

## مقایسه اثر کارسختی و ناهمسانگردی در منحنی‌های حد شکل دهی کرنش و تنش به کمک روش اجزاء محدود\*

سید جمال حسینی پور<sup>(1)</sup> سید غلامرضا قاسمی<sup>(2)</sup> محمد بخشی<sup>(3)</sup>

**چکیده** نمودارهای حد شکل دهی (FLD)، محدوده شکل دهی ورق را برای حالت‌های مختلف تغییر شکل در فرایند های گوناگون شکل دهی ورق نشان می‌دهند. در عمل تعیین تجربی یک منحنی حد شکل دهی (FLC) بسیار زمان بر بوده و احتیاج به تجهیزات خاص و گرانتیست دارد. تحت این شرایط روش اجزاء محدود می‌تواند به عنوان ابزار جایگزین برای پیش بینی نمودارهای حد شکل دهی مورد استفاده قرار گیرد. در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود اثر کارسختی و ناهمسانگردی بر منحنی حد شکل دهی یک نوع ورق فولادی کششی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. بدین منظور آزمون کشش خارج از صفحه هکر با سنبه نیم کروی با استفاده از نرم افزار ABAQUS 6.4 شبیه سازی گردیده است. لحظه گلوبی شدن موضعی که نشان دهنده حد کرنش می‌باشد، به وسیله ردیابی کرنش ضخامتی ورق بر حسب زمان در نازکترین گره و همچنین بررسی مشتقات اول و دوم آن مشخص شده است. با انجام این روش برای نمونه‌های مختلف آزمایش منحنی حد شکل دهی کرنش به دست آمده است. برای تأیید نتایج، منحنی حاصل با نتایج تجربی و تحلیلی مقایسه گردیده است. سپس منحنی حد شکل دهی کرنش با محاسبه تنش های اصلی در گلوبی موضعی به دست آمده است. در نهایت اثر کارسختی و ناهمسانگردی بر منحنی حد شکل دهی کرنش و تنش بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش توان کارسختی منحنی حد شکل دهی کرنش افزایش می‌یابد، اما منحنی حد شکل دهی تنش تغییر قابل توجهی نمی‌نماید. این در حالی است که افزایش مقدار ناهمسانگردی نرمال منجر به افزایش منحنی حد شکل دهی تنش شده ولی منحنی حد شکل دهی کرنش تغییر قابل توجهی نمی‌کند.

**واژه‌های کلیدی** نمودارهای حد شکل دهی، آزمون کشش خارج از صفحه، شبیه سازی اجزاء محدود، کارسختی، ناهمسانگردی.

### A Comparison Between the Effect of Work Hardening and Anisotropy on Strain and Stress Based FLD By Using FEM

S. J. Hosseinipour S. G. Ghassemi M. Bakhshi-Jooybari

**Abstract** A forming limit diagram (FLD) shows the various deformation states and represents the forming limits of sheet metal in the various sheet metal forming processes. In practice, experimental determination of a forming limit curve (FLC) is very time consuming procedure and requires special expensive equipments. Finite element simulation is an alternative method to predict FLD. In this paper, the effect of work hardening and anisotropy on FLC of drawing quality steel has been investigated and compared by using finite element method. For this purpose, the out-of-plane stretching test with hemispherical punch is simulated by finite element software ABAQUS 6.4. The limit strains, which are determined with localized necking, are specified by tracing the thickness strain and its first and second derivatives versus time at thinnest node. By doing this method for different specimens the strain based FLC has been determined. To validate the results, the numerical FLC has been compared with experimental and analytical forming limit curve. Then, the stress based FLD is determined by plotting the calculated principal stresses at the localized necking. Finally, the effect of work hardening and anisotropy has been investigated. The results shown that by increasing work hardening exponent the strain based FLC increases, but the stress based FLC does not change considerably. However, by increasing the value of normal anisotropy the stress based FLC increases, but the strain based FLC does not change considerably.

**Key Words** Forming limit diagram, Out-of-plane stretching test, Finite element simulation, Work hardening, Anisotropy.

\* نسخه اولیه مقاله در تاریخ 86/7/30 و نسخه نهایی آن در تاریخ 87/7/13 به دفتر نشریه رسیده است.

- (1) استادیار گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، مجتمع فنی مهندسی بابل، دانشگاه مازندران
- (2) دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، مجتمع فنی مهندسی بابل، دانشگاه مازندران
- (3) دانشیار، گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، مجتمع فنی مهندسی بابل، دانشگاه مازندران

### مقدمه

بارگذاری می‌باشد. عامل مهمی که در عدم استفاده جدي از نمودارهاي حد شکل‌دهی تنش نقش دارد این است که در بررسی‌های تجربی، تنش به صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری نیست در صورتی که کرنش قابل اندازه‌گیری است. با توجه به این نکته روش اجزاء محدود به عنوان روش اصلی محاسبه دقیق نمودارهاي حد شکل‌دهی تنش به حساب می‌آید [1,2].

به طور کلی روش‌های تجربی ارائه شده برای به دست آوردن نمودارهاي حد شکل‌دهی به دو گروه عمده تقسیم شده است: کشش در صفحه ( In-plane stretching) و کشش خارج از صفحه ( Out-of-plane stretching). در روش اول به نمونه اجازه داده می‌شود که به صورت یکنواخت تغییر شکل دهد و طی آن اصطکاک و هندسه ورق نقش عمده‌ای ایفا نمی‌کنند. روش دوم معمولاً یک سنبه کششی است که در آن اصطکاک و هندسه نیز مهم می‌باشند. نتایج به دست آمده از این دو روش به شکل قابل ملاحظه‌ای با هم متفاوت بوده و نتایج حاصل از روش دوم در عمل بهتر جواب می‌دهد [3]. ناکازیمای (Nakazima) ، ورمن (Veerman) و هکر (Hecker) روش‌هایی را ابداع کردند که در آن‌ها از سنبه نیم‌کروی برای پوشش دادن محدوده کرنش مورد نظر استفاده می‌شود. روش هکر در این میان کاملترین و پر استفاده‌ترین روش می‌باشد. به این صورت که با کم کردن پهنای ورق شکست به کرنش‌های منفی‌تر منتقل شده و بدین ترتیب می‌توان تمام محدوده مورد نظر در یک منحنی حد شکل‌دهی را پوشش داد. یک منحنی حد شکل‌دهی کامل و دقیق با آزمایش بر روی 8 نمونه مختلف قابل ترسیم است [3].

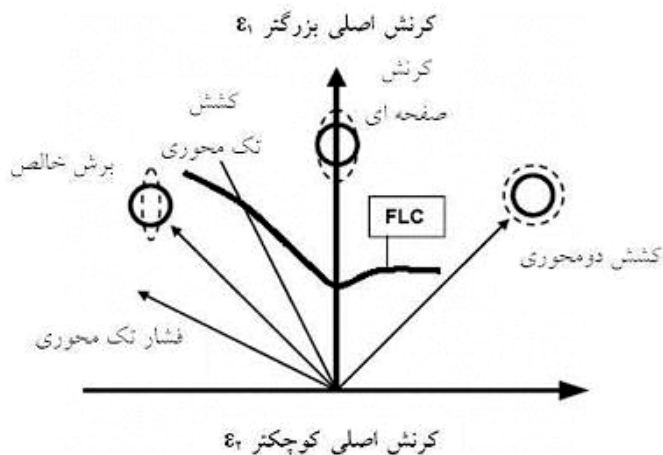
در رابطه با استفاده از نمودارهاي حد شکل‌دهی تحقیقات بسیاری صورت گرفته است. در سال 1964 برای اولین بار کیلر [4] کرنش‌های حدي را در اتساع

بدون یک معیار قابل قبول برای ارزیابی قابلیت شکل پذیري مواد فلزی ورق‌های، ممکن است فرآیند شکل‌دهی منجر به گلوبی شدن و پارگی قطعات در حین تولید شود. با افزایش قطعات از رده خارج، هزینه تولید محصولات فلزی ورقه‌ای افزایش می‌یابد. در این رابطه نمودارهاي حد شکل‌دهی (FLD) (Forming Limit Diagram) یکی از نمودارهاي کاربردی در فرآیند شکل‌دهی ورق برای ارزیابی قابلیت شکل پذیري مواد فلزی ورق‌های می‌باشند. تا هنگامی که کرنش‌های اصلی پایین منحنی حد شکل‌دهی قرار دارند، در آن ناحیه از فلز گلوبی و پارگی رخ نمی‌دهد و در صورت قرار گرفتن در بالای آن خرابی ایجاد می‌شود (شکل 1). کاربرد نمودارهاي حد شکل‌دهی در طراحی قطعه، بهینه سازی قالب، آزمایش قالب و کنترل کیفیت در حین تولید می‌باشد [1,2].

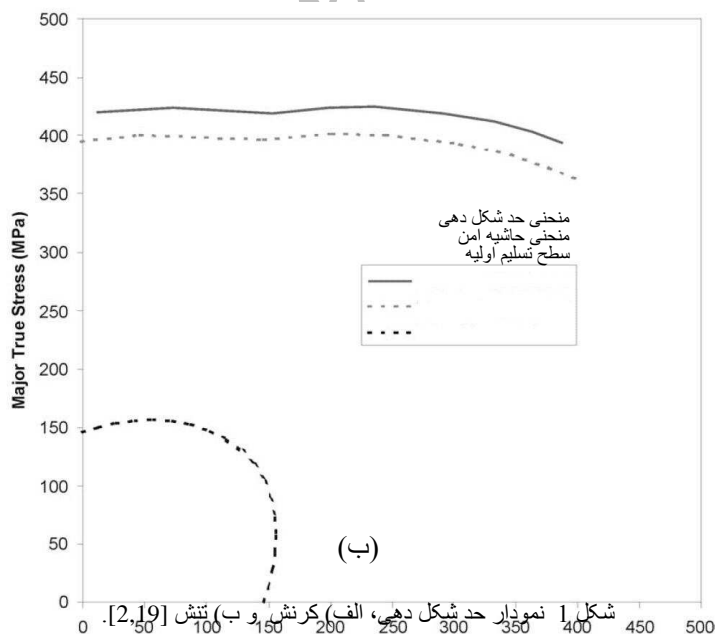
اثبات شده که اگر چه نمودارهاي حد شکل‌دهی کرنش روش مناسبی برای تحلیل شکل پذیري ماده می‌باشند، اما تنها زمانی قابل استفاده هستند که مسیر کرنش متناسب باشد. به عبارت دیگر زمانی که نسبت میان کرنش‌های اصلی در طول فرآیند شکل‌دهی ثابت باشد. با تغییر مسیر کرنش در یک فرآیند شکل‌دهی، شکل منحنی حد شکل‌دهی و در نتیجه نحوه تصمیم‌گیری طراحی تغییر می‌کند. مشکل اساسی با اثر مسیر کرنش این است که هر نقطه بر روی محصول تحت مسیرهاي مختلف کرنش قرار گرفته و در نتیجه نیازمند منحنی حد شکل‌دهی مخصوص خودش است. با توجه به این مسأله استفاده از نمودارهاي حد شکل‌دهی تنش (شکل 1) در فرآیند هاي شکل‌دهی ورق مورد توجه قرار گرفته است. مزیت نمودارهاي حد شکل‌دهی تنش عدم حساسیت آنها به مسیر

خاصی از حالت کرنش مثبت-منفی (سمت چپ منحنی) را به دست آورده و منحنی حد شکل دهی را کامل نمود.

ورق‌های فلزی به صورت تجربی بررسی نمود. او تنها کرنش‌های حادی برای قسمت کرنش‌های مثبت مثبت (سمت راست منحنی) را به دست آورد. در سال 1968، گودوین [5] باترکیبی از عملیات کشش استوانه‌ای و کشش روی ورق‌های باعرض و ضخامت مختلف نقاط



(الف)



(ب)

شکل 1 نمودار حد شکل دهی، (الف) کرنش و (ب) تنش [2,19]. برای پیش بینی نمودارهای حد شکل دهی (Swift) برای پیش بینی و به دست آوردن مدل‌های تئوری نیز ارائه شده است. معیار سمت راست نمودار حد شکل‌دهی مطرح شده است.

هیدرو فرمینگ لوله ها، محدود می‌سازد، کیلر (2000) [11]. استاوتون (2000) [1] مفهوم نمودار حد تنش را مجدداً بررسی و بیان کرد که استفاده از نمودار های حد تنش در همه فرآیندهای شکل‌دهی از جمله فرآیندهای اولیه کشش، برای رسیدن به اندازه گیری دقیق شکل پذیری ضروری است. استاوتون (2002) [12] نشان داد که اگر چه منحنی حد تنش بستگی به مدل ماده دارد اما اگر مدل ماده یکسان در تحلیل اجزاء محدود و در محاسبه نمودار های حد شکل‌دهی به کار رود نوع مدل در دقت جواب تأثیر ندارد. هلمبرگ و همکارانش (2004) [13] یک روش کشش ساده برای به دست آوردن حد کرنش صفحه ای ارائه کردند که از روش های مرسوم دقت بالاتری دارد و بیان کردند که بدون طراحی مناسب نمونه یا نیروی کافی ورقگیر، شکست در ناحیه دلخواه اتفاق نمی‌افتد. وو و همکارانش (2005) [14] وابستگی به مسیر بارگذاری در نمودار های حد تنش را بررسی کردند و نشان دادند که نمودار های حد تنش مستقل از مسیر بارگذاری اند. بایراکتر و همکارانش (2005) [15] یک روش دیگر برای محاسبه حد کرنش صفحه‌ای ارائه کردند که نتیجه حاصل دارای پراکندگی داده‌های کمتری است. پینک و همکارانش (2005) [16,17] با در نظر گرفتن آنالیز مارسینیاک-کوزینسکی (M-K) و بر اساس معیار گلوبی موضعی در راستای ضخامت ورق الگوریتمی جهت تعیین منحنی حد شکل‌دهی معرفی نمودند که برای کل محدوده نمودار های حد شکل‌دهی ورق های فلزی کاربرد دارد. آنها با استفاده از این معیار و به کمک روش اجزاء محدود آزمون کشش در صفحه مارسینیاک را شبیه سازی نمودند. از ترک و لی (2004) [18] کاربرد معیار شکست نرم را در پیش بینی نمودار حد شکل هی یک ورق فولادی کششی بررسی نمودند.

در این تحقیق، با استفاده از روش اجزاء محدود

در معیار سوئیفت رابطه تنش- کرنش ورق به وسیله معادله هولومن بیان می‌شود. در تئوری هیل (Hill) شروع گلوبی موضعی زمانی پیش می‌آید که به یک نحوی در ورق فلزی جهت گلوبی برابر جهت تغییر شکل صفر باشد. بنابراین کرنش در ناحیه گلوبی تنها به علت نازک شدن ورق است. این تحلیل برای سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی بیان شده است. بر اساس تحلیل هیل، منحنی حد شکل‌دهی به معیار تسلیم بستگی نداشته و فقط به توان کار سختی وابسته است. در واقع با داشتن مقدار توان کار سختی به عنوان عرض از مبدا خطی با شیب 45-درجه نمودار حد شکل‌دهی در سمت چپ ترسیم خواهد شد [6].

کلی مولا و پلیکانگاس (1977) [7] نمودار های حد شکل‌دهی را برای فولاد، مس و برنج تحت کشش اولیه تک محوری و دومحوری یکنواخت به دست آوردند و نشان دادند که نمودار های حد کرنش به مسیر کرنش وابسته‌اند. آنها استفاده از نمودار های حد شکل‌دهی بر مبنای تنش را به عنوان یک گزینه پیشنهاد کردند. آریکس و همکارانش (1982) [8] یک معیار بر مبنای تنش را برای مراحل شکل‌دهی ثانویه پیشنهاد کردند. وابستگی نمودار های حد شکل‌دهی کرنش به مسیر کرنش تحت پیش کرنش اولیه توسط گراف و هاسفورد (1993) [9] برای آلومینیوم T4 2008 نیز گزارش شده است. ناندو کار و ناراسیمهان (1999) [10] بیان کردند که مسیر کرنش حتی در آزمایش ساده پانچ استوانه ای در قسمت سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی یکنواخت نیست. وابستگی به شکل و موقعیت مسیر کرنش در نمودار های حد شکل‌دهی کرنش، استفاده از آنها را برای ارزیابی شکل پذیری در فرآیندهای شکل‌دهی ثانویه مانند کشش مجدد و لبه زنی، که مسیر کرنش در آنها مستقل از مسیر کرنش در فرآیند اولیه است، محدود می‌کند. همچنین استفاده از آنها را در فرآیندهایی که به صورت ذاتی غیر خطی اند مانند

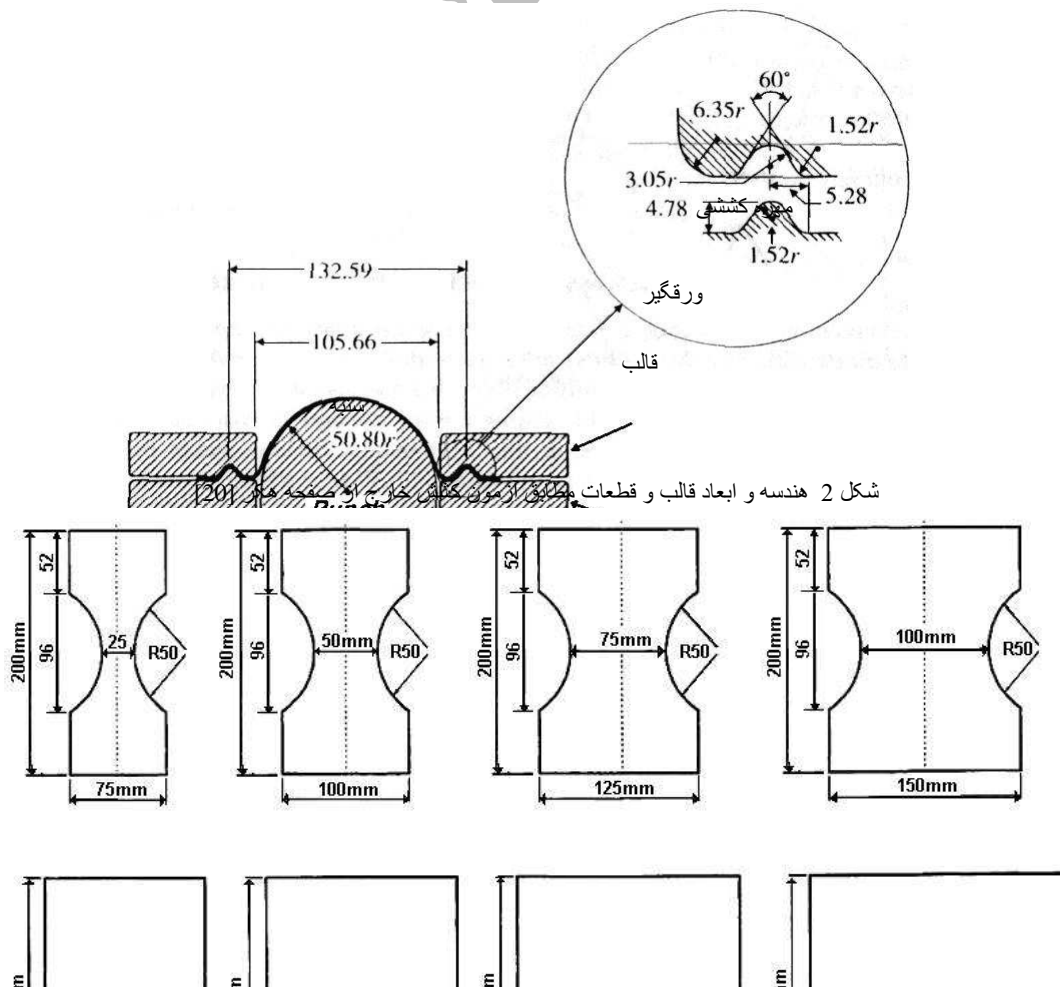
ورق های فلزی فراهم می‌سازد.

### روش اجزاء محدود

**مدل هندسی.** در این پژوهش شبیه‌سازی آزمون کشش خارج از صفحه هکر به منظور تعیین نمودار حد شکل‌دهی یک ورق فولادی کششی با استفاده از نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS 6.4 انجام شده است.

هندسه و ابعاد قالب و قطعات مطابق آزمون در شکل (2) نشان داده شده است. قطعات شکل دهنده شامل سنبه، ورق گیر و قالب به صورت صلب در نظر گرفته شده است. قطعه شکل پذیر که همان ورق می‌باشد به صورت پوسته ای (Shell) مدل شده است. ابعاد نمونه‌ها در شکل (3) نشان داده شده است. هر نمونه مشخص کننده ناحیه معینی از نمودار حد شکل‌دهی می‌باشد. ضخامت اولیه ورق 0/81 mm در نظر گرفته شده است.

قسمت‌های مختلف نمودارهای حد شکل‌دهی کرنش و تنش در آزمون کشش خارج از صفحه هکر برای یک ورق فولادی کششی (Drawing quality steel) شبیه سازی گردیده است. بدین منظور از نرم افزار ABAQUS 6.4 استفاده شده است. آغاز گلوپی موضعی با استفاده از الگوریتم پیتک و همکارانش [16,17] محاسبه شده و نمودار حد شکل دهی حاصل با نمودار به دست آمده از آزمایش تجربی از ترک و لی (2004) [18] مقایسه گردیده است. سپس با استفاده از شبیه سازی اثر پارامترهای کارسختی و ناهمسانگردی با استفاده از معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل مربعی در منحنی حد شکل‌دهی کرنش و تنش مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین مسیر کرنش و تنش نیز مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل درک بهتری از چگونگی تأثیر پارامترهای یاد شده در شکل پذیری



نمونه شماره 1      نمونه شماره 2      نمونه شماره 3      نمونه شماره 4

نمونه شماره 5      نمونه شماره 6      نمونه شماره 7      نمونه شماره 8

شکل 3 ابعاد هندسی نمونه‌های آزمایش [18]

جدول 1 خواص ماده [18]

Yield strength ( $\sigma_y$ )(0.2%) (MPa)	Young's modulus of elasticity (E) (GPa)	Poisson's ratio ( $\nu$ )	Strength coefficient (k) (MPa)	Strain hardening coefficient (n)	Normal anisotropy ( $\bar{r}$ )
174	200	0.3	480.43	0.202	1.75

**مدل تماسی.** مدل تماسی از نوع سطح به سطح (Surface to Surface) انتخاب شده که برای برقراری تماس بین دو سطح المان می‌باشد. سطوح قالب و ورق گیر که تغییر شکل در آنها ایجاد نمی‌شود، به صورت Master، و سطح ورق که امکان تغییر شکل در آن وجود دارد، به صورت Slave معرفی شده است. از مدل اصطکاکی کولمب استفاده شده و ضریب اصطکاک برای تمامی سطوح 0/16 در نظر گرفته شده است.

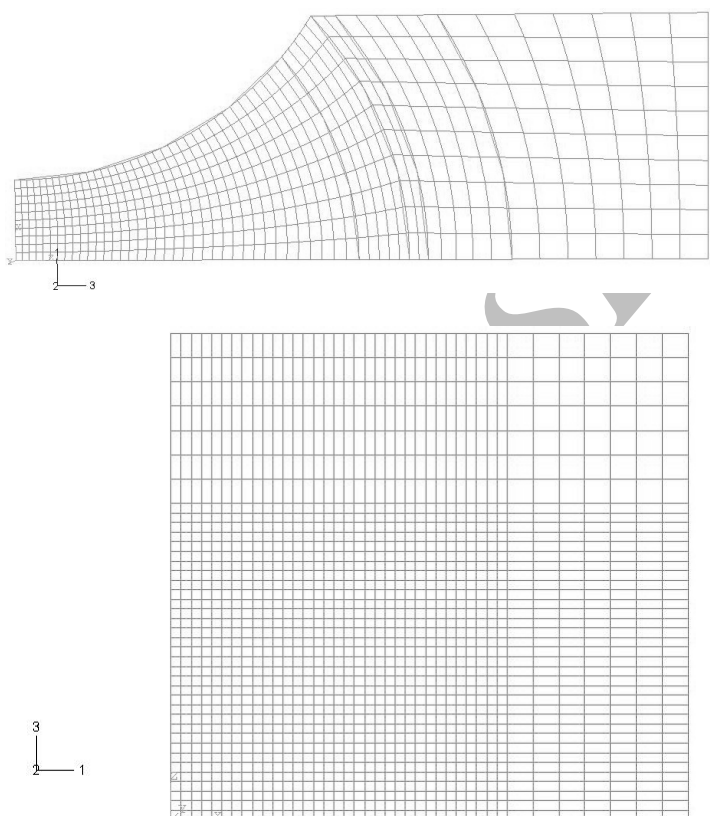
**شرایط مرزی و بارگذاری.** در شبیه سازی به دلیل تقارن هندسی یک چهارم مدل شبیه سازی شده است (شکل 5). برای کاهش مشکل همگرایی در شبیه سازی از حل صریح (Explicit) استفاده گردیده است. بارگذاری در دو مرحله صورت گرفته؛ در مرحله اول نیروی 100 KN به ورق گیر اعمال می‌شود. ورق گیر در جهت عمود بر ورق به سمت پایین حرکت می‌کند و ورق را در برآمدگی‌های

**خواص ماده.** پس از مدلسازی هندسی قطعات مورد نظر، خصوصیات مکانیکی ورق به صورت عددی وارد نرم‌افزار شده است. این خصوصیات شامل منحنی تنش - کرنش حقیقی، ضریب پواسون، مدول الاستیک و چگالی می‌باشد. مشخصات ورق فولادی در جدول (1) آورده شده است. ماده به صورت الاستوپلاستیک و مستقل از سرعت مدل شده است. همچنین خواص ناهمسانگردی ماده توسط معیار تسلیم ناهمسانگرد درجه دو هیل و رفتار منحنی تنش-کرنش ماده با استفاده از رابطه کار سختی هولومن توصیف گردیده است.

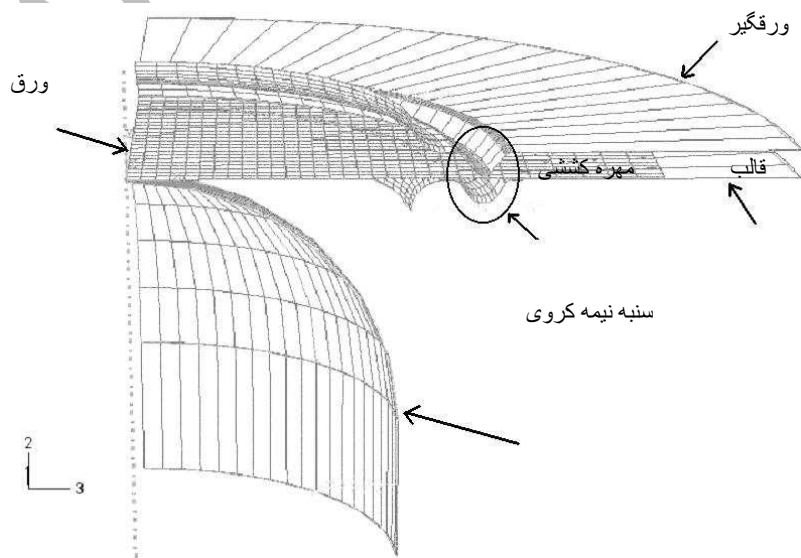
**شبکه بندی.** المان مورد استفاده از نوع پوسته ای S4R می‌باشد که در تغییر شکل‌های زیاد و غیر خطی از آن استفاده می‌شود. از جمله خصوصیات بارز المان‌های پوسته ای، امکان محاسبه تغییرات ضخامت و ضخامت نهایی پس از شکل‌دهی می‌باشد. به منظور افزایش دقت، در قسمت مرکزی نمونه‌های آزمون از شبکه بندی کوچکتری استفاده شده است، (شکل 4).

و ورق گیر جلوگیری می‌کنند. در مرحله بعدی سنبه با سرعت ثابت در جهت عمود بر ورق حرکت می‌کند تا جابه‌جایی لازم رخ دهد.

کششی (Draw-beads) محکم می‌سازد. حین این مرحله سنبه و قالب پایینی ثابت می‌مانند. برآمدگی‌های کششی، ماده را شکل داده و از لغزش ماده میان قالب



شکل 4 نحوه مش بندی نمونه‌ها

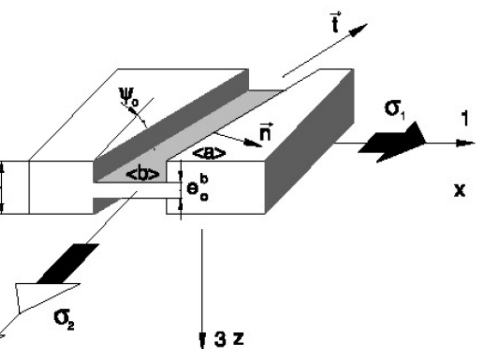


شکل 5 مدل شبیه سازی شده

ضخامت در نازکترین گره می‌تواند انتخاب شود. زمانی که گلوپی رخ می‌دهد، تغییر ناگهانی در رفتار کرنش گره انتخابی مشاهده می‌شود. با رسم منحنی کرنش‌های اصلی در راستای ضخامت ورق در مقابل زمان یک زانویی مشاهده می‌شود، که مشخص کننده تغییرات بیشتر کرنش نسبت به زمان است. با در نظر گرفتن اینکه شروع گلوپی می‌تواند مرتبط باشد با تغییر ناگهانی کرنش در راستای ضخامت در برابر زمان، در نتیجه مشتق دوم کرنش نسبت به زمان در این لحظه مقدار بیشینه خود را دارد. بنابراین با رسم تغییرات مشتق دوم کرنش عرضی در برابر زمان، در نقطه پیک نمودار می‌توانیم شروع گلوپی را انتظار داشته باشیم.

بنابراین روش به دست آوردن نمودار حد شکل‌دهی به مراحل زیر تقسیم می‌شود:

- جستجوی نازکترین گره: بر روی مدل اجزاء محدود. گره‌ای که بیشترین نازک شدگی را در هر بازه زمانی دارد ثبت می‌شود.



شکل 6 عیب اولیه در مدل مارسینیاک-کوزینسکی (M-K) [16,17]

روش تعیین نمودار حد شکل‌دهی. همانطور که اشاره شد در این تحقیق آغاز گلوپی موضعی با استفاده از الگوریتم پیتک و همکارانش [16,17] محاسبه شده است. در این الگوریتم با استفاده از روش تحلیل مارسینیاک-کوزینسکی (M-K)، شبیه سازی ناپایداری پلاستیک صورت گرفته است. این مدل بر مبنای رشد یک عیب اولیه به صورت یک شیار کم عمق با زاویه  $\psi$  نسبت به محور اصلی است (شکل 6). مقدار اولیه عیب سطحی توسط نسبت  $f_0$  مشخص می‌شود.

$$f_0 = \frac{e_0^b}{e_0^a} \quad (1)$$

به صورتی که  $e_0^b$  و  $e_0^a$  ضخامت‌های اولیه در ناحیه همگن و شیار است. این دو ناحیه تحت کشش یکنواخت تغییر شکل یافته و جریان پلاستیک در هر دو ناحیه رخ می‌دهد. اما تغییرات نرخ کرنش در دو ناحیه متفاوت است. در کرنش بحرانی زمانی که جریان موضعی در شیار رخ می‌دهد، کرنش حادی در ورق رخ می‌دهد. برای تعیین گلوپی موضعی با در نظر گرفتن آنالیز M-K و طبیعت انقباض موضعی در ضخامت ورق، کرنش پلاستیک در راستای

- محاسبه اولین و دومین مشتق‌های کرنش اصلی در ضخامت. فرض شده است که شروع گلوپی در زمان افزایش ناگهانی کرنش در راستای

- تعیین کرنش در راستای ضخامت. برای گره‌های یافت شده در مرحله قبل کرنش اصلی در راستای ضخامت ثبت می‌شود.



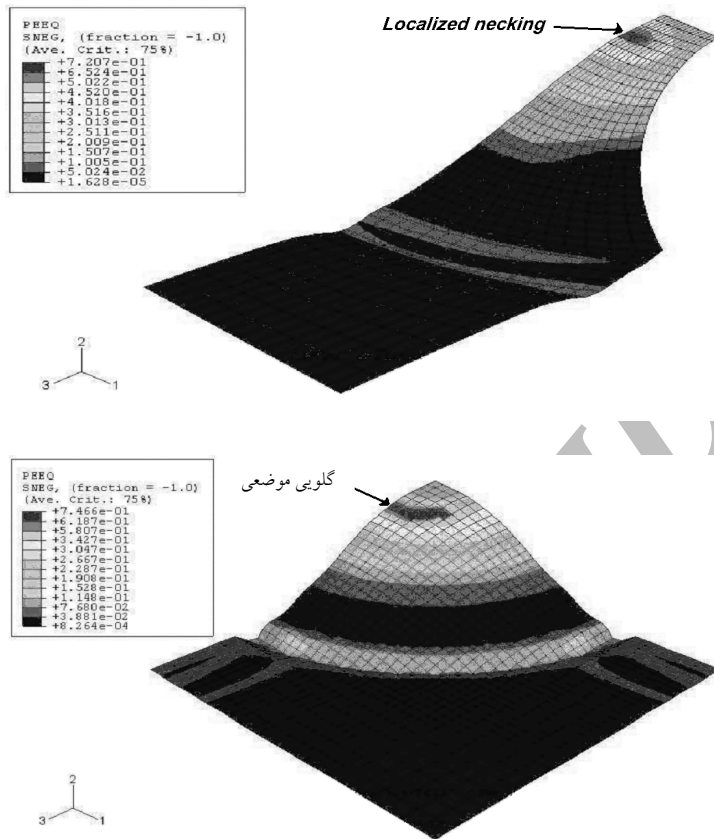
رخ می‌دهد، تغییری ناگهانی در رفتار کرنش گره انتخابی مشاهده می‌شود. با رسم منحنی کرنش اصلی در راستای ضخامت ورق در مقابل زمان، یک زانویی مشاهده می‌شود، (شکل 8). این امر نشان دهنده تغییرات شدید نرخ کرنش است. از این رو با در نظر گرفتن تغییرات نرخ کرنش نسبت به زمان، مشتق اول کرنش ضخامتی بر حسب زمان در این لحظه دارای مقدار بیشینه است، (شکل 8). در شکل (8) مشتق دوم کرنش ضخامتی بر حسب زمان نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود منحنی دارای یک پیک ماکزیم است که نشان دهنده بیشترین تغییرات نرخ کرنش می‌باشد. در نقطه پیک نمودار می‌توانیم شروع گلوئی را انتظار داشته باشیم. بدین ترتیب 8 نمونه آزمایش شبیه سازی گردیده که با استفاده از آن کل ناحیه منحنی حد شکل‌دهی به دست آمده است (شکل 9). برای بررسی صحت نتایج، منحنی حد شکل‌دهی کرنش به دست آمده با نتایج تجربی و تحلیلی انجام شده توسط از ترک ولی [18] مقایسه شده است. با مشاهده نمودار آشکار است که تطابق نسبتاً خوبی میان نتایج حاصل از شبیه سازی با آزمایش تجربی وجود دارد. اختلاف حاصل می‌تواند به دلیل خطای ناشی از ثبت داده‌های گره‌ها در بازه‌های زمانی در هنگام شروع گلوئی باشد. از آنجا که اختلاف میان نتایج شبیه سازی و نتایج تجربی ناچیز است، نتایج شبیه سازی می‌تواند برای بررسی شکل پذیری ورق مورد استفاده قرار گیرد. حال با محاسبه تنش‌های اصلی در گره انتخابی به کمک شبیه سازی می‌توان نمودار حد شکل‌دهی تنش را به صورت رسم تنش‌های اصلی بزرگتر به تنش‌های اصلی کوچکتر، به دست آورد. در شکل (10) نمودار حد شکل‌دهی تنش حاصل از شبیه سازی برای ماده مورد نظر نشان داده شده است.

ضخامت نسبت به زمان است. یک تغییر ناگهانی در نرخ کرنش به خوبی توسط مشتق دوم زمان نشان داده می‌شود که برای تمام گره‌های تعیین شده محاسبه می‌شود.

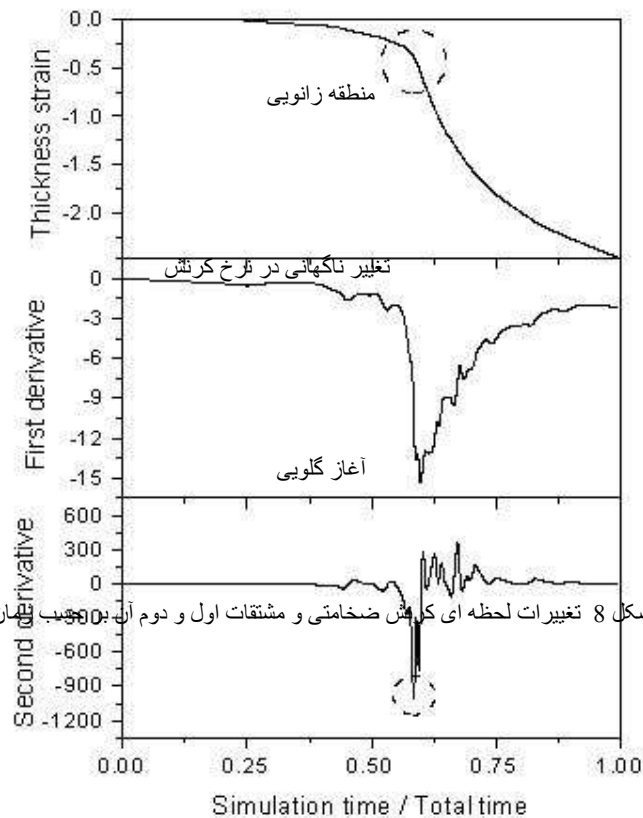
- مشخص کردن مقدار بیشینه مشتق دوم برای یک گره منحصر به فرد. مشتق دوم کرنش پلاستیک نسبت به زمان محاسبه شده است و دارای یک قله است که در حول آن یک زانویی از منحنی کرنش نمایان است. قله مشتق دوم که به عنوان تغییرات زیاد در سرعت شکل‌دهی است مشخص کننده زمانی است که گلوئی رخ می‌دهد.
- انتخاب بیشترین مقدار مشتق دوم زمانی در همه گره‌ها. با مقایسه زمان وقوع مقدار بیشینه مشتق دوم و شماره گره‌ای که اولین مقدار بیشینه ظاهر می‌شود، ثبت می‌گردد.
- ثبت کرنش‌های اصلی در گره مورد نظر. کرنش‌های اصلی در گره مورد نظر و زمان مشخص شده در قسمت قبل ثبت می‌شود.
- رسم نمودار حد شکل‌دهی. با انجام مراحل یاد شده برای هر نمونه نقاط مختلف نمودار حد شکل‌دهی به دست می‌آید.

### نتایج و بحث

**نمودار حد شکل‌دهی کرنش و تنش.** در شکل (7) توزیع کرنش برای دو نمونه تغییر شکل یافته نشان داده شده است. همان طور که توضیح داده شد به کمک شبیه سازی محل‌ها یا گره‌هایی که در آنها ضخامت ورق نازک‌ترین است، مشخص شده است. در طول شبیه سازی تاریخچه کرنش این گره‌های بحرانی ثبت گردیده است. برای تعیین منحنی حد شکل‌دهی بر اساس الگوریتم پیتک و همکارانش [16,17]، با در نظر گرفتن گلوئی موضعی در ضخامت ورق، کرنش پلاستیک در راستای ضخامت در نازکترین گره انتخاب می‌شود. زمانی که گلوئی

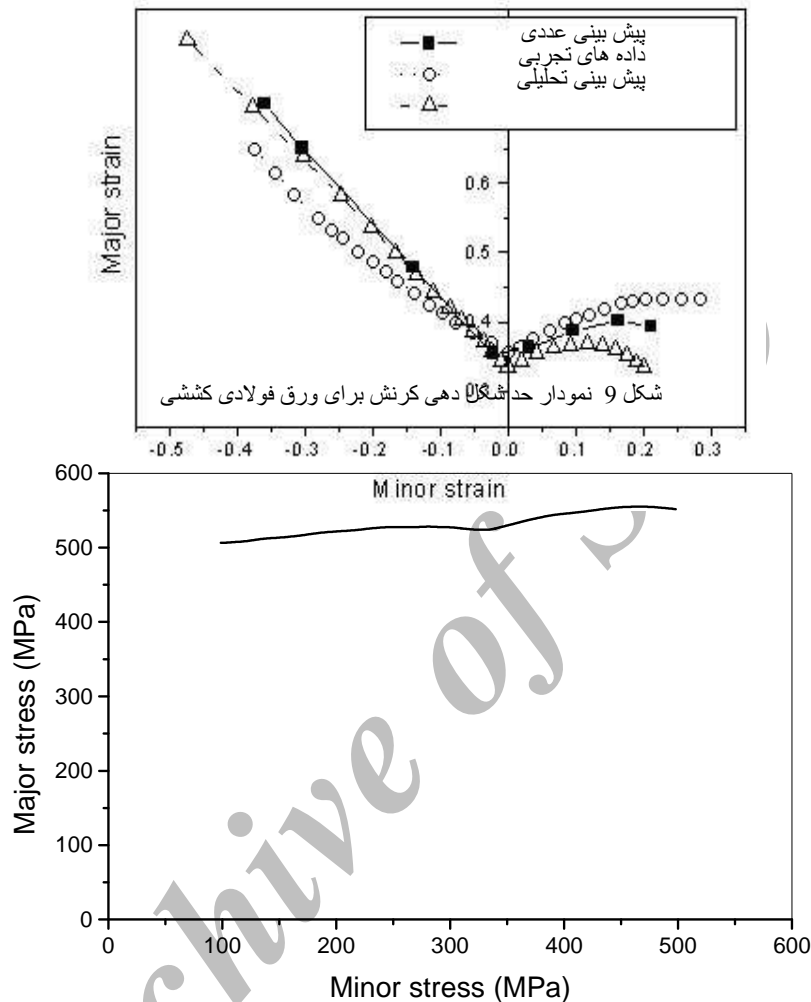


شکل 7 نحوه توزیع کرنش در نمونه‌های تغییر شکل یافته



شکل 8 تغییرات لحظه ای کرنش ضخامتی و مشتقات اول و دوم آن در حین شکل

برای گره بحرانی در یکی از نمونه‌های آزمایش



شکل 9 نمودار حد شکل دهی کرنش برای ورق فولادی کششی

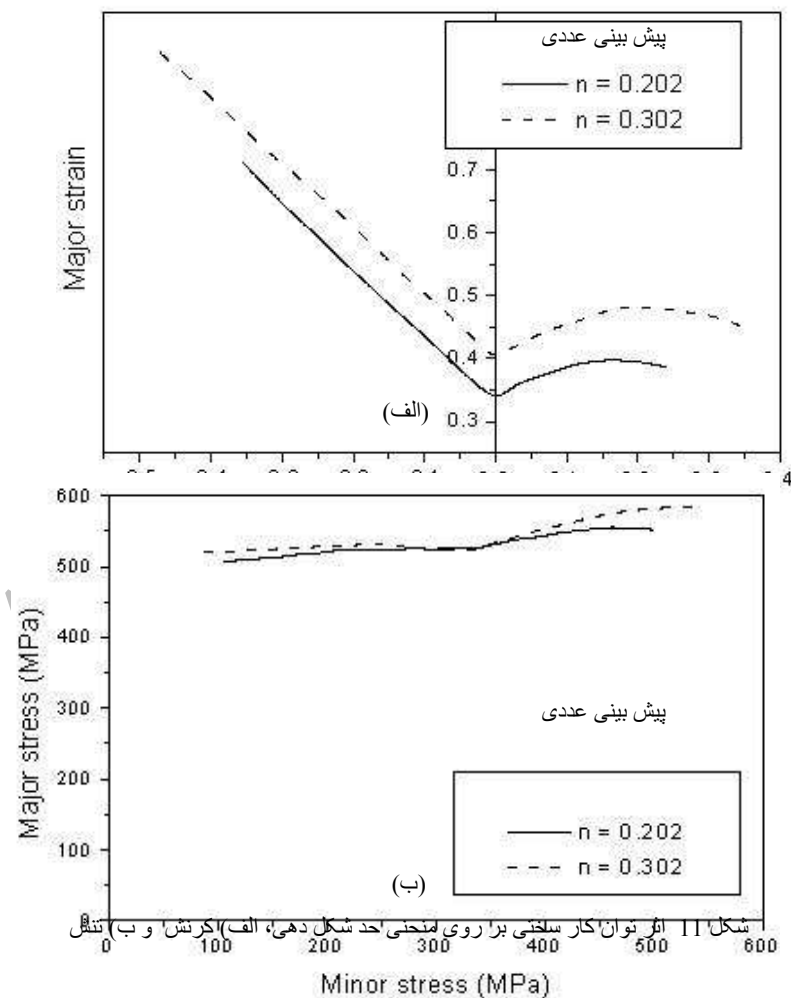
شکل 10 نمودار حد شکل دهی تنش حاصل از شبیه سازی.

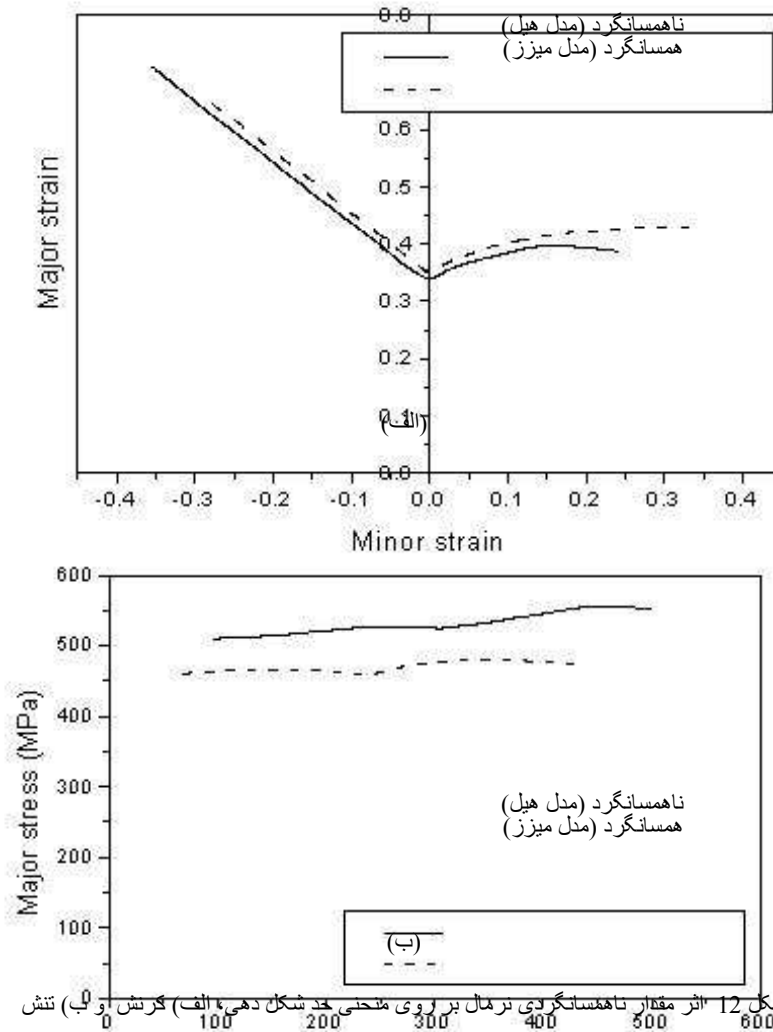
است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش توان کارسختی منحنی حد شکل‌دهی کرنش افزایش یافته که نشان دهنده بهبود شکل‌پذیری ورق می‌باشد. اما افزایش توان کارسختی تأثیر قابل توجه بر روی منحنی حد شکل‌دهی تنش ندارد. لذا در تنش اعمالی به قالب تأثیری ندارد.

**اثر کارسختی بر منحنی حد شکل‌دهی کرنش و تنش.** به منظور بررسی اثر کارسختی بر روی منحنی حد شکل‌دهی کرنش و تنش، مقدار توان کارسختی (n) از 0/202 به 0/302 افزایش داده شده و مجدداً شبیه سازی مطابق روش توضیح داده شده در بالا برای تمام نمونه‌های آزمایش تکرار گردید. در شکل (11) اثر توان کارسختی بر روی نمودارهای حد شکل‌دهی کرنش و تنش نشان داده شده

12- الف) تغییر قابل توجهی نکرده است. این در حالی است که در نمودار حد شکل‌دهی تنش (شکل 12- ب) با افزایش ناهمسانگردی منحنی حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. این نشان می‌دهد که با افزایش مقدار  $\bar{r}$  مقاومت ماده به پارگی افزایش یافته و بنابراین پارگی در سطح تنش‌های بالاتری اتفاق می‌افتد. همچنین نتایج حاصل نشان دهنده آن است که در طراحی قالب این نکته باید مورد توجه قرار گیرد که با افزایش مقدار ناهمسانگردی تنش‌های لازم برای شکل‌دهی نیز افزایش می‌یابند. و از این رو به قالب با استحکام بالاتری نیاز است.

**اثر ناهمسانگردی بر منحنی حد شکل‌دهی کرنش و تنش.** به منظور بررسی اثر ناهمسانگردی بر روی منحنی حد شکل‌دهی کرنش و تنش، از مقدار ناهمسانگردی نرمال ( $\bar{r}=1.75$ ) چشم پوشی شد و شبیه‌سازی با فرض همسانگرد بودن ماده ( $\bar{r}=1$ ) بر اساس معیار تسلیم همسانگرد فون میزز برای تمام نمونه‌های آزمایش تکرار گردید. در شکل (12) نتایج حاصل از شبیه‌سازی نمودار حد شکل‌دهی کرنش و تنش برای دو معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل مربعی و همسانگرد فون میزز نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود منحنی حد شکل‌دهی کرنش (شکل



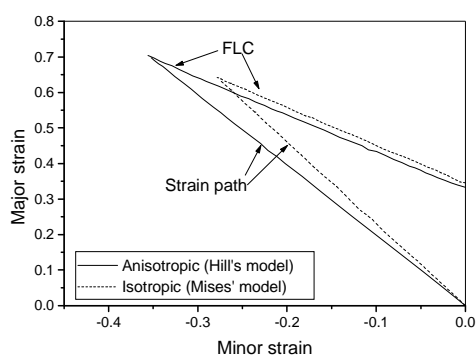


شکل 12 اثر مقدار ناهمسانگردی نرمال بر روی منحنی‌های شکل دهی، الف) کرنش و ب) تنش

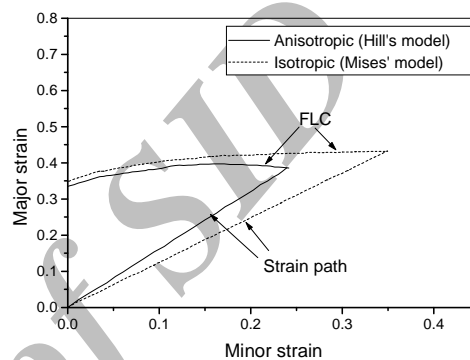
**بررسی مسیر کرنش و تنش.** مسیر کرنش (Minor stress) بر سمت راست نمودار باعث انحراف مسیر نمونه‌های مختلف آزمایش در شکل (13) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش ناهمسانگردی یک چرخشی در مسیر کرنش به سمت چپ نمودار ایجاد می‌شود. این تغییر برای قسمت چپ نمودار باعث فاصله گرفتن از ناحیه کرنش صفحه ای شده و وقوع شکست را به تأخیر می‌اندازد. ولی

داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود ناهمسانگردی تأثیر قابل توجهی بر روی مسیر تنش ندارد. لذا از این جهت نمودار های حد شکل دهی تنش با ثبات تر بوده و پیش بینی بهتری به دست می‌دهند.

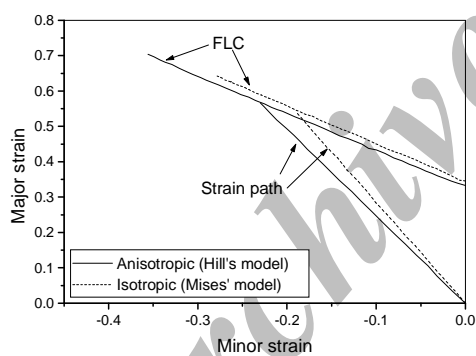
برخی نواحی نمودار حد شکل‌دهی مسیر کرنش خطی نیست. با توجه به تشابه این نوع آزمون با شرایط واقعی، می‌توان نتیجه گرفت که حتی در فرایند های اولیه کشش نیز ممکن است مسیر کرنش متناسب نباشد. در شکل (14) اثر ناهمسانگردی بر روی مسیر تنش در منحنی حد شکل‌دهی تنش نشان



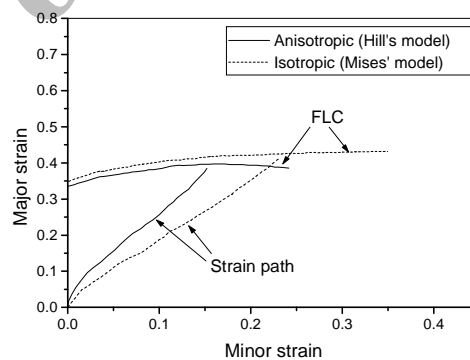
نمونه شماره 1



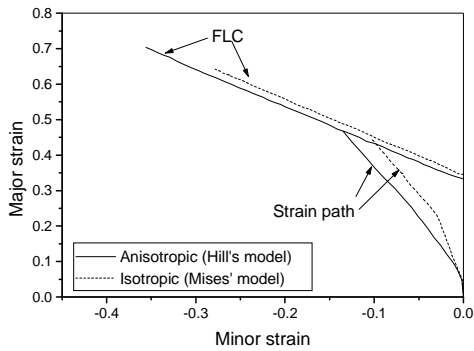
نمونه شماره 8



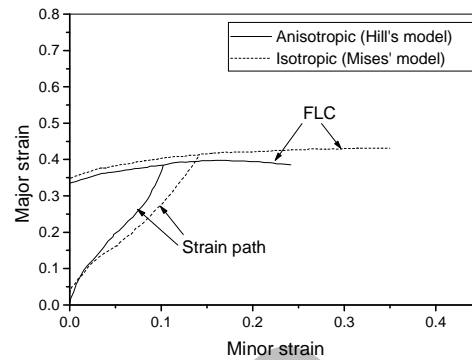
نمونه شماره 2



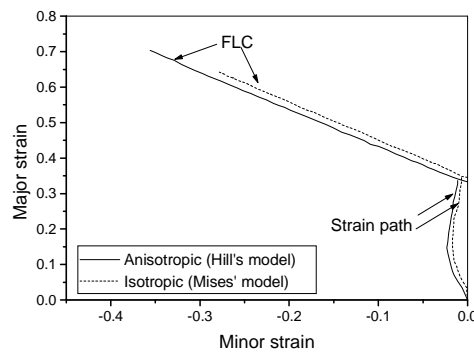
نمونه شماره 7



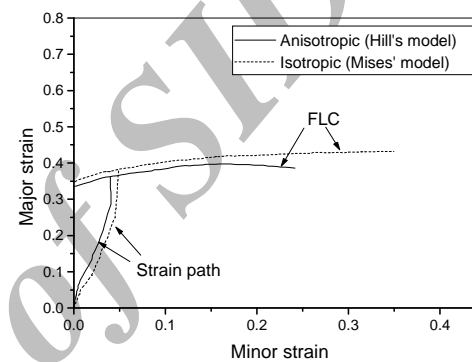
نمونه شماره 3



نمونه شماره 6

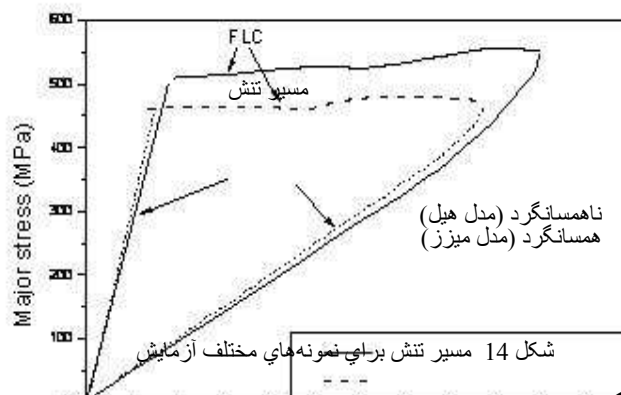


نمونه شماره 4



نمونه شماره 5

شکل 13 مسیر کرنش برای نمونه‌های مختلف آزمایش



شکل 14 مسیر تنش برای نمونه‌های مختلف آزمایش

**نتیجه‌گیری** در این پژوهش به کمک روش اجزاء محدود (FEM) و همچنین اثر پارامترهای کارسختی و کشش خارج از صفحه هکر شبیه‌سازی گردیده و با استفاده از الگوریتم پیتک و همکارانش [16,17] قسمت‌های مختلف نمودار حد شکل‌دهی کرنش و تنش بررسی گردیده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد:

می‌دهد که با وجود اینکه با افزایش مقدار ناهمسانگردی منحنی حد شکل دهی کرنش تغییر نمی‌کند، اما ناهمسانگردی منجر به تغییر مسیر کرنش شده، به نحوی که در مسیر کرنش بر خلاف عقربه های ساعت چرخش ایجاد می‌شود. تحت این شرایط در ناحیه راست نمودار حد کرنش، با افزایش مقدار ناهمسانگردی مسیر کرنش زودتر به مقدار حدی می‌رسد و از این رو شکست زودتر اتفاق می‌افتد. بنابراین برای عملیات کشش دو محوری و هیدروبالجینگ که عمدتاً توزیع کرنش‌ها دو محوری هستند، استفاده از ورق با مقدار ناهمسانگردی ( $\bar{\epsilon}$ ) کوچکتر مناسب تر است. این در حالی است که در ناحیه چپ نمودار حد کرنش، با افزایش مقدار ناهمسانگردی مسیر کرنش دیرتر به مقدار حدی می‌رسد و لذا شکست به تأخیر می‌افتد. در نتیجه در عملیاتی مانند کشش عمیق استوانه ای و کشش تک محوری، ورق با مقدار ناهمسانگردی ( $\bar{\epsilon}$ ) بزرگتر ترجیح داده می‌شود.

● بررسی های انجام شده روی مسیر تنش نشان می‌دهد که با وجود اینکه با افزایش مقدار ناهمسانگردی منحنی حد شکل دهی تنش افزایش می‌یابد، اما مقدار ناهمسانگردی تأثیر قابل توجهی روی مسیر تنش ندارد.

- با توجه به اینکه تنش به صورت مستقیم قابل اندازه گیری نیست، روش اجزاء محدود، زمان شروع گلوبی موضعی را برای محاسبه نمودار حد شکل دهی با دقت قابل قبولی پیش بینی کرده و در نتیجه با استفاده از روش اجزاء محدود نمودار حد شکل دهی تنش قابل رسم است.
- با افزایش توان کار سختی منحنی حد شکل دهی کرنش افزایش می‌یابد در صورتی که منحنی حد شکل دهی تنش تغییر قابل توجهی نمی‌کند. این در حالی است که با افزایش مقدار ناهمسانگردی منحنی حد شکل دهی تنش افزایش یافته در صورتی که منحنی حد شکل دهی کرنش تغییر قابل توجهی نمی‌نماید.
- بررسی های انجام شده روی مسیر کرنش نشان

## مراجع

1. Stoughton, T. B., "A general forming limit criterion for sheet metal forming", Int. J. of Mech. Sci., 42, pp. 1-27, (2000).
2. Stoughton, T. B., Zhu, X., "Review of theoretical models of the strain-based FLD and their relevance to the stress-based FLD", Int. J. of Plasticity, 20, pp. 1463-1486, (2004).
3. Pearce, R., "Sheet Metal Forming", Bristol, Philadelphia and New York, (1991).



4. Keeler, S. P., Backhofen, W.A., "Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches", ASM Transactions Quarterly, 56, pp. 25-48, (1964).
5. Goodwin, G. M., "Application of strain analysis to sheet metal forming in the press shop", SAE paper, No. 680093 (1968).
6. Banabic, D., Bunge, H. J., Pohlandt, K., Tekkaya, A. E., "Formability of Metallic Material", Springer (2000).
7. Kleemola, H. J., Pelkkikangas, M. T., "Effect of predeformation and strain path on the forming limits of steel", Copper and Brass Sheet Metal Industries, 63, pp. 559-5591, (1977).
8. Arrieux, R., Bedrin, C., Boivin, M., "Determination of an intrinsic forming limit stress diagram for isotropic metal sheets". 12th Biennial Congress of the IDDRG, Santa Margherita, Italy, pp. 61-71, (1982).
9. Graf, A. F., Hosford, W. F., "Calculations of forming limit diagrams for changing strain paths". Meter. Trans. A 24, pp. 2497-2501, (1993).
10. Nandedkar, V. M., Narasimhan, K., "Measurement of strain history during the stretching of forming-grade steel sheets". J. of Mater. Process. Tech., 89/90, pp. 24-29, (1999).
11. Keeler, S.P., "Forming limits for hydroforming and other simulations", In: EUROPAM Conference, Nantes. Paris (2000).
12. Stoughton, T. B., "The influence of material model on the stress-based forming limit criterion", SAE paper, 01-0157, (2002).
13. Holmberg, S., Enquist, B., Thilderkvist, P., "Evaluation of sheet metal formability by tensile tests", J. of Mater. Process. Tech., 145, pp. 72-83, (2004).
14. Wu, P. D., Graf, A., MacEwen, S. R., Lloyd, D. J., Jain, M., Neale, K. W., "On forming limit stress diagram analysis", Int. J. of Solids and Structures, 42, pp. 2225-2241, (2005).
15. Bayraktar, E., Isac, N., Arnold, G., "An experimental study on the forming parameters of deep-drawable steel sheets in automotive industry", J. of Mater. Process. Tech., 162/163, pp. 471-476, (2005).
16. Petek, A., Pepelnjak, T., Kuzman, K., "An improved method for determining a forming limit diagram in the digital environment", J. of Mech. Eng. (Slovenia), 51(6), pp. 330-345, (2005).
17. Pepelnjak, T., Petek, A., Kuzman, K., "Analysis of the forming limit diagram in digital environment", Advanced Material Research, 6-8, pp. 697-704, (2005).
18. Ozturk, F., Lee, D., "Analysis of forming limits using ductile fracture criteria", J. of Mater. Process. Tech., 147, pp. 397-404, (2004).
19. Holmderg, S., Enquist, B., Thilderkvist, P., "Evaluation of sheet metal formability by tensile test", J. of Mater. Process. Tech., 145, pp. 72-83, (2005).
20. Kalpakjian, S., Schmid, S. R., "Sheet Metal Forming Process", Prentice-Hall, 4<sup>th</sup> Edition, (2000).