تحلیل داده‌های جدول ۶ نشان می‌دهد که با افزایش درصد نرمال بوتانول در ترکیب سوخت، تغییرات گشتاور در مقایسه با بنزین خالص وابسته به دور موتور است. در دورهای پایین، کاهش جزئی گشتاور مشاهده می‌شود که ناشی از آغاز دیرتر احتراق و گرمای تبخیر بالاتر بوتانول است. با افزایش سرعت موتور، فرآیند تبخیر و اختلاط بهبود یافته و تأثیر منفی بوتانول بر گشتاور کاهش می‌یابد. از آنجا که توان موتور تابعی از گشتاور و سرعت دورانی است، بررسی تغییرات توان می‌تواند دید جامع‌تری از بازده حرارتی و کارایی سوخت‌های ترکیبی ارائه دهد. بنابراین، در ادامه در شکل ۵ تغییرات توان موتور در شرایط بارگذاری ۲۵ درصدی برای سوخت‌های مختلف بررسی شد.



شکل ۵ مقایسه توان موتور تحت بار گذاری ۲۵ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول

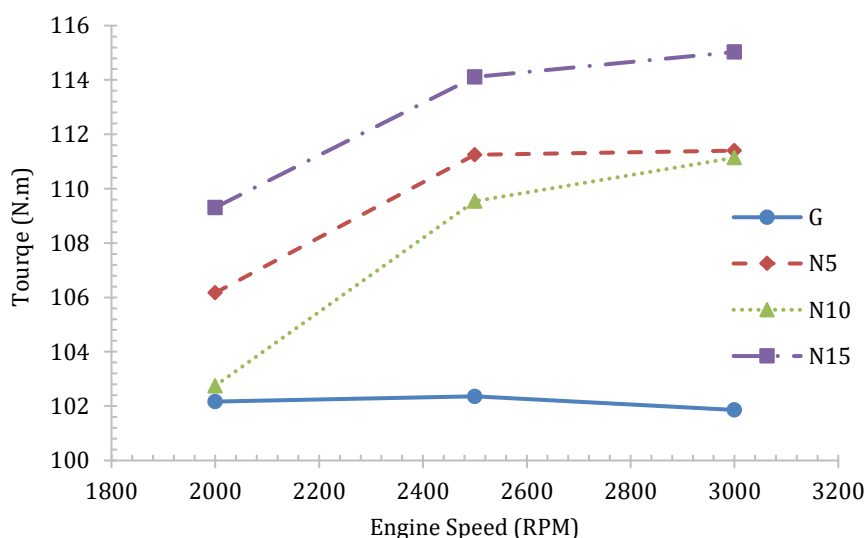
موتور تحت بار ۲۵ درصد، با ترکیب ۱۵ درصد نرمال بوتانول در دور ۳۰۰۰ rpm، عملکرد بهتری در گشتاور و توان، نسبت به ترکیبات ۵ و ۱۰ درصد دارد. با این حال، بنزین خالص در دورهای پایین‌تر این بار، همچنان رقابت‌پذیر باقی مانده و حتی در برخی دورها برتری نسبی دارد که بیانگر آن است که در بارهای سبک کارایی نرمال بوتانول وابسته به میزان درصد اختلاط، زمان بندی جرقه، شرایط احتراق و دمای کاری موتور است. افزایش بوتانول در بار ۲۵٪ در دورهای ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ ددد و بر خلاف دور ۳۰۰۰ ددد موجب کاهش گشتاور و توان شده است.

در شکل ۵ و ۶ بترتیب نمودارهای گشتاور و توان تحت بارگذاری ۵۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول قابل مشاهده است. که سوخت‌های NB5، NB10 و NB15 بترتیب گشتاور و توان را در دور ۳۰۰۰ ددد بترتیب به مقدار ۹/۳۷، ۹/۱۱ و ۱۲/۹۳ درصد و نسبت به بنزین خالص افزایش دهند که دلیل افزایش توان و گشتاور در این بار در تمام دورها، انرژی بیشتری است که سوخت به ازاء جرم هوای ثابتی که در مکش وارد موتور می‌شود تولید می‌کند که در بخش ۲ شرح داده شد. همچنین درصد افزایش گشتاور نسبت به بنزین خالص تحت بار ۵۰٪ در جدول ۷ قابل مشاهده است.

جدول ۷ افزایش گشتاور و توان تحت بار ۵۰ درصد نسبت به سوخت بنزین خالص

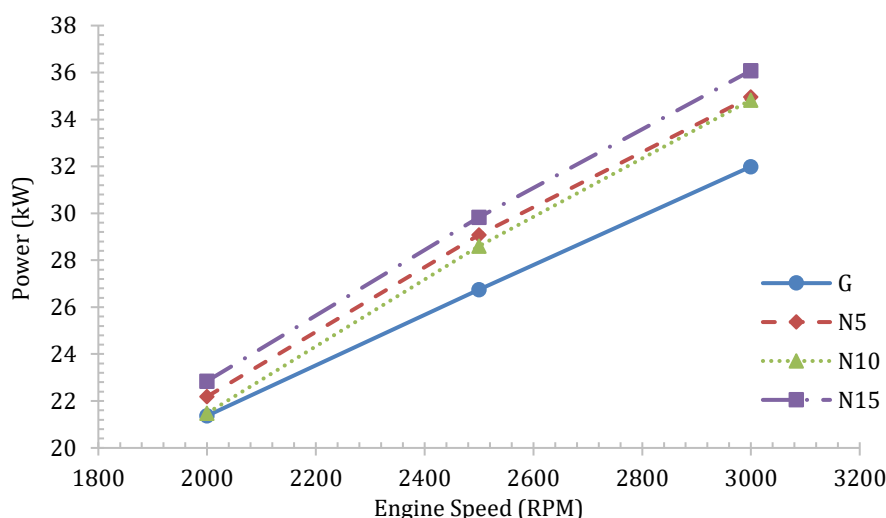
سوخت	۲۰۰۰ ددد	۲۵۰۰ ددد	واحد
NB5	۳/۹۲	۸/۶۹	%
NB10	۰/۵۷	۷/۰۱	%
NB15	۶/۹۹	۱۱/۴۸	%

بررسی مقادیر جدول ۷ نشان می‌دهد که با افزایش درصد نرمال بوتانول تا ۱۵٪، گشتاور موتور در بارگذاری ۵۰ درصدی نسبت به بنزین خالص افزایش یافته است. این روند بویژه در دورهای متوسط (۲۵۰۰rpm) محسوس‌تر است. علت این رفتار را می‌توان به بهبود فرایند احتراق ناشی از حضور اکسیژن در ساختار بوتانول و افزایش یکنواختی مخلوط هوا-سوخت نسبت داد. به منظور درک بهتر این تغییرات و مشاهده رفتار گشتاور در بازه‌های مختلف دور موتور، نمودار مربوط به تغییرات گشتاور برای سوخت‌های مختلف در شکل ۶ نمایش داده شده است.



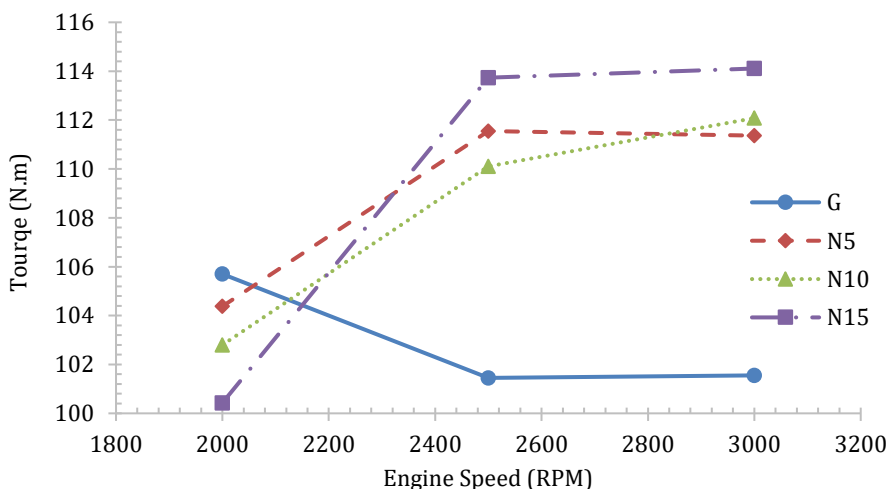
شکل ۶ مقایسه گشتاور موتور تحت بارگذاری ۵۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول

بر اساس شکل ۷ افزایش درصد بوتانول تا ۱۵٪ منجر به بهبود گشتاور خروجی موتور در تمام دورها شده است. در این شرایط، ترکیب حاوی بوتانول با نسبت اکسیژن بالاتر، احتراقی کامل‌تر را فراهم کرده و موجب افزایش فشار متوسط مؤثر ترمزی می‌گردد. از سوی دیگر، با بالا رفتن دور موتور، تأثیر مثبت بوتانول آشکارتر می‌شود زیرا سرعت تبخیر و اختلاط افزایش یافته و شرایط احتراق بهینه‌تر می‌شود. از آن‌جا که توان موتور تابع مستقیم گشتاور و سرعت دورانی است، تغییرات مشاهده‌شده در گشتاور، به‌طور طبیعی بر توان خروجی نیز تأثیر می‌گذارد. برای تحلیل دقیق‌تر این اثر، تغییرات توان موتور در بارگذاری ۵۰ درصدی در شکل ۷ ارائه شده است.



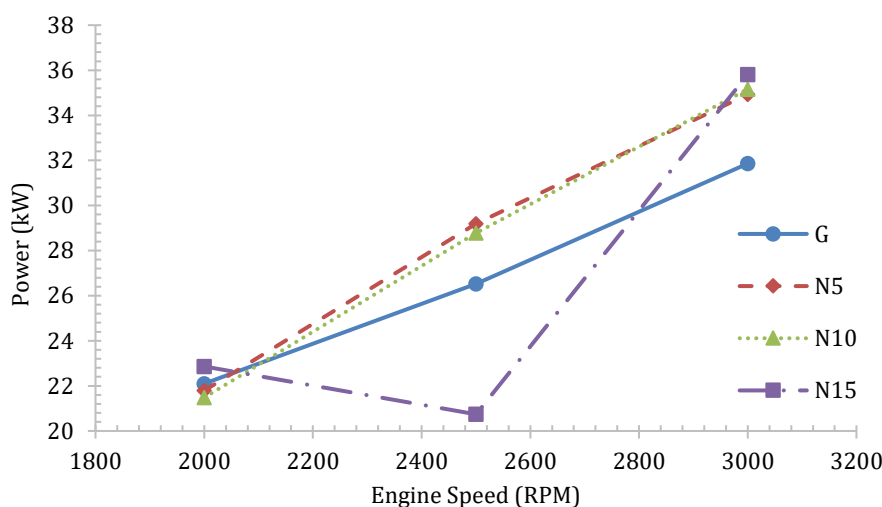
شکل ۷ مقایسه توان موتور تحت بار گذاری ۵۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول

تحت بار ۵۰ درصد افزایش درصد نرمال بوتانول در بنزین منجر به بهبود گشتاور و توان در تمام دورهای آزمون شده است. ترکیب ۱۵ درصد نرمال بوتانول و ۸۵ درصد بنزین در تمامی دورها برتری نسبی قابل‌توجهی دارد که می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مطلوب برای بهبود عملکرد موتور در بارهای میانی مطرح شود. در شکل ۸ و ۹ بترتیب نمودارهای گشتاور و توان تحت بارگذاری ۷۵ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول قابل مشاهده است.



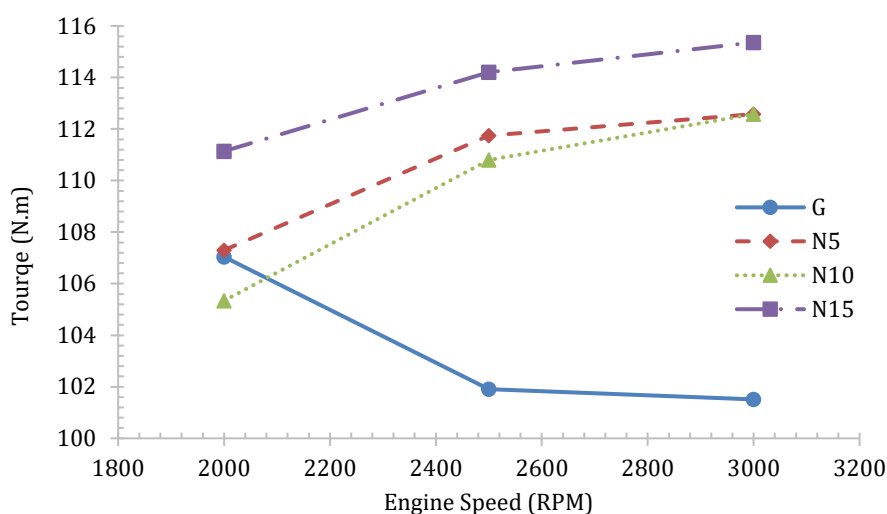
شکل ۸ گشتاور موتور تحت بار گذاری ۷۵ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول

نتایج حاصل از شکل ۸ نشان می‌دهد که در بارگذاری ۷۵ درصدی، مخلوط‌های حاوی نرمال بوتانول، بویژه در نسبت ۱۵٪، گشتاور بالاتری نسبت به بنزین خالص تولید می‌کنند. این افزایش گشتاور را می‌توان به بهبود کیفیت احتراق، غنای مناسب مخلوط هوا-سوخت و پایداری شعله نسبت داد. حضور اکسیژن در ساختار بوتانول سبب افزایش نرخ آزادسازی انرژی و در نتیجه افزایش فشار مؤثر داخل استوانه می‌شود. به‌علاوه، گرمای تبخیر بالاتر بوتانول موجب کاهش دمای ورودی و بهبود بازده حجمی می‌گردد که در مجموع به عملکرد بهتر موتور در بارهای میانی منجر می‌شود. از آن‌جا که توان خروجی تابعی از گشتاور و سرعت موتور است، در شکل ۹ تغییرات توان در همین شرایط برای سوخت‌های مختلف بررسی و مقایسه شده است.

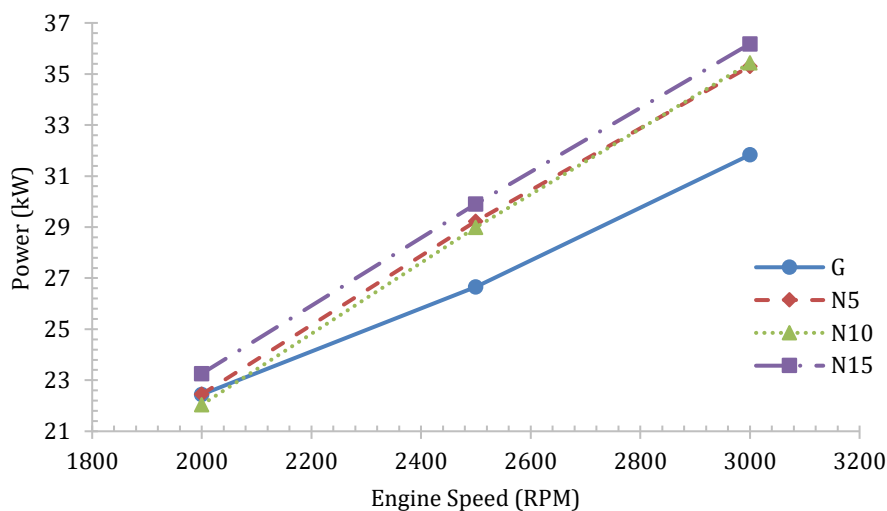


شکل ۹ توان موتور تحت بار گذاری ۷۵ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول

تحت بار ۷۵ درصد ترکیب شامل ۱۵ درصد نرمال بوتانول در اغلب دور موتورهای توان و گشتاور بهتری نسبت به سایر ترکیبات تولید کرده است چرا که در دور ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ دد توانسته مقدار گشتاور را به ترتیب ۳/۰۴، ۱۰/۹۹ و ۱۱/۶۳ درصد نسبت به بنزین خالص افزایش دهد. لازم به ذکر است با افزایش درصد بوتانول به خصوص در دور موتورهای بالاتر ویژگی‌های احتراقی بهبود یافته و تأثیر مثبتی بر عملکرد حرارتی موتور می‌گذارند. این موضوع در مطالعات مشابه نیز تأیید شده است که نشان می‌دهد، استفاده از بوتانول به‌عنوان سوخت مکمل بنزین در بارهای میانی و سنگین باعث بهبود عملکرد موتور شود [۱۶]. دلیل این امر انرژی بیشتری است که به ازاء مقدار هوای ثابت ورودی در هر چرخه با سوخت بوتانول در مقایسه با سوخت بنزین تولید می‌کند. همچنین سوخت بوتانول اکسیژن دارد و از آن در احتراق استفاده می‌شود. در شکل ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نمودارهای گشتاور و توان تحت بارگذاری ۱۰۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول قابل مشاهده است. بر اساس شکل ۱۰، در شرایط بار کامل، افزایش درصد نرمال بوتانول در ترکیب سوخت منجر به بهبود قابل توجه گشتاور موتور شده است. بیشترین مقدار گشتاور در سوخت حاوی ۱۵٪ بوتانول به دست آمده است که بیانگر احتراق کامل‌تر و آزادسازی یکنواخت‌تر انرژی در این حالت است. وجود اکسیژن در ساختار بوتانول، فرایند اکسیداسیون را تقویت کرده و در نتیجه باعث افزایش فشار استوانه در مرحلهٔ توان می‌شود. همچنین، بازده حجمی موتور با گرمای تبخیر بیشتر نرمال بوتانول بالا می‌رود. عدد اکتان بالاتر بوتانول موجب پایداری بیشتر احتراق در بارهای سنگین می‌گردد و از بروز پدیدهٔ احتراق زودرس جلوگیری می‌کند. با توجه به آنکه توان موتور مستقیماً تابعی از گشتاور و سرعت دورانی است، در شکل ۱۱ تغییرات توان خروجی در بار کامل برای سوخت‌های مختلف نمایش داده شده تا اثر ترکیب بوتانول بنزین بر بازده نهایی موتور تحلیل گردد.



شکل ۱۰ مقایسه گشتاور موتور تحت بار گذاری ۱۰۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول



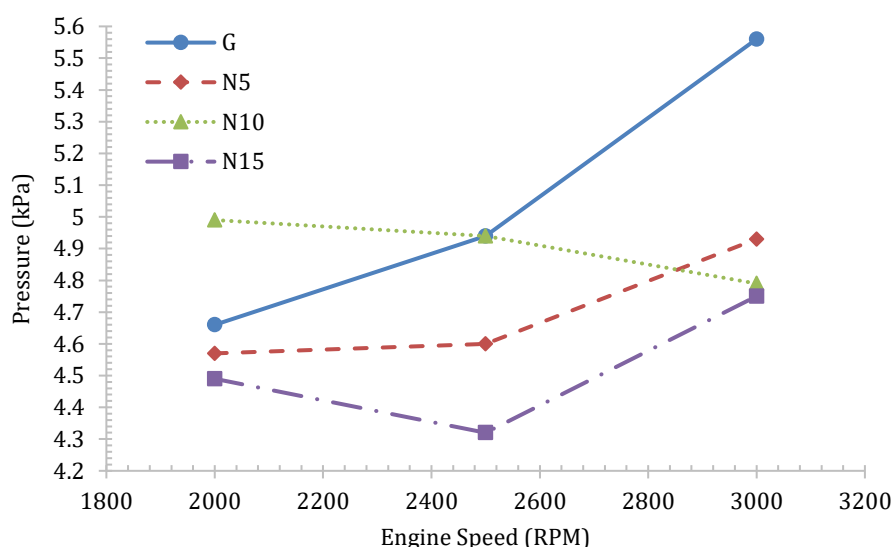
شکل ۱۱ توان موتور تحت بار گذاری ۱۰۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول

تحت بار ۱۰۰ درصد مشاهده شد که افزایش درصد نرمال بوتانول تا ۱۵ درصد منجر به بهبود محسوس در گشتاور و توان خروجی موتور شده است که بیشینه آن در دور موتور ۳۰۰۰ دد دیده شده است. در دور ۳۰۰۰ دد این دور بترتیب سوخت‌های NB5 و NB10 گشتاور را به مقدار ۱۰/۹۱ و ۱۱/۲۶ درصد نسبت به بنزین خالص افزایش داده اند اما سوخت NB15 گشتاور را به مقدار ۱۳/۶۹ درصد افزایش داده است. این سوخت توانسته مقدار توان را نیز به همین میزان افزایش دهد. در نتیجه، سوخت شامل ۱۵ درصد نرمال بوتانول توان و گشتاور بیشتری نسبت به بنزین خالص تولید کرده است. این نتایج نشان بیانگر آن است که تحت بار کامل، استفاده از سوخت با درصدهای بالاتر نرمال بوتانول منجر به بهبود عملکرد موتور شده که می‌تواند به عنوان مکمل سوختی مؤثر در نظر گرفته شود. دلیل این افزایش توان و گشتاور در درصدهای مختلف افزودن بوتانول به بنزین، سرعت بیشتر شعله نرمال بوتانول، گرمای تبخیر بیشتر بوتانول و دمای تبخیر کمتر آن است که احتراق را به احتراق حجم ثابت نزدیکتر، مخلوط هوا و سوخت ورودی را سردتر و بازده حجمی موتور با سوخت بوتانول را بالاتر می‌برد. در جدول ۸ مقادیر گشتاور و توان مستخرج از پژوهش حاضر با مقادیر بدست آمده از آزمون تجربی موتور ملی ایران با سوخت ترکیبی بنزین - بیواتانول و بنزین - اتانول تحت بار کامل در دور ۳۰۰۰ دد مقایسه شد [۲۶، ۲۷].

جدول ۸ مقایسه گشتاور و توان سوخت‌های ترکیبی نسبت به سوخت پایه بنزین بر روی موتور ملی ایران در دور ۳۰۰۰ تحت بار کامل [۲۶، ۲۷]

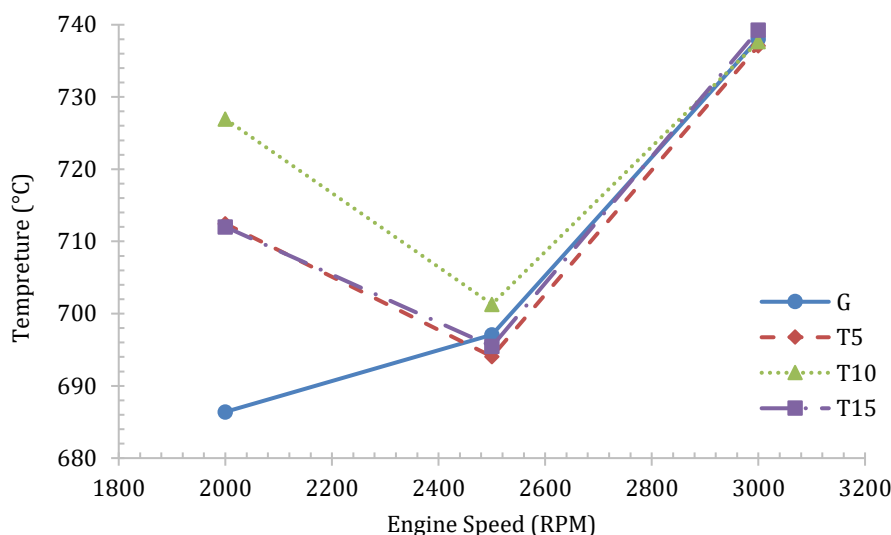
سوخت پایه	افزودنی	افزودنی	گشتاور (Nm)	توان (kW)
۱۰۰٪	-	-	۱۰۱/۵۱	۳۱/۸۶
۹۵٪	نرمال بوتانول	۵٪	۱۱۲/۵۸	۳۴/۹۳
۹۰٪	نرمال بوتانول	۱۰٪	۱۱۲/۹۴	۳۵/۱۶
۸۵٪	نرمال بوتانول	۱۵٪	۱۱۵/۳۶	۳۵/۸۱
۹۵٪	اتانول	۵٪	۱۱۸/۰۳	۳۶/۹۷
۹۰٪	اتانول	۱۰٪	۱۲۰/۹۵	۳۷/۸۹
۸۵٪	اتانول	۱۵٪	۱۲۱/۸۶	۳۸/۲۷
۹۵٪	بیو اتانول	۵٪	۱۰۷/۵۳	۳۳/۷۶
۹۰٪	بیو اتانول	۱۰٪	۱۱۳/۰۶	۳۵/۵۱
۸۵٪	بیو اتانول	۱۵٪	۱۱۸/۲۰	۳۷/۱۱

بررسی داده‌های جدول ۸ نشان دهنده آن است که افزودن نرمال بوتانول، اتانول و بیواتانول به بنزین موجب افزایش گشتاور و توان موتور شده است. نرمال بوتانول افزایش تدریجی و پایدار عملکرد را فراهم کرده است، اتانول بیشترین اثر را داشته و حتی در درصدهای پایین موجب بهبود قابل توجه شده و بیواتانول اثری میانی دارد که در درصدهای بالاتر بهبود چشمگیری ایجاد کرده است. این نتایج بیانگر اهمیت نوع و درصد افزودنی در بهینه‌سازی عملکرد موتور است. همچنین، در شکل ۱۲ تغییرات فشار نسبی دود قبل از واکنشگر تحت بار گذاری ۱۰۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول از ۰ تا ۱۵ درصد، مشاهده می‌شود. نتایج بیانگر آن است که سوخت ترکیبی نرمال بوتانول بنزین در بارهای متوسط و سنگین کارایی بهینه دارند و می‌توانند گزینه‌ای مناسب برای سوخت‌های مکمل در موتور ملی ایران باشند. اما در بار سبک نیاز به اصلاحات کنترلی (مانند تنظیم جرکه و دمای مخلوط) برای جبران تأخیر احتراق وجود دارد تا موتور به عملکرد مناسبی دست یابد.



شکل ۱۲ تغییرات فشار نسبی دود قبل از واکنشگر تحت بار گذاری ۱۰۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول

به‌طور کلی، افزودن نرمال بوتانول به بنزین سبب کاهش فشار نسبی دود قبل از واکنشگر به خصوص در بار کامل و دور موتور تَند شده است. دلیل اصلی این پدیده تعداد کمتر مول‌های محصولات احتراق بوتانول نسبت به بنزین طبق واکنش‌های (۱) و (۲) است. این پدیده همچنین ناشی از احتراق تمیزتر به دلیل ماهیت اکسیژنه سوخت و کاهش ذرات معلق است. تنها در برخی شرایط دور پایین و درصد متوسط بوتانول به دلیل تطابق ناکامل احتراق با زمان‌بندی جرعه موتور افزایش فشار بخاطر دمای بالای محصولات مشاهده شده است. همچنین، در شکل ۱۳ تغییرات دمای دود قبل از واکنشگر تحت بار گذاری ۱۰۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول قابل مشاهده است.



شکل ۱۳ تغییرات دمای دود اگزوز قبل از واکنشگر تحت بار گذاری ۱۰۰ درصد با استفاده از بنزین و سوخت‌های ترکیبی با نرمال بوتانول

با نظر به شکل ۱۳ در دور موتور ۲۰۰۰ دد، افزودن بوتانول بویژه ترکیب حاوی ۱۰ درصد نرمال بوتانول موجب افزایش قابل‌توجه دمای دود می‌شود که ناشی از سرعت شعله بیشتر، حاوی اکسیژن بودن سوخت، بیشتر بودن گرمای نهان تبخیر و در نتیجه افزایش بازده حجمی، انرژی بیشتر آزاد شده در احتراق سوخت ترکیبی با اکسیژن یکسان است که موجب افزایش دمای دود بعد از چندراهه دود شده است. همچنین در دور موتور ۲۵۰۰ دد اثر اثر سرعت بیشتر شعله بوتانول، در ترکیبات حاوی ۵ و ۱۵ درصد آن داده اختلاف معنا داری مشاهده نمی‌شود. البته در دور موتور ۳۰۰۰ دد نسبت به دور ۲۵۰۰ دد دمای دود برای همه سوخت‌های ترکیبی افزایش یافته که ناشی از کاهش زمان انتقال حرارت در موتور و میزان انتقال حرارت به کل انرژی سوخت اشاره کرد. همچنین ترکیب حاوی ۱۵ درصد نرمال بوتانول بالاترین مقدار را دارد که علت آن کاهش زمان احتراق ناشی از افزایش انرژی احتراق سوخت ترکیبی است که باعث افزایش دمای دود شده است [۱۸].

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، اثر افزودن نرمال بوتانول به بنزین بر عملکرد موتور ملی ایران به‌طور جامع بررسی شد و نتایج نشان داد که این سوخت زیستی می‌تواند به‌عنوان مکملی مؤثر در بهبود کارکرد موتور و ارتقای ویژگی‌های زیست‌محیطی آن مطرح شود. تحلیل داده‌ها آشکار ساخت که ترکیب بوتانول-بنزین در بارهای متوسط و سنگین قادر است توان و گشتاور بیشتری نسبت به بنزین خالص تولید کند و این امر به‌طور مستقیم با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی بوتانول مانند سرعت شعله بیشتر، عدد اکتان بزرگتر، گرمای تبخیر بیشتر، مصرف اکسیژن کمتر برای میزان انرژی آزاد شده مساوی و دمای تبخیر کمتر آن مرتبط است. همچنین نتایج نشان داد که استفاده از این سوخت موجب کاهش فشار دود و بهبود فرآیند خروج

گازهای احتراقی می‌شود و از منظر زیست‌محیطی کاهش برخی آلاینده‌ها را در پی دارد. اگرچه چالش‌هایی همچون تبخیر کُندتر بوتانول در بارهای سبک وجود دارد، اما با تنظیم مناسب زمان‌بندی جرعه و مدیریت دقیق رایانه موتور، این محدودیت‌ها قابل جبران هستند. علاوه بر آن، ماهیت تجدیدپذیر بوتانول و سازگاری آن با ساختار موتور، چشم‌اندازی روشن برای توسعه سوخت‌های پایدار فراهم می‌آورد. بر این اساس، یافته‌های تحقیق حاضر می‌تواند مبنای ارزشمندی برای مطالعات آینده در حوزه بهینه‌سازی سامانه‌های احتراقی و توسعه فناوری‌های پیشرفته پایدار باشد.

با نظر به یافته‌های پژوهش حاضر، پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده در چند محور ادامه یابد:

- بهینه‌سازی راهبرد جرعه زنی و زمان بندی پاشش متناسب با مخلوط‌های نرمال بوتانول و بنزین به منظور کاهش تأخیر احتراق در بارهای سبک.
- بررسی اثرات بلند مدت استفاده از مخلوط نرمال بوتانول بر سایش قطعات، رسوبات سوخت، عملکرد سامانه دریچه و افشانه.
- مطالعه و بررسی آلاینده‌های (کربن مونوکسید، کربن دی اکسید، اکسیدهای ازت، هیدروکربن و ذرات معلق) به منظور تعیین دقیق اثرات زیست محیطی.
- بررسی رفتار موتور تحت کنترل حلقه بسته λ و فناوری‌های نوین واحد کنترل الکترونیکی موتور برای بهبود تطابق سوخت‌های ترکیبی.
- توسعه الگوهای شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی و یک‌بعدی به منظور تحلیل دقیق نرخ آزادسازی انرژی و پایداری احتراق.
- بررسی ترکیب بوتانول با سایر سوخت‌های زیستی (مانند اتانول یا بیواتانول) برای یافتن نسبت‌های بهینه دوگانه در موتور ملی ایران.

References

- [1] Shahabiniya MP, Kazempour A. Future studies in the automotive industry with solar energy: technologies and challenges. In: Proceedings of the 12th National Conference on Environment, Energy, and Natural Resources; 2024; Tehran, Iran.
- [2] Kharazmi S, Hajilouy-Benisi A, Mozafari A. Experimental Investigation of Waste Gate Effects on Performance and NOx Emissions in a Turbocharged Aftercooled CNG SI Engine and its Turbocharger. SAE Technical Paper; 2015 Sep 1. doi: 10.4271/2015-01-1957
- [3] Shamsderakhshan M, Kharazmi S. Turbocharger matching and assessments of turbocharger effect on a diesel engine based on one-dimensional simulation. SAE Technical Paper; 2014 Oct 13. doi: 10.4271/2014-01-2557
- [4] Agrawal S, Soni R. Renewable energy: Sources, importance and prospects for sustainable future. Energy: Crises, Challenges and Solutions. 2021 Sep 10;131-50. doi: 10.1002/9781119741503.ch7
- [5] Khedr AM, El-Adawy M, Ismael MA, Qador A, Abdelhafez A, Ben-Mansour R, Habib MA, Nemitallah MA. Recent fuel-based advancements of internal combustion engines: status and perspectives. Energy & Fuels. 2025 Mar 7;39(11):5099-132. doi: 10.1021/acs.energyfuels.5c00057
- [6] Deora PS, Verma Y, Muhal RA, Goswami C, Singh T. Biofuels: An alternative to conventional fuel and energy source. Materials Today: Proceedings. 2022 Jan 1;48:1178-84. doi: 10.1016/j.matpr.2021.08.227
- [7] Gwalwanshi M, Kumar R, Chauhan MK. A review on butanol properties, production and its application in internal combustion engines. Materials Today: Proceedings. 2022 Jan 1;62:6573-7. doi: 10.1016/j.matpr.2022.04.573
- [8] Thakur AK, Kaviti AK, Singh R, Gehlot A. An overview of butanol as compression ignition engine fuel. International Journal of Energy for a Clean Environment. 2020;21(4). doi: 10.1615/InterJEnrCleanEnv.2020033667
- [9] Zhong W, Dai L, He Z, Wang Q. Numerical study on the combustion characteristics of premixed

- ammonia flames with methanol/ethanol/n-butanol addition. *Fuel*. 2025 Feb 1;381:133527. doi: 10.1016/j.fuel.2024.133527
- [10] Liu H, Zheng T, Hui T, Zhang R, Meng X, Zhu W, Liu H, Liu Z. Synthesis of n-butanol from ethanol over Pt-Y/beta catalyst: Synergistic catalysis of yttrium and platinum site. *Chemical Engineering Journal*. 2024 Feb 1;481:148397. doi: 10.1016/j.cej.2023.148397
- [11] Veza I, Said MF, Latiff ZA. Recent advances in butanol production by acetone-butanol-ethanol (ABE) fermentation. *Biomass and Bioenergy*. 2021 Jan 1;144:105919. doi: 10.1016/j.biombioe.2020.105919
- [12] Jayaraman K, Anbuechhiyan G, Mubarak NM, Bandegharai AH, Abnisa F. Exploring the combustion, emission and performance of n-Butanol with Deccan hemp oil methyl ester on dual fuel diesel engine. *Scientific Reports*. 2024 Nov 14;14(1):28015. doi: 10.1016/j.jallcom.2025.181597
- [13] Shang Z, Yu X, Ren L, Li Z, Wang H, Li Y, Wang Y. Synergic effect of hydrogen and n-butanol on combustion and emission characteristics of a hydrogen direct injection SI engine fueled with n-butanol/gasoline. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024 Jan 2;49:945-56. doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.09.213
- [14] Ma Q, Qiu Y, Zhang Q, Chen Z. The practical application value of n-butanol in a heavy-duty engine: Energy-exergy-emission-environmental cost (4E) and sustainability analysis. *Energy*. 2025 Jul 17:137626. doi: 10.1016/j.energy.2025.137626
- [15] Ali OM, Mamat R, Abdullah NR, Abdullah AA. Analysis of blended fuel properties and engine performance with palm biodiesel-diesel blended fuel. *Renewable Energy*. 2016 Feb 1;86:59-67. doi: 10.1016/j.renene.2015.07.103
- [16] Fagundez JL, Golke D, Martins ME, Salau NP. An investigation on performance and combustion characteristics of pure n-butanol and a blend of n-butanol/ethanol as fuels in a spark ignition engine. *Energy*. 2019 Jun 1;176:521-30.
- [17] Rakopoulos DC, Rakopoulos CD, Giakoumis EG, Dimaratos AM, Kyritsis DC. Effects of butanol-diesel fuel blends on the performance and emissions of a high-speed DI diesel engine. *Energy conversion and management*. 2010 Oct 1;51(10):1989-97.
- [18] Venugopal T, Ramesh A. Effective utilisation of butanol along with gasoline in a spark ignition engine through a dual injection system. *Applied thermal engineering*. 2013 Sep 25;59(1-2):550-8.
- [19] Kharazmi S, Sheykhi M, Shahabiniya MP. Experimental Analysis, turbocharger matching and Simulation of the Performance of a Diesel Engine. Available at SSRN 5521545. doi: 10.2139/ssrn.5521545
- [20] Ramegouda R, Joseph AA. Effect of Compression Ratio on Performance and Emission Characteristics of Dual Spark Plug Ignition Engine Fueled With n-Butanol as Additive Fuel. *Int J Renew Energy Dev*. 2021 Feb;10(1):37-45. doi: 10.14710/ijred.2021.32364
- [21] Şahin Z, Aksu ON, Bayram C. The effects of n-butanol/gasoline blends and 2.5% n-butanol/gasoline blend with 9% water injection into the intake air on the SIE engine performance and exhaust emissions. *Fuel*. 2021 Nov 1;303:121210. doi: 10.1016/j.fuel.2021.121210
- [22] Asrar Hussain SK, Usman M, Umer J, Farooq M, Noor F, Anjum R. A novel analysis of n-butanol-gasoline blends impact on spark ignition engine characteristics and lubricant oil degradation. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2025 Dec 12;47(2):2036874. doi: 10.1080/15567036.2022.2036874
- [23] Yesilyurt MK, Yaman H. Comprehensive investigation of using n-butanol/gasoline blends in a port-fuel injection spark-ignition engine. *Int J Exergy*. 2022;37(1):1-23. doi: 10.1504/IJEX.2022.120105
- [24] Sandu C, Pana C, Negurescu N, Lazaroiu G, Cernat A, Georgescu R, Nutu C. The influence of N-Butanol addition in gasoline on the combustion in the spark ignition engine. *Sustainability*. 2023 Sep 21;15(18):14009. doi: 10.3390/su151814009
- [25] Yousif IE, Saleh AM. Butanol-gasoline blends impact on performance and exhaust emissions of a four stroke spark ignition engine. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2023 Jan 1;41:102612. doi: 10.1016/j.csite.2022.102612

- [26] Baratian A, Mirsane SA, Jadidi AM, Hajiali Mohammadi A. Investigating the effect of bioethanol fuel concentration with different percentages on power and torque in EF7 engine. The Journal of Engine Research. 2023 Nov 22;70(3):18-29. doi: [10.22034/er.2024.2026552.1050](https://doi.org/10.22034/er.2024.2026552.1050)
- [27] Hosseini H, Hajialimohammadi A, Gavzan IJ, Hajimousa MA. Numerical and experimental investigation on the effect of using blended gasoline-ethanol fuel on the performance and the emissions of the bi-fuel Iranian national engine. Fuel. 2023 Apr 1;337:127252. doi: [10.1016/j.fuel.2022.127252](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127252)