

استخراج عددی نمودار حد شکل دهی فولاد 304 بر اساس تغییر فاز در فرایند کشش عمیق

مسعود نصر اصفهانی¹ مهران مرادی^{*2} فرهاد حاجی ابوطالبی³

* نویسنده مسئول: moradi@cc.iut.ac.ir

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، استخراج پارامترهای لازم برای مدل سازی آسیب به روش عددی و با استفاده از نرم افزار ABAQUS است. برای مقایسه و بررسی صحت نتایج این روش، این پارامترها به روش عملی استخراج شده اند. برای این منظور، ابتدا پارامترهای نمودار FLD به طور عملی از آزمون اریکسن برای فولاد زنگ نزن نیمه پایدار آستیتی 304 استخراج شده است. با یک روش جدید، رفتار تغییر فاز از آستینیت به مارتزیت این فولاد در حین شکل دهی کشش عمیق توسط نرم افزارهای CLEMEX و SIGMAPLOT مدل شده است و نتایج آن با تعریف تغییرات خواص مکانیکی و فیزیکی ماده الاستیک-پلاستیک با برنامه نویسی به زبان فورترن توسط زیربرنامه VUMAT به نرم افزار ABAQUS انتقال می یابد. سپس آزمون اریکسن در نرم افزار ABAQUS شبیه سازی گردیده و از زیربرنامه ذکر شده جهت تعریف تغییرات خواص در شبیه سازی استفاده شده است. نقاط مستعد به گلوبی شدن موضعی، برای تمام نمونه ها شناسایی شده و نمودار FLD عددی بر اساس کرنش های اصلی در این نقاط ترسیم شده است، در پایان، نتایج حاصل از این روش و پارامترهای به دست آمده از آزمایش عملی روی نمودار FLD مقایسه می شوند.

واژه های کلیدی: مکانیک آسیب، حد شکل دهی، آزمون اریکسن، تغییر فاز، فرایند کشش عمیق، گلوبی شدن، شبیه سازی اجزای محدود.

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.

2- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

مقدمه

آسیب^۱ در حقیقت به وجود آمدن نقص در وضعیت داخلی قطعه قبل از شکست است. قبل از پیشنهاد مدل مکانیک آسیب، قرن‌های متوالی شکست قطعات عموماً ناشی از بار و تنش بحرانی و یا زیاد بودن تعداد سیکل کاری شناخته می‌شد. تاکنون راهکارهای تئوری زیادی جهت اندازه‌گیری یا مدل‌کردن آسیب ارائه شده است.

باید در نظر داشت که تفاوت‌هایی بین پلاستیسیته و آسیب وجود دارد. از جمله این که جریان پلاستیک مواد به وسیله لغزش در سطح کریستالی یا مولکولی اتفاق می‌افتد ولی آسیب، تغییر مرز از سطح اتمی تا مقیاس بزرگتر برای شروع ترک است. در حقیقت تجمع مناطق آسیب و نقص، باعث به وجود آمدن ترک یا حفره می‌شوند. تشخیص و تعیین آسیب قبل از شکست مسئله مهمی است، زیرا به کمک آن می‌توان قبل از تخریب تجهیزات از وقوع شکست جلوگیری کرده یا آن را پیش‌بینی کرد. پالمگرن، ماینر و روینسون اولین کسانی بودند که تحقیق‌هایی در زمینه آسیب انجام دادند [1]. کاجانوف^۲ اولین مطلب راجع به مفهوم ترمودینامیکی آسیب را عنوان کرد. آسیب به دو نوع ترد و نرم تقسیم می‌شود [1]. منظور از آسیب در این مقاله، آسیب نرم (همراه با کرنش پلاستیک) است. اندازه‌گیری آسیب تا به حال به روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است:

- اندازه‌گیری مستقیم

- اندازه‌گیری آسیب براساس تغییر مدول الاستیسیته

- اندازه‌گیری آسیب براساس انتشار امواج آلتراسونیک

- اندازه‌گیری آسیب براساس تغییر ریزسختی

- اندازه‌گیری تغییر چگالی و مقاومت الکتریکی [2-3]

همچنین مدل‌های ریاضی مختلفی مانند معیار آسیب نرم، جانسون کوک، آسیب برشی، نمودار حد شکل‌دهی (FLD)، مدل مارسینیاک-کوچینسکی، نمودار تنش حد شکل‌دهی و نمودار کرنش معادل حد شکل‌دهی برای محاسبه آسیب توسط محققین پیشنهاد شده است [3-5]. در نرم‌افزار ABAQUS

امکان استفاده از این مدل‌ها فراهم شده است، اما برای استخراج پارامترهای مربوط به هر یک از آنها به آزمایش‌های پرهزینه‌ای احتیاج است. یکی از معیارهای ذکر شده، معیار FLD است. این معیار توسط کیلر^۳ به منظور معین کردن محدوده فرم‌دهی یک ماده قبل از وقوع آسیب یا گلوئی شدن^۴ مطرح شد. این مدل شامل نموداری است که محورهای آن کرنش‌های لگاریتمی اصلی بوده و منحنی V شکل این نمودار مرز بین ناحیه‌ی شکل‌دهی ایمن و شکست یا پارگی را مشخص می‌کند [6-8]. این نمودار برای شکل‌دهی ورق‌ها خصوصاً در فرایند کشش عمیق کاربرد فراوان دارد. گروهی از فولادهای زنگ‌نزن و بسیار شکل‌پذیر در صنعت، فولادهای گروه 300 هستند. هدف از انجام این تحقیق، استخراج پارامترهای لازم جهت مدل‌سازی آسیب به روش عددی و با استفاده از خود نرم‌افزار است ولی برای مقایسه و بررسی صحت نتایج این روش، این پارامترها به روش عملی نیز استخراج شده‌اند. این روش روی فولاد 304 و با شرایط پیچیده‌تر، از جمله تغییر فاز و خواص در حین شکل‌دهی بسط داده شده است. روشی جهت بیان رفتار تغییر فازی (از آستنیت به مارتزیت^۵) فولاد زنگ‌نزن نیمه‌پایدار آستنیتی 304 در حین فرایند کشش عمیق ارائه گردیده که با نوشتن یک زیربرنامه به زبان فورترن در تحلیل‌های نرم‌افزار ABAQUS، جهت انجام شبیه‌سازی آزمون اریکسن دخالت داده می‌شود. در نهایت نمودار FLD حاصل از شبیه‌سازی عددی، با نمودار FLD حاصل از آزمایش عملی مقایسه می‌شود. به‌طور کلی فولادهای زنگ‌نزن، آلیاژهای پایه آهنی هستند که دارای عنصر کروم با درصد وزنی بالای ۱۰.۰۵٪ هستند. گروه‌های مختلفی از فولاد زنگ‌نزن وجود دارد [9]. یکی از این گروه‌ها، فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی گروه 300 است که به کرس‌های^۶ گروه 300 معروف هستند. این گروه مقاومت به خوردگی و چقرمگی بالایی دارند و رایج‌ترین نوع فولادهای زنگ‌نزن هستند. فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی قابلیت شکل‌پذیری خوبی دارند و استحکام آن‌ها در دماهای

3- Keeler

4- Necking

5- Austenite-Martensite

6- Cress (Corrosion resistance steel)

1- Damage

2- L. M. Kachnov

پلاستیک یکنواخت تر و ایمن تر را بهبود می بخشد. در این مقاله یکی از فولادهای این گروه با نام فولاد ۳۰۴L یا ۱۸۸ مورد بررسی قرار گرفته که خود شامل سه زیر گروه است. خواص مکانیکی این سه گروه در شرایط بازیخت² و در دمای اتاق براساس استاندارد ASTM A۲۴۰ در جدول (1) ارائه شده است.

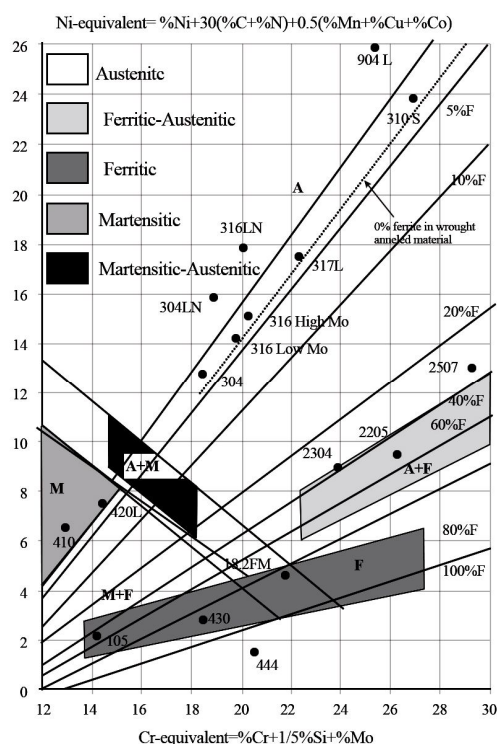
جدول (1) خواص مکانیکی سه گروه فولاد ۳۰۴ [10].

خواص مکانیکی بر اساس			خصوصیت
ASTM A۲۴۰			
۳۰۴	۳۰۴L	۳۰۴H	
۲۰۵	۱۷۰	۲۰۵	استحکام تسلیم (MPa)
۵۱۵	۴۸۵	۵۱۵	استحکام کششی (MPa)
۴۰	۴۰	۴۰	درصد ازدیاد طول در 51 میلیمتر
۲۰۱	۲۰۱	۲۰۱	بیشینه سختی (برینل)
	۸۰۳۰		چگالی (kg/m ³)
	۱۹۳۰۰۰		مدول الاستیسیته (MPa)

برخی از کاربردهای این فولاد در صنایع هوایی، کشتی سازی، لوازم بیمارستانی، خودروسازی، ساخت قالب، تجهیزات قابل جوشکاری، مبدلها و لوله کشی است.

یکی از دلایل بهینه شدن خواص مکانیکی فولاد نیمه پایدار آستنیتی پس از کار سرد³ (ناشی از به وجود آمدن مارتنزیت)، مقاوم بودن مارتنزیت نسبت به ایجاد حفره ها یا عیوبی است که تحت فرایند شکل دهی به وجود می آیند. لازم به ذکر است این حفره ها و عیوب در فرایند کشش عمیق باعث ایجاد شکاف و پارگی می شوند. تاکنون تحقیق های زیادی در مورد رابطه میان میزان کرنش و درصد مارتنزیت به وجود آمده، انجام شده است. اکثر این تحقیق ها براساس پیدا کردن رابطه ای میان درصد مارتنزیت و کرنش در دو بعد (غیر از ضخامت) و یا کرنش مؤثر صورت گرفته است. نتایج

بالا نیز حفظ می شود. به دلیل نیمه پایدار بودن فاز آستنیت، با انجام کار سختی بر روی این فولادها، براساس درصد عناصر آلیاژی و ترکیب شیمیایی آنها، درصدی از ساختار به مارتنزیت تبدیل گردیده و مارتنزیت به وجود آمده در حین شکل دهی این گروه فولاد تأثیر زیادی در رفتار کششی آنها به وجود می آورد [10-11]. یکی از ابزارهای رایج برای پیش بینی ساختار از روی ترکیب شیمیایی این فولادها، نمودار اسپچادرل-دلونگ مطابق شکل (1) است [12].



شکل (1) نمودار اسپچادرل - دلونگ [12].

بر اساس این نمودار برای به دست آوردن ساختار آستنیتی به درصد بالایی از نیکل نیاز است که در فولادهای گروه 300 این مورد قابل مشاهده است [13]. در این نمودار فولادهای آستنیتی کم آلیاژ در سمت چپ و در پایین قابل مشاهده اند. بنابراین آنها نزدیک به ناحیه تشکیل مارتنزیت بوده و فولادهای زنگ نزن مارتنزیتی سخت تر و مستحکم تر از فولادهای آستنیتی اند. از طرف دیگر این انتقال فاز با کار سختی همراه است که مقاومت به گلوئی شدن¹ را بیشتر و تغییر شکل

2- Anneal

3- Cold working

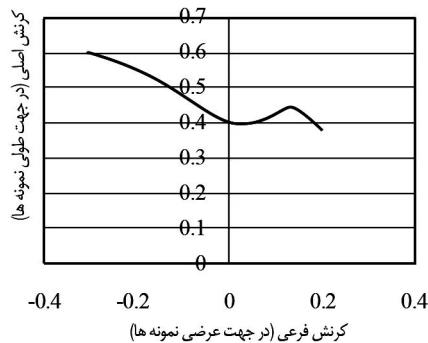
1- Necking

اولین آثار گلوئی شدگی موضعی روی نمونه مشاهده شود. در این لحظه براساس میزان حساسیت دستگاه نسبت به تشخیص پدیده‌ی گلوئی شدگی ورق، سرعت کشش و تأخیر زمانی تنظیم شده بر روی دستگاه، حرکت سنبه متوقف می‌شود. نمونه‌های حاصل از آزمون اریکسن روی فولاد 304 در شکل (3) نشان داده شده است.



شکل (3) نمونه‌های تغییر شکل یافته پس از انجام آزمایش اریکسن.

پس از انجام این آزمون بر روی تمام نمونه‌ها، میزان کرنش اعمال شده در هر نقطه از سطح هر نمونه، در فاصله‌ی یک دایره حول موضع گلوئی شده یا ترک، با توجه به قطر اولیه‌ی دایره و قطرهای کوچک و بزرگ بیضی (هر یک از دایره‌ها پس از شکل دهی به بیضی تبدیل می‌شوند) با خط‌کش مخصوص میلر³ اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. نمودار FLD به‌دست آمده از این آزمون عملی در شکل (4) نشان داده شده است. محور افقی نشان دهنده کرنش در جهت قطر فرعی بیضی‌ها و محور عمودی نشان دهنده کرنش در جهت قطر اصلی آن‌ها می‌باشد. (منظور از بیضی‌ها، بیضی‌های حول نقاط باریک‌شدگی موضعی روی هر نمونه است)

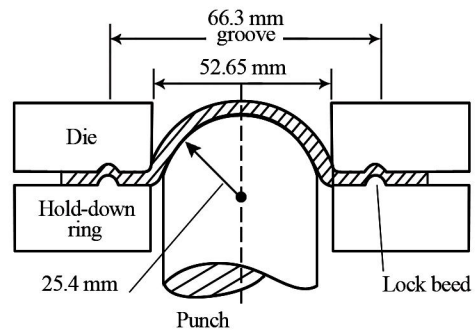


حاصل از این تحقیق‌ها روابطی ریاضی بوده که حتی بعضی از مواقع با نتایج عملی تناقض داشته است.

در نهایت آندرسون و همکاران [13] تحقیق‌هایی روی رابطه میان کرنش ضخامتی و درصد مارتزیت انجام دادند که نتایج حاصل از این تحقیق‌ها بسیار به نتایج عملی نزدیک است.

2- جزئیات آزمایش‌ها

نمونه‌های لازم برای انجام آزمون عملی کشش اریکسن¹ بر اساس استاندارد DIN 50155، 9 قطعه ورق با طول ثابت 110 mm و عرض‌های 12 mm، 24 mm، 36 mm و 48 mm می‌باشد. قالب آزمون اریکسن دارای سه قسمت اصلی ماتریس، سنبه‌ی نیم کرووی و ورق گیر است که در شکل (2) نمای برش خورده‌ی این قالب نشان داده شده است.



شکل (2) ابعاد و سنبه (ساجمه)، ماتریس و ورق گیر [12].

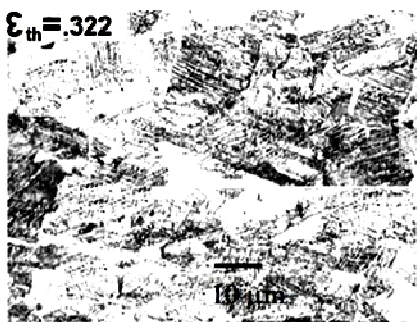
لازم به‌ذکر است که براساس استاندارد مذکور قبل از انجام هر آزمایش، ساجمه (سنبه) کاملاً به روغن مخصوص (تفلون) جهت روانکاری آغشته شده و سطوح درگیری ورق و ورق گیر کاملاً بدون لغزندگی و روانکار می‌باشند. همچنین سطح تمامی نمونه‌ها توسط دستگاه الکترومارک² (به‌صورت شبکه‌های دایره‌ای شکل به قطر 2/5 mm) با استفاده از خاصیت خوردگی حکاکی شده است.

پس از قرار گرفتن نمونه روی دستگاه و بسته شدن گیره مربوط به ورق گیر، سنبه‌ی دستگاه با سرعت تنظیم شده، از سمت پایین به بالا حرکت کرده و بر روی نمونه اعمال کشش می‌کند. این کشش تا جایی ادامه می‌یابد که مطابق شکل (3)

1- Erichsen

2- Electromark

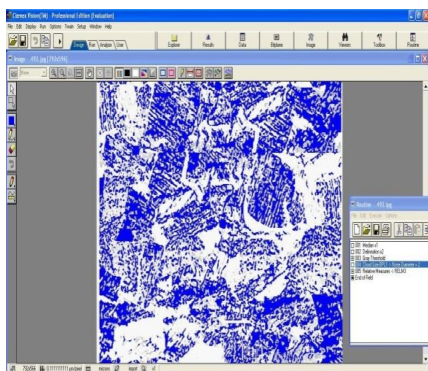
مشاهده‌های ساختاری این نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ نوری Olympus Bx⁶⁰m انجام شده است. شکل (7) ساختار متالوگرافی ضخامت ورق را برای کرنش ضخامتی 0/322 نشان می‌دهد. در این شکل مناطق سفیدرنگ، فاز آستنیت پایه و مناطق تیره‌تر، فاز مارتزیت است.



شکل (7) ساختار متالوگرافی ضخامت ورق در کرنش ضخامتی 0/322.

4- تفکیک ریزساختار نمونه‌ها

در این تحقیق، روش تحلیل عکس میکروساختار، برای تفکیک درصد فازهای آستنیت و مارتزیت به کار رفته است. در این راستا از نرم‌افزار CLEMEX استفاده شده که یکی از نرم‌افزارهای کاربردی در مهندسی متالورژی⁴ است و قابلیت تشخیص و اندازه‌گیری دانه‌ها، فازها، تفکیک ساختار را بر روی عکس میکروساختار و ... دارد. نحوه انجام کار و تحلیل و همچنین خروجی‌های مورد نیاز با استفاده از تنظیم‌های موجود در جعبه‌ابزار⁵ نرم‌افزار مشخص می‌شوند. با تنظیم حساسیت و دقت نرم‌افزار در تشخیص هر فاز، تحلیل بر روی هر تصویر انجام می‌شود. به طور مثال، فاز مارتزیت تشخیص داده شده از تصویر ریزساختار یک نمونه با کرنش ضخامتی 0/397 به صورت شکل (8) است.



4- Metallurgy

5- Toolbox

شکل (4) نمودار FLD به دست آمده از آزمایش عملی.

3- متالوگرافی¹ نمونه‌های حاصل از آزمایش کشش در این مرحله نمونه‌های آزمایش عملی FLD از وسط بریده می‌شوند. دلیل برش این است که کرنش در وسط عرض، بیش از دو لبه‌ی مجاور بوده و برای انجام محاسبه‌های بعدی قابل اعتمادتر است.

پس از برش، یکی از دو نوار به دست آمده از هر نمونه انتخاب و در جهت طولی به تکه‌هایی به طول 10 mm تقسیم می‌شود. در شکل (5) نحوه‌ی تقسیم و برش نمونه به همراه لبه مورد استفاده جهت متالوگرافی، نشان داده شده است.



شکل (5) نحوه‌ی تقسیم و برش نمونه.

در مرحله بعد، تکه‌های بریده شده جهت تهیه مانت² قالب‌گیری شده‌اند. برای جلوگیری از باز پخت، این کار به روش مانت سرد انجام شده است. شکل (6) حالت قرارگیری تکه‌های نمونه در مانت شفاف را جهت بررسی ساختار در ضخامت ورق نشان می‌دهد.



شکل (6) حالت قرارگیری تکه‌های نمونه در مانت شفاف.

لازم به ذکر است، در این تحقیق از محلول اچ³ شیمیایی با ترکیب (0/15 gr K₂S₂O₈, 10 ml HCl, 50 ml H₂O) استفاده شده است [14].

1- Metallographic

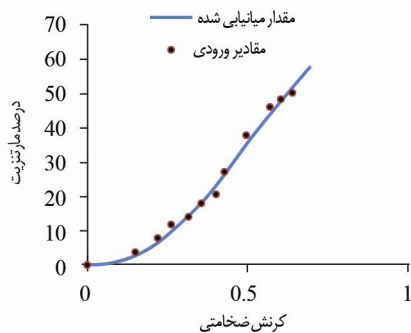
2- Mount

3- Etch

داده‌ها در این نرم‌افزار، روش کمترین مربعات² است که هدف آن کمینه شدن مجموع مربعات اختلاف میان مقادیر میان‌یابی شده توسط نرم‌افزار و داده‌های اولیه است [15].

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n W_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

y_i داده‌ی اولیه و \hat{y}_i مقدار میان‌یابی شده توسط نرم‌افزار است. جهت به‌دست آوردن ضرایب ثابت معادله (1)، مقادیر مندرج در جدول (2) به‌صورت مقادیر ورودی به نرم‌افزار SIGMAPLOT داده شده و با تعریف معادله (1) به عنوان شکل کلی معادله‌ی مورد نظر و انجام تحلیل، مقدار ثابت‌های a و b و M_0 به ترتیب برابر $105/6$ ، $-2/562$ و $0/6478$ به‌دست آمده‌اند. امکان بررسی خطا در این نرم‌افزار نیز تعریف شده است. بررسی خطا و همچنین مقایسه منحنی ترسیم شده از معادله به‌دست آمده با مقادیر ورودی مطابق شکل (9)، حاکی از هم‌پوشانی مناسب داده‌های خروجی با مقادیر ورودی است.



شکل (9) مقایسه‌ی منحنی معادله به‌دست آمده با مقادیر ورودی.

5- جزئیات زیربرنامه

اکنون بایستی به‌گونه‌ای مدول الاستیسیته، چگالی و روابط تنش کرنش پلاستیک، بر اساس تغییر فاز فولاد تعریف شوند. به این منظور از یک زیربرنامه از نوع Vumat برای تعریف معادله‌های صریح³ همسان‌گرد⁴ الاستیک - پلاستیک استفاده شده است. در این معادله‌ها، تغییرات تنش بر اساس نمو کرنش به‌صورت روابط (3) و (4) تعریف می‌شود [16]:

شکل (8) فاز مارتنزیت تشخیص داده شده از تصویر ریز ساختار. نتایج مربوط به درصد فاز مارتنزیت، برای هر تصویر ریزساختار (در یک کرنش ضخامتی معین) در جدول (2) ارائه شده است.

جدول (2) درصد مارتنزیت تولیدشده در هر کرنش ضخامتی.

آزمایش	کرنش ضخامتی	درصد مارتنزیت
آزمایش 1	0/145	2/9
آزمایش 2	. /223	7/4
آزمایش 3	. /261	11/1
آزمایش 4	. /322	14/7
آزمایش 5	. /358	17/8
آزمایش 6	. /397	20/8
آزمایش 7	. /431	26/7
آزمایش 8	. /492	37/7
آزمایش 9	. /569	45/6
آزمایش 10	. /603	48
آزمایش 11	. /634	49/7

آندرسون و همکاران [13] فرمول تئوری زیر را برای پیش‌بینی درصد مارتنزیت، بر اساس کرنش ضخامتی برای کرس‌های گروه 300 پیشنهاد داده‌اند:

$$W_t\%(\text{martensite}) = \frac{a}{1 + \left[\frac{\varepsilon \text{ thickness}}{M_0} \right]^b} \quad (1)$$

که $W_t\%(\text{martensite})$ درصد مارتنزیت به‌وجودآمده و a و b و M_0 ثابت‌هایی هستند که باید مشخص شوند.

نرم‌افزار SIGMAPLOT از جمله ابزارهای مورد استفاده مهندسين است که برای میان‌یابی و ترسیم نمودارها و تخمین معادله‌های هم‌پوشانی داده‌ها استفاده می‌شود. این نرم‌افزار در حل مسائل از روش رگرسیون¹ استفاده کرده که رابطه‌ی میان مقادیر وابسته و غیروابسته را در سیستم مختصات کارترین برای هم‌پوشانی داده‌های ورودی مشخص می‌کند. روش هم‌پوشانی

2- Least square

3- Explicit

4- Isotropic

1- Regression

برای استخراج مدول الاستیسیته فاز مارتزیت، بر اساس استاندارد آزمون کشش (ASTM E⁸)، یک نمونه تحت دو مرحله آزمون کشش قرار گرفته و بر اساس اختلاف در مدول الاستیسیته این دو مرحله، مدول الاستیسیته فاز مارتزیت محاسبه شده است.

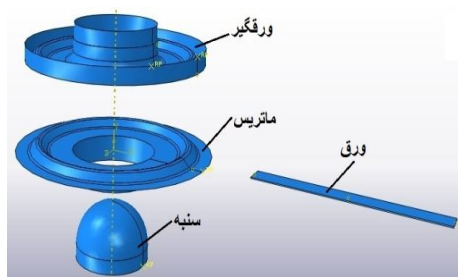
6- جزئیات مدل سازی اجزای محدود

قالب مورد استفاده در آزمون اریکسن در نرم افزار ABAQUS به طور کامل مدل شده و مانند یک آزمون عملی، برای 9 نمونه با عرض های مختلف، شبیه سازی آزمون اریکسن انجام می گیرد. در هر شبیه سازی، فرایند کشش نمونه در طی دو مرحله انجام می شود:

1- گرفتن ورق بین ماتریس و ورق گیر 2- اعمال کشش روی ورق توسط سنبه ساچمه ای (کروی).

برای اعمال تغییرات خواص ماده ناشی از تغییر فاز از آستنیت به مارتزیت در محدوده شکل دهی پلاستیک، از رفتار تنش- کرنش در این محدوده استفاده شده است که قبلاً بر اساس استاندارد ASTM E⁸ در آزمون کشش تک محوری ورق تعیین شده است. لازم به ذکر است که در فرایند کشش ساده نیز مانند سایر روش های شکل دهی، تغییر فاز در ماده به وجود می آید.

شکل (10) اجزای قالب را در دو حالت باز و بسته نشان می دهد. تمامی اجزای قالب به صورت پوسته ای وصلب مجزا³ و ورق به صورت شکل پذیر تعریف شده است.



$$\Delta\sigma_{ij} = \lambda^* \delta_{ij} \Delta\varepsilon_{kk} + 2\mu^* \Delta\varepsilon_{ij} + \left(\frac{\bar{\sigma}^{Pr} - \sigma_y}{3\mu + h} \right) \quad (3)$$

که:

$$h = \frac{d\sigma_y}{d\varepsilon^{Pl}}, \mu^* = \frac{\mu(\sigma_y + h\Delta\varepsilon^{Pl})}{\bar{\sigma}^{Pr}}, \lambda^* = k - \frac{2}{3}\mu^* \quad (4)$$

h ضریب کارسختی، σ_y تنش تسلیم، $\bar{\sigma}^{Pr}$ تنش مؤثر فون میز، k مدول حجمی، μ ضریب لامه، $\Delta\varepsilon^{Pl}$ نمو کرنش مؤثر پلاستیک، $\Delta\varepsilon$ نمو کرنش و $\Delta\sigma$ نمو تنش هستند.

با به کارگیری زیر برنامه ی مذکور، محاسبه های مربوط به تنش، کرنش، چگالی، ضریب ارتجاعی و کرنش سختی از اختیار نرم افزار ABAQUS خارج و معادله های تعریف شده در زیر برنامه مورد استفاده قرار می گیرد. در هر لحظه مدول الاستیسیته و چگالی بر اساس میزان مارتزیت تشکیل شده (وابسته به میزان کرنش در راستای ضخامت ورق)، مطابق مجموعه معادله های (5) و (6) تغییر می کنند:

$$e_{total} = e_{au}*(1-(wt/100)) + e_m*(wt/100) \quad (5)$$

$$d_{total} = d_{au}*(1-(wt/100)) + d_m*(wt/100) \quad (6)$$

e_{total} مقدار مدول الاستیسیته و d_{total} چگالی جدید در هر نقطه از ورق است که مقادیر آن ها وابسته به درصد مارتزیت $\left(\frac{m}{100}\right)$ و درصد آستنیت $(1 - (w_t / 100))$ است (درصد مارتزیت از رابطه (1) به دست می آید). e_m و e_{au} به ترتیب مدول یانگ آستنیت و مارتزیت، و d_m و d_{au} نیز به ترتیب چگالی آستنیت و مارتزیت اند.

بر اساس بررسی های صورت گرفته، تغییر فاز از آستنیت به مارتزیت که ناشی از عملیات شکل دهی است، تغییر چندانی در ضریب پواسون ندارد [17].

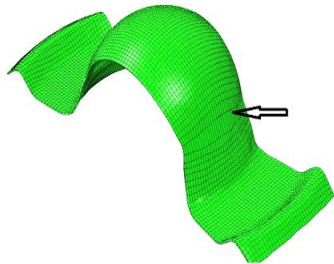
ساختار مارتزیت، مکعبی مرکز پر (bcc¹) و ساختار آستنیت مکعبی مرکز وجه پر (fcc²) بوده، بنابراین چگالی bcc، ۰/۹۶۴ برابر چگالی fcc است [18]. در این صورت، چگالی مارتزیت برابر است با:

$$\rho_m = 0,964 * 8030 = 7743 \text{ kg / m}^3 \quad (7)$$

در زیر برنامه، بر اساس تغییر فاز از آستنیت به مارتزیت، مقادیر تنش، کرنش، چگالی، ضریب ارتجاعی، کرنش سختی و ... در روابط انرژی و تنش - کرنش (رابطه (3))، تغییر یافته و به روزرسانی می شوند.

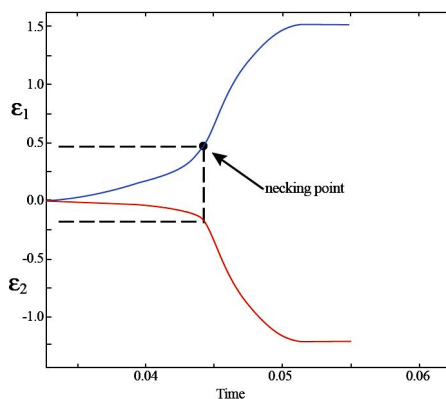
7- بررسی نتایج

معیار اصلی در انتخاب کرنش‌های مورد نیاز در آزمون عملی اریکسن جهت ترسیم نمودار حد شکل دهی، وقوع پدیده‌ی گلوئی شدن موضعی در اولین ناحیه روی هر نمونه است. در شبیه‌سازی نمونه‌ها، با بررسی مرحله به مرحله حرکت سنبه، پس از اعمال کشش می‌توان اولین ناحیه‌ای از یک المان که پدیده گلوئی شدن موضعی رخ می‌دهد را مشخص کرد، شکل (12) را ببینید.



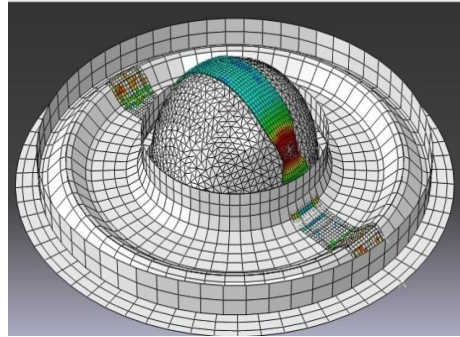
شکل (12) تشخیص اولین نقطه‌ی گلوئی شدن موضعی.

بر این اساس، مطابق شکل (13)، با استفاده از کرنش‌های اصلی در دو جهت، نمودار تلفیقی کرنش - زمان برای هر یک از نقاط مستعد به گلوئی شدن استخراج شده‌اند. از این نمودار، کرنش‌های اصلی (ϵ_1, ϵ_2) در لحظه شروع ازدیاد شیب نمودار کرنش - زمان (لحظه‌ی شروع گلوئی شدن) برای ترسیم نمودار FLD به دست آمده‌اند. این شیوه برای تمام نمونه‌ها در شبیه‌سازی‌ها انجام شده که نتایج آن به صورت داده‌های جدول (3) است.



شکل (13) نمودار تلفیقی کرنش - زمان.

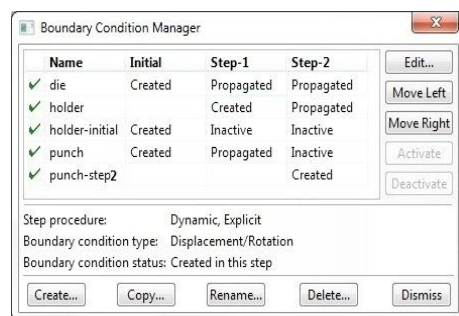
جدول (3) کرنش‌های اصلی و فرعی به دست آمده از روش عددی برای 9 نمونه.



شکل (10) اجزای قالب در دو حالت قالب باز و بسته.

هر دو مرحله تحلیل از نوع تحلیل صریح تعریف شده‌اند. شرایط تماسی به گونه‌ای تعریف شده‌اند که بر اساس شکل‌های (9) و (10)، با قرار گرفتن ورق بین ورق گیر و ماتریس، یک تماس بین ورق گیر و سطح بالایی ورق و تماسی دیگر بین ماتریس و سطح زیرین ورق با ضریب اصطکاک 0/07 تعریف شده است. همچنین تماس بین سطح زیرین ورق و سنبه با ضریب اصطکاک 0/03 (به دلیل استفاده از روانکار) در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی مطابق شکل (11) به گونه‌ای تعریف شده که ماتریس در تمام مراحل هیچ گونه درجه آزادی ندارد. همچنین ورق گیر در مرحله (1) به طرف پایین حرکت نموده و روی ورق قرار می‌گیرد و نیروی (-200) کیلوگرم نیرو (به طرف پایین) را تا پایان کار به آن وارد می‌کند. در مرحله دوم، سنبه که درجات آزادی آن از ابتدای کار تا به این جا کاملاً بسته بوده اکنون به طرف بالا (+y) حرکت کرده و شکل دهی انجام می‌شود.



شکل (11) تعریف کلی شرایط مرزی.

دانه‌بندی ورق با المان‌های شش گوشه با اندازه‌ی 0/6 میلی‌متر و نوع صریح انتخاب شده و برای دانه‌بندی اجزای قالب از نوع المان صلب مجزا و صریح استفاده گردیده است.

محاسبه و اندازه‌گیری درصد مارتزیت تشکیل شده و عامل دوم نحوه‌ی تشخیص گلوئی شدن موضعی در روش‌های عددی و تجربی است. در شبیه‌سازی، این امر به شکل گرافیکی صورت گرفته و به محض شروع این پدیده در هر نقطه می‌توان آن را تشخیص داد ولی تشخیص گلوئی شدن موضعی در روش آزمون اریکسن وابسته به سنسور حساس به سرعت حرکت سنبه است. پس از پاره شدن قسمتی از ورق، دستگاه متوقف شده و عمدتاً همراه با تاخیر زمانی است، در حالی که در روش عددی به محض وقوع گلوئی شدن موضعی می‌توان ϵ_1 ، ϵ_2 را به‌عنوان کرنش‌های یک نقطه از نمودار FLD به دست آورد. به همین دلیل معمولاً ϵ_1 به‌دست آمده از روش عددی کوچکتر از ϵ_1 روش تجربی برای هر نمونه است.

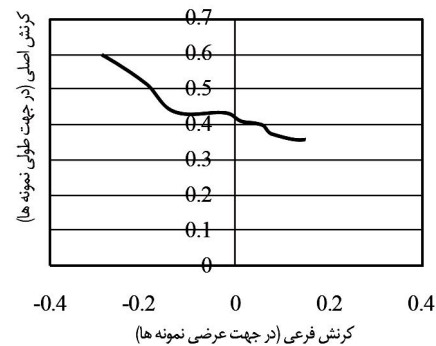
8- بحث و نتیجه‌گیری

هدف از انجام این تحقیق، استخراج پارامترهای لازم جهت مدل‌سازی آسیب به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزار است، ولی برای مقایسه و بررسی صحت نتایج این روش، این پارامترها به روش عملی نیز استخراج شده‌اند. این روش روی یکی از فولادهای گروه 300، با خاصیت تغییر فاز و خواص در حین شکل‌دهی بسط داده شده است و استفاده از آن‌ها حتی در شرایط پیچیده و با تغییرات خواص ماده‌ی اولیه در حین شکل‌دهی تضمین می‌کند. همچنین روش پیشنهادی در مورد تغییر رفتار فولاد می‌تواند به‌عنوان یک مدل کلی برای فرموله نمودن رفتار فولادهای گروه 300 در شبیه‌سازی فرایند شکل‌دهی این فولادها به کار برده شود.

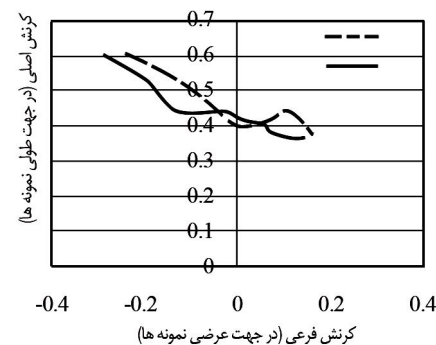
بر اساس نمودار هم‌پوشانی داده‌ها، رابطه‌ی میان درصد کارسرد روی ورق و میزان مارتزیت تولید شده در فولادهای آستیتی نیمه‌پایدار، با روش‌های عددی و نرم‌افزاری ارائه شده در این مقاله، با دقت بسیار بالایی امکان‌پذیر است. همچنین استخراج نمودار FLD به روش عددی براساس نمودارهای کرنش-زمان، حتی تحت شرایط تغییر فاز و با اعمال زیربرنامه مربوط به تغییرات خواص و معادله‌های مربوطه، امکان‌پذیر است. بنابراین به دلیل رشد آسیب در فرایندهای شکل‌دهی و هزینه زیاد آزمایش‌های عملی، می‌توان از روش‌های عددی برای پیش‌بینی آسیب استفاده کرد.

نمونه	ϵ_1	ϵ_2
نمونه 1	0/6	-0/4
نمونه 2	0/52	-0/2
نمونه 3	0/44	-0/2
نمونه 4	0/44	0
نمونه 5	0/41	0/2
نمونه 6	0/4	0/07
نمونه 7	0/38	0/09
نمونه 8	0/36	0/16
نمونه 9	0/4	0/2

چنانچه اطلاعات موجود در جدول (3) روی نمودار ترسیم شود، می‌توان به نمودار FLD که حاصل روش عددی است دست یافت، شکل (14) را ببینید. در شکل (15) دو نمودار FLD به‌دست آمده از آزمایش‌های عملی و روش عددی مقایسه شده‌اند.



شکل (14) نمودار FLD استخراج شده به روش عددی.



شکل (15) مقایسه‌ی نمودار FLD به‌دست آمده از آزمایش عملی و روش عددی.

اختلاف بین نمودارهای FLD به روش عددی و تجربی را می‌توان عمدتاً ناشی از دو عامل دانست. اولین عامل خطای

- فهرست علائم
- درصد مارتنزیت $Wt \% (martensite) (m)$
- ثابت‌ها M_0, a, b
- مدول الاستیسیته E
- نمو زمان Δt
- ضریب کارسختی h
- تنش تسلیم σ_y
- تنش مؤثر فون میزز $\bar{\sigma}^{pr}$
- مدول حجمی k
- ضریب لامه γ
- نمو کرنش مؤثر پلاستیک $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$
- نمو کرنش $\Delta \epsilon$
- نمو تنش $\Delta \sigma$
- مدول یانگ الاستیک کلی $(E_{Total})_{te}$
- چگالی کلی d_{total}
- چگالی آستنیت d_{au}
- چگالی مارتنزیت d_m
- مدول الاستیسیته فاز مارتنزیت e_m
- مدول الاستیسیته آستنیت e_{au}
- تابع وزنی W_i
- مقدار اصلی متغیر وابسته y_i
- مقدار متغیر وابسته پیش‌بینی شده \hat{y}_i
- کرنش ضخامت $\epsilon_{thickness}$
- کرنش در جهت اصلی ϵ_1
- کرنش در جهت اصلی دوم ϵ_2
- ضریب پواسون الاستیک ν
- چگالی مارتنزیت ρ_m
- مراجع
- [1] حاجی ابوطالبی، ف.، پیش‌بینی رشد آسیب در شکل‌دهی ورق‌های فلزی، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، پایان‌نامه دکترا، 1389.
- [2] Lemaitre J., A course on damage mechanics, Verlag, New York, 1992,
- [3] Kattan P.I., Voyiadjis G. Z., Damage mechanics with finite elements, Springer-Verlag, Berlin, 2001.
- [4] Trana E., Buguru M., Zecheru T., Johnson-cook constitutive model for OL 3V Steel, 6th WSEAS International Conference on System Science and Simulation In Engineering, Italy, Vol. 2, 2007, pp. 269-274.
- [5] Solta J., Spisak E., Comprision of the Forming-Limit Diagram(FLD)Models for Drawing Quality(DQ)Steel Sheets, *J.Metalurgija*, No. 44, 2005, PP. 249-253
- [6] Waleed J., Anas A., Balod O., Theoretical Determination of Forming Limit Diagram for Steel, Brass and Aluminum Alloy Sheets, *J.Mechanic Eng.*, No. 14, 2006, pp. 40-50.
- [7] Mater J., Calculation of Forming Limit Diagrams for Changing Strain Paths on the Formability of Sheet Metal, *J.Technol*, No. 1, Vol 17, 2001.
- [8] Stoilov G., Genov J., Kovachev J., Kavardzhikov V., a software system for determination of forming limit diagram, Seventh International Conference on Information Research and Applications, Varna, Vol. 7, 2009, pp. 45-52.
- [9] Blandford ,K., Rahl , E., Morton , K.and Snow , D., tensile stress-strain results for 304L and 316L stainless steel, Pressure Vessels and Piping Division Conference, San Antonio, (2008), 2007, pp. 526-541.
- [10] Milad M., Zreiba N., Elhalouan F., Baradai C., The Effect of Cold Work on Structure and Properties of AISI 304 Stainless Steel, *J. Materials Processing Technology*, No. 44, 2008, pp. 80-85.
- [11] Ding B., Wu Y., Cao B., Hmida S., Xie J., Martensite Transformation Induced by Deformation and its Phas Eletrochemichal Behavior for Stainless Steels AISI 304 and 316L, *J.University of Science and Technlogy Beijing*, Vol 9, 2002, pp. 437.
- [12] Hedstrm P., Lindgren L. E., *Deformation and martensitic phase transformation in stainless steels*, University of Technology SE-971 87 Lule, Sweden, 2007.

- [13] Andersson R., Oden M., Magnusson C., A new equation to describe the microstructural transformation of meta-stable austenitic stainless steels during plastic deformation, Lulea University of Technology Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, ۲۰۰۹.
- [14] Beese A.M., Mohr D., Santacreu P., *Isotropic phase transformation in anisotropic stainless steel 304LN sheets*, Department of Mechanical Engineering, Cambridge MA, USA, ۲۰۰۹.
- [15] www.alfabib.com/filter/sigmafilter\usersguid.pdf.
- [16] www.imechanica.org/files/writing
- [17] Talonen J., *Effect of strain-induced α' -martensite transformation on mechanical properties of metastable austenitic stainless steels*, Helsinki University of Technology, ۲۰۰۷.
- [18] گل‌عذار م، اصول کاربرد عملیات حرارتی فولادها، ویرایش 2، دانشگاه صنعتی اصفهان، 1378، صص 5-28.