سال ۲۸، شماره ۱۲۸، صفحات ۱۹–۲۴، نوع مقاله: ترویجی

مجله علمی مهندسی مکانیک

ISSN: 1605-9719

تعیین ضرایب مدل پلاستیک برای استیل ۳۰۴ در دمای فوق سرد

محمد کاظمی نصرآبادی[۱ و *]، امیررضا لطف‌الله‌پور[۲]

[۱] استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران

[۲] کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

*مسئول مکاتبات: kazemi@ssau.ac.ir

◄ چکیده

اخیراً از گازهایی همچون H_2، N_2، O_2 و ... در صنایع پزشکی و نظامی استفاده‌های زیادی می‌شود. به عنوان مثال در اقدامات پزشکی از این گازها برای برخی عمل‌های جراحی مانند برداشتن لکه‌های پوستی استفاده می‌شود و همچنین اصلی‌ترین مصرف این گازها در صنایع نظامی، استفاده به عنوان سوخت موتورهای موشک است. معمولاً برای ذخیره‌سازی این گازها، آن‌ها را به صورت مایع ذخیره می‌کنند. با توجه به این که رفتار آلیاژها وابسته به دما بوده، از این رو دانستن خواص آلیاژهای مورد استفاده در طراحی و ساخت مخازن مایعات فوق سرد و یا قطعات مکانیکی که در تماس با این نوع مایعات فوق سرد می‌باشند (مانند قطعات داخلی پمپ‌های فوق سرد و بدنه مخازن ذخیره) ضروری می‌باشد. در این تحقیق سعی شده است تا خواص پلاستیک استیل ۳۰۴ توسط آزمون کشش در دمای ۱۹۶– درجه سانتی‌گراد و در قالب تعیین ضرایب مدل توانی بیان شود. برای این کار یک محفظه عایق برای نگهداری نیتروژن مایع طراحی و ساخته شده است و نمونه‌ها در حین آزمایش در این محفظه و در نیتروژن مایع قرار گرفتند. سپس، از نمودار نیرو–جابجایی حاصل و به کمک روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک خواص الاستیک و پلاستیک نمونه تعیین شدند. سازگاری خوبی بین نتایج تجربی و نتایج حاصل از شبیه‌سازی توسط نرم افزار آباکوس در خواص بدست آمده از بهینه‌سازی، وجود دارد.

◄ واژگان کلیدی

آزمون کشش
دمای فوق‌سرد
الگوریتم ژنتیک
مدل پلاستیک

◄ تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۲۵
تاریخ پذیرش ۱۳۹۸/۰۵/۱۱

۱ مقدمه

برای تعیین خواص مواد آزمون‌های استاندارد متعددی از قبیل آزمون کشش ساده، آزمون خمش سه نقطه، آزمون پانچ کوچک و ... وجود دارند، ولی معروف‌ترین آن‌ها به‌ویژه برای تعیین ضرایب الاستیک و پلاستیک در بارگذاری استاتیکی، آزمون کشش ساده است. با توجه به اینکه خواص اکثر آلیاژها وابسته به دما می‌باشد، از این رو لازم است تا آزمون‌های استاندارد در دماهای مختلف انجام شوند. امروزه استفاده از برخی گازها مانند H_2، N_2، O_2 و ... در صنایع پزشکی و نظامی گسترش فراوانی یافته است. در اکثر موارد این گازها در حالت مایع ذخیره‌سازی می‌شوند و دمای مایع آن‌ها بسیار پایین می‌باشد، به عنوان مثال دمای نیتروژن مایع حدود ۱۹۶– درجه سانتی‌گراد است. با توجه به دماهای بسیار پایین این قبیل مایعات، و با توجه به این‌که در طراحی، قطعات همیشه در ناحیه الاستیک نمی‌باشد و در بسیاری از موارد مانند قطعات نظامی که پارامتر وزن بسیار مهم است و یا قطعاتی که در دماهای بالا کار می‌کنند، طراح ناگزیر است که طراحی را در محدوده پلاستیک آلیاژ انجام دهد. از این رو رفتار دقیق مواد در ناحیه پلاستیک و در دماهای مختلف اهمیت دارد. همچنین به عنوان مثالی دیگر برای استفاده از رفتار پلاستیک ماده در تحلیل، می‌توان به صنایع خودروسازی اشاره کرد، به‌طوری‌که در تحلیل تصادف خودروی طراحی‌شده، رفتار پلاستیک آلیاژ باید در نظر گرفته شود. در سال ۲۰۰۴ شیندو و همکارانش [۱] از آزمون پانچ‌کوچک جهت مشاهده تغییر رفتار آلیاژهای ۳۰۴ و ۳۱۶ در دمای ۴ درجه کلوین (هلیم مایع) استفاده کردند. با توجه به اینکه برخی آلیاژها در دماهای بسیار پایین، در ناحیه پلاستیک دچار تغییر فاز می‌شوند. آن‌ها در آزمایشی جداگانه میدان مغناطیسی ۶ تسلا اعمال نمودند. با مقایسه نمودارهای نیرو–جابجایی آلیاژها در دمای ۴ درجه کلوین تأثیر میدان مغناطیسی را به صورت کیفی مقایسه نمودند. طبق نتایج پژوهش آن‌ها میدان مغناطیسی تأثیر چندانی بر رفتار آلیاژها نداشت.

در سال ۲۰۰۸ کاپارو و همکارانش [۲] توسط آزمون کشش و الگوریتم ژنتیک و روش کاهش گرادیان و همچنین یک روش نوین که تلفیقی از دو روش ذکر شده است، خواص الاستیک و پلاستیک را برای یک آلیاژ آلومینیوم تعیین نمودند. در روش ترکیبی ارائه شده از نتایج الگوریتم ژنتیک برای ورودی روش کاهش گرادیان استفاده شد. در نهایت آن‌ها دریافتند که استفاده از روش تلفیقی الگوریتم ژنتیک و روش کاهش گرادیان نسبت به استفاده از تک‌تک آن‌ها، مؤثرتر و سریع‌تر است. پارک و همکارانش [۳] در سال ۲۰۱۱ پارامترهای یک مدل ویسکوپلاستیک را برای یک آلیاژ آلومینیوم و استیل با استفاده از آزمون کشش ساده در دماهای بین ۱۱۰ تا ۲۹۳ درجه کلوین تعیین نمودند. مدل ویسکوپلاستیک آن‌ها شامل دو بخش بود که توانایی پیش‌بینی دو سخت‌شوندگی را داشت. آن‌ها صحت کار خود را با استفاده از مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی تأیید نمودند.

لی و همکارانش [۴] در سال ۲۰۱۲ یک مدل ویسکوپلاستیک برای بیان رفتار آلیاژ ۳۰۴ در دماهای پایین را ارائه کردند و ضرایب مدل را با استفاده

از آزمون کشش ساده تعیین نمودند. آن‌ها آزمون‌ها را در دماهای ۷۷، ۲۱۳ و ۲۷۳ درجه کلوین انجام دادند. نهایتاً برای صحت‌سنجی مدل خود از یک نمونه ترک‌دار استفاده نمودند. با مقایسه نمودارهای نیرو–جابجایی تجربی و شبیه‌سازی نمونه صحت‌سنجی، دقت و صحت مدل خود را تایید کردند. مندیگورن و همکارانش [۵] در سال ۲۰۱۲ از طریق آزمایش خمش ورق، ضرایب مدل پلاستیسیته لودویک را تعیین نمودند. هدف از این آزمایش در نظر گرفتن اثر فنری آلیاژهای مقاومت بالا در مدل پلاستیک و افزایش دقت مدل بود. آن‌ها همچنین از آزمون کشش ساده استفاده نموده و ضرایب مدل را از این آزمایش تعیین کردند. با مقایسه نتایج از هر دو آزمون و نزدیکی آن‌ها، مشاهده شد که استفاده از آزمون خمش ورق دقت قابل قبولی را ارائه می‌دهد.

همچنین در سال ۲۰۱۳ روتوره و همکارانش [۶] از روش نوری برهم‌نهی تصاویر و روش عددی و استفاده از آزمون کشش ساده ضرایب یک مدل شبه‌توانی در ناحیه پلاستیک استفاده نمودند. آن‌ها جابجایی‌ها در نواحی نزدیک محل شکست را بصورت دقیق تعیین نمودند. استفاده نمودند که از این طریق دقت نمودار نیرو–جابجایی و نهایتاً دقت تعیین خواص الاستیک و پلاستیک را افزایش دادند. در سال ۲۰۱۳ سئول–کی کیم و همکارانش [۷] ضرایب یک مدل پلاستیک–آسیب را که خودشان معرفی کردند را در دمای ۱۶۳– برای استیل 304L محاسبه نمودند. همچنین در پژوهش خود مقاومت شکست ماده مورد آزمایش را در این دما محاسبه کردند. در پژوهش آن‌ها از آزمون کشش ساده جهت تعیین تمامی خواص و ضرایب، بهره بردند. در نهایت برای اثبات سنجش صحت کار خود از مقایسه نمودار نیرو–جابجایی تجربی و حاصل از شبیه‌سازی با خواص بدست آمده استفاده کردند. نمونه‌های مورد استفاده در صحت‌سنجی نمونه‌های کششی شیاردار بود. با توجه به اختلاف کم نمودارهای تجربی و شبیه‌سازی صحت مدل و پژوهش خود را اثبات نمودند. با توجه به استفاده روزافزون از مایعات فوق‌سرد در صنایع هوافضا و نیاز به دانستن خواص الاستیک و پلاستیک مواد در تماس با این مایعات و همچنین عدم وجود امکانات کافی جهت انجام آزمون‌های استاندارد در دمای فوق‌سرد در کشور، در این پژوهش یک محفظه عایق و گیره‌های مخصوص برای انجام آزمون کشش ساده در دمای‌فوق‌سرد طراحی و ساخته شده است. سپس با استفاده از نتایج آزمون کشش در نیتروژن مایع (۱۹۶°C–)، به کمک الگوریتم ژنتیک و روش المان‌محدود معکوس خواص الاستیک و پلاستیک استیل ۳۰۴ تعیین شده است. توضیحات مختصری در مورد دمای فوق سرد در بخش دوم از این تحقیق آمده است. در سومین بخش از این تحقیق مدل پلاستیک ارائه شده است. جزئیات شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی موضوعات بخش چهارم و پنجم است. در بخش ششم بهینه‌سازی و تعیین تنش تسلیم و ضرایب مجهول بیان شده است نهایتاً در آخرین بخش از تحقیق نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

۲ دمای فوق‌سرد

به دماهای کمتر از ۱۵۰°C– دمای فوق‌سرد گفته می‌شود. گازهای بی‌اثر در حالت مایع دارای دمای فوق‌سرد می‌باشند. به عنوان مثال اکسیژن در حالت مایع و در فشار محیط دارای دمای جوش ۱۸۲/۹۶ °C–، نیتروژن مایع در فشار محیط دارای دمای جوش ۱۹۶ °C– و از همه کمتر هلیوم مایع که در فشار محیط دارای دمای ۲۶۹ °C– می‌باشد. یکی از اصلی‌ترین موارد مصرف این گازها به ویژه نیتروژن مایع استفاده در صنایع پزشکی است. مثلاً در جراحی‌های پوست از نیتروژن مایع برای از بین بردن لکه‌های سرطانی استفاده می‌شود. در صنایع موتورهای فضاپیما تقریباً استفاده از سوخت جامد منسوخ شده و سوخت‌های مایع جایگزین شده‌اند. اخیراً در موتورهای پیشرفته استفاده از سوخت‌های مایع فوق‌سرد بسیار رواج یافته است. در این موتورها مخازنی وجود دارند که سوخت و اکسیدکننده را ذخیره می‌نمایند همچنین توربوپمپی وجود دارد تا فشار سوخت و اکسیدکننده را تا حد زیادی بالا می‌برد و برای ورود به محفظه پیشرانش آماده می‌کند. بنابراین مخازن، اجزای توربوپمپ و لوله‌های انتقال همگی در معرض دمای پایین سوخت و اکسیدکننده فوق‌سرد می‌باشند. همچنین می‌دانیم رفتار آلیاژ به دما وابسته است، بنابراین تعیین رفتار الاستیک و پلاستیک آلیاژهای مورد استفاده در مخازن، توربوپمپ و لوله‌های انتقال بسیار مهم و حیاتی می‌باشند. که با انجام آزمون‌های استاندارد مانند آزمون کشش در این دماها، تعیین می‌شوند. به عبارت دیگر برای تعیین رفتار آلیاژهای مورد استفاده در معرض دماهای فوق‌سرد، از همان آلیاژ، نمونه‌های استاندارد تهیه می‌شود و آزمون‌های استاندارد انجام می‌شود. بنابراین در این پژوهش سعی شده است تا محفظه عایقی برای انجام آزمون کشش ساده در دمای فوق‌سرد طراحی و ساخته شود. جنس نمونه‌های مورد استفاده استیل ۳۰۴ و دمای آزمایش ۱۹۶ °C– می‌باشد. این دما با غوطه‌ور ساختن نمونه در نیتروژن مایع در زمان آزمون، حاصل شده است.

۳ مدل پلاستیک

با توجه به نمودار تنش–کرنش مهندسی اکثر آلیاژها، قسمت الاستیک به صورت یک خط تقریباً صاف می‌باشد و همچنین بخش پلاستیک آن منحنی شکل است. برای بیان بخش پلاستیک مدل‌های ریاضی گوناگونی ارائه شده است. از معروف‌ترین و ساده‌ترین این مدل‌ها، مدل توانی ساده و یا مدل توانی لودویک می‌باشد. روابط (۱) و (۲) به ترتیب این دو مدل را بیان می‌کنند.

$$\sigma = k\epsilon_p^n \qquad (۱)$$

$$\sigma = k\epsilon_p^n + \sigma_\circ \qquad (۲)$$

در روابط بالا k و n ضرایب مدل و مربوط به خواص ماده می‌باشند. همچنین در رابطه (۲)، $\sigma_\circ$ تنش تسلیم ماده می‌باشد. ضرایب k و n از آزمون‌های استاندارد تعیین می‌شوند. در صورت استفاده از آزمون کشش ساده می‌توان با تبدیل نمودار تنش–کرنش مهندسی به نمودار تنش–کرنش واقعی ضرایب را از طریق روش‌هایی مانند روش حداقل مربعات از تطبیق نمودار تجربی و تحلیلی بدست آورد. در مواردی که از آزمون کشش ساده استفاده نمی‌شود دیگر روش فوق قابل اعمال نیست و باید از روش‌های دیگری استفاده نمود. یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد روش المان‌محدود معکوس است. در این روش معمولاً از یک الگوریتم بهینه‌سازی برای حداقل کردن اختلاف

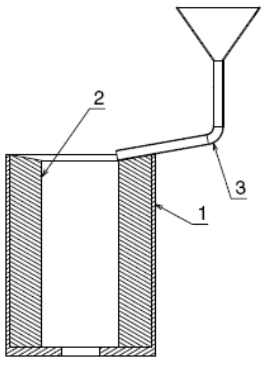
نمودارهای تجربی و تحلیلی استفاده می‌شود. به طور خلاصه در این روش آزمون استاندارد انجام شده در یک نرم افزار المان محدود شبیه‌سازی می‌گردد و یا کد تحلیلی حل مسئله نوشته می‌شود سپس با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی ضرایب مجهول مدل تولید شده و توسط این ضرایب مسئله حل می‌شود و سپس نمودار حاصل از شبیه‌سازی با نمودار تجربی مقایسه شده و الگوریتم بهینه‌سازی سعی می‌کند اختلاف دو نمودار را به حداقل برساند. پس از کمینه شدن اختلاف دو نمودار، ضرایب مدل ماده تعیین می‌شود. در این پژوهش نیز از روش المان محدود معکوس برای یافتن ضرایب مجهول مدل توانی در ناحیه پلاستیک استفاده شده است. جزئیات بیشتر در بخش بهینه‌سازی بیان شده است.

۴ شبیه‌سازی

از نرم‌افزار آباکوس جهت شبیه‌سازی المان محدود استفاده شده است. با توجه به اینکه در دمای فوق‌سرد مدول یانگ و ضریب پواسون آلیاژ خیلی تغییر نمی‌کند مقدار مدول یانگ ۲۰۰ GPa و ضریب پواسون ۰/۲۹ در نظر گرفته شد [۸]. همچنین تحلیل بصورت استاتیکی و زمان آن برابر ۱ ثانیه در نظر گرفته شده است. اندازه المان‌ها نیز حدود ۱ mm و نوع آن‌ها C3D8R انتخاب شد. با یک بار اجرای برنامه، کد پایتون آن برای انجام کارهای بعدی استخراج می‌شود.

۵ آزمایش‌های تجربی

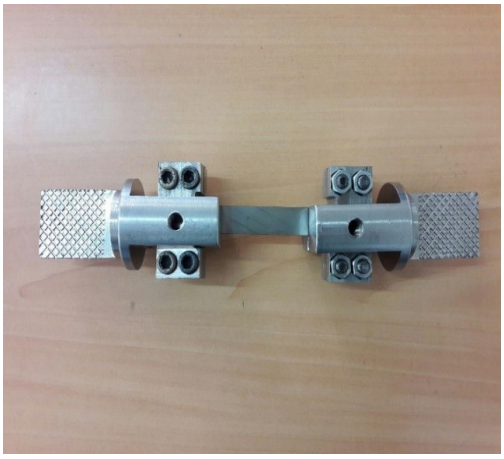
جهت انجام آزمون‌ها در دمای فوق‌سرد یک محفظه عایق به صورت دوجداره ساخته شد. اگر محفظه از اطراف عایق نباشد نیتروژن مایع با نرخ بسیار بالایی تبخیر می‌شود و انجام آزمایش عملاً غیرممکن است. این محفظه برای نگه داشتن نیتروژن مایع ساخته شده است. طوری که نمونه و گیره‌ها در درون محفظه و در نیتروژن مایع قرار می‌گیرند. طول محفظه نیز ۱۴ cm می‌باشد. بین این دو جداره از فوم پلی اورتان پر شد. این فوم عایق بسیار مناسبی می‌باشد. یک انتهای محفظه نیز دیسکی به ضخامت ۵ mm و از جنس لوله خارجی قرار داده شد. شکل ۱ شماتیک مجموعه محفظه و شکل ۲ تصویر واقعی محفظه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: شماتیک محفظه ساخته‌شده : ۱) لوله خارجی از جنس استیل ۳۰۴، ۲) لوله پلاستیکی داخلی، ۳) مجرای تزریق نیتروژن مایع.

شکل ۲: محفظه فوق‌سرد

پس از ساخت محفظه نوبت به طراحی و ساخت گیره نگه‌دارنده نمونه در درون محفظه می‌رسد. این گیره طوری طراحی شده است تا از یک طرف نمونه را محکم بگیرد و در درون محفظه قرار بگیرد و طرف دیگر آن درون گیره‌های دستگاه کشش بسته شود. شکل ۳ این گیره‌ها را نشان می‌دهند.

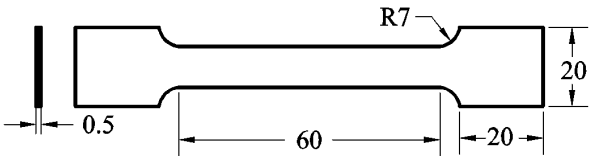


شکل ۳: گیره‌های نگهدارنده نمونه

شکل ۴ نحوه انجام آزمون‌ها را نشان می‌دهد.

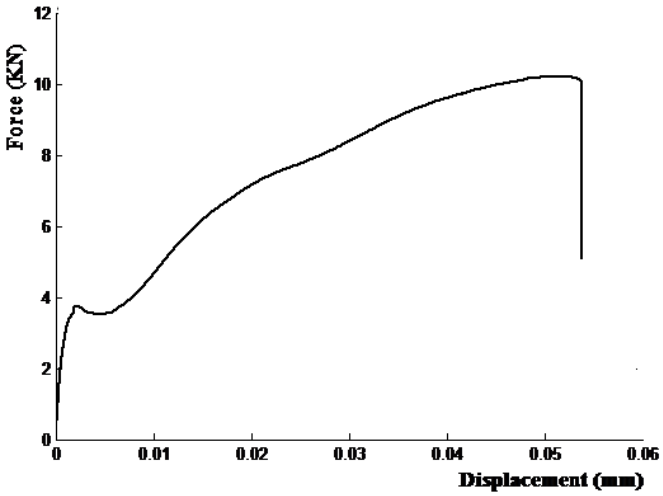
شکل ۴: انجام آزمایش کشش ساده در دمای فوق‌سرد (تزریق نیتروژن مایع)

در میان آزمون‌های استاندارد تعیین خواص مواد، آزمون کشش ساده متداول‌ترین آزمون موجود می‌باشد. در این پژوهش چهار نمونه کشش استاندارد به ضخامت ۰/۵ mm مطابق شکل ۵ تهیه شدند.



شکل ۵: ابعاد نمونه مورد آزمایش

انتهای نمونه‌ها در گیره‌های مخصوص قرار گرفته و مجموعه نمونه و گیره درون محفظه که پر از نیتروژن مایع است قرار می‌گیرند. پس از ثابت شدن نرخ جوشش نیتروژن مایع (زمانی که دمای قطعات به $-۱۹۶\,^{\circ}\mathrm{C}$ می‌رسد) آزمون شروع می‌شود و در حین آزمون نیز نیتروژن مایع به درون محفظه تزریق می‌شود. آزمون تا لحظه شکست نمونه ادامه می‌یابد و نمودار نیرو–جابجایی آزمون دریافت می‌شود. نمودار نیرو–جابجایی حاصل، بیان کننده رفتار الاستیک و پلاستیک نمونه مورد آزمایش است شکل ۶ میانگین ۴ نمودار نیرو–جابجایی حاصل از آزمون‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۶: میانگین ۴ آزمون کشش ساده در دمای فوق‌سرد (۱۹۶– درجه سانتی‌گراد)

۶ بهینه‌سازی

هدف این پژوهش تعیین ضرایب مدل پلاستیک استیل ۳۰۴ در دمای فوق‌سرد می‌باشد. به عبارت دیگر قرار است از نمودار نیرو–جابجایی حاصل از آزمون کشش ساده و بدون تبدیل این نمودار به نمودار تنش–کرنش حقیقی این ضرایب تعیین شوند. فایده این کار قابل تعمیم بودن روش برای هر آزمون دیگری جزء آزمون کشش ساده است که عملاً از خروجی آن آزمون‌ها نمی‌توان نمودار تنش–کرنش حقیقی را بدست آورد.

برای تعیین ضرایب لازم است از یک روند خاصی استفاده شود. در این پژوهش از روش جامع المان‌محدود معکوس و الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده شده است. به عبارت دیگر پس از دریافت نمودار نیرو–جابجایی در دمای فوق‌سرد، آزمون کشش در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی شده و کد پایتون آن استخراج می‌شود. با مجهول قرار دادن خواص پلاستیک در کد پایتون، این کد با الگوریتم ژنتیک لینک می‌شود. وظیفه الگوریتم ژنتیک تولید ضرایب مدل پلاستیک و سپس قرار دادن این ضرایب در مدل و بدست آوردن تنش و کرنش و قرار دادن این تنش و کرنش‌ها در کد پایتون است. سپس کد پایتون اجرا می‌شود و خروجی آن یک نمودار نیرو–جابجایی می‌باشد. این نمودار توسط الگوریتم ژنتیک بازخوانی شده و اختلاف آن با نمودار نیرو–جابجایی تجربی بدست می‌آید. از رابطه (۳) اختلاف دو نمودار نیرو–جابجایی تجربی و شبیه‌سازی محاسبه می‌گردد.

$$\mathrm{Err} = \sum_{d_i=d_1}^{d_2} \sqrt{\left[F_{\mathrm{exp}}(d_i) - F_{\mathrm{sim}}(d_i)\right]^2} \qquad (۳)$$

در رابطه (۳)، d_1 تا d_2 بازه‌ای است که دو نمودار تجربی و شبیه‌سازی با هم مقایسه می‌شوند. همچنین d_i جابجایی‌هایی هستند که توسط نرم‌افزار آباکوس ارائه می‌شوند (نقاط نمودار نیرو–جابجایی شبیه‌سازی).

الگوریتم ژنتیک سعی دارد این اختلاف را کمینه کند. پس از اینکه الگوریتم ژنتیک به اندازه تعداد نسل‌های وارد شده پیشروی نمود. ضرایبی که توسط آن‌ها دو نمودار حاصل از شبیه‌سازی و تجربی کمترین اختلاف را داشتند را ارائه می‌دهد. این ضرایب K و n هستند که همان خواص ماده می‌باشند.

ارزش روش ارائه‌شده برای تعیین ضرایب این است که با اتخاذ روش المان‌محدود معکوس و یک الگوریتم بهینه‌سازی می‌توان از روی نمودار نیرو–جابجایی هر آزمونی مانند آزمون خمش سه نقطه، آزمون پانچ‌کوچک و ... خواص الاستیک، پلاستیک و حتی آسیب مواد را تعیین کرد. به عبارت دیگر روش ارائه شده در این پژوهش یک روش کاربردی و جامع برای تعیین خواص آلیاژها می‌باشد.

۱.۶ تعیین ضرایب مدل پلاستیک

پس از دریافت نمودار نیرو–جابجایی از آزمون این نمودار به عنوان نمودار تجربی وارد متلب می‌شود. از مشاهده نمودار تجربی دیده می‌شود که این نمودار در ناحیه پلاستیک دارای یک تغییر شیب است که بیان کننده تغییر فاز ماده در ناحیه پلاستیک است. به عبارت دیگر استیل ۳۰۴ دارای دو رفتار متفاوت در ناحیه پلاستیک است و علت آن تغییر فاز مارتنزیتی می‌باشد که فقط در دمای فوق‌سرد رخ می‌دهد [۷، ۹]. بنابراین از یک تابع تک ضابطه‌ای، نمی‌توان برای بیان خواص پلاستیک این آلیاژ در دمای فوق‌سرد استفاده نمود و باید از یک تابع دو ضابطه استفاده شود. مسلماً تابع دوضابطه‌ای دارای ضرایب مجهول بیشتری است و روند بهینه‌سازی را پیچیده‌تر می‌کند. در این پژوهش از رابطه دو ضابطه‌ای زیر برای بیان رفتار پلاستیک آلیاژ استفاده می‌شود:

$$\sigma_p = \begin{cases} K_1\epsilon_p^{n_1} + \sigma_0\,, & 0 < \epsilon_p \le \epsilon_c \\ K_2\epsilon_p^{n_2}\,, & \epsilon_p \ge \epsilon_c \end{cases} \qquad (۴)$$

با توجه به رابطه بالا ضرایب مجهول که لازم است تعیین شوند عبارت‌اند از: K_1، n_1، σ_0، ϵ_c، n_2 و ϵ_f که ϵ_f کرنش شکست (کرنش نهایی) می‌باشد. با

توجه به این که نمودار تنش کرنش پیوسته است بنابراین تمامی ضرایب روابط معادله بالا نمی‌توانند مستقل باشند و مقدار $K_۲$ مستقل نبوده و از رابطه زیر بدست می‌آید. همچنین مقدار $\sigma_۰$ به صورت سعی و خطا تعیین می‌شود:

$$K_۲ = \frac{K_۱(\epsilon_c^{n_۱} + \sigma_۰}{\epsilon_c^{n_۲}} . \qquad (۵)$$

وظیفه الگوریتم ژنتیک تولید ضرایب مجهول معادله بالا است. این ضرایب تولید شده توسط کد پایتون استخراج شده، خوانده شده و توسط نرم افزار متلب اجرا می‌شود.

خروجی پایتون نمودار نیرو–جابجایی است که توسط متلب بازخوانی شده و اختلاف این نمودار به صورت نقطه به نقطه با نمودار تجربی تعیین می‌شود. هدف الگوریتم ژنتیک کم کردن این اختلاف است. برای اجرای الگوریتم ژنتیک متلب نیاز است برای هر مجهول یک بازه تعیین شود. هرچه این بازه بزرگتر باشد، بهینه‌سازی جامع‌تر و زمان آن بیشتر خواهد بود. جدول ۱ بازه‌هایی که برای هر ضریب در نرم‌افزار متلب و در بخش الگوریتم ژنتیک آن وارد شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱: حداقل و حداکثر مقادیر مجهولات به عنوان ورودی الگوریتم ژنتیک

متغیر	حداقل	حداکثر
$K_۱$	۱۰۰ MPa	۱۰۰۰ MPa
$n_۱$	۰/۲	۰/۸
ϵ_c	۰/۰۲	۰/۲
$n_۲$	۰/۱	۰/۹
ϵ_f	۰/۲۱	۱
$K_۲$ (وابسته)		

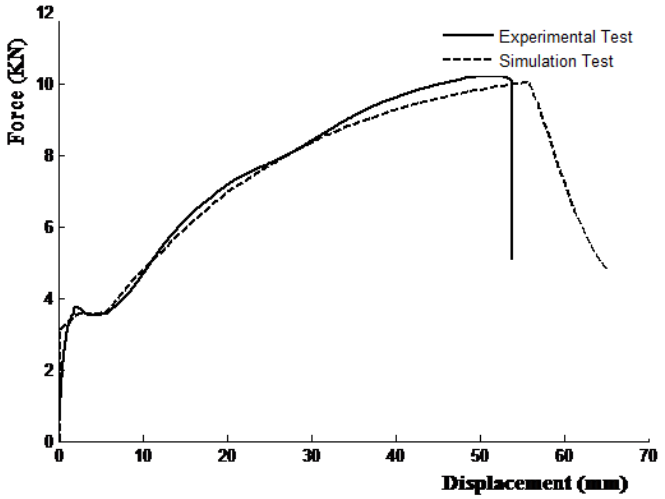
همانطور که گفته شد جهت کاهش مجهولات و تسریع فرآیند یافتن دیگر مجهولات تنش تسلیم ($\sigma_۰$) به صورت سعی و خطا تعیین شد. پس‌از چند سعی و خطا و مقایسه بخش الاستیک نمودارهای تجربی و حاصل از شبیه‌سازی مقدار تنش تسلیم ۵۲۰ MPa تعیین شد.

پس اجرای الگوریتم ژنتیک و ۳۵ نسل جلو رفتن تقریباً مقدار خطاها کم شده و مقادیر مجهولات تعیین می‌شوند. جدول ۲ مقادیر نهایی مجهولات را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقادیر نهایی مجهولات مدل پلاستیک پس از فرآیند بهینه‌سازی

متغیر	مقدار نهایی
$K_۱$	۶۵۰ MPa
$n_۱$	۰/۶۴
ϵ_c	۰/۰۸۶
$n_۲$	۰/۸۰۱۶
$K_۲$ (وابسته)	۴۶۸۱ MPa
ϵ_f	۰/۵۷

در نهایت یک‌بار دیگر آزمون کشش با استفاده از خواص بدست آمده از بهینه‌سازی، در آباکوس شبیه‌سازی شده و نمودار نیرو–جابجایی حاصل با نمودار نیرو–جابجایی تجربی مقایسه می‌شود. شکل ۷ این مقایسه را نشان می‌دهد.



شکل ۷: مقایسه دو نمودار تجربی و حاصل از شبیه‌سازی

با توجه به شکل ۷ تطابق خوبی بین دو نمودار تجربی و شبیه‌سازی وجود دارد که نشان‌دهنده توانایی الگوریتم ژنتیک در مسایل بهینه‌سازی با تعداد متغیرهای نسبتاً زیاد است. همچنین برای اینکه در آخر نمودار شبیه‌سازی کاهش ناگهانی نیرو داشته باشیم (همانند نمودار نیرو–جابجایی تجربی) نیاز است تا پارامترهای آسیب در نرم‌افزار تعریف شوند به عبارت دیگر برای تعیین رفتار دقیق برای کمی قبل و بعد از نازک‌شدگی لازم است تا پارامترهای یک مدل آسیب مربوط به ماده تعیین شوند. ولی معمولاً رفتار آلیاژ در اطراف نازک‌شدگی، در بسیاری از صنایع کاربرد زیادی ندارد.

۷ نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت بالای تعیین رفتار آلیاژها در دمای فوق‌سرد که اخیراً کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا به‌ویژه در صنایع موتور موشک فضاپیما پیدا کرده است، در این پژوهش سعی شد تا روشی برای تعیین رفتار آلیاژها در دماهای فوق‌سرد ارائه شود. بدین منظور با توجه به عدم وجود آزمون کشش فوق‌سرد در کشور، یک محفظه عایق برای نصب در دستگاه کشش طراحی و ساخته شد و برای اولین بار امکان انجام آزمون کشش در دمای نیتروژن مایع ۱۹۶– درجه سانتی‌گراد فراهم گردید. پس از انجام آزمون کشش در نیتروژن مایع بر روی نمونه‌های استاندارد و دریافت نمودار نیرو–جابجایی، با استفاده از روش المان‌محدود معکوس و الگوریتم ژنتیک ضرایب مدل پلاستیک لودیک بدست آمدند. برای تعیین ضرایب نرم‌افزار آباکوس و متلب با یکدیگر لینک شدند. کد نوشته شده در متلب تقریباً یک کد جامع است که می‌تواند با تغییرات جزیی برای هر آزمون دیگری استفاده شود. موارد زیر نتایجی هستند که از انجام این پژوهش دریافت شدند:

۱. یک محفظه کارآمد به همراه گیره‌های داخلی طراحی و ساخته شد که امکان انجام آزمون کشش ساده را در دمای فوق‌سرد فراهم می‌کند. این محفظه از دوجداره ساخته شده است و از اطراف عایق است.

۲. روش المان‌محدود معکوس یک روش بسیار کارآمد در تعیین خواص مجهول مواد است.

۳. الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم قدرتمند بهینه‌سازی است که در زمانی

کوتاه می‌تواند به جواب یکتا برسد.

۴. استیل ۳۰۴ در دمای فوق‌سرد و در ناحیه پلاستیک دستخوش تغییر فاز شده تاثیر بسزایی در رفتار آن دارد و باید در طراحی‌ها در نظر گرفته شود. نوع این تغییر فاز، تغییر فاز مارتنزیتی می‌باشد.

۵. ضرایب مجهول مدل توانی در ناحیه پلاستیک برای استیل ۳۰۴ در دمای فوق سرد با استفاده از روش المان محدود و تست‌های تجربی انجام شد که سازگاری خوبی بین نتایج بدست آمده وجود دارد.

مراجع

[1] Shindo, Yasuhide, Yamaguchi, Yoko, and Horiguchi, Katsumi. Small punch testing for determining the cryogenic fracture properties of 304 and 316 austenitic stainless steels in a high magnetic field. *Cryogenics*, 44(11):789 – 792, 2004.

[2] Chaparro, B.M., Thuillier, S., Menezes, L.F., Manach, P.Y., and Fernandes, J.V. Material parameters identification: Gradient-based, genetic and hybrid optimization algorithms. *Computational Materials Science*, 44(2):339 – 346, 2008.

[3] Park, Woong-Sup, Lee, Chi-Seung, Chun, Min-Sung, Kim, Myung-Hyun, and Lee, Jae-Myung. Comparative study on mechanical behavior of low temperature application materials for ships and offshore structures: Part ii – constitutive model. *Materials Science and Engineering: A*, 528(25):7560 – 7569, 2011.

[4] Lee, Chi-Seung, Yoo, Byung-Moon, Kim, Myung-Hyun, and Lee, Jae-Myung. Viscoplastic damage model for austenitic stainless steel and its application to the crack propagation problem at cryogenic temperatures. *International Journal of Damage Mechanics*, 22(1):95–115, 2013.

[5] Mendiguren, Joseba, Galdos, Lander, Sáenz de Argandoña, Eneko, and Silvestre, E. Ludwik's model parameter identification for v-bending simulations with ti64 and ms1200. in *Material Forming ESAFORM 2012*, vol. 504 of *Key Engineering Materials*, pp. 889–894. Trans Tech Publications Ltd, 4 2012.

[6] Réthoré, Julien, Muhibullah, Elguedj, Thomas, Coret, Michel, Chaudet, Philippe, and Combescure, Alain. Robust identification of elasto-plastic constitutive law parameters from digital images using 3d kinematics. *International Journal of Solids and Structures*, 50(1):73 – 85, 2013.

[7] Kim, Seul-Kee, Lee, Chi-Seung, Kim, Jeong-Hyeon, Kim, Myung-Hyun, and Lee, Jae-Myung. Computational evaluation of resistance of fracture capacity for sus304l of liquefied natural gas insulation system under cryogenic temperatures using abaqus user-defined material subroutine. *Materials & Design*, 50:522 – 532, 2013.

[8] Materials for cryogenic service, 1974. Nickel Development Institute courtesy of Inco Limited.

[9] DeSisto, T. S. and Carr, L. C. Low temperature mechanical properties of 300 series stainless steel and titanium. in Timmerhaus, K. D., ed. , *Advances in Cryogenic Engineering*, pp. 577–586, Boston, MA, 1961. Springer US.