

مطالعه شکل پذیری ورق فولادی AISI 304 به کمک مدل M-K و معیار آسیب GTN

مهدی چلوویان

عبدالواحد کمی*

دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

چکیده

در این پژوهش از روش سطح پاسخ به منظور تعیین ترتیب اهمیت پارامترهای معیار آسیب GTN در مطالعه شکل پذیری ورق های فلزی و در نتیجه انتخاب تعداد کمتری از پارامترها (پارامترهای مهم تر) جهت کالیبره کردن معیار GTN استفاده شد. برای این منظور تعداد ۷ پارامتر GTN انتخاب شد. سپس با در نظر گرفتن یک بازه مناسب برای هر پارامتر، تعداد ۱۴۳ آزمایش با استفاده از روش سطح پاسخ طراحی شد. در این آزمایش ها، کرنش حدی حداقل روی نمودار حد شکل دهی (FLD₀) ورق فولادی AISI 304 به عنوان پاسخ در نظر گرفته شد. برای محاسبه مقدار کرنش حدی حداقل، مدل M-K در نرم افزار المان محدود آباکوس شبیه سازی شد. در این شبیه سازی ها از معیار GTN برای پیش بینی پارگی در ناحیه معیوب مدل M-K استفاده شد. با انجام آنالیز واریانس روی داده های حاصل از شبیه سازی های المان محدود، ترتیب اهمیت پارامترهای معیار GTN مشخص شد. همچنین با استفاده از مقادیر کالیبره شده پارامترهای GTN نمودار کامل حد شکل دهی ورق AISI 304 با دقت قابل قبولی بدست آمد.

واژه های کلیدی: معیار آسیب GTN، نمودار حد شکل دهی، روش سطح پاسخ، مدل M-K، ورق فولادی AISI 304.

Study on formability of AISI 304 steel sheet using M-K model and GTN damage criterion

M. Chelovian

A. Kami

Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

Mechanical Engineering Department, Semnan University, Semnan, Iran

Abstract

In this research, response surface methodology (RSM) was used to rank the parameters of GTN damage criterion in the order of significance in the study of metallic sheets formability, so as to select a limited number of the most significant parameters to have the GTN criterion calibrated. A total of 7 GTN parameters were selected for this purpose. Then, considering a suitable range for each parameter, a total of 143 experiments were designed using RSM. In these experiments, the minimum limit strain obtained from the forming limit diagram (FLD₀) of AISI 304 steel sheet was taken as response. In order to calculate the FLD₀, M-K model was simulated using Abaqus finite element (FE) software. In these simulations, GTN criterion was used to predict fracture in the defect zone of the M-K model. Upon performing analysis of variance (ANOVA) on the data obtained using the FE simulations, the GTN criterion parameters were ranked in the order of significance. Furthermore, using the calibrated values of the GTN parameters, forming limit diagram of AISI 304 sheet was obtained completely at an acceptable accuracy.

Keywords: GTN damage criterion, Forming limit diagram, Response surface methodology, M-K model, AISI 304 steel sheet.

شکست نرم مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. تورگارد و نیدلمن [۳، ۴] رشد ترک بر پایه معیار گورسون را مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. آنان شکست را به صورت نتیجه طبیعی فرآیند تغییر شکل، همراه با جوانه زنی، رشد و در نهایت انعقاد حفره ها که منجر به تشکیل ریز ترک ها می گردد، مدل نمودند. طرحواره مراحل تشکیل ترک و پارگی در معیار آسیب گورسون، تورگارد و نیدلمن (معیار^۱ GTN) در شکل ۱ نمایش داده شده است [۵].

هر چند که معیار آسیب GTN در پیش بینی شکست در ورق های فلزی مدلی قدرتمند است، ولی عملکرد آن تحت تاثیر شناسایی دقیق پارامترها می باشد. معیار GTN دارای ۹ پارامتر شامل پارامترهای تنظیم q_1 ، q_2 و q_3 ، کسر حجمی حفره های اولیه f_0 ، کسر حجمی حفره های شکست f_F ، کسر حجمی حفره های فاز ثانویه f_N ، کسر حجمی حفره های بحرانی f_C ، انحراف معیار S_N و کرنش میانگین جوانه زنی

۱- مقدمه

در صنایع خودروسازی، لوازم خانگی و غذایی قطعات زیادی با شکل دهی ورق های فلزی ساخته می شوند. از همین رو پژوهش های گسترده ای برای بهبود فرآیندهای شکل دهی ورق و کاهش عیوب آن ها انجام شده است. گسیختگی در بخش هایی از قطعه که در آن ها کرنش از اندازه مجاز بیشتر می شود، یکی از عیوب مهم و متداول در این فرآیندهاست که معمولاً به صورت یک گلوبی موضعی آغاز می شود. از آنجایی که در شکل دهی ورق های فلزی پیش بینی گلوبی شدن از اهمیت بالایی برخوردار است، تحقیقات زیادی در این زمینه صورت گرفته است که نتیجه آن ها ارائه مدل های مختلفی از قبیل گورسون [۱] و مارسینیاک-کوزینسکی (مدل M-K) [۲] است.

در حقیقت تجمع عوامل آسیب و نقص باعث به وجود آمدن ترک یا حفره می شود. در میان بسیاری از توابع پتانسیل تسلیم که اثرات بخش هیدرواستاتیک مؤلفه های تنش و کسر حجمی حفره ها را در نظر می گیرند، تابع پتانسیل گورسون به طور گسترده ای (برای پیش بینی)

¹ Gurson-Tvergaard-Needleman

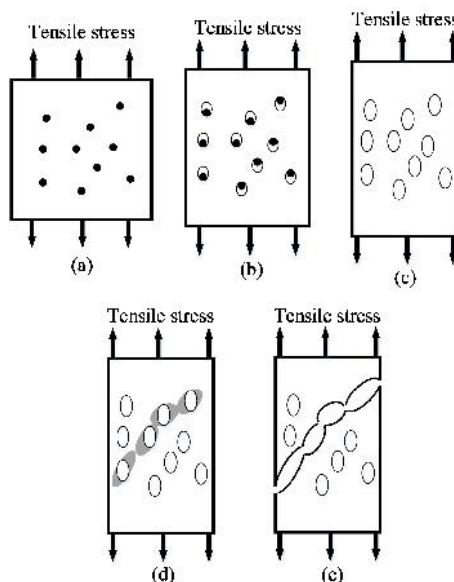
* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: akami@semnan.ac.ir

متعددی استفاده نمود که یکی از رایج ترین آن‌ها استفاده از مدل M-K [۲] است. ظهور و همکاران [۱۵] از مدل M-K برای پیش‌بینی کرنش-های حدی ورق آلومینیوم ۲۰۲۴ استفاده کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های آزمون کشش و بکارگیری الگوریتم لوئرگ-مارکوات مقدار بهینه پارامترهای هر معیار تسلیم را بدست آوردند. نتایج این بررسی نشان داد که انتخاب معیار تسلیم در مدل M-K در تعیین مقدار کرنش‌های حدی بسیار مؤثر است. شویند و همکاران [۱۶] برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی از ترکیب یک مدل پلاستیسیته کریستالی (مدل VPSC) با مدل M-K استفاده کردند. نتایج تعیین کرنش‌های حدی برای مواد مختلف نشان دادند که این مدل ترکیبی بدون در نظر گرفتن ریزساختار، قادر به پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی است. همچنین تأثیر جهت ورق (ناهمسانگردی) بر شکل‌پذیری بررسی شد که نشان‌دهنده اثر کم ناهمسانگردی بر کرنش‌های حدی است. حبیبی و همکاران [۱۷] برای بدست آوردن نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی، از دو مدل المان محدود شامل شبیه‌سازی المان محدود آزمایش ناکازیمما و شبیه‌سازی المان محدود مدل M-K استفاده کردند. نتایج نشان دادند که هر چند مدل المان محدود آزمایش ناکازیمما دقت بالاتری دارد ولی هر دو مدل المان محدود توانایی پیش‌بینی نمودار تجربی حد شکل‌دهی را با مقدار خطای قابل قبول دارند.

در مدل M-K فرض بر این است که کرنش موضعی در محلی از ورق که دارای ناهمگنی هندسی (شیار) است، رخ می‌دهد. در این مدل انتخاب مقدار غیب ضخامتی در ناحیه شیار بر روی دقت کرنش‌های حدی محاسبه شده تأثیر قابل توجه دارد. یک روش جایگزین برای رفع این مشکل مدل کردن ناحیه معیوب به صورت ناحیه‌ای که مقدار حفره‌های بیشتری نسبت به ناحیه سالم دارد، است. در این روش از یک معیار آسیب برای رشد حفره‌ها و پیش‌بینی پارگی استفاده می‌شود. یکی از مثال‌های کاربردی در این مورد، ترکیب معیار آسیب GTN و مدل M-K برای پیش‌بینی لحظه وقوع پارگی و تعیین نمودار حد شکل‌دهی است [۲۱-۱۸]. به عنوان نمونه‌ای از کاربرد این روش می‌توان به کار حسینی و همکاران [۲۰، ۲۱] اشاره نمود که از روش مذکور برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های فولادی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این روش دقت قابل قبولی در تعیین کرنش‌های حدی دارد.

هدف این مقاله پاسخ به این سؤالات است که اگر از معیار GTN در بررسی شکل‌پذیری ورق‌های فلزی استفاده شود، کدامیک از پارامترهای این معیار باید جهت کالیبره کردن انتخاب شوند و کدامیک از پارامترها را می‌توان بر اساس مقادیر پیشنهادی در سایر مراجع انتخاب نمود؟ پاسخ این سؤالات این امکان را فراهم می‌کند تا تعداد کمتری از پارامترهای GTN را بدون کاهش دقت در عملکرد این معیار کالیبره کرد و همچنین از حجم آزمایشات لازم برای کالیبره کردن پارامترها کاست. برای نیل به این هدف، یک مدل المان محدود بر اساس روش M-K ایجاد شد. در این مدل المان محدود از معیار آسیب GTN برای پیش‌بینی لحظه وقوع پارگی استفاده شد. سپس برای بررسی میزان اهمیت پارامترهای معیار GTN از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ و نیز آنالیز داده‌ها استفاده شد.

حفره‌ها $\bar{\epsilon}_N$ است. با توجه به تعداد زیاد این پارامترها و نیز عدم هماهنگی مقادیر و تأثیرات آن‌ها، انتخاب تعداد کمتری از پارامترها و تعیین مقدار صحیح آن‌ها ضروری است [۶، ۷]. تلاش‌های زیادی برای شناسایی پارامترهای معیار GTN صورت گرفته است که در ادامه مختصری از آن‌ها مرور خواهد شد.



شکل ۱- طرحواره رشد حفره و پارگی در یک ورق فلزی نرم (a) ذرات ناخالصی و فاز ثانویه (b) جوانه زنی حفره‌ها، (c) رشد حفره‌ها، (d) ایجاد گلوبی بین حفره‌ها و (e) انعقاد حفره‌ها و پارگی [۵]

کائو و همکاران [۸] با استفاده از پرتونگاری اشعه x و انجام آزمایش‌های مکانیکی ماکروسکوپی، پارامترهای معیار GTN را بدست آوردند. فراتینی و همکاران [۹] با کمک یک سری منحنی‌های نیرو-جابجایی بدست آمده از آزمون‌های کشش تک محوری، پارامترهای معیار GTN را شناسایی کردند. عباسی و همکاران [۱۰، ۱۱] برای شناسایی مقادیر پارامترهای معیار GTN برای ورق فولاد IF و ورق‌های جوش داده شده، از طراحی آزمایشات به روش سطح پاسخ استفاده کردند. آن‌ها در مطالعاتشان از شبیه‌سازی عددی آزمون کشش برای یافتن مقادیر بهینه پارامترهای f_0 ، f_F ، f_N ، f_C استفاده کردند. کمی و همکاران [۱۲، ۱۳] با استفاده از روش سطح پاسخ و مقایسه منحنی نیرو جابجایی تجربی و عددی حاصل از آزمون کشش تک محوری، پارامترهای معیار GTN را تعیین کردند. آبندروت و کانا [۱۴] با کمینه کردن مقدار خطای بین منحنی نیرو-جابجایی آزمون سنبه کوچک تجربی و عددی پارامترهای معیار GTN را بدست آوردند. روش‌های متعدد دیگری نیز برای شناسایی پارامترهای معیار GTN در مراجع وجود دارند که برای رعایت اختصار ذکر نشده‌اند. در هر یک از مراجع فوق، نوع و تعداد پارامترهای انتخاب شده برای شناسایی با یکدیگر متفاوت هستند. در صورتی که اگر میزان اهمیت و اثرگذاری هر پارامتر مشخص باشد، می‌توان تعداد کمتری از پارامترها (یعنی پارامترهای مهم‌تر) را برای شناسایی انتخاب نمود.

برای تعیین کرنش‌های حدی ورق‌های فلزی می‌توان از روش‌های

جدول ۱- ترکیب شیمیایی ورق فولادی AISI304 (مقادیر ذکر شده در جدول نشان دهنده درصد وزنی عناصر اندازه گیری شده است)

Fe	C	Si	Mn	P	S	Ni
Base	۰/۰۴۵	۰/۵۱	۰/۸۷	۰/۰۳۲	۰/۰۰۵	۸/۰
Cr	N	Co	Cu			
۱۸/۰	۰/۰۶	۰/۱۷	۰/۱۴			

برای کاهش اثرات اصطکاک بین سنبه و ورق بر تغییر شکل نمونه-های ناکازیمما، قبل از انجام هر آزمایش، سنبه به روغن آغشته شد و همچنین از سه لایه ورق تفلون با ضخامت ۰/۰۵ میلی متر بین سنبه و ورق استفاده شد. سطوح درگیری ورق و ورق گیر کاملاً بدون لغزندگی و روانکاری می باشند. برای تعیین مقدار کرنش های سطحی، سطح تمامی نمونه ها توسط دستگاه مارک زنی الکتروشیمیایی به صورت شبکه های مربعی با ابعاد ۳ میلی متر و دایره ای به قطر ۳ میلی متر اچ شد. آزمایش های ناکازیمما بر روی یک دستگاه کشش/فشار با ظرفیت ۴۰ تن و با سرعت ثابت ۲ میلی متر بر دقیقه انجام شدند. شکل ۲ نمایی از مجموعه قالب ناکازیمما را در حین انجام آزمایش نشان می دهد.



شکل ۲- مجموعه قالب ناکازیمما در حین اجرای آزمایش بر روی دستگاه کشش افشار

در حین انجام آزمایش ناکازیمما، شروع گلوبی در ورق هم به صورت چشمی (از طریق قرار دادن آینه در زیر نمونه ها) و هم از طریق کاهش نیرو در نمودار نیرو-جابجایی تشخیص داده شد. به محض شروع گلوبی آزمایش ها متوقف شدند. با این وجود به دلیل نازک شدگی بیش از حد ورق در لحظه گلوبی و بار وارده از سنبه، پارگی در برخی از نمونه ها اجتناب ناپذیر است، همانند آنچه در شکل ۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل نمونه با عرض ۱۴۰ میلی متر دچار پارگی شده است در حالیکه در نمونه با عرض ۶۰ میلی متر گلوبی رخ داده و بدون پارگی است. پس از انجام آزمایش ناکازیمما میزان کرنش های حدی به کمک شبکه بندی ایجاد شده در سطح نمونه ها و با استفاده از نوار مایلر اندازه گیری شد. با تغییر شکل ورق، دایره های شبکه بندی سطح ورق بیضی شکل می شوند. با مقایسه مقادیر قطرهای کوچک و بزرگ بیضی-های سالم و معیوب (بیضی های مجاور خط گلوبی یا پارگی) با مقدار قطر دایره های اولیه، مقدار کرنش های حدی کمینه و بیشینه سالم و معیوب در سطح ورق بدست آمدند [۲۳]. کرنش های حدی روی نمودار حد شکل دهی مرز میان کرنش های سالم و معیوب هستند. این کرنش-

۲- معیار آسیب GTN

در سال ۱۹۷۷، گورسون [۱] یک معیار تسلیم جدید را که در آن رفتار پلاستیک ماده به خرابی ناشی از جوانه زنی و رشد میکرو حفره ها مرتبط است، ارائه نمود. تورگارد و نیدلمن [۳، ۴] با افزودن پارامترهای q_1 ، q_2 و q_3 ، به معیار گورسون، اثرات به هم پیوستن میکرو حفره ها بر تغییر شکل پلاستیک ماده را وارد این معیار کردند. این معیار اصلاح شده که تحت عنوان معیار آسیب GTN شناخته می شود، تابع پتانسیلی به فرم زیر دارد:

$$\Phi = \left(\frac{\bar{\sigma}}{Y}\right)^2 + 2q_1 f^* \cosh(q_2 \frac{3p}{2Y}) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (1)$$

در این رابطه $\bar{\sigma}$ تنش مؤثر فون میسر، Y تنش تسلیم معادل ماده بدون حفره، p تنش هیدروستاتیک و f^* کسر حجمی مؤثر میکرو حفره ها است. کسر حجمی مؤثر میکرو حفره ها، f^* ، به صورت تابع زیر تعریف می شود:

$$f^* = f + (1 - \kappa)(f_C - f)h[f_C - f] \quad (2)$$

که در این رابطه، κ یک پارامتر ثابت است و مشخص کننده سرعت رشد میکرو حفره ها بعد از رسیدن به f_C است و f کسر حجمی لحظه ای میکرو حفره ها را نشان می دهد. مقدار κ برابر است با:

$$\kappa = \frac{f_F^* - f_C}{f_F - f_C} \quad (3)$$

که در آن f_F^* مقدار کسر حجمی نهایی میکرو حفره ها بوده و اهمیت فیزیکی ندارد. مقدار این پارامتر در حالت کلی از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$f_F^* = \frac{q_1 + \sqrt{q_1^2 - q_3}}{q_3} \quad (4)$$

همچنین در رابطه (۲)، بیانگر تابع پله ای اصلاح شده است که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$h[f_C - f] = \begin{cases} 1, & f > f_C \\ 0, & f < f_C \end{cases} \quad (5)$$

مطابق با روابط (۱) تا (۵)، معیار آسیب GTN دارای ۹ پارامتر اصلی q_1 ، q_2 ، q_3 ، f_C ، f_N ، f_F ، f_N ، S_N و $\bar{\epsilon}_N$ است که با بکارگیری روش های میکرو یا ماکرو (و یا ترکیب آنها) باید شناسایی شوند.

۳- آزمایش های تجربی

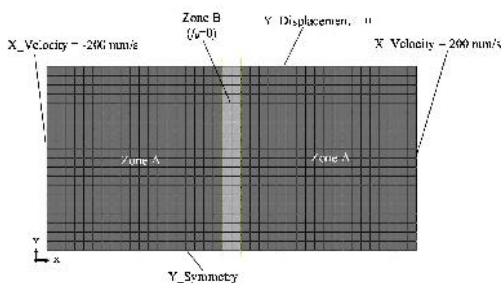
آزمایش های تجربی کشش تک-محوری و اتساع با سنبه سرکروی (آزمایش ناکازیمما) به منظور تعیین خواص مکانیکی و کرنش های حدی بر روی ورق فولادی AISI 304 با ضخامت ۰/۷ میلی متر انجام شدند. ترکیب شیمیایی ورق فولادی در جدول ۱ ارائه شده است. برای تعیین نمودار حد شکل دهی ورق فولادی ۷ نمونه مطابق با استاندارد ISO 12004-2 [۲۲] تهیه شد. این نمونه ها شامل ۶ ورق دیسک شکل شیاردار با قطر خارجی ۲۰۰ میلی متر و پهناهای ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰ و ۱۴۰ میلی متر به همراه یک نمونه گرد (با قطر ۲۰۰ میلی متر) است. در آزمون ناکازیمما یک قالب سه جزء اصلی ماتریس، سنبه نیم کروی و ورق گیر بکار گرفته شد که در آن قطر سنبه ۱۰۰ میلی متر، قطر ماتریس ۱۱۰ میلی متر و شعاع لبه ماتریس ۱۰ میلی متر است.

جدول ۲- حدود بالا و پایین پارامترهای مورد بررسی معیار GTN

پارامتر	حد پایین	حد بالا
q_1	۱	۲
q_2	۱	۲
$1-f_0$	۰/۹۹۰۰	۰/۹۹۹۹
f_C	۰/۰۰۵	۰/۰۲
$f_F - f_C$	۰/۰۵	۰/۲۰
f_N	۰/۰۰۱	۰/۰۲
\bar{e}_N	۰/۰۲	۰/۰۵

مقدار کرنش حدی حداقل روی نمودار حد شکل دهی، FLD_0 ، که نشان دهنده کرنش حدی تغییر شکل کرنش صفحه‌ای است، به عنوان پاسخ طراحی آزمایش در نظر گرفته شد. برای تعیین مقدار FLD_0 یک مدل المان محدود بر اساس روش M-K ایجاد شد. در این مدل یک ورق فولادی از جنس AISI 304 با طول ۱۴ میلی‌متر و عرض ۷ میلی-متر و ضخامت ۰/۷ میلی‌متر مدل شد. در شکل ۴ مدل المان محدود ورق فولادی در حالت مش‌بندی شده نمایش داده شده است. در این مدل المان محدود از ۱۶۰۰ المان C3D8R (المان سه‌بعدی ۸ گره‌ای خطی با انتگرال گیری کاهش یافته) استفاده شد. اندازه المان‌ها با انجام آنالیز حساسیت به مش برابر با ۰/۳۵ میلی‌متر بدست آمد. در راستای ضخامت ورق نیز تعداد ۲ المان در نظر گرفته شد.

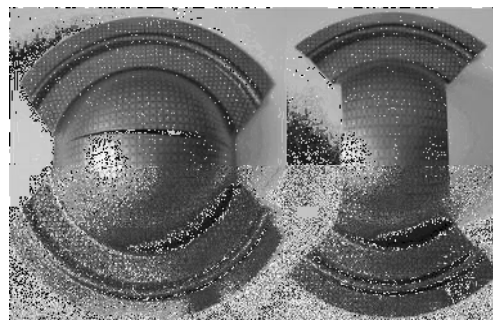
همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است، با در نظر گرفتن تقارن در هندسه و شرایط بارگذاری، نصف ورق شده است. در این شکل دو ناحیه A و B به ترتیب معرف نواحی سالم و معیوب در مدل M-K هستند. در مدل M-K ارائه شده توسط مارتینیاک و کوزینسکی [۲]، ناحیه B دارای یک عیب ضخامت است. به عبارت دیگر یک شیار با ضخامت کمتر روی ورق در نظر گرفته می‌شود. در حالیکه در مدل المان محدود مورد استفاده در این مقاله، ناحیه B دارای ضخامت یکسان با ناحیه A است ولی در مقابل، ناحیه A بدون حفره بوده و کسر حجمی حفره‌ها در ناحیه B برابر با f_0 است. رشد حفره‌ها در هر دو ناحیه A و B بوسیله معیار GTN کنترل می‌شود.



شکل ۴- مدل المان محدود روش M-K با در نظر گرفتن مقدار حفره های اولیه f_0 در ناحیه معیوب B

ورق فولادی AISI 304 به صورت الاستیک-پلاستیک و همسانگرد مدل شد. مدول یانگ این ورق بر اساس نتایج آزمون تجربی کشش برابر با ۱۹۳ گیگاپاسکال تنظیم شد و مقدار ضریب پواسون نیز برابر با ۰/۳ در نظر گرفته شد. خواص پلاستیک ماده (نمودار تنش پلاستیک

ها معرف حداکثر کرنش قابل اعمال به ورق قبل از وقوع گلوپی یا پارگی در ورق می‌باشند.



شکل ۳- دو مورد از نمونه‌های آزمایش ناکازیم بعد از تغییر شکل، نمونه سمت راست دارای پهنای ۶۰ میلی‌متر و نمونه سمت چپ دارای پهنای ۱۴۰ میلی‌متر است.

۴- طراحی آزمایش و تعیین کرنش‌های حدی به روش المان محدود

از میان ۹ پارامتر معیار GTN، ۷ پارامتر شامل q_1 ، q_2 ، f_0 ، f_C ، f_F ، f_N و \bar{e}_N برای بررسی انتخاب شدند. مقدار پارامترهای q_3 و S_N به ترتیب برابر با q_1^2 و ۰/۱ تعریف شدند. برای طراحی آزمایش و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار آماری Design-Expert ویرایش ۹ استفاده شد.

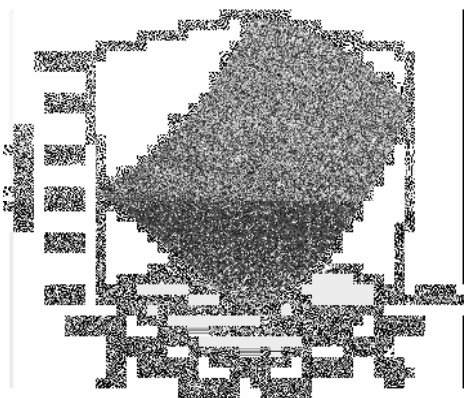
برای طراحی آزمایش از روش طراحی مرکب مرکزی استفاده شد. این روش طراحی یکی از رایج‌ترین روش‌های طراحی سطح پاسخ برای بدست آوردن مدل‌های درجه ۲ است. مزیت استفاده از این روش امکان استخراج داده‌های بیشتر با انجام تعداد کمتری آزمایش نسبت به روش‌های طراحی دیگر همانند روش طراحی فاکتوریل است. به کمک طرح مرکب مرکزی ارتباط بین چندین پارامتر با یک یا چند پاسخ را می‌توان با انجام حداقل آزمایشات ممکن پیدا نمود. همچنین این طرح امکان پیش‌بینی مقدار پاسخ و بهینه‌سازی پارامترها را فراهم می‌کند [۲۴].

در طراحی آزمایش برای هر پارامتر سه سطح در نظر گرفته شد که دو سطح از آن‌ها همان حدود بالا و پایین هر پارامتر است و سطح سوم دارای مقدار متوسط حدود بالا و پایین است. همچنین برای طراحی آزمایش تعداد یک نقطه فاکتوریل، یک نقطه محوری (ستاره-ای) و ۱۰ نقطه مرکزی در نظر گرفته شد. بدین ترتیب تعداد ۱۴۳ آزمایش توسط روش سطح پاسخ طراحی شد. هر کدام از این آزمایش‌ها ترکیب‌های متفاوت از پارامترهای معیار GTN هستند که در شبیه‌سازی عددی مدل M-K مورد استفاده قرار گرفتند. در جدول ۲ حدود پارامترهای مورد بررسی مشخص شده است. در این جدول بجای f_0 از چگالی نسبی $1-f_0$ (نسبت حجم ماده حفره‌دار به حجم ماده بدون حفره) استفاده شده است. همچنین برای اینکه در تمامی آزمایش‌های طراحی شده، همیشه مقدار f_F بزرگتر از مقدار f_C باشد بجای $f_F - f_C$ از استفاده شد.

پارگی ماده به ازای یک مقدار مشخص از f_F در کرنش‌های حدی بزرگتری رخ خواهد داد. همچنین اگر f_C مقدار بزرگی داشته باشد، لازم است تا برای رسیدن به این حجم حفره‌ها، کرنش‌های بزرگتری بر ورق اعمال شود. یعنی برای شروع مرحله انعقاد حفره‌ها و پارگی بعد از آن، تغییر شکل‌های بزرگتری (کرنش‌های بزرگتری) باید در ورق ایجاد نمود. همچنین شکل ۶ نشان می‌دهد که پارامترهای $1-f_0$ و f_C با یکدیگر اثر متقابل ندارد. یعنی مقدار کرنش حدی به ازای تمامی مقادیر $1-f_0$ با افزایش f_C افزایش می‌یابد و برعکس.

جدول ۳- نتایج آنالیز واریانس داده‌های حاصل از طراحی آزمایش به روش سطح پاسخ

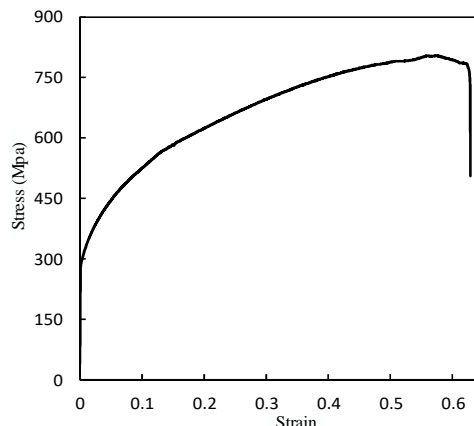
نوع متغیر	مجموع مربعات	میانگین مربعات	پارامتر F	پارامتر p
Model	۸/۳۲۱	۰/۲۳۷	۷۸/۱۲۷	<۰/۰۰۰۱
$1-f_0$	۴/۳۴۹	۴/۳۴۹	۱۳۹۶/۴	<۰/۰۰۰۱
q_1	۰/۱۵۴	۰/۱۵۴	۵۰/۶۹۰	<۰/۰۰۰۱
q_2	۱/۳۷۶	۱/۳۷۶	۴۵۲/۲۳	<۰/۰۰۰۱
f_N	۰/۴۱۱	۰/۴۱۱	۱۳۵/۳۲	<۰/۰۰۰۱
$\bar{\epsilon}_N$	۰/۱۵۱	۰/۱۵۱	۴۹/۹۰۰	<۰/۰۰۰۱
f_C	۰/۷۶۸	۰/۷۶۸	۲۵۲/۳۶	<۰/۰۰۰۱
f_F-f_C	۰/۱۲۰	۰/۱۲۰	۳۹/۷۳۰	<۰/۰۰۰۱



شکل ۶- اثر پارامترهای $1-f_0$ و f_C بر کرنش حدی ورق AISI 304

به صورت مشابه، تغییرات کرنش حدی ورق فولادی AISI 304 نسبت به تغییر پارامترهای q_1 و q_2 در شکل ۷ نمایش داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با کاهش مقدار هر دو پارامتر q_1 و q_2 مقدار کرنش حدی افزایش می‌یابد. مطابق با معادله (۱)، با کاهش پارامترهای q_1 و q_2 مقدار تابع پتانسیل Φ نیز کاهش می‌یابد. در نتیجه برای رسیدن به نقطه تسلیم ماده باید حفره‌های بیشتری در ماده تشکیل شود که این امر خود مستلزم اعمال کرنش‌های بزرگتر در ورق فلزی است. در نتیجه می‌توان انتظار داشت با کاهش q_1 و q_2 مقدار کرنش حدی افزایش یابد. همچنین شکل ۷ نشان می‌دهد که شیب تغییرات کرنش حدی نسبت به q_2 بسیار بیشتر از تغییرات آن نسبت به q_1 است. به بیان دیگر q_2 نسبت به q_1 تأثیر بیشتری بر کرنش حدی دارد.

حقیقی-کرنش پلاستیک حقیقی) بر اساس نمودار تنش-کرنش تجربی حاصل از آزمون کشش تک‌محوری (شکل ۵) تعریف شد.



شکل ۵- نمودار تنش-کرنش مهندسی ورق فولادی AISI 304

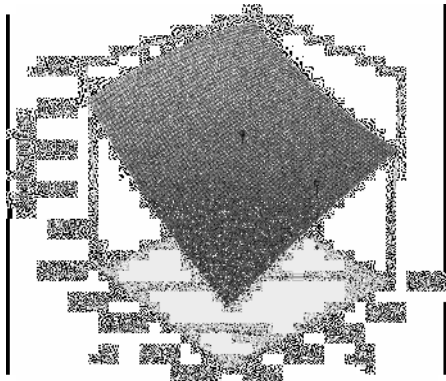
۵- نتایج و بحث

۵-۱- آنالیز واریانس

به منظور تشخیص پارامترهای مهم معیار GTN و همچنین تعیین میزان تأثیرگذاری آن‌ها بر کرنش حدی f_{LD} ، بر روی نتایج به دست آمده از طراحی آزمایش، آنالیز واریانس انجام شد. نتایج این آنالیز در جدول ۳ ارائه شده است. در این جدول معیارهای مختلفی برای تشخیص پارامترهای با ارزش بیان شده است. مطابق با جدول ۳ مقدار پارامتر p برای تمامی متغیرها کمتر از ۰/۰۰۰۱ است. به عبارت دیگر، تمامی این متغیرها در تعیین مقدار کرنش حدی مؤثر هستند. بنابراین برای تشخیص ترتیب اهمیت پارامترها از مقدار پارامتر فیشر (پارامتر F) استفاده شد. این پارامتر برابر با نسبت واریانس میانگین نمونه به واریانس درون نمونه‌ها است. مطابق با جدول ۳ پارامتر f_0 دارای بیشترین مقدار پارامتر F است. یعنی درصد حفره‌های اولیه ماده بیشترین تأثیر را روی کرنش حدی دارد. همچنین جدول ۳ نشان می‌دهد که پارامترهای q_2 و f_C به ترتیب در رتبه‌های دوم و سوم اهمیت قرار دارند. با توجه به این نتایج می‌توان بیان داشت که در محاسبه کرنش‌های حدی با استفاده از معیار GTN، تعیین‌کننده‌ترین پارامترها عبارتند از f_0 ، q_2 و f_C . بنابراین باید توجه ویژه‌ای به تعیین مقدار صحیح این پارامترها داشت و سایر پارامترها را می‌توان بر اساس داده‌های موجود در مراجع انتخاب نمود.

یکی از نتایج کاربردی حاصل از تحلیل داده‌های طراحی آزمایش، نمودارهای تغییر پاسخ طراحی نسبت به تغییر پارامترهای ورودی است. به عنوان مثال، تغییرات کرنش حدی ورق AISI 304 نسبت به تغییر در پارامترهای $1-f_0$ و f_C در شکل ۶ رسم شده است. بر اساس این شکل مشاهده می‌شود که با افزایش هر دوی این پارامترها مقدار کرنش حدی نیز افزایش می‌یابد. با این وجود شیب تغییرات کرنش حدی نسبت به $1-f_0$ بسیار بیشتر از تغییرات آن نسبت به f_C است. به عبارت دیگر پارامتر $1-f_0$ نسبت به f_C تأثیر بیشتری بر کرنش حدی دارد. افزایش $1-f_0$ (کاهش کسر حجمی حفره‌های اولیه f_0) بدان معناست که حفره‌های اولیه کمتری برای رشد وجود دارند. در نتیجه

ضریب تعیین ۰/۹۶۳۰ است که بیان می‌کند این تابع با احتمال ۹۶/۳ درصد، کرنش‌های حدی را به صورت صحیح پیش‌بینی خواهد نمود که یک مقدار قابل قبول است.



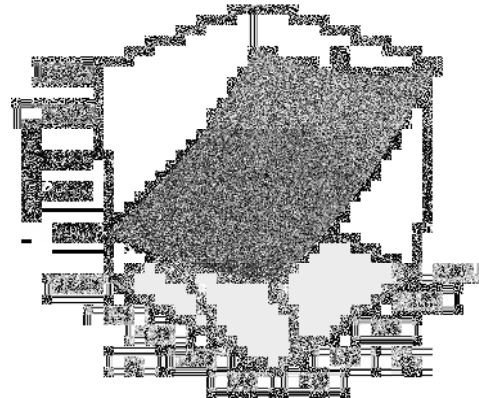
شکل ۸- اثر پارامترهای f_N و ϵ_N بر کرنش حدی ورق AISI 304

جدول ۴- توابع درون‌یابی حاصل از طراحی آزمایش به روش سطح

پاسخ				
نوع تابع	انحراف معیار	ضریب تعیین	ضریب تعیین تنظیم شده	ضریب تعیین پیش‌بینی شده
خطی	۰/۰۹۹	۰/۸۴۷۱	۰/۸۳۹۱	۰/۸۲۶۹
درجه ۲ کاهش یافته	۰/۰۵۷	۰/۹۵۷۲	۰/۹۴۶۵	۰/۹۳۱۹
درجه ۲	۰/۰۵۵	۰/۹۶۳۰	۰/۹۵۰۶	۰/۹۳۴۹
درجه ۳	۰/۰۳۹	۰/۹۹۳۶	۰/۹۸۵۹	۰/۹۳۶۴

برای نمایش بهتر دقت تابع درجه ۲، از این تابع برای پیش‌بینی کرنش‌های حدی تمامی ۱۴۳ آزمایش طراحی‌شده توسط روش سطح پاسخ استفاده شد. در شکل ۹ مقادیر کرنش‌های حدی پیش‌بینی شده با تابع درجه ۲ با مقدار کرنش‌های حدی واقعی (نتایج المان محدود) مقایسه شده است. لازم به ذکر است که در این شکل فرم تبدیل‌یافته کرنش‌های حدی (ریشه دوم مقدار کرنش حدی) نمایش داده شده است. مطابق شکل ۹ نقاط پراکندگی کمی نسبت به خط ۴۵ درجه دارند. به عبارت دیگر پیش‌بینی‌های تابع درجه ۲ به مقادیر کرنش‌های واقعی نزدیک است. این بدان معناست که مدل درجه ۲ دقت بالایی در پیش‌بینی کرنش حدی دارد.

به کمک تابع درجه ۲ مقدار پارامترهای معیار GTN برای کرنش‌های حدی ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ محاسبه شدند. نتایج این محاسبات در جدول ۵ آمده است. سپس برای بررسی میزان دقت مدل درجه ۲ در تعیین پارامترهای معیار GTN، شبیه‌سازی‌های المان محدود با در نظر گرفتن مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط مدل درجه ۲ اجرا شدند و کرنش‌های حدی واقعی (که همان کرنش‌های حاصل از تحلیل المان محدود هستند) محاسبه شدند. در جدول ۵ مقایسه نتایج المان محدود با پیش‌بینی مدل درجه ۲ ارائه شده است. مطابق با این جدول مشاهده می‌شود که تابع درجه ۲ مقادیر بسیار معقولی برای پارامترهای معیار GTN پیش‌بینی نموده است به طوری که برای سه مقدار کرنش در نظر گرفته شده، مقدار خطای کمی بین کرنش‌های حدی حاصل از مدل المان محدود و تابع درجه ۲ وجود دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت

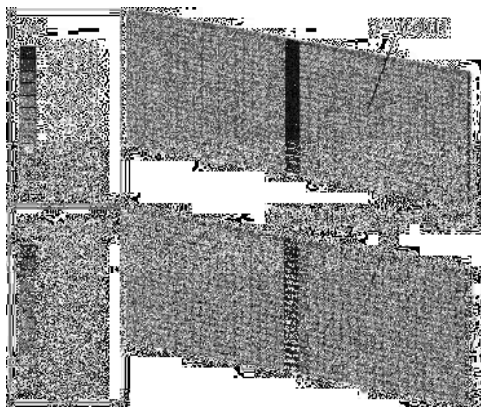


شکل ۷- اثر پارامترهای q_1 و q_2 بر کرنش حدی ورق AISI 304

اثر پارامترهای جوانه‌زنی حفره‌ها (f_N و ϵ_N) بر کرنش حدی در شکل ۸ نمایش داده شده است. مطابق این شکل جوانه‌زنی حفره‌ها یکی از عوامل مهم در افزایش درصد حفره‌ها و در نتیجه پارگی ورق است. به طوری که با کاهش f_N یا کسر حجمی ناخالصی‌ها و نیز با افزایش مقدار ϵ_N یعنی کرنش متوسط جوانه‌زنی حفره‌ها، مقدار کرنش حدی افزایش قابل توجهی نشان می‌دهد. علت این تغییرات را می‌توان اینگونه بیان کرد که اگر درصد ناخالصی‌ها کاهش یابد، محل‌های مستعد تشکیل حفره‌های جدید کاهش می‌یابد و وقوع پارگی در ماده به تأخیر می‌افتد. همچنین اگر مقدار کرنش متوسط ϵ_N زیاد باشد، حفره‌های جدید بعد از اعمال کرنش‌های بزرگتر تشکیل خواهند شد. که این خود به معنای افزایش کرنش حدی ورق است. علاوه بر موارد فوق، شکل ۸ نشان‌دهنده وجود تداخل بین اثرات پارامترهای جوانه‌زنی است. به عبارت دیگر، اگر مقدار ناخالصی‌های ماده بسیار اندک باشد (f_N بسیار کوچک باشد) تغییر مقدار کرنش ϵ_N تأثیر اندکی بر مقدار کرنش حدی خواهد داشت. ولی در f_N ‌های بزرگ، اثر ϵ_N بر کرنش حدی قابل توجه و مشهود است. به صورت مشابه، با کاهش مقدار ϵ_N از ۰/۵ به ۰/۲، میزان تأثیر f_N بر کرنش حدی بیشتر می‌شود.

۵-۲- مدل‌سازی کرنش حدی ورق فولادی 304

علاوه بر تعیین ترتیب اهمیت پارامترها، از روش سطح پاسخ برای پیدا کردن یک تابع چندجمله‌ای برای درون‌یابی نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌های المان محدود استفاده شد. در جدول ۴ نتایج درون‌یابی با توابع مختلف بیان شده است. این جدول با استفاده از معیارهای مختلف میزان دقت چهار مدل مختلف شامل توابع خطی، درجه ۲ کاهش‌یافته (تابع بدون توان‌های دوم هر پارامتر)، درجه ۲ و درجه ۳ را نمایش می‌دهد. در اینجا تابعی که دارای کمترین درجه پیچیدگی بوده و نیز کمترین میزان خطا را داشته باشد، به عنوان تابع درون‌یابی بهینه انتخاب خواهد شد. با مقایسه داده‌های ارائه شده در جدول ۴ می‌توان نتیجه گرفت که اگرچه تابع درجه ۳ خطای کمتری در پیش‌بینی کرنش حدی دارد ولی تابع درجه ۲ با توجه به پیچیدگی کمتر و نیز مقدار خطای بسیار نزدیک به مدل درجه ۳ تابع مناسب‌تری نسبت به سایر توابع است. به همین دلیل این تابع برای درون‌یابی کرنش‌های حدی انتخاب شد. بر اساس جدول ۴، تابع درون‌یاب درجه ۲ دارای

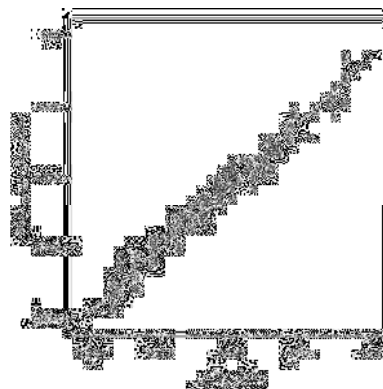


شکل ۱۰- توزیع کسر حجمی حفره‌ها و کرنش حدی حداکثر در ورق AISI 304 در لحظه وقوع پارگی در ناحیه معیوب B

در مورد یک نمودار حد شکل‌دهی، اگر یک معیار مشخص بتواند مقدار دقیق کرنش حدی مربوط تغییرشکل کرنش صفحه‌ای را با دقت قابل قبولی تعیین کند می‌توان انتظار داشت آن معیار بتواند نمودار حد شکل‌دهی را به صورت کامل محاسبه کند [۲۵]. به همین دلیل در اینجا میزان توانایی تابع درجه ۲ بدست آمده در تعیین نمودار حد شکل‌دهی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین‌صورت که نمودار حد شکل-دهی ورق AISI 304 با انجام شبیه‌سازی‌های المان محدود مطابق با روش M-K تعیین شد. برای به دست آوردن تعداد نقاط کافی روی منحنی حد شکل‌دهی، ورق نمایش داده شده در شکل ۴، تحت بارگذاری‌های مختلف قرار گرفت. این بارگذاری‌ها همانطور که در شکل ۱۱ نیز نشان داده شده‌اند شامل کشش تک‌محوری (نقطه سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی)، کشش به صورت کرنش صفحه‌ای (نقطه وسط نمودار حد شکل‌دهی) و کشش دومحوری (نقطه سمت راست نمودار حد شکل‌دهی) هستند. مقادیر پارامترهای معیار GTN به کمک تابع درجه ۲ و برای کرنش حدی تجربی 0.3663 (نقطه واقع روی محور قائم نمودار حد شکل‌دهی) محاسبه شدند و در مدل المان محدود تنظیم شدند. بدین ترتیب نمودار حد شکل‌دهی حاصل از مدل المان محدود با سه نقطه روی آن بدست آمد که در شکل ۱۲ نشان داده شده است.

مقایسه نمودارهای حد شکل‌دهی حاصل از مدل المان محدود و نمودار تجربی در شکل ۱۲ نشان می‌دهد که اگرچه تنها یک نقطه این نمودار برای شناسایی پارامترها استفاده شده است و مدل درجه ۲ نیز تنها برای پیش‌بینی یک نقطه روی نمودار استفاده شده است، ولی مدل المان محدود توانسته است نمودار حد شکل‌دهی را به صورت قابل قبولی پیش‌بینی کند. در سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی انطباق خوبی بین نتایج المان محدود و تجربی وجود دارد. همچنین در ناحیه کرنش صفحه‌ای، مدل المان محدود کرنش حدی را برابر با 0.3647 پیش‌بینی نموده است که دارای خطای 0.44 درصد نسبت به مقدار تجربی است. خطای موجود در سمت راست نمودار حد شکل‌دهی می‌تواند ناشی از شرایط بسیار متفاوت بارگذاری (کشش در دو محور) یا تأثیر در نظر نگرفتن ناهمسانگردی باشد (که این موضوع نیاز به بررسی بیشتر دارد). جالب است توجه شود که مطابق شکل ۱۲ در انتهای‌ترین نقطه نمودار حد شکل‌دهی، مقادیر پیش‌بینی مدل المان محدود با

که تابع درجه ۲ به دست آمده از دقت قابل قبولی در تعیین پارامترهای معیار GTN و نیز محاسبه کرنش حدی برخوردار است.



شکل ۹- مقادیر کرنش‌های حدی پیش‌بینی شده توسط تابع درجه ۲ در مقابل مقادیر واقعی کرنش‌های حدی

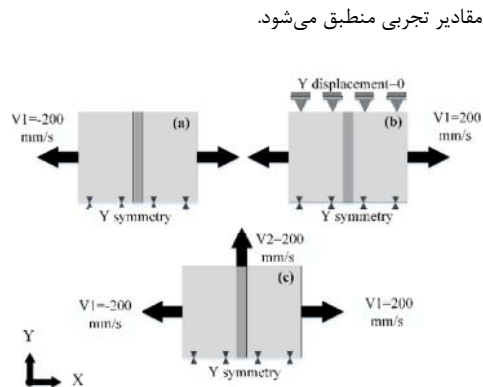
جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی المان محدود و پیش‌بینی‌های تابع درجه ۲

پارامتر	مثال ۱	مثال ۲	مثال ۳
کرنش حدی دلخواه (مدل درجه ۲)	۰/۲	۰/۳	۰/۴
کرنش حدی المان محدود	۰/۱۹۷۵	۰/۳۰۹۸	۰/۴۰۰۵
درصد خطا %	۱/۲۶۶	۳/۱۶۳	۰/۱۲۵
q_1	۱/۶۱۶۰	۱/۴۸۶۰	۱/۱۸۳۰
q_2	۱/۲۳۶۰	۱/۱۹۸۰	۱/۱۰۰۰
$1-f_0$	۰/۹۹۴۹	۰/۹۹۴۹	۰/۹۹۴۹
f_C	۰/۰۱۹۵	۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۴۰
$f_F - f_C$	۰/۱۹۶۵	۰/۱۸۱۸	۰/۱۷۰۷
f_N	۰/۰۱۲۴	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۱۳
$\bar{\epsilon}_N$	۰/۲۴۳۲	۰/۴۷۷۸	۰/۴۲۲۰

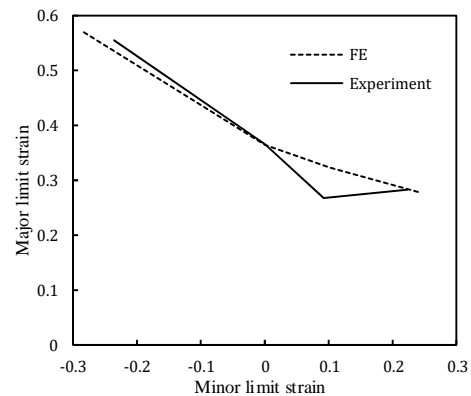
در شکل ۱۰ توزیع کرنش‌های حدی و حجم حفره‌ها در ورق AISI 304 در لحظه وقوع پارگی (در ناحیه معیوب B) نشان داده شده است. در این شکل برای نمایش بهتر ورق، المان‌های ناحیه B در لحظه پارگی حذف نشده‌اند. در مدل المان محدود مربوط به شکل ۱۰ پارامترهای معیار GTN بر اساس ستون چهارم جدول ۵ (پارامترهای مربوط به کرنش حدی 0.4) تنظیم شده‌اند. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد اگرچه مقدار حفره‌ها در ناحیه معیوب B به مقدار نهایی f_F رسیده است، مقدار حجم حفره‌ها در ناحیه سالم A به میزان کمی رشد نموده است (از مقدار صفر به 0.011 افزایش یافته است). همچنین مقدار کرنش‌های حدی حداکثر در ناحیه معیوب B (0.188) بسیار بیشتر از کرنش‌های حدی در ناحیه سالم A (0.40) است. دلیل این مشاهدات رشد ناگهانی حجم حفره‌ها و نیز کرنش‌های حدی قبل از وقوع پارگی در ورق است.

۴- یک تابع درجه ۲ بر اساس نتایج شبیه سازی های المان محدود برای پیش بینی کرنش حدی حداقل محاسبه شد. مقدار ضریب تعیین این تابع ۰/۹۶۳۰ بدست آمد. این تابع درجه ۲ کرنش حدی تجربی را با دقت بالایی (خطای نسبی ۰/۴۴ درصد) پیش بینی کرد.

۵- مشخص شد که می توان از روش سطح پاسخ برای کالیبره کردن پارامترهای معیار GTN با دقت بالا استفاده نمود. به کمک مقادیر کالیبره پارامترهای معیار GTN، نمودار حد شکل دهی ورق AISI 304 با دقت قابل قبولی محاسبه شد.



شکل ۱۱- شرایط مرزی مدل المان محدود روش M-K در تعیین نمودار حد شکل دهی کامل، (a) کشش تک محوری، (b) کرنش صفحه ای، (c) کشش دومحوری



شکل ۱۲- نمودار حد شکل دهی بدست آمده از مدل المان محدود و نمودار حد شکل دهی تجربی

۶- نتیجه گیری

در این مقاله با انجام شبیه سازی المان محدود روش M-K با بکارگیری معیار آسیب GTN، پارامترهایی از این معیار که بیشترین اثر را بر کرنش حدی ورق فولادی AISI 304 دارند، مشخص شدند و همچنین نمودار حد شکل پذیری این ورق فولادی محاسبه شد. نتایج حاصل از پژوهش را می توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱- مدل المان محدود روش M-K با بکارگیری معیار GTN یک مدل ساده و در عین حال کارآمد برای تعیین کرنش های حدی ورق های فولادی است. این مدل نمودار حد شکل دهی ورق AISI 304 را با دقت خوبی پیش بینی نمود.

۲- تمامی پارامترهای بررسی شده از معیار GTN (پارامترهای q_1, q_2, q_3 ، f_N ، f_C ، f_F ، f_0 ، f_1 ، f_2 ، f_3) بر کرنش حدی ورق AISI 304 مؤثر هستند ولی از میان آنها سه پارامتر f_0 ، q_2 و f_C (به ترتیب) تأثیر بیشتری بر کرنش حدی دارند و از درجه اهمیت بالاتری برخوردار هستند.

۳- بین پارامترهای جوانه زنی حفره ها یعنی f_N و $\bar{\epsilon}_N$ اثر متقابل وجود دارد. به طوریکه با کاهش f_N (و یا افزایش $\bar{\epsilon}_N$) اثر پارامتر دیگر بر کرنش حدی کاهش می یابد و بر عکس.

۷- نمادها

حجم لحظه ای حفره ها	f
کسر حجمی مؤثر حفره ها	f^*
کسر حجمی نهایی حفره ها	f_F
کسر حجمی اولیه حفره ها	f_0
کسر حجمی بحرانی حفره ها	f_C
کسر حجمی حفره ها در لحظه شکست	f_F
کسر حجمی حفره های مستعد جوانه زنی یا کسر حجمی ناخالصی ها	f_N
پارامترهای تنظیم معیار GTN	q_1, q_2, q_3
انحراف معیار	S_N
تنش تسلیم معادل (MPa)	\bar{Y}
کرنش متوسط جوانه زنی	$\bar{\epsilon}_N$
تنش مؤثر فون میسز (MPa)	$\bar{\sigma}$

۸- مراجع

- [1] Gurson A. L., Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, No. 1, pp. 2-15, 1977.
- [2] Marciniak Z., Kuczyński K., Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 9, No. 9, pp. 609-620, 1967.
- [3] Tvergaard V., On localization in ductile materials containing spherical voids. *International Journal of Fracture*, Vol. 18, No. 4, pp. 237-252, 1982.
- [4] Tvergaard V., Needleman A., Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*, Vol. 32, No. 1, pp. 157-169, 1984.
- [5] Banabic D., A. Kami., Applications of the Gurson's model in sheet metal forming. *5th International Conference on New Forming Technology (ICNFT 2018)*. Bremen, Germany, 2018.
- [6] Li Z., Bilby B., Howard I., A study of the internal parameters of ductile damage theory. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 17, No. 9, pp. 1075-1087, 1994.
- [7] Zhang C., Leotoing L., Zhao G., Guines D., Ragneau E., A methodology for evaluating sheet formability combining the tensile test with the M-K model. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 1, pp. 480-485, 2010.
- [8] Cao T.-S., Maire E., Verdu C., Bobadilla C., Lasne P., Montmitonnet P., Bouchard P.-O., Characterization of ductile damage for a high carbon steel using 3D X-ray microtomography and mechanical tests—Application to the identification of a shear modified GTN model. *Computational Materials Science*, Vol. 84, pp. 175-187, 2014.
- [9] Fratini L., Lombardo A., Micari F., Material characterization for the prediction of ductile fracture occurrence: an inverse approach. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, No. 1-4, pp. 311-316, 1996.

- [10] Abbasi M., Bagheri B., Ketabchi M., Haghshenas D., Application of response surface methodology to drive GTN model parameters and determine the FLD of tailor welded blank. *Computational Materials Science*, Vol. 53, No. 1, pp. 368-376, 2012.
- [11] Abbasi M., Ketabchi M., Izadkhah H., Fatmehsaria D., Aghbash A., Identification of GTN model parameters by application of response surface methodology. *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 415-420, 2011.
- [12] Kami A., Dariani B. M., Vanini A. S., Comsa D. S., Banabic D., Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage model. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 216, pp. 472-483, 2015.
- [13] Kami A., Mollaei Dariani B., Sadough Vanini A., Comsa D.-S., Banabic D., Application of a GTN damage model to predict the fracture of metallic sheets subjected to deep-drawing. *Proc Rom Acad A*, Vol. 15, pp. 300-309, 2014.
- [14] Abendroth M., Kuna M., Identification of ductile damage and fracture parameters from the small punch test using neural networks. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, No. 6, pp. 710-725, 2006.
- [۱۵] ظهور م.، شاهی س.، حسین پورگلو م.، بررسی تجربی و تئوری تعیین ضرایب معیارهای پیشرفته و نمودار حد شکل دهی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۶، ش. ۱، ص ۱۹۲-۲۰۲.
- [16] Schwindt C., Schlosser F., Bertinetti M.A., Stout M., Signorelli J.W., Experimental and Visco-Plastic Self-Consistent evaluation of forming limit diagrams for anisotropic sheet metals: An efficient and robust implementation of the M-K model, *International Journal of Plasticity*, Vol. 73, pp. 62-9, 2015.
- [۱۷] حبیبی م.، غضنفری ا.، عاصم پور ا.، نقد آبیادی ر.، هاشمی ر.، به دست آوردن منحنی حد شکلدهی با استفاده از دو مدل المان محدود بهبودیافته، نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک، د. ۴۸، ش. ۴، ص ۳۷۹-۳۸۸، ۱۳۹۵.
- [18] Padwal S., Chaturvedi R., Rao U., Influence of superimposed hydrostatic tension on void growth in the neck of a metal sheet in biaxial stress fields. Part-II-Plastic instability. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 32, No. 1-2, pp. 99-107, 1992.
- [19] Melander A., A new model of the forming limit diagram applied to experiments on four copper-base alloys, *Materials Science and Engineering*, Vol. 58, No. 1, pp. 63-88, 1983.
- [۲۰] حسینی م.، ع. حسینی پور س. ج. و بخشی جوئیباری م.، بررسی تئوری اثر حفره‌زایی داخلی بر حد شکل‌دهی فولاد IF با استفاده از مدل M-K و تابع پتانسیل پلاستیک گارسون. *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۱۷، ش. ۱۱، ص ۳۵۳-۳۶۰، ۱۳۹۶.
- [21] Hosseini M. E., Hosseinipour S. J., Bakhshi-Jooybari M., Theoretical FLD Prediction Based on MK Model using Gurson's Plastic Potential Function for Steel Sheets. *Procedia Engineering*, Vol. 183, pp. 119-124, 2017.
- [22] International Standard ISO 12004-2, Metallic Materials-sheet and Strip-Determination of Forming Limit Curves. Part 2: Determination of Forming Limit Curves in the Laboratory. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization.
- [23] Aghaie-Khafri M., Mahmudi R., Predicting of plastic instability and forming limit diagrams. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 46, pp. 1289-1306, 2004.
- [24] Khuri A. I. *Response surface methodology and related topics*. World scientific, Massachusetts, 2006.
- [۲۵] چلوویان م.، مدلسازی نمودار حد شکل پذیری ورق‌های فلزی به کمک مدل آسیب گورسون. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه سمنان، ۱۳۹۶.