



تحلیل فنی - اقتصادی استفاده از سوخت بیودیزل در موتور دیزل به کمک داده‌های آزمایشگاهی

فرشاد میثمی¹، حسین عجم^{2*}

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

* مشهد، صندوق پستی 91779-48974، h.ajam@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 04 آذر 1393

پذیرش: 12 دی 1393

ارائه در سایت: 16 اسفند 1393

کلید واژگان:

بیودیزل

احتراق

آلاینده ها

تحلیل فنی

تحلیل اقتصادی

چکیده

بیودیزل یک سوخت تجدیدپذیر بوده که از روغن‌های گیاهی و یا حیوانی قابل تولید است. مهمترین ویژگی استفاده از سوخت بیودیزل قابلیت این سوخت در کاهش آلاینده‌های خروجی موتور است. در سالیان اخیر مطالعات زیادی در ارتباط با فرآیند تولید بیودیزل و عملکرد و آلاینده‌های آن انجام شده است، اما در این تحقیقات غالباً هیچ‌گونه توجهی به ارزیابی اقتصادی استفاده از بیودیزل در موتور نشده است. در این مطالعه بعد از آزمایش درصدهای مختلف ترکیب سوخت بیودیزل با دیزل روی یک موتور 4 سیلندر پرخوران، داده‌های مورد نیاز استخراج و با استفاده از این داده‌ها واکنش احتراق تعیین گردید. سپس به کمک واکنش احتراق نرخ گرمی هر یک از آلاینده‌ها به دست آمد. ارزیابی اقتصادی با در نظر گرفتن هزینه‌های اجتماعی آلاینده‌ها، هزینه سوخت ورودی و هزینه اکتان موتور انجام گردید. با توجه به قیمت پایین سوخت دیزل در ایران نتایج کلی تحقیق بدون در نظر گرفتن قیمت سوخت ورودی به دست آمد. ارزیابی فنی نیز با در نظر گرفتن نتایج مربوط به عملکرد موتور انجام گردید. نتایج به دست آمده حاکی از آن بود که استفاده از دو ترکیب 10 و 15 درصد حجمی بیودیزل - دیزل (B10 و B15) علاوه بر این که دارای صرفه اقتصادی نسبت به دیزل خالص می‌باشند، دارای مشخصه‌های عملکردی مطلوبی هم هستند. در این دو ترکیب اکتان بسیار ناچیز بوده و همچنین بیشترین بازده حرارتی هم در همین دو ترکیب مشاهده شد. چنانچه فقط هزینه اجتماعی آلاینده‌ها در نظر گرفته شود، همه ترکیبات بیودیزل از دیزل خالص با صرفه‌تر می‌باشند.

Techno-economic analysis of a diesel engine fuelled with biodiesel based on experimental data

Farshad Meisami, Hossein Ajam*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

* P.O.B. 91779-48974, Mashhad, Iran, h.ajam@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 25 November 2014
Accepted 02 January 2015
Available Online 07 March 2015

Keywords:
Biodiesel
Combustion
exhaust emissions
technical analysis
economic analysis

ABSTRACT

Biodiesel is a renewable fuel that can be produced from vegetable or animal oil. The main benefit of using biodiesel is its capacity to lower exhaust emissions compared to diesel fuel. Over the last few years, numerous studies have been performed on biodiesel production and its effect on engine performance and emissions. However, in those studies no attention has been paid to economic analysis of biodiesel usage in engines. In this investigation, various mixtures of biodiesel and diesel fuel have been tested on a four cylinder turbocharged diesel engine. The combustion reaction was determined by using the experimental data. Then, the mass flow rate of each exhaust emission was calculated using combustion reaction. The economic analysis was performed considering social cost of emissions, inlet fuel cost and the cost of engine power loss. Because of low diesel fuel price in Iran, the results were determined by ignoring the inlet fuel cost. The technical analysis was also performed considering the engine performance results. The results showed that the 10% and 15% biodiesel-diesel blends (B10 and B15) were more affordable than diesel fuel. The performance results of engine were also acceptable in these blends. The power loss was slight and the highest thermal efficiency was also observed in these blends. All biodiesel blends were more affordable than diesel in the economic analysis of the emissions.

معضلات راهکارهای متفاوت و متنوعی توسط محققان و مخترعان مختلف پیشنهاد و عملی گردیده است. در این بین یکی از راهکارهایی که هر دو معضل یاد شده را به طور همزمان تحت تاثیر قرار می‌دهد استفاده از بیودیزل است. بیودیزل را می‌توان به راحتی از روغن‌های گیاهی یا حیوانی مختلف

1- مقدمه

یکی از مهمترین دغدغه‌های کنونی بشر آلودگی شدید هوا از طرفی و کاهش روزافزون سوخت‌های فسیلی از طرف دیگر است. در راستای حل این

Please cite this article using:

F. Meisami, H. Ajam, Techno-economic analysis of a diesel engine fuelled with biodiesel based on experimental data, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 301-309, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

حرکت ایجاد می‌شود. با تنظیم پارامترهای موثر در ایجاد این مقاومت می‌توان بار مطلوب را روی موتور اعمال نمود. کالیبراسیون دینامومتر مطابق استاندارد ایزو 2534³ انجام گردید [10]. دقت کلیه تجهیزات و درصد عدم قطعیت⁴ هر یک نیز در جدول 2 آمده است. درصد عدم قطعیت کلی آزمایش با محاسبه مجذور مربعات کلیه درصدهای عدم قطعیت تجهیزات به مقدار 1/66% بدست آمد.

دستگاه سنجش آلایندگی با مارک تجاری ای وی ال 400⁵ و سنسور دمای گاز خروجی با مارک دلتا 9847⁶ مورد استفاده قرار گرفت. در شکل 1 نمایی شماتیک از تجهیزات آزمایش موتور نمایش داده شده است. کلیه آزمایش‌ها با اعمال بار کامل⁷ روی موتور و در دور 1700rpm انجام گردید. قبل از انجام آزمایش‌ها موتور با سوخت دیزل خالص راه‌اندازی و به مدت 15 دقیقه در حالت دور آرام روشن مانده تا گرم شود. آزمایش‌ها در شرایط پایدار⁸ انجام شده و برای بالا رفتن دقت و کاهش خطاهای آزمایش هر یک از آزمایش‌ها برای سه مرتبه تکرار گردید و در نهایت مقدار متوسط داده‌ها در نظر گرفته شد. به‌منظور حصول اطمینان از تکرارپذیری آزمایش‌ها انحراف از معیار⁹ و دامنه اطمینان¹⁰ هر یک از داده‌ها محاسبه گردید.

جدول 1 مشخصات فنی موتور

مشخصه	اطلاعات
مدل	Motorsazan-MT4.244
تعداد سیلندر	4
قطر سیلندر	100mm
کورس پیستون	127mm
حجم موتور	3/99Lit
نسبت تراکم	17/5
زمان تزریق	-8 BTDC
توان بیشینه	82hp در 2000rpm
وزن	265kg
سیستم خنک‌کاری	گردش آب توسط پمپ
طول × عرض × ارتفاع	mm748mm×655mm×678

جدول 2 دقت و درصد عدم قطعیت تجهیزات آزمایش

نمونه	واحد	دقت	درصد عدم قطعیت
توان	kW	±0/01	±0/02
گشتاور	N.m	±0/1	±0/03
مصرف سوخت	g/s	±0/01	±0/25
CO	%Vol	±0/001	±0/33
CO ₂	%Vol	±0/1	±1/12
O ₂	%Vol	±0/1	±1/15
NO _x	ppm	±1	±0/08
PM	mg/m ³	±0/01	±0/02

3- ISO 2534

4- Uncertainty

5- AVL DiCOM 400

6- Delta OHM DO 9847

7- Full load

8- Steady state

9- Standard deviation

10- Confidence interval

تولید نمود. در مورد روش‌های تولید بیودیزل و بررسی عوامل موثر بر بهینه سازی این روش‌ها مطالعات بسیار زیادی انجام شده است. همچنین مطالعات بسیاری در مورد تاثیر استفاده از بیودیزل و یا ترکیبات آن با سوخت دیزل روی عملکرد و آلایندگی موتور دیزل انجام شده است. اکثر محققین در تحقیقات خود کاهش آلایندگی‌های خروجی موتور (به جز اکسید نیتروژن) و کاهش اندک توان و گشتاور و افزایش مصرف سوخت را مشاهده نمودند. کمتر بودن ارزش حرارتی بیودیزل نسبت به دیزل مهمترین دلیلی بود که توسط این افراد برای توجیه کاهش توان و گشتاور بیان شده است [1]. البته برخی افراد هم عدم تغییر و حتی افزایش توان و گشتاور را مشاهده نمودند [2]. از طرفی بیودیزل با دارا بودن حدود 10% اکسیژن در ساختار خود [3]، باعث بهبود احتراق و کاهش اکثر آلایندگی‌ها می‌شود.

تحلیل اقتصادی سیستم‌های حرارتی مختلف توسط محققین مختلف به دفعات انجام شده است. من جمله تحلیل اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی [5,4]، پیل‌های سوختی [6]، نیروگاه حرارتی [7] و ... اما در مورد ارزیابی اقتصادی استفاده از سوخت بیودیزل در موتور دیزل مطالعه ای انجام نشده است. به منظور تحلیل اقتصادی یک سیستم حرارتی بایستی کلیه انرژی‌های ورودی و خروجی از آن سیستم مورد بررسی قرار گرفته و سپس هزینه هر یک از این انرژی‌ها ارزیابی گردد. ضمناً پیامد ایجاد هر تغییری در سیستم باید از نقطه نظر اقتصادی معادل سازی شود. به‌عنوان مثال افت توانی که معمولاً در استفاده از بیودیزل در موتور دیزل رخ می‌دهد باعث ایجاد هزینه می‌شود و همچنین آلایندگی‌های مختلف خروجی از موتور دیزل منجر به ایجاد هزینه‌های مختلف اجتماعی من جمله هزینه‌های درمانی می‌شوند [8]. این هزینه اجتماعی معمولاً توسط پژوهشگران حوزه علوم اقتصادی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد [9].

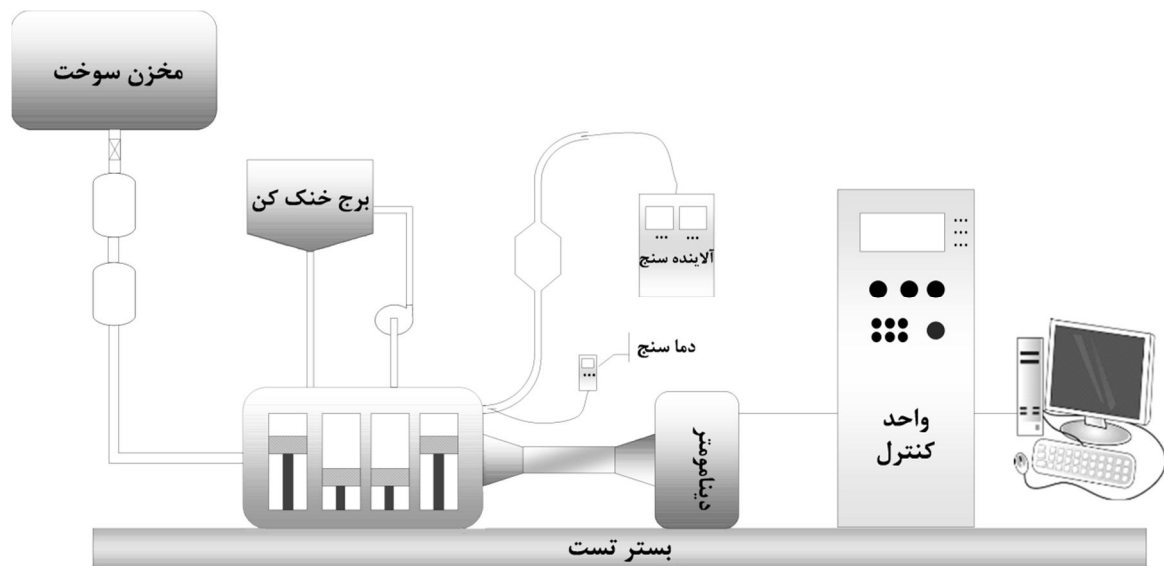
در این تحقیق تحلیل فنی - اقتصادی استفاده از ترکیبات مختلف سوخت بیودیزل با دیزل در یک موتور دیزل انجام پذیرفت. در ابتدا روغن کرچک با توجه به غیرخوراکی بودن و در دسترس بودن و قابلیت کشت در ایران برای تبدیل به بیودیزل انتخاب شد. بیودیزل تولید شده از این روغن روی یک موتور تجاری و در درصدهای مختلف (0، 5، 10، 15، 20 و 30 درصد بیودیزل - دیزل) آزمایش گردید. اطلاعات مربوط به درصد آلایندگی‌های مختلف، توان و مصرف سوخت موتور ثبت گردید. با توجه به این داده‌ها، با بدست آوردن واکنش احتراق نرخ جرمی هر یک از آلایندگی‌های خروجی از موتور به‌دست آمد. استفاده از بیودیزل در موتور باعث افت توان، افزایش مصرف سوخت و کاهش اغلب آلایندگی‌ها می‌شود. بنابراین هزینه هر یک از این موارد نیز در نظر گرفته شد و نهایتاً کلیه سود و ضرر مالی استفاده از بیودیزل در مقایسه با دیزل محاسبه گردید. در کنار تحلیل اقتصادی برخی مشخصه‌های فنی موتور من جمله توان، مصرف ویژه سوخت و بازده‌های حرارتی و حجمی نیز مورد بررسی قرار گرفت. نهایتاً، با در نظر گرفتن همزمان نتایج تحلیل اقتصادی و فنی ترکیب بهینه سوخت مشخص گردید.

2- تجهیزات آزمایش موتور

مشخصات موتور مورد آزمایش در جدول 1 آورده شده است. دینامومتر مورد استفاده از نوع جریان گردابی¹ و با مارک تجاری شنک² و با ظرفیت 190 کیلووات است. این دینامومتر دارای یک هسته یا شفت القایی الکتریکی می‌باشد، که با حرکت در داخل یک میدان مغناطیسی، مقاومت در برابر آن

1- Eddy current

2- Schenck W400

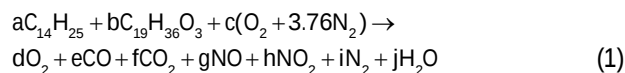


شکل 1- نمایی شماتیک از تجهیزات آزمایش موتور

آلاینده‌گی به کار گرفته شده در این تحقیق مقدار کلی آلاینده‌های اکسید نیتروژن را نشان می‌دهد. با توجه به این که مقدار دی‌اکسید نیتروژن حدود 20 درصد جرمی کل اکسیدهای نیتروژن است، مقدار آلاینده‌های دی اکسید نیتروژن و اکسید نیتریک⁶ به صورت جداگانه بدست می‌آید. در نهایت این داده‌ها برای تعیین واکنش احتراق و تحلیل اقتصادی به کار گرفته شد.

3- تعیین واکنش احتراق

با توجه به درصد آلاینده‌های مختلف می‌توان واکنش احتراق را برای احتراق یک مول سوخت تعیین نمود. سوخت دیزل به کار رفته (دیزل نوع 2 ایران) دارای فرمول شیمیایی $C_{14}H_{25}$ و بیودیزل روغن کرچک دارای فرمول شیمیایی $C_{19}H_{36}O_3$ می‌باشد [11]. هوای احتراق به صورت هوای خالص بدون رطوبت با 79% نیتروژن و 21% مولی اکسیژن، در شرایط استاندارد ($P_0=1atm$ و $T_0=25^\circ C$) وارد سیلندر می‌شود. بنابراین معادله کلی احتراق را می‌توان به فرم رابطه (1) در نظر گرفت.



واکنش احتراق برای احتراق یک مول از سوخت نوشته می‌شود، به این معنی که در رابطه (1) داریم: $a+b=1$. ضرایب مولی مجهول موجود در واکنش احتراق از طریق آنالیز مقادیر آلاینده‌های خروجی تعیین می‌شود. این ضرایب مولی به همراه داده‌های دیگر مورد نیاز در جدول 3 لیست شده‌اند. با داشتن واکنش احتراق نرخ جرمی هر یک از آلاینده‌ها به راحتی تعیین شده و در نتیجه هزینه اجتماعی آن‌ها بدست می‌آیند.

4- تحلیل اقتصادی

4-1- کلیات

تحلیل اقتصادی بایستی در یک طول عمر و ساعت کاری و مکان مشخص انجام گیرد. به این منظور کشور ایران به عنوان منطقه مورد بررسی انتخاب

انحراف معیار نوعی سنجش پراکندگی برای یک توزیع احتمال یا متغیر تصادفی بوده، و نماینده پخش‌شدگی مقادیر آن حول مقدار میانگین است. دامنه اطمینان نوع خاصی از برآورد پارامتر فاصله از جمعیت است که به منظور نشان دادن پایایی و میزان اعتماد برآورد استفاده می‌شود. به عنوان مثال دامنه اطمینان 95% بیان‌کننده تلورانسی است که 95 درصد داده‌ها در آن محدوده قرار گیرند. مقدار انحراف از معیار داده‌های مربوط به توان، مصرف سوخت، CO_2 ، CO ، NOX سوخت دیزل به ترتیب 0/11، 0/006، 0/11، 0/08، 0/002 و 5 بدست آمد. همچنین دامنه اطمینان این داده‌ها به ترتیب 0/12، 0/007، 0/12، 0/003، 0/09 و 6 محاسبه شدند. مقادیر بدست آمده برای دامنه اطمینان نشان‌دهنده آن است که تغییرات نتایج در تکرار آزمایش‌ها نسبت به داده‌های بدست آمده ناچیز است و بنابراین آزمایش‌های انجام شده از تکرارپذیری قابل قبولی برخوردارند.

در ترکیب اسیدهای چرب بیودیزل روغن کرچک، اسید چرب ریسینولئیک¹ حدود 88% این بیودیزل را تشکیل می‌دهد [11]. این اسید چرب دارای گرانی بالایی است که باعث می‌شود گرانی بیودیزل تولید شده از این روغن به حدود $19mm^2/s$ برسد که به شدت از محدوده استاندارد ($12/1-9/6 mm^2/s$) خارج است. بالا بودن گرانی باعث عدم تمیز شدن مناسب سوخت شده که منجر به کاهش توان موتور می‌شود. اما چنانچه از ترکیبات این بیودیزل با سوخت دیزل استفاده شود این مقدار در محدوده مجاز قرار می‌گیرد. امکان‌سنجی استفاده از روغن کرچک به عنوان بیودیزل بیانگر آن است که با توجه به گرانی زیاد بیودیزل روغن کرچک، نباید از درصدهای زیاد این بیودیزل در موتور استفاده شود [13]. به همین دلیل درصد بیودیزل در آزمایش‌ها از 30% افزون نگردید.

بعد از انجام آزمایش‌ها، داده‌های مربوط به توان خروجی، مصرف سوخت و درصد آلاینده‌های دی‌اکسیدکربن²، مونوکسیدکربن³، اکسیژن⁴ و اکسیدهای نیتروژن⁵ استخراج گردید. لازم به ذکر است که دستگاه سنجش

1- Ricinoleic acid
2- Carbon dioxide
3- Carbon monoxide
4- Oxygen
5- Nitrogen oxide

6- Nitric oxide

جدول 3 ضرایب مولی واکنش احتراق و سایر داده‌های مورد نیاز

پارامتر	B0	B5	B10	B15	B20	B30
توان (kW)	55/92	55/18	56/3	55/77	53/91	52/19
مصرف سوخت (g/s)	3/7	3/72	3/8	3/82	3/89	3/9
O ₂ (%Vol)	8/2	8/29	8/47	8/78	8/9	9/21
CO(%Vol)	0/33	0/322	0/312	0/3	0/286	0/26
CO ₂ (%Vol)	8/7	8/78	8/83	8/94	9/02	9/19
NO _x (ppm)	1178	1203	1181	1179	1248	1331
a	1	0/965	0/929	0/892	0/853	0/772
b	0	0/035	0/071	0/108	0/147	0/228
c	32/81	33/26	33/88	34/63	35/16	36/36
d	12/71	12/92	13/3	13/82	14/09	14/76
e	0/511	0/502	0/49	0/472	0/453	0/416
f	13/48	13/68	13/87	14/07	14/28	14/73
g	0/146	0/15	0/148	0/148	0/158	0/17
h	0/0365	0/0375	0/0371	0/0371	0/0395	0/0427
i	123/27	124/96	127/3	130/12	132/1	136/61
j	12/5	12/7	12/89	13/09	13/31	13/76

استفاده از بیودیزل معقول به نظر می‌رسد. قیمت هر لیتر سوخت دیزل ایران، روغن کرچک و بیودیزل تولید شده از آن در جدول 4 آمده است. همچنین برای مقایسه بهتر متوسط قیمت سوخت دیزل در چند کشور (آمریکا، انگلستان، فرانسه، آلمان، ژاپن و چین) نیز در همان جدول گنجانده شده است. ذکر این نکته لازم است که در تبدیل دلار به ریال قیمت‌های جهانی در بازه زمانی 14 ساله طول عمر موتور از قیمت دلار در همان سال (ارائه شده توسط بانک مرکزی [19]) استفاده شده است، لذا بخشی از افزایش ناگهانی قیمت جهانی دیزل و قیمت روغن کرچک از سال 90 به بعد مربوط به افزایش قابل توجه این ارز در ایران است.

4-3- قیمت واحد توان

همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌شود، استفاده از ترکیبات مختلف بیودیزل با دیزل خالص منجر به ایجاد تغییراتی در توان خروجی موتور می‌شود. به عنوان مثال در ترکیب B20 حدود 2kW افت توان در مقایسه با دیزل ایجاد شده است. با توجه به این‌که فرایند تولید توان در موتور دیزل هزینه‌بر است، نیاز است که قیمت واحد توان تعیین شود. هزینه‌هایی که لازم است برای تولید توان در موتور صرف شود عبارت است از: هزینه سوخت ورودی، هزینه اولیه خرید موتور و هزینه تعمیر و نگهداری موتور. هزینه سوخت ورودی که به راحتی با داشتن دبی سوخت و قیمت هر لیتر سوخت به دست می‌آید. قیمت اولیه موتور مورد آزمایش در سال 1380 از نمایندگی شرکت موتورسازان تراکتورسازی تبریز دریافت گردید. در مورد هزینه تعمیر و نگهداری انواع تراکتورها مطالعه‌های وسیعی توسط محققین مختلف صورت گرفته است [20-22]. با توجه به این‌که قیمت موتور مورد آزمایش تقریباً 20% قیمت کل تراکتور است، لذا به عنوان یک تخمین می‌توان فرض نمود که هزینه تعمیر و نگهداری موتور نیز 20% هزینه تعمیر و نگهداری کل تراکتور است. نهایتاً با تقسیم مجموع هزینه‌های مذکور بر توان خروجی موتور قیمت واحد توان تعیین می‌شود. هزینه تعمیر و نگهداری و قیمت واحد توان بدست آمده در مدت زمان طول عمر موتور در جدول 5 لیست شده اند.

4-4- هزینه اجتماعی آلاینده‌های خروجی

آلاینده‌های مختلف خروجی از موتور منجر به ایجاد هزینه‌های اجتماعی می‌شوند. هزینه اجتماعی آلاینده‌ها هزینه‌های غیرمستقیمی است که به واسطه وجود آلاینده‌ها در اجتماع به وجود می‌آید. بخش اصلی این هزینه‌ها شامل هزینه درمان بیماری‌های ایجاد شده ناشی از آلاینده‌ها می‌باشد. علاوه بر آسیب‌های سلامتی، انتشار آلاینده‌ها موجب مسائل و مشکلات زیست محیطی از قبیل بارش باران‌های اسیدی، انباشت گازهای گلخانه‌ای و تغییر آب و هوای جهان می‌شود. استفاده از ترکیبات مختلف بیودیزل با دیزل تاثیر قابل توجهی روی مقدار این آلاینده‌ها دارد. لذا لازم است که قیمت این آلاینده‌ها تخمین زده شود تا بتوان تاثیر اقتصادی استفاده از بیودیزل را در بخش آلاینده‌ها ارزیابی نمود. هزینه اجتماعی آلاینده‌های مختلف هر ساله در ترازنامه انرژی وزارت نیرو [23] اعلام می‌شود. این هزینه‌ها در جدول 6 نشان داده شده‌اند.

هزینه اعلام شده توسط وزارت نیرو به قیمت‌های سال 1381 ارائه شده است. بنابراین برای بدست آوردن این هزینه‌ها در فاصله سال‌های 1380 تا 1393 از جدول شاخص قیمت‌ها و نرخ تورم سالیانه که توسط مرکز آمار ایران [28] ارائه می‌شود استفاده گردید.

گردید. با توجه به این‌که موتور مورد بررسی موتور تراکتور بوده آمار و اطلاعات کارکرد تراکتورهای موجود در ایران استخراج گردید. طول عمر متوسط کارکرد تراکتورها در ایران بین 10 تا 15 سال می‌باشد و ساعت کاری سالانه آن‌ها تقریباً 1200 ساعت می‌باشد [14]. تحلیل اقتصادی این تحقیق به مدت 14 سال و از سال 1380 تا 1393 انجام گردید. در طول این مدت قیمت سوخت دیزل و روغن کرچک از منابع مختلف گردآوری گردید. قیمت سوخت دیزل در ایران بسیار کمتر از قیمت جهانی است، اما طبق برنامه بودجه کشور قرار است در طی سال‌های آتی قیمت دیزل افزایش یافته و به قیمت جهانی نزدیک شود [15]. تولید بیودیزل از روغن خام هزینه بر است. قیمت روغن خام حدود 80 تا 90 درصد قیمت کل بیودیزل است [16]. چنان‌چه تولید بیودیزل در حد انبوه باشد می‌توان همان 90 درصد را در نظر گرفت. ضمناً گلیسرول خروجی از فرایند تولید بیودیزل دارای کاربردهای مختلف من جمله درمانی، صنعتی، تولید صابون و... می‌باشد [17].

4-2- قیمت سوخت

با توجه به یارانه پرداختی دولت در بخش حامل‌های انرژی قیمت سوخت دیزل در ایران اختلاف زیادی با قیمت جهانی این سوخت دارد. همچنین نظر به این‌که در حال حاضر روغن کرچک موجود در ایران از کشور هند و با قیمت جهانی آن خریداری می‌شود [18]، بدیهی است که اختلاف قیمت زیادی بین دیزل و بیودیزل ایجاد شود. با این وجود به واسطه کاهش روزافزون منابع سوخت‌های فسیلی تمایل به استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به شدت در حال افزایش است. علاوه بر این در کشورهای خشک و بیابانی مثل ایران، کشت و برداشت گیاه‌های روغنی می‌تواند کمک زیادی به بیابان‌زدایی داشته باشد. بنابراین حتی با قیمت کنونی سوخت دیزل در ایران

5- نتایج

در این بخش نتایج فنی و اقتصادی موتور ارائه می‌شود. با مقایسه همزمان این نتایج می‌توان انتخاب مناسبی در ارتباط با ترکیب سوخت بهینه انجام داد.

5-1- نتایج فنی

نتایج فنی شامل نتایج مربوط به توان، مصرف ویژه سوخت ترمزی، بازده حرارتی و بازده حجمی می‌باشد. این نتایج در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

5-1-1- توان

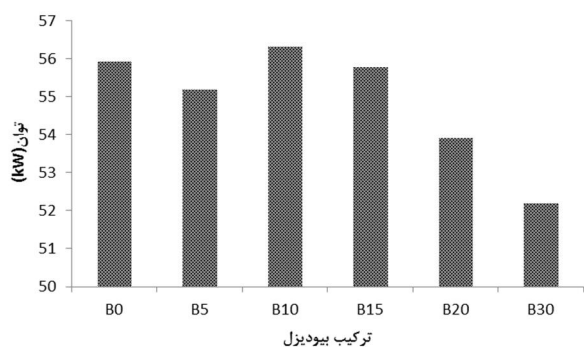
تغییرات توان موتور در ترکیبات مختلف بیودیزل - دیزل در شکل 2 نشان داده شده است. روند کلی نمودار کاهش توان به موازات افزایش درصد بیودیزل است. این کاهش توان عمدتاً به خاطر کاهش ارزش حرارتی سوخت ترکیبی می‌باشد. همچنین با افزایش درصد بیودیزل گرانروی سوخت افزایش یافته که باعث کاهش اتمیزه شدن سوخت و افت توان می‌شود. نکته جالب نمودار افت ناچیز توان در ترکیب B15 و حتی مقداری افزایش توان در ترکیب B10 نسبت به دیزل خالص (B0) می‌باشد. برای توجیه این رفتار بایستی در نظر داشت که اولاً بیودیزل دارای اکسیژن در ساختار خود می‌باشد که باعث بهبود فرآیند احتراق مخصوصاً در مناطق غنی از سوخت می‌شود. ثانیاً چگالی بیشتر بیودیزل باعث می‌شود که در یک حجم مشخص نرخ جرمی بیشتری از سوخت وارد سیلندر شود. همچنین گرانروی بالای بیودیزل که به عنوان عامل کاهش توان مطرح گردید می‌تواند خود باعث افزایش روغن‌کاری و کم شدن اصطکاک در موتور شده و توان خروجی افزایش یابد. بنابراین در دو ترکیب B10 و B15 عوامل ذکر شده در افزایش و کاهش توان به نوعی به یک حالت بهینه دست یافته‌اند و باعث شده‌اند که در این دو ترکیب افت توان نسبت به دیزل خالص ایجاد نشود. بیشترین افت توان نیز در ترکیب B30 و به مقدار 6/6% مشاهده گردید.

5-1-2- مصرف ویژه سوخت ترمزی

مصرف ویژه سوخت ترمزی با افزایش درصد بیودیزل افزایش می‌یابد. این روند به خوبی در شکل 3 نیز قابل مشاهده است. چگالی بالاتر بیودیزل نسبت به دیزل باعث می‌شود که دبی جرمی بیشتری از سوخت وارد موتور شود و مصرف سوخت افزایش یابد. همچنین به خاطر کمتر بودن ارزش حرارتی بیودیزل، موتور نیاز دارد تا سوخت بیشتری را مصرف نماید که جلوی افت توان بیش از حد را بگیرد.

5-1-3- بازده حرارتی ترمزی

بازده حرارتی به صورت نسبت مقدار خالص انرژی تولیدی (توان موتور) به



شکل 2 توان موتور در ترکیبات مختلف بیودیزل-دیزل

جدول 4 قیمت سوخت دیزل و بیودیزل (ریال بر لیتر)

سال	قیمت روغن کرچک [27]	قیمت بیودیزل روغن کرچک	قیمت دیزل در ایران [26]	متوسط قیمت دیزل در چند کشور [25,24]
1380	4039	4488	120	5227
1381	5002	5558	130	5297
1382	7138	7931	160	6448
1383	6887	7652	165	7936
1384	7756	8618	165	9383
1385	6629	7365	165	10354
1386	8882	9869	165	11603
1387	11244	12493	165	14731
1388	9990	11100	165	11880
1389	13563	15070	3500	14685
1390	32281	35868	3500	31179
1391	39545	43939	3500	45512
1392	45120	50133	3500	50976
1393	41416	46018	3500	47833

جدول 5 هزینه تعمیر و نگهداری و قیمت واحد توان

سال	هزینه تعمیر و نگهداری موتور (هزار ریال)	قیمت واحد توان (هزار ریال بر کیلووات)
1380	130	281
1381	410	290
1382	850	308
1383	1260	317
1384	1520	322
1385	1630	324
1386	2450	338
1387	3610	359
1388	4680	378
1389	6410	1556
1390	9030	1603
1391	14150	1695
1392	23150	1856
1393	25000	1889

جدول 6 هزینه اجتماعی آلاینده‌های مختلف به قیمت‌های سال 1381

نوع آلاینده	مقدار هزینه (هزار ریال بر تن)
NO _x	4800
SO ₂	14600
CO	1500
PM	34400
CO ₂	80
CH ₄	1680

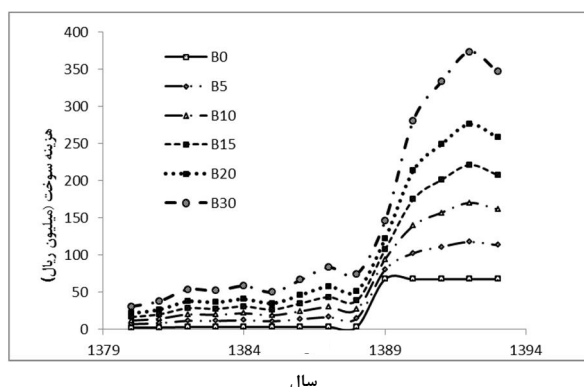
5-2- نتایج اقتصادی

5-2-1- هزینه سوخت

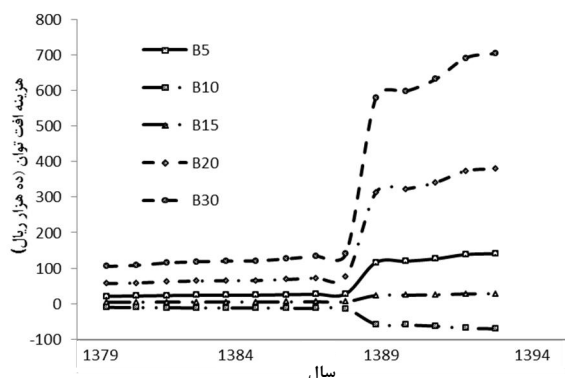
با افزایش درصد بیودیزل در سوخت دیزل مصرف سوخت کمی افزایش می‌یابد. همچنین قیمت سوخت بیودیزل اختلاف زیادی با قیمت دیزل فعلی کشور ایران دارد. بنابراین بدیهی است که هزینه سوخت ورودی با افزایش درصد بیودیزل افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته باشد. شکل 6 این افزایش را به خوبی نشان می‌دهد. تغییرات قیمت ارز در ایران باعث ایجاد برخی نوسانات در منحنی‌ها شده است. به عنوان مثال کاهش قیمتی که از سال 1392 به 1393 مشاهده می‌شود به خاطر کاهش قیمت دلار در حد فاصل این دو سال است. همچنین افزایش ناگهانی قیمت‌ها از سال 1388 به بعد به خاطر افزایش قیمت سوخت دیزل در ایران و افزایش قابل توجه قیمت دلار از این سال به بعد در ایران است.

5-2-2- هزینه افت توان

افت توانی که در هنگام استفاده از بیودیزل رخ می‌دهد منجر به ایجاد ضررهای مالی می‌شود. شکل 7 مقدار ضررهای ایجاد شده به واسطه افت توان در ترکیبات مختلف بیودیزل نسبت به دیزل را نشان می‌دهد. بیشترین افت توان نسبت به دیزل در ترکیب B30 به اندازه 3/73kW رخ داده است، لذا همان‌طور که در شکل هم مشاهده می‌شود، بیشترین ضرر مالی را نیز همین ترکیب به خود اختصاص داده است. نکته جالب‌تر این‌که استفاده از ترکیب B10 نه تنها افت توانی به همراه نداشته است، بلکه مقداری نیز افزایش توان از خود نشان داده است (0/38kW). مقادیر منفی در شکل 7 نیز به خاطر همین افزایش توان موجود در ترکیب B10 می‌باشد. در واقع این ترکیب نه تنها از نظر توان خروجی با ضرر مالی همراه نبوده، بلکه دارای سود هم بوده است.



شکل 6 تغییرات قیمت سوخت ورودی در ترکیبات مختلف بیودیزل

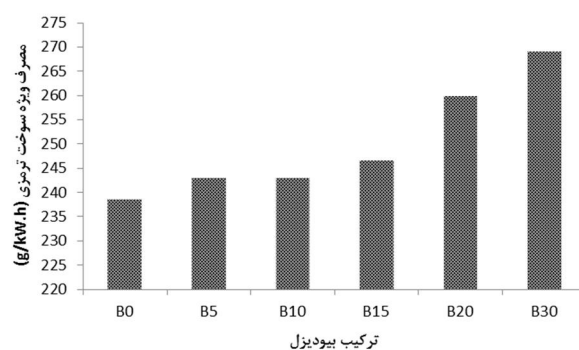


شکل 7 مقدار ضرر مالی ناشی از افت توان در ترکیبات مختلف بیودیزل

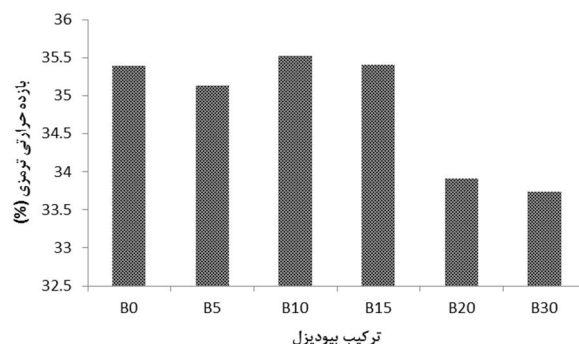
مقدار کل انرژی ورودی (انرژی سوخت ورودی) تعریف می‌شود. همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده است، روند تغییرات بازده حرارتی موتور مشابه تغییرات توان است. به این معنی که در حالت کلی بازده حرارتی با افزایش درصد بیودیزل کاهش پیدا می‌کند، اما در دو ترکیب B10 و B15 این روند کاهشی مشاهده نمی‌شود. توجه این رفتار مشابه همان توجه مطرح شده در بخش توان است. بیشترین بازده حرارتی متعلق به ترکیب B10 (0/37%) افزایش نسبت به دیزل) و کمترین آن مربوط به ترکیب B30 (4/7%) کاهش نسبت به دیزل) می‌باشد.

5-1-4- بازده حجمی

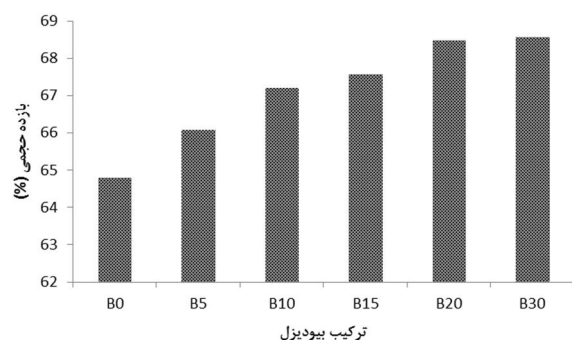
بازده حجمی به صورت نسبت دبی جرمی هوای ورودی به موتور به حداکثر دبی جرمی هوای تنوری تعریف می‌شود. تغییرات بازده حجمی با افزایش درصد بیودیزل در شکل 5 نشان داده شده است. با توجه به وجود اکسیژن در ساختار بیودیزل، هر چه درصد بیودیزل موجود در سوخت بیشتر شود، اکسیژن بیشتر و به تبع آن هوای بیشتری وارد موتور می‌شود. این روند افزایشی به خوبی در شکل 5 قابل مشاهده است.



شکل 3 مصرف ویژه سوخت ترمزی موتور در ترکیبات مختلف بیودیزل - دیزل



شکل 4 بازده حرارتی ترمزی موتور در ترکیبات مختلف بیودیزل - دیزل



شکل 5 بازده حجمی موتور در ترکیبات مختلف بیودیزل - دیزل

3-2-5- هزینه آلاینده‌ها

1-3-2-5- هزینه CO

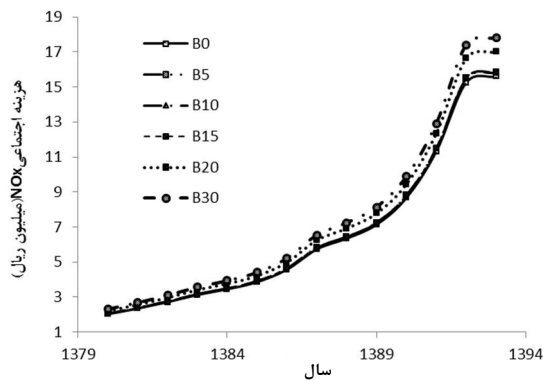
استفاده از بیودیزل در موتور منجر به کاهش آلاینده CO می‌شود. با افزایش درصد بیودیزل کاهش این آلاینده بیشتر می‌شود. شکل 8 هزینه اجتماعی این آلاینده را در حد فاصل سالهای طول عمر موتور نشان می‌دهد. بیشترین کاهش هزینه در ترکیب B30 با 20% کاهش نسبت به دیزل مشاهده گردید.

2-3-2-5- هزینه CO₂

استفاده از بیودیزل منجر به مقداری افزایش در آلاینده CO₂ می‌شود، که عمدتاً به خاطر احتراق کاملتر بیودیزل نسبت به دیزل است. هزینه اجتماعی این آلاینده در قیاس با سایر آلاینده‌ها دارای کمترین مقدار است، اما از طرفی مقدار دبی جرمی خروجی این آلاینده نسبت به دیگر آلاینده‌ها بیشترین است. تغییرات این هزینه در سال‌های مختلف در شکل 9 نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، استفاده از بیودیزل تأثیر زیادی روی هزینه این آلاینده ندارد. به عنوان مثال ترکیب B30 که بیشترین هزینه را به خود اختصاص داده، فقط 6% افزایش هزینه نسبت به دیزل به همراه داشته است. برای واضح‌تر شدن تغییرات ترکیب‌های مختلف بیودیزل بخشی از نمودار از سال 1389 تا 1390 بزرگنمایی شده است.

3-3-2-5- هزینه NO_x

مقدار آلاینده NO_x در موتور دیزل با توجه به احتراق بهتر موتور و افزایش دمای گازهای خروجی با افزایش درصد بیودیزل افزایش می‌یابد. هزینه اجتماعی ناشی از انتشار این آلاینده در شکل 10 نشان داده شده است. مقدار این هزینه در ترکیبات B10 و B15 به ترتیب 1/4% و 1/6% نسبت به دیزل افزایش داشته است.



شکل 10 هزینه اجتماعی NO_x برای ترکیبات مختلف بیودیزل

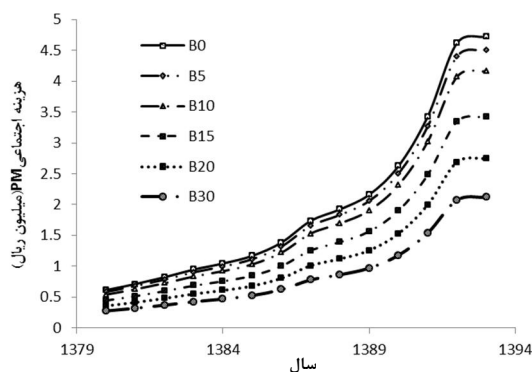
بیشترین افزایش مقدار هزینه در ترکیب B30 و به مقدار 14% ایجاد گردید.

4-3-2-5- هزینه PM

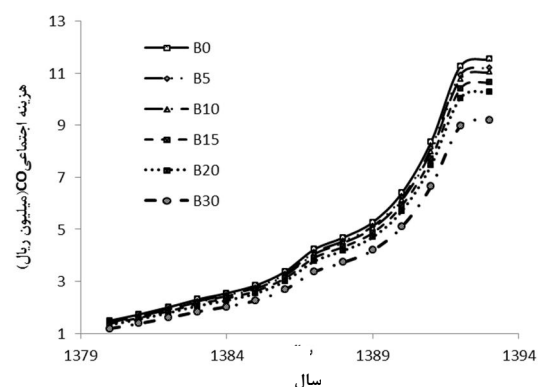
مقدار ذرات معلق خروجی از موتور با افزایش درصد بیودیزل به مقدار زیادی کاهش می‌یابد. بهبود احتراق به واسطه اکسیژن موجود در بیودیزل عمده ترین دلیلی است که در مطالعات مختلف برای توجیه کاهش ذرات معلق ذکر شده است. انتشار این آلاینده در محیط بیشترین مقدار هزینه اجتماعی را در بین سایر آلاینده‌ها در پی دارد. زیرا که تنفس این ذرات یکی از مهمترین عوامل ایجاد بیماری‌های قلبی ریوی می‌باشد [29]. مقدار این هزینه در شکل 11 برای ترکیبات مختلف بیودیزل نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از بیودیزل کاهش هزینه قابل توجهی را در پی دارد. استفاده از ترکیب B30 منجر به کاهش 55 درصدی هزینه اجتماعی آلاینده PM می‌شود. این کاهش هزینه در ترکیب B15 نیز حدود 27% است.

4-2-5- هزینه کلی

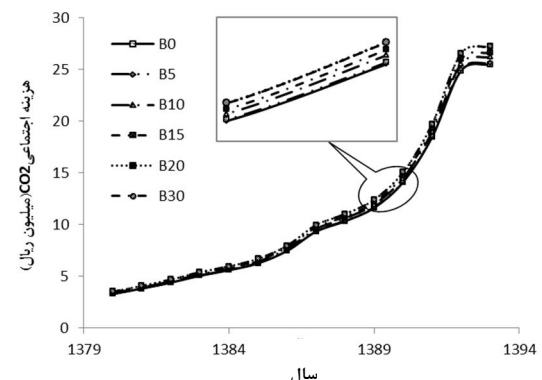
با در نظر گرفتن کلیه هزینه‌ها در کل مدت زمان طول عمر موتور، سود و ضرر مالی استفاده از ترکیبات مختلف بیودیزل نسبت به دیزل (بدون احتساب هزینه سوخت) در شکل 12 نشان داده شده است. با توجه به این که قیمت دیزل در ایران فاصله زیادی با قیمت جهانی دارد، عملاً در هر شرایطی باعث ایجاد ضرر مالی زیادی در استفاده از بیودیزل می‌شود. بنابراین در شکل 12 هزینه سوخت ورودی در نظر گرفته نشده است. همچنین پیشنهاد دیگری می‌تواند مطرح شود استفاده از بیودیزل‌هایی است که تهیه روغن خام آنها هزینه‌ای در بر ندارد. بیودیزل تولید شده از روغن‌های پسماند خوراکی می‌تواند گزینه مناسبی برای این جایگزینی باشد.



شکل 11 هزینه اجتماعی PM برای ترکیبات مختلف بیودیزل



شکل 8 هزینه اجتماعی CO برای ترکیبات مختلف بیودیزل



شکل 9 هزینه اجتماعی CO₂ برای ترکیبات مختلف بیودیزل

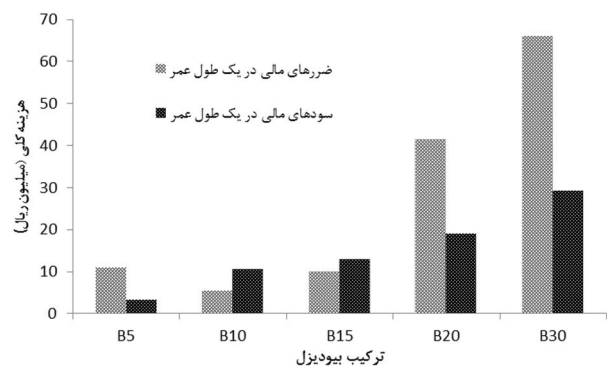
استفاده از بیودیزل عمدتاً منجر به کاهش توان در موتور می‌شود. بنابراین هزینه واحد توان محاسبه و این افت توان معادل‌سازی اقتصادی گردید. در ترکیب B10 نه تنها افت توانی مشاهده نشد بلکه مقداری نیز افزایش توان هم وجود داشت. همین افزایش توان یکی از دلایلی بود که باعث شد این ترکیب به عنوان با صرفه‌ترین ترکیب سوختی معرفی شود. استفاده از بیودیزل در موتور منجر به کاهش دو آلاینده CO و PM و افزایش دو آلاینده CO₂ و NO_x گردید. اما با توجه به این‌که هزینه اجتماعی آلاینده CO₂ نسبت به سایر آلاینده‌ها پایین‌تر بوده و از طرفی نرخ جرمی آلاینده NO_x نیز مقدار کمی بود، مقدار ضرر مالی که توسط این دو آلاینده ایجاد گردید کمتر از سود مالی بود که توسط دو آلاینده دیگر ایجاد شد. بنابراین استفاده از کلیه ترکیبات بیودیزل از نظر هزینه آلاینده‌ها نسبت به دیزل دارای صرفه اقتصادی می‌باشد. برای ایجاد مقایسه بهتر نتایج عملکرد فنی موتور نیز مورد بررسی قرار گرفت. این نتایج شامل توان، مصرف ویژه سوخت و بازده‌های حرارتی و حجمی بودند. در نهایت، نتایج تحقیق جامع فنی - اقتصادی حاکی از آن بود که استفاده از دو ترکیب B10 و B15 علاوه بر این‌که از نظر اقتصادی سودمندتر از دیزل هستند، دارای مشخصه‌های فنی مطلوبی نیز هستند. به عنوان مثال ترکیب B10 هم دارای بیشترین توان و بازده حرارتی بوده و هم دارای بیشترین سود اقتصادی می‌باشد. ترکیب B30 با توجه به افت توان نسبتاً زیاد موتور در این ترکیب منجر به ایجاد بیشترین ضرر مالی و کمترین بازده حرارتی نسبت به سایر ترکیب‌ها گردید و تنها مزیت استفاده از این ترکیب بازده حجمی بالای آن بود.

7- فهرست علائم

BTDC	قبل از نقطه مرگ بالا
%Vol	درصد حجمی
LHV	ارزش حرارتی پایینی (kJ/kg)
NO _x	اکسیدهای نیتروژن
P	فشار (kPa)
PM	ذرات معلق
ppm	قسمت در میلیون
T	دما (°C)
زیرنویس‌ها	
0	شرایط محیط

8- مراجع

- [1] A. Zenouzi, B. Ghobadian, T. T. Hashjin, M. Feyzolahnejad, H. Bagherpour, Effect of Waste Oil Methyl Ester on Tractor Engine Performance, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 89-99, 2010. (In Persian)
- [2] D. Altiparmak, A. Keskin, A. Koca, M. Guru, Alternative fuel properties of tall oil fatty acid methyl ester-diesel fuel blends, *Bioresource Technology*, Vol. 98, No. 2, pp. 241-246, 2007.
- [3] B. Najafi, Artificial neural networks used for the prediction of the diesel engine performance and pollution of waste cooking oil biodiesel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 4, 2011. (In Persian)
- [4] M. Faizal, R. Saidur, S. Mekhilef, M. A. Alim, Energy, economic and environmental analysis of metal oxides nanofluid for flat-plate solar collector, *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, No. 0, pp. 162-168, 2013.
- [5] K. R. Ranjan, S. C. Kaushik, Thermodynamic and economic feasibility of solar ponds for various thermal applications: A comprehensive review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, No. 0, pp. 123-139, 2014.
- [6] N. S. Siefert, S. Litster, Exergy and economic analysis of biogas fueled solid oxide fuel cell systems, *Journal of Power Sources*, Vol. 272, No. 0, pp. 386-397, 2014.
- [7] H. Shahsavari Alavijeh, A. Kiyomarsioskouei, M. H. Asheri, S. Naemi, H.



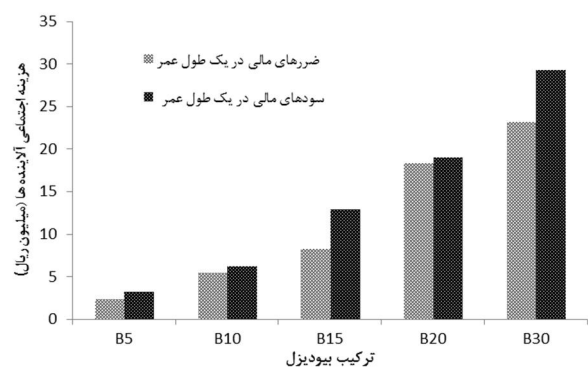
شکل 12 سود و ضرر مالی کلی استفاده از ترکیبات مختلف بیودیزل نسبت به دیزل

با توجه به شکل 12، مشاهده می‌شود که فقط استفاده از دو ترکیب B10 و B15 از نظر اقتصادی سودمند است. بیشترین اختلاف سود و ضرر در ترکیب B30 (36 میلیون ریال) وجود دارد. افت توان به وجود آمده در این ترکیب یکی از دلایل این اختلاف زیاد است. همچنین ترکیب B10 با صرفه‌ترین ترکیب بیودیزل می‌باشد. استفاده از این ترکیب حدود 5 میلیون ریال سود اقتصادی نسبت به دیزل به همراه دارد.

با توجه به اهمیت موضوع آلودگی و برای ایجاد مقایسه بهتر، مقدار سود و ضرر مالی اجتماعی آلاینده‌ها در ترکیبات مختلف بیودیزل در شکل 13 نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، استفاده از کلیه ترکیبات بیودیزل در موتور دیزل باعث کاهش هزینه‌های اجتماعی آلاینده‌ها می‌شود.

6- نتیجه‌گیری

استفاده از بیودیزل‌های مختلف در موتور به کرات توسط محققین مختلف ارزیابی فنی و زیست محیطی شده است. اما در هیچ یک از این تحقیقات به ارزیابی اقتصادی بیودیزل توجه نشده است. در این تحقیق با توجه به خلا موجود، تحلیل کامل فنی - اقتصادی استفاده از ترکیبات مختلف سوخت بیودیزل در موتور دیزل انجام پذیرفت. به این منظور درصد‌های مختلفی از سوخت بیودیزل روغن کرچک روی یک موتور دیزل 4 سیلندر آزمایش گردید. به کمک داده‌های به‌دست آمده از آزمایشات واکنش احتراق نوشته و نرخ جرمی هر یک از آلاینده‌ها تعیین شد. هزینه سوخت ورودی، هزینه اجتماعی آلاینده‌ها و هزینه افت توان موتور پارامترهایی هستند که در تحلیل اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفتند. با توجه به قیمت بسیار پایین سوخت دیزل در ایران نسبت به میانگین جهانی، بدیهی است که در این شرایط استفاده از سوخت بیودیزل به صرفه نیست. به همین دلیل در تحلیل کلی هزینه سوخت ورودی لحاظ نگردید.



شکل 13 سود و ضرر مالی اجتماعی آلاینده‌ها در ترکیبات مختلف بیودیزل

- [17] A. B. Leoneti, V. Aragão-Leoneti, S. V. W. B. de Oliveira, Glycerol as a by-product of biodiesel production in Brazil: Alternatives for the use of unrefined glycerol, *Renewable Energy*, Vol. 45, No. 0, pp. 138-145, 2012.
- [18] V. Parizani, A. Ismaeili, The effect of tariff reduction on Imports of Vegetable oils in Iran, *Agriculture science*, Vol. 18, No. 4, 2009. (In Persian)
- [19] *Foreign Exchange Rates-Central Bank of the Islamic Republic of Iran*, Accessed; www.cbi.ir.
- [20] J. Morris, Estimation of tractor repair and maintenance costs, *Journal of Agricultural Engineering Research*, Vol. 41, No. 3, pp. 191-200, 1988.
- [21] A. Rohani, M. H. Abbaspour-Fard, S. Abdolapour, Prediction of tractor repair and maintenance costs using Artificial Neural Network, *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 7, pp. 8999-9007, 2011.
- [22] A. Ashtiani, I. Ranjbar, M. Tourchi, Estimation of economic life of three agriculture tractor models in Iran *Agriculture science*, Vol. 12, No. 1, 2006. (In Persian)
- [23] *Iranian government: Ministry of Energy*, Accessed; www.moe.gov.ir.
- [24] *Gasoline and diesel prices by country*, Accessed; www.globalpetrolprices.com.
- [25] *The world bank*, Accessed; www.data.worldbank.org.
- [26] *Energy and transportation information of Iran: Iranian fuel conservation company (IFCO)*, 2011. (In Persian)
- [27] castoroil.in, *Comprehensive Castor Oil Report*, Chennai-india, pp. 2014.
- [28] *Iranian government: Statistical Centre of Iran*, Accessed; www.amar.org.ir.
- [29] Z. D. Ristovski, B. Miljevic, N. C. Surawski, L. Morawska, K. M. Fong, F. Goh, I. A. Yang, Respiratory health effects of diesel particulate matter, *Respirology*, Vol. 17, No. 2, pp. 201-212, 2012.
- Basirat Tabrizi, Greenhouse gas emission measurement and economic analysis of Iran natural gas fired power plants, *Energy Policy*, Vol. 60, No. 0, pp. 200-207, 2013.
- [8] K. E. Rosendahl, *Social costs of air pollution and fossil fuel use, A macroeconomic approach*, Oslo: Statistics Norway, 1998.
- [9] J. Berechman, P.-H. Tseng, Estimating the environmental costs of port related emissions: The case of Kaohsiung, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 17, No. 1, pp. 35-38, 2012.
- [10] ISO, Road vehicles-Engine test code-Gross power, Second edition, ISO 2534, International Organization for Standardization, 1998, pp. 29.
- [11] M. H. Shojaeefard, M. M. Etgahni, F. Meisami, A. Barari, Experimental investigation on performance and exhaust emissions of castor oil biodiesel from a diesel engine, *Environmental Technology*, Vol. 34, No. 13-14, pp. 2019-2026, 2013.
- [12] ASTM, Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels, ASTM D6751, ASTM International, 2014, pp. 9.
- [13] F. Meisami, M. Sheikhsamani, investigation the feasibility of converting castor oil to biodiesel and its application in diesel engine, in *2nd Annual Clean Energy Conference (ACEC)*, Kerman-Iran, 2012. (In Persian)
- [14] S. Karimi, T. M. Gundoshmian, N. K. Alhossein, Determining and analyses economic useful life for agricultural tractors in the West Azerbaijan province, *Journal of sustainable agriculture and production science*, Vol. 22, No. 4, 2012. (In Persian)
- [15] *Iranian government: Ministry of Petroleum*, Accessed; www.mop.ir.
- [16] G. Buchanan, *Increasing Feedstock Production For Biofuels : Economic Drivers, Environmental Implications, And The Role Of Research*, pp. 167: DIANE Publishing, 2010.