

تعیین ثوابت مادی معیار تسلیم/شکست خان-لیو با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک و انبوه ذرات

فرهاد فرهادزاده^{۱*}، مهدی سلمانی تهرانی^۲، مهدی تاجداری^۳

ffarhadzadeh@mut-es.ac.ir

tehrani@cc.iut.ac.ir

me-tajdari@iau-arak.ac.ir

* پژوهشگر، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

^۳ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی - واحد اراک، اراک

تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۷/۲۱

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۱/۱۹

چکیده

تعیین بهینه ثوابت مادی یک معیار رفتاری ماده، به یکی از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته و با داشتن کمترین داده‌های آزمون‌های تجربی، مورد توجه طراحان است. معیار تسلیم/شکست خان-لیو یکی از معیارهای نسبتاً دقیق و کاربرپسند برای پیش‌بینی رفتار آلیاژهایی مانند تیتانیوم ۴-۶ است. این معیار با داشتن ده ثابت مادی می‌تواند اثرات عوامل مختلف مانند عدم تقارن در کشش و فشار، ناهمسانگردی، فشار هیدرواستاتیک، نرخ کرنش و دما را به صورت غیرهمبسته مد نظر قرار دهد. روندنماهای تکاملی روش‌های مناسبی برای به دست آوردن ثوابت معادله‌های رفتاری مواد به صورت بهینه هستند. در این کار ما از روش‌های بهینه‌سازی روندنمای ژنتیک و انبوه ذرات که از روندنماهای تکاملی به‌شمار می‌روند، برای تعیین ثوابت معیار خان-لیو استفاده کرده‌ایم. نتایج آزمون‌های کشش و فشار تک‌محوره در دو راستای نورد و عرضی ورق آلیاژ تیتانیوم ۴-۶ در دماهای مختلف و در نرخ کرنش یک بر ثانیه به کار رفته‌اند و نقاط دو محوره - مساوی به صورت محاسباتی استفاده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که روش بهینه‌سازی انبوه ذرات نسبت به روندنمای ژنتیک پاسخ‌های بهتری دارد. پس پیشنهاد می‌شود که برای تعیین ثوابت این معیار از روش یادشده استفاده شود. روش‌شناسی استخراج ثوابت مادی با دو روندنمای ژنتیک و انبوه ذرات و جنبه‌های توسعه و بهبود معیار خان-لیو از نتایج این تحقیق هستند.

واژه‌های کلیدی: معیار تسلیم/شکست، معادله‌های ساختاری، آلیاژ تیتانیوم ۴-۶، روندنمای ژنتیک، بهینه‌سازی انبوه ذرات

۱. مقدمه

یکی از نیازمندی‌های طراحان و مهندسان در حوزه شکل‌دهی گرم مواد فلزی به صورت ورق، به‌ویژه آلیاژهای سوپرپلاستیک وجود معیارهای رفتاری مناسب و به‌نسبت دقیق است که علاوه بر شبیه‌سازی رفتار ترمومکانیکی [۱] بتوان اثرات عوامل مختلف و تاریخچه آن‌ها را به‌صورت هم‌زمان، باهم و به‌صورت غیرهمبسته دید و در شبیه‌سازی‌ها برای دستیابی به دقت‌های بالا به کار برد. خان و همکاران در سال‌های اخیر، با انجام مطالعات و تحقیقات منظم و اصولی، معادله‌ای ساختاری و معیار تسلیم/شکستی نسبتاً فراگیر و کاربردی را برای مواد فلزی ناهمسانگرد ارائه داده‌اند [۲-۴]. هدف کلی در این پژوهش مطالعه ثوابت‌مادی معیار تسلیم/شکست خان-لیو و تعیین آن‌هاست.

توسعه آلیاژهای جدید فولادی، آلیاژهای آلومینیومی، آلیاژهای منیزیم و سوپرپلاستیک‌ها به‌خصوص آلیاژ تیتانیوم ۴-۶، پژوهشگران را به توسعه معیارهای رفتاری مواد تحریک نموده است [۲]. هیچ‌کدام از معیارهای رفتاری ارائه‌شده تاکنون به‌تنهایی دقت پیش‌بینی تسلیم یا شکست همه مواد را ندارند [۵]. این موضوع باعث شده که معیارهای پیشنهادی و توسعه‌یافته، گستردگی زیادی پیدا کرده و تعداد زیادی معیار رفتاری که شرایط متفاوتی از نظر دقت و پیچیدگی دارند، به‌وسیله پژوهشگران به وجود آید. بنابراین انتخاب یک معیار مناسب و قدرتمند به شناخت کافی نیاز دارد.

مهم‌ترین عوامل برای انتخاب یک معیار رفتاری [۶] عبارت‌اند از: دقت پیش‌بینی در مکان‌هندسی تسلیم/شکست، انعطاف‌پذیری، میزان کلی‌بودن، تعداد عوامل مکانیکی موردنیاز، توانایی روش، سهولت در به‌کارگیری و مقبولیت آن در جوامع علمی یا صنعتی. واضح است که همه ویژگی‌های مطلوب باهم دست‌یافتنی نیستند. ولی می‌توان در معیاری فراگیر به یک حد تعادل در کمیت و کیفیت عوامل و متغیرها رسید. معادله ساختاری خان-هوانگ-لیانگ [۳] و معیار تسلیم/شکست خان-لیو [۲] نسبت به برخی از معیارهای دیگر ویژگی‌های بارز برشمرده‌شده در بالا را دارند [۷]. چون این دو معادله ساختاری و معیار تسلیم/شکست، توسعه برخی

از معیارهای دیگر مانند معادله ساختاری جانسون-کووک و هیل ۱۹۴۸ هستند، با این تفاوت که در آن‌ها اثرات فشار هیدروستاتیک و عدم تقارن در کشش و فشار علاوه بر اثرات دما، نرخ کرنش و ناهمسانگردی به‌صورت غیرهمبسته دیده شده‌اند.

برای شرح ماهیت معیار تسلیم یا شکست می‌توان از مفهوم سطح تسلیم یا سطح شکست کمک گرفت [۵]. سطح تسلیم نمایشی ترسیمی از تابع تسلیم است [۸،۹]. بنابراین در بررسی یک معیار تسلیم یا شکست از سطح و مکان‌هندسی تسلیم/شکست کمک گرفته می‌شود.

بانایک، بارلات و همکاران، تاریخچه و روند رو به رشد معیارهای تسلیم را مورد مطالعه قرار داده‌اند [۱۰]. آن‌ها توانمندی‌ها و قابلیت‌های معیارهای پیشنهادی را ارزیابی کرده و در نهایت نسبت به اثبات برتری و کاربردی بودن معیارهای مرجع هیل ۱۹۴۸، هیل ۱۹۹۰ و بارلات ۱۹۸۹ و نیز بی‌بی‌سی ۲۰۰۰ استدلال و قضاوت نموده‌اند. با محاسبه شاخص‌های دقت شاید معیار تسلیم بی‌بی‌سی ۲۰۰۰ دقت بیشتری داشته باشد، ولی هیل ۱۹۴۸ نسبت به دیگر معیارهای تسلیم ناهمسانگرد سهولت بی‌ظیری دارد. بنابراین انتخاب این تابع تسلیم ناهمسانگرد در معیار خان-لیو از هر نظر منطقی است.

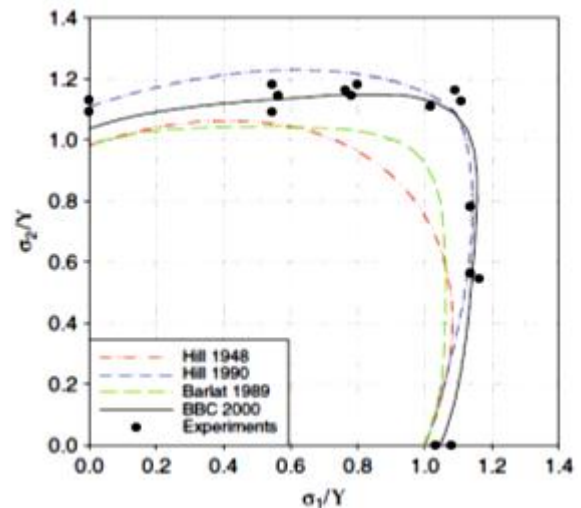
پیش‌بینی کیفیت یک معیار تسلیم بر مبنای همه داده‌های تجربی کشش تک‌محوره و دو‌محوره استوار است [۶،۱۰]. در شکل ۱ مقایسه مکان‌هندسی تسلیم ناهمسانگرد معیارهای گفته‌شده نسبت به داده‌های تجربی در ربع اول صفحه تنش برای آلیاژ آلومینیوم ۳۱۳۰ نشان داده شده است. شکل ۲ نیز مقایسه توزیع صفحه‌ای تنش‌های تسلیم تک‌محوره با این مدل‌ها را نشان می‌دهد که در این مورد هیل ۱۹۹۰ تطبیق عالی و بعد از آن بارلات ۱۹۸۹ با نتایج تجربی مطابقت دارند. جزئیات بیشتر راجع به شکل ریاضی، مزایا و محدودیت‌های بسیاری از معیارهای تسلیم همسانگرد، ناهمسانگرد قدیمی و ناهمسانگرد پیشرفته را می‌توان در کار بانایک و همکاران مورد مطالعه قرارداد [۶،۱۰].

ساختاری فیزیک پایه^۲ و (۳) مدل‌های مبتنی بر شبکه‌های عصبی مصنوعی^۳ تقسیم‌بندی می‌شوند.

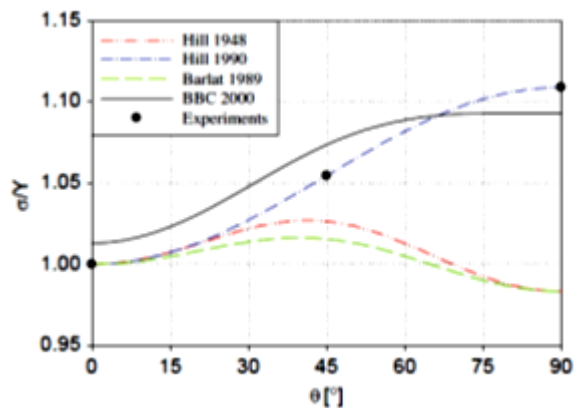
ویژگی کلی مدل‌های ساختاری پدیدارشناختی که مدل خان-لیو از این دسته است، این است که آن‌ها را می‌توان به‌عنوان توابعی برحسب دما، نرخ کرنش و کرنش شکل‌دهی با در نظر گرفتن اثرات عوامل مختلف بر روی رفتار جریان فلزات یا آلیاژها بیان نمود.

یک مدل پدیدارشناختی عملاً دیدگاهی قدیمی برای مدل‌سازی رفتارهای ماده است که در آن نتایج آزمون مکانیکی ماکروسکوپی با تابع ریاضی مناسب تطبیق دارد. مدل خان-لیو نوعی معیار پدیدارشناختی است و رابطه‌ای ساده برای بیان اثرات دما و نرخ کرنش در آن به کار رفته است. از این رو باید هنگام توسعه آن به محدودیت‌های حاکم بر مدل‌های پدیدارشناختی توجه کرد.

هرچه قدرت معادله ساختاری در شبیه‌سازی اثرات کرنش، نرخ کرنش و دما بیشتر باشد، در نتیجه پیچیدگی معادله بیشتر خواهد شد و به دنبال آن کار با آن سخت‌تر خواهد شد. شکل ساده و سهولت در به کارگیری یک معادله ساختاری مانند معادله فیلدز-بکوفن [۱۲] می‌تواند عاملی برای بی‌دقتی یک معادله ساختاری باشد. ژانگ، یک عبارت برای نرم‌شوندگی به مدل فیلدز و بکوفن اضافه نمود تا رفتار نرم‌شوندگی توصیف شود [۱۳]. بعدها چنگ و همکارانش [۱۴] مدل فیلدز و بکوفن را با استفاده از روش‌های مشابه پیشنهاد شده توسط ژانگ [۱۳] اصلاح کردند. نتیجه آن معادله‌ای پیچیده‌تر ولی دقیق‌تر بود [۷]. همین روند در بهبود معادله ساختاری جانسون-کووک رخ داد، طوری که مدل‌های بهبود یافته معادله جانسون-کووک در قبال اندکی افزایش دقت، از نظر شکل ریاضی بسیار پیچیده‌تر و از حیث کاربرد غامض‌تر شدند [۷]. معادله ساختاری خان-هوانگ-لیانگ [۳] از نظر ظاهر ریاضی شباهت بسیار زیادی به معادله اصلی جانسون-کووک داشته [۷، ۱۵] و با رعایت استخوان‌بندی اصلی محدودیت در نظر گرفتن دماهای پایین‌تر از دمای مرجع در آن حل شده است. شکل ۳ مقایسه‌ای بین معادله‌های جانسون-کووک و خان-هوانگ-



شکل ۱. مکان هندسی تسلیم پیش‌بینی شده به وسیله معیارهای هیل ۱۹۴۸، هیل ۱۹۹۰، بارلات ۱۹۸۹ و بی‌بی‌سی ۲۰۰۰ نسبت به داده‌های تجربی برای آلیاژ آلومینیوم AA3103-0 [۶]



شکل ۱. تنش‌های تسلیم تک‌محوره پیش‌بینی شده به وسیله معیارهای تسلیم هیل ۱۹۴۸، هیل ۱۹۹۰، بارلات ۱۹۸۹ و بی‌بی‌سی ۲۰۰۰ نسبت به داده‌های تجربی برای آلیاژ آلومینیوم AA3103-0 [۶]

به‌طور کلی، یک مدل ساختاری پلاستیسیته ایده‌آل برای فلزات و آلیاژها، باید بتواند خواص ماده مانند وابستگی به نرخ کرنش، دمای شکل‌دهی و تاریخچه کرنش و نرخ کرنش، رفتار کارسختی و کرنش سختی (هر دو سخت‌شوندگی همسانگرد و ناهمسانگرد) توصیف و بیان نماید؛ اما بیان و توصیف تمام این پدیده‌ها در یک مدل ساختاری به‌تنهایی کاری فوق‌العاده مشکل است [۱۱]. لین و چن [۷] در کار خود سیر تحول و توسعه مدل‌های ساختاری را مورد مطالعه قرار داده‌اند. مدل‌های ساختاری اساساً به سه دسته (۱) مدل ساختاری پدیدارشناختی^۱، (۲) مدل

بسیاری از معادله‌های رفتاری پیچیده را که با ثوابت مادی نسبت زیادی دارند از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته به دست آورد و رفتار مواد را در شرایط مختلف پیش‌بینی کرد. بنابراین در این پژوهش با استفاده از روش بهینه‌سازی انبوه ذرات و روندنمای ژنتیک که زیرمجموعه روندنماهای تکاملی هستند نسبت به تعیین ثوابت مادی معیار تسلیم/شکست خان-لیو در حالت تنش صفحه‌ای و در صفحه نورد-عرضی برای آلیاژ تیتانیوم ۴-۶ مبادرت شده است و در پایان یکی از این دو که جواب‌های دقیق‌تری را به دست می‌دهند، انتخاب می‌شوند. برای تعیین ثوابت از نتایج تجربی ارائه شده توسط خان-لیو [۲] استفاده شده است.

۲. تئوری معیار تسلیم/شکست خان-لیو

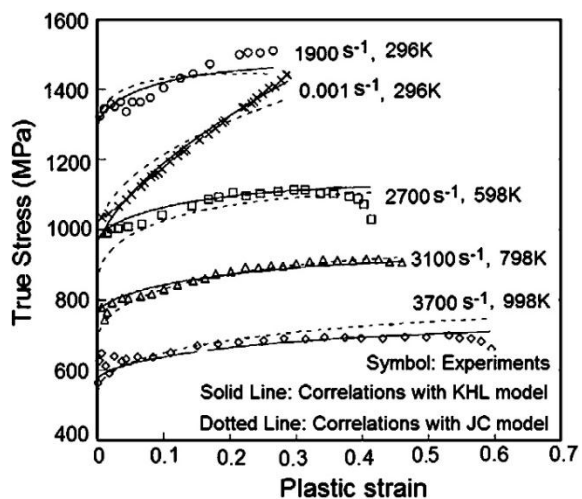
شکل ریاضی معیار تعمیم یافته خان-لیو به صورت معادله (۱) است [۲]:

$$\left[\frac{2}{\sqrt{3}} \sin \theta + \frac{\pi}{3} \right]^K \times \sqrt[2]{e^{C \xi + 1} \left(\frac{F\sigma_1^2 + G\sigma_2^2 + H\sigma_3^2}{L\sigma_1\sigma_2 + M\sigma_1\sigma_3 + N\sigma_2\sigma_3} \right)} = e^{C_1 T / \sqrt{3}} \dot{\epsilon}^n T^{*m} \quad (1)$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ تنش‌های اصلی هستند؛ بنابراین تنش‌های برشی و ثوابت مربوط به آن‌ها حذف شده‌اند. θ زاویه لود، k ثابت ماده، C ضریب عدم تقارن در کشش و فشار، ξ ثابت لود، F, G, H, L, M, N ثوابت ناهمسانگردی، c_1 ضریب فشار هیدرو استاتیک، n حساسیت به نرخ کرنش و m اثر دما هستند. I_1 اولین نامتغیر تانسور تنش است. $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش و T^* دمای بدون بُعد است که از رابطه $(T_m - T)/(T_m - T_r)$ محاسبه می‌شود. T_m دمای ذوب آلیاژ، T دمای فعلی و T_r دمای مرجع یعنی ۲۹۶ درجه کلون هستند. طرح‌واره سطح تسلیم یا شکست خان-لیو در فضای سه‌بعدی تنش در شکل ۴ رسم شده است.

عبارت $e^{C(\xi+1)}$ اثر عدم تقارن در کشش و فشار را با نقشی که ثابت لود بازی می‌کند، نشان می‌دهد [۲]. به‌طور کلی اهمیت ثابت لود برای بیان حالت تنش و ارزیابی معیار تسلیم

لیانگ با داده‌های تجربی در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف شبه‌استاتیکی و دینامیکی را نشان می‌دهد. از این شکل به‌طور ظاهری مشاهده می‌شود که انطباق بهتری بین مدل خان-هوانگ-لیانگ و نتایج تجربی وجود دارد [۷]. خان در ادامه کارهای خود [۲] در معیار تسلیم/شکست خان-لیو معادله ساختاری خان-هوانگ-لیانگ را با حذف اثرات سختی کار و لحاظ نمودن اثر فشار هیدرواستاتیک به کار برد. معیار تعمیم نیافته تسلیم/شکست تولید شده توسط خان-لیو دارای ۱۰ ثابت مادی بوده که با تعیین آن‌ها می‌توان اثرات عدم تقارن در کشش و فشار، ناهمسانگردی، فشار هیدرواستاتیک، نرخ کرنش و دما را در رفتار ماده‌ای مانند آلیاژ تیتانیوم ۴-۶ پیش‌بینی نمود.



شکل ۲. تطبیق معادلات ساختاری جانسون-کووک و خان-هوانگ-لیانگ با نتایج تجربی در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف شبه‌استاتیکی و دینامیکی [۷، ۱۶]

فرهادزاده، سلمانی و تاجداری در سال ۲۰۱۷ نسبت به طراحی یک دستگاه آزمون کشش دومحوره برای تعیین تجربی تنش‌های دومحوره ورق‌های فلزی اقدام کردند و آن را ساختند [۱۷]. در سال ۲۰۱۸ موفق شدند با روش‌های عددی-تجربی نقاط تنش‌های دومحوره ورق‌های فلزی از آلیاژهای آلومینیوم ۵۰۸۳ و تیتانیوم ۴-۶ را در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف تعیین کنند [۱۸].

امروزه روش‌های بهینه‌سازی، توسعه چشمگیری پیدا کرده‌اند. برای تعیین ضرایب و ثوابت معادله‌های رفتاری مواد، می‌توان

$$F = \sigma_1^{-2} e^{2C_1 I_1 / \sqrt{3}} \quad (3-الف)$$

$$G = \sigma_2^{-2} e^{2C_1 I_1 / \sqrt{3}} \quad (3-ب)$$

$$H = \sigma_3^{-2} e^{2C_1 I_1 / \sqrt{3}} \quad (3-ج)$$

$$L = \sigma_B^{-2} e^{2C_1 I_1 / \sqrt{3}} - F - G \quad (3-د)$$

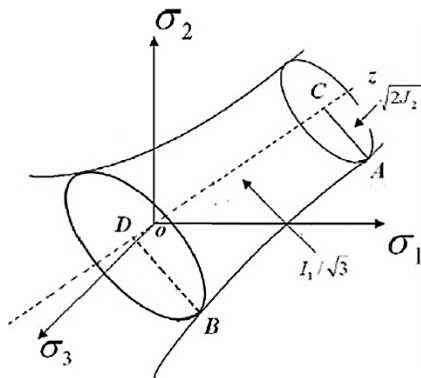
$$M = \sigma_B^{-2} e^{2C_1 I_1 / \sqrt{3}} - F - H \quad (3-ه)$$

$$N = \sigma_B^{-2} e^{2C_1 I_1 / \sqrt{3}} - H - G \quad (3-و)$$

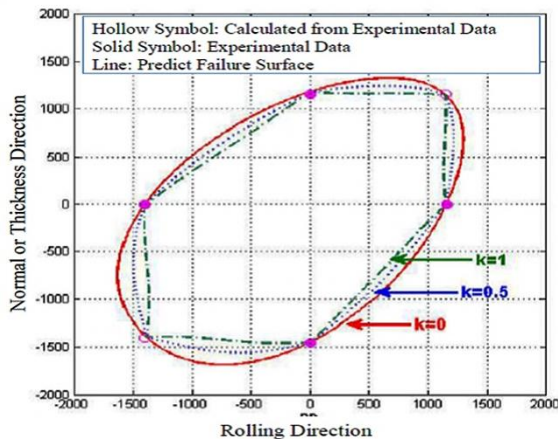
σ_B تنش دو محوره است که در حالت کشش دو محوره - مساوی تنش صفحه‌ای، عبارت است از:

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_B, \sigma_3 = 0 \quad (4)$$

جزئیات بیشتر را می‌توان از کارهای خان و همکاران جستجو نمود [۲-۴].



شکل ۳. طرح‌واره سطح شکست در فضای تنش اصلی [۲]



شکل ۴. مقایسه مکان هندسی شکست پیشنهادی در صفحه نورد - ضخامت ورق با مقادیر مختلف k در نرخ کرنش یک بر ثانیه و دمای مرجع [۲]

پیشنهادی می‌تواند به کار رود [۱۹-۲۱]. عبارت داخل پرانتز شامل ضرایب ناهمسانگرد F, G, H, L, M و N همان معیار هیل ۱۹۴۸ بوده که اثرات ناهمسانگردی را شبیه‌سازی می‌کند [۶، ۲۲]. برای بیان اثر فشار هیدرواستاتیک که برخی از فلزات مانند آلایژ تیتانیوم ۴-۶ به آن حساس هستند، عبارت $e^{C_1 I_1 / \sqrt{3}}$ ایفای نقش می‌کند [۲-۴]. همچنین برای بیان اثرات نرخ کرنش و درجه حرارت نیاز به یک معادله ساختاری است که در معیار مطرح شده، عبارت $\sigma^n T^m$ شکل بسیار ساده‌ای از معادله‌های ساختاری را نشان می‌دهد [۲]. عبارت $[(2/\sqrt{3}) \sin(\theta + \pi/3)]^k$ عامل تعمیم‌یافتگی معیار خان-لیو بوده که با تعیین ثابت مادی k می‌توان معیار مناسب ماده را به دست آورد [۲، ۲۳]. مقدار k در محدوده $10 \leq k \leq$ است. K را می‌توان با تطبیق داده‌های تجربی که از شرایط بارگذاری کرنش صفحه‌ای حاصل شده، تعیین نمود. وقتی K معادل با یک باشد، معادله (۱) به یک مکان هندسی شکست شبیه ترسکا تبدیل می‌شود. در حالی که وقتی K صفر است معادله (۱) دارای یک مکان هندسی شکست درجه دوم خواهد شد. مقادیر دیگر k حالت میانی مکان هندسی تسلیم را مشخص می‌کند. شکل ۵ این موضوع را برای مکان هندسی شکست پیشنهادی در صفحه نورد - ضخامت ورق با مقادیر مختلف k در نرخ کرنش یک بر ثانیه و دمای ۲۹۶ درجه کلون نشان می‌دهد.

ξ و θ را می‌توان از معادله (۲) به دست آورد [۲، ۱۹، ۲۳، ۲۴].

$$\xi = \cos 3\theta = \frac{27}{2} \frac{J_3}{(\sqrt{3}J_2)^3} \quad (2)$$

در این عبارت J_2 و J_3 به ترتیب دومین و سومین نامتغیرهای تانسور تنش انحرافی هستند. در بارگذاری کشش تک محوره $\xi = +1$ و برای بارگذاری فشار تک محوره $\xi = -1$ به دست می‌آیند. از سوی دیگر θ همواره در محدوده $0 \leq \theta \leq \pi/3$ قرار دارد [۲].

عبارت‌های مربوطه برای ثوابت مادی ناهمسانگردی نیز در دسته معادله‌های (۳) ارائه شده‌اند [۲]:

کروموزوم^{۱۱} در نظر گرفته می‌شود. مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها جمعیت روندها را تشکیل می‌دهند که در هر تکرار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و نسل^{۱۲} نامیده می‌شود. بعد از ایجاد جمعیت تصادفی اولیه و ارزیابی آن، برای ایجاد نسل بعدی، برخی از کروموزوم‌های نسل فعلی به‌عنوان جمعیت جفت‌گیری^{۱۳} با مکانیزم انتخاب^{۱۴} برگزیده می‌شوند تا فرزندان^{۱۵} خود را تولید کنند. حال جمعیت نسل فعلی و فرزندان بر حسب مقدار برازندگی بیشتر با هم مقایسه می‌شوند و کروموزوم‌ها با برازندگی بیشتر، نسل بعدی را خواهند ساخت.

هر کدام از کروموزوم‌های جمعیت جفت‌گیری که به والد^{۱۶} شناخته می‌شود، فرزندان خود را با استفاده از دو مکانیزم برش^{۱۷} و جهش^{۱۸} تولید می‌کنند. مکانیزم انتخاب تعیین می‌کند که کدام کروموزوم از نسل فعلی به‌صورت مستقیم یا غیر مستقیم در نسل بعدی حضور یابد. انتخاب مبتنی بر چرخ رولت^{۱۹}، انتخاب رقابتی^{۲۰}، نمونه‌برداری تصادفی فراگیر^{۲۱}، انتخاب مبتنی بر مرتبه^{۲۲} و انتخاب بولترمان^{۲۳} برخی از مکانیزم‌های معروف انتخاب هستند. در این پژوهش انتخاب بولترمان مورد استفاده قرار گرفته است.

عملگر برش یکی از اساسی‌ترین عملگرها برای تولید کروموزوم‌های جدید با ترکیب کروموزوم‌های والد است. برش تک‌نقطه‌ای، دونقطه‌ای و یکنواخت از معروف‌ترین عملگرهای برش هستند. از آنجا که در این پژوهش کد روندهای ژنتیک پیوسته پیاده‌سازی شده، برش پیوسته^{۲۴} مورد استفاده گرفته است.

جهش به‌عنوان یکی از عملگرهای توالد^{۲۵} با استفاده از یک تغییر تصادفی در کروموزوم‌های والدین، کروموزوم‌های فرزندان را تولید می‌کند. عملگر جهش با افزایش اکتشاف فضای جستجو، همگرایی به بهینه محلی را کاهش می‌دهد. جهش غیریکنواخت^{۲۶} یکی از معروف‌ترین عملگرهای جهش در روندهای ژنتیک پیوسته است.

۳. روش تعیین و بهینه‌سازی ضرایب

می‌توان بهینه‌سازی را روشی برای یافتن بهترین نتیجه یک تابع با قيود داده‌شده تعریف کرد. روندهای بهینه‌سازی به دو دسته قدیمی/دقیق و غیرقدیمی/تخمینی تقسیم می‌شوند. روش‌های بهینه‌سازی قدیمی مثل روش کاهش گرادیان، نیوتن و شبه‌نیوتن، روش‌های دقیقی هستند، اما برای مسائل پیچیده کارایی لازم را ندارند. روش‌های بهینه‌سازی غیرقدیمی خود به سه دسته روش‌های ابتکاری، فرا ابتکاری و فوق‌ابتکاری تقسیم می‌شوند. برخلاف روندهای فرا ابتکاری، نمی‌توان روندهای ابتکاری را برای مسائل مختلف پیاده‌سازی کرد، همچنین امکان به دام افتادن در بهینه‌های محلی نیز وجود دارد؛ اما در روندهای فرا ابتکاری با راهکارهایی برای اکتشاف بیشتر فضای جستجو، امکان برون‌رفت از بهینه محلی فراهم است. روندهای فرا ابتکاری به دو دسته روندهای مبتنی بر یک پاسخ^۳ و روندهای مبتنی بر جمعیت^۴ تقسیم‌بندی می‌شوند. روندهای مبتنی بر یک پاسخ مثل روند نمای تبرید شبیه‌سازی شده^۵ و جستجوی ممنوعه^۶ تنها بر بهبود و اصلاح حل یک‌تای کاندید شده، تمرکز می‌کنند. روندهای مبتنی بر جمعیت خود شامل روندهای مبتنی بر محاسبات تکاملی مانند روندهای ژنتیک و تکامل تفاضلی و هوش جمعی مانند روندهای انبوه‌ذرات، گروه مورچگان^۷ و گروه زنبورها^۸ هستند. در ادامه روندهای فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت شامل ژنتیک و انبوه ذرات به اختصار شرح داده خواهند شد.

۳-۱. روندهای ژنتیک

به‌عنوان یکی از پرکاربردترین روندهای بهینه‌سازی، روندهای ژنتیک یک روندهای جستجو، سراسر تصادفی مبتنی بر جمعیت است که از علم ژنتیک و تکامل طبیعی اقتباس شده است. روندهای ژنتیک در اوایل دهه ۱۹۷۰ توسط جان هالند و دانشجویانش معرفی شد، این تحقیقات در سال ۱۹۷۵ در کتابی منتشر شد [۲۵]. شکل متعارف روندهای ژنتیک توسط گلدبرگ، یکی از دانشجویان هالند، با عنوان روندهای ژنتیک ساده^۹ معرفی شد [۲۶]. در روندهای ژنتیک هر متغیر به‌عنوان یک ژن^{۱۰} و هر حل به‌عنوان یک

۲-۳. بهینه‌سازی انبوه ذرات

بهینه‌سازی انبوه ذرات یکی دیگر از روندنماهای مبتنی بر جمعیت است که در زیرگروه هوش جمعی^{۲۷} قرار دارد. این روندنما در سال ۱۹۹۵ توسط کندی و ابرهات برای بهینه‌سازی مسائل غیرخطی پیوسته ارائه شد [۲۸]. روندنمای انبوه ذرات در دسته روندنماهای فرا ابتکاری قرار دارد، به طوری که بدون داشتن یا تعداد کم مفروضاتی از مسئله به بهینه‌سازی آن می‌پردازد. باید دقت داشت که این روندنما نیز مانند سایر روندنماهای فرا ابتکاری، یافتن جواب بهینه را تضمین نمی‌کند. در این روندنما از رفتار اجتماعی دسته پرندگان یا گروه ماهی‌ها^{۲۸} الهام گرفته شده است، بدین صورت که حرکت فیزیکی هر ذره، ماهی یا پرنده، در یک گروه برای فرار از شکارچیان، یافتن غذا و غیره هم بر اساس تجربه قبلی خود آن ذره و هم تجربه تمامی اعضای آن گروه است. با در نظر گرفتن هر حل منفرد در فضای جستجو به عنوان یک پرنده که آن را ذره می‌نامند، یک بردار سرعت مماس بر مسیر پرواز هر کدام از این پرندگان و ارزیابی مقدار برازندگی آن‌ها با تابع برازندگی، هر پرنده براساس تجربه پرواز خود و تجربه پرواز اطرافیان، پرواز خود را تنظیم می‌کند.

برای به دست آوردن ضرایب و ثوابت مادی معیار خان-لیو از هردو روش بهینه‌سازی روندنمای ژنتیک و انبوه ذرات استفاده شده است. در نهایت با توجه به نتایج، یکی از این دو روش انتخاب خواهد شد.

البته مزیت‌های روندنمای انبوه ذرات نسبت به روندنمای ژنتیک عبارت‌اند از:

(۱) نیاز به تنظیم متغیرهای کمتر؛

(۲) پیاده‌سازی راحت‌تر و به صورت پیوسته (برخلاف روندنمای ژنتیک که اساساً به صورت باینری پیاده‌سازی می‌شود، در پی‌اس‌او یا انبوه‌ذرات اعداد حقیقی به عنوان ذره در نظر گرفته می‌شوند)؛

(۳) نداشتن عملگرهای جهش و ترکیب؛

(۴) حافظه‌دار بودن ذرات.

۴. نتایج آزمون‌های تجربی

شکل ۶ آزمون‌های تجربی لازم برای به دست آوردن مکان هندسی تسلیم یک ماده خاص به صورت ورق را به طور کلی نشان می‌دهد [۲۹، ۳۰]. خان و همکاران، برای پیشنهاد معیار ساختاری و معیار تسلیم یا شکست خود آزمون‌های تجربی زیادی را انجام داده‌اند [۲-۴]. جزئیات این آزمون‌ها برای بررسی اثرات دما، نرخ کرنش، فشار هیدرواستاتیک، ناهمسانگردی و عدم تقارن در کشش و فشار در کارهای آن‌ها وجود دارند.

آنچه از پژوهش حاضر برای تخمین ضرایب معیار خان-لیو لازم است، نقاط روی مکان هندسی تسلیم یا شکست در شرایط مختلف نرخ کرنش و درجه حرارت است. شکل ۷ نتایج آزمون‌های تجربی و مکان هندسی تسلیم/شکست ترسیمی را در صفحه نورد عرضی ورق در دماها و نرخ کرنش یک بر ثانیه که توسط خان و لیو انجام شده، نشان می‌دهد. در شکل ۷ چهار نقطه روی محورهای اصلی σ_1 و σ_2 وجود دارند که کشش تک محوره و فشار تک محوره را نشان می‌دهند. این نقاط را می‌توان از آزمون‌های تجربی کشش و فشار تک محوره به دست آورد. دو نقطه دیگر برای حالت‌های کشش دو محوره و فشار دو محوره وجود دارند که در کار خان و لیو به صورت نیمه محاسباتی - نیمه تجربی به دست آمده‌اند. بهتر است که برای به دست آوردن نقاط مربوط به تنش‌های دو محوره در ربع اول صفحه $\sigma_1 - \sigma_2$ از آزمون‌های تجربی نمونه صلیبی استفاده شود [۲۹، ۳۰]. در ربع سوم نیز نیاز به انجام آزمون‌های تجربی دو محوره فشاری وجود دارد. در این صورت می‌توان دقت بسیار بالایی را در رسم مکان هندسی تسلیم یا شکست معیار خان-لیو و به دست آوردن ضرایب این معیار به دست آورد. از نمودارهای مکان هندسی تسلیم/شکست شکل ۷ در این تحقیق برای به دست آوردن ضرایب معیار خان-لیو استفاده می‌شود، تا راهبردی قابل قبول در این خصوص به دست آید. در استخراج ضرایب این معیار از چهار نقطه آزمون‌های کشش و فشار تک محوره و دو نقطه نیمه تجربی - نیمه محاسباتی، مربوط به کشش و فشار دو محوره - مساوی، استفاده می‌شود.

نرخ کرنش و دمای مشخص منطبق باشد و برآزش آن با نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک صورت پذیرد؛ اما در این تحقیق چون معیار موردنظر با مکان‌هندسی بیان می‌شود، بنابراین از این تطبیق صرف نظر شده و همه ثوابت با هم و منطبق با نقاط شش گانه، روی مکان‌هندسی تجربی، استخراج می‌شوند.

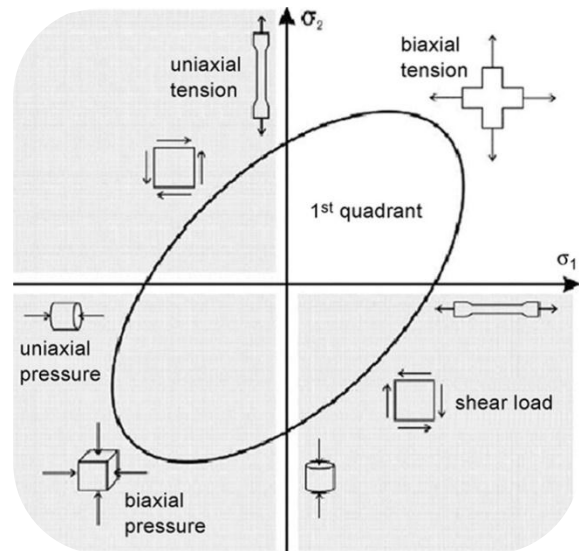
$$\text{Cost Function} = \text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{Q} \sum_{K=1}^Q e^2(K)} \quad (5)$$

Q تعداد نقاطی است که برآزش منحنی با آن‌ها انجام می‌شود و e نیز مقدار اختلاف بین تابع برآزش شده و مقدار واقعی است که به صورت معادله (۶) تعریف می‌شود.

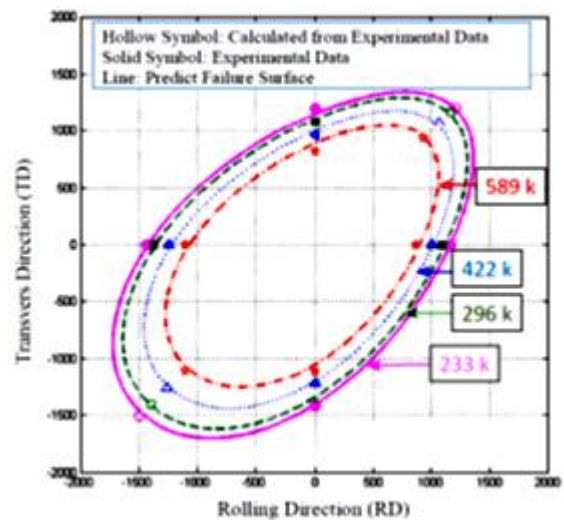
عبارت سمت چپ معادله (۱) به‌طور کلی معرف شکل مکان‌هندسی تسلیم/شکست است که شامل سه بخش است. اولین عبارت تابع تسلیم ناهمسانگرد هیل ۱۹۴۸، دومین عبارت مربوط به عدم تقارن در کشش و فشار و سومین عبارت، عبارت وابسته به شکل مکان‌هندسی تسلیم/شکست هستند. عبارت سوم یک عبارت یا ضریب تصحیح است که به دلیل عدم امکان یا مشقت انجام آزمون‌های متعدد برای ماده و استخراج مکان‌هندسی تسلیم/شکست، شکل مکان‌هندسی تسلیم/شکست را بهبود می‌دهد. از این‌رو عبارت سوم به هنگام تعیین ضرایب و ثوابت معیار خان-لیو نمی‌تواند وارد چرخه محاسبات شود. از این‌رو برای تعیین ضرایب و ثوابت معیار خان-لیو: (۱) از تطبیق معادله ساختاری با نمودار تنش حقیقی-کرنش پلاستیک صرف نظر می‌شود، (۲) و عبارت وابسته به شکل مکان‌هندسی تسلیم/شکست یا تعمیم‌دهنده کنار گذاشته می‌شود. ثوابتی که به دست می‌آیند فقط در معیار تعمیم‌یافته تسلیم/شکست خان-لیو صدق می‌نمایند. با فرض حالت تنش صفحه‌ای، یعنی $\sigma_3 = 0$ ، تابع هزینه برای مسئله برآزش منحنی به صورت معادله (۵) در نظر گرفته شده است. (۵)

$$e = \sqrt{e^{C(\xi+1)} (F\sigma_1^2 + G\sigma_2^2 + L\sigma_1\sigma_2)} - e^{\frac{C_1 I_1}{\sqrt{3}}} \dot{\epsilon}^n T^m \quad (6)$$

تابع هزینه دارای هفت متغیر به صورت جدول ۱ است. همچنین تعداد نقاط آزمایش برای برآزش منحنی، شش نقطه



شکل ۵. انواع آزمون‌های لازم برای رسم مکان‌هندسی دقیق یک ماده مشخص [۲۹، ۳۰]



شکل ۶. ارتباط بین نتایج تجربی با مکان‌هندسی شکست پیشنهادی در صفحه نورد-عرضی در درجه حرارت‌های ۲۳۳، ۲۹۶، ۴۲۲ و ۵۸۹ درجه کلون در نرخ کرنش ۱ بر ثانیه [۲]

۵. تعیین ضرایب و ثوابت مادی معیار خان-لیو

در معادله (۱) عبارت سمت راست در واقع همان معادله ساختاری ماده است که در معیار خان-لیو از اثرات کارسختی در آن صرف نظر شده است. ولی اثرات فشار هیدرواستاتیک، نرخ کرنش و دما دیده شده‌اند. این عبارت معرف اندازه مکان‌هندسی تسلیم/شکست بوده و عوامل یادشده نیز بر اندازه سطح یا مکان‌هندسی تسلیم/شکست اثر دارند. نمودار یک معادله ساختاری باید بر نمودار تنش-کرنش در یک

جدول ۱. متغیرهای مسئله

x_7	x_6	x_5	x_4	x_3	x_2	x_1	متغیرها
m	n	c_1	L	G	F	C	ثوابت مادی

است که به صورت جدول ۲ برای هر منحنی در دمای مشخص با نرخ کرنش یک بر ثانیه از منحنی‌های شکل ۷ استخراج شده است.

جدول ۲. نقاط آزمایش برای برآزش منحنی از شکل ۷ مربوط به مکان‌های هندسی تسلیم در نرخ کرنش یک بر ثانیه برحسب مگاپاسکال

دما بر حسب درجه کلوین								نقاط تجربی
۵۸۹		۴۲۲		۲۹۶		۲۳۳		
σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	σ_2	σ_1	
۵/۳۶	۸۶۳	۵/۱۲	۱۰۱۰	-۱/۸۷	۱۱۰۰	-۱۹۹	۱۱۷۰	۱
۹۴۷	۹۳۲	۱۰۷۰	۱۰۷۰	۱۱۶۰	۱۱۷۰	۱۲۱۰	۱۲۱۰	۲
۸۲۶	۰/۰۰۰۰۳۱	۹۶۹	۶/۸۵	۱۰۹۰	۶/۸۵	۱۱۹۰	۶/۸۵	۳
۸/۷۳	-۱۱۱۰	۲/۱۴	-۱۲۵۰	۲/۳۷	-۱۳۸۰	۹/۲۹	۱۴۴۰	۴
-۱۱۰۰	-۱۱۱۰	-۱۲۵۰	-۱۲۷۰	-۱۴۰۰	-۱۴۰۰	-۱۴۹۰	-۱۵۰۰	۵
-۱۱۱۰	۰/۰۰۰۰۳۱	-۱۲۲۰	۶/۸۵	-۱۳۴۰	۰/۰۰۰۰۳۱	-۱۴۲۰	۱۳/۷	۶

یادآوری است که اجرای کدهای مربوطه با تکرارهای زیاد برای اجتناب از کمینه‌های محلی همراه بوده است.

جدول ۳. داده‌های استفاده‌شده در روندنمای ژنتیک

کمیت	داده‌ها
۷	تعداد متغیرها
۲۰۰۰	بیشینه تکرار
۸۰	اندازه جمعیت
٪۸۰	درصد تقاطع
٪۳۰	درصد جهش
۰/۱۲۵	نرخ جهش
مکانیزم چرخ رولت	مکانیزم انتخاب والدین

۵-۱. نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از روندنمای ژنتیک

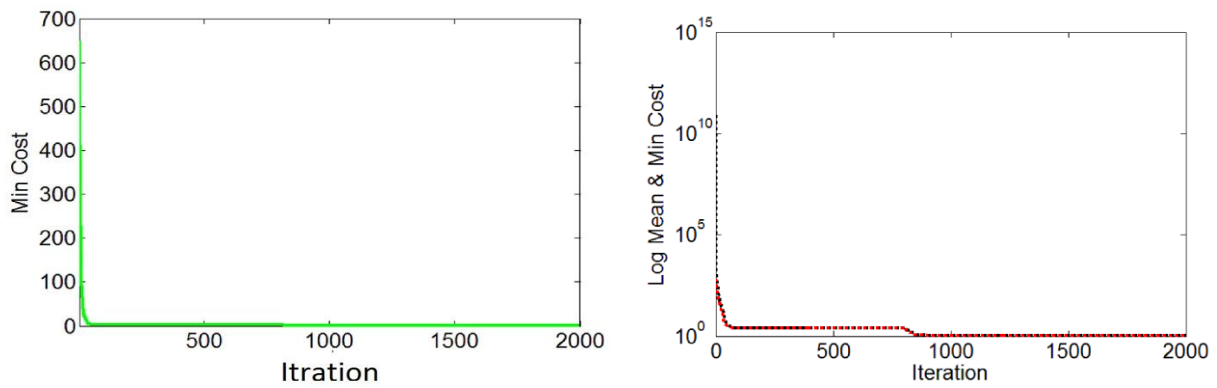
بر اساس مطالب گفته‌شده در بخش ۳-۱ ساختار روندنمای ژنتیک، برای بهینه‌سازی تابع هزینه به‌دست‌آمده، مطابق جدول ۳ ایجاد شد.

پس از تهیه کدهای روندنمای ژنتیک و اجرای آن‌ها در نرم‌افزار متلب جواب‌های بهینه مطابق جدول ۴ و نحوه همگرایی به طور کلی مطابق شکل ۸ به دست آمدند. برای همه حالت‌ها نمودارهای همگرایی تقریباً مشابه و دارای یک روند یکسان هستند. همچنین نمودارهای هدف ترسیم‌شده با ضرایب بهینه یافته‌شده، مطابق شکل ۹ هستند. لازم به

جدول ۴. نتایج به‌دست‌آمده برای ضرایب و ثوابت مادی معیار خان-لیو با استفاده از روندنمای ژنتیک برای آلیاژ تیتانیومی ۴-۶ در نرخ کرنش ۱ بر ثانیه و در

صفحه نورد-عرضی ورق

مقدار تابع هزینه	m	n	C_1	L	G	F	C	دما بر حسب کلوین
۱/۰۱۲	۰/۸۲۲۰	۰/۰۸۳۷	-۸/۸۸۰۲e-۵	-۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۴	۰/۰۰۴۲	۰/۰۶۳۴	۲۳۳
۰/۳۵۷۵۴	۰/۸۶۰۷	۰/۰۷۱۶	-۹/۱۶۰۱e-۵	-۰/۰۱۲۰	۰/۰۱۱۵	۰/۰۱۰۸	۰/۰۹۰۸	۲۹۶
۰/۶۸۹۲۶	۰/۸۴۳۵	۰/۰۴۱۴	-۹/۷۷۴۵e-۵	-۰/۰۲۲۰	۰/۰۲۰۸	۰/۰۱۹۶	۰/۱۰۰۴	۴۲۲
۱/۲۳۸۴	۰/۷۹۸۹	۰/۰۵۷۲	-۱/۱۲۸۴e-۴	-۰/۰۲۷۵	۰/۰۲۵۸	۰/۰۲۴۷	۰/۱۳۶۹	۵۸۹

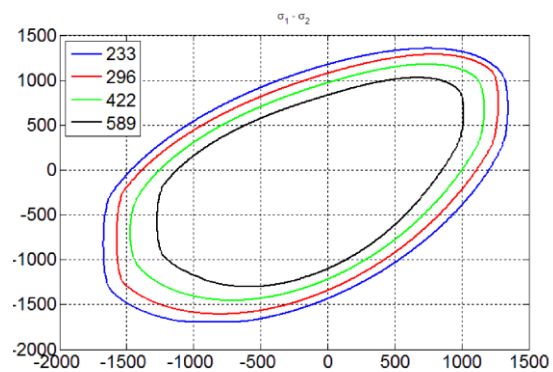


شکل ۷. نمودارهای همگرایی روندنمای ژنتیک برای دمای ۲۳۳ درجه کلونین (نمودارهای همگرایی مربوط به دماهای دیگر تقریباً به صورت همین نمودارها هستند.

متلب اجرا شدند. شیوه همگرایی روندنمای انبوه ذرات برای همه حالت‌های جدول ۲ تقریباً مطابق شکل ۱۰ هستند. جواب‌های بهینه پس از تکرارهای بسیار زیاد اجرای کدهای مربوطه مطابق جدول ۶ هستند. همچنین نمودارهای هدف ترسیم‌شده با ضرایب بهینه یافته‌شده، مطابق شکل ۱۱ هستند.

جدول ۵. داده‌های استفاده‌شده در بهینه‌سازی انبوه ذرات

کمیت	داده‌ها
۷	تعداد متغیرها
۲۰۰۰	بیشینه تکرار
۲۰	اندازه جمعیت
۲/۰۵	ضریب انقباض ϕ_1
۲/۰۵	ضریب انقباض ϕ_2
۱	نسبت میرایی ضریب اینرسی



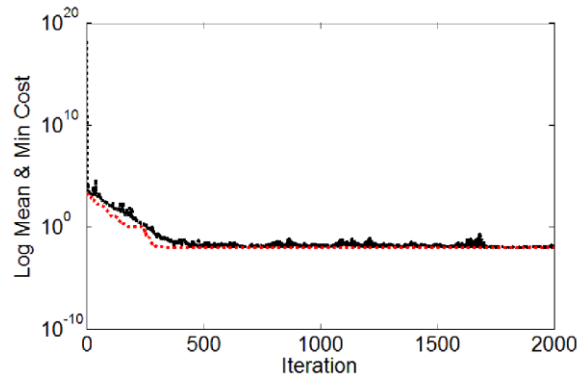
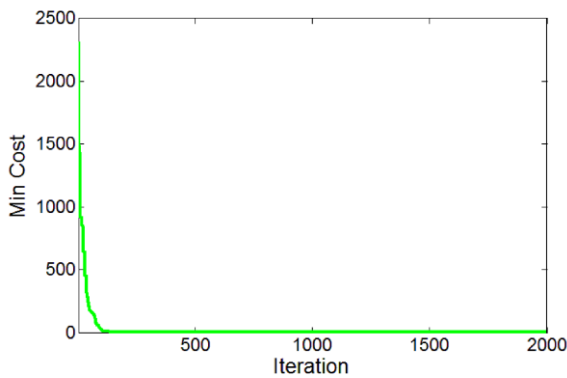
شکل ۸. نمودارهای نظری ترسیم‌شده با استفاده از ضرایب بهینه به دست آمده از روندنمای ژنتیک برای دماهای ۲۳۳، ۲۹۶، ۴۲۲ و ۵۸۹ درجه کلونین در نرخ کرنش ۱ بر ثانیه برای آلیاژ تیتانیوم ۴-۶، محور افقی σ_1 و محور عمودی σ_2 هستند.

۲-۵. نتایج به دست آمده با استفاده از بهینه‌سازی انبوه ذرات

بر اساس مطالب گفته‌شده در بخش ۳ ساختار روندنمای انبوه ذرات برای بهینه‌سازی تابع هزینه به دست آمده مطابق جدول ۵ ایجاد شد. کدهای مربوطه تهیه شده و در نرم‌افزار

جدول ۶. نتایج به دست آمده برای ضرایب و ثوابت مادی معیار خان-لیو با استفاده از روندنمای انبوه ذرات برای آلیاژ تیتانیومی ۴-۶ در نرخ کرنش یک بر ثانیه و در صفحه نورد-عرضی ورق

دما بر حسب کلونین	C	F	G	L	C_1	n	M	مقدار تابع هزینه
۲۳۳	۰/۰۶۲۱	۱/۶۷۱۴ e-۶	۱/۶۶۴۹ e-۶	-۱/۷۴۵۴ e-۶	-۸/۸۰۲۳ e-۵	۰/۰۵۰۸	۰/۱	۰/۰۰۹۷۱۹۹
۲۹۶	۰/۰۸۹۵	۱/۹۷۲۰ e-۶	۲/۰۸۲۲ e-۶	-۲/۱۸۱۸ e-۶	-۹/۱۸۲۹ e-۵	۰/۰۱۴۷۴۳	۰/۱۰۳۶	۰/۰۰۴۲۸۳۶
۴۲۲	۰/۰۹۹۴	۳/۰۹۳۲ e-۶	۳/۲۸۵۰ e-۶	-۳/۴۸۰۷ e-۶	-۹/۷۹۷۰ e-۵	۰/۰۱۲۵	۰/۱۱۹۱	۰/۰۰۸۱۱۴۵۵
۵۸۹	۰/۱۳۴۶	۳/۸۱۴۱ e-۶	۳/۹۹۶۶ e-۶	-۴/۲۶۹۵ e-۶	-۱/۲۴۹۱ e-۴	۰/۰۳۶۱	۰/۱۱۰۷	۰/۰۱۴۶۴۳

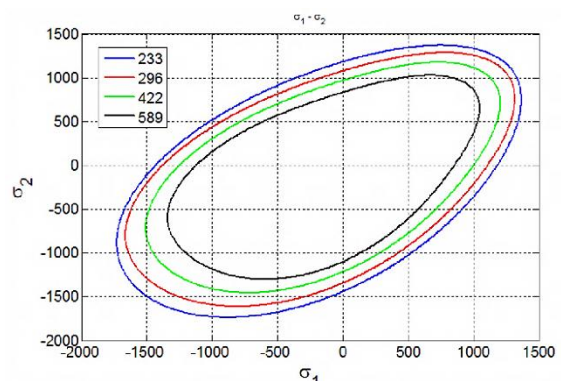


شکل ۹. نمودارهای همگرایی روندنمای انبوه‌ذرات برای دمای ۲۳۳ درجه کلونین (نمودارهای همگرایی مربوط به دماهای دیگر تقریباً به صورت همین نمودارها هستند).

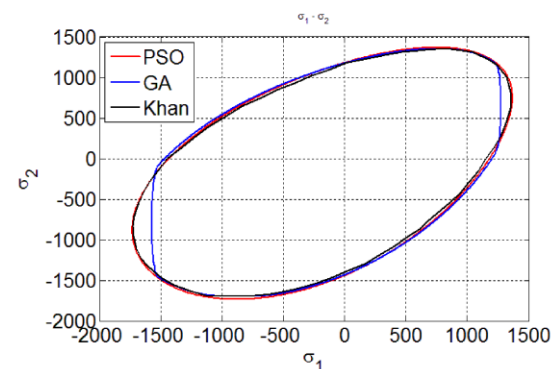
آلیاژ تیتانیوم ۴-۶ است. زیرا این معیار می‌تواند اثرات هم‌زمان عدم تقارن در کشش و فشار، ناهمسانگردی، فشار هیدرواستاتیک، نرخ کرنش و دما را به صورت غیرهم‌بسته ببیند. سادگی عبارات‌های به کاررفته در معیار خان-لیو و عدم هم‌بستگی این عبارات به یکدیگر، یکی از نقاط قوت این معیار بوده که می‌تواند علاوه بر داشتن تعداد زیادی ثابت مادی کاربردهای وسیعی داشته باشد.

برای تعیین ثوابت مادی این معیار، روندنماهای تکاملی ژنتیک و انبوه‌ذرات می‌توانند روش‌های بسیار راحت و نسبتاً دقیقی باشند. البته روش انبوه‌ذرات علاوه بر کوتاهی زمان حل دارای پاسخ‌های دقیق‌تری است.

بنابراین در این تحقیق از این دو روش بهینه‌سازی برای تعیین ثوابت مادی معیار خان-لیو استفاده شده است. کدهای این دو روندنما متناسب با شکل ریاضی معیار و محدودیت‌های متغیرهای آن تهیه شده‌اند. با استفاده از نتایج تجربی به دست آمده توسط خان و همکاران برای آلیاژ تیتانیوم ۴-۶ در نرخ کرنش یک بر ثانیه و در دماهای مختلف کدهای مربوطه اجرا شده‌اند و ثوابت مادی پس از تکرارهای زیاد به دست آمده‌اند. مکان‌های هندسی تسلیم/شکست برای هر حالت رسم شده‌اند و با نمودارهای به دست آمده توسط خان و لیو مقایسه شده‌اند. با توجه به نمودارهای همگرایی به دست آمده و نمودارهای مکان‌های تسلیم تطبیق خوبی بین نتایج روش انبوه‌ذرات با نتایج پیش‌بینی خان و لیو وجود دارد. این موضوع در شکل ۱۲ برای دمای ۲۳۳ درجه



شکل ۱۰: نمودارهای نظری ترسیم‌شده با استفاده از ضرایب بهینه به دست آمده از بهینه‌سازی انبوه‌ذرات برای دماهای ۲۳۳، ۲۹۶، ۴۲۲ و ۵۸۹ درجه کلونین در نرخ کرنش ۱ بر ثانیه برای آلیاژ تیتانیوم ۴-۶



شکل ۱۱: نمودارهای نظری ترسیم‌شده با استفاده از ضرایب بهینه به دست آمده از روندنماهای ژنتیک و انبوه‌ذرات در مقایسه با نمودار به دست آمده توسط خان و لیو در دمای ۲۳۳ درجه کلونین در نرخ کرنش ۱ بر ثانیه برای آلیاژ تیتانیوم ۴-۶

۶. بحث و نتیجه‌گیری

معیار تسلیم/شکست خان-لیو یکی از مناسب‌ترین معیارهای پیش‌بینی رفتار مواد، همچون آلیاژهای تیتانیوم به‌خصوص

۷. سپاسگزاری

این پژوهش جزئی از تحقیقات پروژه "امکان‌سنجی دستیابی به فناوری ایجاد سازه‌های تیتانیومی تا ۲۰۰۰ متر زیر سطح دریا" بوده و لازم است از مسئولان پژوهش دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر و مدیریت مجتمع دانشگاهی مکانیک - پژوهشکده مهندسی دریا، برای تأمین اعتبار و ایجاد تسهیلات لازم در پیشبرد اهداف این پروژه کمال قدردانی کنیم. همه حقوق مادی و معنوی این تحقیق متعلق به دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر است.

مراجع

- [1] Odenberger EL, Hertzman J, Thilderkvist P, Merklein M, Kuppert A, Stöhr T, et al. Thermo-mechanical sheet metal forming of aero engine components in Ti-6Al-4V-PART 1: Material characterisation. International journal of material forming. 2013;6(3):391-402.
- [2] Khan AS, Liu H. Strain rate and temperature dependent fracture criteria for isotropic and anisotropic metals. International Journal of Plasticity. 2012;37:1-15.
- [3] Khan AS, Yu S. Deformation induced anisotropic responses of Ti-6Al-4V alloy. Part I: Experiments. International Journal of Plasticity. 2012;38:1-13.
- [4] Khan AS, Yu S, Liu H. Deformation induced anisotropic responses of Ti-6Al-4V alloy Part II: A strain rate and temperature dependent anisotropic yield criterion. International Journal of Plasticity. 2012;38:14-26.
- [5] Boresi AP, Schmidt RJ, Sidebottom OM. Advanced mechanics of materials: Wiley New York; 1993.
- [6] Banabic D. Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation. Springer Science & Business Media; 2010 Jun 21.
- [7] Lin Y, Chen X-M. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working. Materials & Design. 2011;32(4):1733-59.

کلوین مشاهده می‌شود. البته برای دماهای دیگر نیز نمودارها مشابه شکل ۱۲ هستند. تمامی نمودارهای به دست آمده از نقاط کشش و فشار تک محوره تجربی عبور نموده‌اند اما برای افزایش دقت پیشگویی نیاز به داده‌های آزمون‌های تجربی دو محوره وجود دارد. همچنین با به دست آوردن ثابت مادی k ، یعنی ثابت مادی عبارت وابسته به شکل مکان هندسی یا ضریب تصحیح معیار، از آزمون‌های تجربی کرنش صفحه‌ای می‌توان پیش‌بینی نسبتاً دقیقی را برای رفتار تسلیم یا شکست ماده به صورت ورق ارائه داد.

با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش، اندازه سطح تسلیم/شکست ماده کوچک می‌شود. در یک نرخ کرنش و در دماهای مختلف ثابت به دست آمده متفاوت‌اند. چون در روش بهینه‌سازی به کاررفته پاسخ یکتایی برای ثابت مادی وجود ندارد، بنابراین نمی‌توان راجع به روند تغییرات ثابت نسبت به دما و یا نرخ کرنش یا هر دو اظهار نظر نمود. آنچه اهمیت دارد شکل و اندازه مکان هندسی رسم شده نسبت به شش نقطه تنش تجربی (شامل چهار نقطه تنش تجربی کشش و فشار تک محوره و دو نقطه تنش تجربی کشش و فشار دو محوره تقریباً مساوی) در صفحه تنش است.

کارهایی که می‌توان در ادامه انجام داد؛ عبارت‌اند از:

- ۱- تعیین ثابت مادی در معیار خان-لیو با به کار بردن معادله خان-هوانگ-لیانگ، به روش روندنمای انبوه ذرات در یک نرخ کرنش و دما مشخص؛
- ۲- تعیین ثابت مادی معیار خان-لیو به صورت توابعی از نرخ کرنش و دما با استفاده از روش بهینه‌سازی انبوه ذرات؛
- ۳- تعیین عبارت وابسته به شکل مکان هندسی تسلیم/شکست بر حسب کرنش یا نرخ کرنش و دما با استفاده از آزمون‌های تجربی کرنش صفحه‌ای برای تعمیم معیار خان-لیو؛
- ۴- بررسی اثرات کارسختی و نرم‌شوندگی مواد در معیار خان-لیو.

- [19] Barsoum I. The effect of stress state in ductile failure [dissertation]. univ.KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Solid Mechanics; 2008.
- [20] Akhtar SK, Huang S. Continuum theory of plasticity. USA: A Wiley Interscience Publication, John Wiley and Sons, Inc; 1995.
- [21] Altenbach H, Öchsner A. Plasticity of Pressure-Sensitive Materials. Springer; 2014.
- [22] Hill R. A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. 1948 May 27;193(1033):281-97.
- [23] Khan AS, Huang S. Continuum theory of plasticity. John Wiley & Sons ;1995.
- [24] Chen WF, Han DJ. Plasticity for structural engineers. Springer Science & Business Media; 2012.
- [25] Holland JH. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence. University of Michigan Press; 1975.
- [26] Goldberg DE. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning, Addison-Wesley, Reading, MA, 1989. NN Schraudolph and J. 1989;3(1).
- [27] Janikow CZ, Michalewicz Z, editors. An experimental comparison of binary and floating point representations in genetic algorithms. ICGA; 1991.
- [28] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Network; 1995;Perth, WA, Australia. doi: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [29] Geiger M, Hußnätter W, Merklein M. Specimen for a novel concept of the biaxial tension test. Journal of Materials Processing Technology. 2005;167(2):177-83.
- [30] Hannon A, Tiernan P. A review of planar biaxial tensile test systems for sheet metal. Journal of materials processing technology. 2008;198(1):13-1.
- [8] Mendelson A. Plasticity, theory and application. New York, NY : Macmillan; 1968.
- [9] Jacob L. Plasticity theory. New York: Macmillan Publishing Company; 1990.
- [10] Banabic D, Barlat F, Cazacu O, Kuwabara T. Advances in anisotropy and formability. International journal of material forming. 2010;3(3):165-89.
- [11] Khan AS, Liu H. A new approach for ductile fracture prediction on Al 2024-T351 alloy. International Journal of Plasticity. 2012;35:1-12.
- [12] Fields D, Backofen W, editors. Determination of strain hardening characteristics by torsion testing. Proc ASTM; 1957.
- [13] Zhang X. Experimental and numerical study of magnesium alloy during hot-working process [dissertation]. Univ. Shanghai Jiaotong ersity; 2003.
- [14] Cheng YQ, Zhang H, Chen ZH, Xian KF. Flow stress equation of AZ31 magnesium alloy sheet during warm tensile deformation. Journal of materials processing technology. 2008;208(1):29-34.
- [15] Johnson GR, Cook WH, editors. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics; 1983: The Hague, The Netherlands .
- [16] Khan AS, Suh YS, Kazmi R. Quasi-static and dynamic loading responses and constitutive modeling of titanium alloys. International Journal of Plasticity. 2004;20(12):2233-48.
- [17] Farhadzadeh F, Tajdari M, Salmani-Tehrani M. Determining material constants Khan-Huang-Liang criterion by genetic algorithm and particles swarm optimization method for Ti-6Al-4V alloy. 7th International Offshore Industries Conference, to Persian; 2017.
- [18] Farhadzadeh F, Salmani-Tehrani M, Tajdari M. Determining biaxial tensile stresses by fracture cruciform specimen at different temperatures and strain rates for Ti-6Al-4V alloy. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering. 2018;40(11):532.

پی‌نوشت‌ها

1. Lode Angle
2. Lode Parameter

3. Single Solution-Based
4. Population-Based
5. Simulated Annealing
6. Tabu Search
7. Ant Colony Optimization (ACO)
8. Artificial Bee Colony (ABC)
9. Simple Genetic Algorithm
10. Gene
11. Chromosome
12. Generation
13. Mating Pool
14. Selection Mechanism
15. Offspring
16. Parent
17. Crossover
18. Mutation
19. Roulette Wheel Selection
20. Tournament Selection
21. Stochastic Universal Sampling
22. Rank-based Selection
23. Boltzmann Selection
24. Arithmetic Crossover
25. Reproduction
26. Non-Uniform Mutation
27. Swarm Intelligence
28. Bird Flock or Fish School