

انژکتورهای پیزوالکتریک در خودرو

حمید محمودخانی^۱، مسعود دهمرده^۲ و*

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

*مسئول مکاتبات: mdahmardeh@iust.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

انژکتور پیزوالکتریک
مواد هوشمند
عملگر پیزوالکتریک
کاهش آلایندگی

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۴/۲۷
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

انژکتورهای پیزوالکتریک به عنوان جایگزینی برای انژکتورهای سلونوئیدی شناخته می‌شوند. این انژکتورها به سبب وجود ماده پیزوالکتریک در عملگر آنها و خواص منحصربه‌فرد این دسته از مواد، دارای ویژگی‌هایی هستند که این انژکتورها را از بقیه نمونه‌های موجود متمایز می‌سازد. سرعت عمل بالاتر، اتمیزه شدن بیشتر سوخت و همچنین استفاده از تکنولوژی سیستم‌های ریل مشترک باعث شده که این دسته از انژکتورها جایگاه ویژه‌ای در موتورهای دیزل داشته باشند. همچنین با استفاده از این نوع انژکتور میزان آلایندگی گازهای خروجی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد که ناشی از پودر شدن بهتر سوخت به علت بالا رفتن فشار در سیستم تزریق سوخت تا ۲۰۰۰ bar و همچنین داشتن کنترل کامل بر روی فرآیند تزریق می‌باشد. در این نوع از انژکتورها می‌توان تعداد دفعات پاشش سوخت را در طی یک سیکل احتراقی تا پنج مرتبه افزایش داد. با این کار به علت پاشش‌های چندباره، تورک خروجی موتور افزایش می‌یابد، همچنین به علت احتراق یکنواخت‌تر و جلوگیری از انفجار یک دفعه‌ای میزان ضربه در موتور کاهش می‌یابد.

۱ مقدمه

و تزریق سوخت کاملاً روشن می‌باشد. با توجه به اینکه امروزه فرآیند تزریق سوخت در اکثر قریب به اتفاق خودروها توسط انژکتورها که وسیله‌ای برای پاشش سوخت به درون محفظه احتراق یا پشت سوپاپ ورودی می‌باشند، اتفاق می‌افتد؛ از این رو انواع تکنولوژی‌های مربوط به انژکتورها در حال توسعه می‌باشند.

یکی از آخرین تکنولوژی‌های مربوط به انژکتورها، انژکتورهای پیزوالکتریک می‌باشد. این دسته از انژکتورها برخلاف انژکتورهای متداول که از سیم‌پیچ‌های مغناطیسی برای باز و بسته کردن سوزن انژکتور استفاده می‌کنند، از عملگر^۲ پیزوالکتریک برای این منظور استفاده کرده‌اند. تعدادی از کمپانی‌هایی که هم اکنون از انژکتورهای پیزوالکتریک در محصولات تولیدی خود استفاده می‌کنند شامل کمپانی‌های فورد، دوج، جنرال موتورز، تویاتا، هوندا-نيسان، بی ام دبلیو، مرسدس بنز و فولکس واگن می‌باشد. همچنین تعدادی از شرکت‌هایی که این دسته از انژکتورها را تولید می‌کنند شامل بوش، زیمنس و دنسو می‌باشد. مطابق با اطلاعات ارائه شده توسط شرکت بوش، در سال ۲۰۱۴ در آمریکای شمالی تعداد ۶/۴ میلیون وسیله نقلیه از این نوع از انژکتورها استفاده کرده‌اند [۲].

بر اساس آمارها در سال ۲۰۱۰ در حدود یک میلیارد و پانزده میلیون وسیله نقلیه موتوری در تمام دنیا موجود بوده است [۱]. علیرغم وجود خودروهای هیبریدی یا تمام الکتریکی یا حتی پیل سوختی، هنوز موتور احتراقی جایگاه اصلی و ویژه خود را در سبد محصولات خودروسازان حفظ کرده است و با توجه به اینکه این حجم انبوه از خودروها در سراسر دنیا باعث به وجود آمدن مشکلات جانبی فراوانی برای محیط زیست و آب و هوا و در نتیجه صرف بودجه فراوانی برای دولت‌ها به جهت کنترل شرایط جوی و آلودگی می‌شوند؛ از این رو کنترل فرآیند احتراق در موتورهای احتراق داخلی امری اجتناب‌ناپذیر و حیاتی شده است.

این کنترل از چندین جهت حائز اهمیت می‌باشد. اول اینکه، هدف اصلی درموتور و سیستم محرکه^۱، بهره‌وری حداکثری از توان و انرژی موجود در سوخت می‌باشد که این امر با کنترل فرآیند احتراق و تکنولوژی‌های متعدد مربوط به تزریق سوخت و ... امکان‌پذیر شده است. از جهت دیگر، تمامی آلایندگی خودروهای احتراق داخلی به سبب فرآیند احتراق و سوختن سوخت آنها می‌باشد که برای کنترل این امر، انواع استانداردهای آلایندگی اعم از استاندارد آلایندگی اتحادیه اروپا (Euro) و ... تدوین شده‌اند که هدف نهایی از این استانداردها، کنترل خروجی‌های ناشی از احتراق در موتورها از جمله مونواکسید کربن، NO_x ، soot و ... می‌باشد.

بنابراین با توجه به دلایل ذکر شده، اهمیت ویژه فرآیندهای سوخت‌رسانی

۲ سیستم سوخت‌رسانی کاربراتور

در دهه ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ در ایالات متحده و ژاپن، دولت‌های مربوطه قوانین سخت‌گیرانه‌ای درباره گازهای آلایندگی خروجی از اتومبیل‌ها اتخاذ کردند. در

¹power-train system ²actuator

۲.۳ مزایا و معایب سیستم‌های انژکتوری

خصوصیات و ویژگی‌های سیستم‌های انژکتوری سبب شده است آنها با سرعت بالایی جایگزین سیستم‌های کاربراتور شوند در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: معایب و مزایای سیستم‌های انژکتوری

مزایا	معایب
<ul style="list-style-type: none"> عملکرد نرم‌تر و روان‌تر پاسخ سریع‌تر به تغییر وضعیت دریچه گاز استارت سرد راحت‌تر (عدم نیاز به گرمکن) کاهش نیاز به تعمیرات بازده مصرف سوخت بهتر توزیع یکنواخت سوخت بین سیلندرها کاهش خام‌سوزی و تولید گازهای خطرناک کمتر راندمان حجمی بالاتر به علت حذف ونتوری کاهش ارتفاع موتور اندازه‌گیری دقیق میزان سوخت تزریق شده دور آرام پایدارتر^۶ 	<ul style="list-style-type: none"> وجود قطعات حساس و دقیق نیازمند تخصص بالاتر در تولید و تعمیر قطعات در مواردی باعث پیچیده‌تر شدن سیستم سوخت‌رسانی

آن دوره، اکثر اتومبیل‌های بنزینی و کامیون‌های سبک از موتورهای با سیستم سوخت‌رسانی کاربراتوری استفاده می‌کردند.

برای برآورده کردن مقررات جدید، تولیدکنندگان اتومبیل اغلب بهینه‌سازی‌های گسترده و پیچیده‌ای را روی موتورهای کاربراتوری انجام می‌دادند، که این امر سبب شده بود هزینه نهایی این سیستم‌ها بسیار بالاتر از نمونه‌های اولیه شود.

سیستم‌های تزریق سوخت چرخه باز^۳، توزیع سیلندر به سیلندر سوخت و محدوده گسترده کارکرد دمایی موتور را بهبود داده بودند اما دامنه وسیعی از نسبت مخلوط سوخت به هوا را به جهت کاهش میزان گازهای آلاینده خروجی، ارائه نمی‌دادند.

سال‌ها بعد، سیستم‌های تزریق سوخت چرخه بسته^۴، با استفاده از سنسور اکسیژن در مسیر گازهای خروجی، کنترل مخلوط سوخت و هوا را بهبود دادند. اگرچه یک مبدل کاتالیزوری، بخشی از سیستم کنترل تزریق سوخت نمی‌باشد اما استفاده از آن میزان گازهای آلاینده خروجی را به میزان قابل توجهی کاهش داد.

در کشورهای در حال توسعه، کاربراتورها همچنان در چرخه مصرف باقی ماندند زیرا که در این کشورها قوانین مربوط به آلاینده‌های خودروها و همچنین زیرساخت‌های تشخیص و تعمیرات وجود نداشت. البته تعداد زیادی موتورسیکلت همچنان از موتورهای کاربراتوری استفاده می‌کنند در حالی که تمامی نمونه‌های موجود با عملکرد بالا و درخشان از تزریق سوخت الکترونیکی استفاده می‌کنند.

۳.۳ اجزای سیستم تزریق سوخت الکترونیکی

- **واحد کنترل موتور (ECU):** واحد کنترل موتور، هسته اصلی سیستم تزریق سوخت الکترونیکی است. ECU، اطلاعات را از سنسورهای مختلف جمع‌آوری می‌کند و با پردازش آنها، مقدار سوخت مورد نیاز به جهت پاشش را اندازه‌گیری می‌کند.
- **انژکتورها:** وقتی سیگنالی از طرف ECU صادر می‌شود، انژکتور فعال شده و سوزن آن باز می‌شود و سوخت تحت فشار به درون محفظه موتور پاشیده می‌شود. مدت زمانی که انژکتور باز است (که معمولاً به عنوان پهنای پالس شناخته می‌شود) بیانگر مقدار سوختی است که به موتور تحویل می‌شود.
- **ریل سوخت:** وظیفه سوخت‌رسانی و تقسیم آن بین سیلندرها را بر عهده دارد.
- **پمپ سوخت:** مقدار فشار سوخت را در درون ریل افزایش می‌دهد تا اتمیزه شدن مولکول‌های سوخت به نحو بهتر و بیشتر انجام شود. که نتیجه آن بالا رفتن راندمان احتراق موتور است.
- **رگولاتور فشار سوخت:** تنظیم میزان فشار سوخت در درون ریل به مقدار مشخص.
- **دسته‌های سیم‌کشی**
- **سنسورهای مختلف:** از جمله سنسور وضعیت میل لنگ یا سنسور وضعیت میل بادامک، سنسور میزان جرم جریان هوا یا Map سنسور، سنسور اکسیژن.

۳ سیستم سوخت‌رسانی انژکتوری

۱.۳ اهداف

اهداف کاربردی برای سیستم‌های تزریق می‌تواند متفاوت باشد اما وظیفه مشترک و اصلی در تمامی آنها تأمین سوخت مورد نیاز برای احتراق می‌باشد. اما تصمیم‌گیری درباره بهینه‌سازی سیستم می‌تواند شامل اهداف زیر باشد:

- بهبود توان خروجی
- بهبود بازده مصرف سوخت
- بهبود عملکرد آلاینده‌ها
- عمل کردن تحت سوخت‌های متفاوت^۵
- قابلیت اعتماد بالاتر
- عملکرد نرم و روان‌تر
- هزینه اولیه پایین‌تر
- هزینه تعمیر و نگهداری کمتر
- تیونینگ موتور
- تزریق چند باره سوخت در محفظه در طی یک سیکل احتراقی
- کنترل میزان پاشش سوخت
- کنترل شرایط کارکردی موتور در نقاط بهینه خود

³open-loop fuel injection systems

⁴closed-loop fuel injection systems

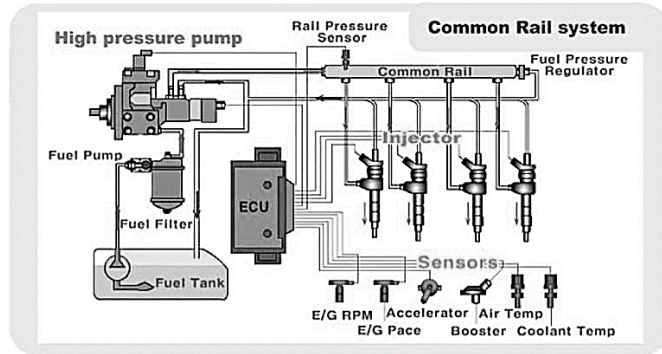
⁵running on alternative fuels

⁶more stable idling

۴.۳ تزریق سوخت مستقیم (GDI)

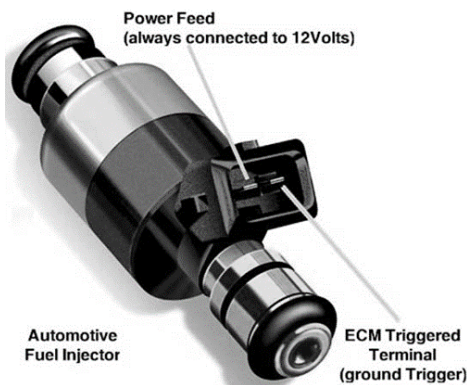
و پاشش ثانویه برای کاهش الاینده‌گی صورت می‌گیرد. سوخت توسط لوله‌های فشاری کوتاهی به انژکتورها می‌رسد و سپس از نازل انژکتور به درون محفظه احتراق پاشیده می‌شود.

فشار پاشش بالاتر، بخار شدن بهتر سوخت توسط سیستم پاشش را سبب می‌شود که نتیجه آن بالا رفتن راندمان احتراق می‌باشد. در شکل ۲ اجزای این سیستم ریل مشترک نشان داده شده است.



شکل ۲: اجزای یک سیستم تزریق سوخت انژکتوری با تکنولوژی ریل مشترک و نحوه کارکرد آن

پمپ سوخت با مکش آن از مخزن آنرا وارد فیلتر سوخت و در نهایت وارد پمپ فشار بالا می‌کند، در پمپ فشار بالا فشار سوخت تا ۲۰۰۰ bar افزایش می‌یابد و وارد ریل سوخت می‌شود. در این ریل رگولاتور و سنسور فشار سوخت وجود دارد تا از یکنواختی و همچنین میزان فشار در تمامی نواحی ریل اطمینان حاصل شود. انژکتورها بطور جداگانه به ریل سوخت متصل می‌باشند. تقاضای راننده با پدال گاز مشخص می‌گردد. ECU با توجه به درخواست راننده و وضعیت فعلی خودرو که از سنسورها دریافت می‌کند فرمان پاشش سوخت را از طریق پورت‌های ورودی انژکتور به آن می‌دهد.



شکل ۳: پورت‌های ورودی به انژکتور به جهت فعال‌سازی

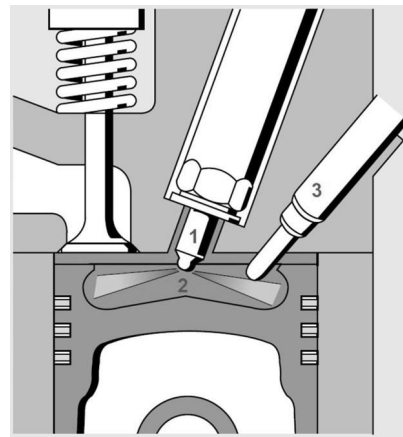
۴ اثر پیزوالکتریک^{۱۳}

۱.۴ معرفی اثر پیزوالکتریک

یکی از ویژگی‌های غیرعادی که برخی سرامیک‌ها از خود بروز می‌دهند، پدیده پیزوالکتریک یا اثر فشاربرقی است. در این مواد با اعمال نیروی

شکل محفظه احتراق در موتور برخی از ویژگی‌های خروجی از موتور را تا حدودی کنترل می‌کند، زیرا می‌تواند برای بهتر مخلوط شدن هوا و سوخت استفاده شود. دو نوع محفظه احتراق وجود دارد: تقسیم‌شده^۸ و تقسیم‌نشده^۹. استفاده از محفظه احتراق تقسیم‌نشده در موتورهای تزریق مستقیم (DI) انتخاب بهتری است، زیرا باعث کاهش مصرف سوخت و میزان سر و صدا در مقایسه با موتورهای تزریق غیرمستقیم است که از محفظه احتراق تقسیم‌شده استفاده می‌کنند.

شکل ۱، طرحی شماتیک از محفظه احتراق جداشده را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، سوخت مستقیماً به داخل محفظه احتراق تزریق می‌شود و با هوا مخلوط می‌شود. این تکنولوژی باعث ایجاد آشفتگی مناسب در هوا^{۱۰} می‌شود و تضمین می‌کند که سوخت به طور مساوی در داخل محفظه احتراق توزیع شود. با این حال، تزریق سوخت با فشار زیاد تا ۲۰۰۰ bar ضروری است [۳].



شکل ۱: تزریق مستقیم سوخت به محفظه احتراق [۳]: ۱: نازل خروجی انژکتور، ۲: رژیم پاشش سوخت با توجه به هندسه محفظه احتراق، ۳: مکان شمع جرقه‌زن در راستای اسپری سوخت

۵.۳ سیستم سوخت‌رسانی ریل مشترک

بوش سیستم ریل مشترک^{۱۱} را برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ در خودروهای سواری به بازار عرضه کرد. محصول سیستم ریل مشترک برای خودروهای تجاری از سال ۱۹۹۹ شروع شد.

در مقایسه با دیگر سیستم‌های انژکتوری، فشار تولیدی و فشار پاشش سوخت، در تکنولوژی ریل مشترک از هم جدا هستند. یک پمپ فشار بالای مستقل، سوخت را به طور پیوسته در ریل سوخت تغذیه می‌کند. در سیستم ریل مشترک به طور دائم و پایداریک فشار هماهنگ با وضعیت‌های مدیریت موتور، در اختیار انژکتور قرار می‌گیرد.

در این روش در مقایسه با سیستم‌های مرسوم تفاوت‌هایی وجود دارد که پاشش‌های متعدد^{۱۲} را در سیکل‌های انجام کار مهیا می‌کند. در این روش، پاشش اولیه برای آرام کار کردن موتور، پاشش اصلی برای ایجاد قدرت ایده‌آل

⁷Gas Direct Injection ⁸divided ⁹undivided ¹⁰good air turbulence ¹¹common-rail system ¹²multiple injection ¹³Piezo-electric effect

Output Input	Strain	Electric charge	Magnetic flux	Temperature	Light
Stress	Elasticity	Piezo-electricity	Magneto-striction		Photo-elasticity
Electric field	Piezo-electricity	Permittivity			Electro-optic effect
Magnetic field	Magneto-striction	Magneto-electric effect	Permeability		Magneto-optic
Heat	Thermal expansion	Pyro-electricity		Specific heat	
Light	Photostriction	Photo-voltaic effect			Refractive index

شکل ۵: اثرات مختلف محرک- پاسخ در مواد [۴]. مواد هوشمند مطابق با سلول‌های غیرقطری هستند.

۲.۴ نحوه ساخت ماده پیزوالکتریک

پایین‌تر از یک دمای مشخص که دمای کوری^{۱۵} نامیده می‌شود، کریستال دوقطبی‌های الکتریکی^{۱۶} را می‌سازد، اما دوقطبی‌ها بصورت تصادفی می‌چرخند و دوقطبی الکتریکی خالص در یک مقیاس ماکروسکوپی، صفر می‌باشد. در طول فرآیند قطبی‌سازی، وقتی که این کریستال در حضور یک میدان الکتریکی قوی، سرد می‌شود، این دوقطبی‌ها تمایل به هم جهت شدن با جهت میدان الکتریکی دارند، که منجر به یک دوقطبی الکتریکی در مقیاس ماکروسکوپی می‌شود.

بعد از خنک‌سازی و برداشتن میدان الکتریکی خارجی، این دوقطبی‌های تشکیل شده نمی‌توانند به حالت اولیه خود بازگردند. آنها در جهت میدانی که در آن قطبی‌سازی شده بودند، باقی می‌مانند و ماده بطور دائم به یک پیزوالکتریک تبدیل می‌شود. با این قابلیت که انرژی مکانیکی را به انرژی الکتریکی تبدیل کند و بالعکس.

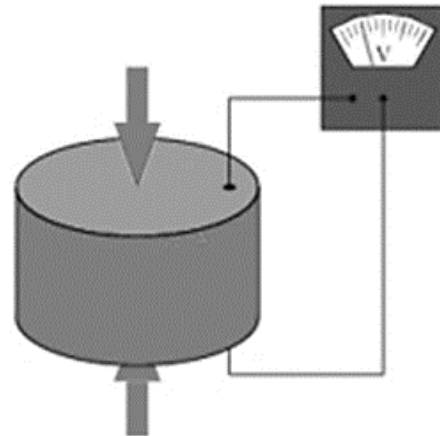
البته اگر دما به بیش از دمای کوری افزایش یابد یا اگر که این مبدل (همان پیزوالکتریک) در یک میدان بیش از حد قوی که جهت آن عکس جهت قطبی‌سازی اولیه باشد قرار گیرد، این خاصیت از بین خواهد رفت [۴].

۳.۴ مشهورترین مواد پیزوالکتریک

بعضی کریستال‌ها همانند کوارتز و نمک پتاسیم^{۱۷} بصورت طبیعی خاصیت پیزوالکتریک را بروز می‌دهند، در حالی که انواع دیگر همانند تیتانات باریم^{۱۸} و تیتانات زیرکونات سرب^{۱۹} که بصورت سرامیک هستند و همچنین PVDF^{۲۰} که یک پلیمر می‌باشد بصورت فروالکتریک هستند. مواد فروالکتریک موادی هستند که پلاریزاسیون خودبه‌خودی را زمانی که تحت یک میدان الکتریکی قرار می‌گیرند، از خود نشان می‌دهند. به بیان دیگر، فروالکتریک‌ها باید برای نشان دادن خاصیت پیزوالکتریک، ابتدا تحت میدان، قطبی‌سازی شوند [۴، ۵].

خارجی، دوقطبی‌های این سرامیک‌ها تحریک می‌شوند و میدان الکتریکی ایجاد می‌شود. وارون کردن اثر نیرو (مثلاً از کششی به فشاری) جهت میدان را معکوس می‌کند. واژه پیزوالکتریک یعنی الکتریسیته ناشی از فشار، که از لغت یونانی پیزو به معنای فشردن و الکترون به معنی کهربا گرفته شده است. از مواد پیزوالکتریک در مبدل‌ها و وسایلی که انرژی الکتریکی را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کنند یا برعکس، استفاده می‌شود. اثر پیزوالکتریک فرآیند برگشت‌پذیر است؛ موادی که به طور مستقیم اثر پیزوالکتریک (تولید داخلی بار الکتریکی به دلیل اعمال نیروی مکانیکی) را انباشته می‌کنند، اثر پیزوالکتریک معکوس (تولید داخلی نیروی مکانیکی در اثر اعمال میدان الکتریکی) را نیز انباشته می‌کنند.

در واقع، اثر پیزوالکتریک توانایی برخی مواد می‌باشد برای تبدیل انرژی مکانیکی به انرژی الکتریکی و بالعکس. این اثر را برادران کوری، پی‌یر و ژاک کوری، در دهه ۱۸۸۰ کشف کردند. اثر پیزوالکتریک در بسیاری از مواد از جمله تک‌بلورها، سرامیک‌ها، بسپارها و مواد مرکب دیده می‌شود. تولید اختلاف پتانسیل الکتریکی در برخی بلورهای نارسانا مثل کوارتز، تحت کشش یا فشار معکوس یکدیگر می‌باشند و هر چه میزان فشار یا کشش بیشتر باشد، اختلاف پتانسیل تولیدشده بیشتر است. اثر پیزوالکتریک معکوس به معنی تغییر شکل آن‌ها بر اثر اعمال اختلاف پتانسیل الکتریکی است. اگر دو وجه روبه‌رویی در هر یک از این بلورها را به اختلاف پتانسیل متناوب الکتریکی وصل کنیم، تغییر شکل متناوبی در آن رخ می‌دهد و به ارتعاش در می‌آیند. شکل ۴ بصورت شماتیک این موضوع را نشان داده است.



شکل ۴: تغییر طول یک ماده پیزوالکتریک در اثر اعمال ولتاژ الکتریکی

مواد پیزوالکتریک متعلق به دسته‌ای از مواد به نام، مواد هوشمند یا مواد چندمنظوره^{۱۴} می‌باشند که قابلیت پاسخ‌دهی قابل توجهی را به عوامل محرک خارجی دارند. شکل ۵، پاسخ مواد گوناگون به ورودی‌های مختلف از جمله: مکانیکی، مغناطیسی، گرمایی و روشنایی را نشان داده است. ارتباط بین زمینه‌های مختلف فیزیکی در باکس‌های غیرقطری در شکل نشان داده شده است [۴].

^{۱۵} دمای کوری (Curie temperature) به دمایی گفته می‌شود که در آن ساختار ماده به سمت تقارن میل می‌کند و ماده خاصیت فروالکتریک خود را از دست می‌دهد.

^{۱۴} multi-functional materials ^{۱۶} electric dipoles ^{۱۷} Rochelle salt ^{۱۸} barium titanate (BaTiO₃) ^{۱۹} lead zirconate titanate (PZT) ^{۲۰} polyvinylidene fluoride (PVDF)

۴.۴ کاربرد مواد پیزوالکتریک

هم‌اکنون، صنایع و کارخانه‌های تولیدی، بزرگ‌ترین بازار مصرف برای پیزوالکتریک‌ها می‌باشند از جمله صنعت اتومبیل‌سازی. همچنین تقاضای بسیار بالایی در ابزار پزشکی و مخبراتی وجود دارد. تقاضای جهانی برای وسایل پیزوالکتریک در سال ۲۰۱۰ در حدود ۱۴/۸ میلیارد دلار تخمین زده شده بود [۶]. بزرگ‌ترین گروه مواد برای وسایل پیزوالکتریک، پیزو کریستال‌ها هستند و در حال حاضر کاربردی از جمله موارد زیر دارند:

- **منابع قدرت و ولتاژ قوی:** اثر پیزوالکتریک مستقیم برخی از مواد مانند کوارتز می‌تواند پتانسیل تولید هزاران ولت را داشته باشد. آشنا ترین کاربرد، فندک های پیزو است که با فشار دادن دکمه باعث ایجاد ولتاژ قوی و در نتیجه احتراق گاز عبوری از محفظه می‌شود. همچنین کاربرد دیگر در این دسته، بازیاب‌های انرژی^{۲۱} می‌باشد که با استفاده از اثر پیزوالکتریک معکوس کار می‌کنند. از این وسایل در پوتین‌های سربازان برای تولید برق مورد نیازشان استفاده شده است.

- **سنسورها:** اصل بهره‌برداری از یک سنسور پیزوالکتریک این است که یک کمیت فیزیکی، به یک نیرو تبدیل می‌شود و بر روی دو صفحه مخالف از عنصر حسگر عمل می‌کند. با توجه به نوع طراحی سنسور، حالات مختلف بارگذاری المان پیزوالکتریک می‌تواند استفاده شود، یعنی: طولی، مقطعی و برشی. این سنسورها می‌توانند در هر دو حالت سنسور و عملگر استفاده شوند و اغلب وسایل پیزوالکتریک دارای این ویژگی بازگشت‌پذیری هستند که می‌تواند از آن مورد استفاده قرار گیرد یا خیر. به عنوان مثال، مبدل‌های اولتراسونیک، می‌توانند امواج اولتراسونیک یا فراصوت را به بدن انسان تزریق کنند و موج بازگشتی را دریافت کنند و آن را به سیگنال الکتریکی (ولتاژ) تبدیل کنند. اغلب مبدل‌های اولتراسونیک در پزشکی، از مواد پیزوالکتریک هستند.

- **عملگرها:** از آنجایی که با میدان‌های الکتریکی بسیار بزرگ فقط تغییرات بسیار کوچک در عرض کریستال ایجاد می‌شود و همچنین دامنه تغییرات این پهنا با دقتی در حد میکرومتر می‌باشد، این دقت بالا، کریستال‌های پیزوالکتریک را مهم‌ترین ابزار برای قرار دادن در اشیا با دقت بسیار بالا ساخته است. در نتیجه باعث استفاده از آنها در عملگرها شده است.

این سرامیک‌ها در دو نوع از عملگرها استفاده می‌شود:

۱. عملگرها با استفاده از اثر مستقیم پیزوالکتریک^{۲۲}

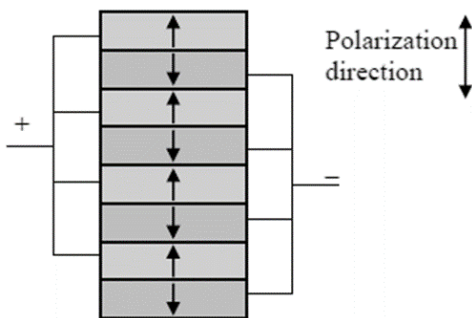
۲. عملگرها با استفاده از اثر پیزوالکتریک تقویت‌شده^{۲۳}

درحالی که عملگرهای مستقیم، تغییر طولی در حدود کمتر از ۱۰۰ میکرومتر دارند، عملگرهای پیروی تقویت‌شده می‌توانند به تغییر طول‌های میلی متری هم برسند. تعدادی از مواردی که در آنها از عملگرهای پیزوالکتریک استفاده شده است شامل بلندگوها، موتورهای پیزوالکتریک، پریترهای جوهرافشان و انژکتورهای پیزوالکتریک می‌باشد.

۵.۴ عملگرهای پیزوالکتریک با ساختار چندلایه

یک دسته از عملگر پیزوالکتریک، عملگری است که از تعدادی N دیسک سرامیکی همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده، ساخته شده است که در آن هر دیسک دارای جهت پلاریزهای خلاف دیسک‌های مجاور خود است. این دیسک‌ها توسط الکترودهای نازک فلزی از یکدیگر جدا می‌شوند. ولتاژ برابری به همه دیسک‌ها اعمال می‌شود و جابجایی نهایی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta l_{\text{total}} = N(\Delta l_{\text{single disc}}) \quad (1)$$



شکل ۶: شماتیک عملگر پیزوالکتریک شامل یک دسته از سرامیک‌ها [۳].

دسته عملگرها قادر به مقاومت در برابر نیروهای فشاری قوی، ایجاد جابه‌جایی‌های بزرگ و سفتی^{۲۴} بالا در مقایسه با دیگر عملگرهای پیزوالکتریک می‌باشد. در حالی که دسته عملگرها قادر به کار کردن تحت فشار بالا هستند، آنها نسبت به نیروهای کششی آسیب‌پذیرتر و حساستر می‌باشند و هیچ نیروی کششی نباید به دسته‌های پیزوالکتریک که پیش بارگذاری نشده‌اند، اعمال شود.

۵ انژکتورهای پیزوالکتریک

این دسته از انژکتورها از مواد پیزوالکتریک به عنوان عملگر و جابه‌جاکننده سوزن نازل استفاده می‌کنند. این دسته از انژکتورها به دلیل ویژگی‌های بسیار منحصربه‌فردی که دارند به سرعت در حال جایگزینی با انژکتورهای معمولی که از عملگرهای سلونوئیدی به عنوان محرک خود استفاده می‌کنند، هستند. تعدادی از نمونه‌های موجود راه خود را به محصولات تجاری باز کرده‌اند در حالی تعدادی دیگر موفق نبوده‌اند.

۱.۵ مدل‌های متفاوت از انژکتورهای پیزوالکتریک

۱.۱.۵ انژکتورهای مبتنی بر مدار سروو

انژکتورهای سوخت مبتنی بر پیزوالکتریک که از پیکربندی مدار سروو استفاده می‌کنند، عملکردی بسیار مشابه با انژکتور سلونوئیدی دارند با این تفاوت که عملگر آنها بر پایه پیزوالکتریک است نه براساس یک سلونوئید.

بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط آقای سو^{۲۵} و همکارانش در سال

²¹energy harvester ²²direct piezo actuators ²³amplified piezo-electric actuators ²⁴stiffness ²⁵Suh

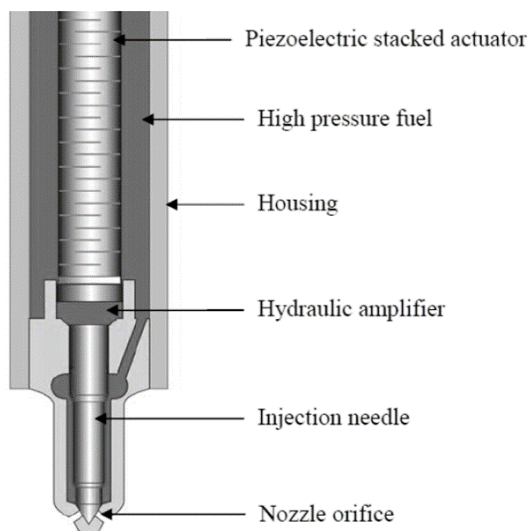
می‌یابد. البته این تأخیر در دیگر انژکتورهای مبتنی بر سروو نیز دیده می‌شود. در نتیجه، اگر وابستگی به انباشت سوخت کاهش یابد، عملکرد انژکتور نیز می‌تواند بهبود یابد.

۳.۱.۵ انژکتور توسعه‌یافته توسط Delphi

یک انژکتور تحریک مستقیم مطابق با شکل ۸، توسط کمپانی Delphi طراحی شده است. این انژکتور از یک دسته عملگر پیزوالکتریک برای هدایت سوزن نازل بطور مستقیم و آب‌بندی‌شده برای تزریق سوخت به داخل محفظه احتراق استفاده می‌کند.

این انژکتور به عنوان بخشی از سیستم ریل مشترک طراحی شده است تا نشان دهد که نیروی تولیدی توسط عملگر پیزوالکتریک برای غلبه به فشار بالای سوخت، می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. هدف اصلی استفاده از عملگر مستقیم این است که زمان پاسخ انژکتور در مقایسه با انژکتورهای پیزوالکتریک با مدار سروو، افزایش یابد. حداکثر سرعت سوزن قابل دسترس در این انژکتورها، ۳ متر بر ثانیه است [۹] که در مقایسه با انژکتور DENSO که بر اساس مدار سروو بود و سرعت سوزن آن ۱/۲ متر بر ثانیه بود، مقداری بسیار بالاتر و قابل توجه است.

برای استفاده از حداکثر پتانسیل نیروی عملگر، انژکتور Delphi از پیکربندی «قطع انرژی برای پاشش» برخلاف «انرژی دهی برای پاشش» استفاده می‌کند. در پیکربندی این انژکتور، زمانی که عملگر انرژی دریافت نکند، سوزن نازل باز می‌شود و سوخت تزریق می‌گردد. این بدین معناست که، عملگر پیزوالکتریک برای تقریباً ۹۵ درصد از عمر سرویس دهی خود باید انرژی دریافت کند. برای دادن انرژی مورد نیاز به انژکتور، باید ولتاژ مثبت نسبتاً بالایی به مدت طولانی به عملگر اعمال شود که این امر باعث کاهش عمر مفید انژکتور می‌شود.



شکل ۸: انژکتور پیزوالکتریک تحریک مستقیم، توسعه داده‌شده توسط Delphi [۹].

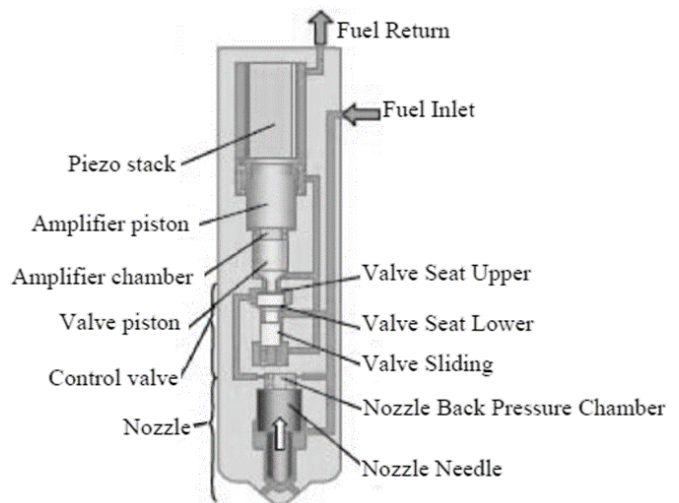
۴.۱.۵ انژکتور توسعه داده‌شده توسط Mide

Mide یک سیستم عملگر پیزوالکتریک برای کنترل فرآیند تزریق توسعه داده

۲۰۰۷، بر روی مقایسه ویژگی‌های اسپری سوخت در انژکتور پیزوالکتریک در مقایسه با انژکتور سلونوئیدی، سیستم تزریق پیزو دارای چند مزیت می‌باشد. تأخیر تزریق سوخت در انژکتور پیزوالکتریک در حدود ۰/۱ میلی‌ثانیه کمتر از انژکتور نوع سلونوئیدی بود. علاوه بر این، تجزیه و تحلیل نشان داد که تمیزه کردن سوخت در سیستم پیزو به علت پاسخ زمانی سریع‌تر و سرعت تزریق بیشتر، بهتر انجام می‌پذیرد [۷].

۲.۱.۵ انژکتور توسعه‌یافته توسط DENSO

انژکتور پیزوالکتریک DENSO قادر به دستیابی به ۵ تزریق در هر سیکل احتراقی می‌باشد. این انژکتور بخشی از یک سیستم ریل مشترک است که قادر به کار کردن تا فشار ۱۸۰ مگاپاسکال است و از یک پیکربندی مدار سروو هیدرولیکی استفاده می‌کند. همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است فشار سوخت، داخل محفظه فشار برگشت نازل^{۲۶}، سوپاپ نازل را به پایین هل می‌دهد. هنگامی که عملگر انرژی دریافت می‌کند (فعال می‌شود)، فشار در این محفظه با اجازه دادن به خروج سوخت از طریق مجرای بازگشت سوخت کاهش می‌یابد. در نتیجه، سوزن نازل با فشار سوخت در زیر آن، به سمت بالا رانده می‌شود. تأخیر از زمان شروع فعال‌سازی الکترونیکی تا شروع پاسخ مکانیکی، از ۰/۴ میلی‌ثانیه در انژکتورهای سلونوئیدی به ۰/۱ میلی‌ثانیه در این انژکتورها کاهش می‌یابد [۸].



شکل ۷: مکانیزم عملکردی انژکتور پیزوالکتریک DENSO [۸].

زمان پاسخ سریع‌تر، تعداد تزریق بیشتر در فواصل تزریق کوتاه‌تر را موجب می‌شود. سرعت جابه‌جایی سوزن در این نوع از انژکتور حدوداً ۱/۲ متر بر ثانیه است. عملکرد موتور در سطح انتشار گازهای آلاینده خروجی و حداکثر قدرت و گشتاور بهبود یافته است. در نمونه تست‌شده، قدرت موتور از ۱۴۷ اسب بخار به ۱۷۴ اسب بخار افزایش یافت. همچنین گشتاور از ۳۱۰ نیوتن متر به ۴۰۰ نیوتن متر افزایش یافته است [۸]. به دلیل تأخیر کمتر در انژکتورهای پیزوالکتریک، بصورت بالقوه تعداد تزریق بیشتری نسبت به انژکتورهای سلونوئیدی می‌توان حاصل کرد. با این حال، عملکرد انژکتور بدلیل تأخیر در انباشت سوخت در محفظه تقویت‌کننده انژکتور کاهش

²⁶nozzle back pressure chamber

۲.۵ میزان جابه‌جایی سوزن نازل در انژکتور پیزوالکتریک

آزمایش‌های انجام‌شده در مطالعات جداگانه‌ای [۱۲، ۱۳]، میزان جابه‌جایی سوزن انژکتور را در نمونه‌های مختلف موجود اندازه‌گیری کرده‌اند. برای مثال، حداکثر جابه‌جایی سوزن برای یک انژکتور که از تقویت‌کننده جابه‌جایی هیدرولیکی بهره می‌برد، ۳۰۰ میکرومتر اندازه‌گیری شده است [۱۲].

میزان جابه‌جایی سوزن انژکتور، برای یک انژکتور بوش که برای مصارف سنگین می‌باشد، ۵۰۰ میکرومتر اندازه‌گیری شده است [۱۳].

همچنین مطابق با کاتالوگ شرکت زمینس که جزو تولیدکنندگان انژکتورهای پیزوالکتریک است، انژکتور مذکور با استفاده از ۳۵۰ کریستال کوآرتز که ضخامت هرکدام ۸۰ میکرومتر است ساخته شده است. مطابق با این اطلاعات ارائه‌شده، بیشترین میزان افزایش طول لایه‌های پیزوالکتریک ۴۰ میکرومتر بیان شده است که این مقدار با افزایش از طریق مکانیزم تقویتی باعث جابه‌جایی سوزن انژکتور می‌شود [۱۴].

۳.۵ انژکتورهای پیزوالکتریک و کنترل آلاینده‌گی

در موتورهای دیزل، فرآیند احتراق در داخل سیلندر بسیار به فرآیند تزریق سوخت وابسته است. با کنترل زمان و مقدار پاشش سوخت و همچنین پروفیل پاشش سوخت به عنوان تابعی از زمان، بطور مؤثری می‌توان عملکرد موتور را کنترل کرد. با استفاده از انژکتورهای پیزوالکتریک و استفاده از خواص آنها که در قسمت‌های قبل ذکر شد می‌توان آلاینده‌گی در گازهای خروجی را کاهش داد.

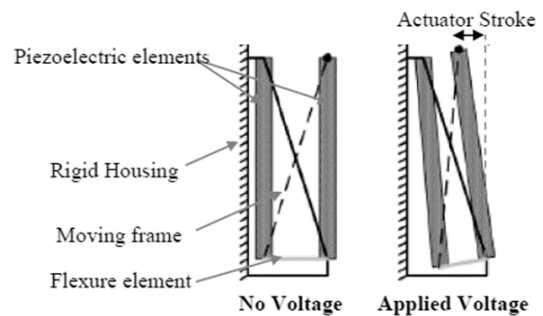
این دسته از انژکتورها سریع‌تر از انژکتورهای متداول باز و بسته می‌شوند که این سرعت بیشتر، کنترل دقیق‌تری را بین فواصل پاشش ایجاد می‌کند. همچنین لایه‌های پیزوالکتریک با ایجاد نوسان‌های جزئی در ولتاژ مورد استفاده برای فعال شدن خود، بازخوردی را ارائه می‌دهند. بطور مثال، اگر که ECU مدت زمان باز بودن انژکتور را ۰/۵ میلی ثانیه در نظر بگیرد و پاسخ زمانی انژکتور نشان دهد که انژکتور برای ۰/۴۹۶ میلی ثانیه باز بوده است، ECU می‌تواند یک زمان بسیار کم را در سیکل تزریق بعدی به منظور پوشش این تأخیر، به مدت زمان پاشش اضافه کند [۱۵].

انژکتورهای پیزوالکتریک نه تنها از انژکتورهای متداول دقیق‌تر هستند، بلکه بخاطر قابلیت و روش فعال‌سازی آنها مزایای دیگری نیز دارند. مثلاً، با دادن میزان ولتاژ الکتریکی کمتر به آنها، کریستال‌های پیزوالکتریک به میزان کمتری منبسط می‌شوند؛ باز شدن کمتر سوزن انژکتور به معنای مدت زمان پاشش طولانی‌تر می‌باشد، که قابلیت سودمند در زمانی که ما سعی در پاشش میزان مشخص و کمی از سوخت داریم، می‌باشد مثلاً در هنگام رانندگی در یک سراسیمگی [۱۵].

همچنین بخاطر سرعت بالای عملکردی، انژکتور پیزوالکتریک می‌تواند در یک سیکل احتراق، چندین بار پاشش داشته باشند (تا هفت بار پاشش در بعضی از دیزل‌ها) که بصورت کلی شامل سه مرحله تزریق اولیه، تزریق اصلی و تزریق ثانویه می‌باشند. این انعطاف می‌تواند آلاینده‌گی خروجی از موتورها از جمله سوخت‌های نسوخته در دیزل‌ها را کاهش دهد [۱۵].

با ظهور مبدل‌های کاتالیستی، صنایع اتومبیل‌سازی همواره راهی برای

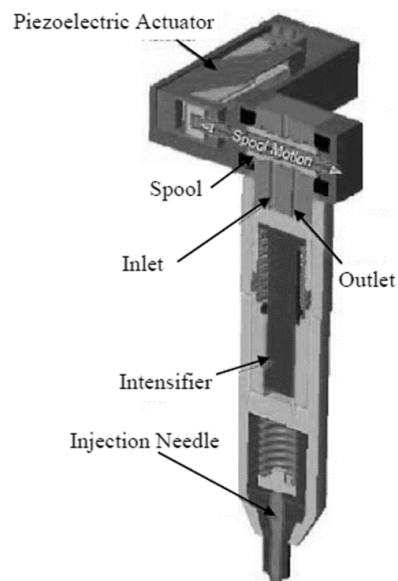
است. همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، از دو دسته عملگر پیزوالکتریک می‌شود که 5×5 میلی‌متر مربع سطح مقطع و ۵۰ میلی‌متر هم طول آنهاست. علاوه بر این، یک مکانیزم خمشی به جهت کنترل ورودی و خروجی سوخت، حرکت می‌کند. تصویر سمت چپ عملگر را زمانیکه ولتاژ به آن اعمال نشده و تصویر سمت راست همان عملگر را هنگامی که ولتاژ اعمال می‌شود نشان می‌دهد که ازدیاد طول داشته‌اند. همان‌طور که دو عملگر پیزوالکتریک گسترش می‌یابند، چارچوب متحرک به عنوان یک جسم صلب می‌چرخد و منجر به خروج سوخت می‌شود [۱۰].



شکل ۹: پیکربندی مکانیزم خمشی Mide [۱۰].

این ساز و کار خمشی قادر است جابه‌جایی خروجی را با یک ضریب ۳/۵ افزایش دهد. با این حال، نیروی خروجی از ۱۰۰۰ نیوتن به ۶۶ نیوتن کاهش می‌یابد. با استفاده از عنصر خمشی و در نتیجه چارچوب متحرک و محفظه صلب، چهارنقطه محوری ایجاد شده و جابه‌جایی خروجی خطی از پیروها تبدیل به یک حرکت تقریباً خطی موازی با محور پیروها می‌شود. شکل ۱۰ نحوه اتصال عملگر را به واحد انژکتور نشان می‌دهد. با توجه به اندازه و جهت حرکت خروجی، عملگر باید در زاویه ۹۰ درجه نسبت به بدنه انژکتور نصب گردد [۱۱].

کاهش نیروی خروجی و اندازه و جهت چرخش عملگر، استفاده از این انژکتورها را محدود کرده است. گرچه عملگر به خوبی فرآیند تزریق را کنترل می‌کند ولی این مدل در موتورهای دیزل اجرایی نشده است.



شکل ۱۰: انژکتور پیزوالکتریک Mide [۱۱].

- [9] Dober, Gavin, Tullis, Simon, Greeves, Godfrey, Milovanovic, Nebojsa, Hardy, Martin, and Zuelch, Stefan. The impact of injection strategies on emissions reduction and power output of future diesel engines. in *SAE Technical Paper*. SAE International, 04 2008.
- [10] MacLachlan, Brian J., Elvin, Niell, Blaurock, Carl, and Keegan, N. Jared. Piezoelectric valve actuator for flexible diesel operation. in Anderson, Eric H., ed. , *Smart Structures and Materials 2004: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*, vol. 5388, pp. 167 – 178. International Society for Optics and Photonics, SPIE, 2004.
- [11] van Schoor, Marthinus, Prechtel, Eric, Masters, Brett, MacLachlan, Brian, and Makar, Paul. Innovative technology for clean, lean, and mean diesel fuel injection. in *SAE Technical Paper*. SAE International, 11 2002.
- [12] Ficarella, A. and Laforgia, D. Injection characteristics simulation and analysis in diesel engines. *Meccanica*, 28(3):239–248, 1993.
- [13] Coppo, Marco, Dongiovanni, Claudio, and Negri, Claudio. A linear optical sensor for measuring needle displacement in common-rail diesel injectors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 134(2):366 – 373, 2007.
- [14] Siemens piezo injections. Online. <http://docplayer.net/22178614-Siemens-piezo-injectors.html>.
- [15] Shashank, M. Piezoelectric diesel injectors & emission control. *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 4(1):1–3, January 2015.

کاهش آلاینده‌های هیدروکربنی و NO_x از موتورهای احتراق داخلی پیدا کرده‌اند. کاهش آلاینده‌های CO_2 هنوز نیز یکی از موانع بزرگ حل نشده باقی مانده است. با طراحی انژکتورهای بهتر، آلاینده‌های CO_2 نیز بصورت مؤثری می‌تواند کاهش یابد. یکی از بهترین راه‌ها برای کاهش این آلاینده‌ها استفاده از سوخت کمتر در فرآیند احتراق می‌باشد. انژکتورهای پیزوالکتریک با تزریق دقیق‌تر سوخت کمک می‌کنند که بطور غیرمستقیم مصرف سوخت کاهش یابد.

۶ نتیجه‌گیری

با توجه به مطالب ذکرشده، اهمیت پرداختن به موضوع انژکتورهای پیزوالکتریک کاملاً روشن است. این دسته از انژکتورها با سرعت بسیاری در حال جایگزینی با انژکتورهای قدیمی‌تر هستند. بدلیل خواص کنترلی بسیار مطلوب در این دسته از انژکتورها، هم اکنون در بسیاری از موتورهای دیزل از آنها استفاده می‌شود زیرا در موتورهای دیزل با توجه به ذات طراحی آنها فرآیند احتراق با نحوه پاشش سوخت به طرز مؤثری کنترل می‌شود. خواص منحصر به فرد این انژکتورها، عملکرد موتور را نیز می‌تواند تحت تأثیر قرار دهد، بطوریکه مطابق با مطالب ذکرشده میزان تورک و توان خروجی از موتور بهبود می‌یابد. البته در مباحث مربوط به کنترل آلاینده‌های نیز حرف‌های زیادی برای گفتن دارند.

مراجع

- [1] Wikipedia contributors. Motor vehicle — Wikipedia, the free encyclopedia, 2020. [Online; accessed 12-February-2020].
- [2] Bosch. Bosch fuel injectors top part numbers | north america.
- [3] Nouraei, Hirmand. Design and development of a direct-acting piezoelectric fuel injector. Master's thesis, University of Toronto, 2012.
- [4] Preumont, André. *Mechatronics: Dynamics of Electromechanical and Piezoelectric Systems*. Springer Netherlands, 2006.
- [5] Beeby, Stephen, Ensel, Graham, White, Neil M., and Kraft, Michael. *MEMS Mechanical Sensors*. Artech House, 2004.
- [6] Wikipedia contributors. Piezoelectricity — Wikipedia, the free encyclopedia, 2020. [Online; accessed 12-February-2020].
- [7] Suh, Hyun Kyu, Park, Sung Wook, and Lee, Chang Sik. Effect of piezo-driven injection system on the macroscopic and microscopic atomization characteristics of diesel fuel spray. *Fuel*, 86(17):2833 – 2845, 2007.
- [8] Oki, Mamoru, Matsumoto, Shuichi, Toyoshima, Yoshio, Ishisaka, Kazuyoshi, and Tsuzuki, Naoyuki. 180MPa piezo common rail system. in *SAE Technical Paper*. SAE International, 04 2006.