

## تأثیر مخلوط‌های سوخت بیواتانول و دیزل بر روی ارتعاش موتور دیزل

سید حبیب الله هاشمی فرد دهکردی<sup>۱\*</sup> - مرتضی الماسی<sup>۲</sup> - علی محمد برقی<sup>۳</sup> - بابک بهشتی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۲/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۲/۶/۲

### چکیده

امروزه استفاده از سوخت بیواتانول به‌عنوان یک سوخت جایگزین تجدیدپذیر بسیار مورد توجه قرار گرفته است. مخلوط‌های بیواتانول و دیزل با نسبت‌های مختلفی در موتورهای دیزل و بنزینی استفاده می‌شود. ارتعاش به‌طور مستقیم اثر مخرب بر روی قطعات موتور و کاربر دارد و به‌همین دلیل بررسی ارتعاش حاصل از فرآیند احتراق در موتورهای احتراق داخلی همواره مورد توجه محققان بوده است. در این تحقیق تأثیر مخلوط‌های بیواتانول و دیزل در شش ترکیب دیزل خالص (E2، (D100)، (مخلوط ۲ درصد بیواتانول و ۹۸ درصد دیزل)، E5، E10، E15 و E20 بر روی ارتعاش موتور تراکتور دوچرخ میتسوبیشی مورد بررسی قرار گرفت. موتور در سرعت‌های ۱۲۰۰، ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه برای تمامی مخلوط‌های سوخت تست شد، همچنین برای دو سوخت E10 و D100 اثر بار موتور بر مقدار ارتعاش بررسی شد. نتایج نشان داد مخلوط‌های سوخت اثر معنی‌داری بر مقدار ارتعاش دارد. کمترین مقدار ارتعاش مربوط به E10 و بیشترین ارتعاش مربوط به سوخت E20 است. همچنین ثابت شد، با افزایش دور موتور برای تمامی مخلوط‌های سوخت، مقدار شتاب نیز افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد افزایش بار موتور اثر معنی‌داری بر مقدار شتاب عمودی و جانبی دارد به‌گونه‌ای که با افزایش بار موتور، مقدار شتاب در راستای جانبی کاهش یافت ولی مقدار شتاب عمودی در ابتدا روند افزایشی و پس از آن روند کاهشی دارد.

واژه‌های کلیدی: ارتعاش، بیواتانول، تراکتور دو چرخ، موتور دیزل

### مقدمه

مقایسه با سوخت بیودیزل دارای مزایای بسیاری مانند تولید ساده‌تر و ارزان‌تر؛ قابلیت تجدیدپذیری بیشتر و حاوی اکسیژن بیشتری بوده و بنابراین پتانسیل بیشتری جهت کاهش آلاینده‌گی ذرات معلق دارد. بیواتانول سوختی است که از منابع گیاهی، محصولات جانبی صنایع تبدیلی کشاورزی حاوی قند یا نشاسته و یا از زیست توده سلولزی حاصل از پس‌مانده‌های زیستی تولید می‌شود. تقریباً ۳۰٪ وزنی اتانول از اکسیژن تشکیل شده است، به‌همین دلیل پس از مخلوط کردن آن با سوخت می‌تواند به احتراق بهتر و کاهش انتشار آلاینده‌های زیست محیطی کمک کند (Zoldy, 2011).

امروزه سوخت اتانول کاربرد گسترده‌ای در موتورهای بنزینی دارد، به‌طور مثال در برزیل ۹۰ درصد خودروهای سواری و ۲۶ درصد خودروهای ناوگان عمومی از مخلوط‌های اتانول و دیزل استفاده می‌کنند (Rakopoloulos *et al.*, 2008). ولی به‌دلایلی مانند عدد ستان پایین اتانول و اینکه احتراق اتانول به روش تراکمی دشوار است، در موتورهای احتراق تراکمی کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. تحقیقات وسیعی در خصوص تأثیر بیواتانول بر روی عملکرد و آلاینده‌های خروجی موتور دیزل انجام گرفته است. استفاده از مخلوط اتانول و دیزل می‌تواند باعث افزایش راندمان حرارتی موتور، کاهش آلودگی ذرات معلق و NOX گردد (Hansen *et al.*, 2008).

موتورهای دیزل به خاطر دارا بودن راندمان بالا در گستره وسیعی مانند کشاورزی، حمل و نقل، عمران و تولید انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی با توجه به پیشرفت‌های صنعت الکترونیک و کاربرد آن در موتور، موتورهای دیزل بیش از پیش در خودروها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به کاهش سریع منابع سوخت فسیلی در جهان، افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی و همچنین آلاینده‌گی‌های زیست محیطی تولید شده توسط سوخت‌های فسیلی، استفاده از سوخت‌های تجدیدپذیر به‌عنوان سوخت جایگزین در موتورهای دیزل مورد توجه قرار گرفته است.

در بین سوخت‌های تجدیدپذیر، بیواتانول به‌عنوان یکی از قابل اعتمادترین سوخت‌های جایگزین مورد توجه قرار گرفته است که در

۱- استادیار گروه مکانیک ماشین‌های کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول  
(نویسنده مسئول: Email: hashemifard63@gmail.com)

۲ و ۳- استاد گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

۴- استادیار گروه ماشین‌های کشاورزی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران

محدوده بین ۲۲/۱ تا ۱۰۰/۵ متر بر مجذور ثانیه برای سوخت بنزین و در محدوده بین ۱/۴ تا ۹۰/۵ متر بر مجذور ثانیه برای سوخت LPG افزایش می‌یابد (Flekiewicz et al., 2007). خرابی سوپاپ‌های موتور دیزل یکی دیگر از عوامل افزایش ارتعاش بلوک موتور است که با استفاده از روش‌های WVDs<sup>۵</sup> و یا NNP<sup>۶</sup> قابل شناسایی می‌باشد (Chengdong et al., 2008).

تأثیر مخلوط‌های سوخت بنزین و اتانول بر روی ارتعاش بلوک سیلندر و سر و صدای موتور اشتعال جرقه‌ای توسط محققان بررسی شد. نتایج آزمایش نشان داد که با افزایش اتانول در مخلوط سوخت، ارتعاش و سر و صدای موتور به‌خصوص در محدوده دور موتور ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ دور بر دقیقه افزایش می‌یابد (Keskin, 2010). تقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) ارتعاشات مخلوط‌های سوخت بیودیزل و دیزل را بر روی موتور اشتعال تراکمی شش سیلندر پرکینز قبل و بعد از تعمیر موتور بررسی کردند؛ نتایج نشان داد که مخلوط سوخت به‌طور معنی‌داری بر مقدار ارتعاش تأثیرگذار است، به‌گونه‌ای که مخلوط‌های B20 و B40 کمترین مقدار ارتعاش و مخلوط‌های B15 و B30 بیشترین مقدار ارتعاش را داشتند. همچنین نتایج آزمایش‌ها نشان داد که ارتعاش به‌مقدار چشمگیری بعد از تعمیر موتور کاهش یافته است.

## مواد و روش‌ها

### تجهیزات مورد استفاده

در این تحقیق از تراکتور دوچرخ میتسوبیشی مدل MR801 استفاده شد. جدول ۱ مشخصات فنی موتور و تراکتور مورد استفاده در آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. به‌منظور کنترل بار موتور از یک دینامومتر جریان گردابی<sup>۷</sup> ساخت شرکت TechnoGerma استفاده شد که توسط یک اتصال مناسب به محور خروجی موتور تراکتور متصل شد. در این تحقیق ارتعاشات موتور تراکتور دو چرخ مورد بررسی قرار گرفت. ارتعاش موتور رفت و برگشتی دیزل حاصل از نیروهای احتراق یک‌طرفه و تشدیدهای ساختاری موتور است؛ هرگونه تغییر در نوع سوخت و الگوی پاشش بر روی ارتعاش موتور تأثیر می‌گذارد.

برای جمع‌آوری سیگنال‌های ارتعاش از دو عدد شتاب‌سنج مدل 8704B25M10 ساخت شرکت کیستلر<sup>۸</sup> استفاده شد. این شتاب‌سنج در محدوده  $\pm 50g$  با حساسیت بالای  $1\text{ mV g}^{-1}$  توانایی اندازه‌گیری بسامدهای بین ۱۰ تا ۷۰۰۰ هرتز را دارد. برای اندازه‌گیری و ثبت زاویه دوران میل‌لنگ و همچنین دور موتور از یک کدگذار استفاده شد.

شرکت اسکانیا نیز از مخلوط سوخت ۵ درصد اتانول به‌همراه دیزل برای اتوبوس‌های شهری استفاده نموده است (Kowalewicz and Pajaczek, 2003).

بررسی صدا و ارتعاش حاصل از فرآیند احتراق در موتورهای احتراق داخلی همواره مورد توجه محققان بوده است. ارتعاش به‌طور مستقیم اثر مخرب بر روی قطعات موتور و کاربر دارد و همچنین سر و صدای ناشی از آن نیز بر روی کاربران اثر نامطلوب دارد. موتورهای دیزل در مقایسه با موتورهای جرقه‌ای ارتعاش و صدای بیشتری تولید می‌کنند که می‌تواند اثرات مخرب بیشتری بر روی موتور و کاربر داشته باشد. آندرو و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که ارتعاشات پیچشی<sup>۱</sup> سیستم‌های موتوری، بعضی از پدیده‌ها را نشان می‌دهد که در مورد ارتعاشات معمول نیست. این تأثیرات از هندسه مکانیزم رفت و برگشتی نتیجه می‌گردد و با تحلیل‌های جنبش‌شناسی و دینامیکی آشکار می‌شود. جدا از اینکه اینرسی سیستم با چرخش میل‌لنگ تغییر می‌کند، نتایج نشان داد که ارتعاشات از اصطکاک بین سیلندر و پیستون نیز تأثیر می‌پذیرد. آزمایش‌هایی بر روی احتراق موتور دیزلی به‌منظور آشکارسازی عیوب موتور با استفاده از ارتعاشات پیچشی میل‌لنگ انجام شد که از سیگنال کدگذار<sup>۲</sup> برای ایجاد شکل موج سرعت زاویه‌ای لحظه‌ای (IAS)<sup>۳</sup> استفاده شد. مطالعات اولیه نشان داد که سیگنال IAS و تحلیل تبدیل فوریه سریع آن برای پایش موتور با کمتر از هشت سیلندر مؤثر هستند. قابلیت کاربرد این روش برای موتورهای با سرعت متوسط به خاطر تعداد سیلندر بالا و ممان‌های اینرسی بزرگ کاهش می‌یابد. بنابراین از یک روش تبدیل فوریه بهبود یافته استفاده شد. به‌علاوه یک روش جدید بر اساس سیستم مختصات قطبی سیگنال IAS معرفی گردید. کلیه آزمایش‌ها بر روی موتورهای ۱۶ و ۲۰ سیلندر سالم و معیوب انجام گرفت (Charles et al., 2009).

کارلوجی و همکاران (۲۰۰۶) رابطه بین پارامترهای تزریق سوخت و ارتعاش بلوک سیلندر را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها از دو شتاب‌سنج که بر روی سطوح جانبی و بالایی بلوک سیلندر قرار گرفته بود و روش آنالیز فوریه کلاسیک به‌منظور تعیین رابطه بین فشار درون سیلندر و سیگنال‌های ارتعاشی استفاده کردند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که زمان و مقدار پاشش سوخت تأثیر قابل توجهی بر روی سیگنال‌های ارتعاشی بلوک سیلندر دارد. تأثیر سوخت بنزین و گاز مایع LPG<sup>۴</sup> بر روی فشار احتراق داخل سیلندر و ارتعاش بلوک سیلندر موتور اشتعال جرقه‌ای بررسی گردید. نتایج آزمایش‌ها نشان داد با افزایش سرعت و بار موتور، شتاب ارتعاشی بلوک سیلندر در

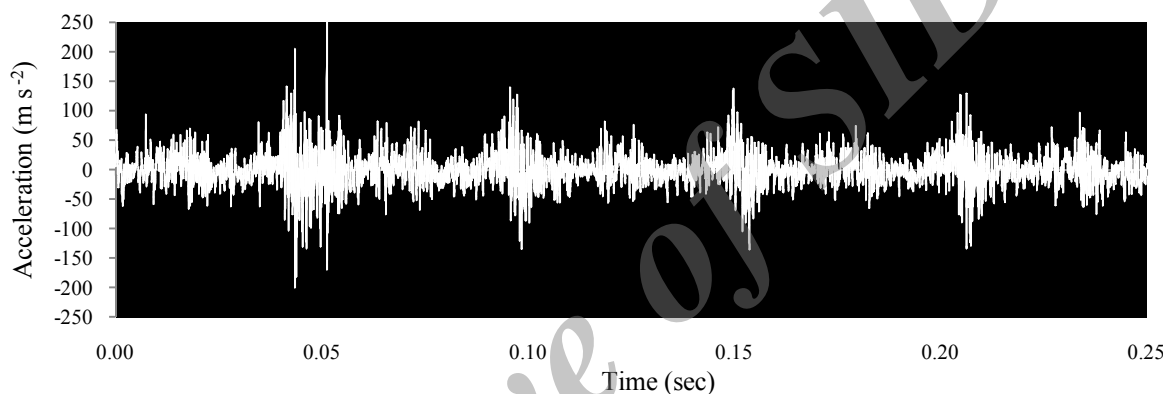
5- Wigner-ville distribution  
6- Neural network probabilistic  
7- Eddy current dynamometer  
8- Kistler

1- Torsional vibration  
2- Encoder  
3- Instant angular speed  
4- Liquid petroleum gas

**جدول ۱ - مشخصات فنی تراکتور دوچرخ و موتور آن**

**Table 1- Technical specifications of a two wheel tractor and its engine**

شرکت سازنده	میتسوبیshi
Manufacturer	Mitsubishi
مدل	MR 801 D
Model	
نوع	احتراق تراکمی چهار زمانه
Type	4 Cycle diesel engine
حجم موتور	443 cc
Displacement	
توان بیشینه در دور ۲۴۰۰	8 hp
Max power in 2400 rpm	
وزن تراکتور	272 kg
Weights	



**شکل ۱ - سیگنال حوزه زمانی ارتعاش موتور تراکتور دوچرخ با سوخت دیزل خالص در سرعت ۲۴۰۰ دور بر دقیقه**

**Fig.1. Time domain vibration signal for tiller engine fuelled with diesel at 2400 rpm**

### روش داده برداری

یکی از شتاب‌سنج‌ها بر روی سرسیلندر موتور قرار گرفت تا سیگنال شتاب عمودی را اندازه‌گیری کند و شتاب‌سنج دیگر به‌منظور اندازه‌گیری سیگنال شتاب جانبی بر روی دیواره سیلندر قرار داده شد. بسامد نمونه‌گیری شتاب‌سنج‌ها بر روی ۵۰ کیلوهرتز تنظیم شد. شتاب‌سنج‌ها طبق پیشنهاد سازنده با گسٹاور ۲ نیوتن‌متر بر روی موتور بسته شدند. برای هر مخلوط سوخت، سیگنال‌های شتاب در سرعت‌های ۱۲۰۰، ۱۶۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۴۰۰ دور بر دقیقه ثبت شد. مدت زمان داده‌گیری برای هر آزمایش ۱۰ ثانیه در نظر گرفته شد. قبل از آغاز هر تست به‌منظور گرم شدن و پایدار شدن شرایط موتور، به مدت ۱۵ دقیقه موتور روشن شده و در حالت بدون بار کار می‌کند. هنگام تعویض سوخت، قبل از شروع داده برداری با سوخت جدید، مطمئن می‌شویم که باقی‌مانده سوخت تست قبل کاملاً مصرف شده باشد. از یک رایانه دستی برای ثبت داده‌ها استفاده شد. برای داده‌گیری، پردازش سیگنال‌ها و تبدیل سیگنال‌های حوزه زمان به

برای این کار کدگذار بر روی یک قطعه رابط که به این منظور طراحی و ساخته شد قرار گرفته و به انتهای میل‌لنگ متصل شد. از یک واحد جمع‌آوری داده<sup>۱</sup> چهارکاناله مدل NI-4472 استفاده شد. در این تحقیق بسامد نمونه‌گیری شتاب‌سنج‌ها بر روی ۵۰ کیلوهرتز و بسامد نمونه‌گیری واحد کدگذار بر روی ۱۰ کیلوهرتز تنظیم شد.

### مخلوط‌های سوخت

سوخت بیواتانول با خلوص ۹۹/۴ درصد به مقدار لازم از شرکت الکل بیدستان خریداری شد. اتانول مورد استفاده در این تحقیق از زیست توده سلولزی حاصل از پس‌مانده‌های زیستی تولید شده است. سوخت دیزل نیز از یکی از جایگاه‌های توزیع سوخت خریداری شد. در این تحقیق از شش ترکیب دیزل خالص (D100)، E2 (مخلوط ۲ درصد بیواتانول و ۹۸ درصد دیزل)، E5، E10، E15 و E20 استفاده شد.

1- Signal acquisition board

حوزه بسامد از نرم‌افزار متلب<sup>۱</sup> استفاده شد.

## تحلیل آماری

آزمایش‌ها به صورت فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی متعادل با پنج سطح سرعت موتور و چهار سطح مخلوط سوخت مورد بررسی قرار گرفت. هر یک از تیمارها شامل پنج تکرار است. تحلیل آماری بر روی مقادیر جذر میانگین مربعات شتاب<sup>۲</sup> با روش آنالیز واریانس<sup>۳</sup> انجام شد. به منظور شناسایی تفاوت مقادیر شتاب در سطوح مختلف سرعت و مخلوط سوخت و همچنین بار موتور از آزمون مقایسه میانگین دانکن<sup>۴</sup> استفاده شد. برای تحلیل آماری از نرم افزار SPSS<sup>۵</sup> و برای برآورد آزمون معنی‌داری اثرات سطوح مختلف بر داده‌های ارتعاش از نرم افزار SAS<sup>۶</sup> استفاده شد.

## نتایج و بحث

داده‌های ارتعاشی در حوزه زمان به وسیله شتاب‌سنج‌ها در دو راستای Z (عمودی) و Y (جانبی) ثبت گردید. پردازش‌های اولیه سیگنال‌ها نشان داد که تفاوت معنی‌داری بین داده‌های ثبت شده در تیمارهای مختلف در راستای Z (عمودی) وجود دارد در حالی که برای داده‌های ارتعاشی ثبت شده در راستای Y (جانبی) تفاوت کمتری مشاهده شد. از آنجایی که بیشتر ارتعاشات موتور در اثر حرکت رفت و برگشتی در راستای قائم پیستون به وجود می‌آید، حساسیت بیشتر در راستای عمودی در نظر گرفته شد. راستای Y (جانبی) بیانگر ارتعاشات جانبی است که اکثراً در اثر توزیع غیر یکنواخت جرم‌های در حال حرکت، نقایص و همچنین خروج از مرکز قطعات به وجود می‌آید.

در تمامی آزمایش‌ها بسامد داده‌گیری هر دو شتاب‌سنج ۵۰ کیلوهرتز بود که با توجه به زمان داده‌گیری ۱۰ ثانیه‌ای، تعداد ۵۰۰۰۰۰ نمونه در هر آزمایش ثبت شد. بخشی از سیگنال شتاب در حوزه زمان در شکل ۱ آورده شده است. این سیگنال با استفاده از سوخت دیزل خالص، در دور موتور ۲۴۰۰ دور در دقیقه و در راستای عمودی به مدت ۰/۲۵ ثانیه ثبت شده است. برای سیگنال مذکور، مقدار RMS شتاب برابر ۲۷/۴ متر بر مجذور ثانیه و فاکتور قله<sup>۷</sup> (نسبت مقدار بیشینه شتاب به مقدار RMS) برابر ۵/۰۴ است. همان‌گونه که در شکل ۱ دیده می‌شود مقادیر شتاب به صورت متناوب با دوره تناوب ۰/۰۵ ثانیه، تکرار می‌شوند. شکل ۱ اطلاعات کافی در

خصوص فرکانس‌های ارتعاشی را نمی‌تواند بیان کند، به همین دلیل با استفاده از آنالیز فوریه سریع<sup>۸</sup> داده‌ها به حوزه بسامد منتقل شد. شکل ۲ سیگنال حوزه بسامدی نمودار شکل ۱ را در سرعت ۲۴۰۰ دور بر دقیقه نشان می‌دهد. برای موتور تک سیلندر چهار زمانه با سرعت دوران n دور بر دقیقه، بسامد احتراق برابر  $2^{-1}n$  و بسامد سوپاپ‌ها برابر n می‌باشد. همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد اوج‌های شتاب در بسامدهای ۲۰ و ۴۰ هرتز اتفاق می‌افتد. برای دور موتور ۲۴۰۰ دور بر دقیقه، تعداد احتراق ۲۰ بار در ثانیه است. به عبارتی فرآیند احتراق در موتور با بسامد ۲۰ هرتز رخ می‌دهد که این عدد به وضوح در اولین اوج نمودار بسامدی شکل ۱ دیده می‌شود. بسامد ضربه‌های سوپاپ‌های هوا و دود نیز در دور موتور ۲۴۰۰، برابر ۴۰ هرتز می‌باشد که در دومین اوج نمودار بسامدی قابل رؤیت است.

به منظور بررسی اثر دور موتور و همچنین مخلوط سوخت بر روی شتاب موتور، از جذر میانگین مربعات شتاب با پنج تکرار برای هر تیمار استفاده شد. برای محاسبه جذر میانگین مربعات از رابطه (۱) استفاده شد.

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x^2(n)} \quad (1)$$

$X_{\text{rms}}$ : جذر میانگین مربعات شتاب

N: تعداد کل مقادیر داده‌های شتاب

$x(n)$ : n امین مقدار شتاب

با توجه به پردازش‌های اولیه و نتایج تحقیقات دیگر محققان، مقادیر شتاب در راستای Z (عمودی) بیشتر مورد نظر هستند؛ لذا یک بار مقادیر RMS شتاب در راستای Z (عمودی) به طور کامل مورد بررسی قرار گرفت و یک بار هم مقادیر RMS شتاب کل بررسی شد. مقادیر شتاب کل ( $a_t$ ) حاصل برآیند شتاب‌ها در دو راستای عمودی و جانبی است که با استفاده از رابطه (۲) محاسبه شد.

$$a_t = \sqrt{a_{\text{ver}}^2 + a_{\text{lat}}^2} \quad (2)$$

$a_t$ : مقدار شتاب کل

$a_{\text{ver}}$ : مقدار RMS شتاب در جهت عمودی

$a_{\text{lat}}$ : مقدار RMS شتاب در جهت جانبی

## اثر سرعت دورانی موتور بر مقدار ارتعاش

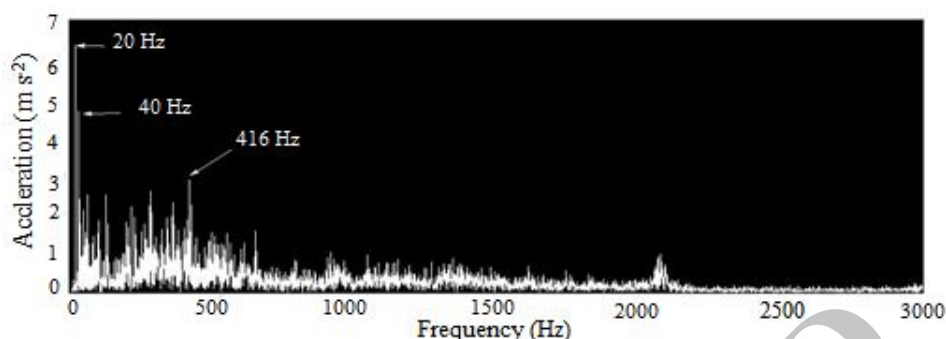
مقایسه مقادیر میانگین شتاب برای سرعت‌های مختلف موتور نشان داد که با افزایش سرعت موتور از ۱۲۰۰ به ۲۴۰۰ دور بر دقیقه، مقدار ارتعاش برای تمامی مخلوط‌های سوخت به طور معنی‌داری در سطح ۵٪ افزایش می‌یابد. همان‌گونه که در جدول ۲ مشاهده می‌شود از سرعت ۱۲۰۰ تا ۲۴۰۰ دور بر دقیقه برای تمامی مخلوط‌های سوخت، مقدار شتاب در راستای عمودی افزایش می‌یابد. میانگین

8- Fast fourier transform (FFT)

1- MATLAB  
2- Root mean square (RMS)  
3- Analysis of variance (ANOVA)  
4- Duncan's multiple range test  
5- Statistical package for the social sciences  
6- Statistical analysis system  
7- Crest factor

راستای عمودی و جانبی) را برای سرعت‌های موتور و مخلوط‌های مختلف سوخت نشان می‌دهد.

افزایش مقدار شتاب برای تمامی مخلوط‌های سوخت از دور ۱۲۰۰ تا ۲۴۰۰ دور بر دقیقه به ترتیب ۵/۱۶، ۸/۶۰ و ۳/۳۶ متر بر مجذور ثانیه است. جدول ۳ آنالیز واریانس مقادیر شتاب کل (برآیند شتاب در



شکل ۲- سیگنال حوزه بسامد ارتعاش موتور تراکتور دوچرخ با سوخت دیزل خالص در سرعت ۲۴۰۰ دور بر دقیقه

Fig.2. Frequency domain vibration signal for tiller engine fuelled with diesel at 2400 rpm

جدول ۲- میانگین مقادیر RMS شتاب موتور در راستای عمودی در سرعت‌ها و مخلوط‌های سوخت مختلف در قالب طرح کاملاً تصادفی

Table 2- Summary table of mean comparisons for RMS of acceleration in vertical axis, the mean of square derived from the completely randomized design

مخلوط‌های سوخت Fuel blends	سرعت موتور Engine speed			
	1200	1600	2000	2400
D 100 (E0)	11.32 <sup>ab</sup>	16.61 <sup>a</sup>	24.78 <sup>b</sup>	27.43 <sup>c</sup>
E2	11.16 <sup>b</sup>	16.39 <sup>b</sup>	24.75 <sup>c</sup>	27.81 <sup>d</sup>
E5	10.84 <sup>c</sup>	16.05 <sup>c</sup>	24.73 <sup>c</sup>	28.31 <sup>c</sup>
E10	10.52 <sup>d</sup>	16.67 <sup>d</sup>	24.58 <sup>d</sup>	28.22 <sup>c</sup>
E15	11.17 <sup>b</sup>	16.12 <sup>c</sup>	24.90 <sup>b</sup>	28.53 <sup>b</sup>
E20	11.43 <sup>a</sup>	16.54 <sup>a</sup>	25.26 <sup>a</sup>	28.87 <sup>a</sup>
میانگین مربعات Mean of square	58.07 <sup>*</sup>	34.32 <sup>*</sup>	28.37 <sup>*</sup>	42.87 <sup>*</sup>

در هر ستون، مقادیر با حروف متفاوت، تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد

At each column, means with the same symbol letters showed no significant differences in 5% level  
\* معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

جدول ۳- میانگین مقادیر شتاب کل موتور در سرعت‌ها و مخلوط‌های سوخت مختلف در قالب طرح کاملاً تصادفی

Table 3- Summary table of mean comparisons for total of acceleration, the mean of square derived from the completely randomized design

مخلوط‌های سوخت Fuel blends	سرعت موتور Engine speed			
	1200	1600	2000	2400
D 100 (E0)	15.38 <sup>b</sup>	20.47 <sup>a</sup>	29.62 <sup>b</sup>	33.04 <sup>c</sup>
E2	15.26 <sup>c</sup>	20.28 <sup>b</sup>	29.26 <sup>c</sup>	33.35 <sup>d</sup>
E5	14.88 <sup>d</sup>	19.93 <sup>c</sup>	29.56 <sup>b</sup>	33.82 <sup>c</sup>
E10	14.44 <sup>c</sup>	19.42 <sup>d</sup>	29.43 <sup>bc</sup>	33.85 <sup>c</sup>
E15	15.33 <sup>bc</sup>	19.90 <sup>c</sup>	29.59 <sup>b</sup>	34.22 <sup>b</sup>
E20	15.66 <sup>a</sup>	20.31 <sup>b</sup>	30.06 <sup>a</sup>	34.56 <sup>a</sup>
میانگین مربعات Mean of square	63.07 <sup>*</sup>	72.02 <sup>*</sup>	41.14 <sup>*</sup>	81.27 <sup>*</sup>

در هر ستون، مقادیر با حروف متفاوت، تفاوت معنی‌دار در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد

At each column, means with the same symbol letters showed no significant differences in 5% level  
\* معنی‌دار در سطح احتمال ۱ درصد

افزایش می‌یابد.

### اثر بار<sup>۲</sup> موتور بر مقدار ارتعاش

نتایج آزمایش نشان داد با افزایش بار موتور از حالت بدون بار تا تمام بار، مقادیر ارتعاش در راستای جانبی موتور برای هر دو مخلوط سوخت کاهش می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود مقادیر ارتعاش جانبی برای هر دو مخلوط سوخت دیزل و E10 به‌طور مشابه کاهش یافتند. دلیل این کاهش می‌تواند عدم تعادل گشتاور در بارهای پایین موتور باشد، ولی با افزایش بار موتور، گشتاور موتور بالانس شده که منجر به کاهش ارتعاشات می‌شود. جیندال (۲۰۱۲) اثر بار موتور بر ارتعاش موتور دیزل را با استفاده از مخلوط سوخت دیزل و بیودیزل بررسی کرد و نتایج مشابهی را گزارش داد. شکل ۴ تغییرات مقادیر شتاب در راستای عمودی را برای دو مخلوط سوخت دیزل و E10 نشان می‌دهد. با افزایش بار موتور از بی‌باری تا بار ۷۵ درصد، مقدار ارتعاش در راستای عمودی برای هر دو سوخت افزایش دارد ولی پس از آن، میزان شتاب کاهش می‌یابد. دلیل این مسئله می‌تواند مربوط به فشار و دمای درون سیلندر باشد.

با افزایش بار موتور تا ۷۵ درصد، فشار سیلندر به بیشینه مقدار خود رسیده و پس از آن به‌صورت مرزی کاهش می‌یابد. همچنین دماهای بالای متناظر با بار زیاد موتور باعث کاهش تأخیر در اشتعال می‌شود که می‌تواند در کاهش پدیده ضربه<sup>۳</sup> مؤثر باشد. برای مخلوط سوخت E10 کاهش مقدار شتاب بین بار ۷۵ درصد تا حالت تمام بار بیش از سوخت دیزل است، به‌گونه‌ای که مقدار شتاب از ۱۷/۰۴ به ۱۶/۶۳ متر بر مجذور ثانیه کاهش یافت.

### نتیجه‌گیری

مقایسه مقادیر میانگین شتاب نشان داد که با افزایش سرعت، برای همه مخلوط‌های سوخت، مقدار ارتعاش به‌طور معنی‌داری افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش بار موتور، مقادیر ارتعاش عمودی موتور افزایش می‌یابد که به دلیل افزایش فشار و دمای سیلندر است، ولی مقادیر ارتعاش جانبی، با افزایش بار موتور کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که مخلوط سوخت اثر معنی‌داری بر مقادیر شتاب در راستای عمودی و همچنین شتاب کل دارد. کمترین ارتعاش مربوط به مخلوط سوخت E10 و بیشترین ارتعاش مربوط به مخلوط سوخت E20 می‌باشد.

همان‌طور که انتظار می‌رود، با افزایش سرعت دورانی موتور، مقادیر شتاب کل نیز افزایش یافت. بیشترین مقدار افزایش بین سرعت‌های ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ دور بر دقیقه است که مقدارش برابر ۹/۸۱ متر بر مجذور ثانیه است. در حالی که افزایش بین سرعت‌های ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ و ۲۰۰۰ تا ۲۴۰۰ به ترتیب ۴/۶۸ و ۴/۱۶ متر بر مجذور ثانیه است. افزایش مقدار شتاب در سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه به‌طور محسوسی بیشتر از سرعت‌های دیگر است که دلیل آن، افزایش ناگهانی گشتاور در این دور موتور است. تقی‌زاده و همکاران (۲۰۱۲) نتایج مشابهی را برای ارتعاش موتور تراکتور مسی فرگوسن ۳۹۹ ارائه دادند.

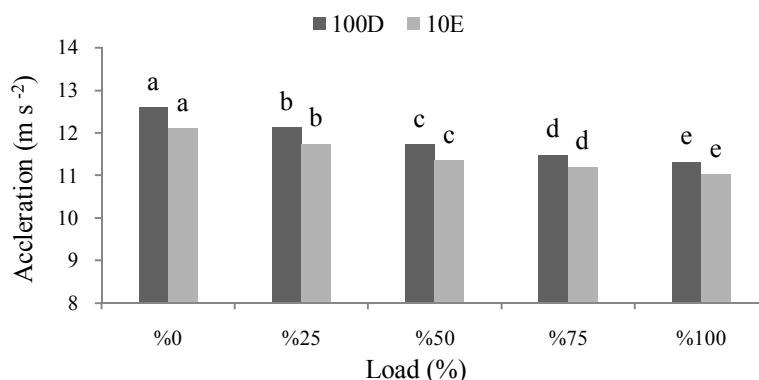
### اثر مخلوط سوخت بر مقدار ارتعاش

همان‌طور که در جدول‌های ۲ و ۳ مشاهده می‌شود، مخلوط‌های سوخت اثر معنی‌داری بر مقادیر RMS شتاب در راستای عمودی و همچنین شتاب کل دارند. ارزیابی مقادیر ارتعاش در جدول‌های ۲ و ۳ نشان می‌دهد که مقدار ارتعاش برای مخلوط سوخت E10 در بین دیگر مخلوط‌های سوخت، کمترین مقدار است. همچنین بیشترین مقدار ارتعاش مربوط به مخلوط E20 است. مقادیر ارتعاش جانبی نیز نتایج مشابهی را نشان دادند. با افزایش درصد اتانول در مخلوط سوخت از E0 تا E10، شاهد روند کاهشی مقادیر شتاب هستیم در حالی که از E10 تا E20 مقادیر شتاب کل افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهند. افزایش اتانول به سوخت دیزل باعث کاهش عدد ستان و همچنین افزایش تأخیر احتراق می‌شود که نهایتاً می‌تواند منجر به افزایش فشار سیلندر شود (Li et al., 2007). از آنجایی که مقدار فشار سیلندر و توزیع امواج فشار اثر مستقیم بر روی ارتعاش بلوک موتور دارد (Rakopoloulos et al., 2008)، پیش‌بینی می‌شد که مخلوط E20 بیشترین ارتعاش را داشته باشد.

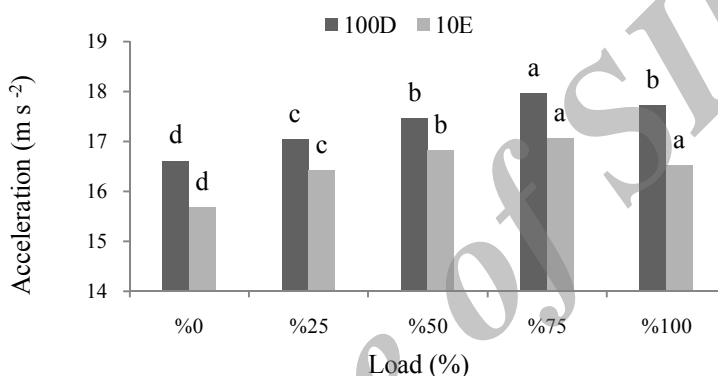
لی و همکاران (۲۰۰۷) نشان دادند که با افزایش مقدار اتانول در مخلوط سوخت دیزل، مدت زمان احتراق کاهش یافته و همچنین برای مخلوط‌های E15 و E2 نقطه آزادسازی حرارت<sup>۱</sup> به نقطه مرگ بالا نزدیک‌تر شده و زودتر اتفاق می‌افتد. همچنین آن‌ها نشان دادند با افزایش اتانول، فشار سیلندر افزایش می‌یابد که این مقدار برای مخلوط‌های E5 و E10 بسیار ناچیز بوده ولی از E10 تا E20 با شیب زیادی افزایش دارد. افزایش فشار سیلندر به معنی افزایش ارتعاش و سر و صدای موتور است. سالاس و همکاران (۲۰۰۸) نشان دادند که افزایش اتانول به دیزل باعث کاهش سر و صدای موتور در سرعت‌های پایین موتور می‌شود در حالی که برای سرعت‌های بالای موتور، با افزایش درصد اتانول مخلوط سوخت، سر و صدای موتور

2- Full load  
3- Knock

1- Heat release centre



شکل ۳- نمودار شتاب در راستای جانبی بر حسب بار موتور  
**Fig.3.** Effect of engine load on vibrations in lateral axis



شکل ۴- نمودار شتاب در راستای عمودی بر حسب بار موتور  
**Fig.4.** Effect of engine load on vibrations in vertical axis

#### منابع

- Andrew, L. G., C. H. Dianne, and J. S. Brain. 2007. The effect of piston friction on the torsional natural frequency of a reciprocating engine. *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing* 21: 2833-2837.
- Carlucci, A. P., F. F. Chiara, and D. Laforgia. 2006. Analysis of the relation between injection parameter variation and block vibration of an internal combustion diesel engine. *Journal of Sound and Vibration* 295: 141-164.
- Charles, P., J. K. Sinha, F. Gu, L. Lidstone, and A. D. Ball. 2009. Detecting the crankshaft torsional vibration of diesel engines for combustion related diagnosis. *Journal of Sound and Vibration* 321: 1171-1185.
- Chengdong, W., Z. Youyun, and Z. Zhenyuan. 2008. Fault diagnosis for diesel valve trains based on time-frequency images. *Mechanical Systems Signal Processing* 22: 1981-1993.
- Flekiewicz, M., P. Fabi, and B. Flekiewicz. 2007. Engine block vibration level as a tool for fuel recognition. *SAE Technical Paper*. 2007-01-2162.
- Hansen, A. C., Q. Zhang, and P. W. L. Lyne. 2008. Ethanol-diesel fuel blends—a review. *Bioresource Technology* 96: 277-285.
- Jindal, S. 2012. Vibration signatures of a biodiesel fueled CI engine and effect of engine parameters. *International Journal of Energy and Environment* 3: 151-160.
- Keskin, A. 2010. The influence of ethanol-gasoline blends on spark ignition engine vibration characteristics and noise emissions. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 32: 1851-1860.

9. Kowalewicz, A., and Z. Pajączek. 2003. Dual fuel engine fuelled with ethanol and diesel fuel. *Journal of KONES, Internal Combustion Engines* 10: 96-105.
10. Li, W., Y. Ren, X. B. Wang, H. Miao, and Z. H. Huang. 2007. Combustion characteristics of a compression ignition engine fuelled with diesel-ethanol blends. *Automobile Engineering* 222: 265-274.
11. Rakopoloulos, D. C., E. C. Kakaras, and E. G. Giakoumis. 2008. Effects of ethanol-diesel fuel blends on the performance and exhaust emissions of heavy duty DI diesel engine. *Energy Conversion and Management, Elsevier, Greece*.
12. Salles, E., A. Zambotti, A. Gouvêa, and A. Agenor. 2008. An experimental study of diesel-ethanol combustion controlled electronically, Robert Bosch Research Manuscript.
13. Taghizadeh-Alisaraei, A., B. Ghobadian, T. Tavakoli-Hashjin, and S. S. Mohtasebi. 2012. Vibration analysis of a diesel engine using biodiesel and petrodiesel fuel blends. *Fuel* 102: 414-422.
14. Zoldy, M. 2011. Ethanol-biodiesel-diesel blends as a diesel extender option on compression ignition engines. *Transport Journal* 26: 303-309.

Archive of SID