

## مطالعه آزمایشگاهی تأثیر استفاده از روش $FGR$ بر دمای ماکزیمم شعله و انتشار $NO_x$ در احتراق گازوئیل و بیودیزل

علی آجیلیان ممتاز<sup>۱</sup>، حمید ممهدی هروی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی - مشهد - ایران

a.ajilian@yahoo.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه آزاد اسلامی - مشهد - ایران

heravihm@mshdiau.ac.ir

دریافت مقاله: ۹۱/۲/۱۰ اصلاحیه: ۹۱/۹/۷

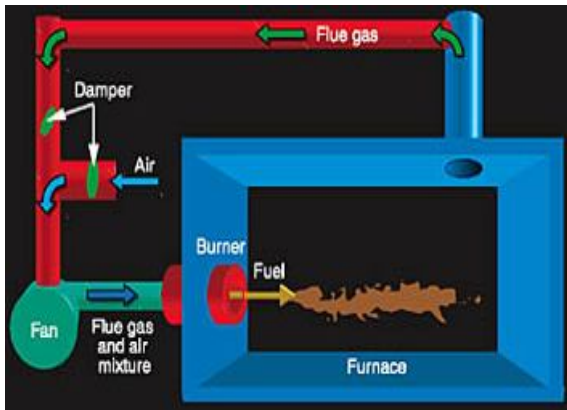
پذیرش مقاله: ۹۱/۱۰/۶

**چکیده:** هدف از انجام این پژوهش، مطالعه آزمایشگاهی تأثیر برگشت گازهای خروجی بر دمای شعله و انتشار  $NO_x$  حاصل از احتراق گازوئیل و بیودیزل تولید شده از روغن آفتابگردان در داخل کوره آزمایشگاهی استوانه‌ای شکل است. آزمایش‌ها در درصدهای مختلف برگشت گازهای خروجی از صفر تا ۳۰ درصد و دبی‌های هوای ورودی  $3/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  و  $4/5$  و  $5/5$  انجام شده است. نتایج آزمایشگاهی بیانگر این است که در احتراق گازوئیل و بیودیزل B20 و B40، با افزایش درصد گازهای برگشتی تا ۳۰ درصد، ماکزیمم دمای شعله و انتشار آلاینده  $NO_x$  کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، در احتراق بیودیزل، با افزایش درصد حجمی بیودیزل از صفر تا ۴۰ درصد در مخلوط سوخت، دمای گازهای خروجی و انتشار آلاینده  $NO_x$  افزایش می‌یابد. نتایج حاصل از این پژوهش، دلالت می‌کند که روش بازگردانی گازهای خروجی، روشی مؤثر در جهت کاهش آلاینده  $NO_x$  می‌باشد. مقایسه نتایج با آزمایش‌های سایر محققان مطابقت بسیار خوبی، خصوصاً از لحاظ کیفی نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** بازگردانی گازهای احتراقی، بیودیزل،  $NO_x$ .

۱. مقدمه

دارد که مهم‌ترین آن‌ها اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) می‌باشند. روش‌های مختلفی برای کاهش انتشار  $NO_x$  وجود دارد که یکی از مؤثرترین آن‌ها، کاهش دمای ماکزیمم با استفاده از بازگردانی محصولات احتراق<sup>۱</sup> ( $FGR$ ) است [۹]. در این روش، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، بخشی از محصولات احتراق در خروجی کوره بازگردانده می‌شود و به هوای ورودی اضافه می‌گردد. بدین ترتیب، حداقل دو عامل که باعث کاهش تشکیل اکسیدهای نیتروژن می‌شود، روی می‌دهد: اول اینکه این عمل باعث کاهش درصد اکسیژن در محصولات احتراق می‌گردد و احتراق در اتمسفر با اکسیژن کم باعث کاهش تولید  $NO_x$  می‌شود؛ همچنین به دلیل افزایش گرمای ویژه مخلوط محصولات احتراق بازگردانده شده و هوای ورودی، دمای شعله کاهش می‌یابد، در نتیجه آن  $NO_x$  حرارتی کمتری تشکیل می‌شود. به طور کلی، دو نوع  $FGR$  وجود دارد: در نوع اول، ابتدا گازهای برگشتی توسط یک مبدل حرارتی خنک می‌شود و سپس با هوا مخلوط می‌گردد. در این صورت، دمای احتراق به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در نوع دیگر، گازهای برگشتی بدون اینکه خنک شود با هوا مخلوط می‌شود. نوع اول به دلیل اینکه سبب افزایش آلدهیدها در محصولات احتراق می‌گردد و همچنین هزینه اضافی ناشی از خنک‌کاری گازهای برگشتی را به همراه دارد، کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. باید توجه داشت که میزان زیاد  $FGR$  باعث ناپایداری و احتراق ناقص و در نتیجه موجب تولید  $CO$  و دود می‌گردد. میزان کم  $FGR$  نیز باعث افزایش تولید  $NO_x$  می‌شود.



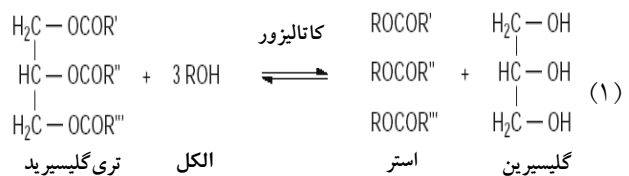
شکل (۱): روش بازگردانی گازهای خروجی ( $FGR$ ) [۹]

نقطه شروع تحقیقات پیرامون سوخت بیودیزل به سال ۱۸۹۳ برمی‌گردد. رادولف دیزل و همکاران در آلمان به دنبال ساخت موتوری بودند که بالاترین نسبت تراکم ممکن را داشته باشد [۱]. تحقیقات آن‌ها ادامه یافت تا اینکه در سال ۱۹۱۲ اعلام کردند که می‌توان از روغن‌های گیاهی تولید سوخت کرد. در سال ۱۹۹۴، کمیته ملی بیودیزل آمریکا

انرژی، نقش مهمی در زندگی روزانه انسان‌ها ایفا می‌کند و یکی از مهم‌ترین عوامل پیشرفت جوامع بشری است. منابع انرژی می‌توانند به سه گروه تقسیم شوند: انرژی سوخت‌های فسیلی، انرژی هسته‌ای و انرژی‌های تجدیدپذیر [۱]. بعضی از این منابع، طی سالیان دراز و بعضی نیز به تازگی در جهت رفع نیاز بشر به انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

ذغال‌سنگ، گاز طبیعی و نفت از جمله سوخت‌های فسیلی اند [۲]. استفاده از این‌گونه سوخت‌ها اگرچه نیاز بشر به انرژی را تا حد زیادی برآورده کرده است، مشکلاتی از قبیل آلودگی‌های زیست‌محیطی و تولید گازهای گلخانه‌ای را نیز به همراه داشته است. دسته دیگر انرژی، انرژی هسته‌ای است که در تولید آن از مواد قابل شکافت (مانند اورانیوم) استفاده می‌شود [۳]. انرژی هسته‌ای، علی‌رغم مزایای بسیار آن، معایب اساسی دارد که می‌توان مشکلات دورریزی فضولات، امکان تکثیر جنگ‌افزارهای هسته‌ای، آلودگی گرمایی ناشی از نیروگاه‌ها و آثار سوء بر سلامتی انسان را نام برد.

برای غلبه بر مشکلات ذکر شده، منابع انرژی جدید، مانند سوخت بیودیزل، به دلیل اینکه عمدتاً دوست‌دار محیط زیست‌اند و از منابع تجدیدپذیر مانند گیاهان، روغن‌های خوراکی و غیرخوراکی به دست می‌آیند، بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۴]. سوخت بیودیزل از ترکیب منوالکیل اسید چرب با الکل و در حضور کاتالیزور به دست می‌آید که طی واکنش‌هایی، «متیل استر» با عنوان تجاری بیودیزل تولید می‌شود و بعد از خالص‌سازی قابل استفاده است [۵]. رایج‌ترین الکل‌های مورد استفاده برای تولید بیودیزل، متانول و اتانول است. از هیدروکسیدپتاسیم و هیدروکسیدسدیم نیز معمولاً به عنوان کاتالیزور استفاده می‌شود. روش رایج برای تولید بیودیزل از روغن‌های نباتی، ترانس‌استریفیکاسیون روغن‌های گیاهی است [۶]. واکنش کلی ترانس‌استریفیکاسیون در رابطه (۱) ارائه شده است [۷]:



گلیسرین که از محصولات فرعی این فرآیند است، پس از تصفیه در منابع آرایشی، بهداشتی و نظامی کاربرد دارد.

انتشار آلاینده‌ها و توجه به مسائل زیست‌محیطی از دیگر عوامل مهم در انتخاب نوع سوخت و طراحی سیستم‌های احتراقی است [۸]. انواع گوناگون آلاینده‌ها در محصولات احتراق سوخت‌های گوناگون وجود

$NO_x$  با استفاده از این روش به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد؛ هرچند انتشار ذرات ریز افزایش می‌یابد.

همان‌طور که اشاره شد، سوخت تجدیدپذیر بیودیزل می‌تواند به عنوان جایگزین مناسب گازوئیل مورد استفاده قرار گیرد، لذا در مقاله حاضر، ابتدا خواص احتراقی سوخت گازوئیل بررسی شده است. پس از مقایسه نتایج با پژوهش مشابه و اطمینان از صحت و دقت نتایج، به مطالعه آزمایشگاهی اثر افزودن بیودیزل به سوخت گازوئیل بر انتشار آلاینده احتراقی  $NO_x$  و دمای گازهای خروجی حاصل از احتراق آن در داخل کوره آزمایشگاهی پرداخته شده است. در انتها تأثیر استفاده از روش  $FGR$ ، که به عنوان یکی از مؤثرترین روش‌های کاهش آلاینده‌های احتراقی مورد استفاده قرار می‌گیرد، بر احتراق گازوئیل و بیودیزل بررسی می‌گردد.

## ۲. تجهیزات آزمایشگاهی

کوره آزمایشگاهی استفاده شده در این پروژه با توجه به ظرفیت مشعل، از یک استوانه افقی با طول ۱۸۰۰mm و قطر ۳۶۰mm تشکیل شده که در قسمت ورودی آن، محلی برای نصب مشعل و در قسمت خروجی نیز محلی برای اتصال دودکش در نظر گرفته شده است. سطح داخلی کوره کاملاً صیقلی است تا هیچ‌گونه مقاومتی در مقابل گازهای داغ به وجود نیاید. بدنه کوره از فولاد AISI316 جهت مقاومت در دماهای بالا ساخته شده است. اطراف کوره توسط عایق حرارتی پوشانده شده است به طوری که انتقال حرارت از بدنه کوره قابل اغماض است. جنس عایق حرارتی پشم هندی و ضخامت آن ۴۰mm است. دمای داخل کوره به وسیله یک ترموکوپل نوع S با قابلیت اندازه‌گیری دما تا  $1700^\circ C$ ، که در فاصله ۵cm از انتهای کوره قرار گرفته، اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری میزان  $NO_x$  توسط دستگاه آنالیزور گاز Testo 350 XL که قادر به اندازه‌گیری غلظت  $NO_x$  تا ۳۰۰۰ppm است، انجام شده است. به منظور بازگردانی بخشی از گازهای خروجی از دودکش و ترکیب آن با هوای ورودی به مشعل، از ارتفاع ۳ متری با نصب سه‌راهی بر روی دودکش، مسیر برگشت گازهای خروجی ایجاد شده است. مسیر در نظر گرفته شده جهت بازگردانی گازهای دودکش از لوله گازی فولادی به قطر ۲ اینچ است. برای به حداقل رساندن اتلافات و درزبندی کامل، از اتصالات جوشی استفاده شده است. بر روی این مسیر، سه شیر تنظیم و یک فن مکنده، جهت تنظیم دبی گازهای بازگشتی از دودکش خروجی و هوای ورودی به مشعل، نصب شده است. از شیر تنظیم اول به منظور کنترل دبی گازهای برگشتی از دودکش، از شیر دوم برای تنظیم دبی هوای ورودی و از شیر سوم جهت تنظیم دبی مخلوط گازهای برگشتی و

گزارشی درباره سوخت بیودیزل B20 (مخلوط ۲۰ درصد بیودیزل و ۸۰ درصد گازوئیل) و خصوصیات عملکردی و آلاینده‌های تولیدی آن ارائه کرد. این گزارش نشان می‌داد بیودیزل، عملکرد موتور را بهتر کرده و انتشار آلاینده‌ها نیز کاهش یافته است. در پژوهشی دیگر، گارپن [۱۰] به مطالعه تأثیر زمان و دمای واکنش بر روی کیفیت استر پرداخت. نتایج تحقیقات وی نشان داد این دو پارامتر، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر کیفیت سوخت بیودیزل‌اند. تولید اسیدهای چرب متیل استر با استفاده از امواج مایکروویو و کاتالیزورهای همگن توسط هرناندو و همکاران مورد مطالعه قرار گرفت [۱۱]. آن‌ها گزارش کردند که با استفاده از تابش امواج مایکروویو، می‌توان تری‌گلیسیریدها را به کمک متانول، سریع‌تر الکل‌دار کرد؛ این عمل باعث افزایش تولید اسیدهای چرب متیل استر می‌شود. پژوهشگران زیادی از روغن بازیافتی برای تولید بیودیزل استفاده کرده‌اند [۱۲]. استفاده از این گونه روغن‌ها اگرچه هزینه اولیه تهیه روغن به منظور تولید بیودیزل را کاهش می‌دهد، عموماً هزینه خالص‌سازی و رفع ناخالصی‌ها از سوخت، این کاهش هزینه را جبران می‌کند. امروزه تحقیقات گسترده‌ای بر روی جلبک‌ها و گیاهان تک‌یاخته‌ای جهت تولید بیودیزل در حال اجراست [۱۳].

محققان زیادی نیز از روش بازگردانی گازهای خروجی به محفظه احتراق جهت کاهش تولید آلاینده اکسیدهای نیتروژن ( $NO_x$ ) استفاده کرده‌اند. بالتازار و کاروالهو [۱۴] به بررسی آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی تأثیر بازگردانی گازهای خروجی بر روی شعله و انتشار آلاینده‌ها در احتراق پروپان و هوا در کوره آزمایشگاهی پرداختند. نتایج به دست آمده بیانگر این بود که استفاده از این روش، باعث کاهش انتشار  $NO_x$  می‌شود و در عین حال، بر روی بازده احتراق تأثیر منفی ندارد. همچنین آن‌ها متوجه شدند که بازگردانی گازهای خروجی تا ۳۲ درصد، بدون توجه به میزان هوای اضافی، بر روی پایداری شعله هیچ تأثیر سوئی ندارد. تیموتی و بستر [۱۵] با استفاده از این روش در احتراق پیش‌آمیخته گاز طبیعی و هوا در نسبت هم‌ارزی ۱ و بازگردانی ۵۰ درصد گازهای خروجی از دودکش به محفظه احتراق، موفق شدند انتشار  $NO_x$  را به میزان ۹۵ درصد کاهش دهند. ماتسوموتو و همکاران [۱۶] و ینگ و لانگ‌بیو [۱۷]، تحقیقات آزمایشگاهی به منظور مطالعه اثربخشی بازگردانی گازهای خروجی به محفظه احتراق بر کاهش آلاینده  $NO_x$  در احتراق دی‌متیل اتر انجام دادند. نتایج بیانگر آن بود که با استفاده از این روش، انتشار  $NO_x$  به طور چشمگیری کاهش می‌یابد. روی و همکاران [۱۸] نیز به بررسی استفاده از روش بازگردانی گازهای خروجی و جداکننده‌های سیکلونی بر کاهش  $NO_x$  و ذرات ریز در موتور دیزل پاشش مستقیم پرداختند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که میزان انتشار



شکل (۳): مخلوط گلیسرین و بیودیزل قبل از جداسازی

برای اطمینان از تولید سوخت بیودیزل و انجام کامل فرآیند ترانس استریفیکاسیون، نمونه‌ای از بیودیزل تولیدی تحت تست IR<sup>۱</sup> قرار گرفت. نتیجه انجام این تست، بیانگر آن بود که فرآیند ترانس استریفیکاسیون به طور کامل صورت پذیرفته و استر که جزء اصلی سازنده بیودیزل می‌باشد، تشکیل شده است. همچنین بعضی از خواص این سوخت در آزمایشگاه اندازه‌گیری گردید. نتایج به دست آمده، که در جدول (۱) ارائه شده، مؤید آن است که خواص سوخت بیودیزل تولید شده با جداول استاندارد این سوخت، مطابقت بسیار خوبی دارد.

جدول (۱): خواص بیودیزل استاندارد و تولید شده در این آزمایش

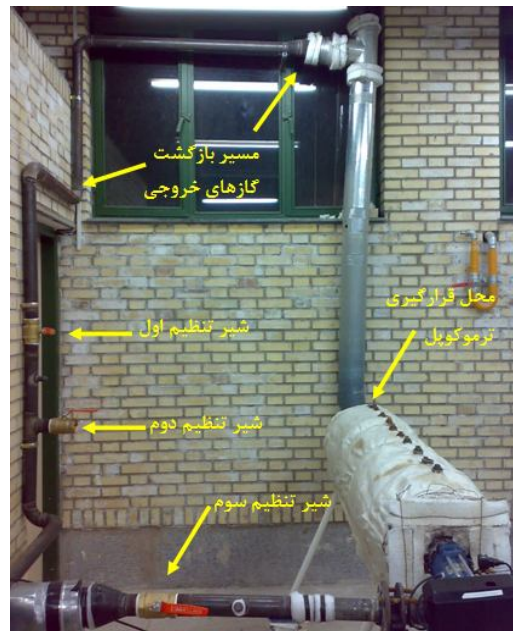
بیودیزل تولیدی	بیودیزل خالص	مشخصات سوخت		
		استاندارد ASTM	واحد	خصوصیت
۰/۹۱۳	۰/۸۹۵	D4052	g.cm <sup>-3</sup>	چگالی
۴/۱	۴/۷۹	D445	Cst	ویسکوزیته در دمای ۴۰ °C
۱	۷	D2500	°C	نقطه ابری شدن
-۶	-۴	D97	°C	نقطه ریزش

### ۳. میزان خطا در داده‌های آزمایشگاهی

در این پژوهش، ابتدا برای هر نقطه، سه داده آزمایشگاهی جمع‌آوری، و سپس میانگین حسابی داده‌ها محاسبه و به عنوان داده نهایی آزمایشگاهی

۱. از طیف IR یک جسم می‌توان گروه‌های مختلف موجود در آن را به دست آورد. همچنین برای اثبات یکسان بودن دو جسم از طیف IR استفاده می‌شود.

هوای ورودی به مشعل استفاده شده است. همچنین برای اندازه‌گیری دبی هوا و محصولات احتراق بازگردانده شده، بر روی شیرهای تنظیم دوم و سوم، سرعت‌سنج‌های دیجیتالی پروانه‌ای نصب گردیده است. فن مکنده، که از نوع ساتریفورژ است، با مکش هوا و گازهای خروجی از دودکش، دبی مورد نظر جهت ورود به مشعل و ترکیب با سوخت را تأمین می‌کند. در شکل (۲)، کوره آزمایشگاهی و مسیر بازگشت گازهای خروجی نشان داده شده است.



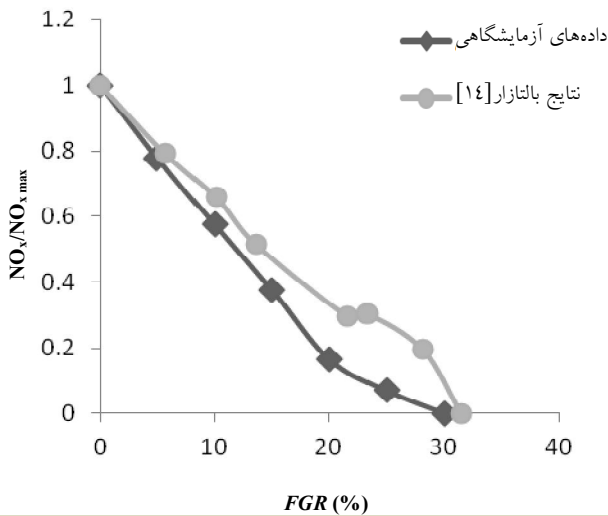
شکل (۲): کوره آزمایشگاهی و مسیر بازگشت گازهای خروجی

در منابع مختلف به منظور تعیین درصد FRG فرمول‌های مختلفی ارائه گردیده که در این پروژه، فرمول (۲) انتخاب شده است [۱۴]:

$$FGR = \frac{M_{air \text{ without } FGR} - M_{air \text{ with } FGR}}{M_{air \text{ without } FGR}} \quad (2)$$

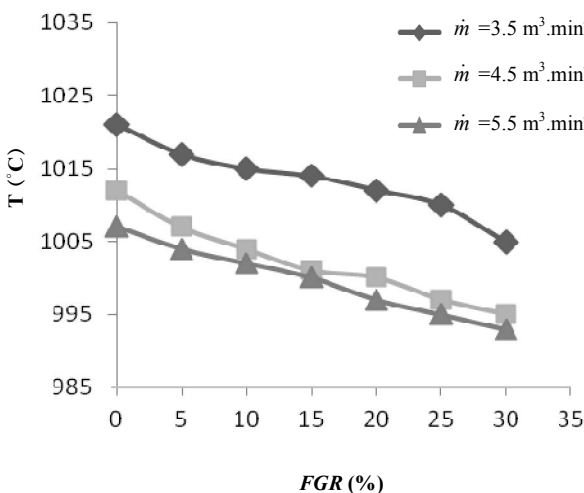
علاوه بر گازوئیل، سوخت بیودیزل نیز تولید و در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. به همین منظور، سوخت بیودیزل با استفاده از روغن مایع آفتابگردان، متانول (به عنوان الکل)، سدیم‌هیدروکسید (به عنوان کاتالیزور) و با استفاد از فرآیند ترانس استریفیکاسیون تولید گردید. محصول فرعی این فرآیند، گلیسرین است که همان‌طور که در شکل (۳) نشان داده شده، در ظرف ته‌نشین شده است. بیودیزل بعد از جداسازی گلیسرین و الکل و سایر ترکیبات دیگر و شستشو با آب مقطر، قابل استفاده می‌باشد.

شرایط کاری مختلف، نوع سوخت، پارامترهای متفاوت دبی سوخت و هوا و مشخصات هندسی کوره می‌باشد.



شکل (۵): مقایسه بین داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر و نتایج آزمایشگاهی بالتازار و همکاران [۱۴]

شکل (۶)، نتایج آزمایشگاهی تأثیر درصدهای مختلف  $FGR$  بر دمای گازهای خروجی کوره، حاصل از احتراق گازوئیل را، برای دبی‌های مختلف مخلوط هوا و گازهای برگشتی نشان می‌دهد.



شکل (۶): تأثیر درصدهای مختلف  $FGR$  بر روی دمای گازهای خروجی در احتراق گازوئیل برای دبی‌های مختلف هوا و گازهای برگشتی

با توجه به شکل (۶) مشاهده می‌شود که دمای محصولات احتراق با افزایش درصد  $FGR$  کاهش می‌یابد. هم‌زمان با افزایش میزان گازهای برگشتی، دما و گرمای ویژه مخلوط هوا و محصولات بازگردانده شده افزایش می‌یابد و در نتیجه تأثیر این دو عامل، دمای محصولات احتراق کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، از آنجا که محصولات احتراق بازگردانده شده قبل از ترکیب با هوا خنک‌کاری نشده‌اند، سبب پیش‌گرمایش هوا

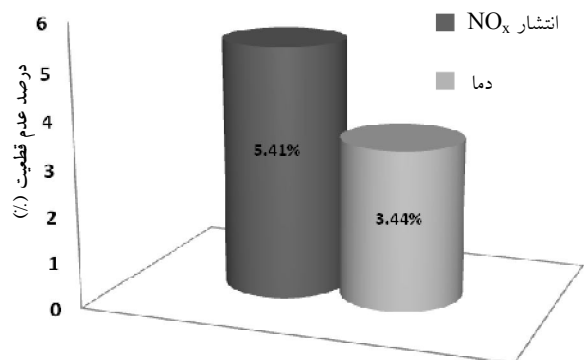
استفاده شده است. مقدار خطای احتمالی یا عدم قطعیت داده‌ها از فرمول (۳) محاسبه شده است [۱۹]:

$$\sigma_m = \sigma / n^{0.5} \quad (3)$$

در این فرمول،  $\sigma_m$  انحراف معیار مقدار میانگین و  $\sigma$  انحراف معیار مجموعه اندازه‌گیری‌ها و  $n$  تعداد اندازه‌گیری‌ها در هر نقطه است. مقدار درصد عدم قطعیت  $(x)$  داده‌های آزمایشگاهی از فرمول (۴) محاسبه شده است:

$$x = 100\sigma_m / \bar{x} \quad (4)$$

که در آن،  $\bar{x}$  مقدار میانگین حسابی داده‌های آزمایشگاهی است. عدم قطعیت داده‌های به دست آمده (در حالت ۱۵ درصد  $FGR$  و دبی ورودی  $5/5 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$ ) در شکل (۴) نشان داده شده است.

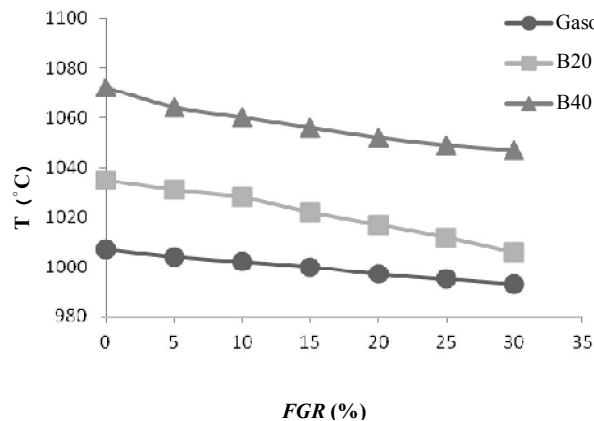


شکل (۴): درصد عدم قطعیت داده‌های آزمایشگاهی

## ۴. نتایج

در آزمایش‌های انجام شده، دمای سوخت و هوای ورودی بسته به میزان گازهای برگشتی، از ۳۰۰ تا ۳۵۰ درجه کلوین متغیر است. آزمایش‌ها در درصدهای مختلف  $FGR$ ، از صفر تا ۳۰ درصد و فشار هوای ۱ اتمسفر صورت گرفته است و برای سوخت‌های گازوئیل و بیودیزل و دبی‌های هوای ورودی  $3/5 \text{ m}^3.\text{min}^{-1}$ ،  $4/5$  و  $5/5$  تکرار شده و تأثیر آن بر احتراق بررسی گردیده است. به منظور اطمینان از صحت داده‌ها و نتایج به دست آمده، داده‌های آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده حاصل از احتراق گازوئیل با نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱۴] مقایسه شده است. هرچند شرایط کاری آزمایش و پارامترهای مختلف مانند دبی سوخت و هوا، در این پژوهش و مرجع فوق کاملاً مشابه نیستند، اما روند کیفی تغییر داده‌های آزمایشگاهی مشابه یکدیگرند. در شکل (۵)، تغییرات نسبت  $NO_x/NO_{x,max}$  حاصل از نتایج بالتازار و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده در این پژوهش، در نسبت هم‌ارزی ۱/۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، روند کیفی تغییرات به‌خصوص در نقاط ابتدایی کاملاً یکسان است و اختلاف مقادیر اندازه‌گیری شده به واسطه

یکی از اصلی‌ترین تفاوت‌های بیودیزل با سایر سوخت‌های فسیلی در میزان اکسیژن موجود در آن است. برخلاف گازوئیل که در محتوای آن اکسیژن موجود نیست، بیودیزل حاوی ۱۰ تا ۱۲ درصد وزنی اکسیژن است. شکل (۸)، نتایج آزمایشگاهی تأثیر استفاده از سوخت بیودیزل بر روی دمای گازهای خروجی را برای درصد‌های مختلف *FRG* و در دبی ثابت  $5/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  نشان می‌دهد.



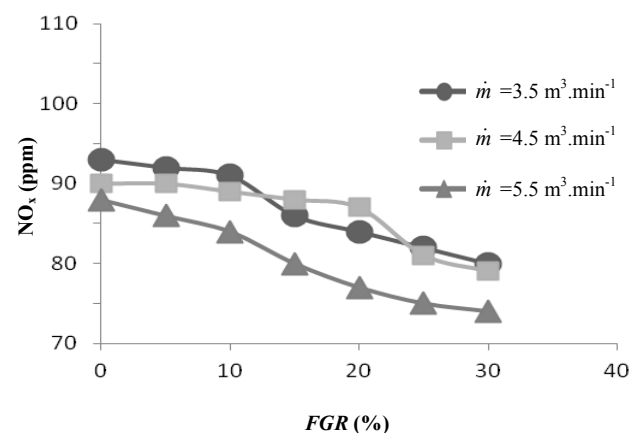
شکل (۸): نتایج آزمایشگاهی تأثیر استفاده از بیودیزل بر دمای گازهای خروجی در دبی ثابت  $5/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

با توجه به شکل (۸) دیده می‌شود که در درصد *FRG* ثابت، با افزایش درصد حجمی سوخت بیودیزل از ۰ تا ۴۰ درصد، دمای گازهای حاصل از احتراق افزایش می‌یابد. زنجیره طویل هیدروکربنی بیودیزل و وجود اکسیژن در مخلوط سوختی منجر به بهبود احتراق، افزایش راندمان حرارتی و در نتیجه افزایش دما می‌شود. همچنین باید توجه داشت که نقطه اشتعال بیودیزل نسبت به گازوئیل بالاتر است و در نتیجه سبب افزایش دمای گازهای خروجی می‌گردد. از طرف دیگر، ملاحظه می‌شود که با افزایش میزان گازهای برگشتی و درصد *FRG*، تغییرات دمای گازهای خروجی روند نزولی دارد. ماکزیمم دمای گازهای خروجی حاصل از احتراق گازوئیل  $1007^\circ\text{C}$  می‌باشد و در احتراق بیودیزل B20 و B40 به  $1035^\circ\text{C}$  و  $1072^\circ\text{C}$  رسیده است که به ترتیب حدود ۳ و ۶ درصد افزایش یافته است.

تأثیر استفاده از سوخت بیودیزل بر تولید آلاینده  $\text{NO}_x$  در درصد‌های مختلف *FRG* و در دبی ثابت  $5/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  در شکل (۹) نشان داده شده است. نیتروژن یک گاز بی‌اثر است و تا دمای  $1100^\circ\text{C}$  بدون واکنش باقی می‌ماند، ولی در دماهای بالاتر وارد واکنش شیمیایی با اکسیژن موجود در محفظه می‌شود و تشکیل اکسیدهای ازت می‌دهد. از طرفی، مکانیزم غالب در تولید آلاینده  $\text{NO}_x$  به‌ویژه در دماهای بالا، مکانیزم حرارتی زلدوویچ است [۱۸]. دمای بالاتر احتراق بیودیزل نسبت به گازوئیل و حضور اکسیژن در سوخت بیودیزل از مهم‌ترین دلایل

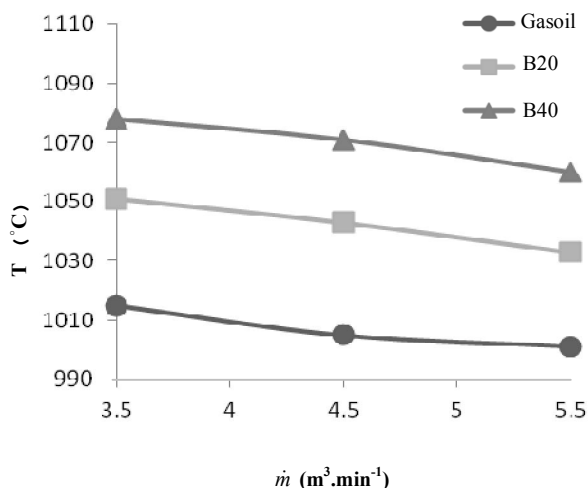
نیز می‌شوند و از کاهش زیاد دما جلوگیری می‌کنند. مشاهده می‌شود که دمای ماکزیمم در دبی  $3/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  برابر با  $1021^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد است که با ۳۰ درصد *FRG* به  $1005^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. به طور مشابه، برای دبی‌های ورودی  $4/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  و  $5/5$  این میزان از  $1012^\circ\text{C}$  و  $1007^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد در حالت بدون *FRG* به  $995^\circ\text{C}$  و  $993^\circ\text{C}$  درجه سانتی‌گراد در حالت ۳۰ درصد *FRG* کاهش یافته است؛ هرچند این کاهش دما خیلی زیاد نیست.

در شکل (۷)، نتایج آزمایشگاهی تأثیر درصد‌های مختلف *FRG* بر انتشار  $\text{NO}_x$  در گازهای خروجی از کوره، حاصل از احتراق گازوئیل برای دبی‌های هوای ورودی مختلف نشان داده شده است. نتایج شکل (۷) نشان می‌دهد که با افزایش میزان دبی هوای ورودی، میزان انتشار  $\text{NO}_x$  کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش درصد *FRG* نیز، انتشار  $\text{NO}_x$  کاهش می‌یابد. این کاهش غلظت به دو دلیل روی می‌دهد: اول اینکه با افزایش درصد *FRG* غلظت اکسیژن ورودی کاهش می‌یابد؛ این عامل باعث می‌شود میزان این گونه کاهش یافته و ضمن تأثیر بر سینتیک بنیادی واکنش تولید  $\text{NO}_x$ ، نرخ تولید آن را نیز کاهش می‌دهد. علاوه بر این، از آنجا که واکنش تشکیل  $\text{NO}_x$  به شدت به دمای احتراق وابسته است و با افزایش میزان گازهای خروجی برگشتی، ماکزیمم دمای شعله کاهش می‌یابد، انتشار این آلاینده نیز کاهش می‌یابد. با توجه به شکل (۷) دیده می‌شود که در دبی ورودی  $3/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  غلظت انتشار  $\text{NO}_x$  در حالت بدون *FRG* از  $93 \text{ ppm}$  به  $80 \text{ ppm}$  در حالت ۳۰ درصد *FRG* کاهش (حدود ۱۴ درصد) یافته است. همچنین در دبی‌های ورودی  $4/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  و  $5/5$  نیز با افزایش درصد *FRG* از صفر تا ۳۰ درصد در دبی به ترتیب،  $12/22$  درصد و  $15/9$  درصد کاهش انتشار  $\text{NO}_x$  ملاحظه می‌گردد.



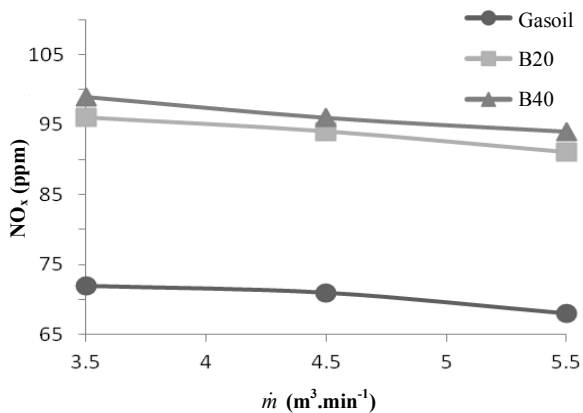
شکل (۷): تأثیر درصد‌های مختلف *FRG* بر انتشار  $\text{NO}_x$  در احتراق گازوئیل برای دبی‌های ورودی مختلف

نزدیکی خروجی کوره، حدود ۲ درصد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، ملاحظه می‌گردد در همه دبی‌های ورودی، افزایش میزان بیودیزل در سوخت از صفر تا ۴۰ درصد سبب افزایش دمای داخل کوره می‌شود.



شکل (۱۰): نتایج آزمایشگاهی تأثیر تغییر دبی مخلوط هوا و گازهای خروجی بر دمای محفظه احتراق در ۱۰ درصد FGR

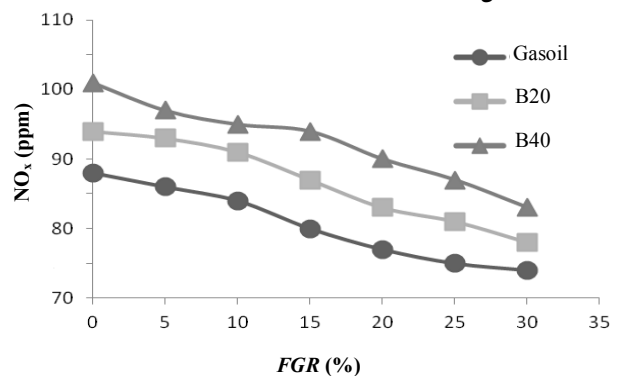
در شکل (۱۱)، تغییرات انتشار  $NO_x$  بر اثر افزایش دبی مخلوط هوا و گازهای خروجی در ۱۰ درصد FGR نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش دبی ورودی، میزان انتشار  $NO_x$  کاهش یافته است.



شکل (۱۱): نتایج آزمایشگاهی تأثیر تغییر دبی مخلوط هوا و گازهای خروجی بر تشکیل آلاینده  $NO_x$  در ۱۰ درصد FGR

واکنش تشکیل  $NO_x$  به دما به شدت وابسته است. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شد با افزایش دبی ورودی، دمای محفظه احتراق کاهش می‌یابد و در نتیجه، میزان تولید  $NO_x$  روند نزولی پیدا می‌کند. با توجه به شکل (۱۱) مشاهده می‌شود که افزایش دبی ورودی از  $3/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  به  $5/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  سبب کاهش انتشار  $NO_x$  برای سوخت‌های گازوئیل به میزان ۵/۵ درصد و برای سوخت‌های B20 و B40 حدود ۵ درصد می‌گردد. از طرف دیگر، با اضافه شدن میزان

افزایش  $NO_x$  در هنگام استفاده از سوخت بیودیزل می‌باشند. عدد ستان بیودیزل نیز بیشتر از گازوئیل است، لذا انتظار می‌رود که احتراق بهبود یابد و انتشار آلاینده  $NO_x$  نیز کاهش یابد، ولی با توجه به شکل (۹) ملاحظه می‌گردد که انتشار آلاینده  $NO_x$  افزایش می‌یابد، زیرا خواص ترموفیزیکی بیودیزل مانند چگالی که بر روی خواص سوخت تأثیرگذار است، موجب افزایش انتشار این آلاینده می‌شود. مقدار ماکزیمم آلاینده  $NO_x$  در حالت بدون FGR در احتراق گازوئیل ۸۸ ppm می‌باشد که در احتراق بیودیزل B20 این مقدار به ۹۴ ppm و در احتراق بیودیزل B40 به ۱۰۱ ppm رسیده است. همچنین نتایج شکل (۹) نشان می‌دهد که با افزایش درصد FGR از صفر تا ۳۰ درصد، میزان انتشار  $NO_x$  حاصل از احتراق گازوئیل، B20 و B40 به ترتیب حدود ۱۶، ۱۷ و ۱۸ درصد کاهش یافته است.



شکل (۹): نتایج آزمایشگاهی تأثیر استفاده از بیودیزل بر انتشار  $NO_x$  در دبی ثابت  $5/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$

در ادامه، تأثیر تغییر دبی مخلوط هوا و گازهای برگشتی بر محصولات احتراق بیودیزل و گازوئیل بررسی می‌شود. شکل (۱۰)، نتایج آزمایشگاهی تأثیر افزایش دبی مخلوط هوا و گازهای برگشتی بر دمای محفظه احتراق در فاصله ۳۰ cm از انتهای کوره حاصل از احتراق گازوئیل، B20 و B40 در ۱۰ درصد FGR را نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰)، با افزایش دبی ورودی و در نتیجه، افزایش هوای اضافی دما کاهش می‌یابد. میزان هوای اضافی در دبی  $3/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  برابر ۲۹ درصد، در دبی  $4/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  برابر ۳۷ درصد و در دبی  $5/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  برابر ۴۶ درصد است. در این شرایط، هوای اضافی مانند یک چاه حرارتی عمل می‌کند و دمای گازهای حاصل از احتراق را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، افزایش نسبت هوای اضافی، ازدیاد سرعت گازهای احتراق را به همراه دارد که این امر، زمان ماند گازها در محفظه احتراق برای انجام احتراق کامل را کاهش می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰) مشاهده می‌شود که با افزایش دبی ورودی از  $3/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  تا  $5/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  برای سوخت‌های گازوئیل، B20 و B40 دمای گازها در

دبی‌های ورودی، با افزایش درصد *FRG* از صفر تا ۳۰ درصد، دمای محفظه احتراق به طور متوسط ۲۰ درجه و میزان انتشار آلاینده  $NO_x$  حدود ۱۷ درصد کاهش می‌یابد. از طرف دیگر، در حالت بدون *FRG* و دبی  $5/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ ، با افزایش درصد حجمی بیودیزل خالص از ۰ تا ۴۰ درصد در مخلوط سوخت، دمای گازهای حاصل از احتراق برای *B20* و *B40* به ترتیب، ۲۸ و ۶۵ درجه افزایش می‌یابد. در این حالت، انتشار آلاینده  $NO_x$  نیز با افزوده شدن بیودیزل به گازوئیل، برای *B20* و *B40* به ترتیب، ۷ و ۱۵ درصد افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با افزایش دبی مخلوط گازهای برگشتی و هوا، دمای گازهای خروجی و انتشار آلاینده  $NO_x$  کاهش می‌یابد.

بیودیزل به گازوئیل از صفر تا ۴۰ درصد، میزان انتشار  $NO_x$  افزایش می‌یابد؛ برای مثال، در دبی ورودی  $3/5 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$  با استفاده از سوخت *B20* و *B40* به ترتیب، حدود ۳۳ و ۳۷ درصد افزایش انتشار آلاینده  $NO_x$  ملاحظه می‌گردد.

## ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نتایج آزمایشگاهی دما و آلاینده  $NO_x$  حاصل از احتراق مخلوط سوخت مایع بیودیزل و گازوئیل در یک کوره با مشخصات هندسی طول ۱/۸ m و قطر ۰/۳۲ m مورد بررسی قرار گرفت. همچنین اثر تغییر درصد *FRG* و تغییر دبی مخلوط هوا و گازهای برگشتی بر دما و تولید آلاینده  $NO_x$  حاصل از احتراق مورد تجزیه و تحلیل واقع شده‌اند. ملاحظه گردید که در احتراق بیودیزل و گازوئیل، در همه

## مراجع

- [1] Demirbas, A., "Biofuels Securing the Plant's Future Energy Needs", Journal of Green Energy and Technology, pp. 156-223, 2009.
- [2] Demirbas, A., "Biodiesel: A Realistic Fuel Alternative for Diesel Engines", Springer, London, pp. 70-93, 2008.
- [۳] مرتضوی، س. م.، هاشمی، ز.، فن‌آوری هسته‌ای و نقش آن در ایجاد بستر مناسب برای توسعه پایدار، انتشارات علمی و فرهنگی. صفحه ۸۸، ۱۳۸۵.
- [4] Karaosmanoglu, F., Aksoy, H.A., "The Phase Separation Problem of Gasoline-Ethanol Mixture as Motor Fuel Alternatives", Journal of Thermal Sci Technol., Vol. 11, pp. 49-52, 1988.
- [5] Kemp, D., "National Standards for Biodiesel-Discussion Paper", Department of the Environment and Heritage, pp. 12-103, 2003.
- [۶] زنوزی، ع.، قبادیان، ب.، «مقایسه بیودیزل تولیدی به عنوان انرژی تجدیدپذیر از چهار روغن خوراکی»، ششمین همایش ملی انرژی، تهران، ۱۳۸۶.
- [7] Keskin, A., "Biodiesel Production from Free Fatty Acids Obtained with Neutralization of the Crude Glycerin", International Journal of Energy Sources, Vol. 27, pp. 17-24, 2005.
- [8] Haagen-Smith, A. J., "Chemistry and Physiology of Los Angeles Smog", Industrial Engineering Chemistry, Vol. 44, pp. 1342-1346, 1952.
- [9] Bowman, C. T., "Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulations", Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, PA, pp. 859-879, 1992.
- [10] Jon, V. G., "Biodiesel Processing and Production", Fuel Processing Technology, Vol. 86, pp. 1097-1107, 2005.
- [11] Hernando J et al, "Biodiesel and FAME Synthesis Assisted by Microwaves: Homogeneous Batch and Flow Processes", Fuel, Vol. 86, pp. 1641-1644, 2007.
- [12] Houfang, L., Yingying, L., Hui, Z., Ying, Y., Mingyan, Ch., Bin, L., "Production of Biodiesel from Jatropha Curcas Oil", Computers and Chemical Engineering, Vol. 33, pp. 1091-1096, 2009.
- [13] Chisti, Y., "Biodiesel from Microalgae", In Biothechnology Advances, Vol. 25, pp. 294-307, 2007.
- [14] Baltasar, J., Carvalho, M.G., Coelho, P., "Flue Gas Recirculation in a Gas-Fired Laboratory Furnace: Measurements and Modeling", Fuel, Vol. 76, pp. 919-929, 1997.
- [15] Webster, T., "Burner Technology for Single Digit  $NO_x$  Emissions in Boiler Applications", CIBO  $NO_x$  Control XIV Conference, 2001.
- [16] Matsumoto, R., Ozawa, M., Terada, S., Lio, T., "Low  $No_x$  combustion of DME by means of Flue Gas Recirculation", Fuel, Vol. 85, pp. 112-120, 2006.
- [17] Ying, W., Longbao, Z., "Experimental Study on Exhaust Emissions from a Multi-Cylinder DME Engine Operating with EGR and Oxidation Catalyst", Journal of Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 1589-1595, 2008.
- [18] Roy, M.M., Najmul Hoque, S.M., "Use of Exhaust Gas Recirculation (EGR) and Cyclonic Separator for Simultaneous  $NO_x$  and PM Reduction in DI Diesel Engines", Journal of Petroleum and Gas Engineering, Vol. 23, pp. 54-63, 2011.
- [۱۹] ملکی، م.، دیبایی‌نیا، ب.، روش‌های اندازه‌گیری در مهندسی، انتشارات جهاد دانشگاهی، چاپ اول، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۶۹.