

(مقاله پژوهشی)

شبیه‌سازی تأثیر خوردگی در آب دریا بر عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جوشکاری شده به روش قوس با گاز محافظ پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی

محمد رضا هادوی^۱، فرامرز آشنای قاسمی*^۲، حسن جعفری^۳

f.a.ghasemi@sru.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد و علوم میان‌رشته‌ای، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

چکیده

در این تحقیق با استفاده از شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود تأثیر خوردگی آب شور دریا روی عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جوشکاری شده به روش قوس با گاز محافظ و پس از اعمال فرآیند اصطکاکی اغتشاشی مورد بررسی قرار گرفته است. صفحاتی با ابعاد مختلف ۴۹/۱ تا ۴۹/۸ سانتی‌متر مکعب مدل‌سازی و سپس با خسارت خوردگی به شکل مخروطی شکل، با قطر و ارتفاع متفاوت و توزیع تصادفی شبیه‌سازی شدند. در ادامه، با لحاظ خواص مکانیکی مطابق با نتایج تجربی توسط حل‌گر نرم‌افزار آباکوس عمر خستگی مورد تحلیل قرار گرفتند. نتایج تأثیر ناشی از خوردگی و خواص مکانیکی آلیاژ روی عمر خستگی و همچنین تأثیر خوردگی بر عمر مفید آلیاژ آلومینیوم بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش میزان خوردگی آلیاژ آلومینیوم مقاومت کمتری را در مقابل خستگی داشت، به گونه‌ای که با ایجاد تقریباً ۱/۱۸٪ خوردگی در سطح نمونه، ۵/۶٪ کاهش سیکل را حاصل نمود. برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی در تحلیل خوردگی خستگی آلیاژ آلومینیوم به روش تنش-عمر، از پژوهش‌های دیگر محققین استفاده شد که نتایج حاصل مطابقت خوب شبیه‌سازی با نتایج تجربی محققین را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: آلیاژ آلومینیوم؛ فرآیند اصطکاکی اغتشاشی؛ اجزاء محدود؛ خوردگی خستگی؛ خواص مکانیکی

تاریخ دریافت مقاله : ۹۹/۱۰/۱۶

تاریخ پذیرش مقاله : ۹۹/۰۲/۲۴

صص ۲۵-۳۳

مقدمه

افزایش نیازهای بشر در عصر حاضر باعث خلق مسائل تازه‌ای برای دانشمندان شده است. این مسائل تازه که پیچیدگی‌های محاسباتی بسیاری نسبت به گذشته داشتند، نیازمند رویکردهای جدیدی در حل مسئله بودند و روش‌های عددی یکی از همین رویکردها است. یکی از روش‌های عددی که در حل مسائل مختلف در رشته مکانیک کاربرد دارد روش اجزای محدود است. نرم‌افزارهای تجاری مختلفی هم بر اساس این روش معرفی و عرضه شده‌اند. یکی از متداول‌ترین نرم‌افزارهای اجزای محدود نرم‌افزار آباکوس است که توانایی حل مسائل مختلفی از یک تحلیل خطی ساده تا مسائل غیرخطی بسیار پیچیده را دارد.

پدیده خوردگی، به‌ویژه خوردگی فلزات، در صد سال گذشته توجه بسیاری از محققان را به خود معطوف داشته است. امروزه این پدیده به‌عنوان یک مبحث بین‌رشته‌ای در علوم مختلف و از جنبه‌های گوناگون مورد بررسی قرار می‌گیرد. پدیده خوردگی یکی از عوامل مخرب و مؤثر بر عمر تجهیزات و قطعات فلزی است [۱]. خوردگی حفره‌ای یکی از انواع خوردگی‌های موضعی بوده و همان‌طور که از نام آن مشخص است به‌صورت حفره‌هایی در سطح فلز ظاهر می‌شود و یکی از زیان‌بارترین و مخرب‌ترین انواع خوردگی است [۲]. طبق مطالعات، استحکام خستگی فلزات بر اثر خوردگی به شدت کاهش می‌یابد [۳]. بنابراین، پیش‌بینی اثرات خوردگی بر عمر خستگی و مقاومت فلزات مورد استفاده، بسیار مفید و مهم است [۴].

میشرا [۵] در یک مطالعه تجربی تأثیر خوردگی بر خواص مکانیکی و عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۸۰۱۱ را مورد بررسی قرار داد. او متوجه شد که خوردگی آلیاژ بطور قابل توجهی خواص مکانیکی آلیاژ را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بطوری که منجر به کاهش عمر خستگی، مقاومت کششی و استحکام خستگی می‌شود. از آنجایی که در صنعت تولید قطعات در نمونه‌های بزرگ می‌تواند هزینه و زمان بر باشد و در صورت ناکارآمدی قطعات باعث عدم بهره‌وری کافی از نظر اقتصادی گردد، می‌توان این فرآیندها را مدل‌سازی نمود. برای شبیه‌سازی خوردگی روی ورق و بررسی تأثیر آن، محققین رویکردهای مختلفی را مدنظر قرار داده‌اند.

هو و همکاران [۶] در یک مطالعه عددی با روش CDM^۱ عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم را مورد بررسی قرار دادند. رشد حفره‌ها با در نظر گرفتن اثرات تنش‌های چند محوره و آسیب خستگی مدل‌سازی، سپس شبیه‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس اجرا شد. همچنین اثر متقابل بین خوردگی و خستگی ارائه شد. آنها متوجه شدند که رشد حفره‌های خوردگی باعث افزایش تنش موضعی شده و همچنین تنش چرخشی باعث رشد سریع حفره‌ها می‌شود. هم‌زمان، خستگی اطراف حفره‌ها باعث تضعیف خواص مکانیکی شده و منجر به توزیع مجدد تنش در این ناحیه می‌شود.

پایک و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۴ برای مطالعه تأثیر خوردگی یک ورق روی مقاومت کمانشی آن، خوردگی را به‌صورت دایره‌هایی که ورق را کاملاً سوراخ کرده بود، مدل‌سازی کردند. اینکیکیک و همکاران [۸] برای مدل‌سازی خوردگی، ضخامت بخشی مستطیلی از ورق را کمتر از سایر نواحی در نظر گرفتند. سومی [۹] از توزیع حفره‌هایی مخروطی به‌صورت متقارن برای شبیه‌سازی خوردگی حفره‌ای در سطح ورق بهره بردند. شریفی و توحیدی [۱۰] خوردگی در جان یک تیر فولادی را با استفاده از توزیع منظمی از استوانه‌هایی با قطر یکسان عمق محدود شبیه‌سازی کردند. وانگ و همکاران [۱۱] خوردگی را به‌صورت توزیع تصادفی^۲ استوانه‌هایی با قطرهای مختلف در یک ورق فولادی شبیه‌سازی نمودند. از آنجایی که فرآیند اصطکاکی اغتشاشی^۳ (FSP)، به جهت ویژگی‌های منحصر به فرد خود، مورد توجه روزافزون محققین و صنایع قرار گرفته است لذا مطالعه تأثیر این فرآیند، از طریق مدل‌سازی، بر رفتار خوردگی خستگی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم جوشکاری شده، می‌تواند گام مؤثری در بهبود طراحی سازه‌هایی که از تکنیک‌های جوشکاری ورق‌ها بهره می‌برند و تحت بارهای متناوب قرار دارند، محسوب شود.

در تحقیق حاضر، تأثیر خوردگی در آب دریا روی عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جوشکاری شده با روش قوس- فلز با گاز محافظ^۴ (MIG) و به دنبال آن FSP با

¹ Continuum Damage Mechanics

² Random

³ friction stir processing

⁴ metal inert gas

است. به دلیل اینکه شکل ورق بعد از ایجاد حفره‌ها کاملاً نامنظم است، نمی‌توان از المان‌های مکعبی برای مش-بندی ورق استفاده کرد. بدین منظور ورق با استفاده از المان‌های چهار وجهی درجه ۱۰ گره‌ای C3D10^۲ مش-بندی شد.

روابط حاکم بر مسئله

با توجه به این که هدف اصلی این تحقیق تعیین تأثیر خوردگی بر عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود است، برای تحلیل و پیش‌بینی عمر خستگی آلیاژ به ازای بارگذاری و شرایط در نظر گرفته‌شده، در تحلیل‌ها از میان معیارهای معمول، معیارهای، گودمن اصلاح‌شده^۳ (رابطه (۱)) و گربیر^۴ (رابطه (۲)) استفاده گردید [۱۲].

$$\sigma_f = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_U}\right)} \quad (1)$$

$$\sigma_f = \frac{\sigma_a}{\left(1 - \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_U}\right)^2\right)} \quad (2)$$

در روابط فوق σ_U بیانگر تنش نهایی آلیاژ، σ_m تنش میانگین و σ_a دامنه تغییرات تنش است. جهت محاسبه استحکام خستگی-عمر، از رابطه (۳) استفاده شد:

$$\sigma_f = a N^b \quad (3)$$

در این رابطه σ_f استحکام خستگی-عمر، N تعداد سیکل و a ، b ضرایب تنش-عمر هستند [۱۲].

شرایط مرزی حاکم بر مسئله

بارگذاری بر یک سمت یک ورق آلومینیومی، به صورت اعمال نیروی کششی-کششی، صورت گرفت. بدین‌گونه که یک سمت ورق کاملاً مقید شده و سمت دیگر آن با یک نیروی سطحی کشیده می‌شد. این نیروی سطحی با دو اندازه مختلف و در دو گام جداگانه بر ورق وارد شد. در

استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود مورد بررسی قرار گرفته است. سپس تحلیل خوردگی خستگی در ورق صورت گرفته و عمر آلیاژ در اثر بارگذاری‌های وارد شده، مطالعه شده است.

روش تحقیق

به منظور شبیه‌سازی تأثیر خوردگی آب دریا بر عمر خستگی آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جوشکاری شده به روش MIG پس از FSP، از نرم‌افزار آباکوس استفاده شد. مدل‌هایی با خواص مکانیکی ورق جوشکاری و FSP شده، ساخته شد. با استفاده از اطلاعات بدست آمده از خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده، مدل‌سازی خوردگی حفره‌ای در ورق، تأثیر خوردگی روی میزان تنش، تحلیل عمر خستگی در ورق و عمر مفید آلیاژ در اثر بارگذاری‌های وارده بررسی شد.

در تحقیق حاضر با استفاده از اسکریپت نویسی به زبان پایتون در نرم‌افزار آباکوس، پدیده خوردگی به صورت مخروط‌هایی با قطر و ارتفاع‌های مختلف با توزیع تصادفی مدل‌سازی شد. نحوه عملکرد اسکریپت بدین‌گونه است که بعد از گرفتن ابعاد قطعه و حفره‌های خوردگی از کاربر، تعدادی مخروط به صورت تصادفی با ابعاد مختلف تولید می‌کند. این رویکرد مدل‌سازی، نزدیکی بیشتری به ساختار طبیعی پدیده خوردگی، نسبت به مدل‌سازی حفره‌ها به صورت استوانه‌هایی با اندازه‌های یکسان در سطح ورق دارد.

هندسه مورد مطالعه

به‌منظور شبیه‌سازی آزمون خستگی در محیط دریا، ورق خورده شده، ورقی با ضخامت ۵ میلی‌متر به صورت سه‌بعدی^۱ مدل‌سازی شد. از آنجا که برای مدل‌سازی نیاز است تا در راستای ضخامت ورق خوردگی به صورت حفره‌هایی از ورق کاسته شوند، نمی‌توان از هندسه ورق یا پوسته برای مدل‌سازی آلیاژ آلومینیوم استفاده کرد.

بعد از مدل‌سازی ورق، حفره‌ها به صورت پراکنده در سطح ورق توزیع شده و از حجم ورق اصلی کاسته می‌شوند (شکل ۱). از قابلیت‌های دیگر این برنامه، در نظر گرفتن تعداد مخروط‌های شبیه‌سازی خوردگی به صورت تصادفی

² 10-node quadratic tetrahedron

³ modified Goodman

⁴ Gerber

¹ Solid

نمونه	استحکام کششی (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)	ظرایب تنش - عمر	
			a	b
MIG	۲۶۹	۱۴۰	$۴/۴۲۷ \times ۱۰^۹$	-0/327
500	۲۳۷/۶	۱۳۸	$۱/۲۰۳ \times ۱۰^۹$	-0/249
750	۲۷۰/۴	۱۵۵	$۳/۳۶۷ \times ۱۰^۹$	-0/287
820	۲۷۱	۱۴۶	$۴/۹۹۳ \times ۱۰^۹$	-0/۳۷3
1000	۲۷۱/۴	۱۴۲	$۴/۹۴۳ \times ۱۰^۹$	-0/355

جدول (۱) خواص مکانیکی ورق‌های آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جوشکاری شده در شرایط مختلف FSP برای وارد کردن در اسکریپت تحلیل خوردگی خستگی

داده‌های نمونه FSP شده با سرعت دورانی ۸۲۰ دور در دقیقه مربوط به نتیجه فرآیند بهینه‌سازی به وسیله سیستم الگوریتم ژنتیک از بین دوره‌های ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ دور در دقیقه است [۱۳].

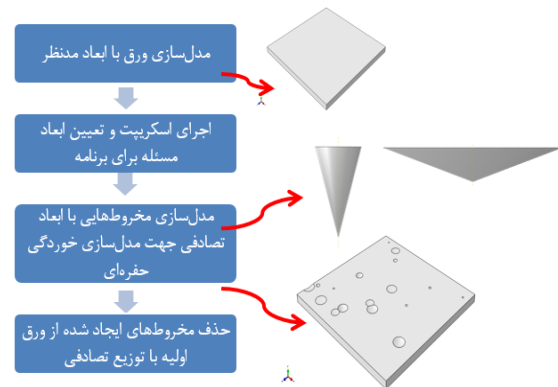
مدل سازی خوردگی خستگی

برای بررسی تأثیر خوردگی روی عمر خستگی مفید آلیاژ آلومینیوم جوش کاری شده، بعد از انجام تحلیل بارگذاری مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، از تنش‌های به‌دست‌آمده در تحلیل خستگی با رویکرد تنش-عمر، استفاده شد. نرم‌افزار آباکوس به‌صورت پیش‌فرض امکان تحلیل خستگی قطعات را ندارد. بدین منظور از نرم‌افزارهای آماده و مخصوص این کار Fe-sage استفاده شود و یا نتایج را با کد نویسی تحلیل کرد. در روش Fe-sage می‌توان نتایج تنش را از نرم‌افزار خارج کرد و یا اینکه از اسکریپت نویسی در خود نرم‌افزار استفاده نمود. از آنجایی که اسکریپت نویسی در نرم‌افزار علاوه بر دقت بالا و سرعت بیشتر نسبت به سایر روش‌ها، امکان مشاهده کانتور تغییرات را هم در اختیار قرار می‌دهد، در این تحقیق از این روش استفاده گردید. عملکرد این اسکریپت بدین‌گونه است که در گام اول فایل نتایج تحلیل تنش در مرحله قبل را باز می‌کند. این فایل با فرمت odb، خروجی اصلی تحلیل‌های نرم‌افزار آباکوس است. خواص آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ شامل تنش تسلیم، تنش نهایی و ضرایب رابطه استحکام خستگی - عمر، مطابق با رابطه (۳) و نتایج

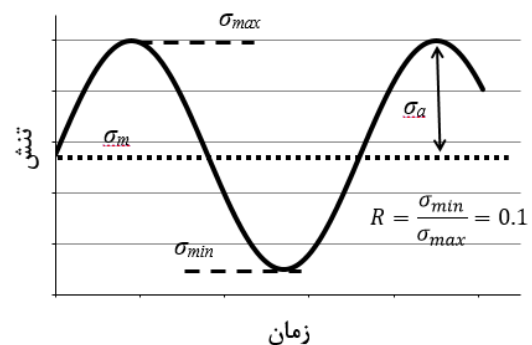
گام اول مقدار نیرو، نشان‌دهنده کمینه نیروی وارد بر ورق و در گام دوم نشان‌دهنده بیشینه نیرو وارد بر ورق است. این دو نیرو در راستای مدل‌سازی نیروی‌های کششی، به شکل سینوسی، در جهت اعمال شرایط پدیده خستگی وارد بر ورق، به‌گونه‌ای در نظر گرفته شد که نسبت نیروی کمینه به بیشینه مطابق شکل ۲ برابر با ۰/۱ گردد.

اعمال خواص مکانیکی

خواص مکانیکی ورق آلیاژ آلومینیوم ۵۰۸۳ جوشکاری شده برای حالت‌های مختلف FSP، مطابق نتایج تجربی ارائه شده در جدول ۱ وارد نرم‌افزار شد. این خواص شامل رفتار الاستیک (مدول یانگ و ضریب پواسون) و پلاستیک (تنش تسلیم و نمودار تنش کرنش) است، که از نتایج تحقیقات گذشته نویسندگان این مقاله که بصورت یک مقاله گزارش شده برگرفته شده است [۱۳].



شکل (۱) روند اجرای اسکریپت نوشته‌شده برای مدل‌سازی خوردگی حفره‌ای در سطح ورق



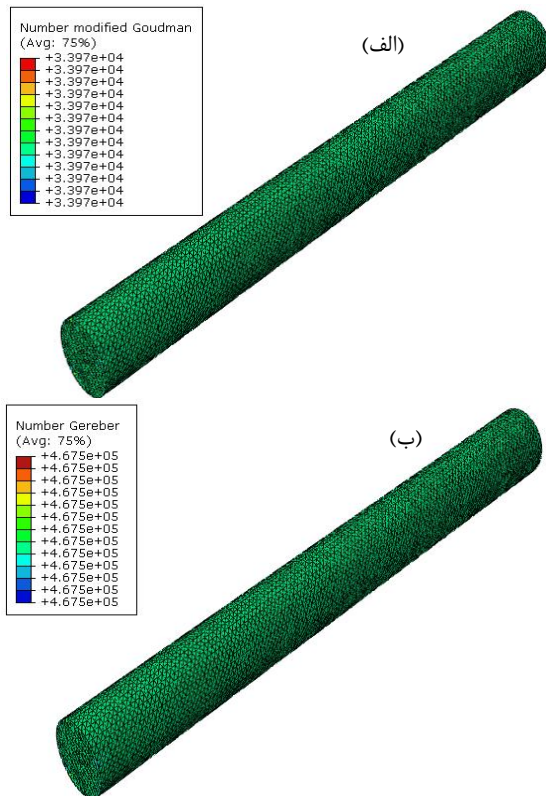
شکل (۲) میزان بارگذاری جهت شبیه‌سازی شرایط خستگی [۱۲]

¹ Contour

ضرایب نمودار تنش-عمر آن به صورت $MPa ۸۹۳/۵۶۱$ a و $b = ۰/۰۸۵۱$ است. در این مرجع سیکل کاری قطعه با دو معیار گودمن اصلاح شده و گربر محاسبه شده است که به ترتیب برابر با ۳۴۰۰۰۰ و ۴۶۰۰۰۰ هستند.



شکل (۳) روند اجرای اسکریپت نوشته شده برای تحلیل خوردگی - خستگی



شکل (۴) نتایج محاسبه تعداد سیکل کاری با استفاده از اسکریپت تحلیل خستگی. (الف) تعداد سیکل کاری مطابق با معیار گودمن اصلاح شده. (ب) تعداد سیکل کاری مطابق با معیار گربر.

برای شبیه سازی این مسئله در نرم افزار، میله ای با قطر ۱۰ سانتی متر و طول ۱۰۰۰ سانتی متر مدل سازی و تحت بار مرجع مذکور قرار گرفته است. پس از تحلیل با نرم افزار، برای تعیین تعداد سیکل کاری قطعه با استفاده از معیار

تجربی به دست آمده برای ورق های جوش کاری شده آلیاژ آلومینیم وارد نرم افزار شد.

تنش میانگین، σ_m ، و دامنه تغییرات تنش، σ_a ، (مطابق شکل ۲) با استفاده از مقادیر تنش که به ترتیب تنش به ازای کمترین میزان بارگذاری و تنش به ازای بیشترین میزان بارگذاری بودند از روابط (۴) و (۵) محاسبه شدند [۱۲]:

$$\sigma_a = \left| \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \right| \quad (۴)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (۵)$$

برای محاسبه تعداد سیکل کاری ورق آلیاژ آلومینیم به ازای بارگذاری و شرایط در نظر گرفته شده، نیاز است تا تنش معادل شرایط بارگذاری مسئله محاسبه گردد. بدین منظور در اسکریپت از روش های گودمن اصلاح شده و گربر بهره گرفته شد. با توجه به کاربرد قطعه در صنعت و اهمیت ضریب اطمینان می توان روش مورد نظر را انتخاب نمود.

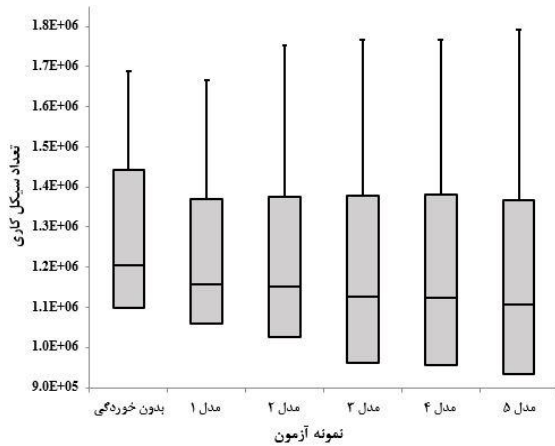
در ادامه با استفاده از رابطه (۳) و محاسبه σ_f به راحتی می توان تعداد سیکل کاری قطعه را محاسبه نمود. با محاسبه این پارامتر هدف اسکریپت تحقق یافته است و تنها ارائه نتایج باقی خواهد ماند. ارائه نتایج در اسکریپت به نحوی است که تعداد سیکل کاری در هر المان در انتهای بارگذاری به صورت کانتور در نرم افزار قابل مشاهده باشد.

این ویژگی کمک می کند که نواحی بحرانی قطعه مورد بررسی قرار گیرند. دیاگرام عملکرد اسکریپت تحلیل خوردگی خستگی نوشته شده به طور خلاصه در شکل ۳ ارائه شده است.

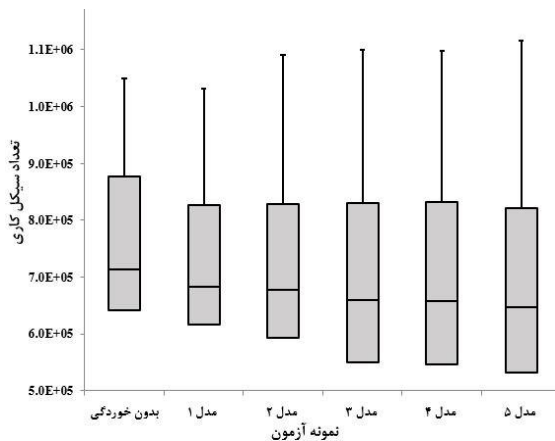
صحت سنجی کد خستگی

جهت اعتبار سنجی کد نوشته شده برای تحلیل خستگی به روش تنش-عمر از مسئله حل شده در منابع استفاده شده است [۱۲]. مسئله مورد بررسی در این مرجع، میله ای تحت اعمال بار متناوب با تنش بیشینه کششی $MPa ۳۱/۷$ و تنش کمینه فشاری $MPa ۱۳۷/۹$ قرار دارد. جنس میله از فولادی استحکام نهایی $MPa ۵۵۱/۶$ و استحکام تسلیم $MPa ۴۴۸/۲$ است. همچنین

نمونه خورده شده با حجم ۴۹/۸ سانتی متر مکعب، (پ) نمونه خورده شده با حجم ۴۹/۶ سانتی متر مکعب، (ت) نمونه خورده شده با حجم ۴۹/۴ سانتی متر مکعب، (ث) نمونه خورده شده با حجم ۴۹/۳ سانتی متر مکعب، و (ج) نمونه خورده شده با حجم ۴۹/۱ سانتی متر مکعب



شکل (۶) تعداد سیکل کاری به ازای میزان خوردگی‌های متفاوت نشان داده شده در شکل (۷) با استفاده از معیار گربر



شکل (۷) تعداد سیکل کاری به ازای میزان خوردگی‌های متفاوت نشان داده شده در شکل ۷ با استفاده از معیار گودمن اصلاح شده

همچنین لازم به ذکر است که خط پایین نمودار که نشان‌دهنده ۱۰٪ تجمیع پایانی است، از نظر عددی بسیار به چارک پایین نزدیک است و در نمودار مشخص نشده است. با توجه و مقایسه نمودارهای شکل ۶ و ۷، استفاده از معیار گودمن اصلاح شده نسبت به معیار گودبر حساسیت بیشتری را به ازای خوردگی یکسان از خود نشان می‌دهد.

شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهند که با افزایش میزان خوردگی، تعداد سیکل کاری در المان‌ها یا نواحی بیشتری

گودمن اصلاح شده و گربر استفاده شد. نتایج به دست آمده در شکل ۴ ارائه شده در منابع مطابقت دارد [۱۲].

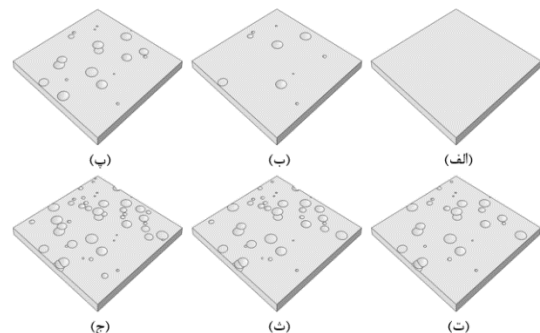
نتایج و بحث

تحلیل و بررسی تأثیر میزان خوردگی بر عمر خستگی

با افزایش میزان خوردگی سطح قطعه، انتظار می‌رود که میزان تنش وارد بر آن افزایش یابد که بخش اصلی آن ناشی از وقوع تمرکز تنش است. برای بررسی این موضوع و تأثیر آن روی تعداد سیکل کاری قطعه، ورقی با طول و عرض ۱۰ سانتی متر تحت بارگذاری سیکلی با نسبت تنش ۰/۱ مدل‌سازی شد و با استفاده از اسکریپت نوشته شده، خوردگی‌های حفره‌ای در سطح آن مدل‌سازی گردید. در شکل ۵ مدل‌های مختلف با میزان خوردگی‌های مختلف مورد استفاده در مدل‌سازی نشان داده شده است.

از آنجا که به خاطر توزیع خوردگی با عمق‌های مختلف در سطح جسم، معیار قرار دادن حداقل تعداد سیکل کاری در کل جسم نمی‌تواند معیار مناسبی از تأثیر خوردگی روی جسم باشد؛ تعداد سیکل کاری در کل المان‌های جسم استخراج شده و به صورت نمودار جعبه و خط^۱ در شکل‌های ۶ و ۷ با استفاده از دو معیار گربر و گودمن اصلاح شده نمایش داده شده است.

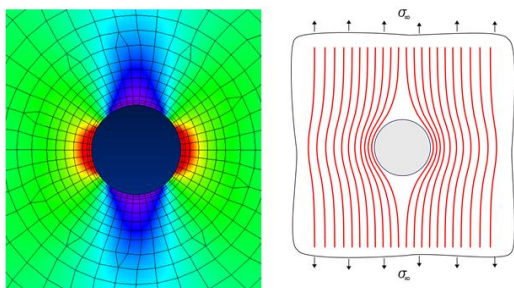
برای رسم این نمودار چارک بالا و پایین به عنوان حد بالا و پایین جعبه و خط میانی آن مقدار میانی داده‌هاست. همچنین خط بالا نشان‌دهنده تعداد المان‌ها در تجمیع ۹۰٪ داده‌ها است تا از داده‌های خارج از محدوده اجتناب شود.



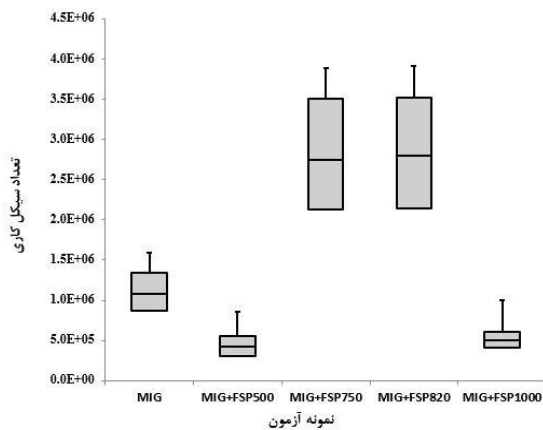
شکل (۵) مدل‌های مختلف با میزان خوردگی‌های متفاوت؛ (الف) نمونه بدون خوردگی با حجم ۵۰ سانتی متر مکعب، (ب)

¹ Box and Whisker

بدین منظور جهت شبیه‌سازی این فرایند، یک قطعه با طول ۲۵ سانتی‌متر و عرض ۱۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شد و مطابق شکل ۱۱ به بخش‌های مختلفی تقسیم و خواص آن وارد گردید. در شکل ۱۱، بخش‌های سبز رنگ دارای خواص مکانیکی مشابه فرآیند جوشکاری MIG و نواحی دیگر دارای خواص بر اثر اعمال FSP در شرایط‌های مختلف است. در این مرحله به دلیل ساده‌سازی از تأثیر اعمال FSP در نواحی مرزی بین دو بخش صرف‌نظر گردید. در شکل ۱۲ تغییرات تعداد سیکل کاری قطعه تحت اثر بار خستگی با مواد مختلف در بخش‌های مشخص شده در شکل قبلی در طول مسیری در میانه ورق (که در شکل مشخص است) با استفاده از معیار گربر نشان داده شده است. که همپوشانی تقریبی دو نمودار نمونه‌های ۸۲۰ و ۷۵۰ دور در دقیقه کاملاً مشهود است.



شکل (۸) شبیه‌سازی سوراخ دایره‌ای شکل در سطح



شکل (۹) تعداد سیکل کاری به ازای شرایط مختلف اعمال FSP در جسم با خوردگی ۲٪ با استفاده از معیار گربر

از جسم کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، انتظار می‌رود که جسم مقاومت کمتری در مقابل خستگی از خود نشان دهد. با افزایش میزان خوردگی، تعداد سیکل کاری در المان‌ها یا نواحی بیشتری از جسم کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، انتظار می‌رود که جسم مقاومت کمتری را در مقابل خستگی از خود نشان دهد. همچنین روند صعودی تعداد سیکل کاری مربوط به المان‌هایی است که با افزایش خوردگی سطح همراه شده‌اند. این مساله بدین جهت روی می‌دهد که با ایجاد خوردگی در سطح، تمرکز تنش در اطراف دایره ایجاد می‌شود. این تمرکز تنش در نواحی هم‌راستا با اعمال بار، باعث افزایش تنش کششی خواهد شد ولی در نواحی عمود بر بارگذاری، مطابق شکل ۸، یک تنش فشاری ایجاد می‌کند [۱۴]. برهم‌کنش خوردگی‌های مختلف در سطح جسم و وجود تنش‌های فشاری، باعث کاهش سطح تنش در نواحی خاصی از قطعه خواهد شد که افزایش تعداد سیکل کاری در آن نواحی را به دنبال دارد.

تحلیل تأثیر تغییر خاصیت ماده روی عمر خستگی

برای بررسی تأثیر انجام فرایند FSP روی عمر خوردگی خستگی با استفاده از معیار تنش - عمر، یک نمونه با ۲٪ کاهش حجمی بر اثر خوردگی تحت بار تناوبی با نسبت تنش ۰/۱ قرار می‌گیرد. در شکل‌های ۹ و ۱۰ نمودار جعبه و خط متناظر با شرایط مختلف اعمال FSP با استفاده از معیارهای گودمن اصلاح‌شده و گربر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود نمودار نمونه‌های ۸۲۰ و ۷۵۰ دور در دقیقه، همپوشانی بسیار خوبی باهم دارند که حاصل نزدیک بودن خواص مکانیکی این دو نمونه بهم است. این امر تأیید کننده عدم وجود عیوب تونلی و تخلخل در حین انجام فرایند FSP است که توانسته‌اند با اعمال خوردگی به میزان ۲٪ تعداد سیکل کاری یکسانی را بدست دهند. ولی در نمونه‌های دیگر بدلیل وجود عیوب حاصل از اعمال فرایند، سیکل کاری پایین‌تری را حاصل نمودند.

از آنجایی که اعمال FSP در طول قطعات بزرگ می‌تواند هزینه و زمان بر باشد و در برخی از موارد به دلیل نقص در انجام اعمال فرآیند باعث عدم بهره‌وری کافی قطعات تولیدی از نظر اقتصادی گردد، می‌توان این فرآیند را به صورت موضعی انجام داد.

به همراه فرآیند اصطکاکی اغتشاشی با استفاده از شبیه‌سازی اجزاء محدود بررسی شد. صفحات با حجم‌های مختلف ۴۹/۱ تا ۴۹/۸ سانتی‌متر مکعب مدل‌سازی شدند و با خوردگی‌هایی به شکل مخروط با قطر و ارتفاع متفاوت و توزیع تصادفی حفره‌ها شبیه‌سازی و سپس با اعمال خواص مکانیکی مطابق با نتایج تجربی و با بارگذاری کششی توسط حل‌گر نرم‌افزار آباکوس تحلیل شدند. نتایجی که در این تحقیق به دست آمدند، به شرح زیر است:

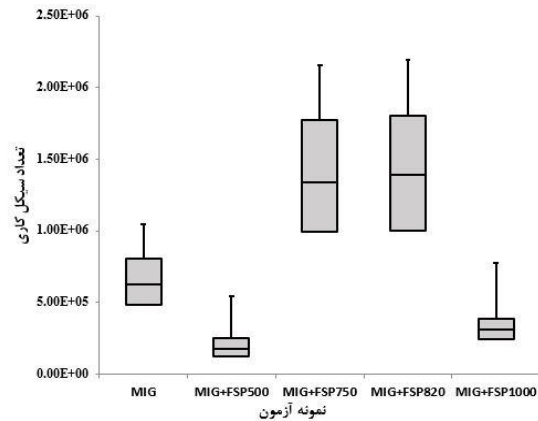
۱- اعتبارسنجی نتایج کدهای نوشته شده برای تحلیل خستگی به روش تنش-عمر با نتایج پژوهش دیگر محققین مقایسه شد و مطابقت خوبی با آنها به دست آمد.

۲- با افزایش میزان خوردگی، تعداد سیکل کاری در المان‌ها یا نواحی بیشتری از آلیاژ آلومینیم کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، انتظار می‌رود که آلیاژ آلومینیم مقاومت کمتری را در مقابل خستگی از خود نشان دهد، به گونه‌ای که با ایجاد تقریباً ۱/۸٪ خوردگی در سطح نمونه، ۵/۶٪ کاهش سیکل را بدست می‌دهد.

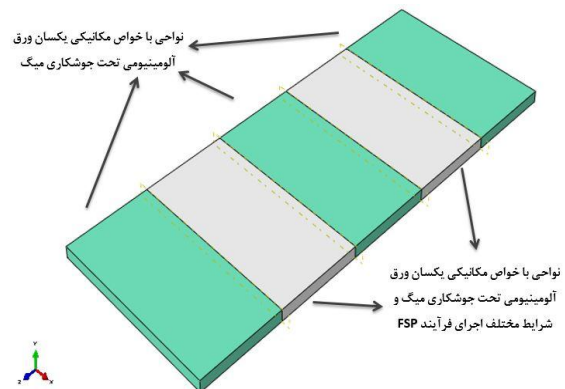
۳- در مقایسه عمر مفید آلیاژ آلومینیم در اثر بارگذاری‌های وارد شده، به ازای حالت‌های مختلف با معیار گودمن اصلاح شده و گربر در نمونه‌های ۸۲۰ و ۷۵۰ دور در دقیقه حدوداً ۰/۳۱٪ اختلاف وجود دارد که بسیار ناچیز است.

منابع

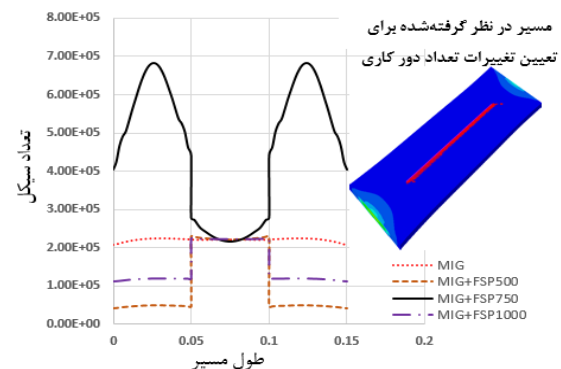
- [1] J. Bhandari, F. Khan, R. Abbasi, V. Garaniya, R. Ojeda, Modelling of pitting corrosion in marine and offshore steel structures-A technical review, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 37 (2015) 39-62.
- [2] P. Shi, S. Mahadevan, Probabilistic estimation of pitting corrosion fatigue life, in: 41st Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit (2000) pp. 1644.
- [3] G.H. Bray, R.J. Bucci, E.L. Colvin, M. Kulak, Effect of prior corrosion on the S/N fatigue performance of aluminum sheet alloys 2024-T3 and 2524-T3, in: Effects of the Environment on the Initiation of Crack Growth, ASTM International, 1997.
- [4] T. Nakai, H. Matsushita, N. Yamamoto, Effect of pitting corrosion on the ultimate strength of steel plates subjected to in-plane compression and bending, Journal of marine science and technology, 11 (2006) 52-64.



شکل (۱۰) تعداد سیکل کاری به ازای شرایط مختلف اعمال FSP در نمونه با خوردگی ۲٪ با استفاده از معیار گودمن اصلاح شده



شکل (۱۱) مدل در نظر گرفته شده برای تعیین تأثیر اعمال غیر پیوسته FSP در شرایط مختلف



شکل (۱۲) تغییرات تعداد سیکل کاری با استفاده از معیار گربر در راستای مسیری در میانه ورق به ازای شرایط اجرای سرعت‌های مختلف FSP

نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر خوردگی روی عمر خستگی آلیاژ آلومینیم ۵۰۸۳ جوشکاری شده با روش قوس با گاز محافظ

- [5] R. Mishra, Study the effect of pre-corrosion on mechanical properties and fatigue life of aluminum alloy 8011, *Materials Today: Proceedings*, 25 (2020) 602-609.
- [6] P. Hu, Q. Meng, W. Hu, F. Shen, Z. Zhan, L. Sun, A continuum damage mechanics approach coupled with an improved pit evolution model for the corrosion fatigue of aluminum alloy, *Corrosion Science*, 113 (2016) 78-90.
- [7] J.K. Paik, A.K. Thayamballi, J.M. Lee, Effect of initial deflection shape on the ultimate strength behavior of welded steel plates under biaxial compressive loads, *Journal of Ship Research*, 48 (2004) 45-60.
- [8] D. Ok, Y. Pu, A. Incecik, Artificial neural networks and their application to assessment of ultimate strength of plates with pitting corrosion, *Ocean Engineering*, 34 (2007) 2222-2230.
- [9] M. Ahmad, Y. Sumi, Numerical simulation of strength and deformability of steel plates with surface pits and replicated corrosion-surface, *Analysis and Design of Marine Structures: including CD-ROM*, 1 (2009) 223.
- [10] Y. Sharifi, S. Tohidi, J.K. Paik, Ultimate compressive strength of deteriorated steel web plate with pitting and uniform corrosion wastage, *Scientia Iranica*, 23 (2016) 486-499.
- [11] R. Wang, R.A. Sheno, A. Sobey, Ultimate strength assessment of plated steel structures with random pitting corrosion damage, *Journal of Constructional Steel Research*, 143 (2018) 331-342.
- [12] McGraw-Hill Series in Mechanical Engineering Richard Budynas, Keith Nisbett - Shigley's Mechanical Engineering Design (2014).
- [۱۳] هادوی، محمدرضا ، آشنای قاسمی، فرامرز ، جعفری، حسن، تحلیل تجربی خواص مکانیکی آلومینیم ۵۰۸۳ جوشکاری شده به روش MIG پس از فرآیند اصطکاکی اغتشاشی، فصلنامه علمی علوم و فناوری دریا ، ۱۳۹۹.
- [14] Martin H. Sadd. *Elasticity, Theory, Applications, and Numeric. Book. Second Edition* (2009).