

## تأثیر اینترکولر و توربوشارژر بر موتور تراکتور فرگوسن ۲۸۵ عملیاتی

علی جلالی<sup>۱</sup>، محمد حسین عباسپور فرد<sup>۲\*</sup> و جواد زارعی<sup>۳</sup>

### چکیده

یکی از مشکلات اساسی در موتورهای احتراق داخلی، کاهش جریان هوای ورودی به داخل سیلندر و به همراه آن کاهش راندمان موتور است. برای حل این مشکل، توربوشارژر به‌عنوان وسیله‌ای مناسب در موتورهای دیزلی تراکتور استفاده می‌شود. توربوشارژر در مسیر گازهای خروجی قرار می‌گیرد تا طی فرآیندی هوا را فشرده کرده و جهت افزایش راندمان حجمی به داخل سیلندرها هدایت کند و همچنین با احتراق کامل‌تر به کاهش آلاینده‌های خروجی کمک کند. از سوی دیگر، استفاده همزمان از توربوشارژر و اینترکولر در موتورهای دیزلی کاهش دمای هوای ورودی به محفظه احتراق و افزایش راندمان حجمی را به دنبال دارد. در این پژوهش جهت بررسی تأثیر توربوشارژر و اینترکولر روی عملکرد موتور تراکتور فرگوسن ۲۸۵ عملیاتی، از یک توربوشارژر به همراه اینترکولر استفاده شده و آزمون‌های لازم توسط دینامومتر هیدرولیکی در دورهای مختلف rpm ۲۵۰۰-۲۰۰۰-۱۵۰۰-۱۰۰۰ در حالت تمام بار انجام شده‌است. نتایج نشان داد در دورهای مختلف، گشتاور خروجی موتور با وجود توربوشارژر و اینترکولر تا ۲۷/۲۲٪ افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که اثر نصب اینترکولر روی تراکتور ۲۸۵ عملیاتی در دورهای بالاتر از ۱۵۰۰ rpm در سطح ۱٪ معنادار بوده، بطوریکه می‌توان گفت وجود توربوشارژر و اینترکولر در دور بالاتر از ۱۵۰۰ باعث افزایش عملکرد موتور می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** اینترکولر، توربوشارژر، تراکتور فرگوسن، گشتاور موتور.

ارجاع: جلالی ع. عباسپور فرد م. و زارعی ج. ۱۳۹۹. تأثیر اینترکولر و توربوشارژر بر موتور تراکتور فرگوسن ۲۸۵ عملیاتی. نشریه پژوهش‌های مکانیک ماشین‌های کشاورزی. ۹(۱): ۴۵-۵۵.

۱- کارشناسی ارشد مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۲- استاد گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

۳- دکتری مکانیک بیوسیستم، گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد.

\*نویسنده مسئول: [abaspour@um.ac.ir](mailto:abaspour@um.ac.ir)

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۱/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۳/۱۷

## مقدمه

با توجه به پیشرفت تکنولوژی در دهه‌های اخیر در زمینه ماشین‌های کشاورزی و نیز بحث صرفه‌جویی در انرژی و افزایش قیمت سوخت در دنیا قدم‌های مثبتی صورت گرفته است. از این رو محققان، جهت بهبود عملکرد موتورهای مورد استفاده در تراکتورها از جمله موتور تراکتور فرگوسن ۲۸۵، استفاده از روش‌های مدرن را به‌منظور بهره‌وری بیشتر از این موتورها ضروری می‌دانند. از طرفی با توجه به مشکل داغ‌کردن سریع موتور تراکتور فرگوسن ۲۸۵ که یکی از پرکاربردترین موتورهای مورد استفاده در صنعت تراکتورسازی است (Adibi et al., 2017)، ارائه راهکارهایی جهت خنک شدن هوای ورودی به محفظه احتراق و بهره‌وری بیشتر از آن، اهمیت زیادی دارد؛ لذا انجام مطالعات و کارهایی در زمینه افزایش بهره‌وری و توان این‌گونه موتورها نظیر نصب توربوشارژرها در این نوع تراکتور پرکاربرد در کشور، ضروری است.

یکی از اصلی‌ترین مزایا و دلیل محبوبیت توربوشارژرها روی تراکتورها و موتورهای دیزلی، افزایش اندک وزن موتور نسبت به افزایش توان خروجی موتور است. در واقع توربوشارژرها جریان هوای ورودی به محفظه احتراق را تقویت نموده و باعث افزایش دو برابری فشار آن نسبت به فشار جو می‌شود (Dehkordi et al., 2010). این امر سبب افزایش قدرت خروجی شده و گشتاور موتور را از ۱۱ تا ۵۱ درصد بسته به طراحی توربوشارژر و موتور بالا می‌برد (Andalibi & Ahmadi, 2006).

تأثیر توربوشارژر بر پارامترهای عملکردی و میزان انتشار آلاینده‌های موتور دیزل توسط محققان از لحاظ قدرت ترمزی، گشتاور، مصرف سوخت و بازده حرارتی، و همچنین انتشار آلاینده‌ها بررسی شده است (Muqem et al., 2019. Zareei et al., 2019. Gao et al., 2015). این مطالعه نشان داده‌است که در شرایط افزایش شدید توان خروجی، استفاده از توربوشارژر تأثیر زیادی روی پخش دمای گازهای خروجی دارد و همچنین وجود توربوشارژر به همراه اینترکولر در ماشین‌های سنگین منجر به بهبود راندمان موتور و کاهش گازهای خروجی شده‌است.

حداکثر توان کششی، معمولاً مهم‌ترین معیار عملکرد تراکتورهای کشاورزی است. تحقیقات روی تراکتورهای ITM485 و TM800 با وجود توربوشارژر، و تراکتورهای بدون توربوشارژر ITM475 نشان داد که

سیستم توربوشارژر موجب افزایش توان کششی و نیروی کششی و کاهش مصرف سوخت ویژه تراکتور می‌شود (PashaiHulasu et al., 2015). در تحقیقی دیگر، این نتیجه حاصل شد که افزایش نسبت تراکم در یک موتور توربوشارژردار باعث کاهش مصرف سوخت ویژه ترمزی و آلاینده‌های خروجی می‌شود (Ahmadi pour et al., 2019).

در پژوهشی دیگر توسط (Shen et al., 2003)، بررسی عملکرد موتور و گازهای خروجی در یک موتور دوگانه‌سوز توربوشارژردار به همراه اینترکولر با سوخت دیزل و گاز طبیعی انجام شد. نتایج نشان داد که افزایش سوخت گاز طبیعی باعث کاهش NOx و افزایش مصرف سوخت ویژه ترمزی می‌شود. همچنین نتایج این مطالعه روش بهینه احتراق را در صورت وجود توربوشارژر همراه با اینترکولر با سوخت‌های مورد استفاده فراهم نمود.

مطالعاتی نیز جهت بهبود بازدهی یک موتور دیزل دارای توربوشارژر مجهز به اینترکولر هوا خنک، به‌صورت آزمایشگاهی انجام شده است (Plaksin et al., 2015). Sandu, 2014). در این پژوهش با استفاده از دینامومتر، پارامترهای عملکردی موتور اندازه‌گیری شده‌است. نتایج آزمون نشان داده‌است که باز طراحی توربوشارژر و اینترکولر حداکثر توان و گشتاور موتور را افزایش و آلاینده‌های خروجی را در یک موتور دیزلی کاهش می‌دهد.

در تحقیقی دیگر که به‌صورت آزمایشگاهی و عددی صورت گرفت، معرفی الگوهای تطبیقی توربوشارژر روی موتور انجام شد. توربین مورد استفاده در این مطالعه از نوع جریان شعاعی بود. نتایج نشان داد که با استفاده از روش‌های تجربی و الگوسازی، انتخاب توربوشارژر در دامنه کارکرد موتور، بهترین بازده را دارد (Shahhoseyni et al., 2009).

اینترکولر سیستم خنک‌کننده بعد از توربوشارژر است و با عبور جریان از میان آن، موجب کاهش دما شده و اجازه می‌دهد حجم هوای بیشتری به موتور وارد شود. سرانو و همکاران (Serrano et al., 2015)، اینترکولر را به عنوان عضوی مهم در کنترل درجه حرارت احتراق سیلندر در یک موتور توربوشارژر شده مطرح نمودند. همچنین نتایج ارزیابی حرارتی ترمودینامیکی هوای خروجی در یک سیستم توربوشارژر نشان داد که با کاهش دما از ۳۷۰ به

همین محقق نشان داد که مقدار بازده موتور با نتایج حاصل از شبیه‌سازی کمی تفاوت دارد. از بررسی اطلاعات مرکز توسعه مکانیزاسیون وزارت جهاد کشاورزی (خرداد ۹۷) چنین برمی‌آید که حدود ۳۰۰ هزار تراکتور فعال در کشور وجود دارد که از این تعداد حدود ۵۰ درصد آنها عمری بالای ۱۳ سال دارند و عملاً از رده خارج هستند. ضمن اینکه ۸۰ درصد تراکتورهای موجود در کشور دارای توان متوسط حدود ۸۰-۶۰ اسب بخار است، این موضوع نشان می‌دهد که توان عملیاتی متنوع در تراکتورهای موجود در کشور وجود ندارد و بیشتر عملیات مورد نیاز در کشور توسط تراکتورهای متوسط انجام می‌شود. متوسط کارکرد هر تراکتور در کشور حدود ۱۰۰۰ ساعت در سال است و اضافه مصرف سوخت آنها نسبت به تراکتورهای جدید با قابلیت عملکرد بالا، حدود ۳ لیتر در ساعت است. لذا کل مصرف گازوئیل هدررفته در قبال هر سال کار تراکتورهای با قابلیت متوسط نسبت به تراکتورهای با قابلیت و توان بالاتر حدود ۴۵۰ میلیون لیتر در بخش کشاورزی است. با توجه به مشکلات مطرح شده تحقیق حاضر به بررسی این موضوع می‌پردازد که در صورت نصب توربوشارژر و اینترکولر توان یا گشتاور موتور چه میزان افزایش می‌یابد که این افزایش، از هدررفت سوخت جلوگیری خواهد کرد.

### مواد و روش‌ها

جهت انجام آزمون از یک دستگاه دینامومتر هیدرولیکی Froude موجود در گروه مهندسی بیوسیستم دانشگاه فردوسی مشهد مطابق با مشخصات جدول ۱ و شکل ۱ استفاده شد، که قابلیت اندازه‌گیری میزان گشتاور و توان را به صورت دیجیتال دارد. برای اندازه‌گیری گشتاور، از یک تراکتور ۲۸۵ دارای مشخصات مطابق جدول ۲ با ویژگی لازم جهت نصب توربوشارژر و اینترکولر و همچنین یک عدد فشارسنج و یک عدد ترمومتر استفاده شد.

۳۰۳ درجه کلین در دور ۲۵۰۰rpm، مصرف سوخت به طور ویژه کاهش می‌یابد. همچنین آنها متوجه شدند که کاهش مصرف سوخت با اندازه اینترکولر مرتبط است (Sen & Ermis, 2015).

پژوهشگران یک مدل آزمایشگاهی از اینترکولر به همراه یک حسگر کنترل دما و یک موتور جریان مستقیم را طراحی کردند. هدف آنها کنترل دمای هوای ورودی به موتور در محدوده ۳۶ درجه سلسیوس بود. با افزایش دما از مقدار معین، موتور جریان مستقیم فعال شده و جریان آب را به اینترکولر هدایت می‌کند. در واقع با کاهش دما تا محدوده معین حجم اکسیژن بیشتری به موتور ارسال می‌شود (Mifdal et al., 2015).

اثرات اینترکولر بر کار خالص و بازده چرخه Brayton طی تحقیق دیگری، مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت‌های مختلف چرخه ایده‌آل Brayton با و بدون اینترکولر در هر چرخه پارامترهای مختلفی از جمله راندمان بررسی شده است. در بعضی شرایط در چرخه Brayton با اینترکولر بازده کمتری نسبت به حالت بدون اینترکولر به دست آمده اما در همه موارد کار مصرفی در چرخه Brayton با اینترکولر کمتر از حالت بدون اینترکولر بوده است (Adibi et al., 2017)

بررسی مطالعات روماگنولی و همکاران (Romagnoli et al., 2017) همچنین نیکزاد فر و شامخی (Nikzadfar & Shamekhi, 2019) روی عملکرد موتور دیزلی توربو شارژدار نشان داد که فرایند کالیبراسیون‌های معمول روی توربوشارژر باعث افزایش گشتاور در بار کامل موتور و کاهش آلاینده‌های خروجی می‌شود. در مطالعه دیگری که به بررسی کاربرد سیستم دو مرحله‌ای توربوشارژر روی موتورهای دیزلی بزرگ انجام شد، (Codan & Huber, 2012) نتیجه شده است که بازده موتور توربوشارژر دو مرحله‌ای حدود ۲/۵ درصد بیشتر از موتور توربوشارژر تک مرحله‌ای است؛ ضمن اینکه بررسی نتایج تجربی توسط

جدول ۱- مشخصات دینامومتر هیدرولیکی Froude

کشور سازنده	حداقل دور	حداکثر دور	حداقل توان (kW)	حداکثر توان (kW)
انگلیس	۱۰	۳۵۰۰	۰	۱۲۰

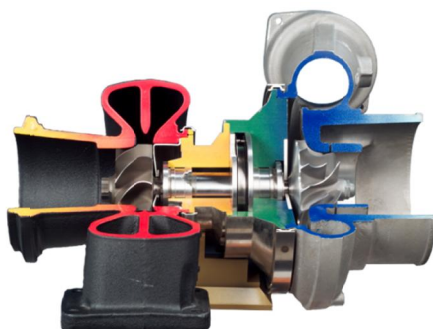
شامل یک مبدل حرارتی جهت خنک کردن هوای ورودی به آن و یک لوله خروجی جهت انتقال هوای خنک به داخل محفظه احتراق است. به منظور بررسی نشتی، قبل از نصب، اینترکولر در حوضچه آب تحت فشار قرار گرفته است. در این اینترکولر برای خشک شدن جریان هوا از نظر حرکتی بصورت U شکل است. همچنین به علت هواخنک بودن اینترکولر، در جلوی رادیاتور آب تراکتور نصب شد تا با جریان هوایی که توسط پره موتور مکش می شود حرارت را انتقال دهد.



شکل ۱- دینامومتر مورد استفاده جهت اندازه گیری گشتاور

### جدول ۲- مشخصات فنی تراکتور MF285 [شرکت تراکتورسازی تبریز]

مشخصات عملکردی	مقدار
حداکثر قدرت	75 hp @ 2000 RPM
حداکثر گشتاور	284 N.m @ 1300 RPM
قدرت محور P.T.O	63.4 hp @ 540 RPM
نوع موتور	پرکینز با پاشش مستقیم
سوخت	دیزل
تعداد سیلندر	4
وزن تراکتور	2540 Kg



شکل ۲- توربو شارژر برش خورده مورد استفاده



الف) محل استقرار توربوشارژر و اینترکولر



ب) لوله های ورودی و خروجی اینترکولر

شکل ۳- محل استقرار توربوشارژر و اینترکولر (الف) به همراه لوله های ورودی و خروجی اینترکولر (ب)

### آماده سازی و نصب توربوشارژر

یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در عملکرد یک توربوشارژر اندازه توربین آن است. اگر اندازه توربین آن بزرگ باشد جریان هوای بیشتری را به موتور وارد می کند اما مشکل آن این است که در دورهای پایین وارد عمل نمی شود. بنابراین برای هر موتور باید توربوشارژر متناسب با آن انتخاب شود. در این تحقیق توربوشارژر پیشنهاد شده توسط تراکتورسازی ایران که از نوع محوری است، انتخاب شد (شکل ۲). همچنین جهت نصب توربوشارژر روی تراکتور از یک منی فولد ورودی مخصوص متناسب با موتور استفاده شد. در این راستا توربوشارژر مورد نظر و متناسب با کمپانی ITM و پیشنهاد شده توسط تراکتورسازی ایران برای تراکتورهای ۲۸۵، روی تراکتور مورد آزمون نصب و راه اندازی شد (شکل ۳). در گام بعدی اینترکولر طراحی شده که از نوع هواخنک است و از نظر ابعاد و اندازه قابلیت نصب روی تراکتور مورد آزمون را دارد و جنس آن از برنج با ورودی و خروجی بالا و هم سایز با رادیاتور آب تراکتور است، نصب شد. اینترکولر بیان شده،

### اندازه‌گیری میزان دما

برای بررسی عملکرد اینترکولر، میزان دمای هوای ورودی و خروجی اینترکولر اندازه‌گیری می‌شود. به این منظور از یک دستگاه ترمومتر با بازه دمایی ۳-۱۳۰۰ درجه سلسیوس برای اندازه‌گیری دما در چهار دور استفاده شد. دوره‌های مشخص شده را با گاز دستی تنظیم نموده و در هر دور، دمای ورودی و خروجی اینترکولر قرائت و ثبت شد.

### اندازه‌گیری فشار اینترکولر

یکی دیگر از آزمون‌های مورد بررسی میزان افت فشار هوا در اینترکولر بود، از اینرو فشار هوا در ورودی و خروجی اینترکولر اندازه‌گیری شد. افزایش فشار هوای خروجی از کمپرسور توربوشارژر می‌تواند موجب افزایش فشار هوای ورودی به موتور شود و کاهش عملکرد توربوشارژر را به دنبال داشته‌باشد. کار توربوشارژر، بیشترکردن فشار هوای ورودی به موتور نیست بلکه فرستادن جریان هوا بیشتر به سیلندر است. افزایش فشار هوا در توربوشارژرها تا حدودی ناشی از افزایش دمای هوای کمپرس شده قبل از ورود به موتور است. بنابراین استفاده از اینترکولر برای پایین‌آوردن دمای هوا و متراکم‌کردن آن بسیار مؤثر خواهد بود. اینترکولر در حقیقت یک وسیله جانبی، شبیه به رادیاتور است که بعد از کمپرسور قرارداشته و هوا عبوری از کمپرسور را از داخل گذرگاه‌های آبدی شده به سمت مینیفولد انتقال می‌دهد، به طوری که عمل خنک‌کردن جریان هوا در محیط داخلی اینترکولر صورت گیرد. به این منظور از یک دستگاه فشارسنج دیجیتال (Digital pressure indicator) استفاده شد تا تغییرات فشار ورودی و خروجی اینترکولر بررسی شود. اینترکولر اگرچه باعث کاهش دمای هوای خروجی از توربوشارژر می‌شود اما در صورت پایین‌بودن فشار آن به خنک شدن هوای ورودی به موتور و افزایش راندمان حجمی موتور نیز کمک می‌کند.

### روش انجام آزمون

در این پژوهش که هدف آن بررسی تأثیر توربوشارژر و اینترکولر بر عملکرد موتور دیزل است، جهت انجام مطالعات آزمایشگاهی، سه مرحله آزمون صورت گرفته‌است. روش آزمون به این ترتیب بود که جهت انجام آزمایش‌های مرحله اول بدون نصب توربوشارژر و اینترکولر به تراکتور، در چهار دور مختلف ۲۵۰۰، ۲۰۰۰،

۱۵۰۰، ۱۰۰۰، ابتدا شفت PTO تراکتور را به دستگاه دینامومتر (شکل ۳) متصل نموده، سپس تراکتور را روشن و با گاز دستی دور موتور را در ۱۰۰۰ rpm ثابت می‌کنیم. سپس با دستگاه دینامومتر و توسط اهرم باردهی دینامومتر نیرویی مخالف جهت چرخش شفت PTO اعمال می‌شود. نیروی اعمالی در واقع معرف گشتاور موتور است، با توجه به نیروی اعمالی، داده‌ها (گشتاور و دور) توسط دستگاه لودسل و حسگر به رایانه ارسال می‌شود. این آزمون به همین صورت برای دوره‌های دیگر نیز انجام شده و در سه تکرار داده‌ها ثبت می‌شوند. جهت انجام آزمون‌های مرحله دوم، بررسی اثر توربوشارژر روی عملکرد موتور به تنهایی مورد بررسی قرارگرفت. به این منظور توربوشارژر استاندارد موتور مورد آزمون، تهیه شده و روی تراکتور نصب شد و باردهی در دوره‌های ذکر شده انجام شد. مانند مرحله قبل در دوره‌های ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ rpm تراکتور با توربوشارژر در حالت بارگذاری توسط دستگاه دینامومتر قرارگرفته و داده‌ها توسط دستگاه لودسل خوانده و در رایانه ثبت می‌شود. این کار با سه تکرار انجام می‌شود. در مرحله سوم که هدف بررسی تأثیر استفاده توامان اینترکولر و توربوشارژر بود، اینترکولری از نوع هواخنک در جلوی تراکتور (جلوی رادیاتور آب) نصب شد و لوله خروجی توربوشارژر به ورودی اینترکولر و خروجی اینترکولر به ورودی مینیفولد هوای موتور متصل شد. در ادامه عملیات نصب، آب‌بندی سیستم انتقال هوا از سیستم توربوشارژر به اینترکولر و از اینترکولر به مینیفولد هوا انجام شد و در پایان، تراکتور برای مرتبه سوم مورد آزمون و ارزیابی قرار گرفت و مقادیر عملکردی از داده‌های خروجی دینامومتر، مقادیر آلایندگی از دستگاه تست پنج گاز و کدرسنج، و همچنین مقادیر دما و فشار با استفاده از ترمومتر و فشارسنج اندازه‌گیری شده و جهت بررسی ثبت شد.

### تجزیه آماری داده‌ها

به منظور بررسی آماری داده‌های به دست آمده از انجام آزمون‌ها، اثر معنی‌داری متغیرهای مستقل (توربوشارژر، اینترکولر) و متغیرهای وابسته (دما، دور موتور، زاویه لنگ) و پارامترهای کیفی، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نمونه‌های آماری این تحقیق از نوع نمونه‌های هم‌بسته است که جهت تصدیق نتایج به دست آمده از داده‌های

آمار آزمون و سطح خطا همانند حالت قبلی محاسبه می‌شود به طوری که نتایج محاسبات آماری برای فرضیه فوق در جدول ۳ ثبت شده است.

جدول ۳- نتایج محاسبات آماری برای حالت فرضیه ۱ (در حالت وجود توربوشارژر)

دور موتور	n	α	t <sub>α</sub>	t
۱۰۰۰	۷۲۰	۱%	۲/۳۲	۳/۸۱*
۱۰۰۰	۷۲۰	۵%	۱/۶۴	۳/۸۱*
۱۵۰۰	۶۸۲	۱%	۲/۳۲	۱۶/۵۸*
۱۵۰۰	۶۸۲	۵%	۱/۶۴	۱۶/۵۸*
۲۰۰۰	۴۴۳	۱%	۲/۳۲	۱۶/۷۷*
۲۰۰۰	۴۴۳	۵%	۱/۶۴	۱۶/۷۷*
۲۵۰۰	۴۷۲	۱%	۲/۳۲	۲۷/۲۷*
۲۵۰۰	۴۷۲	۵%	۱/۶۴	۲۷/۲۷*

علامت \* معرف معنادار بودن است.

جدول ۳- نتایج محاسبات آماری برای حالت فرضیه ۲ (نصب توربوشارژر و اینترکولر)

RPM	n	α	t <sub>α</sub>	t
۱۰۰۰	۷۲۰	۱%	۲/۳۲۶	-۲/۲۳**
۱۰۰۰	۷۲۰	۵%	۱/۶۴۵	-۲/۲۳**
۱۵۰۰	۶۸۲	۱%	۲/۳۲۶	۲۱/۳۹*
۱۵۰۰	۶۸۲	۵%	۱/۶۴۵	۲۱/۳۹*
۲۰۰۰	۴۴۳	۱%	۲/۳۲۶	۲۹۸*
۲۰۰۰	۴۴۳	۵%	۱/۶۴۵	۲۹۸*
۲۵۰۰	۴۷۲	۱%	۲/۳۲۶	۱۳/۱۱*
۲۵۰۰	۴۷۲	۵%	۱/۶۴۵	۱۳/۱۱*

علامت \* معرف معنادار بودن و علامت \*\* معرف غیرمعنادار بودن است.

### نتایج و بحث

#### عملکرد موتور از نظر گشتاور خروجی

نتایج اندازه‌گیری گشتاور موتور حاکی از این است که با افزایش بار موتور دور موتور کاهش می‌یابد تا اینکه در نقطه‌ای منجر به خاموش شدن موتور می‌شود (پدیده‌ای که اصطلاحاً واماندگی موتور (Engine stall) نامیده می‌شود). نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که در صورت وجود توربوشارژر و توربوشارژر و اینترکولر به صورت همزمان، حداکثر مقدار گشتاور به دست آمده نسبت به موتور بدون توربوشارژر به ترتیب برابر با ۹/۵۲ و ۱۸/۱۳ درصد افزایش دارد. این موضوع به دلیل افزایش دبی هوای ورودی به

آزمون، یک مقایسه آماری صورت گرفت.

### مقایسه راندمان موتور تراکتور قبل و بعد از نصب توربوشارژر

جهت مقایسه راندمان موتور تراکتور قبل و بعد از نصب توربوشارژر و اینترکولر، از روش آزمون T-Value استفاده شده است. برای بررسی آماری این مطالعه، راندمان به عنوان معیار مقایسه میانگین گشتاورها در نظر گرفته می‌شود به طوری که فرضیات بشرح زیر است.

- μ<sub>1</sub> میانگین گشتاور موتور قبل از نصب توربوشارژر
- μ<sub>2</sub> میانگین گشتاور موتور بعد از نصب توربوشارژر
- μ<sub>3</sub> میانگین گشتاور موتور بعد از نصب توربوشارژر

#### آزمون‌های فرض

با فرض اینکه میانگین گشتاور موتور بعد از نصب توربوشارژر افزایش می‌یابد، از نظر ریاضی این فرضیه به صورت معادله (۱) خواهد بود (فرضیه ۱):

$$\begin{cases} H_0: \mu_2 \leq \mu_1 \\ H_1: \mu_2 > \mu_1 \end{cases} \quad (1)$$

اگر تعداد داده‌ها n و i = 1, 2, ..., n اختلاف گشتاور قبل و بعد از نصب توربوشارژر باشد، آنگاه آماره آزمون همانند معادله (۲) برابر است با:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n d_i^2 - (\sum_{i=1}^n d_i)^2}{n-1}}} \quad (2)$$

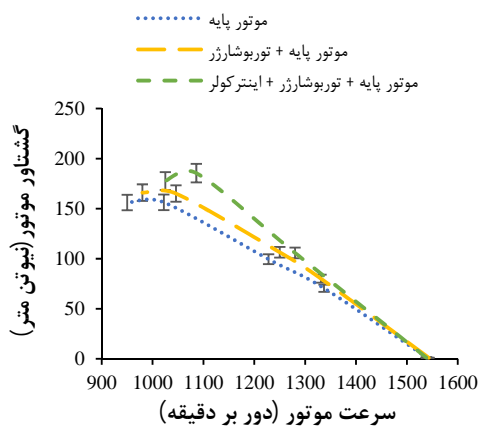
مقدار به دست آمده از معادله فوق را برای بررسی معنادار بودن داده‌ها استفاده می‌کنیم. این آزمون تفاوت‌ها را نسبت به تغییرپذیری داده‌های به دست آمده ارزیابی می‌کند و در نتیجه معنادار بودن و یا غیرمعنادار بودن داده‌ها را با مقایسه بین نتایج آزمایشگاهی که روی یک نمونه یکسان انجام شده است، مشخص می‌کند.

نتایج محاسبات آماری برای فرضیه فوق در جدول ۳ ثبت شده است و نشان می‌دهد که در سطوح یک درصد و پنج درصد معنادار است.

برای حالت ۲ با فرض اینکه میانگین گشتاور موتور بعد از نصب توربوشارژر و اینترکولر افزایش می‌یابد، از نظر ریاضی این فرضیه به صورت معادله (۳) نشان داده می‌شود:

$$\begin{cases} H_0: \mu_3 \leq \mu_1 \\ H_1: \mu_3 > \mu_1 \end{cases} \quad (3)$$

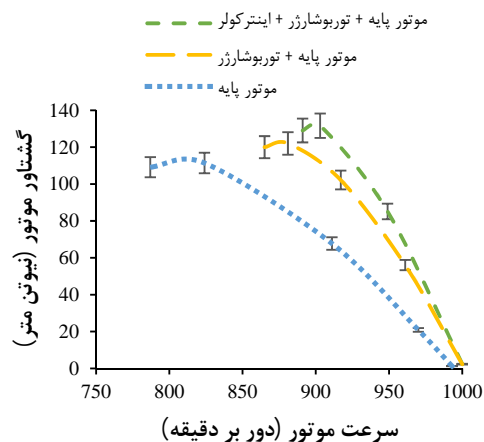
شکل ۵ نمودار تغییرات گشتاور موتور را در ۱۵۰۰ rpm با توجه به تغییر بار موتور و در شرایط وجود توربوشارژر و اینترکولر نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش بار موتور، گشتاور افزایش، اما دور موتور کاهش می‌یابد تا اینکه در نقطه‌ای منجر به کاهش گشتاور می‌شود. علاوه بر این، افزایش بیش از حد بار باعث خاموش شدن موتور می‌شود (واماندگی موتور رخ می‌دهد). همچنین مقدار افزایش گشتاور، در صورت وجود اینترکولر و توربوشارژر به صورت همزمان نسبت به حالت فقط دارای توربوشارژر و بدون توربوشارژر به ترتیب برابر با ۶/۳۷ و ۱۸/۸۳ درصد است. حداکثر گشتاور در حالت بدون توربوشارژر در حالت افزایش بار در ۱۰۱۱ rpm، در حالت با توربوشارژر تنها در ۱۰۴۶ rpm و در حالت وجود توربوشارژر همراه با اینترکولر در ۱۰۸۶ rpm حاصل شد. با مشاهده شکل ۴ و ۵ می‌توان گفت که وجود اینترکولر و توربوشارژر باعث می‌شود که حداکثر گشتاور با توجه به افزایش بار موتور در دور بالاتر حاصل شود و این موضوع به حل مسئله که همانا به دست آوردن گشتاور بالاتر قبل از کاهش دور موتور یا خاموش کردن موتور است کمک فراوانی می‌کند. بنابراین می‌توان گفت که راندمان موتور یا به عبارتی عملکرد موتور در صورت وجود توربو و اینترکولر به طور توامان بیشتر است.



شکل ۵- تغییرات گشتاور موتور در ۱۵۰۰RPM تا حالت تمام بار

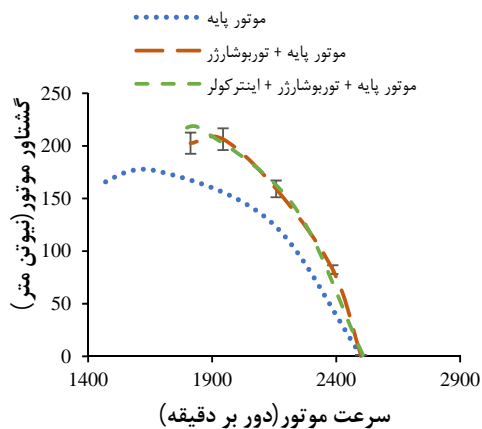
شکل ۶ نمودار تغییرات گشتاور موتور را در مقابل دور موتور در شرایط عدم وجود توربوشارژر، وجود توربوشارژر و وجود توربوشارژر و اینترکولر در سرعت ۲۰۰۰ rpm نشان می‌دهد. نتایج در این دور همانند نتایج در دورهای قبلی

موتور توسط توربوشارژر، خنک شدن هوای ورودی به موتور توسط اینترکولر و در نتیجه افزایش راندمان حجمی موتور و اثر قانون دوم ترمودینامیک است، که در نهایت منجر به بهبود کارایی موتور شده است. نکته دیگری که در اینجا حائز اهمیت است این است که حداکثر گشتاور موتور در صورت وجود توربوشارژر و اینترکولر در دور بالاتری نسبت به حالت بدون توربو حاصل می‌شود (به عبارتی وجود توربوشارژر و اینترکولر باعث می‌شود واماندگی در دورهای بالاتری رخ دهد). این موضوع ناشی از آن است که عملاً اینترکولر و توربوشارژر در دورهای خیلی پایین کارایی ندارد، چرا که جهت عملکرد توربوشارژر نیاز به سرعت بالای دودهای خروجی است. شکل ۴ نمودار گشتاور موتور را در شرایط بدون توربوشارژر و اینترکولر، وجود توربوشارژر تنها و وجود توام توربوشارژر و اینترکولر در سرعت ۱۰۰۰ rpm نشان می‌دهد. با توجه به نمودار مذکور این نتیجه حاصل می‌شود که در صورت وجود توربوشارژر و اینترکولر به طور همزمان نسبت به حالت موتور فقط با توربو، با افزایش بار موتور، حداکثر گشتاور در دور بالاتری به دست می‌آید و این مقدار افزایش غیرقابل بازگشت به طور عمده ناشی از فشار و درجه حرارت بیشتر به علت وجود توربوشارژر است. ضمن اینکه وجود توربوشارژر و اینترکولر به طور همزمان باعث می‌شود با افزایش بار موتور به علت فشار معکوسی که توربوشارژر ایجاد می‌کند، کارایی آن در دورهای خیلی پایین کم باشد و موتور نسبت به حالت بدون توربوشارژر زودتر دچار واماندگی شده و خاموش شود.



شکل ۴- تغییرات گشتاور موتور در ۱۰۰۰ rpm تا حالت تمام بار

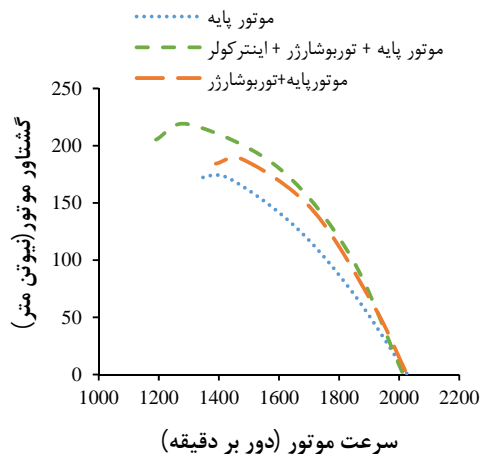
گشتاور در دور بالاتر حاصل شده، لذا وجود توربو و اینترکولر باعث افزایش راندمان موتور و یا عملکرد تراکتور می‌شود.



شکل ۷- تغییرات گشتاور موتور در ۲۵۰۰ rpm تا حالت تمام بار

شکل ۸ نمودار تغییرات حداکثر گشتاور موتور را در دوره‌های مختلف موتور در سه حالت توربوشارژر همراه با اینترکولر، فقط با توربوشارژر و بدون توربوشارژر نشان می‌دهد. با توجه در این شکل می‌توان گفت که حداکثر مقدار گشتاور در صورت وجود توربو به همراه اینترکولر بیشترین مقدار را نسبت به حالت بدون توربوشارژر دارد. در ضمن اینکه وقتی توربو و اینترکولر وجود دارد می‌توان به حداکثر گشتاور در دور پایین‌تر دست یافت و این ناشی از آن است که راندمان حجمی با وجود توربو و اینترکولر در دور پایین‌تر نسبت به حالت بدون اینترکولر و توربو کامل‌تر است. لذا اگر حجم هوادهی به محفظه احتراق بیشتر شود، گشتاور افزایش می‌یابد. همچنین این مطلب موید این موضوع است که عملاً وجود توربو و اینترکولر در این تراکتور مفید هستند. بنابراین نمودار فوق نشان می‌دهد که مقدار حداکثر گشتاور موتور در حالت تنها با توربوشارژر و توربوشارژر با اینترکولر نسبت به حالت بدون توربوشارژر به ترتیب در حدود ۱۶/۱۵ درصد و ۲۵/۱۸ درصد افزایش داشته است. لذا نصب توربو به همراه اینترکولر روی این تراکتور کاملاً توجیه‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه خواهد بود.

موتور است و بیانگر آنست که در صورت وجود اینترکولر و توربوشارژر به صورت همزمان و در حالت فقط وجود توربوشارژر، مقدار گشتاور افزایش یافته نسبت به موتور بدون توربوشارژر به ترتیب برابر با ۹/۸۳ و ۲۷/۲۲ درصد است. ضمناً حداکثر گشتاور در حالت بدون توربوشارژر در حالت افزایش بار در ۱۴۳۰ rpm و در حالت با توربوشارژر در ۱۴۸۰ rpm و در حالت وجود توربو همراه با اینترکولر در ۱۳۰۰ rpm حاصل شده است.

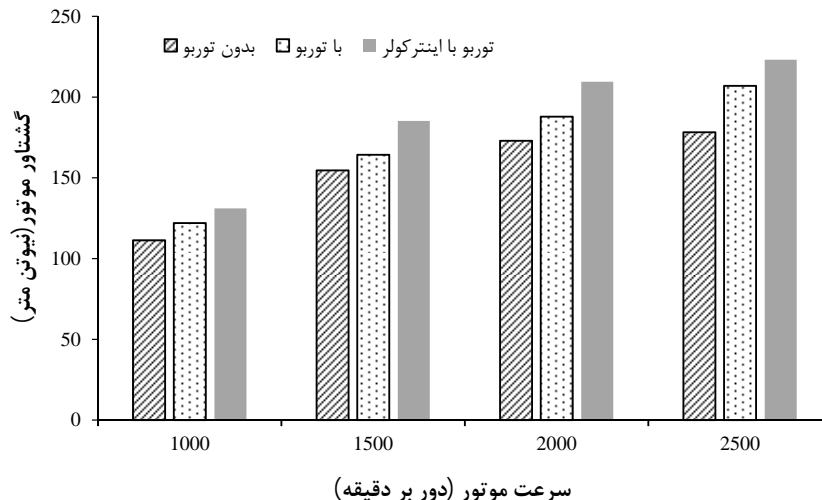


شکل ۶- تغییرات گشتاور موتور در ۲۰۰۰ rpm تا حالت تمام بار

شکل ۷ نمودار گشتاور موتور را در مقابل دور موتور در شرایط مختلف وجود و یا عدم وجود توربوشارژر و اینترکولر در سرعت ۲۵۰۰ rpm نشان می‌دهد. در صورت وجود اینترکولر و توربوشارژر به صورت همزمان و در حالت فقط وجود توربوشارژر، مقدار گشتاور افزایش یافته به ترتیب برابر با ۱۶/۸۵ و ۲۳/۱۱ درصد است. ضمناً حداکثر گشتاور در حالت بدون توربوشارژر در حالت افزایش بار در دور ۱۶۶۹ rpm و در حالت با توربوشارژر در دور ۱۹۴۴ rpm و در حالت وجود توربو همراه با اینترکولر در ۱۸۴۵ دور بر دقیقه حاصل شده است.

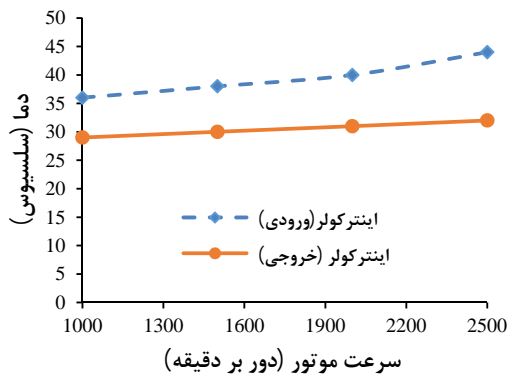
نکته حائز اهمیت در دور ۲۵۰۰ rpm این است که به علت عدم فرصت کافی جهت خنک‌شدن هوای ورودی به سیلندر، مقدار گشتاور موتور در حالت با و بدون اینترکولر در شرایط موتور با توربوشارژر تقریباً برابر است. با مشاهده نمودار شکل ۶ و ۷ می‌توان گفت که موتور دارای توربوشارژر و اینترکولر دارای حداکثر گشتاور بیشتری نسبت به موتور بدون توربو است، همچنین حداکثر مقدار





شکل ۸- مقایسه حداکثر گشتاور موتور در دورهای مختلف در حالت تمام بار

به افزایش راندمان حجمی موتور کمک می‌کند. ضمن اینکه سرد شدن هوای ورودی به محفظه احتراق از وجود نقاط داغ در محفظه احتراق جلوگیری کرده و مانع از افزایش NOx که همانا در اثر وجود نقاط داغ و افزایش دمای هوای محفظه احتراق به وجود می‌آید، می‌شود (Luo *et al.*, 2019).



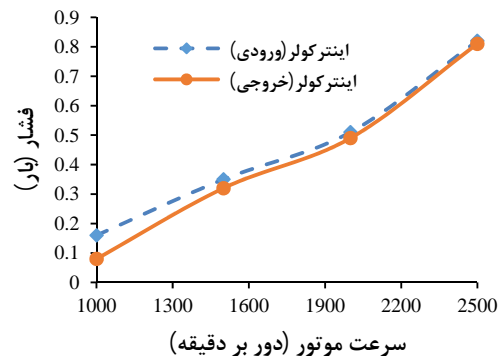
شکل ۱۰- مقایسه دمای هوا در ورودی و خروجی اینترکولر

### نتیجه‌گیری

در این پژوهش نتایج زیر از نظر عملگری حاصل شد: نتایج آماری نشان می‌دهد که اثر توربوشارژر روی عملکرد موتور در تمام دوره‌های آزمون معنادار بوده است. اما اثر توربوشارژر و اینترکولر به‌طور همزمان روی عملکرد موتور نشان می‌دهد که در دور ۱۰۰۰ rpm، نصب موارد مذکور معنی‌دار نبوده و این به دلیل کاهش فشار به وجود آمده در

### تغییرات فشار و دما در اینترکولر

در شکل ۹ مقایسه فشار هوا در ورودی و خروجی دیده می‌شود که با افزایش دور اولیه، فشار هوای ورودی و فشار هوای خروجی اینترکولر افزایش یافته و اختلاف فشار ورودی و خروجی اینترکولر (افت فشار) در دورهای بالا ناچیز و تقریباً یکسان است. زیرا قسمتی از فشار هوای ورودی به اینترکولر در اثر سرد شدن در داخل اینترکولر کاهش می‌یابد و بخشی از افت فشار ناشی از اصطکاک هوا با جداره داخلی اینترکولر رخ می‌دهد.



شکل ۹- مقایسه فشار هوا در ورودی و خروجی اینترکولر

شکل ۱۰ مقایسه دمای هوای ورودی و خروجی اینترکولر را نشان می‌دهد و مشخص است که دمای هوای خروجی اینترکولر نسبت به دمای هوای ورودی به اینترکولر کاهش یافته است. البته می‌توان گفت که سرد شدن هوا در داخل اینترکولر در دوره‌های مختلف کاملاً مشهود است که خود

- turbocharged diesel engine of a heavy truck and potentials of improving fuel economy and reducing exhaust emissions. *Energy conversion and management*, 15(184): 456-65.
7. Luo, QH. Hu, JB. Sun, BG. Liu, FS. Wang, X. Li, C. and Bao, LZ. 2019. Experimental investigation of combustion characteristics and NOx emission of a turbocharged hydrogen internal combustion engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(11): 5573-84.
  8. Mifdal, M. Y. A. Nuraida, M. H. Norzalina, O. and Shamil, A. H. 2015. Turbo Intercooler Cooling System. *International Journal of Engineering Science Invention ISSN (Online)*, 2319(6734): 49-56.
  9. Muqem, M. Ahmad, M. and Sherwani, AF. 2015. Turbocharging of diesel engine for improving performance and exhaust emissions: A review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 12: 22-9.
  10. Nikzadfar, K. and Shamekhi, A. H. 2019. Investigating a new model-based calibration procedure for optimizing the emissions and performance of a turbocharged diesel engine. *Fuel*, 242: 455-469.
  11. PashaiHulasu, KH. Mohammadi, B. and Alasti, M. 2015. Haddad Derafshi, A. and Abbasgholipour, M. Effect of turbo charger system on engine fuel consumption and tractor power and traction (ITM475, ITM485 and ITM800) *Journal of Agricultural Machinery*, 5(2): 313-324.
  12. Plaksin, A. Gritsenko, A. and Glemba, K. 2015. Modernization of the turbocharger lubrication system of an Internal combustion engine. *Procedia engineering*, 129: 857-862.
  13. Rakopoulos, C. D. Dimaratos, A. M. Giakoumis, E. G. and Rakopoulos, D. C. 2009. Evaluation of the effect of engine, load and turbocharger parameters on transient emissions of diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 50(9): 2381-2393.
  14. Romagnoli, A. Manivannan, S. Rajoo, M. S. Chiong, A. Feneley, A. Pesiridis, M. and Botas, R. F. 2017. A review of heat transfer in turbochargers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79: 1442-1460.
  15. Sandu, V. 2014. Improving Diesel Engine Performance by Air-To-Air Intercooling. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Engineering Sciences. Series I*, 7(2): 19.
  16. Sen, Y. and Ermis, K. 2015. Thermal Analysis of Turbocharger and Intercooler in Diesel Engine/ ISITES2015 Valencia – Spain, 2012-2021.
- توربوشارژر توسط اینترکولر است، همچنین به دلیل پایین بودن دور موتور، دور توربوشارژر به اندازه مورد نیاز جهت افزایش فشار هوای ورودی به اینترکولر و مانیفولد نبوده است. همچنین در دورهای ۱۵۰۰RPM، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ اثر توربوشارژر به همراه اینترکولر در سطح ۱٪ و ۵٪ معنی دار شده است.
- عملکرد اینترکولر نشان می دهد که اختلاف دمای ورودی و خروجی در ۲۵۰۰ RPM نسبت به دورهای پایین تر به دلیل سرعت شدت جریان بیشتر بوده و این موضوع به افزایش و بهبود راندمان حجمی کمک مضاعف می کند.
- در بررسی نتایج حداکثر مقدار گشتاور در صورت وجود توربوشارژر و اینترکولر روی تراکتور ۲۸۵ عملیاتی نشان داد که مقادیر حداکثر گشتاور در تمام دورهای موتور در حالت تمام بار افزایش داشته و مقادیر افزایش آنها به ترتیب در ۱۰۰۰RPM، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰، ۲۵۰۰ برابر با ۲۵/۱۸٪، ۲۱/۱۶٪، ۱۹/۸۳٪ و ۱۷/۷۳٪ است.

#### منابع

1. Adibi, T. Kangarluei, R. A. Azar, S. K. J. and Rossoli, B. 2017. Investigating Effect of Intercooler on Performance and Efficiency of Brayton Cycle in Ideal and Non-ideal Condition, 6(4): 706-710.
2. Ahmadipour, S. Aghkhani, M. H. and Zareei, J. 2019. The effect of compression ratio and alternative fuels on performance and exhaust emission in a diesel engine by modelling engine. *AUT Journal of Mechanical Engineering*, 3(2): 81-90.
3. Andalibi, P. and Ahmadi, M. 2006. Turbocharging a bi-fuel engine to achieve equal power in natural gas and gasoline modes. In *ASME 2006 Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, pp. 645-654.
4. Codan, E. and Huber, T. 2012. Application of two stage turbocharging systems on large engines. In *10th International Conference on Turbocharger and Turbocharging, IMechE, London*, pp. 55-69.
5. Dehkordi, B. Mirzaee, R. and Kharadmand, A. 2010. Improvement and optimization of energy and exergy in oil industry operational vessels, 4th International Conference on Modern Approaches to Energy Conservation, 10: 210-219.
6. Gao, J. Chen, H. Tian, G. Ma, C. and Zhu, F. 2019. An analysis of energy flow in a

17. Serrano, J. R. Olmeda, P. Arnau, F. J. Reyes-Belmonte, M. A. and Tartoussi, H. 2015. A study on the internal convection in small turbochargers. Proposal of heat transfer convective coefficients. *Applied Thermal Engineering*, 89: 587-599.
18. Shahhoseyni, M. Hajiloy, A. and Rad, M. 2009. The role of modeling turbocharger in the stages of adaptation to the engine. *The journal of engine research*, 12: 241-252.
19. Shen, J. Qin, J. and Yao, M. 2003. Turbocharged diesel/ CNG dual-fuel engines with intercooler: combustion, emissions and performance (No. 2003-01-3082). SAE Technical Paper. SAE Technical Paper; 2003 Oct 27.
20. Zareei, J. Aghakhani, Mh. and Ahmadipour, S. 2019. Numerical investigation of the variation of compression ratio on performance and exhaust emission of a turbo-diesel engine. *International Journal of Automotive Engineering*, 9(3): 2991-3001.

