



تحلیل اجزای محدود آسیب خستگی در بستار موتور دیزل سواری تحت بارگذاری‌های نوسانی مکانیکی - حرارتی

عادل بصیری^۱، محمد آزادی^{۲*}، فرشید مقدم^۳

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، abasiri1994@gmail.com

^۲ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران، m_azadi@semnan.ac.ir

^۳ شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو، تهران، ایران، f_moghaddam@ip-co.com

* نویسنده مسئول

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۶ مهر ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۴ بهمن ۱۳۹۷

کلیدواژه‌ها:

تحلیل اجزای محدود

بستار موتور دیزل سواری

خستگی مکانیکی - حرارتی

الگوی شهید اغلو

الگوی انرژی کرنش مومسان

چکیده

در این مقاله، به تخمین عمر خستگی مکانیکی - حرارتی بستار یک موتور دیزل سواری پرداخته شده است. ابتدا از الگوی ارتجاعی - مومسان لزوج دولایه موجود در نرم افزار آباکوس، به منظور محاسبه توزیع تنش و کرنش در بستار استفاده شده است. ثوابت مادی این الگو، با تطبیق منحنی‌های هیستریزس تنش - کرنش حاصل از شبیه‌سازی و آزمون‌های خستگی کم‌چرخه و مکانیکی - حرارتی، بر روی همبسته آلومینیم - سیلیسیم - منیزیم بدست آمده است. به منظور تخمین عمر خستگی بستار، از دو الگوی آسیب خستگی پرکاربرد، شامل الگوی انرژی کرنشی مومسان تصحیح شده و الگوی شهید اغلو استفاده شده است. نتایج هر دو الگو، مکان ترک خستگی در بستار را بین دریچه‌ها تخمین زدند که این نتیجه با مشاهدات تجربی مطابقت دارد. نتایج هر دو الگو نیز، مشابه بوده اما الگوی انرژی، با توجه به سادگی روابط آن و تعداد کمتر ثوابت مادی، الگوی مناسب‌تری نسبت به الگوی شهید اغلو، برای تخمین عمر خستگی مکانیکی - حرارتی قطعات، بشمار می‌رود.

تمامی حقوق برای انجمن علمی موتور ایران محفوظ است.



۱- مقدمه

امروزه عرضه خودروهای با مصرف سوخت بهینه، یکی از بزرگترین چالش های صنعت خودروسازی محسوب می شود. افزایش بازدهی موتور و کاهش آلودگی و مصرف سوخت در کنار قدرت و توان بالا، بهترین پاسخ به درخواست مشتریست. درخواست بازار به منظور افزایش توان منجر به بارگذاری های شدیدتر مکانیکی و حرارتی بر اجزای موتور شده که چالشی جدید پیش روی طراحان موتور می باشد [۲۰۱].

یکی از این اجزاء، بستار می باشد که تحت انواع بارگذاری های استاتیکی و خستگی در حین کارکرد قرار دارد. بارگذاری که بیشترین آسیب در بستار را موجب می شود، بارگذاری خستگی مکانیکی- حرارتی است که ناشی از نوسان دما در فرآیند روشن و خاموش موتور است. در بستارهای آلومینیومی دمای ایجاد شده معمولاً به اندازه ای بالاست که کرنش های ایجاد شده ناشی از خستگی مکانیکی- حرارتی در بستار عموماً در ناحیه مومسان قرار داشته و عمر قطعه را به طور چشمگیری کاهش می دهند لذا تخمین عمر بستار در مرحله طراحی به منظور گارانتی محصول بسیار حائز اهمیت است [۵-۳].

در مقالات مختلف، روش ها و الگوهای متفاوتی به منظور شبیه سازی خستگی مکانیکی- حرارتی در مواد و تخمین عمر خستگی آنها ارائه شده که در ادامه، به جزئیاتی از برخی از آنها پرداخته می شود.

چابوچه^۱ [۶]، یک مدل مومسان- لزج^۲ یکپارچه به منظور پیش بینی رفتار تنش- کرنش فلزات تحت بارگذاری های چرخه ای ارائه داد. او نشان داد که این مدل تمامی رفتارهای ماده که در آزمون های خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی مشاهده شده اند را با دقت قابل قبولی لحاظ می کند که از این رفتارها می توان به سخت شوندگی/ نرم شوندگی چرخه ای، اثر باشینگر، رهاسازی تنش میانگین^۳ و پایداری تنش^۴ اشاره کرد.

فرهی و همکاران [۷]، از الگوی مومسان- لزج دولایه موجود در نرم افزار آباکوس به منظور پیش بینی رفتار تنش- کرنش همبسته آلومینیوم- سیلیسیم- منیزیم استفاده کردند. آنها از آزمون های خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی بر روی نمونه آزمون استاندارد به منظور محاسبه ثوابت مادی این الگو استفاده کرده و دقت آن را در پیش بینی رفتار نشان دادند. آنها در پژوهشی دیگر [۸]، از این الگو به منظور تحلیل مکانیکی- حرارتی یک بستار موتور دیزل استفاده کردند. آنها نشان دادند که محل بیشینه تنش و کرنش در بین دریچه ها واقع شده و با استفاده از مقایسه نتایج با یک بستار آسیب دیده، صحت نتایج بدست آمده را اثبات کردند.

سوه^۵ و همکاران [۹]، پس از شبیه سازی اجزای محدود بستار، عمر خستگی مکانیکی- حرارتی آن را با الگوی نرخ آسیب شهید اغلو^۶، پیش بینی و با نتایج تجربی مقایسه کردند. لفللی و همکاران [۱۰]، رفتار تنش کرنش همبسته آلومینیوم A357 را تحت خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی در نرخ کرنش های متفاوت، پیش بینی کردند. آنها از چهار الگوی ارتجاعی- مومسان- لزج مختلف جهت پیش بینی رفتار ماده استفاده کرده و مزایا و معایب هر الگو را مورد بررسی قرار دادند. همچنین به منظور پیش بینی رفتار ماده در نرخ کرنش های متفاوت، از الگوی جانسون- کوک^۷ استفاده کردند. فرهی و همکاران [۱۱]، رفتار تنش- کرنش دو همبسته آلومینیوم و منیزیم را تحت خستگی مکانیکی- حرارتی مورد بررسی قرار دادند. به این منظور، آنها از دو الگوی ارتجاعی- مومسان- لزج پر کاربرد استفاده کرده و نتایج این دو را با هم مقایسه کردند. همچنین، استخراج ثوابت مادی این دو الگو از آزمون های خستگی کم چرخه از خروجی های مهم این مقاله بود. فرهی و همکاران [۱۲]، یک الگوی بر پایه انرژی کرنش مومسان اصلاح شده ارائه داده و دقت آن را در تخمین عمر خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی نسبت به الگوهای دیگر برای همبسته آلومینیوم- سیلیسیم- منیزیم، نشان دادند. آزادی و همکاران [۱۳]، از این الگو به منظور تخمین عمر خستگی مکانیکی- حرارتی یک بستار منیزیمی، استفاده کردند و دقت این الگو را نسبت به نتایج تجربی مورد بررسی قرار دادند. ویلسون^۸ و همکاران [۱۴]، مکانیسم های آسیب خستگی کم چرخه در یک همبسته آلومینیوم ریخته گری را مورد مطالعه قرار داده و یک الگو بر پایه انرژی کرنشی ارتجاعی- مومسان به منظور لحاظ کردن تاثیر دما و ریزساختار بر نرخ رشد ترک در آلومینیوم ارائه دادند. وانگ^۹ و همکاران [۱۵]، ریزساختار، خواص مکانیکی، رفتار خستگی کم چرخه و مکانیسم های آسیب خستگی همبسته آلومینیوم- سیلیسیم مورد استفاده در پیستون موتور در دماهای بالا را مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین به منظور تخمین عمر خستگی این همبسته، یک الگو بر پایه انرژی کرنشی هیستریزیس ارائه داده و دقت مناسب آن را در تخمین عمر خستگی کم چرخه همبسته آلومینیوم- سیلیسیم نشان دادند. آنها در پژوهشی دیگر [۱۶]، رفتار و مکانیسم های آسیب این همبسته را تحت خستگی مکانیکی- حرارتی در بازه دمایی ۱۲۰-۳۵۰ و ۱۲۰-۴۲۵ درجه سانتیگراد را مورد بررسی قرار دادند. آنها همچنین با نشان دادن اثر غالب آسیب خزش در این همبسته تحت خستگی مکانیکی- حرارتی، الگوی انرژی کرنشی هیستریزیس دیگری با افزودن ضریب تصحیح نرخ کرنش پیشنهاد داده و مطابقت نتایج آن با نتایج آزمون های خستگی مکانیکی- حرارتی را نشان دادند.

6 Sehitoglu

7 Johnson-cook

8 Wilson

9 Wang

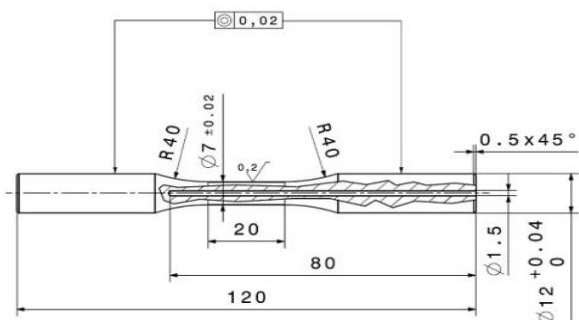
1 Chaboche

2 Viscoplastic

3 Mean stress relaxation

4 Stabilization

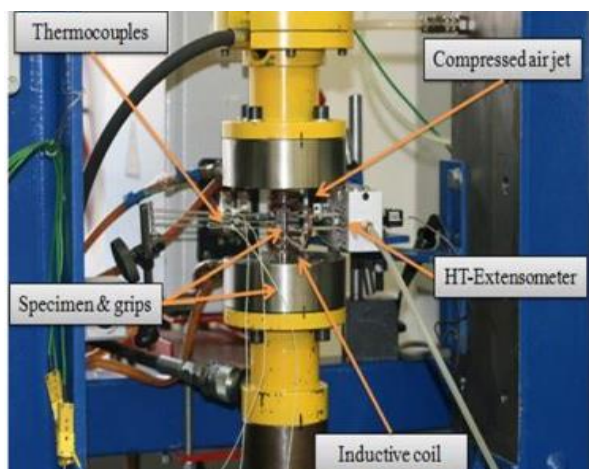
5 Su



شکل ۱: ابعاد نمونه استاندارد آزمون از همبسته آلومینیومی در آزمون های خستگی کم‌چرخه و حرارتی- مکانیکی [۱۸]



شکل ۲: تجهیزات مربوط به آزمون خستگی کم‌چرخه [۱۸]



شکل ۳: تجهیزات مربوط به آزمون خستگی مکانیکی- حرارتی [۱۸]

نکات حائز اهمیت در رابطه با آزمون های خستگی این است که مقدار نرخ کرنش کمتر در آزمون خستگی مکانیکی- حرارتی نسبت به نرخ کرنش در آزمون خستگی کم‌چرخه، به دلیل ایجاد تنش های چندمحوره در حین اجرای آزمون خستگی مکانیکی- حرارتی و در حالت نرخ کرنش زیادتر، می باشد. زمان خاموش بودن موتور، بستار تحت بارهای همبندی پیچ‌ها قرار دارد (کرنش کششی) و دما کمینه است و زمان روشن بودن موتور، بستار تحت فشار احتراق قرار دارد (کرنش فشاری) و دما بیشینه است [۱۸].

بر این اساس، الگوهای مختلفی در رابطه با پیش بینی رفتار تنش- کرنش و آسیب ماده وجود دارد. در این مقاله، از پرکاربردترین الگوهای برای شبیه‌سازی خستگی مکانیکی- حرارتی در یک بستار موتور دیزل سواری استفاده می شود. شبیه سازی یک نمونه واقعی صنعتی و همچنین مقایسه دو تئوری آسیب خستگی پرکاربرد، الگوی انرژی و الگوی شهید اغلو، می توانند از خروجی های مهم باشند.

۲- مواد و آزمون ها

در این مقاله، همبسته آلومینیوم- سیلیسیم- منیزیم ریخته گری شده با کاربرد در بستار موتور دیزل سواری، مورد مطالعه قرار گرفته است. سپس، شبیه سازی رفتار مکانیکی- حرارتی ماده مطالعه شده است. همبسته آلومینیوم مدنظر، شامل ۷٪ عنصر سیلیسیم و ۳٪ عنصر منیزیم است. در این پژوهش، دو نوع آزمون خستگی کم‌چرخه و خستگی حرارتی- مکانیکی غیرهمفاز^۱ بر روی نمونه های استاندارد آلومینیومی (مطابق با شکل ۱) اجرا شده است. برای گرم و سرد کردن آنها نیز از سامانه القایی و جت هوا، به ترتیب، استفاده شده است. شرایط آزمون خستگی کم چرخه، براساس استاندارد ASTM-E606، شامل دمای ثابت ۲۵ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد و دامنه کرنش مکانیکی ثابت ۰٫۳٪ است. تجهیزات مربوط به آزمون خستگی کم‌چرخه در شکل ۲ آمده است. کرنش مکانیکی با دستگاه اندازه گیری کرنش در دمای گرم^۲ اندازه گیری شده است. نرخ بارگذاری کرنش مکانیکی و مقدار کرنش اولیه (ناشی از بارهای همبندی شامل بستن پیچ های بستار) به ترتیب، برابر با ۰٫۰۱ بر ثانیه و ۰٫۰۵٪ بصورت کششی در نظر گرفته شده است [۱۸]. شایان ذکر است که این میزان کرنش ناشی از همبندی بستار، در پیچ‌ها بصورت کششی و در محل زیر پیچ‌ها، بصورت فشاری است. بعلاوه، بارهای ناشی از همبندی در محل محفظه احتراق بستار، بصورت کششی ظاهر می‌شود و بارهای ناشی از احتراق نیز، بصورت فشاری است [۱۸]. اطلاعات بیشتر در مورد آزمون خستگی کم‌چرخه در مرجع [۱۸] آمده است.

شرایط آزمون خستگی مکانیکی- حرارتی غیرهمفاز، براساس استاندارد COP-EUR22281EN، با اعمال کرنش متغیر (با نرخ ۰٫۰۰۰۱ بر ثانیه) و دمای متغیر (با نرخ ۱۰ درجه سانتیگراد بر ثانیه بین دماهای ۵۰ تا ۲۵۰ درجه سانتیگراد)، انجام شده است. تجهیزات آزمون خستگی مکانیکی- حرارتی غیرهمفاز در شکل ۳ نشان داده شده است. ضمناً آزمون خستگی مکانیکی- حرارتی، به صورت غیرهمفاز^۳ بوده، به این معنا که در بیشینه دما، کمترین کرنش (فشاری) و در کمینه دما، بیشترین کرنش (کششی)، می‌باشد که این نوع بارگذاری مشابه بارگذاری بستار موتور است [۱۸]. اطلاعات بیشتر در مورد آزمون خستگی حرارتی- مکانیکی غیرهمفاز در مرجع [۱۸] آمده است.

³ Out-of-phase

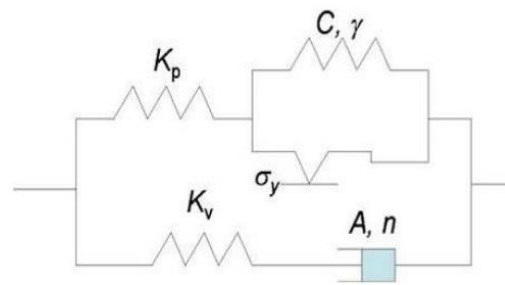
¹ Out-of-phase

² High temperature extensometer

۳- تئوری الگوهای رفتاری ماده

۳-۱- الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه

به منظور شبیه سازی رفتار همبسته آلومینیوم از الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه برای بیان رفتار مومسان و لزجت^۱ استفاده گردیده است. این الگو، اثر مومسان و لزجت را به دو شبکه ارتجاعی- مومسان و ارتجاعی- لزج تقسیم می کند. بیان یک بعدی این الگو، در شکل ۴ نشان داده شده است. در شبکه مومسان، از الگوی سخت شونده همسانگرد- پویای غیرخطی^۲ استفاده شده است که رفتارهای ماده نظیر سخت شونده یا نرم شونده و خزش چرخه به چرخه^۳، رهاسازی تنش میانگین و اثر باشینگر^۴ را پیش بینی می کند و الگوی مناسبی برای بیان رفتار مومسان مواد است. [۱۷].



شکل ۴: بیان یک بعدی الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه [۱۷]

معیار تسلیم در حالت بارگذاری تک محوره برای این الگو، در معادله ۱ نشان داده شده است [۱۷].

$$|\sigma - X| - R - k = 0 \quad (1)$$

که X متغیر سخت شونده پویا، R مقدار تغییر اندازه سطح تسلیم و k اندازه سطح تسلیم در چرخه اول است. معادلات ۲ و ۳ بیانگر سخت شونده پویای غیرخطی اند [۱۷].

$$X = v \frac{C}{\gamma} + \left(X_0 - v \frac{C}{\gamma} \right) \exp(-v\gamma(\epsilon_p - \epsilon_{p,0})) \quad (2)$$

$$X = \sum_{i=1}^M X_i \quad (3)$$

که $v = \pm 1$ نشان دهنده جهت سیلان جریان مومسان است و X_0 و $\epsilon_{p,0}$ به ترتیب مقادیر اولیه X و ϵ_p می باشند. در معادله ۳ نیز، با در نظر گرفتن M برابر با ۳، متغیر سخت شونده به سه قسمت تقسیم می شود که موجب افزایش دقت الگو می شود [۱۷].

$$R = Q(1 - \exp(-bp)) \quad (4)$$

که در آن p کرنش مومسان تجمعی، Q مقدار نهایی یا اشباع شده است که حداکثر افزایش یا کاهش شعاع سطح تسلیم را نشان می دهد و b نرخ است که اشباع (یعنی Q) حاصل می شود [۱۷].

همچنین، در شبکه لزج از قانون نورتون- هاف^۵ برای در نظر گرفتن اثر زمان استفاده شده است (معادله ۵)

$$\dot{\epsilon}_v = A\sigma_v^n \quad (5)$$

که $\dot{\epsilon}_v$ نرخ کرنش لزج، A و n ثوابت مادی و σ_v تنش لزج است. همچنین، نسبت ضرایب ارتجاعی، در دو شبکه لزج و مومسان، با ضریب f مطابق معادله ۶ بیان می شود.

$$f = \frac{K_v}{K_v + K_p} \quad (6)$$

که K_p و K_v ، به ترتیب، ثوابت ارتجاعی در شبکه های ارتجاعی- لزج و ارتجاعی- مومسان اند [۱۷].

برای بدست آوردن ثوابت مادی این الگوی رفتاری ماده، از آزمون های خستگی کم چرخه در دمای اتاق و دمای زیاد استفاده شده است. این ثوابت برای همبسته A356 توسط فرهی و همکاران [۷]، محاسبه شده است که در جداول ۳-۱ قابل مشاهده می باشند.

جدول ۱: ثوابت مادی الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه (بخش

رفتار ارتجاعی- مومسان) [۷]

رفتار مومسان		رفتار ارتجاعی			دما
b	Q (MPa)	k (MPa)	v	E (GPa)	(°C)
۲۰	۱۵	۷۵	۰,۳۳	۶۹,۱	۲۵
۱	-۱۷	۵۷	۰,۳۳	۵۳	۲۵۰

جدول ۲: ثوابت مادی الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه (بخش

رفتار مومسان) [۷]

رفتار مومسان						دما
γ_3	γ_2	γ_1	C_3 (MPa)	C_2 (MPa)	C_1 (MPa)	(°C)
۱۲۶۷	۱۳۳۲	۱۳۰۷	۴۶۸۹۰	۲۴۸۶۵	۱۲۵۹۸	۲۵
۸۹۴	۳۶۹۰	۴۰۸	۳۵۳۲	۸۸۴۸	۵۶۹۲	۲۵۰

جدول ۳: ثوابت مادی الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه (بخش

رفتار لزج) [۷]

رفتار لزج			دما
$f(-)$	$n(-)$	$A(MPa^{-n}Sec^{-1})$	(°C)
۰,۲۰	۱,۶۷	2×10^{-5}	۲۵
۰,۰۵	۱,۶۷	8×10^{-7}	۲۵۰

همانطور که در بخش مواد و آزمون گفته شد، آزمون های خستگی کم چرخه در نرخ کرنش ۰,۰۱ بر ثانیه انجام شده است، در حالی که آزمون های خستگی مکانیکی- حرارتی، در نرخ کرنش ۰,۰۰۰۱ بر ثانیه

⁴ Bauschinger

⁵ Norton-Hoff

¹ Viscous

² Non-linear isotropic-kinematic

³ Cyclic ratcheting

۴-۱- تئوری های آسیب خستگی

۴-۱-۱- الگوهای کلاسیک

پس از تحلیل رفتار تنش- کرنش ماده توسط الگوهای ساختاری^۲، از نتایج حاصل از این تحلیل جهت تخمین عمر خستگی ماده استفاده می شود. این کار به وسیله تئوری های آسیب خستگی در ماده انجام می شود که این تئوری ها به طور کلی به چهار دسته الگوهای کلاسیک، الگوهای بر پایه نرخ آسیب، الگوهای بر پایه مکانیک شکست و الگوهای بر پایه انرژی کرنش، تقسیم می شوند [۱۹]. صورت کلی تئوری های کلاسیک در معادله ۷ مشاهده می شود.

$$\varphi(\varepsilon, \varepsilon_p, \sigma, \dots) = f(N_f, \alpha, \beta, \dots) \quad (7)$$

که سمت راست معادله فوق، شامل خواص مادی و سمت چپ، شامل شرایط بارگذاری، تنش و کرنش است. یکی از این تئوری های متداول، معیار مانسون- کافین^۳ است که همانطور که در معادله ۸ مشاهده می شود، به تشریح یک معادله خطی بین دامنه کرنش مومسان و عمر، در مقیاس لگاریتمی می پردازد. معادله مانسون- کافین- باسکویین^۴، روش کرنش کل (مجموع کرنش ارتجاعی و مومسان) است و به فرم رابطه ۹ نوشته می شود [۱۹].

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \dot{\varepsilon}_f (2N_f)^c \quad (8)$$

ایراد عمده این دسته از تئوری ها این است که عمر بر حسب پارامتر های دیگر مانند دما محاسبه می شود و چنانچه مانند خستگی مکانیکی- حرارتی دما متغیر باشد، این تئوری ها قابل استفاده نیستند [۱۹].

۴-۲- الگوی نرخ آسیب شهید اغلو

این الگو، آسیب ماده را ترکیبی از آسیب های ناشی از خستگی، خوردگی و خزش، در نظر می گیرد. آسیب خستگی ناشی از دامنه کرنش مکانیکی زیاد در دمای کم، ایجاد می شود در حالی که آسیب خوردگی و خزش در دماهای زیاد فعال می شوند. آسیب کل در الگوی شهید اغلو به فرم رابطه ۱۰ تعریف می شود.

$$D_{tot} = D_{fat} + D_{ox} + D_{creep} \quad (10)$$

از آنجا که عمر خستگی رابطه عکس با آسیب در ماده دارد، عمر خستگی کل در الگوی شهید اغلو به فرم رابطه ۱۱ تعریف می شود.

$$\frac{1}{N_{tot}} = \frac{1}{N_{fat}} + \frac{1}{N_{ox}} + \frac{1}{N_{creep}} \quad (11)$$

آسیب خستگی اصولاً در دمای اتاق اتفاق می افتد و ناشی از ایجاد و رشد ریزترک ها در کرنش های مومسان زیاد می باشد. این نوع آسیب با روابط کلاسیک مانند مانسون- کافین- باسکویین به فرم رابطه ۹

انجام شده است. تفاوت نرخ کرنش بین این دو آزمون، موجب می شود که شبیه سازی خستگی مکانیکی- حرارتی بر روی همبسته آلومینیم، با ثوابت بدست آمده از آزمون های خستگی کم چرخه، دقت لازم را نداشته باشد. یک راه برای حل این مشکل، آن است که آزمون های خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی، در نرخ کرنش برابر انجام شوند. انجام این کار، موجب افزایش زمان انجام آزمون های خستگی کم چرخه می شود، از طرفی ایده استفاده از آزمون های خستگی کم چرخه به منظور بدست آوردن ثوابت، به دلیل صرفه جویی در هزینه و زمان آزمون می باشد. راه دیگر می تواند در نظر گرفتن رفتار لزج ماده باشد، اما تاثیر زیادی بر کاهش خطا ندارد. راه حل استفاده شده در این پژوهش، استفاده از الگوی جانسون- کوک^۱ مطابق با پژوهش فلفلی و همکاران [۱۰]، می باشد.

۳-۲- الگوی جانسون- کوک

تنش تسلیم ماده، تابع دما و نرخ کرنش است. تاثیر دما و نرخ کرنش بر فلزات به این گونه می باشد که با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش، تنش تسلیم کاهش می یابد. برای بیان این دو اثر، الگوهای مختلفی ارائه شده است که یکی از این الگوها، الگوی جانسون- کوک می باشد [۱۰]. روابط این الگو در معادلات ۷ و ۸، ارائه شده است.

$$\sigma = \sigma^*(\varepsilon) \left(1 + c \ln \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}^*} \right) \right) (1 - T_H^m) \quad (7)$$

$$T_H = \frac{T - T^*}{T - T_{melt}} \quad (8)$$

در رابطه ۷، $\sigma^*(\varepsilon)$ مقدار تنش در نرخ کرنش مرجع $\dot{\varepsilon}^*$ و دمای مرجع T^* می باشد. لذا با داشتن ثابت های مادی این الگو، مقادیر تنش در دما و نرخ کرنش های متفاوت را می توان پیش بینی کرد. m برای همبسته A356 برابر ۱ و c در دماهای مختلف برابر ۰,۰۲۵ ذکر شده است. در نتیجه با استفاده از این الگو، رفتار همبسته آلومینیم- سیلیسیم- منیزیم در دماهای ۲۵ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش ۰,۰۰۰۱ بر ثانیه پیش بینی شده و سپس از نتایج حاصل جهت پیش بینی رفتار خستگی مکانیکی- حرارتی همبسته آلومینیم، استفاده می شود. بر اساس پژوهش فلفلی و همکاران [۱۰]، در نرخ کرنش های مختلف، تنش تسلیم ماده تغییر پیدا می کند لذا با استفاده از الگوی جانسون- کوک، تنش تسلیم ماده در نرخ کرنش ۰,۰۰۰۱ بر ثانیه محاسبه شده و از آن جهت شبیه سازی خستگی مکانیکی- حرارتی همبسته آلومینیم، استفاده می شود. دقت شود که دیگر ثوابت ماده تغییر نمی کنند. تنش تسلیم همبسته آلومینیم در نرخ کرنش ۰,۰۰۰۱ بر ثانیه در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد برابر ۶۶ مگاپاسکال و در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد برابر ۵۰ مگاپاسکال محاسبه شد.

³ Manson-Coffin

⁴ Manson-Coffin-Basquin

¹ Johnson-cook

² Constitutive models

بیان می شود. ثابت های مادی در معادله مانسون- کافین- باسکوپن، از آزمون های خستگی کم چرخه در دمای اتاق محاسبه می شوند [۲۰].

آسیب خوردگی ناشی از تشکیل لایه اکسید بر روی سطح نمونه و گسیختگی^۱ آن است که موجب بروز پدیده نفوذ اکسید شده و ایجاد ترک را در پی دارد. با تکرار این چرخه، ترک رشد کرده و تا شکست کامل پیش می رود. تمایل به خوردگی برای ایجاد ترک ها به دامنه کرنش وابسته بوده و تنش ناشی در آن ندارد [۲۰].

عمر خستگی ناشی از آسیب خوردگی به فرم رابطه ۱۲ تعریف می شود.

$$\frac{1}{N_{ox}} = \left[\frac{h_c \delta_0}{B \varphi^{ox} K_p^{eff}} \right]^{-\frac{1}{\beta}} \frac{2(\Delta \varepsilon_{mech})^{\frac{2}{\beta}+1}}{\varepsilon^{1-\frac{\alpha}{\beta}}} \quad (12)$$

در رابطه بالا برابر با ضخامت بحرانی اکسید، δ_0 ، ضریب شکل پذیری اکسید، $\Delta \varepsilon_{mech}$ ، بازه کرنش مکانیکی کل، ε ، نرخ کرنش مکانیکی، B ، α و β ، ثابت های مادی هستند. K_p^{eff} برابر با ثابت خوردگی سهمیگون موثر^۲ می باشد که روند خوردگی در یک سیکل که تحت تغییرات دما است را به فرم رابطه ۱۳ نشان می دهد.

$$K_p^{eff} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} D_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT(t)}\right) dt \quad (13)$$

در رابطه بالا برابر ضریب انتشار اکسید، Q ، انرژی فعال سازی خوردگی، R ، ثابت جهانی گازها و t_c برابر دوره تناوب یک سیکل است.

φ^{ox} برابر با ضریب تغییر فاز خوردگی^۳ می باشد و به فرم رابطه ۱۴ نشان می دهند [۲۰].

$$\varphi^{ox} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{th} + 1}{\xi^{ox}}\right)^2\right) dt \quad (14)$$

ξ^{ox} در رابطه بالا برابر با مقدار نسبی آسیب مربوط به تغییرات فازی مختلف است. این رابطه، اندرکنش بین کرنش مکانیکی و کرنش حرارتی در بارگذاری مکانیکی- حرارتی را نشان می دهد. به عنوان مثال، در بارگذاری مکانیکی- حرارتی غیرهمفاز، $\frac{\dot{\varepsilon}_{th}}{\dot{\varepsilon}_{mech}} = -1$ در نتیجه آسیب خوردگی بیشینه می شود و از آسیب خزش می توان صرف نظر نمود. علت این امر نیز آن است که در بارگذاری خستگی مکانیکی- حرارتی غیرهمفاز، در دمای زیاد، کرنش فشاری وجود دارد که در نتیجه لایه اکسید تحت فشار ایجاد می شود، سپس زمانی که دما کم باشد، لایه اکسید رفتار ترد از خود نشان می دهد و تحت کرنش کششی، گسیخته می شود. در بارگذاری خستگی حرارتی- مکانیکی همفاز،

$$D_{creep} = \varphi^{creep} \int_0^{t_c} A e^{\frac{-\Delta H}{RT(t)}} \left(\frac{\alpha_1 \bar{\sigma} + \alpha_2 \sigma_H}{K}\right)^m dt \quad (15)$$

در رابطه بالا برابر با تنش اصطکاکی^۴، ΔH ، انرژی فعال سازی آسیب خزشی، α_1 و α_2 برابر با فاکتورهای مقیاس دهی^۵ که نشان دهنده ی مقادیر نسبی آسیب در کشش و فشار هستند. در حالت تک محوره، در صورتی که هیچ آسیب خزشی در ناحیه فشاری رخ ندهد، ضرایب α_1 و α_2 به ترتیب برابر یک سوم و یک خواهد بود. تنش اصطکاکی نیز تنش تسلیم ماده بوده و رابطه خطی آن با دما به صورت رابطه ۱۶ تعریف می شود.

$$K = K_0 - K_1 T \quad (16)$$

A و m ثوابت مادی بوده و φ^{creep} برابر فاکتور فازی خزش است و به فرم رابطه ۱۷ نشان داده می شود.

$$\varphi^{creep} = \frac{1}{t_c} \int_0^{t_c} \exp\left[-\frac{1}{20} \left(\frac{\left(\frac{\dot{\varepsilon}_{th}}{\dot{\varepsilon}_{mech}}\right) - 1}{\xi^{creep}}\right)^2\right] dt \quad (17)$$

ξ^{creep} در رابطه بالا برابر با حساسیت تغییر فاز به آسیب خزش است. همان طور که گفته شد، در بارگذاری خستگی مکانیکی- حرارتی همفاز که $\frac{\dot{\varepsilon}_{th}}{\dot{\varepsilon}_{mech}} = 1$ است، آسیب خزش بیشینه می شود و می توان از آسیب خوردگی صرف نظر کرد. ثوابت مادی الگوی نرخ آسیب شهید اغلو توسط آزمون های خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی بدست می آید. این ثوابت برای همبسته A356 تحت آزمون های خستگی کم چرخه در دمای زیاد و خستگی مکانیکی- حرارتی توسط آزادی [۲۰] محاسبه شده و در جدول ۴ قابل مشاهده است.

۳-۴- الگوهای بر پایه انرژی کرنش

این دسته از الگوها، یک رابطه عکس بین انرژی کرنش هدر رفته در هر سیکل و آسیب در ماده برقرار می کنند. انرژی کرنش به دو بخش ارتجاعی و مومسان تقسیم می شود که در بعضی از الگوها انرژی کرنش ارتجاعی و مومسان را به صورت یکپارچه در نظر می گیرند و در بعضی دیگر این دو بخش، جداگانه در نظر گرفته می شود. در این مقاله تمرکز بر الگوی ارائه شده توسط فرهی و همکاران [۱۲]، می باشد. پارامتر

5 Voids

6 Intergranular cracking

7 Drag stress

8 Scaling factor

1 Rupture

2 Effective oxidation parabolic constant

3 Oxidation phasing

4 Creep

یک فرآیند زمان بر و پیچیده است، لذا چگالی انرژی کرنش مومسان از ضرب بازه تنش ($\Delta\sigma$) و بازه کرنش مومسان ($\Delta\varepsilon$) محاسبه می شود و به فرم رابطه ۱۹ محاسبه می شود [۱۲].

$$\Delta W_{u,p} = \oint \sigma d\varepsilon = \int_{cycle} \sigma d\varepsilon \approx \Delta\sigma \Delta\varepsilon^P \quad (19)$$

در بارگذاری های خستگی کم چرخه و خستگی مکانیکی- حرارتی، ماده تحت دماهای زیاد قرار داشته و تنش میانگین نیز، یک مقدار غیر صفر دارد و از آنجا که دمای زیاد در بیشتر موارد باعث کاهش عمر خستگی شده و تنش میانگین فشاری باعث افزایش عمر و تنش میانگین کششی باعث کاهش عمر می شود، لذا در نظر گرفتن دو ضرایب تصحیح تنش میانگین و دما، ضروری می باشد [۱۲].

ضریب تصحیح دما در رابطه ۱۸ به فرم رابطه ۲۰ نوشته می شود.

$$\varphi_T = \left[\frac{\exp\left(-\frac{T_{act}}{T_{max}}\right)}{\exp\left(-\frac{T_{act}}{T_m}\right)} \right]^n \quad (20)$$

T_{act} در رابطه بالا برابر دمای فعال سازی می باشد که در دماهای زیادتر از این دما، آسیب های خزش و خوردگی، فعال می شوند. دمای فعال سازی در این پژوهش، برابر ۴۲٫۵٪ دمای ذوب ماده در نظر گرفته شده است. T_m برابر با دمای ذوب ماده و n ، ثابت مادی است [۱۲].

ضریب تصحیح تنش میانگین در رابطه ۱۸ به فرم رابطه ۲۱ نوشته می شود.

$$\Psi_\sigma = \left(1 + m_1 \frac{\sigma_{mean}}{\sigma_a} \right)^{m_2} \quad (21)$$

در رابطه ۲۱، σ_{mean} برابر تنش میانگین، σ_a برابر با دامنه تنش است. ثوابت الگوی انرژی کرنش ارائه شده، تحت آزمون های خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی بدست می آیند که این ثوابت برای همبسته A356 توسط آزادی [۱۸]، محاسبه شده و در جدول ۶ قابل مشاهده می باشند.

جدول ۶: ثوابت الگوی انرژی کرنش مومسان با دو ضریب تصحیح برای همبسته A356.0 [۱۸]

نوع آزمون خستگی		ثابت	
LCF/TMF	TMF	LCF	
۱۰٫۱	۱۳٫۱	۱۴٫۷	n
۷٫۶	۲٫۱	۷٫۷	m_1
۰٫۷	۱	۰٫۷	m_2
۶۳۶۳٫۵	۲۱۴۰٫۷	۷۸۳٫۴	A_u
۲٫۴	۱٫۲	۲٫۳	B_u

آسیب در این الگو بر حسب چگالی انرژی کرنش مومسان سیکل پایدار به همراه دو ضریب تصحیح می باشد. یک ضریب تصحیح تنش به منظور در نظر گرفتن اثر تنش میانگین و یک ضریب تصحیح دما به منظور در نظر گرفتن آسیب ماده در دماهای بالا، می باشد. در این الگو اثر آسیب خزش و خوردگی به صورت غیر مستقیم لحاظ شده است.

فرم کلی الگوی انرژی با دو ضریب تصحیح تنش و دما به فرم رابطه ۱۸ نوشته می شود [۱۲].

$$N_f = A_u [\Delta W_{u,p} (\Psi_\sigma + \varphi_T)]^{-B_u} \quad (18)$$

در رابطه بالا، Ψ_σ ، ضریب تصحیح تنش میانگین، φ_T ، ضریب تصحیح دمای بیشینه، $\Delta W_{u,p}$ ، چگالی انرژی کرنش مومسان در سیکل پایدار و A_u و B_u ، ثابت های مادی هستند.

جدول ۴: ثوابت مادی همبسته A356 در الگوی شهید اغلو [۱۸]

نوع آسیب	مقدار ثابت در آزمون خستگی
خستگی	مکانیکی- حرارتی غیرهمفاز
$\frac{\sigma_f}{E}$	۰٫۰۰۹۸۵
ε_f	۰٫۰۰۴۹۷
b	-۰٫۱۸۸
c	-۰٫۱۴۹
خوردگی	مکانیکی- حرارتی غیرهمفاز
B	۰٫۰۰۲
ξ^{ox}	۰٫۵
h_c	۴۰۰
Q	۱۲۰
δ_0	۰٫۱
D_0	۶۰
α	۰٫۷۵
β	۱٫۵
خزش	مکانیکی- حرارتی غیرهمفاز
ξ^{creep}	۲٫۸
m	۸
ΔH	۲۱۵
K_0	۱۴۸٫۸۵
K_1	۰٫۲۰۶۶

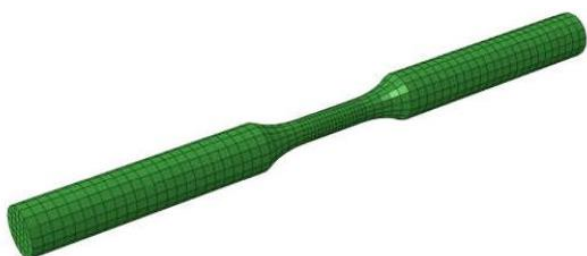
چگالی انرژی کرنش مومسان در رابطه ۱۸ برابر با سطح داخل حلقه واماندگی^۱ است اما چون انتگرال گیری از سطح داخلی حلقه واماندگی

¹ Hysteresis loop

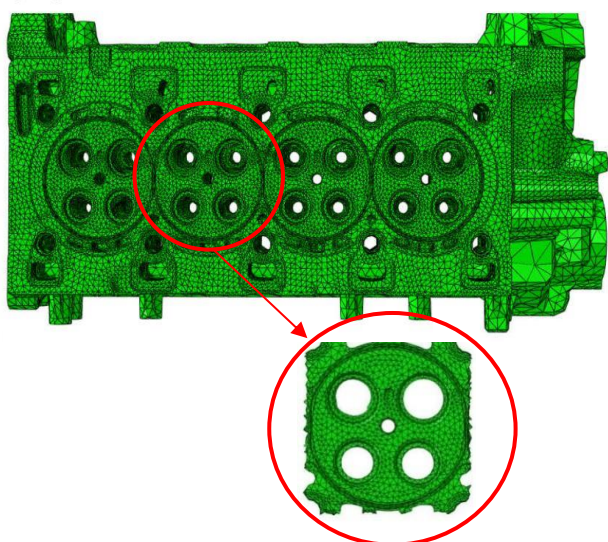
پس از شبکه بندی، اعمال سطوح تماسی و شرایط مرزی در نرم افزار HYPERMESH، این شبیه سازی به صورت یک مدرک متنی که قابلیت خوانده شدن در نرم افزار ABAQUS را دارد، وارد این نرم افزار شد. ابتدا با استفاده از نتایج تحلیل سیالات محاسباتی و دینامیک گاز، بستار مورد تحلیل حرارتی قرار گرفت. در این مرحله، انتقال حرارت جابجایی بین بستار و سیال خنک کننده، انتقال حرارت تشعشی با راهگاه های آب و محیط اطراف و سایر روندهای انتقال حرارتی در بستار، شبیه سازی شد.

جدول ۷: شرایط بارگذاری نمونه آزمون در آزمون های خستگی [۷]

نوع آزمون		متغیرها
خستگی ترمومکانیکی	خستگی کم چرخه	دما
$T_{min} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$	$T = 25, 250\text{ }^{\circ}\text{C}$	
$T_{max} = 250\text{ }^{\circ}\text{C}$		
$K_{TM} = 125\%$	$\epsilon_{a,mech} = 0.30\%$	کرنش



شکل ۵: هندسه شبکه بندی شده نمونه آزمون همبسته آلومینیم جهت تحلیل اجزای محدود



شکل ۶: هندسه شبکه بندی شده بستار و محفظه احتراق جدا شده از آن

۵- شبیه سازی اجزای محدود

۵-۱- شبیه سازی رفتار تنش- کرنش نمونه آزمون با استفاده از الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دو لایه

این قسمت به منظور صحنه گذاری نتایج بدست آمده توسط فرهی و همکاران [۷]، انجام شده است.

به منظور مقایسه نتایج این مقاله و نتایج فرهی و همکاران [۷]، ابتدا هندسه نمونه آزمون مطابق با شکل ۱ جهت شبیه سازی آزمون خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی، در نرم افزار SOLID-WORKS شبیه سازی شد. هندسه شبکه بندی شده در شکل ۵ قابل مشاهده است.

ثوابت مادی الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دو لایه مطابق جدول ۱، ۲ و ۳، به نرم افزار ABAQUS وارد شد. جهت شبیه سازی آزمون خستگی کم چرخه، دمای نمونه مطابق آزمون، ثابت در نظر گرفته شده و از آنجا که آزمون از نوع کرنش- کنترل است، جابجایی یک سر نمونه طبق رابطه ۲۲ محاسبه شده و به نمونه اعمال گردید.

$$\Delta L = \epsilon L_0 \quad (22)$$

L_0 در رابطه بالا برابر طول اولیه ناحیه گیج^۱ است. به منظور شبیه سازی آزمون مکانیکی- حرارتی نیز کرنش کل و دما مطابق آزمون به نرم افزار وارد می گردد که این بارگذاری بصورت غیرهمفاز است و در بیشینه دما، کرنش فشاری و در کمینه دما، کرنش کششی می باشد. دمای اولیه برابر ۵۰ درجه سانتیگراد و کرنش اولیه برابر ۰.۳٪ در نظر گرفته شده است که نماینده پیش بار پیچ ها در بستار قبل از بارگذاری مکانیکی- حرارتی می باشد. شرایط شبیه سازی خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی در جدول ۷ ارائه شده است. برای شبکه بندی نمونه نیز از ۲۴۳۲ مش شش وجهی^۲ در نرم افزار HYPERMESH، استفاده شده است.

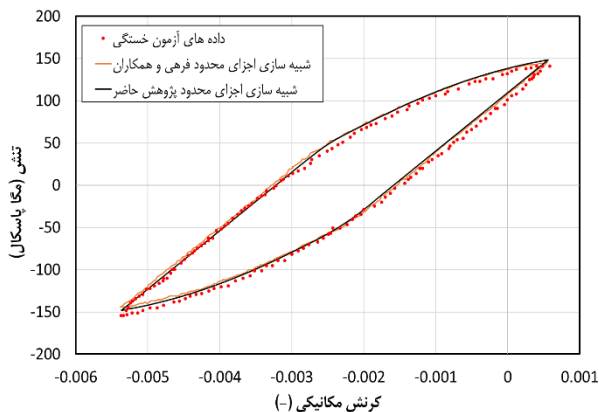
۵-۲- شبیه سازی رفتار تنش- کرنش بستار با استفاده از الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دو لایه

پس از شبیه سازی یک بعدی نمونه آزمون و صحنه گذاری ثوابت موجود در جداول ۱، ۲ و ۳، از این نتایج جهت تحلیل رفتار تنش- کرنش یک بستار موتور دیزل سواری چهار استوانه، استفاده می شود. ابتدا هندسه بستار و مجموعه قطعات در گیر با آن در نرم افزار Pro/E شبیه سازی شده و سپس در نرم افزار دانه بندی HYPERMESH توسط دانه های چهاروجهی^۳، شبکه بندی شد. جهت تسریع در روند تحلیل و مطالعه رفتار نواحی بحرانی، تنها محفظه احتراق^۴ استوانه شماره ۲، مورد تحلیل قرار گرفت. هندسه شبکه بندی شده بستار و محفظه احتراق جدا شده از آن در شکل ۶ قابل مشاهده است.

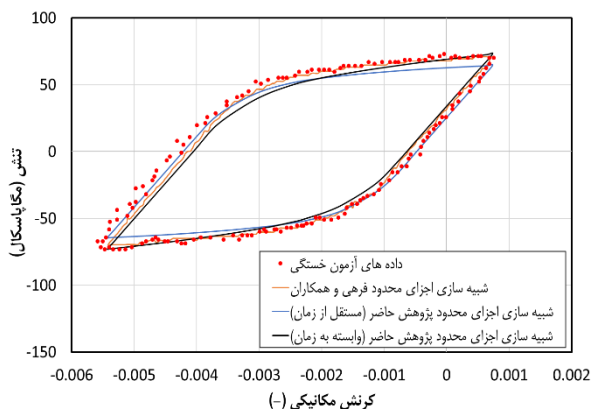
³ Tetrahedral
⁴ Valve bridge

¹ Gage length
² Hexahedral

نتایج شبیه سازی با نتایج شبیه سازی ارائه شده توسط فرهی و همکاران [۷] و داده‌های آزمون، مقایسه شده است. تمامی منحنی های تنش- کرنش در چرخه نیمه عمر ماده که به عنوان چرخه پایدار در نظر گرفته شده، گزارش شده است. نتایج شبیه سازی خستگی کم چرخه در دو دمای ۲۵ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد در شکل های ۷ و ۸ قابل مشاهده است.



شکل ۷: رفتار تنش- کرنش همبسته آلومینیم در چرخه نیمه عمر، تحت بارگذاری خستگی کم چرخه در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد



شکل ۸: رفتار تنش- کرنش همبسته آلومینیم در چرخه نیمه عمر، تحت بارگذاری خستگی کم چرخه در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد

همانطور که مشاهده می شود، نتایج شبیه سازی با نتایج شبیه سازی فرهی و همکاران [۷] و همچنین داده های آزمون، مطابقت مناسبی دارد. در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد، به دلیل زیاد بودن دما، رفتار لزج ماده قابل توجه می شود به همین دلیل تنش در ماده بدون در نظر گرفتن تنش لزج، عملاً کمتر از مقدار تنش در آزمون خستگی کم چرخه می باشد. خطای نسبی تنش بیشینه و کمینه نتایج شبیه سازی فرهی و همکاران [۷] و پژوهش حاضر با داده های آزمون خستگی کم چرخه در دو دمای ۲۵ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد در جدول ۸ گزارش شده است. بر اساس این جدول، مقادیر تنش بیشینه پژوهش فرهی و همکاران [۷]، خطای کمتری دارد اما در مقادیر تنش کمینه، نتایج پژوهش حاضر،

پس از تحلیل حرارتی، جهت شبیه سازی بارگذاری، در مرحله اول، نشیمنگاه های دریچه در ورودی دریچه ها جا زده شده و نیروی پیچ ها اعمال می شوند. در مرحله دوم، دمای بستار از دمای محیط به دمای حالت دریچه گاز کاملاً باز، می رسد. در مرحله سوم، فشار احتراق به بستار اعمال شده و در مرحله چهارم، دما به دمای محیط باز می گردد. سه مرحله افزایش دما، فشار احتراق و بازگشت به دمای محیط، یک چرخه بارگذاری خستگی مکانیکی- حرارتی در بستار را تشکیل می- دهند. جهت پایدار شدن رفتار تنش- کرنش، دو چرخه از خستگی مکانیکی- حرارتی به بستار اعمال شده است.

۳-۵- پیش بینی آسیب در بستار با استفاده از الگوی انرژی کرنش مومسان

همانطور که در بخش ۳-۴ ذکر شد، جهت محاسبه عمر خستگی بستار، از الگوی انرژی کرنش مومسان به همراه دو ضریب تصحیح جهت در نظر گرفتن اثر دما و تنش میانگین استفاده شد. جهت پیاده سازی این الگو، معادلات آن توسط یک اسکریپت به زبان PYTHON در محیط نرم افزار ABAQUS نوشته شد. ورودی های اسکریپت نوشته شده، تنش بیشینه اصلی، کرنش مومسان معادل و دما در دو مرحله آخر بارگذاری و ثابت مادی الگو می باشد که پیش از این توسط آزادی [۱۸] بدست آمده و در جدول ۶ ارائه شده است. خروجی این اسکریپت، توزیع عمر خستگی در بستار به شکل کانتور می باشد.

۴-۵- پیش بینی آسیب در بستار با استفاده از الگوی شهید اغلو

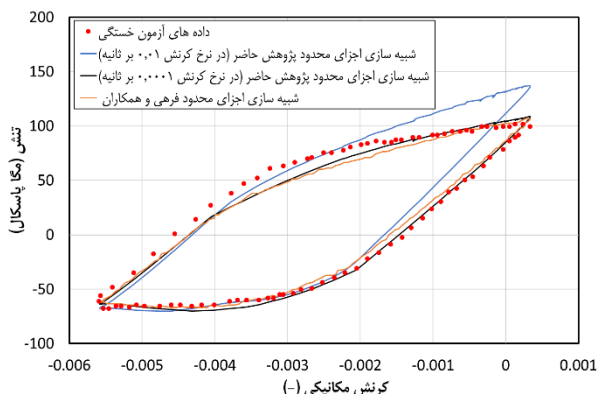
این الگو و روابط مربوط به آن در بخش ۲-۴ ارائه شد و ثابت مادی آن نیز توسط آزادی [۱۸] محاسبه شده و در جدول ۴ ارائه شده است. جهت شبیه سازی آسیب در بستار، از نرم افزار تجاری تحلیل خستگی، FEMFAT استفاده شد که الگوی شهید اغلو نیز در آن موجود است. ابتدا اطلاعات مش بندی بستار یعنی مختصات گره ها به نرم افزار وارد می شود. پس از وارد نمودن ثابت الگوی شهید اغلو، تنش، کرنش مجموع و دما از سیکل آخر بارگذاری به نرم افزار وارد می شوند. خروجی شامل توزیع عمر خستگی و توزیع هر یک از آسیب های مکانیکی، خوردگی و خزش به شکل کانتور می باشد.

۶- بحث بر روی نتایج

۶-۱- نتایج شبیه سازی خستگی کم چرخه بر روی نمونه آزمون همبسته آلومینیم

مطابق آنچه در بخش ۱-۵ ذکر شد، شبیه سازی نمونه آزمون تحت خستگی کم چرخه در دو دمای ۲۵ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد انجام شد.

خطای نسبی نتایج فرهی و همکاران [۷] و پژوهش حاضر با نتایج آزمون خستگی مکانیکی- حرارتی روی همبسته آلومینیم در جدول ۹ گزارش شده است که نشان دهنده مناسب بودن نتایج ارائه شده در این پژوهش، می باشد.



شکل ۹: رفتار تنش- کرنش همبسته آلومینیم در چرخه نیمه عمر، تحت بارگذاری خستگی مکانیکی- حرارتی غیرهمفاز با تغییرات دما بین ۲۵-۲۵۰ درجه سانتیگراد

جدول ۹: خطای نسبی تنش بیشینه و کمینه نتایج فرهی و همکاران [۷] و پژوهش حاضر با نتایج آزمون خستگی مکانیکی- حرارتی

خطای نتایج فرهی و همکاران [۷] با نتایج آزمون (%)	خطای نتایج پژوهش حاضر با نتایج آزمون (%)	نوع تنش
۶,۵۸	۷,۵۹	بیشینه
۱,۶۰	۶,۶۸	کمینه

۳-۶- نتایج شبیه سازی خستگی مکانیکی- حرارتی بر روی بستار موتور دیزل سواری

طبق روشی که در بخش ۲-۵ ذکر شد، ابتدا تحلیل حرارتی بر روی بستار انجام گرفت. خروجی تحلیل مورد نظر، توزیع دما در حالت دریچه گاز کاملاً باز در بستار می باشد که در شکل ۱۰ قابل مشاهده می باشد. همانطور که در این شکل مشاهده می شود بین دو دریچه دود، بیشترین دما وجود دارد که این پدیده به دلیل همگرایی گازهای احتراق خروجی در این ناحیه است. قابل ذکر است که در آزمون دمایی بر روی بستار فوق الذکر، بیشینه دما در همین ناحیه رخ داده و برابر با ۲۰۷,۹ درجه سانتیگراد [۱۸]، بدست آمد. دمای بیشینه در شبیه سازی نیز، برابر با ۲۰۳,۵ درجه سانتیگراد می باشد که با نتایج آزمون دمایی، اختلاف ناچیزی دارد.

پس از تحلیل حرارتی بستار، جهت شبیه سازی خستگی مکانیکی- حرارتی بستار، از الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه استفاده شده است. توزیع تنش اصلی بیشینه و کرنش مومسان معادل در بستار، به

پیش بینی بهتری دارد. با این حال تفاوت خطای این پژوهش با نتایج فرهی و همکاران [۷] در تنش بیشینه قابل چشم پوشی است و در نتیجه با روش ذکر شده در این مقاله می توان رفتار ماده را تحت خستگی کم چرخه به خوبی پیش بینی کرد.

مطابق انتظار قبلی، در خستگی کم چرخه در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد، مقادیر تنش بیشینه و کمینه کمتر از خستگی کم چرخه در دمای اتاق است که این پدیده به دلیل وابستگی تنش تسلیم ماده به دما و کاهش آن با افزایش دما می باشد. همچنین، کرنش مومسان (عرض منحنی واماندگی روی خط تنش میانگین صفر) در دمای ۲۵۰ درجه سانتیگراد، بیشتر از دمای اتاق می باشد که این پدیده نیز به علت تنش تسلیم کمتر ماده در دماهای زیاد می باشد.

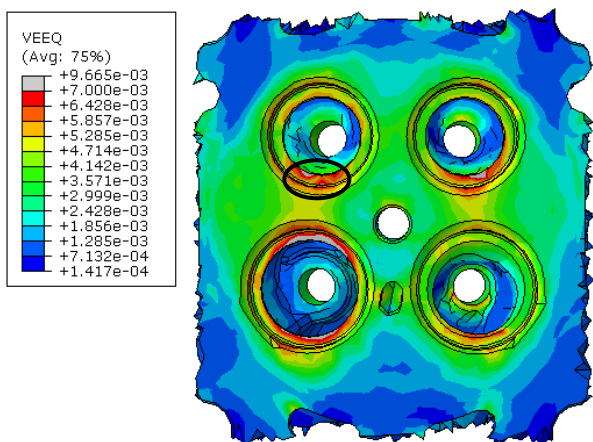
جدول ۸: خطای نسبی تنش بیشینه و کمینه نتایج فرهی و همکاران [۷] و پژوهش حاضر با نتایج آزمون خستگی کم چرخه

خطای نتایج فرهی و همکاران [۷] با نتایج آزمون (%)	خطای نتایج پژوهش حاضر با نتایج آزمون (%)	نوع تنش	دما (°C)
۳,۴۲	۴,۷۲	بیشینه	۲۵
۶,۴۹	۳,۸۹	کمینه	
۱,۴۰	۲,۸۱	بیشینه	۲۵۰
۲,۷۳	۰	کمینه	

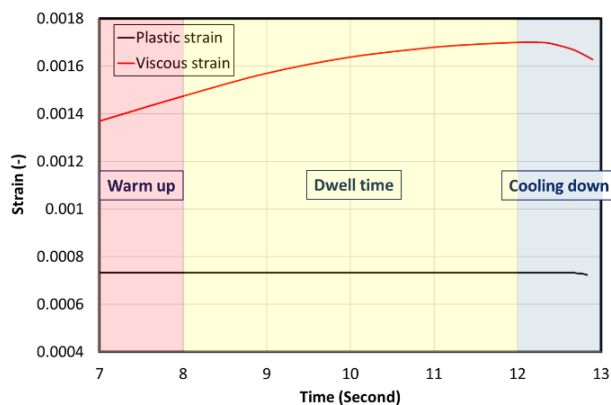
۲-۶- نتایج شبیه سازی خستگی مکانیکی- حرارتی بر روی نمونه آزمون همبسته آلومینیم

در بخش قبل، ثوابت مادی محاسبه شده از داده های آزمون های خستگی کم چرخه توسط فرهی و همکاران [۷] در دماهای ۲۵ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد، در شبیه سازی خستگی کم چرخه همبسته آلومینیم گنجانده شده و صحت این ثوابت مورد تایید قرار گرفت. حال از ثوابت بدست آمده جهت شبیه سازی خستگی مکانیکی- حرارتی بر روی همبسته آلومینیم، استفاده شده است. نتایج این شبیه سازی در شکل ۹ قابل مشاهده می باشد. همانطور که در بخش ۱-۳ ذکر شد، تفاوت نرخ کرنش آزمون های خستگی کم چرخه و مکانیکی- حرارتی، موجب می شود که شبیه سازی خستگی مکانیکی- حرارتی با ثوابت بدست آمده از آزمون های خستگی کم چرخه، با نتایج آزمون همخوانی نداشته باشد که این امر در شکل ۹ مشهود است. لذا در این مقاله از الگوی جانسون- کوک استفاده شده و تنش تسلیم جدید ماده در دو دمای ۲۵ و ۲۵۰ درجه سانتیگراد و نرخ کرنش ۰,۰۰۰۱ بر ثانیه پیش بینی شده و از آن جهت شبیه سازی خستگی مکانیکی- حرارتی همبسته آلومینیم، استفاده می شود. همانطور که در شکل ۱۰ قابل مشاهده می باشد، با استفاده از این روش، نتایج شبیه سازی با نتایج شبیه سازی فرهی و همکاران [۷] و همچنین نتایج آزمون، تطابق قابل قبولی دارد.

دما نیز، این کرنش سیر صعودی دارد که به علت وابستگی پدیده خزش به زمان است. این پدیده یا همان تاثیر بالای کرنش لزج در بستار آلومینیومی، در پژوهش فرهی و همکاران [۸] نیز، گزارش شده است.



شکل ۱۳: توزیع کرنش لزج معادل در بستار موتور دیزل سواری در مرحله آخر بارگذاری

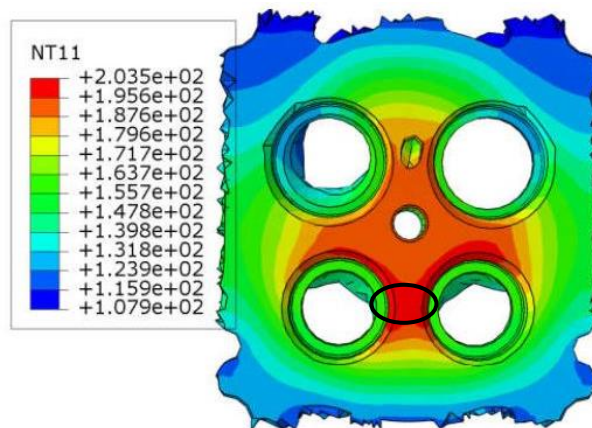


شکل ۱۴: تغییرات کرنش مومسان و لزج، نسبت به زمان، در سیکل آخر بارگذاری بستار موتور دیزل سواری

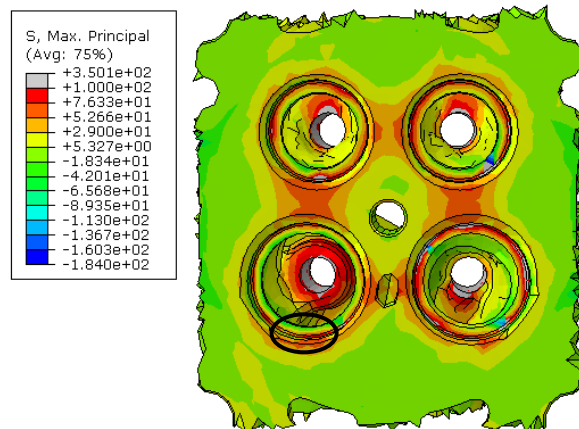
۴-۶- شبیه سازی آسیب خستگی در بستار موتور دیزل با استفاده از الگوی انرژی کرنش مومسان

نحوه پیاده سازی این الگو و شبیه سازی بستار با استفاده از آن در بخش ۳-۵ ذکر شد. توزیع عمر خستگی در بستار موتور دیزل تحت بارگذاری خستگی مکانیکی- حرارتی محاسبه شده توسط الگوی انرژی کرنش مومسان تصحیح شده در شکل ۱۵ قابل مشاهده است. در این شکل محل کمترین عمر خستگی در بستار توسط دایره سیاه رنگ نشان داده شده است. این محل همان نقطه ای را نشان می دهد که بیشترین مقدار تنش میانگین در آن وجود دارد. توزیع تنش میانگین در این بستار را می توان در شکل ۱۶ مشاهده کرد. همانطور که قبلا نیز ذکر شد، تنش میانگین کششی در یک محل، آن را به ناحیه مستعد ایجاد ترک خستگی تبدیل کرده و اثر کاهشی بر عمر خستگی می گذارد که این امر در دو شکل ۱۵ و ۱۶ مشهود است. در شکل ۱۳ محل های مستعد

ترتیب در شکل های ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده می باشد. در شکل ۱۱ مشاهده می شود که مقدار تنش بیشینه در نواحی بین دریچه ها و روی نشیمنگاه دریچه ها، بیشترین مقدار را دارد. همچنین کرنش مومسان بر روی نشیمنگاه دریچه ها، بیشترین مقادیر را به خود اختصاص داده است. نواحی ذکر شده به علت قرار گیری در محل های با دمای زیاد و همچنین ضخامت کم این نواحی، به نقاط بحرانی در تحلیل بدل شده اند در نتیجه می توان انتظار داشت که شروع ترک های خستگی در این نواحی باشد.



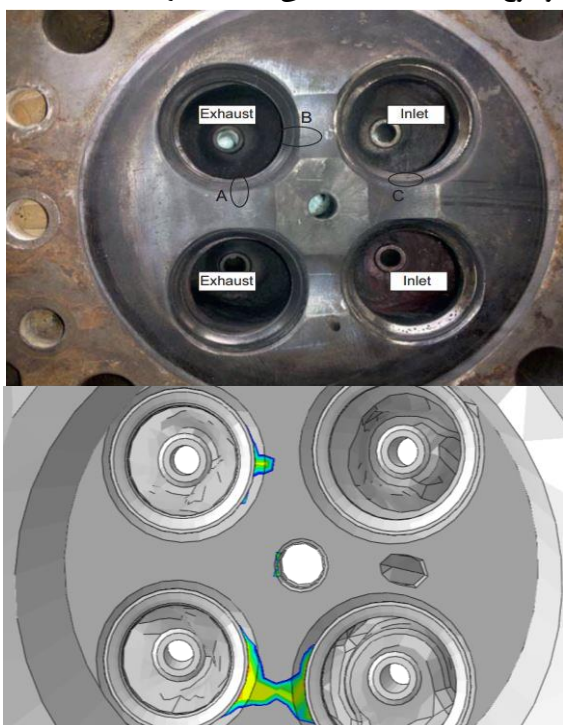
شکل ۱۰: توزیع دمای بستار موتور دیزل سواری در حالت دریچه گاز کاملا باز



شکل ۱۱: توزیع تنش اصلی بیشینه در بستار موتور دیزل سواری در مرحله آخر بارگذاری

توزیع کرنش لزج معادل در بستار و تغییرات کرنش مومسان و لزج، نسبت به زمان، به ترتیب در شکل های ۱۳ و ۱۴ قابل مشاهده است. در این شکل ها مشاهده می شود که کرنش مومسان در طول چرخه، مقدار تقریباً ثابتی دارد. در حالی که کرنش لزج با افزایش دما، افزایش و با کاهش دما، کاهش می یابد. مقادیر آن نیز بیشتر از کرنش مومسان می باشد. از آنجا که کرنش لزج، متاثر از دمای زیاد و پدیده خزش است، لذا می توان به حساسیت بالای همبسته آلومینیم به دما و اثر غالب خزش در رفتار تنش-کرنش بستار، پی برد. همچنین، در حالت نگهداری

مستقیم بسیار ناچیزی بر عمر خستگی دارد و تنها تاثیر آن، بر مقادیر تنش و کرنش است که این مقادیر توسط معادله انرژی کرنش مومسان بدون ضرایب تصحیح نیز در نظر گرفته می‌شود. بنابراین، اثر غالب دما، همان اثر غیرمستقیم آن بر عمر خستگی است. از طرف دیگر، تنش میانگین نقش حیاتی بر عمر خستگی ماده ایفا می‌کند. همانطور که در شکل ۱۶ مشاهده می‌شود، در بیشتر نقاط بستار، تنش میانگین فشاری وجود دارد که این امر تاثیر مثبتی بر عمر خستگی ایفا می‌کند. بیشترین مقدار تنش میانگین کششی در بستار، برابر با ۲۹۶ مگاپاسکال بوده و مکان آن در شکل ۱۶ نشان داده شده است. محل بیشترین مقدار تنش میانگین کششی، دقیقا همان محل کمترین عمر خستگی است که این موضوع با مباحث گفته شده قبلی، مطابقت دارد.

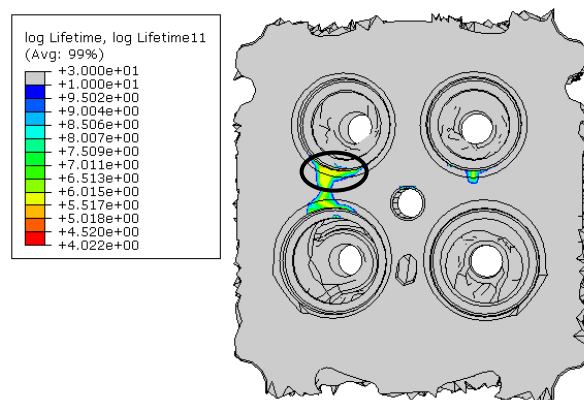


شکل ۱۷: نواحی ایجاد ترک خستگی در پژوهش ژانگ و همکاران [۲۱] (بالا) و مقایسه با شبیه سازی حاضر (پایین)

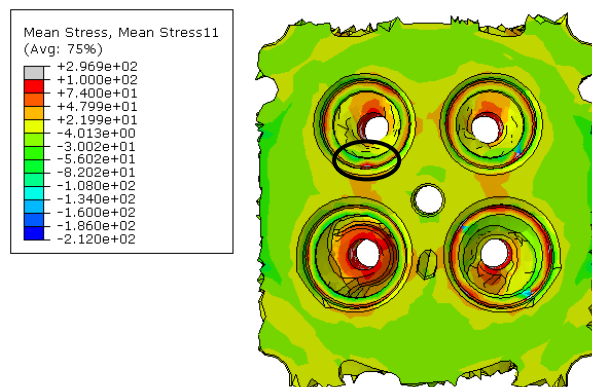
۵-۶- شبیه سازی آسیب خستگی در بستار موتور دیزل سواری با استفاده از الگوی شهید اغلو

همانطور که در بخش ۵-۴ ذکر شد، ثوابت مادی الگوی شهید اغلو و مقادیر تنش، کرنش مجموع و دما در سیکل آخر بارگذاری بدست آمده از نتایج شبیه سازی با الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دو لایه به نرم افزار FEMFAT وارد شد. توزیع عمر خستگی در بستار موتور دیزل سواری با الگوی شهید اغلو در شکل ۱۹ قابل مشاهده است. محل کمترین عمر خستگی بدست آمده از الگوی شهید اغلو در بستار موتور دیزل سواری در شکل ۱۹ نشان داده شده است. توزیع آسیب مکانیکی و خوردگی در بستار که با استفاده از الگوی شهید اغلو محاسبه شده اند، به ترتیب در شکل ۲۰ و ۲۱ قابل مشاهده است.

ایجاد ترک خستگی با پژوهش ژانگ و همکاران [۲۱]، مطابقت نسبی دارد. همانطور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، نواحی مستعد ایجاد ترک خستگی بین دریچه ها و روی نشیمنگاه دریچه ها می باشد که این امر در شبیه سازی این پژوهش نیز محقق شده است.

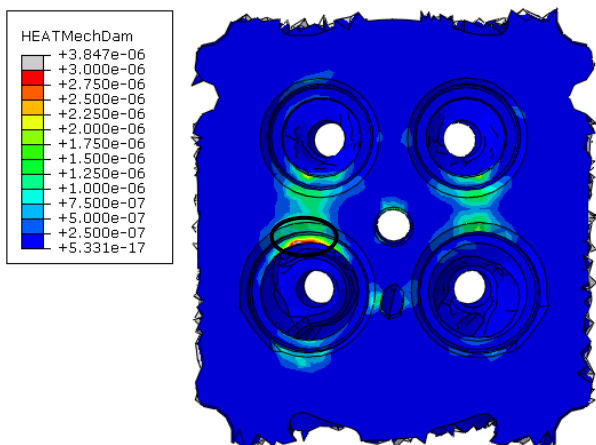


شکل ۱۵: توزیع عمر خستگی بستار موتور دیزل سواری بدست آمده از الگوی انرژی کرنش مومسان

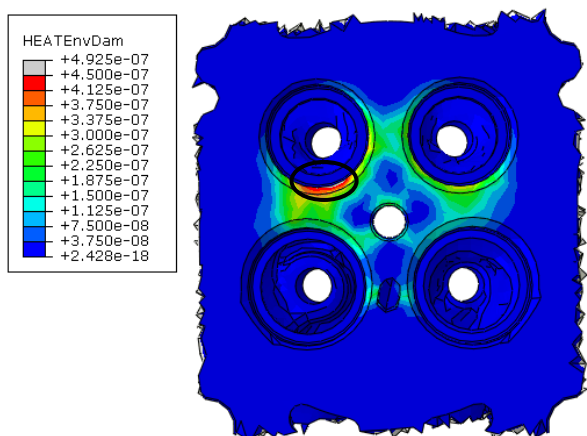


شکل ۱۶: توزیع تنش میانگین در بستار موتور دیزل سواری

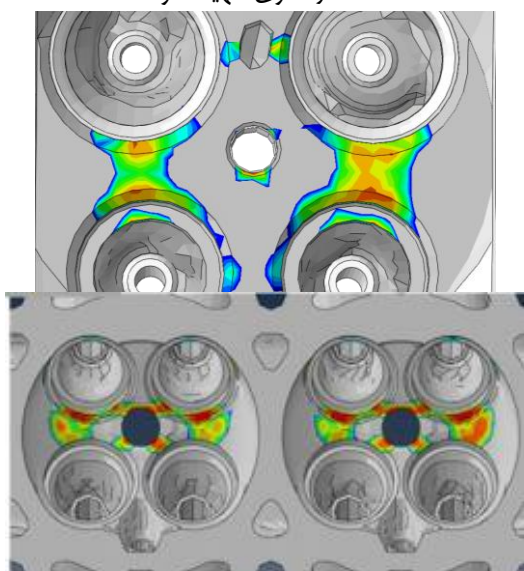
همانطور که در بخش ۳-۴ ذکر شد، دو پارامتر مهم در الگوی انرژی کرنش مومسان که به طور مستقیم بر روی عمر خستگی ماده تاثیر گذارند، دما و تنش میانگین می باشند. بر این اساس، افزایش دما و تنش میانگین کششی، باعث کاهش عمر خستگی می‌شوند. این دو اثر به صورت دو ضریب تصحیح در معادله انرژی کرنش مومسان لحاظ شده اند. همانطور که در معادله ضریب تصحیح دما (معادله ۲۰) مشاهده می‌شود، این ضریب در دماهای کم، بسیار ناچیز است و با افزایش دما، افزایش می‌یابد. این امر در شکل ۱۸ نیز قابل مشاهده است که در نواحی ای از بستار با دمای زیادتر، مقدار ضریب تصحیح دما نیز، بیشتر است. در نتیجه، در دماهای کمتر، مقدار ضریب تصحیح دما بسیار کوچک شده و عملا آسیبی از آسیب های مربوط به دمای زیاد (خوردگی و خزش)، ماده را تهدید نمی‌کند. در بستار مورد مطالعه این پژوهش، دمای بیشینه، همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، برابر ۲۰۳ درجه سانتیگراد است در حالی که دمای فعال سازی همبسته آلومینیم برابر با ۲۶۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. لذا دما در الگوی انرژی، تاثیر



شکل ۲۰: توزیع آسیب مکانیکی در بستار موتور دیزل سواری بدست آمده از الگوی شهید اغلو

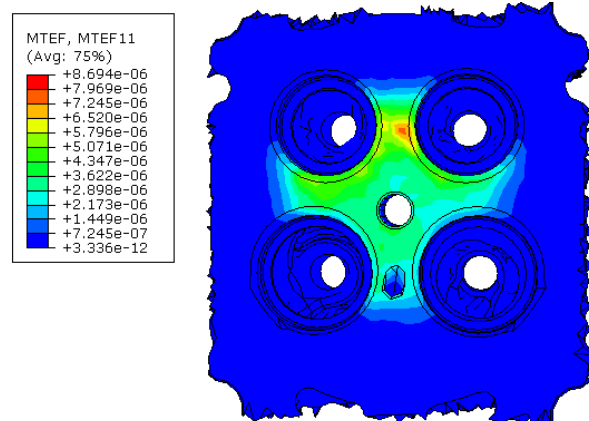


شکل ۲۱: توزیع آسیب خوردگی در بستار موتور دیزل سواری بدست آمده از الگوی شهید اغلو

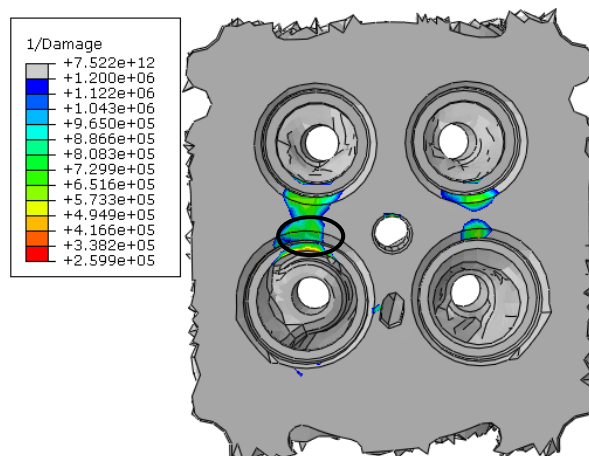


شکل ۲۲: شبیه سازی بستار موتور دیزل سواری با استفاده از الگوی شهید اغلو و ثوابت مانسون- کافین جدید (بالا) و مقایسه با پژوهش سیور و همکاران [۳] (پایین)

در شکل ۲۰ مشاهده می شود که بیشترین مقدار آسیب مکانیکی در بستار در نشیمنگاه دریچه هوا می باشد. همچنین این ناحیه، کمترین مقدار عمر خستگی را همانطور که در شکل ۱۹ قابل مشاهده است، به خود اختصاص داده است. مقدار آسیب مکانیکی در این ناحیه بیشتر از آسیب خوردگی، قابل مشاهده در شکل ۲۱، می باشد و این امر ناشی از کرنش مومسان زیاد در نشیمنگاه دریچه است که این ناحیه را مستعد ایجاد ترک خستگی می کند. در نتیجه آسیب مکانیکی در بستار مورد مطالعه، اثر غالب بر عمر خستگی نسبت به آسیب خوردگی دارد که این امر به علت اثر غالب تنش و کرنش مومسان نسبت به دما است. از آنجا که آسیب خوردگی آسیبی متکی بر دمای زیاد می باشد، و همانطور که در بخش ۴-۶ ذکر شد، دما در بستار حاضر یک عنصر بحرانی محسوب نمی شود. در رابطه با آسیب خزش، همانطور که در بخش ۵-۴ ذکر شد، در بارگذاری خستگی مکانیکی- حرارتی غیرهمفاز، آسیب خزش قابل نا دیده گرفتن می باشد. نتایج شبیه سازی بستار در شکل ۲۲، با نتایج سیور^۱ و همکاران [۳]، مقایسه شده است.



شکل ۱۸: توزیع ضریب تصحیح دما در الگوی انرژی کرنشی مومسان تصحیح شده در بستار



شکل ۱۹: توزیع عمر خستگی در بستار، بدست آمده از الگوی شهید اغلو

¹ Sever

فهرست علائم

E	مدول الاستیک، MPa
k	تنش تسلیم در سیکل اول، MPa
R	تنش اصطکاکی، MPa
X	تنش بازگشتی، MPa
C	ثابت مادی در سخت شوندهگی پویا، MPa
p	کرنش مومسان تجمعی
Q	ثابت مادی در سخت شوندهگی همسانگرد، MPa
b	ثابت مادی در سخت شوندهگی همسانگرد
A	ثابت مادی در رابطه لزجت، $\text{MPa}^{-n}\text{sec}^{-1}$
n	ثابت مادی در رابطه لزجت
f	نسبت ضریب ارتجاعی
k_p	ضریب ارتجاعی در شبکه ارتجاعی- مومسان، MPa
k_v	ضریب ارتجاعی در شبکه ارتجاعی- لزج، MPa
T	دما، $^{\circ}\text{C}$
T_m	دمای ذوب، $^{\circ}\text{C}$
\bar{c}	ثابت مادی در الگوی جانسون- کوک
m	ثابت مادی در الگوی جانسون- کوک
N	عمر خستگی، چرخه
A_u	ثابت مادی در الگوی انرژی
B_u	ثابت مادی در الگوی انرژی
n	ثابت مادی در ضریب تصحیح دما
m_1	ثابت مادی در ضریب تصحیح تنش میانگین
m_2	ثابت مادی در ضریب تصحیح تنش میانگین
A	ثابت مادی در آسیب خزش، s^{-1}
B	ثابت مادی در آسیب خوردگی، $\text{s}^{-0.5}$
b	توان استحکام خستگی
c	توان شکل پذیری خستگی
D_0	ثابت مادی در سهمیگون خوردگی، $\frac{\text{m}^2}{\text{sec}}$
ΔH	انرژی فعال سازی خزش، $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
h_c	ضخامت بحرانی لایه اکسید، μm
k	تنش پسا، MPa
K_p^{eff}	سهمیگون خوردگی موثر
Q	انرژی فعال سازی خوردگی، $\frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
m	ثابت مادی در آسیب خزش
R	ثابت جهانی گازها، $\frac{\text{J}}{\text{mol.k}}$
t	زمان، s
t_c	زمان چرخه، s

با توجه به شکل ۲۲، نواحی بحرانی بستار بین دریچه دود و هوا واقع شده که این امر در پژوهش سیور و همکاران [۳]، نیز محقق شده است. با تخمین آسیب خستگی در بستار موتور دیزل سواری، توسط دو الگوی پر کاربرد (الگوی انرژی کرنش مومسان و الگوی شهید اغلو)، مشاهده شد که در تخمین مکان ترک خستگی، این دو الگو نتایج تقریباً مشابه اما در تخمین عدد عمر خستگی، نتایج آنها بسیار متفاوت می باشد. این امر به دلیل وابستگی الگوی شهید اغلو به زمان می باشد. با توجه به روابط الگوی شهید اغلو، لحاظ کردن مدت زمان گذرای افزایش و کاهش دمای بستار ضروریست اما در پژوهش حاضر، از این زمان صرف نظر شده و شبیه سازی انتقال حرارت بصورت پایا انجام گرفته است. این امر می تواند عدد عمر غیر منطقی الگوی شهید اغلو را توجیه کند. با این حال، با توجه به نتایج مشابه این دو الگو، الگوی انرژی با داشتن روابطی ساده و همچنین تعداد پایین ثوابت مادی، الگوی بهینه تری با کاربرد بیشتری، محسوب می شود. یکی از اشکالات دیگر الگوی شهید اغلو، عمر خستگی کمتر در دمای زیادت، است. در پژوهش حاضر، یک استثنا وجود دارد و آن عمر خستگی بیشتر همبسته آلومینیم در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتیگراد است. این پدیده به علت تغییرات ریزساختاری در همبسته آلومینیم، ناشی از پدیده پیرسازی^۱ در دمای ۲۰۰ درجه سانتیگراد، است. براساس مرجع [۱۹]، الگوی شهید اغلو اندرکنش بین سه ساز و کار آسیب خستگی، خوردگی و خزش را در نظر نمی گیرد و این یکی از اشکالات آن می باشد.

۷- نتیجه گیری

رفتار تنش- کرنش و آسیب یک بستار موتور دیزل سواری چهار استوانه تحت بارگذاری خستگی مکانیکی- حرارتی غیرهمفا، مورد تحلیل قرار گرفت. به منظور محاسبه رفتار تنش و کرنش بستار از الگوی ارتجاعی- مومسان لزج دولایه موجود در نرم افزار آباکوس استفاده شد. ثوابت مادی این الگو توسط آزمون های خستگی کم چرخه بر روی نمونه آزمون همبسته آلومینیم، محاسبه و تطبیق آنها با منحنی های تنش-کرنش شبیه سازی و آزمون، ثابت شد. پس از محاسبه توزیع تنش و کرنش در بستار، از دو الگوی آسیب پر کاربرد، انرژی کرنشی مومسان تصحیح شده و الگوی شهید اغلو جهت تخمین عمر بستار استفاده شد. نتایج هر دو الگو با نمونه واقعی تطبیق داشته و نشان داده شد که الگوی شهید اغلو علیرغم استفاده گسترده آن در صنعت و نرم افزار FEMFAT، حداقل در پژوهش حاضر، کارایی لازم را نداشته و الگوی انرژی کرنشی تصحیح شده، الگوی بهینه تری در تخمین عمر خستگی بستار می باشد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران خودرو (ایپکو) اعلام می دارند.

¹ Aging

مراجع و منابع

علائم یونانی

- [1] C. Krishnappa, M. Makana, and M.M. Kulkarni, Thermo-Mechanical Analysis of the Cylinder Head and Cylinder Block-CAE Approach, SAE international, 2013
- [2] S. Trampert, T. Gocmez, S. Pischinger, Thermomechanical Fatigue Life Prediction of Cylinder Heads in Combustion Engines, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol.130, 2008
- [3] C. Sever, T. Brewer, S. Eeley, X. Chen, R. Jin, E. Khalil, and M. Herr, Cylinder Head Thermo-Mechanical Fatigue Risk Assessment under Customer Usage, SAE international, 2017
- [4] M. Chen, Y. Wang, W. Wu, Q. Cui, K. Wang, and L. Wang, Thermal-Mechanical Fatigue Prediction of Aluminum Cylinder Head with Integrated Exhaust Manifold of a Turbo Charged Gasoline Engine, SAE international, 2016
- [5] F. Zieher, F. Langmayr, A. Jelatancev, K. Wieser, Thermal mechanical fatigue simulation of cast iron cylinder heads, SAE International, Paper No. 2005-01-0796, 2005
- [6] J.L. Chaboche, A review of some plasticity and viscoplasticity constitutive theories, International Journal of Plasticity, Vol. 24, pp. 1642-1693, 2008
- [7] G.H. Farrahi, M. Ghodrati, M. Azadi, M. Rezvani Rad, Stress-strain time-dependent behavior of A356.0 aluminum alloy subjected to cyclic thermal and mechanical loadings, Mechanics of Time-Dependent Materials, Vol. 18, pp. 475-491, 2014
- [8] G.H. Farrahi, M. Ghodrati, M. Azadi, Finite element analysis of thermal and mechanical stresses in diesel engine cylinder head using two-layer elastic viscoplastic model, The Journal of Engine Research, Vol. 28, pp. 51-60, 2012
- [9] X. Su, M. Zubeck, J. Lasecki, C.C. Engler-Pinto Jr., C. Tang, H. Sehitoglu, J. Allison, Thermal fatigue analysis of cast aluminum cylinder heads, SAE International, Paper No. 2002-01-0657, 2002
- [10] M. Felfeli, M. Azadi, G.H. Farrahi, Constitutive modeling of elastic-visco-plastic behaviors in aluminum alloys subjected to cyclic loadings at various strain rates, The Journal of Strain Analysis in Engineering Design, Vol. 50, No. 2, pp. 103-124, 2015
- [11] G.H. Farrahi, A. Shamloo, M. Felfeli, M. Azadi, Numerical simulations of cyclic behaviors in light alloys under isothermal and thermo-mechanical fatigue loadings, Materials and Design, Vol. 56, pp. 245-253, 2014
- [12] G.H. Farrahi, M. Azadi, G. Winter, W. Eichlseder, A new energy-based isothermal and thermo mechanical fatigue lifetime prediction model for aluminum-silicon-magnesium alloy, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol. 36, No. 12, pp. 1323-1335, 2013
- [13] M. Azadi, G.H. Farrahi, F. Zahedi, Low cycle fatigue analysis of magnesium alloy cylinder head

σ	تنش، MPa
ε	کرنش
$\Delta\varepsilon$	بازه کرنش
$\Delta\sigma$	بازه تنش، MPa
ε_a	دامنه کرنش
σ_a	دامنه تنش، MPa
σ_m	تنش میانگین، MPa
ν	نسبت پواسون
γ	ثابت مادی در سخت شوندگی سینماتیک
$\dot{\varepsilon}$	نرخ کرنش لزج، s^{-1}
σ_v	تنش لزج، MPa
$\Delta W_{u,p}$	انرژی کرنش مومسان
φ_T	ضریب تصحیح دما در الگوی انرژی
Ψ_σ	ضریب تصحیح تنش میانگین در الگوی انرژی
T_{act}	دمای فعال سازی، $^{\circ}C$
φ	فاکتور فازی
$\dot{\varepsilon}_f$	ضریب شکل پذیری خستگی
$\dot{\sigma}_f$	ضریب استحکام خستگی، MPa
$\bar{\sigma}$	تنش معادل، MPa
σ_h	تنش هیدرواستاتیک، MPa
β, α	ثوابت مادی در آسیب خوردگی
α_1, α_2	ثوابت مادی در آسیب خزش
δ_0	ثابت مادی در آسیب خزش، $\mu m. s^{-0.75}$
ξ	ضریب حساسیت فازی

زیرنویس ها

<i>fat</i>	خستگی
<i>ox</i>	خوردگی
<i>creep</i>	خزش
<i>mech</i>	مکانیکی
<i>th</i>	گرمایی
<i>p</i>	مومسان
<i>v</i>	لزج

بالانویس ها

*	شرایط مرجع
.	نرخ زمانی

fatigue lifetime prediction model for A356.0 aluminum alloy with thermal barrier coating, PhD Thesis, Sharif University of Technology, Tehran, Iran, 2013

[19] M. Azadi, G. H. Farrahi, G. Winter, P. Huter, W. Eichlseder, Damage prediction for un-coated and coated aluminum alloys under thermal and mechanical fatigue loadings based on a modified plastic strain energy approach, *Materials and Design*, Vol. 66, Part B, pp. 587-595, 2015

[20] R.W. Neu, H. Sehitoglu, Thermo-mechanical fatigue, oxidation and creep, Part II: Life prediction, *Matallurgical Transactions A*, Vol. 20, pp. 1769-1783, 1989

[21] Q. Zhang, Z. Zuo, J. Liu, Failure analysis of a diesel engine cylinder head based on finite element method, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 34, pp. 51-58, 2013

based on plastic strain energy approach, *The Journal of Engine Research*, Vol. 27, pp. 3-10, 2012

[14] P. Wilson, N. Saintier, T. Palin-Luc, S. Bergamo, Isothermal fatigue damage mechanisms at ambient and elevated temperature of a cast Al-Si-Cu aluminum alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 121, pp. 112-123, 2019

[15] M. Wang, J.C. Pang, S.X. Li, Z.F. Zhang, Low-cycle fatigue properties and life prediction of Al-Si piston alloy at elevated temperature, *Materials Science & Engineering A*, Vol.704, pp.480-492, 2017

[16] M. Wang, J.C. Pang, M.X. Zhang, H.Q. Liu, S.X. Li, Z.F. Zhang, Thermo-mechanical fatigue behavior and life prediction of the Al-Si piston alloy, *Materials Science & Engineering A*, Vol. 715, pp.62-72, 2018

[17] ABAQUS/CAE (v6.14), User's Manual, 2014

[18] M. Azadi, Presenting of thermo-mechanical



Finite element analysis of fatigue damage in passenger-car diesel engine cylinder head under cyclic thermo-mechanical loadings

A. Basiri¹, M. Azadi^{2*}, F. Moghaddam³

¹Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, Abasiri1994@gmail.com

²Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran, m_azadi@semnan.ac.ir

³Irankhodro Powertrain Company (IPCo), Tehran, Iran, f_moghaddam@ip-co.com

*Corresponding Author

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 September 2018

Accepted: 13 February 2019

Keywords:

Finite element analysis
Passenger-car diesel engine
Cylinder head
Thermo-mechanical fatigue
Sehitoglu's model
Plastic strain energy model

ABSTRACT

In this article, the thermo-mechanical fatigue lifetime of the cylinder head of a passenger-car diesel engine has been estimated. At the first stage, stress and strain distributions in the cylinder head have been calculated using the two-layer visco-plastic model, available in the ABAQUS software. The calibration of the model was performed, using correlating of simulated hysteresis curves and low-cycle fatigue (LCF) and thermo-mechanical fatigue (TMF) tests on the aluminum-silicon-magnesium alloy. In order to estimate the fatigue lifetime of the cylinder head, two common approaches including the corrected plastic strain energy model and the Sehitoglu's model were utilized. Obtained results of both models showed that the fatigue crack area was located between valves, which could be verified by empirical observations of the fatigue crack area. Both models had similar results; however, the energy model was the optimal approach, in order to predict the fatigue lifetime of components, than that of the Sehitoglu's model. The reason was simplified formulations and the lower number of material constants for the energy model, with respect to those of the Sehitoglu's model.

