



## Numerical study on the effect of geometry on pressure caused by the injectors sealing on the mechanical behavior of common rail fuel of Shahin car at the engine operating temperature conditions

Reza Sedighi, Alireza Bakhshinejad Bahambari\*

Engineering and R&D Department, Mojdeh Vasl Shiraz Company, Qazvin, Iran

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Common Rail Fuel  
Internal Combustion Engine  
Injector  
Finite Element Simulation  
Tension

### ABSTRACT

The common rail fuel is one of the key components in the operation and performance of internal combustion engines, which is crucial as a fuel distributor and engine ignition part. This article provides an investigation regarding the durability and stability of common rail fuel of Shahin car at the engine's operating temperature and analyses the mechanical behavior of the part. In this research, the analysis of deformation states and stress distribution of Shahin fuel rail part in two types of reinforced design (three legs) and simple type (two legs) is investigated using 3D modeling and finite element simulation at the engine's operating temperature conditions. The simulation results were compared with the experimental amounts for validation and verification and presented acceptable amounts. The distribution of stress and deflection of Shahin fuel rail in two types of reinforced and simple designs were compared at the engine's operating temperature conditions, and also, the maximum amounts of stress and deflection were investigated at the location of the injectors. The maximum amount of deviation was observed at the location of simple Shahin fuel rail injectors (two legs) at a temperature of 140°C with an amount of 0.59mm, which is one of the potential points for fuel leakage. Shahin fuel rail with a reinforced design (three legs) significantly reduces the deformation of the part, especially at the points of the injector nipples at engine operating temperature. Moreover, the reinforced design of the Shahin fuel rail reduces the stress concentration on the fuel rail's lateral legs and increases the reliability of the part.



© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

\* Corresponding author

E-mail address: [a.bakhshi@mvsco.com](mailto:a.bakhshi@mvsco.com) (A. Bakhshinejad Bahambari)

Received 3 April 2024; Accepted 20 August 2024

E-ISSN: 2345-4121/ISSN: 1735-5214

**Cite this article:** Sedighi R, Bakhshinejad Bahambari A. Numerical study on the effect of geometry on pressure caused by the injectors sealing on the mechanical behavior of common rail fuel of Shahin car at the engine operating temperature conditions. The Journal of Engine Research. 2024 Nov 21;71(3):1-15. doi: [10.22034/ER.2024.2024268.1027](https://doi.org/10.22034/ER.2024.2024268.1027)

## بررسی عددی اثر هندسه قطعه بر روی فشار ناشی از آببندی افشانه‌ها بر رفتار مکانیکی قطعه لوله سوخت خودروی شاهین در شرایط دمای کارکرد موتور

رضا صدیقی، علیرضا بخشی نژاد بهمبری\*

گروه مهندسی و R&D، شرکت مژده وصل شیراز، قزوین، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>لوله سوخت یکی از اجزای کلیدی در کارکرد و عملکرد موتورهای احتراق داخلی است که به‌عنوان قطعه پخش‌کننده سوخت و احتراق موتور از حساسیت بالایی برخوردار است. این مقاله به بررسی دوام و پایداری لوله سوخت شاهین در شرایط دمای کارکرد موتور می‌پردازد و رفتار مکانیکی قطعه را مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار می‌دهد. تحلیل حالات تغییر شکل و توزیع تنش قطعه لوله سوخت در دو نوع طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) و نوع ساده (دوپایه) با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی و شبیه‌سازی اجزای محدود در شرایط دمای کارکرد موتور بررسی می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای اعتبارسنجی با مقادیر تجربی مقایسه گردید و مقادیر قابل قبولی را ارائه کرد. توزیع تنش و تغییر شکل لوله سوخت در دو نوع طراحی تقویت‌شده و ساده در دمای کارکرد موتور باهم مقایسه و بیشینه مقادیر تنش و تغییر شکل در محل قرارگیری افشانه‌ها مورد بررسی واقع شد. بیشترین مقدار تغییر شکل در محل افشانه‌های لوله سوخت شاهین نوع ساده (دوپایه) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد با مقدار ۰.۵۹ میلی‌متر است. لوله سوخت با طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) به‌طور قابل توجهی تغییر شکل قطعه بویژه در نقاط نشیمنگاه‌های افشانه در دمای کارکرد موتور کاهش می‌دهد. همچنین، لوله سوخت طراحی تقویت‌شده از تمرکز تنش‌های موجود بر پایه‌های جانبی لوله سوخت می‌کاهد و قابلیت اطمینان قطعه را افزایش می‌دهد.</p>	<p><b>کلیدواژه‌ها:</b> لوله مشترک سوخت موتور احتراق داخلی افشانه شبیه‌سازی اجزای محدود تنش</p>



© 2024 Iranian Society of Engine, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license). (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

\* نویسنده مسئول

پست الکترونیکی: [a.bakhshi@mvsco.com](mailto:a.bakhshi@mvsco.com) (علیرضا بخشی نژاد بهمبری)

دریافت ۱۵ فروردین ۱۴۰۳؛ پذیرش ۳۰ مرداد ۱۴۰۳  
شاپای الکترونیکی: ۴۱۲۱-۲۳۴۵ / شاپای چاپی: ۵۲۱۴-۱۷۳۵

**Cite this article:** Sedighi R, Bakhshinejad Bahambari A. Numerical study on the effect of geometry on pressure caused by the injectors sealing on the mechanical behavior of common rail fuel of Shahin car at the engine operating temperature conditions. The Journal of Engine Research. 2024 Nov 21;71(3):1-15. doi: 10.22034/ER.2024.2024268.1027

## ۱- مقدمه

صنعت خودرو در چند دهه گذشته شاهد پیشرفت چشمگیری در توسعه و بهبود موتورهای احتراق داخلی تزریق مستقیم بوده است. موتورهای احتراق داخلی جهت کارکرد صحیح نیازمند سوخت و هوا می‌باشند که لوله سوخت وظیفه توزیع سوخت موتور را بر عهده دارد. سوخت به‌طور پیوسته و با فشار بالا درون لوله سوخت در زمان کارکرد موتور جریان دارد و از طریق نشیمنگاه‌های افشانه موجود بر لوله سوخت به‌تمامی افشانه‌ها توزیع می‌گردد. لوله‌های سوخت مورد استفاده در موتور خودرو به‌طور معمول از طریق پایه‌های هر لوله به بدنه موتور ثابت و محکم می‌گردد. از سوی دیگر، افشانه‌ها در موتور خودرو بر روی لوله سوخت نصب می‌گردند که برای جلوگیری از نشتی سوخت و آببندی از محل اتصال افشانه‌ها به تثبیت و محکم‌کاری نیازمند بوده تا بر فشار سیال پشت افشانه غلبه کنند. لوله‌های سوخت بسته به کاربرد و طراحی مهندسی در موتور خودرو در انواع فلزی و پلاستیکی ساخته می‌شود. علاوه بر این، لوله‌های سوخت پلاستیکی به دلیل وزن کمتر و پیچیدگی کمتر در فرآیند ساخت نسبت به نوع فلزی و همچنین استحکام و مقاومت بالا در آزمون‌های عملکردی از جمله حرارتی و کشش قطعه پتانسیل بالایی در پیاده‌سازی و استفاده در موتور خودرو دارند [۲، ۸].

در فرآیند احتراق در موتورهای احتراق داخلی به عوامل زیادی از جمله متغیرهای ساختاری محفظه احتراق، ورودی و خروجی هوای احتراق و از همه مهم‌تر لوله سوخت و سامانه افشانه مرتبط است [۳]. همچنین نوسانات فشار در لوله سوخت سبب کاهش بازده عملکردی موتور از جمله تغییر در بار و سرعت موتور و تغییر در مقدار سوخت پاشش شده از افشانه‌ها می‌گردد [۴]. تأثیر نوسانات فشار در ورودی افشانه با کاهش قطر لوله افزایش پیدا می‌کند. این در حالی است که طول لوله بر امواج فشار داخل سامانه سوخت‌رسانی تأثیر آن‌چنانی ندارد [۵].

نشت در سامانه‌های سوخت‌رسانی فشار بالا و افشانه‌های سوخت می‌تواند یک عنصر نگران‌کننده در ایمنی خودرو و عملکرد سامانه‌های تحویل سوخت تزریق مستقیم باشد [۶]. خطر آتش‌سوزی در موتور خودرو از موارد ایمنی در خودرو است که با جان سرنشینان ارتباط دارد. از این رو حوادث حاصل از نشتی سوخت که با آتش‌سوزی همراه بوده با آببندی لوله سوخت و بویژه آببندی محل افشانه‌ها ارتباط مستقیم دارد [۷، ۸].

به‌منظور شناسایی محل نشتی سوخت در سامانه سوخت‌رسانی خودرو و تشخیص متغیرهای دخیل در نشتی رویکردهای تحلیلی همراه با الگوریتم ارائه گردید. از متغیرهای نشت سوخت می‌توان به خرابی اتصالات آب‌بند، فشار بیش‌ازحد در اتصالات لوله سوخت و خرابی حلقه‌های لاستیکی افشانه در زمان کارکرد موتور اشاره کرد که منجر به افزایش مصرف سوخت و کاهش بازده موتور می‌گردد [۹، ۱۰]. ارتعاشات ناشی از لختی و ضربات اجزای محرک موجود در موتور سبب شل شدن نقاط آببندی و نشتی سامانه سوخت‌رسانی می‌شود [۱۱].

تحلیل اجزای محدود در خصوص آببندی سامانه سوخت‌رسانی موتور خودرو با طراحی‌های متفاوت در اتصالات انجام گردید که منجر به طراحی بهینه اتصالات جهت آببندی لوله سوخت گردید [۱۲، ۱۳]. بررسی اثر ارتعاش و تشدید در لوله‌های سامانه سوخت‌رسانی با طراحی و پیکربندی‌های مختلف با استفاده از شبیه‌سازی عددی انجام گردید که منجر به کاهش دامنه ارتعاش و تنش در ناحیه تلمبه سوخت و اتصالات سامانه سوخت‌رسانی گردید [۱۴].

تحلیل سازوکار شکست خستگی لوله لوله سوخت فشار بالا با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی و تجربی انجام شده است. در این خصوص، تحلیل حالت‌های ارتعاشی، سطوح شکستگی، پاسخ بسامدی و تحلیل عمر خستگی به‌منظور دستیابی به علل شکست قطعه بررسی شده است. بسامدهای ارتعاش به‌طور قابل‌توجهی بر عمر خستگی لوله متصل به لوله سوخت تأثیر می‌گذارند و شکستگی لوله سوخت پرفشار، شکست خستگی شناسایی شد. شکست در سطح مشترک بین سر و بدنه لوله مشاهده شد و ترک از ناحیه بیرونی شروع شده و به داخل گسترش یافته است. حداکثر تنش فون میسز کمتر از حد خستگی مواد لوله سوخت گزارش شد و ارتعاشات بسامد پایین نسبت به ارتعاشات بسامد بالا تأثیر قابل‌توجهی بر عمر خستگی دارد. شکست خستگی لوله سوخت عمدتاً به دلیل تشدید در بسامد ارتعاش مرتبه اول ایجاد شده است [۱۵].

انبساط حرارتی مواد تشکیل‌دهنده قطعه و افزایش فشار سوخت بر نشتی سامانه سوخت‌رسانی بویژه تلمبه سوخت تأثیر مستقیم دارد. بدین منظور، با بهینه‌سازی ساختار هندسی می‌توان به جلوگیری از تغییر شکل قطعه حاصل از تغییرات دما در شرایط کاری موتور پرداخته شود [۱۶].

آببندها از عوامل اصلی در آببندی سامانه سوخت‌رسانی بویژه در ناحیه لوله سوخت می‌باشند که بررسی متغیرهای مرتبط با خرابی آن‌ها از عوامل مؤثر در کاهش نشتی سوخت است [۱۷]. نتیجه تحلیل ارتعاشی بر سامانه سوخت‌رسانی یک موتور خودرو منجر به شناسایی حالت‌های ارتعاشی سامانه و تأثیرات آن بر عملکرد لوله سوخت گردید. پدیده تشدید هیدرولیکی بین اجزاء سامانه سوخت‌رسانی سبب تأثیر منفی بر عملکرد سوخت‌رسانی دارد که بسته به مدهای بسامدی قطعه از لوله‌های سوخت‌رسانی بین تلمبه فشار بالای سوخت تا لوله مشترک سوخت و افشانه‌ها را شامل می‌شود [۱۸]. علل و اثرات مخرب خوردگی بر شرایط عملکردی و ایمنی لوله سوخت و افشانه‌های افشانه موردبررسی قرار گرفته است [۱۹].

از این عوامل می‌توان به کارکرد سامانه سوخت‌رسانی با سوخت بی‌کیفیت و ناخالص، همراه با ترکیبات شیمیایی متفاوت اشاره کرد که تمام اجزای مرتبط با سامانه احتراق موتور را از جمله استوانه تا افشانه سوخت تحت تأثیر قرار می‌دهد. در سامانه سوخت‌رسانی پدیده حفره‌زایی و خوردگی در سطوح دیواره‌ها به دلایلی همچون نقش جریان سیال، طراحی و خصوصیات فیزیکی سوخت ناشی از تغییرات دمایی، چگالی و یا لزجت سوخت به وقوع می‌پیوندد و سبب مشکل در انتقال مناسب سوخت می‌شود که دستورالعمل‌های تعمیر و نگهداری برای جلوگیری از وقوع این پدیده توصیه می‌گردد [۲۰، ۲۱]. بررسی نشتی افشانه‌های لوله سوخت با استفاده از تحلیل اجزای محدود به منظور افزایش سطح تماس و ضخامت قطعه آببند با افشانه توسط معیار تنش فون میسر بررسی و انجام گردید [۲۲]. شبیه‌سازی عددی در خصوص بررسی متغیرهای طراحی تأثیرگذار بر عملکرد لوله مشترک سوخت و پاشش سوخت از افشانه به بهبود و شناسایی تأثیر متغیرها منتج گردید. از جمله متغیرها طراحی می‌توان به فشار داخل لوله سوخت، قطر افشانه، قطر ورودی و خروجی افشانه اشاره کرد که از عوامل تأثیرگذار بر پایداری و دوام عملکرد موتور احتراق داخلی است [۲۳-۲۵].

در این مقاله با توجه به اهمیت آببندی و جلوگیری از نشتی سوخت در عملکرد سامانه سوخت‌رسانی موتور خودرو و بویژه ناحیه نشیمنگاه‌های افشانه موجود بر لوله سوخت، سعی بر ارائه یک طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) برای لوله سوخت خودرو شاهین است. با توجه به مطالب فوق در خصوص نشتی و خرابی سامانه سوخت‌رسانی، لوله مشترک سوخت تحت تأثیر عوامل نوسانات فشار، خوردگی، ارتعاشات، دما و خرابی اتصالات آببند است. بنابراین در این تحقیق با شبیه‌سازی اجزای محدود، دو نوع هندسه لوله سوخت از لحاظ رفتار مکانیکی قطعه جهت تحلیل آببندی قطعه در شرایط دمای کارکرد موتور موردبررسی و مقایسه قرار می‌گیرد که در تحقیقات پیشین به صورت مشخص و واضح ارائه نشده است. لوله سوخت طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) با ایجاد یک‌پایه تقویتی در وسط قطعه در مقایسه با طراحی نوع ساده (دوپایه) سعی در کنترل و جلوگیری از تغییر شکل زیاد قطعه را خواهد داشت. شبیه‌سازی سه‌بعدی به صورت عددی در چندین بازه دمایی انجام گردیده است تا به بررسی قرارگیری لوله سوخت در شرایط طراحی موتور همراه با حفظ آببندی سوخت و افشانه‌ها پردازد. تغییرات حاصل از قرارگیری لوله سوخت با حفظ شرط آببندی افشانه‌ها در شرایط دمای کارکردی موتور با تغییر شکل و توزیع تنش بررسی و مقایسه می‌گردد. لوله سوخت در استفاده از طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) به طور قابل توجهی تمرکز تنش موجود بر بدنه را مهار می‌کند و تغییر شکل حاصل از آببندی را کاهش خواهد داد.

## ۲- هندسه و شرایط مرزی

هندسه لوله سوخت در دو نوع طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) و نوع ساده (دوپایه) ارائه گردیده که در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین، شکل ۲ (الف و ب) نشان‌دهنده قطعه تولیدی لوله سوخت طراحی دوپایه و سه‌پایه با مواد

پلاستیکی است. در شکل ۲-پ نمونه لوله سوخت طراحی سه پایه بر روی موتور خودرو مونتاژ گردیده است و پایه‌های لوله به‌عنوان نقاط ثابت مشخص شده است. در این شبیه‌سازی سه‌بعدی، سطوح زیرین پایه‌های لوله سوخت به‌عنوان نقاط ثابت در نظر گرفته شده است. همچنین، نشیمنگاه‌های افشانه موجود بر لوله سوخت نقاط اعمال فشار به جهت مقابله با نشتی سوخت و آببندی افشانه‌ها در نظر گرفته شده است.



شکل ۱ لوله سوخت شاهین (الف) طراحی ساده (دوپایه) (ب) طراحی تقویت شده (سه پایه)



(پ)



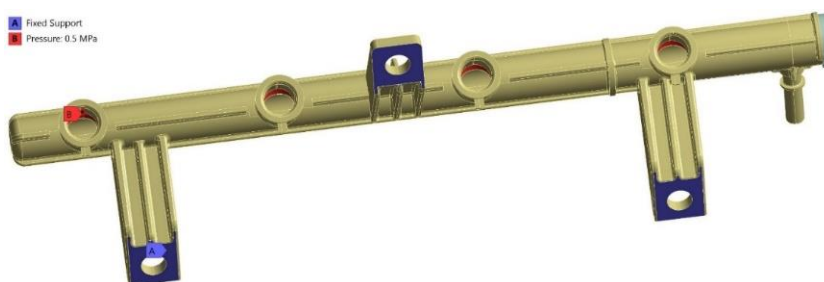
(ب)

(الف)

شکل ۲ قطعه تولیدی لوله سوخت شاهین، (الف) طراحی تقویت شده (سه پایه)، (ب) طراحی ساده (دوپایه)، (پ) لوله سوخت مونتاژ شده در موتور خودرو (پایه‌های لوله سوخت محل نقاط ثابت)

در این تحقیق، معادل ۰٫۵ مگاپاسکال فشار به‌صورت عمودی بر چهار عدد نشیمنگاه افشانه لوله سوخت به‌منظور آببندی افشانه‌ها وارد می‌گردد که معادل فشار حاصل از اعمال حلقه‌های لاستیکی هر افشانه در جهت مقابل جهت آببندی است. فشار عمودی ۰٫۵ مگاپاسکال که به جهت آببندی نشیمنگاه‌های افشانه لوله سوخت ارائه گردیده بر اساس مدارک توصیه شده آزمون نشتی قطعه لوله سوخت است. تغییرات دما در سه بازه دمایی ۲۲ درجه، ۸۵ درجه و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به‌منظور شبیه‌سازی تغییرات لوله سوخت در شرایط دمایی کارکرد موتور در نظر گرفته شده است [۲۶]، شرایط مرزی مذکور بر روی قطعه‌های لوله سوخت در شکل ۳ ارائه شده است. رنگ‌های مختلف در سطوح شرایط مرزی فشار بر ناحیه افشانه‌ها و نقاط ثابت پایه‌ها را نشان می‌دهد. ماده پلاستیکی به‌کاررفته در لوله سوخت از جنس پلی آمید-الیاف شیشه است که خصوصیات فیزیکی ماده در جدول ۱ ارائه گردیده است [۲۸، ۲۹]. مطالعه تجربی در خصوص جهت‌گیری مواد پلی‌آمید تقویت شده با الیاف شیشه کوتاه با درصد وزنی الیاف ۰، ۱۵ و ۳۰ درصد به‌منظور مقایسه خواص مکانیکی مواد با استفاده از پرتونگاری رایانه‌ای اشعه ایکس انجام شده است. تأثیر ناهمسانگردی و همسانگردی مواد پلی آمید با الیاف شیشه که مرتبط با ضریب کشسانی و خواص مکانیکی هست با تغییر در جهت‌های مختلف بررسی شده است [۳۰]. در مطالعه حاضر، خواص مکانیکی مواد پلی آمید شیشه همسانگرد فرض شده است که به یکسان بودن

خواص در تمامی جهت‌ها اشاره دارد. تأثیر شرایط محیط بر روی خواص مکانیکی مواد پلی آمیدی با ترکیبات الیاف شیشه به دلیل اهمیت این مواد در طراحی و کاربرد صنعتی بررسی شده است. از این‌رو، تغییرات دما بر روی این مواد می‌تواند منتج به آسیب‌های ظاهری سطح همچون تغییر رنگ و ترک‌های سطحی بویژه در دماهای بالا اشاره کرد. همچنین، تأثیر دما بر کاهش استحکام کششی قطعه، ازدیاد طول در نقطه شکست و کاهش سختی قطعه اشاره کرد. تغییر در حالت شکست قطعه از چکش‌خوار به نیمه‌ترد از نتایج قرارگیری قطعه در شرایط دمایی با دوره‌های زمانی طولانی‌مدت است [۳۱، ۳۲]. قابلیت جذب انرژی و تحمل تنش در مواد مرکب الیاف شیشه همراه با وزن کمتر در مقایسه با آلیاژهای فلزی با وزن بیشتر به دلایل بالقوه مذکور، گزینه‌ی مناسبی جهت جایگزینی با مواد فلزی است که قابل‌تأمل و بررسی است [۳۳].



شکل ۳ شرایط مرزی اعمال‌شده بر لوله سوخت شاهین

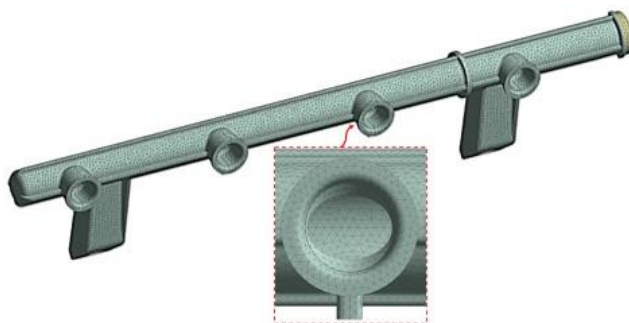
جدول ۱ خصوصیات فیزیکی ماده PA-GF

مقدار	خصوصیات
1.34 (g/cm <sup>3</sup> )	چگالی
$2.3 \times 10^{-5}$ (1/K)	ضریب انبساط حرارتی
8500 MPa	مدول یانگ
0.42	نسبت پواسون
150 MPa	استحکام تسلیم کششی

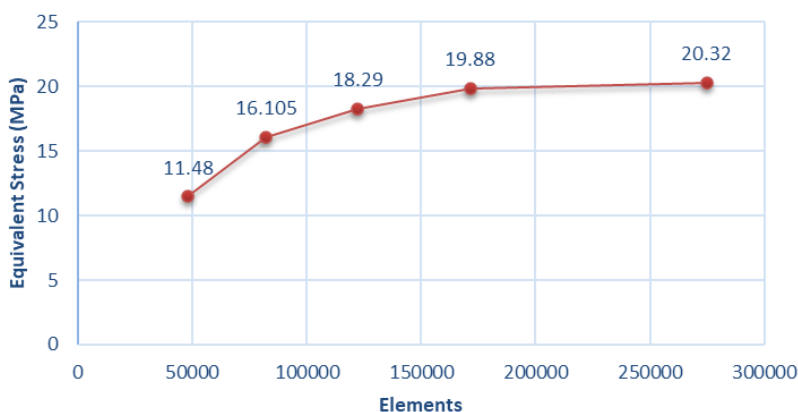
### ۳- شبیه‌سازی عددی و اعتبار سنجی

در مطالعه حاضر، روش اجزای محدود برای حل مسئله سه‌بعدی و تحلیل لوله سوخت اتخاذ شده است. شبکه‌بندی لوله‌های سوخت از نوع چندوجهی<sup>۱</sup> است که در شکل ۴ ارائه شده است. روش اجزای محدود به منظور بررسی تغییر شکل و توزیع تنش لوله‌های سوخت در محدوده‌های دمایی مختلف اتخاذ گردیده و از نرم‌افزار ANSYS برای شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج همگرایی شبکه مربوط به تنش فون میسز در قطعه لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) در چندین شبکه‌بندی با شبکه‌های مختلف در شکل ۵ ارائه گردیده است. این نتایج تنش بیشینه قطعه لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) را با شبکه‌های مختلف گزارش کرده است که در نقاط نزدیک به پایه‌های لوله سوخت است. در ادامه بحث، موقعیت و محل نقطه بیشینه در سطح زیرین پایه لوله مشخص شده که در بخش نتایج ارائه شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود تعداد ۲۷۴۷۹۷ شبکه به‌عنوان متراکم‌ترین در نظر گرفته شده که در مقایسه با شبکه‌بندی استفاده شده با ۱۷۱۶۴۱ شبکه اختلاف ۲،۲۱ درصد دارد. بنابراین، به‌طور متوسط تعداد ۱۷۱۶۴۱ شبکه در شبکه‌بندی این شبیه‌سازی استفاده شده است.

<sup>1</sup> Tetrahedron



شکل ۴ شبکه‌بندی لوله سوخت شاهین



شکل ۵ نتایج همگرایی شبکه لوله سوخت شاهین طراحی ساده (دوپایه)

محاسبه تنش وارده بر لوله‌های سوخت در این مقاله بر اساس معیار تنش فون میسز و نظریه حداکثر انرژی اعوجاج بررسی و محاسبه می‌گردد. بر این اساس، جهت کنترل شکست و تسلیم قطعه لوله سوخت تنش‌های اصلی موجود در دایره موهر را بر اساس رابطه فون میسز سنجیده و با مقدار استحکام تسلیم ماده مقایسه و نقاط شکست قطعه بررسی می‌گردد [۳۴-۳۶]. معادلات حاکم در تحقیق حاضر بدین شرح اند:

معادله بین تنش و کرنش [۳۵، ۳۶]:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3)$$

که  $E$  ضریب کشسانی و  $\Delta L$  تغییرات طول و  $L_0$  به‌عنوان طول اولیه قطعه است.

اندازه‌گیری تنش در این مقاله بر اساس معیار تنش فون میسز  $\sigma'$  محاسبه می‌گردد که در سه محور مختصات XYZ به‌صورت زیر تعریف می‌گردد [۳۶]:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)]} \quad (4)$$

ضریب اطمینان برای بررسی تسلیم قطعه [۳۶]:

$$S.F. = \frac{S_y}{\sigma} \quad (5)$$

که  $S_y$  برابر با استحکام تسلیم ماده است.

در این مقاله، به‌منظور اعتبار سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی مقایسه مقادیر با نتایج آزمایشگاهی صورت می‌گیرد. بدین منظور، لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) را با استفاده از دستگاه آزمون فشار نشیمنگاه (آزمون کشش) موجود در آزمایشگاه در دو بازه دمایی محیط که معادل ۲۱ درجه سانتی‌گراد و دمایی ۸۵ درجه سانتی‌گراد از لحاظ مقدار تنش و تغییر شکل قطعه مورد بررسی قرار داده و با نتایج شبیه‌سازی مقایسه می‌شود. آون (کوره حرارتی) در شکل ۶-الف نشان داده شده که جهت رساندن قطعه لوله سوخت به دمایی ۸۵ درجه سانتی‌گراد مورد استفاده قرار گرفته است. آون (کوره حرارتی) ساخت کشور آلمان بوده با تفکیک دمایی ۰,۱ درجه سانتی‌گراد و بازه دمایی بیشینه ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد قابلیت گرمایش قطعات را دارد. همچنین، جهت بررسی مقدار نیرو و تنش و کرنش وارده بر قطعه لوله سوخت در دو بازه دمایی مشخص شده از دستگاه آزمون کشش استفاده می‌گردد که در شکل ۶-ب مشخص شده است. دستگاه آزمون کشش ساخت کشور کره جنوبی بوده که با تفکیک‌پذیری ۰,۱ کیلوگرم و گستره اندازه‌گیری ۱-۱۰۰۰ کیلوگرم جهت اندازه‌گیری نیروی وارده بر قطعات مورد استفاده در آزمایش است.



(الف)

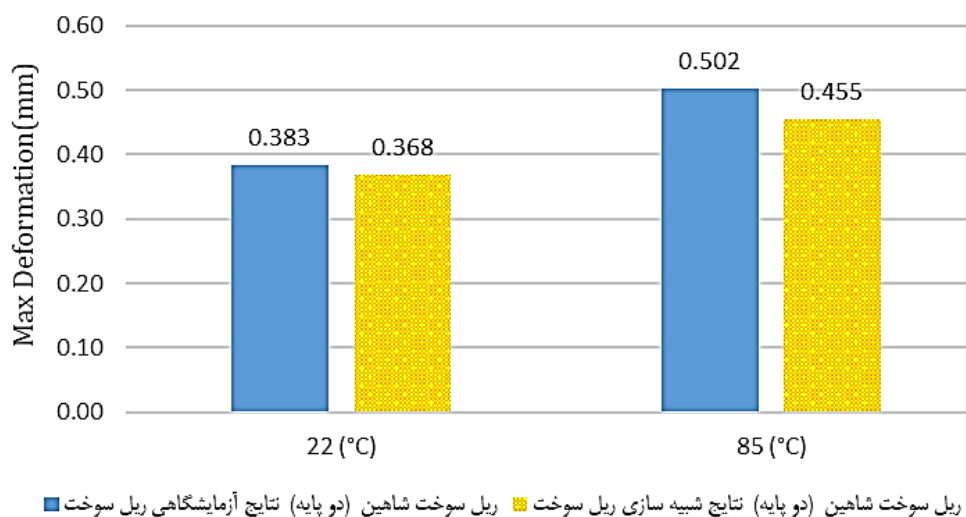


(ب)

شکل ۶ تجهیزات آزمایشگاه شامل کوره و دستگاه آزمون فشار نشیمنگاه (آزمون کشش)

برای انجام آزمایش آزمون فشار، قطعه لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) بر روی فیکسچر خود قرار داده شده است تا به صورت عمودی فشار به نشیمنگاه‌های قطعه لوله سوخت اعمال گردد. سپس فیکسچر به منظور بررسی آزمون تنش در دستگاه آزمون کشش قرار داده شده است و نتایج از رایانه متصل به دستگاه استخراج گردیده است. به منظور بررسی و استخراج نتایج مقدار تنش و کرنش وارده بر قطعه لوله سوخت در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد، ابتدا قطعه را به مدت ۶ ساعت در کوره حرارتی قرار داده تا به صورت کامل قطعه دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد را حفظ کرده باشد. سپس قطعه مطابق آزمون اول بر روی فیکسچر نصب می‌گردد و در دستگاه آزمون کشش قرار داده و نتایج استخراج می‌گردد.

مقایسه نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی در شکل ۷ ارائه گردیده است که معادل ۱۰,۳۴٪ خطا در تغییر شکل قطعه مشاهده شده است. رفتار مکانیکی و الاستو پلاستیک مواد پلی آمید-الیاف شیشه (فایبرگلاس) با استفاده از دستگاه آزمون کشش با درصد الیافها و بازه‌های دمایی مختلف به صورت تجربی و شبیه‌سازی بررسی شده است. نتایج به تأثیر مستقیم دما بر روند و نمودار تنش و کرنش نمونه‌های پلی آمید-الیاف شیشه موجود در آزمون اشاره دارد و شبیه‌سازی در تمامی موارد مطابقت خوبی با نتایج تجربی داشته است [۳۷، ۳۸].



رئیل سوخت شاهین (دو پایه) نتایج شبیه‌سازی رئیل سوخت (دو پایه) نتایج آزمایشگاهی رئیل سوخت  
 شکل ۷ مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی بیشینه تغییر شکل در کل لوله سوخت در دو دمای مختلف

تنش تسلیم مواد پلی آمید-الیاف شیشه با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند. همچنین، کرنش و تغییر شکل یک نمونه پلی آمید-الیاف شیشه با درصد الیاف یکسان در آزمون کشش در دمای بالاتر به طور چشمگیری افزایش می‌یابد [۳۷]. این روند تغییرات دما برافزایش تغییر شکل قطعه در شکل ۷ قابل مشاهده است. همان‌گونه که در شکل ۷ گزارش شده، قطعه در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد دارای اختلاف تغییر شکل بیشتری نسبت به نتایج شبیه‌سازی شده است که می‌توان به وجود ناخالصی، تأثیر دما بر خواص ماده و تخلخل در مواد تشکیل دهنده قطعه [۳۹] در نتایج آزمایشگاهی نسبت داد. علاوه بر این، کشش پلاستیکی این مواد در دماهای مختلف همراه با اثر نرم شدگی پیوسته حرارتی و شروع سخت‌شوندگی در کرنش قطعه همراه است که به تکامل جهت‌گیری زنجیره‌های درون مواد اشاره دارد [۳۹، ۴۰]. تغییرات در افزایش تنش قطعه همراه با تغییر شکل در اثر افزایش دما را می‌توان به این خاصیت از مواد این قطعه نسبت داد که نتایج آن در بررسی تنش‌های وارد بر قطعات لوله سوخت ارائه شده است.

## ۴- نتایج و بحث

نتایج تحلیل تغییر شکل لوله سوخت در دو نوع طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) و نوع ساده (دوپایه) در شکل ۸ در سه بازه دمای ۲۲ درجه، ۸۵ درجه و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد ارائه گردیده است. همچنین، تغییر شکل لوله‌های سوخت به صورت تشدید شده در شکل نشان داده شده است تا نقاط تغییر شکل در بازه‌های دمایی مختلف قابل‌شناسایی باشد. افزایش دما بر مقدار تغییر شکل لوله‌های سوخت تأثیر مستقیم دارد و لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) بیشترین مقدار تغییر شکل را در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۰٫۶ میلی‌متر در قسمت میانی لوله سوخت نشان داده است.

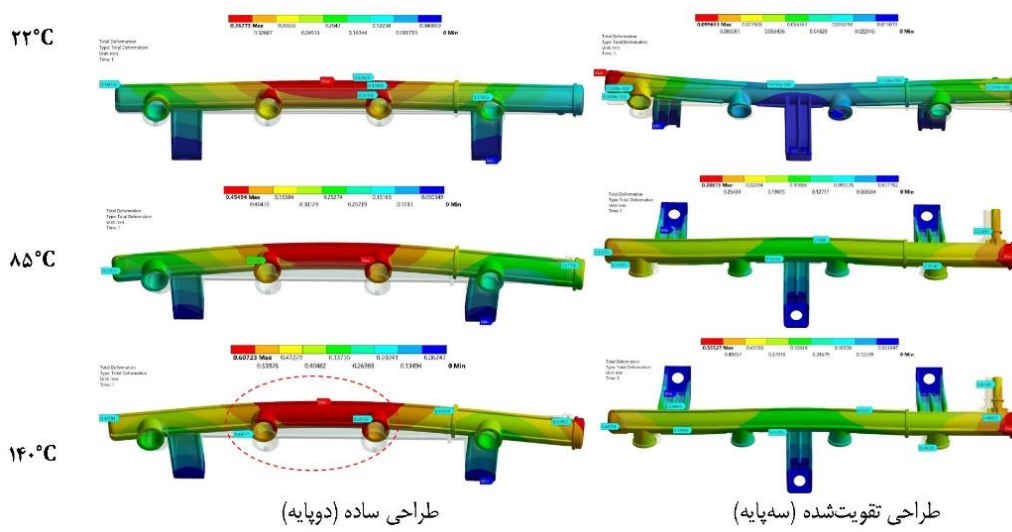
پایه‌های لوله‌های سوخت، به دلیل ثابت بودن و قرارگیری بر روی سطح مونتاژی در موتور، در هر دو نوع طراحی دارای کمترین مقدار تغییر شکل می‌باشند. علاوه بر این، وقوع بیشترین مقدار تغییر شکل در قسمت میانی قطعه لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) احتمال نشتی سوخت از محل اتصال افشانه‌ها را به شدت افزایش می‌دهد. در مقابل، مقدار تغییر شکل در لوله سوخت طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۰٫۵۵ میلی‌متر است که در قسمت انتهایی لوله سوخت است. تنش فون میسر برای پیش‌بینی تسلیم و توزیع تنش مواد تحت بارگذاری در این تحلیل استفاده می‌شود.

تنش فون میسر در معادله ۴ از معادلات حاکمه ارائه شده است و گستردگی و توزیع تنش بر روی نقاط مختلف قطعه را ارائه می‌دهد. کانتورهای توزیع تنش در لوله‌های سوخت در شکل ۹ ارائه گردیده است و نقاط نزدیک به پایه‌های لوله سوخت متحمل بیشترین مقدار تنش می‌گردد. همچنین، مقدار تنش با افزایش دمای اعمال شده بر لوله‌های سوخت تأثیر مستقیم دارد و لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) بیشترین تنش را در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۱۴۲٫۹۵ مگاپاسکال در قسمت پایه‌های لوله سوخت نشان می‌دهد. بیشترین تنش در لوله سوخت طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۱۵۳٫۸۹ مگاپاسکال است که در قسمت پایه میانی لوله سوخت است. قرار دهی پایه میانی در لوله سوخت طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) باعث کاهش مقدار تغییر شکل قطعه لوله سوخت و افزایش مقدار تنش در قسمت پایه میانی در دمای کارکردی موتور گردید.

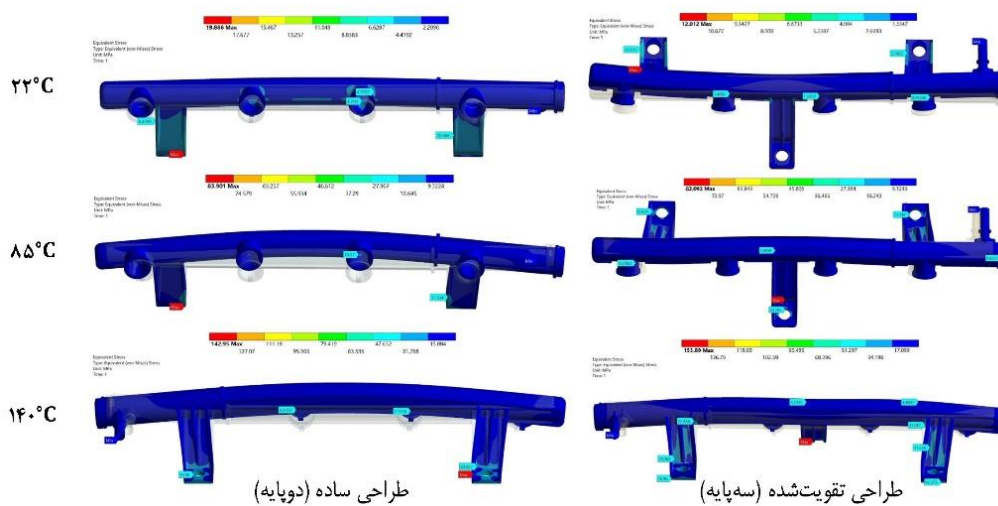
در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد، تأثیر ایجاد پایه تقویتی (سه‌پایه) در کاهش تغییر شکل قطعه و متغیر تنش بیشینه در مقایسه با طراحی نوع ساده (دوپایه) چشمگیر بوده است. قطعه طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) با افزایش تعداد پایه‌ها که همراه با افزایش سطح، گستردگی و کاهش تمرکز تنش است به کاهش تغییر شکل و رشد کمتر بیشینه تنش نسبت به طراحی نوع ساده (دوپایه) منجر گردیده است. درحالی‌که در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد، تنش حرارتی بر قطعه غالب می‌گردد و بیشترین مقدار تنش در سطح زیرین پایه قطعه تقویت‌شده (سه‌پایه) وارد می‌گردد.

نتایج بیشینه تغییر شکل و بیشینه تنش در نقاط نشیمنگاه‌های افشانه و کل قطعه در هر یک از لوله‌های سوخت در دماهای مختلف به ترتیب در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ ارائه گردیده است. تغییر شکل در لوله‌های سوخت با افزایش دما نرخ صعودی دارد و استفاده از پایه کمکی در کاهش تغییر شکل در لوله سوخت طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) مؤثر واقع بوده است. نتایج شبیه‌سازی در دمای ۸۵ درجه سانتی‌گراد با مقدار بیشینه تغییر شکل ۰٫۲۸ میلی‌متر در ناحیه انتهایی لوله سوخت در شکل ۸-الف این موضوع را نشان می‌دهد.

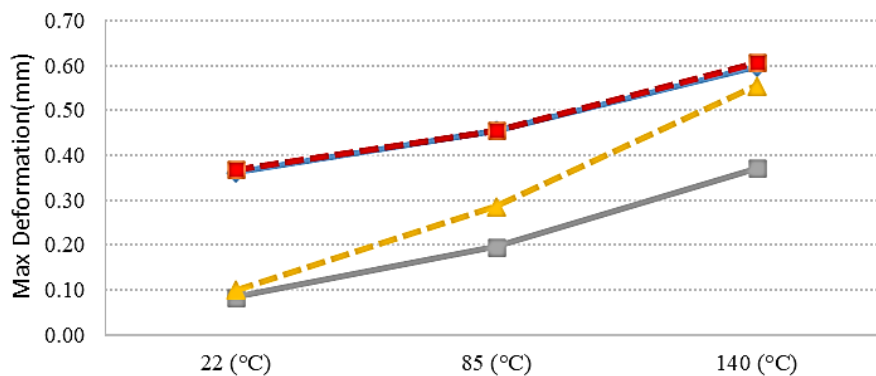
بیشترین تغییر شکل در نقاط نشیمنگاه‌های افشانه و کل قطعه در سه بازه دمای ۲۲، ۸۵ و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد مربوط به قطعه لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) است که در شکل ۱۰ ارائه گردیده است. بیشترین مقدار تغییر شکل در محل افشانه‌های لوله سوخت نوع ساده (دوپایه) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد با مقدار ۰٫۵۹ میلی‌متر است. بیشترین مقدار تغییر شکل در محل افشانه‌های لوله سوخت نوع ساده (دوپایه) به امکان وجود نشت سوخت از محل نشیمنگاه لوله سوخت اشاره خواهد داشت. همچنین، بیشترین تغییر شکل در نقاط نشیمنگاه‌های افشانه لوله سوخت طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۰٫۲۲۶ میلی‌متر کمتر از قطعه لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) است.



شکل ۸ تغییر شکل در لوله سوخت شاهین



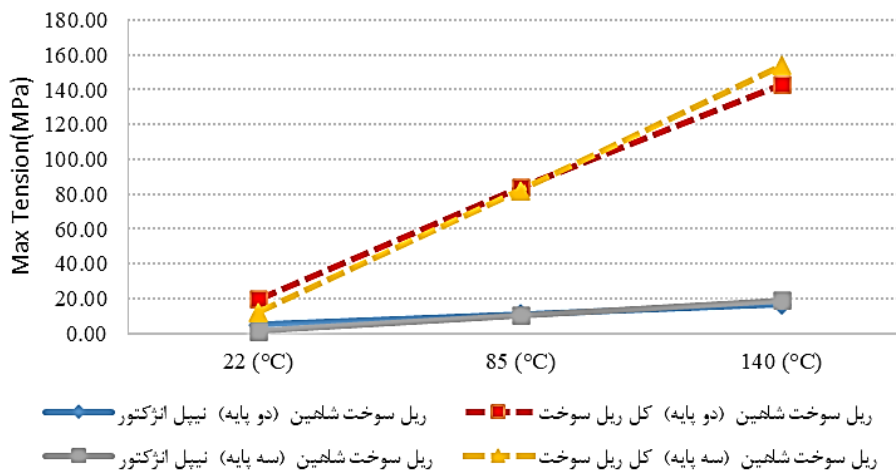
شکل ۹ توزیع تنش در لوله سوخت شاهین



شکل ۱۰ بیشینه تغییر شکل در نقاط نشیمنگاه‌های افشانه و کل قطعه لوله سوخت در سه دمای مختلف

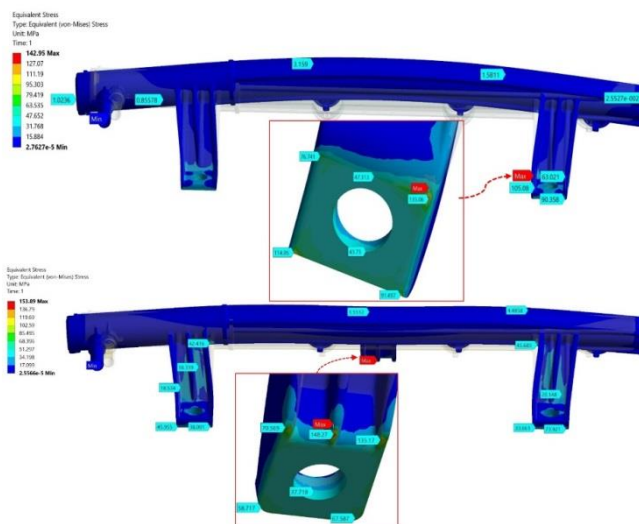
ریل سوخت شلحین (دو پایه) کل ریل سوخت (دو پایه) ■ - ریل سوخت شلحین (سه پایه) نیپیل انژکتور ◆ -  
 ریل سوخت شلحین (سه پایه) نیپیل انژکتور ■ - ریل سوخت شلحین (دو پایه) کل ریل سوخت (سه پایه) ▲ -

بیشترین مقدار تنش در کل قطعه در شکل ۱۱ مربوط به لوله سوخت طراحی تقویت شده (سه پایه) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد است. لوله سوخت طراحی تقویت شده (سه پایه) به منظور کنترل و کاهش تغییر شکل قطعه با ایجاد یک پایه در وسط قطعه، متحمل بیشترین مقدار تنش در سطح زیرین پایه در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد می‌گردد. همچنین، بیشترین توزیع تنش در طراحی نوع ساده (دوپایه) به پایه ابتدایی (سمت راست) لوله سوخت منتقل شده است.



شکل ۱۱ بیشینه تنش در نقاط نشیمنگاه‌های افشانه و کل قطعه لوله سوخت در سه دمای مختلف

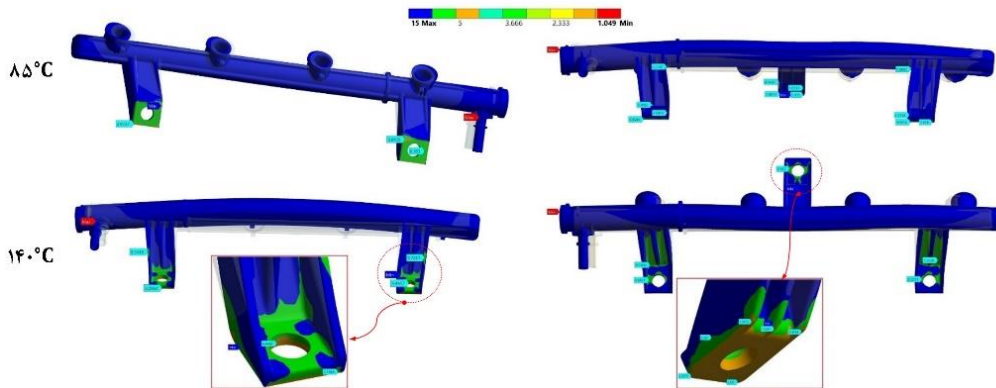
یکی از دلایل این توزیع تنش که بر پایه سمت راست متمرکز است، ضخامت و سطح مقطع کمتر بدنه لوله سوخت در آن ناحیه است و جزئیات در شکل ۱۲ ارائه شده است. به‌طور کلی، ضخامت دیواره بدنه اصلی لوله سوخت از ابتدا تا انتهای لوله سوخت به دلیل نوع طراحی خاص قطعه با یک شیب افزایشی همراه است. همان‌طور که مشاهده می‌شود لبه‌های کناری پایه لوله سوخت دارای تمرکز تنش است.



شکل ۱۲ تنش بیشینه در ناحیه سطح زیرین پایه لوله سوخت شاهین طراحی ساده و تقویت شده (سه پایه) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد

بررسی ضریب اطمینان و تسلیم قطعات لوله سوخت در دو نوع طراحی تقویت شده (سه پایه) و نوع ساده (دوپایه) در شکل ۱۳ در دو دمای ۸۵ درجه و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد ارائه گردیده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود سطوح زیرین

پایه‌های لوله سوخت به دلیل قرارگیری به‌عنوان نقاط ثابت دارای بیشترین نرخ تنش و کمترین ضریب اطمینان می‌باشند. لبه‌های جانبی در سطوح زیرین هر لوله سوخت شاهد کمترین ضریب اطمینان بوده است. لوله سوخت با طراحی سه‌پایه توزیع کمتری از نقاط با ضریب اطمینان پایین در پایه‌های لوله سوخت نسبت به لوله سوخت طراحی دوپایه نشان می‌دهد.



شکل ۱۳ توزیع ضریب اطمینان در لوله سوخت شاهین، الف) طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه)، ب) طراحی ساده (دوپایه) در دو دمای ۸۵ و ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد

## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق اهمیت نشستی سوخت از سامانه لوله مشترک سوخت و عوامل مؤثر بر آن بررسی شد و به مقایسه لوله سوخت شاهین در دو نوع طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) و نوع ساده (دوپایه) در شرایط دمای کاری موتور پرداخته شد. لوله سوخت در طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) بهبود قابل‌توجهی در کنترل تغییر شکل در دمای بالا در مقایسه با لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) از خود نشان داد.

- بیشترین مقدار تغییر شکل در قسمت میانی قطعه لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) ایجاد شده است که احتمال نشستی سوخت از محل اتصال افشانه‌ها را به‌شدت افزایش می‌دهد. بیشترین مقدار تغییر شکل در محل افشانه‌های لوله سوخت نوع ساده (دوپایه) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد با مقدار ۰٫۵۹ میلی‌متر است. همچنین، بیشینه تغییر شکل در نقاط نشیمنگاه‌های افشانه لوله سوخت طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) در دمای ۱۴۰ درجه سانتی‌گراد به مقدار ۰٫۲۲۶ میلی‌متر کمتر از قطعه لوله سوخت طراحی ساده (دوپایه) است.
- در مقابل، پایه میانی در لوله سوخت طراحی تقویت‌شده (سه‌پایه) به دلیل مهار و جلوگیری از تغییر شکل قطعه متحمل بیشترین مقدار تنش در دمای کاری موتور گردید. همچنین، توزیع کمتری از نقاط با ضریب اطمینان پایین در قطعه لوله سوخت طراحی سه‌پایه در مقایسه با لوله سوخت طراحی دوپایه مشاهده گردید.

## فهرست علائم

$\sigma$	تنش، MPa
S.F.	ضریب اطمینان
A	مساحت، m <sup>2</sup>
E	ضریب کشسانی، Gpa
°C	درجه سانتی‌گراد

## علائم یونانی

$\rho$

چگالی،  $\text{g/cm}^3$

$\varepsilon$

کرنش

## References

- [1] Sureshkumar J, Sivanantham R, Natchimuthu K, Muthalagu A. An Approach towards Design of Plastic Fuel Rail for Automotive Application. SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility. 2019 Jan 9;1(2019-26-0164):102-12. doi: 10.4271/2019-26-0164.
- [2] Cavaglieri MR, Figueiredo FA, Cardia F, dos Reis G. Plastic welding process signature. SAE Technical Paper; 2012 Oct 2. doi: 10.4271/2012-36-0162
- [3] Guo HT. Study on fuel injection rate and fuel control strategy of high pressure common rail fuel injection system (Doctoral dissertation, Doctor's Thesis, Shanghai Jiao Tong University, School of Mechanical and Power Engineering). 2001.
- [4] Hematian R, Hassan-Beygi SR, Massah J, Hajjalimohammadi A. Numerical investigation the effect of accumulator on reducing the pressure waves in a common rail fuel injection system of diesel engine. The Journal of Engine Research. 2022 Sep 23;68(68):31-8. doi: 10.22034/ER.2022.701023 [In Persian]
- [5] Mohebbi M, Aziz AA, Hamidi A, Hajjalimohammadi A, Hosseini V. Modeling of pressure line behavior of a common rail diesel engine due to injection and fuel variation. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2017 Mar;39:661-9. doi: 10.1007/s40430-016-0573-z
- [6] Krogerus TR, Hyvönen MP, Huhtala KJ. A survey of analysis, modeling, and diagnostics of diesel fuel injection systems. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2016 Aug 1;138(8):081501. doi: 10.1115/1.4032417
- [7] Viderščak D, Schauerperl Z, Ormuž K, Šolić S, Nikšić M. Failure analysis of high-pressure fuel injection lines. Engineering failure analysis. 2021 Mar 1;121:105176. doi: 10.1016/j.engfailanal.2020.105176
- [8] Lee E. A case analysis of a car fire that broke out due to fuel leakage from an injector. Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation. 2018 Aug 31;18(5):137-44. doi: 10.9798/KOSHAM.2018.18.5.137
- [9] Sarwar A, Lu X. Leak detection, localization, and prognosis of high pressure fuel delivery system. In Annual Conference of the PHM Society 2018 Sep 24 (Vol. 10, No. 1). doi: 10.36001/phmconf.2018.v10i1.498
- [10] Yakimov IV, Bondarenko EV, Krivtsov SN, Krivtsova TI. Leak detection method for electrohydraulic injectors of diesel engines in operation. In International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018) 2018 May (pp. 448-452). Atlantis Press. doi:10.2991/avent-18.2018.86
- [11] Kang J, Hu H. Vibration detection & diagnosis for high-pressure fuel pipe of diesel engine. In International Conference on Information Acquisition, 2004. Proceedings. 2004 Jun 21 (pp. 127-129). IEEE. doi: 10.1109/ICIA.2004.1373334
- [12] Sethy GK, Parikh R. Finite Element Analysis based Investigation to Evaluate Sealing Capability of High-Pressure Fuel Line Joints in IC Engine. SAE Technical Paper; 2021 Sep 22. doi: 10.4271/2021-26-0364
- [13] Bae JH, Kim MS, Song MJ, Jung SY, Kim C. A study on optimal design and fatigue life of the common rail pipe. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. 2011 Jun;12:475-83. doi: 10.1007/s12541-011-0061-4
- [14] Patil C, Askhedkar R, Ghorpade R, Jomde A. Finite Element and Experimental Vibration Analysis of High-Pressure Fuel Injection Pipe for 8-Cylinder V Diesel Engine. Journal of University of Shanghai for Science and Technology. 2021;23(3):224-33. doi: 10.51201/Jusst12676
- [15] Zhang J, Li W, Lin J, Qiu Y, Yuan Y, Zhou T. Failure analysis of a high-pressure fuel pipe of engine. Engineering Failure Analysis. 2019 Sep 1;103:70-81. doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.04.040
- [16] Qian D, Liao R, Xiang J, Sun B, Wang S. Thermal fluid-structure interaction analysis on the piston/cylinder interface leakage of a high-pressure fuel pump for diesel engines. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. 2017 Jun;231(6):791-8. doi: 10.1177/1350650116679266
- [17] Vinarcik EJ. Investigation of Fuel System Component O-Ring Interface Design & Assembly. SAE Technical Paper; 2009 Apr 20. doi: 10.4271/2009-01-1180
- [18] Ferrari A, Paolicelli F. Modal analysis of fuel injection systems and the determination of a transfer function between rail pressure and injection rate. Journal of Engineering for Gas Turbines and

- Power. 2018 Nov 1;140(11):112808. doi: 10.1115/1.4039348
- [19] Abramek KF, Stoeck T, Osipowicz T. Statistical evaluation of the corrosive wear of fuel injector elements used in common rail systems. *Strojnicki vestnik-Journal of Mechanical Engineering*. 2015 Feb 15;61(2):91-8.
- [20] Zhao J, Guo N, Lu X, Chen J, Chen S, Zhang H. Numerical research on characteristics of fuel heating and subcooling in the nozzle hole of common rail injector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2023 Jan 1;200:123508.
- [21] Chomik Z, Łagowski P. The analysis of mechanical damage of common rail injectors. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*. 2019;64(1):13-20.
- [22] Ferrari A, Mittica A, Pizzo P, Wu X, Zhou H. New methodology for the identification of the leakage paths and guidelines for the design of common rail injectors with reduced leakage. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. 2018 Feb 1;140(2):022801. doi: 10.1115/1.4037862
- [23] Duan L, Yuan SQ, Hu LF, Yang WM, Xia XL. Injection performance and cavitation analysis of an advanced 250 MPa common rail diesel injector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2016 Feb 1;93:388-97. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.10.028
- [24] Fan L, Bai Y, Ma X, Song E. Analysis upon fuel injection quantity variation of common rail system for diesel engines. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016 Jul;30:3365-77. doi: 10.1007/s12206-016-0646-z
- [25] Hajjalimohammadi A, Abdullah A, AghaMirsalim M, Chitsaz I. Experimental and numerical investigation on the macroscopic characteristics of the jet discharging from gaseous direct injector. *Journal of mechanical science and technology*. 2014 Feb;28:773-81. doi: 10.1007/s12206-013-1142-3
- [26] Saipa Motor Gearboxes & Axles Automotive Manufacturing Company. press release "ECN 2448: TN289-22130". Technical database: MEGA MOTOR. REV: E2202170. 2023. [In Persian]
- [27] PSA Peugeot-Citroën. B22 2820. press release "PSA Peugeot Citroën PETROL ENGINE PLASTIC INJECTION RAIL". 2003.
- [28] Picoplast. GRILON BGZ-30/2. "TECHNICAL DATA SHEET GRILON BGZ-30/2". EMS-Grivory. 2015.
- [29] Illing T, Gotzig H, Schoßig M, Bierögel C, Grellmann W. Influence of hygrothermal aging on poisson's ratio of thin injection-molded short glass fiber-reinforced PA6. *Fibers*. 2016 May 17;4(2):17.
- [30] Holmström PH, Hopperstad OS, Clausen AH. Anisotropic tensile behaviour of short glass-fibre reinforced polyamide-6. *Composites Part C: Open Access*. 2020 Oct 1;2:100019. doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100019
- [31] Ksouri I, Haddar N. Long term ageing of polyamide 6 and polyamide 6 reinforced with 30% of glass fibers: temperature effect. *Journal of Polymer Research*. 2018 Jul;25:1-2. doi: 10.1007/s10965-018-1551-1
- [32] Ksouri I, De Almeida O, Haddar N. Long term ageing of polyamide 6 and polyamide 6 reinforced with 30% of glass fibers: physicochemical, mechanical and morphological characterization. *Journal of Polymer Research*. 2017 Aug;24:1-2. doi: 10.1007/s10965-017-1292-6
- [33] Ali M, Alam K, Ohioma E. Energy absorption characteristics of a carbon fiber composite automobile lower rail: a comparative study. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition 2015 Nov 13 (Vol. 57571, p. V014T11A023)*. American Society of Mechanical Engineers. doi: 10.1115/IMECE2015-50486
- [34] Sun JQ, Wang X, Bergman LA. Fatigue analysis of non-linear structures with von Mises Stress [1]. *Journal of sound and vibration*. 2001 Aug 30;245(5):947-52. doi: 10.1006/jsvi.2001.3567
- [35] Ansys Mechanical AP. *Structural Analysis Guide*. Ansys Inc. 2017.
- [36] Budynas RG, Nisbett JK. *Shigley's mechanical engineering design*. New York: McGraw-Hill; 2011.
- [37] da Costa Mattos HS, Brandão JF, Amorim FC, Araujo PS, Reis JM. A unified expression to estimate the stress-strain curve of polyamides at different temperatures. *Materials Research Express*. 2018 Oct 12;6(1):015304.
- [38] Şerban DA, Weber G, Marşavina L, Silberschmidt VV, Hufenbach W. Tensile properties of semi-crystalline thermoplastic polymers: Effects of temperature and strain rates. *Polymer Testing*. 2013 Apr 1;32(2):413-25.
- [39] Mouritz AP, Gibson AG. *Fire properties of polymer composite materials*. Springer Science & Business Media; 2007 Jan 30.
- [40] Reis JM, Pacheco LJ, da Costa Mattos HS. Influence of the temperature and strain rate on the tensile behavior of post-consumer recycled high-density polyethylene. *Polymer testing*. 2013 Dec 1;32(8):1576-81.