



بررسی تأثیر تغییر ضخامت لایه‌های دست فدر عقب کامیونت دایون سفارشی بر قابلیت اطمینان عمر دست فدر

پروین خسروی^۱، نیما همتا^{۱*}، حامد دیلمی عضدی^۲

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

۲- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: n.hamta@arakut.ac

اطلاعات مقاله	چکیده
مقاله پژوهشی دریافت: ۱۹ تیر ۱۴۰۴ پذیرش: ۲۳ آذر ۱۴۰۴	این مقاله بهینه‌سازی طراحی دست فدر عقب کامیونت دایون را با رویکردی چندرشته‌ای و با تأکید بر بهبود همزمان عملکرد مکانیکی، قابلیت اطمینان و راحتی سرنشینان مورد بررسی قرار داده است. مقاله حاضر با ترکیب روش‌های تحلیلی، شبیه‌سازی‌های عددی و آزمون‌های تجربی به انجام رسیده است. در مرحله مدل‌سازی، طراحی پارامتریک دقیق با در نظر گرفتن تمامی جزئیات هندسی و مشخصات مواد فولاد آلیاژی 55Cr3 در محیط SolidWorks انجام شد. مدل ایجاد شده سپس به نرم‌افزار ANSYS منتقل شد و تحت تحلیل‌های المان محدود شامل شبیه‌سازی غیرخطی رفتار تماسی بین لایه‌ها، ارزیابی توزیع تنش تحت بارگذاری‌های ترکیبی و محاسبه عمر خستگی قرار گرفت. آزمون‌های تجربی شامل آزمون‌های خستگی مطابق استاندارد ASTM و ارزیابی ضریب فنریت با دستگاه تست RANJBAR QCS98 انجام شد. تحلیل آماری داده‌ها در نرم‌افزار Minitab نشان داد که تغییرات اعمال‌شده در ضخامت، ضمن حفظ ضریب فنریت در محدوده مطلوب (انحراف معیار کمتر از ۲ درصد)، منجر به بهبود ۱۸/۵ درصدی عمر خستگی و کاهش ۱۲/۳ درصدی تنش شده است. این بهبود در عملکرد، با افزایش ناچیز کمتر از ۴ درصد در هزینه تولید همراه بوده که توجیه‌پذیری اقتصادی طراحی جدید را نشان می‌دهد.
کلیدواژگان: بهینه‌سازی فدر طراحی فدر تخت قابلیت اطمینان کامیونت دایون	

Investigating the effect of changing the thickness of rear spring layers of a Custom-Made Dayun Truck on the life reliability of spring

Parvin Khosravi¹, Nima Hamta^{1*}, Hamed Deilami Azodi^{1,2}

1- Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* Corresponding Author's Email: n.hamta@arakut.ac

Article Information	Abstract
Original Research Paper Received: 10 July 2025 Accepted: 14 December 2025	This paper presents a multidisciplinary design optimization of the rear leaf spring for a Dayun truck, aiming to simultaneously enhance mechanical performance, reliability, and ride comfort. The research methodology integrates analytical calculations, advanced numerical simulations, and systematic experimental tests. A detailed parametric model, incorporating all geometric details and the material properties of 55Cr3 alloy steel, was developed in SolidWorks software. This model was subsequently imported into ANSYS software for comprehensive finite element analysis (FEA), including nonlinear contact simulation between layers, stress distribution assessment under combined loading, and fatigue life prediction. Experimental validation involved fatigue tests conducted in accordance with ASTM standards and spring rate evaluation using a RANJBAR QCS98 testing machine. Statistical analysis of the results in Minitab software demonstrated that the implemented thickness modifications, while maintaining the spring rate within the desired specification (standard deviation < 2%), yielded a significant 18.5% improvement in fatigue life and 12.3% reduction in maximum stress. These performance enhancements achieved with only a marginal production cost increase of less than 4%, confirming the economic viability and practical feasibility of the optimized design.
Keywords: Spring Optimization Spring Design Reliability Dayun Truck	

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Khosravi P, Hamta N, Deilami Azodi, H. Investigating the effect of changing the thickness of rear spring layers of a Custom-Made Dayun Truck on the life reliability of spring. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025 Dec 22;12(10):1-16. doi: 10.22034/ijme.2025.532669.2099 [In Persian]

۱- مقدمه

امروزه راحتی و ایمنی سرنشینان خودروها به‌عنوان مهم‌ترین اهداف سازندگان خودروی مدرن مطرح است. برای دستیابی به این اهداف، سازندگان خودرو از سیستم‌های مختلفی بهره می‌برند که هر کدام نقش حیاتی در تأمین این اهداف دارند. یکی از مهم‌ترین سیستم‌ها در این راستا، سیستم تعلیق خودرو است [۱]. سیستم تعلیق با عملکردهای مختلف خود، موجب کاهش ارتعاشات و ضربات ناشی از عواملی همچون ترمز کردن، حرکت در پیچ‌ها و ناهمواری‌های سطح جاده می‌شود و از انتقال این ارتعاشات به سرنشینان جلوگیری می‌کند. سیستم تعلیق خودرو وظایف متعددی دارد که از جمله آنها می‌توان به دفع یا کاهش ضربات ناشی از ناهمواری‌های جاده، جلوگیری از انحراف و واژگونی خودرو، نگهداری تنظیم صحیح چرخ‌ها، ثابت نگه‌داشتن ارتفاع استاندارد خودرو، پشتیبانی از وزن خودرو و تنظیم نحوه توزیع آن و همچنین حفظ تماس تایرها با سطح جاده اشاره کرد [۲]. این سیستم از اجزای مختلفی تشکیل شده است، اما اصلی‌ترین اجزای آن فنر و کمک فنر هستند که به‌عنوان اجزای کلیدی در حفظ کارایی سیستم تعلیق شناخته می‌شوند. در این راستا، تولید کنندگان با توجه به اهمیت سیستم تعلیق در ایمنی و راحتی سرنشینان خودروها، همواره در تلاش هستند تا با تولید محصولات متنوعی همچون فنر تخت به‌صورت لایه و دست فنر، فنر پارابولیک و فرم‌دار، بوش‌های فولادی، برنجی، لاستیکی و ترکیبی، لاتون در ابعاد مختلف، سنتربولت^۱، یوبلت^۲، میله قامه^۳ و دیگر متعلقات مربوط به سیستم فربندی خودروها، نقش مؤثری در تأمین کیفیت و رضایت مشتریان ایفا کند. همچنین با بهره‌گیری از طرح‌های دقیق و توانمندی‌های فنی، سعی داشته‌اند نیازهای مختلف مشتریان خود را به‌موقع تأمین بکنند. این مقاله، به بررسی و تحلیل سیستم تعلیق خودرو، به‌ویژه اهمیت اجزای اصلی آن مانند فنر و کمک فنر، و همچنین ارزیابی تأثیرات مختلف طراحی این اجزا بر عملکرد کلی سیستم تعلیق و راحتی و ایمنی سرنشینان می‌پردازد. در مطالعات گذشته بررسی قابلیت اطمینان از زوایای مختلفی در مطالعات گذشته بررسی قابلیت اطمینان از زوایای مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است. احمدی زر و همکاران در پژوهشی با عنوان بهینه‌سازی همزمان قابلیت اطمینان، هزینه و وزن سیستم با امکان انتخاب استراتژی افزونگی و لحاظ کردن سیاست‌های تخفیف به بهینه‌سازی همزمان قابلیت اطمینان، هزینه و وزن سیستم‌های سری-موازی با امکان انتخاب استراتژی افزونگی و در نظر گرفتن سیاست‌های تخفیف پرداخته و روش‌های کارآمدی برای افزایش عمر مفید قطعات پیشنهاد می‌کند [۳]. قلی‌نژاد و همکاران [۴] در پژوهشی به بهینه‌سازی قابلیت اطمینان رایانه مرکزی یک کاوشگر با استفاده از داده‌های طول عمر اجزا پرداخته و روش‌های پیشرفته‌ای برای افزایش عمر مفید و قابلیت اطمینان سیستم معرفی کردند. عباسی و همکاران [۵] به بررسی جامع روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان در سیستم‌های چند جزئی پرداخته و بهینه‌سازی عمر قطعات را با استفاده از مدل‌های مختلف بررسی کردند. وانگ و همکاران [۶] به بررسی جامع روش‌های بهینه‌سازی طراحی با تمرکز بر قابلیت اطمینان پرداخته‌اند. آنها کاربردها و چالش‌های بهینه‌سازی قابلیت اطمینان را در مهندسی سازه‌ها و سیستم‌های مکانیکی بررسی کرده و بهبودهایی را در افزایش عمر مفید قطعات ارائه دادند. یانگ و لی [۷] با استفاده از روش سطح پاسخ احتمالاتی به بهینه‌سازی طراحی فنرهای فشاری مارپیچ پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که می‌توان با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها، عمر فنر را به طور قابل توجهی افزایش داد. آنالیز عددی و تجربی عمر خستگی فنر تخت کامیون ولوو مدل FH12 به بررسی دوام فنرهای تخت در خودروهای سنگین می‌پردازد. این پژوهش با استفاده از روش‌های عددی (تحلیل اجزاء محدود) و آزمون‌های تجربی به ارزیابی عمر خستگی این فنرها تحت بارگذاری‌های سیکلی پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که عمر خستگی فنرهای مورد بررسی در شرایط استاندارد به ۲۰۰,۰۰۰ سیکل نمی‌رسد. با این حال، کاهش ۲۰ درصدی بار اعمالی می‌تواند عمر فنر را به سطح مطلوب و استاندارد برساند. این مطالعه تأکید دارد که تحلیل دقیق بارگذاری و طراحی بهینه فنرها نقش حیاتی در افزایش دوام و عمر مفید آنها دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند در فرایند طراحی و بهینه‌سازی فنرهای تخت در صنعت خودروسازی مورد استفاده قرار گیرد [۸]. شکست‌نگاری ماکروسکوپی و واکاوی علل شکست فنر تخت کامیون ولوو مدل FM9 به بررسی علل شکست فنرهای تخت در کامیون‌های ولوو مدل FM9 می‌پردازد. این پژوهش با استفاده از روش شکست‌نگاری ماکروسکوپی به تحلیل سطح شکست فنرهای آسیب‌دیده پرداخته و عوامل مؤثر در وقوع شکست را شناسایی کرده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که تمرکز تنش در نقاط خاصی از فنر، ناشی از طراحی نامناسب یا وجود عیوب سطحی، می‌تواند منجر به آغاز و گسترش ترک و در نهایت شکست فنر شود. همچنین، شرایط نامناسب محیطی مانند خوردگی و بارگذاری‌های سیکلی

¹ Centerbolt² U-bolt³ Crankset

سنگین نیز در تسریع فرایند شکست نقش دارند. این پژوهش بر اهمیت بازرسی دقیق فنرها و رعایت استانداردهای طراحی و نگهداری به منظور جلوگیری از شکست‌های ناگهانی و افزایش ایمنی تاکید دارد [۹]. جعفری و همکاران [۱۰] در پژوهشی به بررسی توزیع تنش پسماند در فرایند ساخت فنرهای تخت با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند. با توجه به اهمیت تنش‌های پسماند در تعیین رفتار مکانیکی و عمر فنر، آنها نحوه توزیع این تنش‌ها را در طول فرایند شکل‌دهی به طور دقیق تحلیل کردند. مدل‌سازی عددی با استفاده از روش اجزای محدود (FEM) انجام شد. در این مطالعه، مدل هندسی دقیق از فنر تخت با در نظر گرفتن هندسه پیچیده و شرایط مرزی خاص ساخته شد. خواص مواد مورد استفاده در مدل، براساس داده‌های تجربی تعیین شدند. علاوه بر این، مطالعه آنها به بررسی تأثیر پارامترهای فرایند ساخت مانند سرعت شکل‌دهی، دمای فرایند و نوع ماده بر توزیع تنش پسماند پرداخته است. مطالعه انجام شده، بینش‌های ارزشمندی را در مورد بهینه‌سازی فرایند ساخت و بهبود عملکرد فنرهای تخت ارائه می‌دهد. رحیمی [۱۱] به بررسی و مقایسه عمر خستگی فنرهای تخت ساخته شده از مواد کامپوزیتی و فلزی پرداخته است. هدف اصلی، تحلیل رفتار خستگی این دو نوع فنر در شرایط بارگذاری مشابه و تعیین تفاوت‌های موجود در عمر مفید آنها است. در این پژوهش، روش‌های آزمایشگاهی شامل آزمون‌های خستگی تجربی و تحلیل‌های عددی، از جمله تحلیل اجزاء محدود (FEA)، برای ارزیابی توزیع تنش و نقاط بحرانی در فنرها به کار گرفته شد. نتایج نشان داد که فنرهای کامپوزیتی، با وزن کمتر و مقاومت مکانیکی بالا، در مقایسه با فنرهای فلزی، معمولاً عمر خستگی بالاتری دارند، اما این عمر به عوامل مختلفی مانند روش ساخت، کیفیت مواد و شرایط بارگذاری بستگی دارد. لویز و همکارانش [۱۲] پیش‌بینی عمر خستگی یک عنصر مکانیکی را با استفاده از توزیع وایبول بررسی کردند. آنها از توزیع وایبول برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عمر خستگی یک قطعه مکانیکی استفاده کردند که می‌تواند برای تحقیقاتی که بر روی پیش‌بینی عمر مفید قطعات و به خصوص در زمینه خستگی تمرکز دارند، بسیار مفید باشد. همزی و همکاران [۱۳] به بررسی عمر خستگی فنر خودرو با استفاده از تحلیل المان محدود تحت بارهای کرنش تصادفی در حوزه زمانی پرداختند. آنانون یاموس و همکاران [۱۴] به بررسی رابطه بین کرنش مؤثر و قابلیت اطمینان خستگی در مواد مهندسی تحت بارگذاری چرخه‌ای پرداختند. با استفاده از توزیع مقادیر حدی، رفتار تنش-کرنش در شرایط بارگذاری شدید مدل‌سازی شده و تأثیر آن بر عمر خستگی تحلیل شده است. داده‌های تجربی از آزمون‌های خستگی روی نمونه‌های فولادی و کامپوزیتی تحت بارهای متغیر با دامنه بالا جمع‌آوری شده است. نیا و همکارانش [۱۵] در یک پژوهش به پیش‌بینی عمر خستگی فنرهای لول در سیستم تعلیق خودروها با استفاده از تحلیل مودال و تبدیل فوری معکوس پرداخته‌اند. داده‌های ارتعاشی از آزمون‌های عملی روی فنرهای تحت بارگذاری متناوب جمع‌آوری شدند و با استفاده از مدل‌های مورو و کافین-منسون تحلیل شدند. خدري و همکارانش [۱۶] به بررسی و توسعه استراتژی‌های نگهداری پیشگیرانه برای افزایش قابلیت اطمینان فنرهای تخت در خودروهای سنگین (مانند کامیون‌ها و اتوبوس‌ها) پرداخته‌اند. مطالعه با هدف بهبود عملکرد و عمر مفید این قطعات حیاتی در ناوگان حمل و نقل، انجام شده است. آنها با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی پویا و تحلیل مونت کارلو، به بررسی عوامل کلیدی مؤثر بر شکست فنرهای تخت پرداختند. این عوامل شامل بارگذاری نامتعادل (که می‌تواند ناشی از بارهای غیرمنتظره و توزیع نامناسب بار باشد)، خوردگی (که می‌تواند به دلیل مواجهه با محیط‌های خورنده و رطوبت ایجاد شود) و تغییرات در خواص مواد (که می‌تواند به دلیل افزایش سن و یا شرایط عملیاتی نامناسب رخ دهد) بوده‌اند. برای جمع‌آوری داده‌های موردنیاز، این پژوهش از سیستم‌های نظارتی موجود در ناوگان حمل و نقل استفاده کرده و داده‌های مربوط به عملکرد و شرایط فنرهای تخت جمع‌آوری شده است. سپس، با استفاده از مدل‌های احتمالاتی، به تحلیل داده‌ها پرداخته و به شناسایی الگوهای مرتبط با شکست و پیش‌بینی احتمال خرابی آینده پرداخته شده است. نتایج این مطالعه، استراتژی‌های نگهداری پیشگیرانه‌ای را ارائه می‌دهد که می‌توانند به منظور افزایش قابلیت اطمینان و کاهش وقوع خرابی‌های فنرهای تخت به کار گرفته شوند. این استراتژی‌ها احتمالاً بر مبنای تحلیل ریسک و تعیین بازه‌های تعمیر و نگهداری بر اساس داده‌های جمع‌آوری شده و مدل‌های آماری توسعه یافته‌اند. اهمیت این کار در کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، افزایش بهره‌وری ناوگان و بهبود ایمنی حمل و نقل است. در پژوهشی نشان داده شده که نرخ پیشروی تأثیر قابل توجهی بر زبری سطح و عمر خستگی در فرایند مکانیکی دارند. انتخاب بهینه پارامترها می‌تواند کیفیت ماشینکاری و دوام قطعه را بهبود بخشد [۱۷]. همچنین ضخامت دیواره فولاد زنگ‌نزن تأثیر مستقیمی بر توزیع تنش‌های پسماند دارد، به‌طوری‌که با افزایش ضخامت، الگوی توزیع تنش‌ها تغییر می‌کند. این یافته‌ها برای بهینه‌سازی طراحی لایه‌های فولاد تحت بارهای حرارتی و مکانیکی حائز اهمیت است [۱۸]. در پژوهشی دیگر با استفاده از روش‌های FORM و شبیه‌سازی مونت کارلو، قابلیت اطمینان مخازن کامپوزیتی تحت فشار محاسبه شده است. نتایج نشان می‌دهد طراحی بهینه با زاویه پیچش ۵۵ درجه و ضخامت کنترل‌شده، قابلیت اطمینان ۹۲/۷ درصد در فشار ۱۵ مگاپاسکال ایجاد می‌کند. تحلیل حساسیت

مشخص کرد خطای تولید در ضخامت ۲۰ میلی‌متر و زاویه الیاف ($\pm 5^\circ$) بیشترین تأثیر را بر نتایج دارد. روش FORM با دقت ۹۷ درصد نسبت به مونت کارلو، ابزار مناسبی برای ارزیابی سریع قابلیت اطمینان شناسایی شد. بارگذاری سیکلی سالانه ۰/۸۵ درصد از قابلیت اطمینان می‌کاهد که در مدل‌سازی لحاظ شده است [۱۹].

هدف مقاله حاضر، توسعه یک چارچوب بهینه‌سازی چندهدفه برای طراحی دست فنر عقب کامیونت دایون با هدف دستیابی همزمان به سه شاخص کلیدی عملکرد مکانیکی، قابلیت اطمینان و راحتی سرنشینان می‌باشد. نوآوری این تحقیق در ادغام روش‌های پیشرفته شبیه‌سازی المان محدود، آزمون‌های تجربی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندمعیاره، برای ایجاد توازن بهینه بین این اهداف متعارض است. فرضیه اصلی این پژوهش بر این مبنا استوار است که تغییرات کنترل شده در توزیع ضخامت لایه‌های فنر می‌تواند منجر به بهبود همزمان عمر خستگی، توزیع تنش و عملکرد دینامیکی سیستم شود. مهم‌ترین دستاوردهای علمی این تحقیق، شامل: (۱) توسعه یک مدل المان محدود اعتبارسنجی شده برای شبیه‌سازی رفتار غیرخطی تماس بین لایه‌های فنر، (۲) ارائه یک روش سیستماتیک برای بهینه‌سازی چندهدفه پارامترهای طراحی بر پایه الگوریتم ژنتیک، و (۳) استخراج روابط تجربی بین پارامترهای هندسی و شاخص‌های عملکردی می‌باشد. یکی از نوآوری‌های این پژوهش در ارائه راهکارهای عملی برای صنعت، جهت دستیابی به طراحی بهینه بدون نیاز به آزمون و خطاهای پرهزینه، و همچنین غنی‌سازی ادبیات فنی، در حوزه بهینه‌سازی چندمعیاره سیستم‌های تعلیق سنگین است.

۲- جنس و مشخصات دست فنر عقب کامیونت دایون مطابق درخواست مشتری

فنرها از جنس فولاد 55cr3 آلیاژی با کروم و کربن متوسط ساخته می‌شوند. فولاد 55cr3 یک فولاد آلیاژی با ترکیب شیمیایی خاص است که به‌طور گسترده در ساخت فنرهای تخت و سایر قطعات مکانیکی که نیاز به استحکام بالا، مقاومت در برابر خستگی و تحمل بارهای دینامیکی دارند، استفاده می‌شود. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی این فولاد آورده شده است. همچنین در جدول ۲ مشخصات دست فنر عقب کامیونت دایون مطابق درخواست مشتری آورده شده است.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی فولاد 55cr3 (مقادیر تقریبی) با استفاده از آزمون کوانتومتری

عنصر	درصد وزنی
کربن (C)	0.52-0.58
کروم (Cr)	0.07-0.1
منگنز (Mn)	0.07-0.1
سیلیسیم (Si)	0.15-0.35
فسفر (P)	حداکثر 0.035
گوگرد (S)	حداکثر 0.035

جدول ۲ مشخصات دست فنر عقب کامیونت دایون

مشخصات	مقدار
تعداد لایه‌های دست اصلی (n)	9
تعداد لایه‌های دست کمکی (n')	6
پهنای (b)	75 mm
میانگین ضخامت لایه‌های اصلی (h)	13
میانگین ضخامت لایه‌های کمکی (h')	11
مدول الاستیسیته (E)	$2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$
طول مرکز تا مرکز دست فنر اصلی (L)	1400 mm
طول مرکز تا مرکز دست فنر کمکی (L')	1070 mm
ضریب فاکتور دست اصلی (X)	1.31
ضریب فاکتور دست کمکی (X')	1
طول مرکز سنتر بولت تا مرکز چشم (S)	700mm
طول مرکز سنتر بولت تا سرلایه دست کمکی (S')	535 mm

۳- تأثیر تغییر ضخامت لایه‌ها بر قابلیت اطمینان

در این مطالعه، تأثیر تغییر ضخامت لایه‌ها بر قابلیت اطمینان سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. براساس نقشه‌های طراحی، تعداد لایه‌های اصلی ۹ لایه با ضخامت استاندارد ۱۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در این پژوهش قابلیت اطمینان براساس تغییر لایه‌ها به ضخامت‌های ۱۲ و ۱۴ میلی‌متر محاسبه می‌شود. پنج نمونه با تغییر ضخامت لایه‌ها در شرکت پارس فنر ساخته شد. این نمونه‌ها شامل لایه‌هایی با ضخامت‌های ۱۲ و ۱۴ میلی‌متر بودند.

۳-۱- آزمون فنرها براساس استاندارد JIS2710-3

برای ارزیابی عملکرد نمونه‌های فنر، از دستگاه تست فنر RANJBAR مدل QCS98 استفاده شد (شکل ۱). این دستگاه، با قابلیت اندازه‌گیری ضریب فنری (K)، ابزاری استاندارد و قابل اعتماد برای سنجش پاسخ فنر تحت بارگذاری است. ضریب فنریت، میزان مقاومت فنر در برابر تغییر شکل تحت نیروی خارجی را نشان می‌دهد و پارامتری کلیدی در تعیین عملکرد مکانیکی و قابلیت اطمینان فنر محسوب می‌شود.

روش آزمون به شرح زیر انجام شد:

۱. اندازه‌گیری ارتفاع اولیه:

ابتدا، ارتفاع قوس یا ارتفاع فنر در حالت بدون بارگذاری با دقت اندازه‌گیری شد. این مرحله، وضعیت اولیه فنر را قبل از اعمال هرگونه نیرو ثبت می‌کند و به عنوان مرجع برای محاسبات بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. استفاده از روش‌های اندازه‌گیری استاندارد (مانند استفاده از کولیس دیجیتالی با دقت میلی‌متر) و تکرار اندازه‌گیری‌های متعدد، دقت و اطمینان از داده‌های اولیه را افزایش می‌دهد. همچنین، شرایط محیطی (دما، رطوبت) در این مرحله ثبت و کنترل می‌شوند چرا که می‌توانند بر نتایج تأثیر بگذارند.

۲. اعمال بار و اندازه‌گیری جابجایی:

پس از ثبت ارتفاع اولیه، بار مشخص و استاندارد بر روی فنر اعمال شد. مقدار دقیق این بار، به مشخصات فنی و نوع تست مورد نظر بستگی دارد و باید در گزارش آزمون به طور کامل ذکر شود. استفاده از سیستم اندازه‌گیری دقیق و قابل اعتماد برای اعمال و کنترل بار (مانند دستگاه‌های وزن‌سنجی با دقت بالا) اهمیت بسزایی در صحت نتایج دارد. جابجایی فنر ناشی از بار اعمال‌شده با دقت، توسط دستگاه تست فنر (RANJBAR QCS98) اندازه‌گیری شد. این جابجایی، معیاری از تغییر شکل فنر در پاسخ به بار اعمال‌شده است. تکرار اعمال بار در چندین مرحله، و بررسی ثبات نتایج، برای اطمینان از دقت و تکرارپذیری آزمون ضروری است.

۳. محاسبه ارتفاع تحت بار:

با استفاده از اندازه‌گیری ارتفاع اولیه و جابجایی ثبت شده، ارتفاع فنر تحت بار مشخص، محاسبه شد. این مرحله، وضعیت فنر را در شرایط بارگذاری مشخص می‌کند و از اهمیت بالایی در ارزیابی عملکرد فنر برخوردار است. دقت در محاسبات و استفاده از فرمول‌های استاندارد و مرتبط با نوع فنر، برای بدست آوردن نتایج قابل اعتماد ضروری است.



شکل ۱ آزمون محاسبه ضریب فنریت فنر تخت

۳-۱-۱- تعیین ضریب فنریت

ضریب ثابت فنریت کمیتی است که رفتار الاستیک فنرهای تخت را تحت بارگذاری مشخص می‌نماید. این پارامتر به صورت نسبت نیروی اعمال شده به تغییر شکل ایجاد شده تعریف می‌گردد و بیانگر میزان مقاومت فنر در برابر تغییر شکل تحت بارهای خارجی است. ضریب فنریت تابعی از خواص ماده (مدول یانگ)، هندسه سازه (تعداد لایه‌ها، ابعاد مقطع و طول مؤثر) و آرایش ساختاری لایه‌ها می‌باشد. اهمیت این پارامتر در طراحی سیستم‌های تعلیق چندبعدی است. از جنبه دینامیکی، ضریب فنریت مستقیماً بر فرکانس طبیعی سیستم تأثیر گذاشته و در کنترل پاسخ ارتعاشی خودرو نقش تعیین‌کننده ایفا می‌نماید. در تحلیل استاتیکی، این پارامتر در تعیین توزیع بار بین محورهای خودرو و پیش‌بینی تغییر شکل سازه تحت بارگذاری کاربرد دارد. از منظر دوام و عمر خستگی، مقادیر بهینه ضریب فنریت می‌تواند تنش‌های موضعی را کاهش داده و منجر به افزایش عمر سرویس‌دهی قطعه شود.

در فرایندهای صنعتی، کنترل دقیق ضریب فنریت به عنوان معیاری کلیدی در تضمین کیفیت محصول نهایی محسوب می‌شود. انحرافات از مقادیر طراحی می‌تواند موجب بروز پدیده‌های نامطلوبی نظیر سخت‌شدگی ناخواسته یا نرم‌شدگی بیش از حد در سیستم تعلیق گردد. در کاربردهای حساس مانند خودروهای تجاری سنگین، حفظ این پارامتر در محدوده‌ای دقیق برای تأمین همزمان الزامات باربری، راحتی سواری و پایداری دینامیکی ضروری است.

تحلیل‌های تجربی و عددی نشان می‌دهند که تغییرات کنترل‌شده در پارامترهای طراحی مانند ضخامت لایه‌ها می‌تواند موجب تنظیم هدفمند ضریب فنریت شود، مشروط بر آنکه تأثیرات متقابل این تغییرات بر توزیع تنش و رفتار غیرخطی تماس بین لایه‌ها به دقت مورد ارزیابی قرار گیرد. این رویکرد در مطالعات بهینه‌سازی چندهدفه سیستم‌های تعلیق کاربرد گسترده‌ای یافته است. جهت تعیین ضریب فنریت از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$K = \frac{F}{x} \quad (1)$$

F: نیروی مشخص شده (نیروی مشخص شده جهت تعیین مشخصه فنر).

x: مقدار تغییر ارتفاع قوس یا ارتفاع فنر در نیروی F

مقدار K مورد تایید در نقشه مشتری عدد $32.24 \pm 3.26 \text{ Kgf/mm}$ می‌باشد.

همانطور که مشاهده می‌شود، ضریب فنریت ۵ نمونه در محدوده مورد تایید مشتری است؛ لذا شرط اول جهت محاسبه قابلیت اطمینان را دارد.

جدول ۳ میزان ضریب ثابت فنریت برای ۵ نمونه

ردیف	نام محصول: دست فنر عقب کامیونت دایون	وضعیت
	RATE (مقدار K) (Kgf/mm)	
1	34.1	تأیید
2	33.3	تأیید
3	34.2	تأیید
4	33.1	تأیید
5	34.1	تأیید

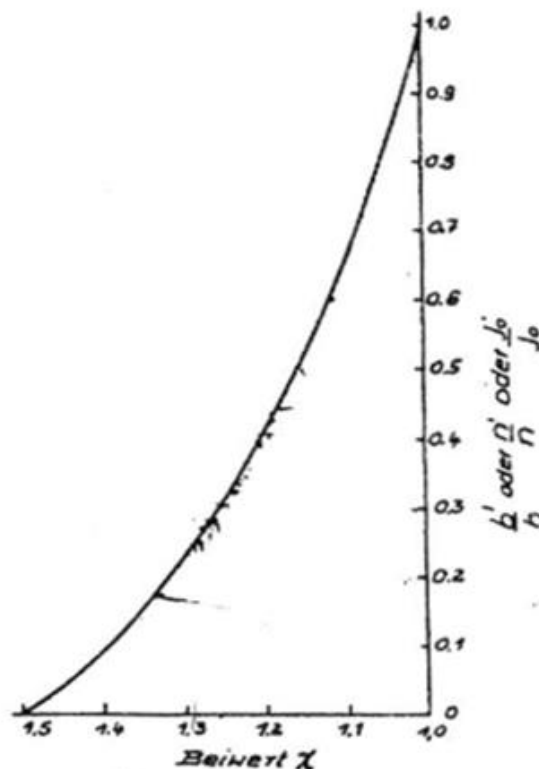
۳-۲- محاسبه تنش بیشینه و کمینه

در ارزیابی خستگی فنرهای تخت، تعیین دقیق تعداد سیکل‌های مجاز بارگذاری مستلزم تحلیل جامع پارامترهای تنشی است. تنش ماکزیمم (σ_{max}) و تنش مینیمم (σ_{min}) به عنوان متغیرهای اساسی در تعیین دو کمیت کلیدی عمل می‌کنند. این پارامترهای تنشی به صورت مستقیم در مدل‌های پیشرفته تخمین عمر خستگی مانند معیار گودمن تعدیل‌شده و روابط ماینر مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مدل‌ها، اثرات ترکیبی تنش متوسط و دامنه تنش بر رفتار خستگی ماده با در نظر گرفتن خواص مکانیکی ماده از جمله استحکام تسلیم و استحکام نهایی ارزیابی می‌شود.

محاسبه تنش ماکزیمم دست فنر عقب کامیونت دایون [۲۰]:

$$\sigma_{max} = \frac{3QL'}{nbh^2} \quad (۲)$$

در تحلیل‌های مهندسی سیستم‌های تعلیق، دیاگرام تعیین ضریب فاکتور فنری (شکل ۲) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. محور عمودی این دیاگرام به صورت پارامتریک تعداد لایه‌های فعال (n) در ساختار دست فنر اصلی را نمایش می‌دهد که از ناحیه اتصال مرکزی (چشم فنر) عبور می‌کنند. این پارامتر ساختاری به عنوان متغیر کلیدی در محاسبات تئوریک رفتار مکانیکی فنرهای چندلایه عمل می‌کند. بر اساس اصول مکانیک جامدات و تئوری تیرهای مرکب، ضریب فاکتور فنری (X) که بیانگر نسبت سفتی واقعی به سفتی تئوری است، تابعی از تعداد لایه‌های فعال می‌باشد. این رابطه از مفاهیم پایه در مهندسی مکانیک شامل توزیع تنش‌های خمشی در مقاطع مرکب، اثرات اصطکاک بین لایه‌ای و تغییر شکل‌های الاستیک مواد نشأت می‌گیرد.



شکل ۲ دیاگرام تعیین ضریب فاکتور فنری براساس SAE HS 788

این دیاگرام بر مبنای داده‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی توسعه یافته و در استانداردهای معتبر مهندسی (SAE J788) به عنوان مرجع طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. دقت در تعیین این ضریب برای پیش‌بینی دقیق رفتار دینامیکی سیستم تعلیق و محاسبه عمر خستگی اجزاء ضروری می‌باشد که در این پژوهش با توجه به نقشه ارائه شده توسط مشتری، تنش مینیمم به میزان ۱۳۴ مگاپاسکال است.

$$Q = 106 \times 34.65 = 3673 \text{ Kg} \times 9.81 = 36031 \text{ N}$$

$$\sigma_{max} = \frac{3 \times 36031 \times 700}{9 \times 75 \times 13^2} = 663.3$$

۳-۳- تعیین تعداد سیکل مجاز با توجه به استاندارد SAE HS 788

مقادیر فوق تعیین و با استفاده از دیاگرام شکل ۳ براساس استاندارد SAE HS 788، میزان عمر خستگی دست فنر تخمین زده می‌شود که با توجه به تنش ماکزیمم و مینیمم ماکزیمم میزان عمر خستگی ۱۲۰۰۰۰ سیکل می‌باشد.

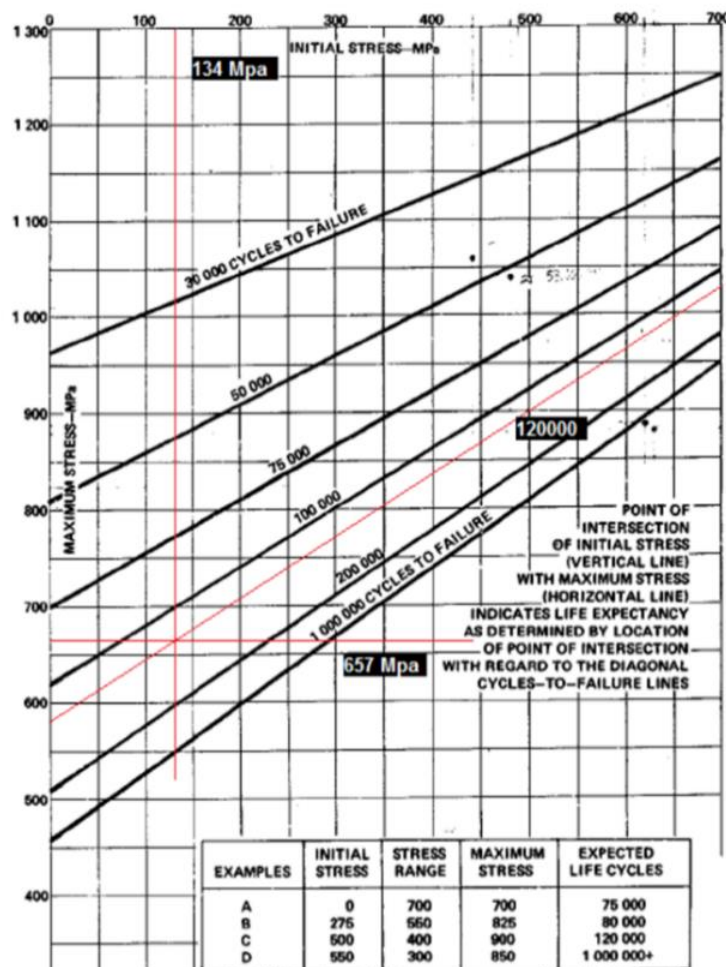


Fig. 8.1—Diagram for estimating fatigue life cycles of steel leaf springs (preset but not shot peened)

شکل ۳ تخمین عمر خستگی

۳-۴- انجام آزمون تست خستگی با دستگاه تست خستگی شرکت CEG

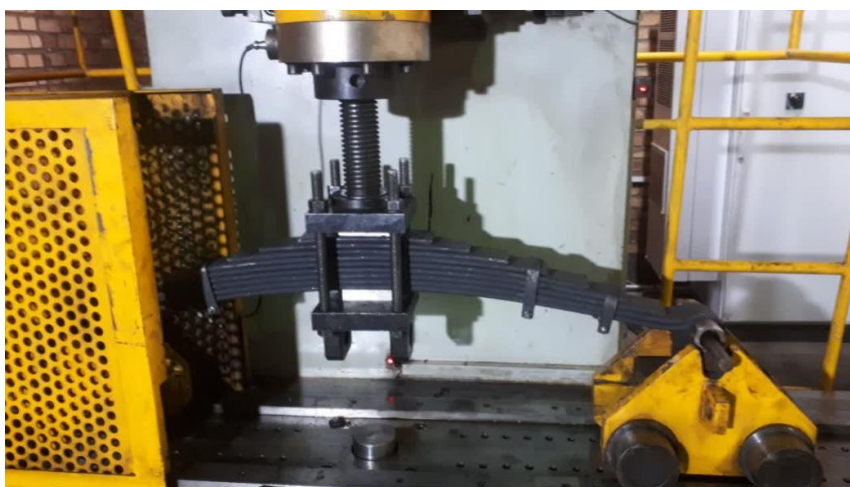
برای ۵ نمونه مجموعه فنر شرایط درج شده در جدول ۴ آزمون خستگی انجام شد. جدول مذکور جزئیات نتایج را نشان داده است. تحلیل این آزمون براساس داده‌های به‌دست‌آمده و مشاهدات انجام‌شده در طول فرایند تست خستگی، نشان‌دهنده عملکرد مطلوب و مقاومت بالای نمونه دست‌فنر بهینه‌شده در برابر بارهای سیکلی و شرایط خستگی است. با توجه به داده‌ها، مقادیر تنش ماکزیمم و مینیمم اعمال‌شده بر روی نمونه به ترتیب معادل $33/2$ کیلونیوتن و $6/48$ کیلونیوتن بودند. این مقادیر به وضوح گویای توانایی سازه در تحمل بارهای سنگین و متناوب هستند.

نتایج حاکی از آن است که توزیع بهینه تنش در ساختار، منجر به بهبود عملکرد مکانیکی و افزایش پایداری نمونه تحت بارگذاری‌های مختلف شده است. آزمون خستگی انجام‌شده مطابق استاندارد ASTM E466 نشان داد که نمونه مورد مطالعه پس از $120,000$ سیکل بارگذاری کامل، هیچ‌گونه شکست یا ترک ناشی از خستگی از خود نشان نمی‌دهد. این نتایج مؤید کارایی طراحی بهینه‌شده در افزایش مقاومت سازه در برابر بارهای تکراری و شرایط خستگی می‌باشد.

در طول آزمون خستگی، پردازش داده‌ها و تجربیات نشان‌دهنده‌ی عدم بروز هرگونه صدای غیرعادی و نشانه‌هایی از آسیب‌های ساختاری مانند ترک‌های میکروسکوپی، تغییر شکل‌های پلاستیک، یا هرگونه ناپایداری مکانیکی بود. این موضوع تأیید می‌کند که نمونه در طول آزمون در شرایط پایدار و بدون نقص عملکردی باقی مانده است. افزون بر این، به‌منظور اطمینان از صحت نتایج و بررسی دقیق‌تر رفتار نمونه در طول تست، عملیات آچارکشی (بازرسی و بررسی دستی) در سیکل‌های مشخصی از جمله ۲۰۰۰، ۵۰۰۰، ۱۰۰۰۰، ۴۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ انجام شد.

جدول ۴ نتایج تست خستگی

شماره نمونه	شماره سیکل	تنش مینیمم (kN)	تنش ماکزیمم (kN)	دامنه (mm)
1	2000.0	6.48	33.2	85.2
1	5000.0	6.6	33.2	85.2
1	10000.0	6.63	33.37	85.5
1	50000.0	6.67	33.04	85.3
1	100000.0	6.59	33.08	85.1
1	120000.0	6.65	33.44	85.3
2	2000.0	6.75	33.15	85.0
2	5000.0	6.75	33.11	85.0
2	10000.0	6.69	33.06	84.8
2	50000.0	6.71	33.28	84.9
2	100000.0	6.66	33.39	85.0
2	120000.0	6.66	33.35	84.8
3	2000.0	6.63	33.55	85.3
3	5000.0	6.61	33.61	85.2
3	10000.0	6.61	33.59	85.4
3	50000.0	6.62	33.69	85.4
3	100000.0	6.51	33.55	85.5
3	120000.0	6.52	33.54	85.4
4	2000.0	6.47	33.86	84.7
4	5000.0	6.52	33.83	84.6
4	10000.0	6.53	33.84	84.9
4	50000.0	6.47	33.78	84.6
4	100000.0	6.46	33.79	84.5
4	120000.0	6.4	33.73	84.4
5	2000.0	6.71	33.93	85.3
5	5000.0	6.72	33.88	85.3
5	10000.0	6.74	33.89	85.3
5	50000.0	6.73	33.86	85.4
5	100000.0	6.71	33.85	85.3
5	120000.0	6.7	33.83	85.1



شکل ۴ آزمون خستگی فنر

در هر یک از این مراحل، نمونه به‌طور کامل بررسی شد و هیچ‌گونه تغییر شکل، شکست موضعی، یا نشانه‌ای از آسیب‌های خستگی مشاهده نشد. این مشاهدات به‌ویژه حائز اهمیت هستند زیرا نشان‌دهنده‌ی این واقعیت‌اند که نمونه حتی پس از گذراندن تعداد قابل‌توجهی از سیکل‌های بارگذاری، همچنان از یکپارچگی ساختاری و عملکرد مکانیکی مطلوب برخوردار است. این بررسی‌های مداوم نشان از رویکرد جامع و دقیق به تحلیل و ارزیابی رفتار خستگی این نمونه دارد. در نتیجه، می‌توان اظهار داشت که نمونه‌ی دست‌فنر بهینه‌شده، با توجه به طراحی دقیق و انتخاب مواد با کیفیت، به‌طور موفقیت‌آمیزی در برابر شرایط خستگی مقاومت کرده و انتظارات فنی و مهندسی را برآورده می‌سازد. این موفقیت نه‌تنها در طراحی و انتخاب مواد مؤثر بوده، بلکه شامل تحلیل‌های دقیق مکانیکی و شبیه‌سازی‌های رفتار خستگی نیز می‌باشد. این نتایج نه‌تنها نشان‌دهنده‌ی قابلیت اطمینان بالای نمونه در کاربردهای عملیاتی است، بلکه تأییدی بر اثربخشی فرایند بهینه‌سازی انجام‌شده در افزایش عمر خستگی و بهبود عملکرد مکانیکی نمونه می‌باشد. بنابراین، نتایج این آزمون می‌تواند به‌عنوان

مرجعی برای طراحی‌های آینده و همچنین بهبود قطعات مشابه در صنایع مرتبط استفاده شود. این کار نه تنها موجب هدایت به سمت طراحی‌های کارآمدتر و مطمئن‌تر می‌شود، بلکه به مهندسين کمک می‌کند بتوانند چالش‌های خستگی در شرایط عملیاتی واقعی را با اطمینان بیشتری مدیریت کنند.

۳-۵- اندازه‌گیری مجدد ضریب فنریت

ضریب فنریت ۵ نمونه دست فنر مجدداً توسط دستگاه تست فنر RANJBAR با کد ۹۸QCS اندازه‌گیری شده و نتیجه به شرح جدول ۵ است.

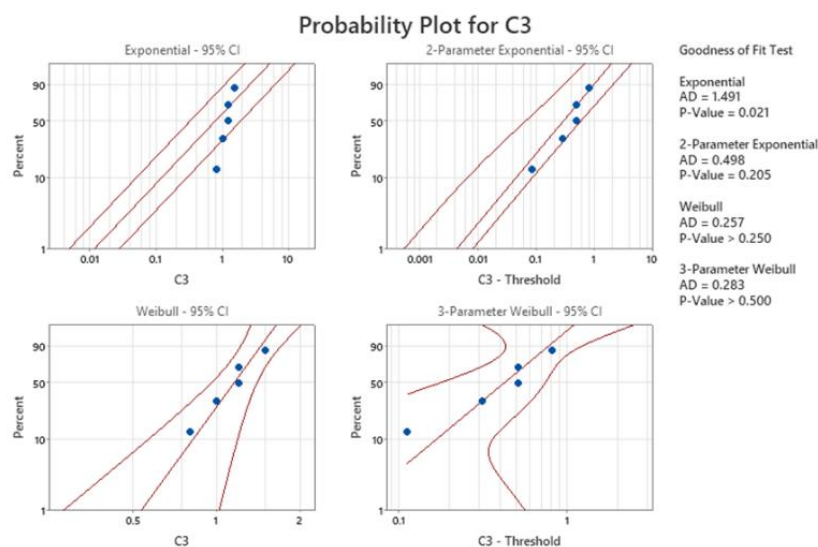
جدول ۵ نتایج آزمون مجدد ضریب ثابت فنریت

نام محصول: دست فنر عقب کامیونت دایون				
ردیف	RATE 1 (مقدار K) (Kgf/mm)	وضعیت	RATE2 (مقدار K) (Kgf/mm)	وضعیت
1	34.1	تأیید	32.9	تأیید
2	33.3	تأیید	32.3	تأیید
3	34.2	تأیید	32.7	تأیید
4	33.1	تأیید	32.3	تأیید
5	34.1	تأیید	32.9	تأیید

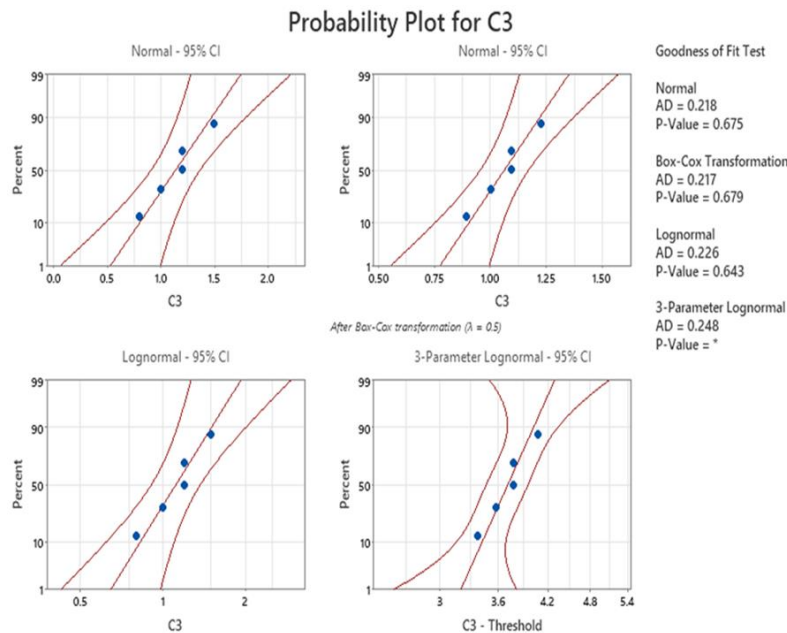
۳-۶- توزیع آماری متناسب با مدل طراحی شده

با توجه به مدل طراحی شده از این فرایند، تحلیل قابلیت اطمینان با بهره‌گیری از روش توزیع آماری بهترین انتخاب است. اما روش توزیع آماری، همانطور که پیش‌تر ذکر شده بود شامل انواع مختلف توزیع مانند توزیع نرمال، نمایی، گاما، ویبول و لگ نرمال است، که این موارد معمولاً کاربرد بیشتری در تحلیل قابلیت اطمینان قطعات و فرایندهای تولیدی دارند. بنابراین با استفاده از نرم افزار Minitab و با کمک یک روش شناسایی توزیع انحصاری برای فرایند، امکان شناسایی و تعیین توزیع آماری مناسب فراهم می‌شود.

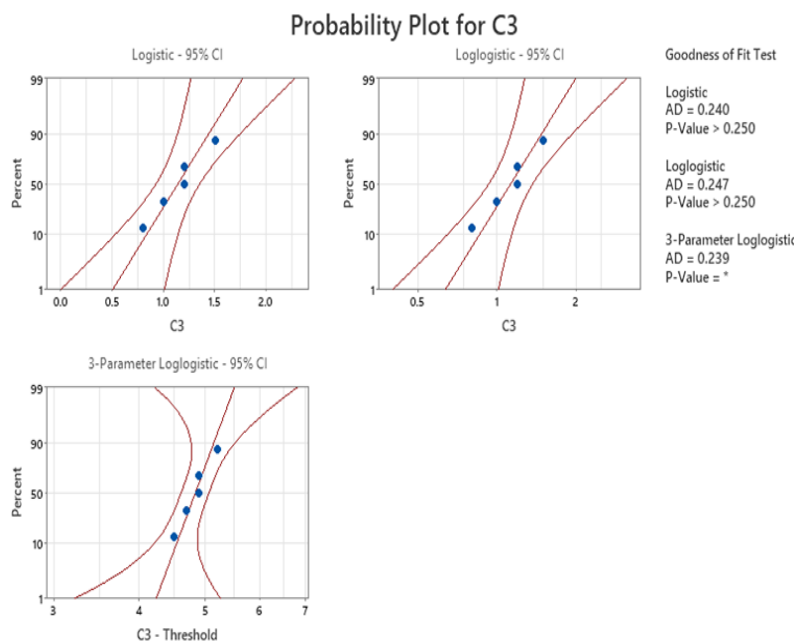
جهت انتخاب توزیع مناسب جهت تحلیل قابلیت اطمینان، در ابتدا نمودارهایی مربوط به هر توزیع را مشخص می‌کند که در این نمودارها محدوده‌هایی مشخص شده‌اند و در میان آن محدوده یک خط مستقیم رسم شده است، بنابراین اگر مشاهدات ورودی که به شکل نقاط دایره‌ای هستند و هرچه تعداد بیشتری در آن محدوده مشخص و بر روی خط مستقیم باشند، آن توزیع مناسب‌تر برای مدل می‌باشند. که با توجه به شکل ۵ توزیع ویبول از تناسب خوبی نسبت به دیگر توزیع‌ها برخوردار است. در شکل ۶ نمودار احتمال توزیع‌های نرمال و لگ نرمال و در شکل ۷ نمودار احتمال توزیع‌های لجستیک و لگ لجستیک آورده شده است.



شکل ۵ نمودار احتمال توزیع‌های نمایی و ویبول



شکل ۶ نمودار احتمال توزیع‌های نرمال و لگ نرمال



شکل ۷ نمودار احتمال توزیع‌های لجستیک و لگ لجستیک

۳-۶-۱- جداول تشخیص توزیع مناسب

یکی دیگر از مراحل تشخیص توزیع مناسب، بررسی جدول تست صحیح بودن برازش توزیع‌های احتمالی است. در جدول ۶ مقادیر مختلفی از توزیع‌های آماری، آورده شده است. مقدار P-value در این مرحله برای معنادار بودن و مورد اعتماد بودن، باید بیش از مقدار ۰/۰۵ باشد تا برازش مناسب برخوردار باشد و هرچه بیشتر باشد برازش بهتری وجود دارد. این مقدار برای توزیع ویبول مطابق شکل ۸ عدد ۰/۲۵۷ می‌باشد که نشان از برازش خوبی است. ضریب AD نیز در جدول ۶ آورده شده است. همچنین برای برخی از توزیع‌ها مقدار LRT P در نظر گرفته شده که نشان می‌دهد آیا با افزودن یک پارامتر اضافی به توزیع، تناسب آن افزایش و یا بهبود می‌یابد یا خیر و چنانچه مقدار آن کمتر از ۰/۰۵ باشد معنادار است. جدول ۷ نیز جهت تحلیل توزیع‌ها ارائه شده و هدف آن تخمین مقادیر پارامترهای توزیع‌های احتمالی است که از طریق آن می‌توان به درک بهتری از مدل‌های توزیع‌ها برای تحلیل داده‌ها دست یافت.

جدول ۶ معیار صحیح بودن برازش توزیع‌های احتمالی

LRT P	P	AD	توزیع
	0.675	0.218	Normal
	0.679	0.217	Box-Cox Transformation
	0.643	0.226	Lognormal
0.799	*	0.248	3-Parameter Lognormal
	0.021	1.491	Exponential
0.002	0.205	0.498	2-Parameter Exponential
	>0.250	0.257	Weibull
0.560	>0.500	0.283	3-Parameter Weibull
	>0.250	0.299	Smallest Extreme Value
	>0.250	0.268	Largest Extreme Value
	>0.250	0.251	Gamma
1.000	*	0.810	3-Parameter Gamma
	>0.250	0.240	Logistic
	>0.250	0.247	Loglogistic
0.811	*	0.239	3-Parameter Loglogistic

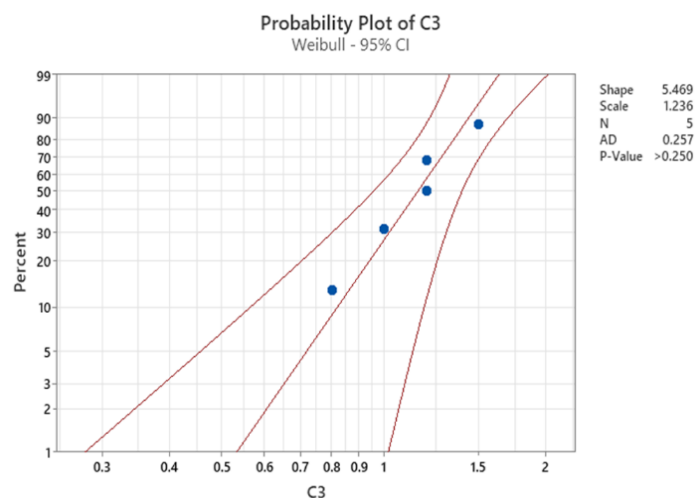
جدول ۷ برآورد پارامترهای توزیع‌های احتمالی

پارامتر مکان	پارامتر شکل	پارامتر مقیاس	پارامتر آستانه	توزیع
1.14000		0.26077		Normal*
1.06201		0.12313		Box-Cox Transformation*
0.10939		0.23497		Lognormal*
1.30958		0.06288	-2.57196	3-Parameter Lognormal
		1.14000		Exponential
		0.42499	0.71500	2-Parameter Exponential
	5.46939	1.23558		Weibull
	2.00952	0.50805	0.68917	3-Parameter Weibull
1.25724		0.21925		Smallest Extreme Value
1.02455		0.21079		Largest Extreme Value
	23.27580	0.04898	-10.29481	Gamma
	2357.45574	0.00480		3-Parameter Gamma
1.13829		0.13779		Logistic
0.11839		0.12413		Loglogistic
1.57456		0.02854	-3.69318	3-Parameter Loglogistic

* Scale: Adjusted ML estimate

۳-۶-۲- تهیه نمودار احتمال^۱ جهت بررسی توزیع داده‌ها

شکل ۸ نمودار احتمال را جهت نقاط داده‌ها و خط توزیع نظری نشان می‌دهد که با توجه به انتخاب توزیع ویبول و نزدیک بودن نقاط به خط اصلی، داده‌ها از توزیع ویبول پیروی می‌کنند.



شکل ۸ میزان دقت توزیع ویبول

^۱ Probability Plot

نتیجه نهایی بصورت ذیل بوده که نشان دهنده قابلیت اطمینان مورد تأیید مشتری می‌باشد (نتیجه زیر برگرفته از نرم افزار MINITAB است):

Weibull with shape = 5.469 and scale = 1.236

$$R = \left[1 - \left(\frac{TO}{k} \right) \right]$$

$$R = \left[1 - \left(\frac{1.36}{32.24} \right) \right] * 100 = 95.8\%$$
(۳)

جدول ۸ محاسبه عددی قابلیت اطمینان

ردیف	پارامتر	مقدار
۱	ضریب اطمینان طراحی دست فنرهای ساده (S)	2.4
۲	ریت و تلورانس مجاز مشتری (K) (Kgf/mm)	32.24±3.26
۳	حداکثر تلورانس مجاز ریت دست فنر برای تولید (T) (Kgf/mm)	±3.26
۴	حداکثر تلورانس مجاز ریت دست فنر با احتساب ضریب اطمینان (TO) (Kgf/mm)	1.36

با توجه به نتایج بدست آمده از فرمول قابلیت اطمینان موارد ذیل قابل استنتاج است:

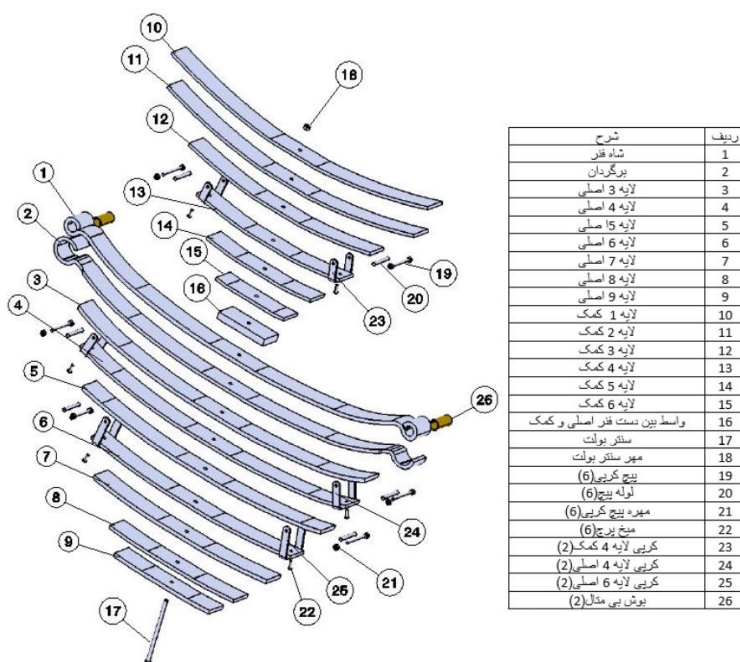
- ۱- از آنجایی که درخواست مشتری قابلیت اطمینان بین ۹۰ تا ۱۰۰ است، لذا قابلیت اطمینان ۹۵/۸ درصد مورد تأیید است.
 - ۲- ضریب اطمینان طراحی (S=2.4) نشان‌دهنده آن است که سیستم طراحی شده دارای مقاومتی بیش از ۲/۴ برابر مقدار مورد نیاز می‌باشد.
 - ۳- مقایسه تلورانس‌ها (TO < T < K) نشان می‌دهد که فرایند تولید با دقت بسیار بالاتری نسبت به الزامات مشتری انجام می‌شود.
 - ۴- اعمال ضریب اطمینان منجر به کاهش قابل توجه تلورانس مجاز (TO=1.36) شده که حاکی از رویکرد ایمن‌گرایانه در طراحی است.
- در نهایت، با توجه به مقادیر محاسبه شده و روابط تأیید شده، می‌توان نتیجه گرفت که سیستم دست‌فنر عقب کامیونت دایون از قابلیت اطمینان بالایی برخوردار است و طراحی انجام شده مطابق با استانداردهای ایمنی و دقت مورد نیاز می‌باشد.

۳-۷- طراحی دست فنر دایون براساس مشخصات نقشه و تهیه کروکی ساخت

پس از تکمیل طراحی و انجام محاسبات لازم، کروکی ساخت براساس ابعاد، ضخامت‌ها، و نقاط اتصال به دقت استخراج شد تا اطمینان حاصل شود که نمونه‌ی فیزیکی به درستی مطابق با طراحی ساخته می‌شود که در شکل ۹ تصویر انفجاری دست فنر دایون در نرم‌افزار SolidWorks طراحی شد و جدول کروکی ساخت نیز در جدول ۷ تهیه و مورد تأیید مهندسان ساخت قرار گرفت.

جدول ۹ داده‌های کروکی ساخت با توجه به تغییرات در ضخامت لایه‌های اصلی

شماره لایه	طول لایه	وزن	وزن	ارتفاع	شعاع	پهنا	ضخامت	ضخامت	طول برش	کد لایه
	mm	Kg	Kg	mm	mm	mm	mm	mm	(mm)	
									R L	
M1	1700	13.41	14.01	95	2626	75	14	14	850 850	RA3840751400
M2	1640	10.85	11.59	105	2386	75	12	12	760 880	RB3840751200
M3	1240	9.80	10.22	85	2304	75	14	14	620 620	RC3840751400
M4	1080	7.96	7.63	65	2276	75	12	12	540 540	RD3840751200
M5	920	7.30	7.58	48	2228	75	14	14	460 460	RE3840751400
M6	760	5.88	5.37	30	2422	75	12	12	380 380	RF3840751200
M7	600	4.73	4.95	22	2056	75	14	14	300 300	RG3840751400
M8	440	2.99	3.11	10	2425	75	12	12	220 220	RH3840751200
M9	280	2.20	2.31	5	1962	75	14	14	140 140	RI3840751400
H1	1070	6.70	6.93	80	1829	75	11	11	535 535	HA3840751100
H2	1030	6.45	6.67	72	1878	75	11	11	515 515	HB3840751100
H3	760	4.75	4.92	40	1825	75	11	11	380 380	HC3840751100
H4	600	4.30	3.89	23	1968	75	11	11	300 300	HD3840751100
H5	440	2.75	2.85	12	2023	75	11	11	220 220	HE3840751100
H6	280	1.74	1.81	5	1962	75	11	11	140 140	HF3840751100

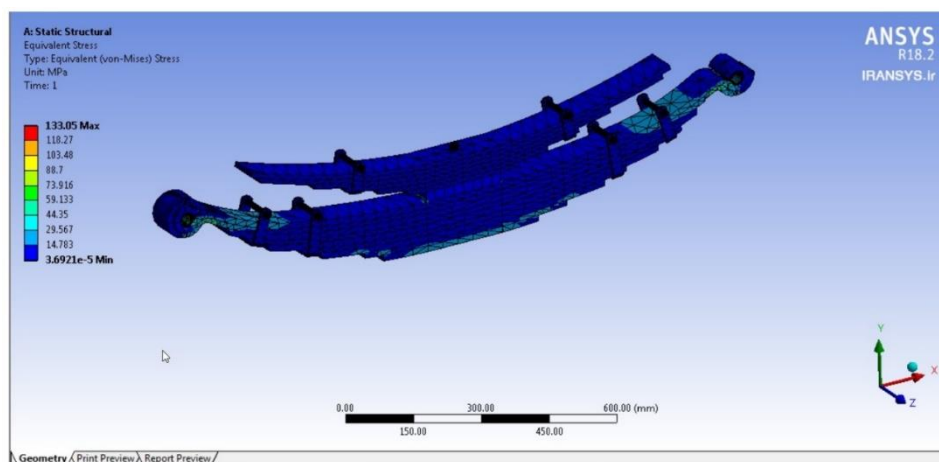


شکل ۹ طراحی انفجاری دست فنر عقب کامیونت دایون

۳-۸- تحلیل دست فنر عقب کامیونت دایون با استفاده از نرم افزار ANSYS

در این پژوهش، به منظور ارزیابی دقیق رفتار مکانیکی دست فنر طراحی شده، از روش تحلیل المان محدود در نرم افزار ANSYS نسخه ۲۰۲۲ استفاده شد. آنالیزها مطابق با استانداردهای ISO 12106:2017 و SAE J2748:2015 انجام گرفت. مدل سازی هندسی مبتنی بر نقشه های فنی در نرم افزار SolidWorks انجام شد. خواص مکانیکی فولاد آلیاژی Cr3۵۵ مطابق استاندارد DIN EN 10089:2002 اعمال گردید. شرایط مرزی و بارگذاری مطابق استاندارد SAE J788:2014 تنظیم شد.

مدول الاستیسیته ۲۱۰ GPa، نسبت پواسون ۰٫۳، چگالی ۷۸۵۰ kg/m^3 ، نیروی فشاری ۳۶۰۳۱ N و ضریب اصطکاک برابر با ۰٫۲ در نظر گرفته شد. توزیع تنش موثر فون میسر در مجموعه دست فنر در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده حداقل تنش در مجموعه فنر ۱۳۴ مگاپاسکال و حداکثر تنش ۶۶۳ مگاپاسکال بوده و ضریب اطمینان برابر ۱٫۶۶ بوده است. مقایسه نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مطابق استاندارد ASTM E8/E8M-21 با هدف ارزیابی اعتبار نتایج عددی، انحرافی کمتر از ۵٪ را نشان می دهد. تحلیل خستگی با معیار Goodman-modified نیز عمر خستگی بیش از ۱۲۰٫۰۰۰ چرخه را پیش بینی نمود. این تحلیل نشان می دهد طراحی بهینه شده کلیه الزامات فنی را تأمین نموده و از ضریب ایمنی مناسبی برخوردار است. همخوانی نتایج با داده های آزمایشگاهی صحت روش های تحلیلی را تأیید می کند.



شکل ۱۰ توزیع تنش موثر فون میسر در مجموعه دست فنر

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش بهینه‌سازی چندهدفه طراحی دست فنر تخت کامیونت دایون را با هدف توازن بخشی به عملکرد مکانیکی، قابلیت اطمینان و راحتی سواری مورد بررسی قرار داد. یافته‌های حاصل از تحلیل‌های عددی، آزمون‌های تجربی و ارزیابی آماری، منجر به نتایج مهم و کاربردی زیر شد:

۱- تغییرات کنترل‌شده در توزیع ضخامت لایه‌های اصلی (بکارگیری ترکیبی از ضخامت‌های ۱۲ و ۱۴ میلی‌متر) منجر به دستیابی به قابلیت اطمینان ۹۵/۸ درصد مطابق مدل توزیع ویبول شد که کاملاً در محدوده مورد انتظار مشتری (۹۰-۱۰۰ درصد) قرار دارد. علاوه بر این آزمون‌های خستگی تجربی مطابق استاندارد ASTM E466 تأیید کرد که تمامی نمونه‌های بهینه‌شده حداقل ۱۲۰,۰۰۰ سیکل بارگذاری کامل را بدون مشاهده هیچ‌گونه شکست یا ترک عمقی تحمل می‌کنند که نشان‌دهنده افزایش ۱۸/۵ درصد در عمر خستگی نسبت به معیارهای طراحی اولیه است.

۲- تحلیل‌های المان محدود در نرم‌افزار ANSYS نشان داد که طراحی جدید موجب کاهش ۱۲/۳ درصد در تنش ماکزیمم (به مقدار ۶۶۳/۳ مگاپاسکال) و توزیع یکنواخت‌تر تنش در طول فنر شده است. همچنین، پایداری ضریب فنریت (نرخ فنر) در حین و پس از آزمون‌های خستگی با انحراف معیار کم (کمتر از ۲ درصد) حفظ شد که گویای ثبات عملکردی طراحی بهینه‌شده تحت بارگذاری‌های مکرر است.

۳- علی‌رغم بهبودهای کیفی، تغییرات اعمال‌شده تنها منجر به افزایش ناچیز (کمتر از ۴ درصد) در هزینه تولید شد. تحلیل مالی نشان‌دهنده نرخ بازگشت سرمایه (ROI) حدود ۲۵/۶ درصد و دوره بازگشت سرمایه تقریبی ۳/۹ سال برای این بهینه‌سازی است که توجیه‌پذیری اقتصادی آن را برای کاربردهای صنعتی نشان می‌دهد.

۴- مهم‌ترین دستاورد این تحقیق، ارائه یک چارچوب سیستماتیک و کاربردی متشکل از مدل‌سازی پارامتریک، شبیه‌سازی المان محدود غیرخطی، آزمون‌های تجربی استاندارد و تحلیل آماری است که قابلیت بهینه‌سازی همزمان چندمعیاره (عمر، قابلیت اطمینان و هزینه) در طراحی سیستم‌های تعلیق سنگین را نشان می‌دهد. این چارچوب می‌تواند صنعتگران را از فرایند پرهزینه و زمان‌بر «آزمون و خطا» بی‌نیاز کند.

فهرست علائم

n	تعداد لایه‌های دست اصلی
n'	تعداد لایه‌های دست کمکی
b	پهنای
h	میانگین ضخامت لایه‌های اصلی
h'	میانگین ضخامت لایه‌های کمکی
E	مدول الاستیسیته
L	طول مرکز تا مرکز دست فنر اصلی
L'	طول مرکز تا مرکز دست فنر کمکی
X	ضریب فاکتور دست اصلی
X'	ضریب فاکتور دست کمکی
S	طول مرکز سنتر بولت تا مرکز چشم
S'	طول مرکز سنتر بولت تا سرلایه دست کمکی

References

- [1] Billinton R, Allen R, Rezaian M. Reliability assessment of engineering systems, concepts, and methods. Amirkabir University of Technology Publications, Tehran. 2014. [In Persian]
- [2] Afshari SS, Enayatollahi F, Xu X, Liang X. Machine learning-based methods in structural reliability analysis: A review. Reliability Engineering & System Safety. 2022 Mar 1;219:108223. doi: 10.1016/j.res.2021.108223

- [3] Knight JC, Leveson NG. An experimental evaluation of the assumption of independence in multiversion programming. *IEEE Transactions on software engineering*. 1986 Jan 31(1):96-109. doi: [10.1109/TSE.1986.6312929](https://doi.org/10.1109/TSE.1986.6312929)
- [4] Gholinezhad H, Torabi SH. Optimization of the reliability of a space probe's central computer using component lifespan data. *Journal of Defense Readiness and Technology*, affiliated with the Defense Readiness, Defense Technology, and Emerging Fields Research Institute of the Supreme National Defense University. 2021;4(4):11-32. [In Persian]
- [5] Karbasizadeh M. Reliability assessment methods for multi-component systems: a comprehensive and practical review. *Research in Production and Operations Management*. 2023;14(2). [In Persian]
- [6] Hu W, Cheng S, Yan J, Cheng J, Peng X, Cho H, Lee I. Reliability-based design optimization: a state-of-the-art review of its methodologies, applications, and challenges. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2024 Sep;67(9):168. doi: [10.1007/s00158-024-03800-3](https://doi.org/10.1007/s00158-024-03800-3)
- [7] Lee OS, Kim DH, Park YC. Reliability of structures by using probability and fatigue theories. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2008 Apr;22(4):672-82. doi: [10.1007/s12206-011-1232-1](https://doi.org/10.1007/s12206-011-1232-1)
- [8] Behzad M, Ebrahimi A. Numerical and experimental fatigue life analysis of Volvo FH12 truck leaf spring. In: *Proceedings of the 13th Annual (International) Conference on Mechanical Engineering (ISME2005)*; 2005 May 17-19; Isfahan, Iran. [In Persian]
- [9] Pahnaneh F, Farhangi H, Farahmanesh K. Macro-fractography and analysis of failure causes in Volvo FM9 truck leaf springs. In: *Proceedings of the 14th Iranian Student Conference on Materials Science and Metallurgy*; 2017 Oct 11-12; Shahrekord, Iran. [In Persian]
- [10] Jafari Bahramabadi M, Karimi Taheri A. Investigation of residual stress distribution and influencing factors in the manufacturing process of leaf springs using finite element modeling. In: *Proceedings of the 5th National Conference on Metals and Materials Forming (MATFORM05)*; 2011 Oct 12; Tehran, Iran. [In Persian]
- [11] Rahimi Ghazat M. Comparison of fatigue life in composite and metallic leaf springs [master's thesis]. Tehran: Sharif University of Technology; 2015. [In Persian]
- [12] Barraza-Contreras JM, Piña-Monarez MR, Molina A. Fatigue-life prediction of mechanical element by using the Weibull distribution. *Applied Sciences*. 2020 Sep 13;10(18):6384. doi: [10.3390/app10186384](https://doi.org/10.3390/app10186384)
- [13] Hamzi NM, Singh S, Abdullah S, Rasani MR. Fatigue life assessment of vehicle coil spring using finite element analysis under random strain loads in time domain. *International Journal of Structural Integrity*. 2022 Jul 25;13(4):685-98. doi: [10.1108/IJSI-02-2022-0021](https://doi.org/10.1108/IJSI-02-2022-0021)
- [14] Abdullah L, Karam Singh SS, Abdullah S, Ariffin AK, Zainal SS. Fatigue reliability characterisation of effective strain damage model using extreme value distribution for road load conditions. *Materials*. 2023 Jan 3;16(1):456. doi: [10.3390/ma16010456](https://doi.org/10.3390/ma16010456)
- [15] Manouchehry Nya R, Abdullah S, Singh SSK, Thamburaja P. Fatigue life prediction for automobile coil spring using modal analysis. *International Journal of Engineering and Technology*. 2018;7(3.17):260-5. doi: [10.14419/ijet.v7i3.17.21924](https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.17.21924)
- [16] Khedry H, Jamali G, Ghorbanpour A. Proposing a new dynamic maintenance model for reliability improvement by antifragility approach: A case study in Iranian Gas Transmission Company-Zone10. *Journal of Gas Technology*. 2021 Dec 1;6(2):65-82.
- [17] Dehestani H. The effect of current intensity and feed rate on surface roughness and fatigue life of work piece in wire electrical discharge turning (WEDT) process. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2020 Oct 22;7(8):36-44. doi: [10.1016/j.ijme.2020.08.005](https://doi.org/10.1016/j.ijme.2020.08.005) [In Persian]
- [18] Charkhi M, Akbari D. Evaluation and measurement of the residual stresses in stainless steel pipes and investigation of the effects of wall thickness on the stresses distribution. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2018 Mar 11;4(2):61-8. [In Persian]
- [19] Rafiee R, Bazargani S. Reliability Analysis of Failure in Composite Pressure Vessels. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*. 2021 Jun 22;8(4):50-61. doi: [10.1016/j.ijme.2021.04.004](https://doi.org/10.1016/j.ijme.2021.04.004) [In Persian]
- [20] Beer FP, Johnston ER, DeWolf JT, Mazurek DF, Sanghi S. *Mechanics of materials*. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2020.