



دانشگاه صنعتی امیرکبیر  
(پلی تکنیک تهران)

دوره ۴۸، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۳۷۹ تا ۳۸۸  
Vol. 48, No. 4, Winter 2017, pp. 379-388



نشریه علمی پژوهشی امیرکبیر - مهندسی مکانیک  
AmirKabir Journal of Science & Research  
Mechanical Engineering  
ASJR-ME

## به دست آوردن منحنی حد شکل دهی با استفاده از دو مدل المان محدود بهبود یافته

مصطفی حبیبی<sup>۱</sup>، احمد غضنفری<sup>۲</sup>، احمد عاصم پور<sup>۳\*</sup>، رضا نقد آبادی<sup>۳</sup>، رامین هاشمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

(دریافت: ۱۳۹۴/۴/۳ پذیرش: ۱۳۹۴/۸/۱۸)

### چکیده

در فرایندهای شکل دهی ورق، استفاده از نمودارهای حد شکل دهی در مطالعه‌ی شکل پذیری ورق‌های فلزی و طراحی قالب اهمیت زیادی دارد. یکی از روش‌های به دست آوردن منحنی حد شکل دهی که نتایج بسیار مناسب و نزدیک به نتایج آزمایشی دارد، مدل تئوری مارشینیاک-کوزینسکی است. این مدل روشی برای پیش‌بینی گلوئی موضعی است. در این تحقیق با روش گنجاندن مدل تئوری مارشینیاک-کوزینسکی در دو مدل المان محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس، منحنی حد شکل دهی به دست آمده است. در مدل اول تئوری مارشینیاک-کوزینسکی در مدل المان محدود آزمون ناکازیمایا گنجانده شده و در مدل دوم (مدل تخت) تئوری مارشینیاک-کوزینسکی شبیه‌سازی شده است. داده‌های موردنیاز برای این شبیه‌سازی‌ها از طریق انجام آزمون کشش ساده در سه جهت به دست آورده شده است. بعد از مقایسه نتایج مدل المان محدود تخت و ناکازیمایا با نتایج تجربی، نمودار حد شکل دهی به دست آمده از مدل المان محدود آزمون ناکازیمایا بسیار مناسب و کمتر از ده درصد در سطح پایین‌تری از نمودار حد شکل دهی تجربی قرار گرفته است. علت اختلاف، نمودار حد شکل دهی مدل تخت و نتایج تجربی خمش است.

### کلمات کلیدی:

نمودار حد شکل دهی، مدل مارشینیاک-کوزینسکی، مدل سازی المان محدود، آزمون ناکازیمایا، ورق St14.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

Habibi, M., Ghazanfari, A., Assempour, A., Naghdabadi, R., and Hashemi, R., 2017. "Determination of Forming Limit Diagram Using Two Modified Finite Element Models". *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, 48(4), pp. 379-388.

نویسنده مسئول و عهده‌دار مکاتبات: Email: assem@sharif.edu



## ۱- مقدمه

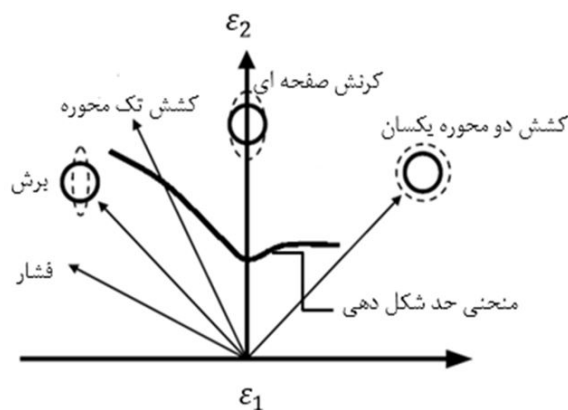
شود، این تحلیل برای پیش‌بینی پایین‌ترین نقطه و سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی ارائه شد.

تا کودا و همکارانش [۷]، با استفاده از معیار شکست نرم و مدل‌سازی المان محدود، نمودار حد شکل‌دهی را برای آلیاژهای آلومینیوم و فولاد پیش‌بینی کرده‌اند. استورن و رایس [۸]، معیار دوشاخه‌ای شدن را برای پیش‌بینی پارگی ارائه کردند که در آن، یک اختلاف سرعت در تغییر شکل موجب وقوع گلوئی موضعی می‌شود. پیتک و همکارانش [۹، ۱۰]، با استفاده از معیار دوشاخه‌ای شدن، الگوریتمی برای تعیین زمان وقوع گلوئی موضعی در مدل‌سازی المان محدود ارائه نموده‌اند. برون [۱۱] پیشنهاد کرد که ماده در زمانی که نازک‌شدگی شتاب می‌گیرد، شروع به گلوئی موضعی می‌کند. این پدیده توسط نویسندگان متفاوتی که با استفاده از مدل المان محدود نمودارهای حد شکل‌دهی را تعیین کردند، دنبال شد [۱۰]. حسینی پور و همکارانش [۱۲]، با استفاده از این الگوریتم اثر ناهمسانگردی را بر روی نمودارهای حد شکل‌دهی بررسی کردند. آن‌ها نشان داده‌اند که با افزایش ناهمسانگردی نمودار حد تنش شکل‌دهی بالاتر می‌رود، اما مسیر تنش تقریباً ثابت می‌ماند.

به موازات روش‌های وقت‌گیر تجربی، روش عددی بر اساس حل عددی با رایانه گسترش یافت. مارشینیاک-کوزینسکی [۱۳] یک معیار بر اساس وجود یک ناهمگنی در ورق ارائه کردند که این ناهمگنی با عامل  $f$  (نسبت ضخامت قسمت سالم به ضخامت قسمت ناسالم) معرفی شد. مارشینیاک و کوزینسکی مدل عددی خود را برای حالت کشش دومحوره ارائه کردند و این مدل در طی زمان توسط محققان مختلف کامل شد. بر اساس معیار مارشینیاک-کوزینسکی گلوئی موضعی زمانی اتفاق می‌افتد که نسبت نرخ کرنش منطقه ناسالم به منطقه سالم به یک مقدار بحرانی برسد.

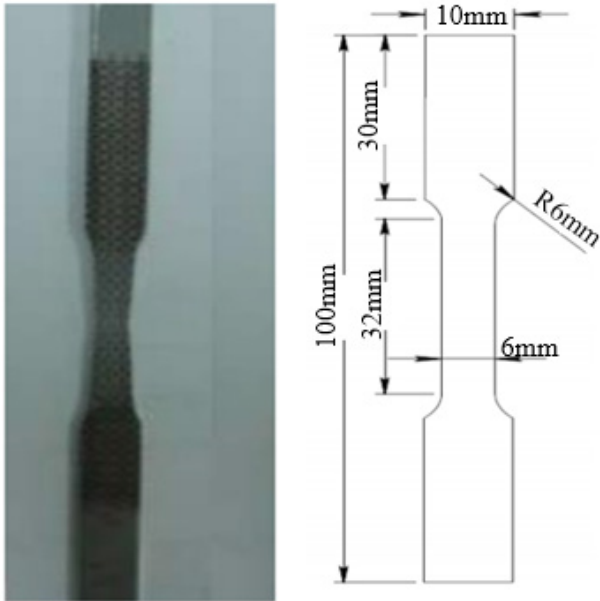
در این تحقیق نمودار حد شکل‌دهی از طریق دو مدل المان محدود به دست آمده است. در مدل اول از طریق گنجاندن معیار گلوئی مارشینیاک-کوزینسکی در مدل المان محدود آزمون ناکازیما نمودار حد شکل‌دهی به دست آورده شد. در مدل دوم، نمودار حد شکل‌دهی از طریق شبیه‌سازی تئوری مارشینیاک-کوزینسکی به دست آمد. در این تحقیق شیار مدل مارشینیاک-کوزینسکی را در حین شبیه‌سازی در ورق ایجاد کرده و طی ۱۰ مرحله از ۰ تا ۹۰ درجه دوران داده شده است. سپس زاویه شیار که در زمان گلوئی موضعی، کرنش‌های حدی کوچک‌تری در منطقه سالم ایجاد کرده به‌عنوان زاویه بحرانی برگزیده و کرنش‌هایش یک نقطه از نمودار حد شکل‌دهی را تشکیل خواهد داد. در این تحقیق زمان گلوئی از طریق نمودار نیرو-زمان سنبه به دست آورده شده است. در تحقیق حاضر از معیار تسلیم هیل ۴۸ و مدل سخت‌شوندگی هولمن برای مدل کردن رفتار ماده استفاده شده است. در بخشی دیگر از این پژوهش نمودار حد شکل‌دهی برای ورق فولادی St14 با استفاده از آزمون ناکازیما به دست آورده شده است.

نمودارهای حد شکل‌دهی در طراحی قطعه، بهینه‌سازی قالب، آزمایش قالب، کنترل کیفیت حین تولید، طراحی فرایند و تخمین شکل‌پذیری ورق کاربرد دارند. شکل‌پذیری ورق را می‌توان قابلیت آن برای تغییر شکل و تبدیل شدن به شکل موردنظر بدون وقوع گلوئی موضعی یا پارگی تعریف کرد. ورق‌ها را تنها تا حد معینی می‌توان تغییرشکل داد و این حد با شروع گلوئی موضعی که در نهایت منجر به پارگی می‌شود، مشخص می‌شود. رسم نمودار حد شکل‌دهی روشی مرسوم برای مشخص کردن این محدوده است. مطابق شکل ۱ منحنی کرنش اصلی بر حسب کرنش فرعی در لحظه آغاز گلوئی این حد را تعیین می‌کند. تا هنگامی که کرنش‌های اصلی پایین منحنی حد شکل‌دهی قرار دارند، در ورق گلوئی و پارگی رخ نمی‌دهد، اما اگر بالای آن قرار گیرد پارگی اتفاق می‌افتد. نسبت کرنش فرعی به اصلی نشان‌دهنده‌ی مسیر بارگذاری است. نمودار حد شکل‌دهی در محدوده نسبت کرنش ۱- تا ۱ رسم می‌شود [۱].



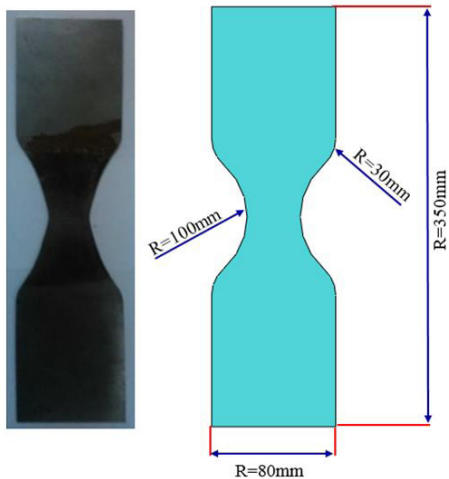
شکل ۱: شماتیکی از نمودار حد شکل‌دهی

سه روش برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی وجود دارد: روش تحلیلی، روش تجربی و روش عددی. در روش‌های تجربی تعیین نمودار حد شکل‌دهی، ورق‌های فلزی در مسیرهای کرنش مختلف قرار می‌گیرند. برای این کار ورق‌هایی با پهنای متفاوت و طول یکسان تحت آزمون نمودار حد شکل‌دهی که یک آزمون تغییر شکل خارج از صفحه است، قرار می‌گیرند [۲]. کلو و بکوفن [۳] برای اولین بار کرنش‌های حدی را برای ورق‌های فلزی به‌صورت تجربی بررسی کرده‌اند. آن‌ها توانستند سمت راست نمودار حد شکل‌دهی را به دست آورند. گودوین [۴]، با کشش ورق‌های با عرض‌های مختلف، سمت چپ نمودار حد شکل‌دهی را به دست آورده و بدین ترتیب نمودار حد شکل‌دهی را کامل کرد. از آنجایی که تعیین نمودار حد شکل‌دهی با استفاده از روش تجربی مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی است، تحقیقات زیادی برای پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی با روش‌های تئوری انجام شده است. پیش‌بینی نمودار حد شکل‌دهی با استفاده از روش‌های تئوری اولین بار توسط سوئیفت [۵] ارائه شد که سمت راست این نمودار را به دست آورد. هیل [۶] پیش‌بینی کرد گلوئی موضعی زمانی رخ می‌دهد که شرایط تغییر شکل کرنش صفحه‌ای



شکل ۳: نمونه آزمون کشش برای استخراج خواص مکانیکی

۲-۲-۲- آزمون کشش برای به دست آوردن کرنش‌های حدی مد کشش در این تحقیق برای یافتن ضریب نقص ( $f$ ) مدل مارشینیاک-کوزینسکی از یک آزمون کشش ساده استفاده شده است. کرنش‌های حدی مد کشش تک‌محوره با استفاده از این آزمون که بر اساس استاندارد ASTM- E8 بوده انجام می‌شود. مطابق شکل ۳ نمونه آزمون آماده و سطح آن شبکه‌بندی شده و بعد از مشاهده گلوئی موضعی فرایند متوقف و کرنش‌های حدی استخراج می‌شود. کرنش‌های حدی مد کشش تک‌محوره در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۴: آزمون کشش جهت یافتن ضریب نقص مدل مارشینیاک-کوزینسکی

کرنش اصلی $\epsilon_1$	کرنش فرعی $\epsilon_2$
۰/۶۱۵	۰/۳۲۵

## ۲- مواد و آزمایش

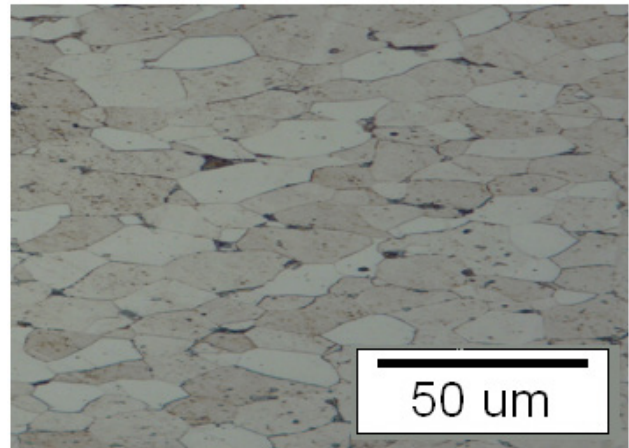
### ۲-۱- مواد

در تحقیق حاضر مواد مورد استفاده ورق فولادی St14 با ضخامت ۱/۴۵ میلی‌متر بوده که به علت شکل‌پذیری بالا این ورق در صنایع خودروسازی کاربرد زیادی دارد. ترکیب شیمیایی برای مواد مورد استفاده از طریق کوانتومتری به دست آمده و در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی فولاد St14

عنصر	Cu	Mo	Ni	P	Mn	C
درصد	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۰۷

ریزساختار این ورق با استفاده از متالوگرافی استخراج شده و در شکل ۲ ارائه شده است.



شکل ۲: ریزساختار ورق St14

### ۲-۲- آزمون کشش ساده

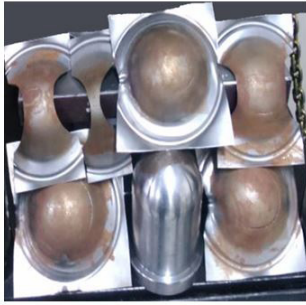
در این پژوهش آزمون کشش بر روی دو هندسه انجام شده است. یکی از هندسه‌ها برای استخراج خواص مکانیکی و هندسه دیگر برای به دست آوردن کرنش‌های حدی حالت کشش انجام شده است.

### ۲-۲-۱- آزمون کشش برای به دست آوردن خواص مکانیکی

بر اساس استاندارد ASTM-E8 [۱۴] سه نمونه آزمون، مطابق هندسه شکل ۳ در جهت ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه آماده شده است تا بدین ترتیب خواص مکانیکی (توان کار سختی، ضریب استحکام، ضریب ناهمسانگردی، مدول یانگ، تنش تسلیم و استحکام نهائی) ورق استخراج شود. خواص مکانیکی این ورق در جدول ۲ ارائه شده است. قابل ذکر است برای هر یک از جهت‌ها سه آزمون انجام شده و میانگین ارائه شده است.

جدول ۲: خواص مکانیکی

مدول یانگ (GPa)	استحکام تسلیم (MPa)	ضریب استحکام (MPa)	توان کار سختی	$\Gamma_0$	$\Gamma_{45}$	$\Gamma_{90}$
۲۰۰	۱۸۸	۶۰۰	۰/۳۱	۲/۶۸	۱/۱۳	۲/۴۵



شکل ۶: شماتیک نمونه‌های آزمون ناکازیمما و نمونه‌ها بعد از تغییر شکل

### ۳- مدل‌سازی رفتار ماده

در این قسمت تابع تسلیم مورد استفاده در تحلیل المان محدود و نوع سخت‌شوندگی ارائه شده است.

#### ۳-۱- تابع تسلیم

برای مدل‌سازی خواص ورق فلزی در شبیه‌سازی المان محدود مطابق رابطه (۲) از معیار تسلیم هیل ۴۸ استفاده شده است [۱۶].

$$f(\sigma) = \sqrt{\frac{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2}{2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{13}^2 + 2N\sigma_{12}^2}} \quad (2)$$

روابط (۲) تا (۸) به دست می‌آیند:

$$F = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right) \quad (3)$$

$$G = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{33}^2} + \frac{1}{\sigma_{11}^2} - \frac{1}{\sigma_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right) \quad (4)$$

$$H = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{11}^2} + \frac{1}{\sigma_{22}^2} - \frac{1}{\sigma_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right) \quad (5)$$

$$L = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\sigma_{23}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2} \quad (6)$$

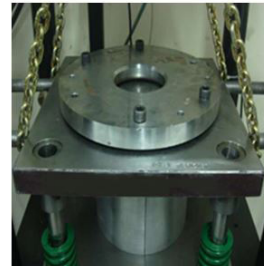
$$M = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\sigma_{13}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2} \quad (7)$$

$$N = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\sigma_{12}} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2} \quad (8)$$

برای به کارگیری این معیار تسلیم در نرم‌افزار آباکوس از روابط (۹) تا (۱۲) استفاده می‌شود. با استفاده از این روابط ضرایب ناهمسانگردی به صورت یک تانسور متقارن مرتبه دو در نرم‌افزار گنجانده می‌شود [۱۷].

### ۳-۲- نمودار حد شکل‌دهی تجربی

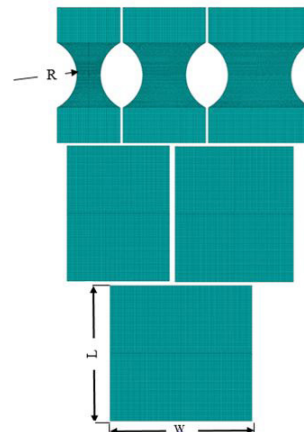
آزمون‌ها طبق روش استاندارد ناکازیمما [۱۵] با استفاده از یک سنبه کروی به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و یک پرس هیدرولیک ۳۰ تن انجام شده است. موقعیت قرارگیری تجهیزات آزمون که شامل سنبه، قالب و ورق گیر است روی دستگاه پرس، در شکل ۵ نشان داده شده است. تمام آزمون‌ها با استفاده از روانکار مناسب، به گونه‌ای انجام شده که به شرایط بدون اصطکاک نزدیک باشد. دستگاه پرس به حسگر نیروسنج مجهز بوده و در آزمون‌ها به محض اینکه نیرو کاهش یابد متوقف می‌شود. کاهش یافتن نیرو در حین فرآیند، نشان‌دهنده گلوئی موضعی در ورق است.



شکل ۵: قالب آزمون ناکازیمما

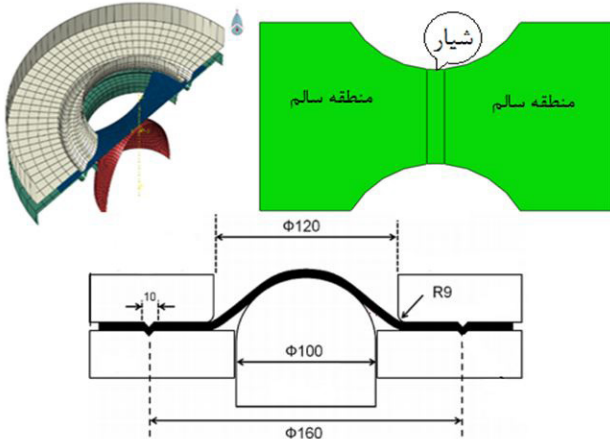
با استفاده از دستگاه حک الکتروشیمیایی دایره‌هایی به قطر ۲/۵ میلی‌متر شبکه‌بندی شده تا بتوان پس از تغییر شکل کرنش‌ها اندازه‌گیری شوند و ابعاد این نمونه‌ها بر اساس مرجع [۱۵] از نظر ابعادی آماده شده است. دایره‌هایی که در معرض تغییر شکل هستند پس از فرآیند به شکل بیضی درمی‌آیند و برحسب موقعیت در یکی از سه ناحیه ایمن، ناحیه گلوئی و ناحیه شکست قرار می‌گیرند. کرنش‌های اصلی در صفحه ورق بر اساس کرنش‌های حقیقی بیان شده است. کرنش‌های حقیقی کمینه و بیشینه با اندازه‌گیری قطر کوچک ( $a$ ) و بزرگ ( $b$ ) بیضی‌ها و مقایسه آن با قطر اولیه ( $d$ ) با استفاده از رابطه (۱) اندازه‌گیری می‌شود. شماتیک نمونه‌های آزمون ناکازیمما و نمونه‌ها بعد از تغییر شکل در شکل ۶ ارائه شده است. با توجه به شکل ۶،  $L$  برای تمام نمونه‌ها ثابت و ۱۸۰ میلی‌متر بوده و  $R$  در نمونه‌های ردیف اول ۵۰ میلی‌متر و  $W$  به ترتیب ۸۰، ۱۰۰، ۱۳۰، ۱۴۵، ۱۶۰ و ۱۸۰ میلی‌متر است.

$$\epsilon_{minor} = \ln(a/d_0) \quad \epsilon_{major} = \ln(b/d_0) \quad (1)$$





به مش بندی ریز در تمام قسمت‌ها ندارند. ورق به صورت یک جسم تغییر شکل پذیر با استفاده از المان پوسته دارای چهار نقطه انتگرال گیری و با ضخامتی برابر ضخامت ورق مدل شده است.



شکل ۷: مدل ناکازیمما

در این مدل در مرحله اول ورق بین قالب و ورق گیر ثابت شده و در مرحله دوم ورق، ورق گیر و قالب ثابت شده و سنبه در جهت عمود بر ورق حرکت کرده تا موجب تغییر شکل در ورق شود. در مرحله دوم مقدار جابجایی سنبه ادامه دارد تا نیروی پانچ افت کند. در شرایط واقعی یک ناهمگنی در ماده بوده که موجب ایجاد گلوئی موضعی و افت نیرو پانچ شده است. در این مدل شیار مدل مارشینیاک-کوزینسکی (ناهمگنی موجود در ماده) در هر یک از نمونه‌های آزمون ناکازیمما طراحی شده و طی ۱۰ مرحله از ۰ تا ۹۰ درجه دوران داده شده است. زاویه‌ای که کرنش‌های حدی در منطقه سالم کوچک‌تر بوده یک نقطه از نمودار حد شکل‌دهی را حاصل می‌کند. در این مدل گلوئی موضعی زمانی رخ می‌دهد که نیرو پانچ افت می‌کند.

#### ۴-۲- مدل تخت

در این مدل مطابق شکل ۸ ورق مربعی تغییر شکل پذیر با ابعاد ۱۸۰×۱۸۰ میلی‌متر و ضخامت ۱/۴۵ میلی‌متر طراحی و تحت نسبت‌های مختلف بارگذاری قرار داده می‌شود. این نسبت‌های مختلف بارگذاری از طریق ایجاد قید جابجایی در وجوه جانبی ورق، حاصل می‌شود.

در این مدل جهت ایجاد نسبت بارگذاری، چهار وجه ورق به ترتیب در جهات،  $U_A$  در جهت  $X$ ،  $U_C$  در جهت  $-X$ ،  $U_B$  در جهت  $Y$  و  $U_D$  در جهت  $-Y$ . برای ایجاد نسبت بارگذاری کرنش صفحه‌ای،  $U_B$  در جهت  $Y$ ،  $U_D$  در جهت  $-Y$  و  $U_A=U_C=0$  است. در این مدل جهت ایجاد نسبت بارگذاری کشش دو محوره،  $U_A$  در جهت  $-X$ ،  $U_C$  در جهت  $X$ ،  $U_B$  در جهت  $Y$  و  $U_D$  در جهت  $-Y$  است.

$$R_{11} = R_{13} = R_{23} = 1 \quad (9)$$

$$R_{22} = \frac{r_{90}(r_0 + 1)}{r_0(r_{90} + 1)} \quad (10)$$

$$R_{33} = \frac{r_{90}(r_0 + 1)}{(r_{90} + r_0)} \quad (11)$$

$$R_{12} = \frac{3(r_0 + 1)r_{90}}{\sqrt{(r_{90} + r_0)(2r_{45} + 1)}} \quad (12)$$

ضرایب ناهمسانگردی که با استفاده از آزمون کشش به دست آمده و تانسور  $R_{ij}$  به صورت رابطه (۱۳) حاصل می‌شود.

$$[R_{ij}] = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ \vdots & R_{22} & R_{23} \\ SYM & \dots & R_{33} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 1.271 & 1 \\ \vdots & 0.987 & 1 \\ SYM & \dots & 1.325 \end{bmatrix}$$

#### ۳-۲- رابطه سخت‌شوندگی

رابطه تنش-کرنش در منطقه پلاستیک با استفاده از قانون هولمن که مطابق رابطه (۱۵) است، مدل شده است:

$$\sigma_e = K(\epsilon_e)^n \quad (15)$$

$\sigma_e$  تنش سیلان،  $\epsilon_e$  کرنش مؤثر،  $K$  ضریب کار سختی و  $n$  توان کارسختی است. گفتنی است در شبیه‌سازی‌ها از سخت‌شوندگی همگن استفاده شده است.

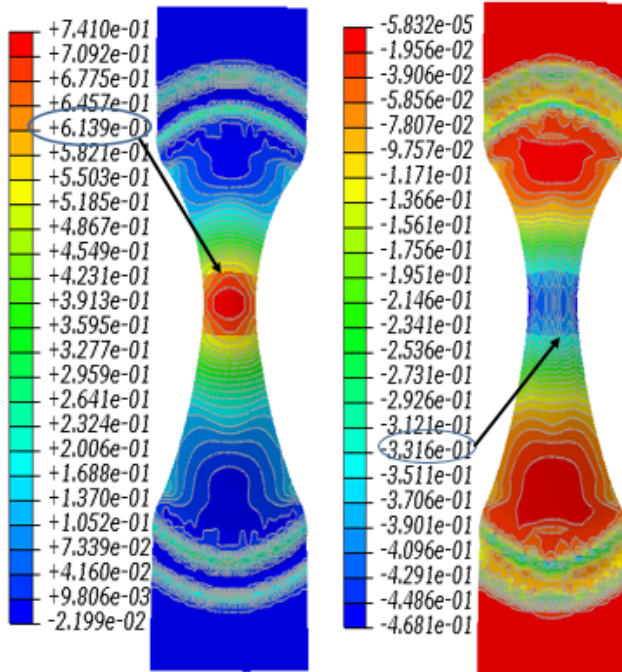
#### ۴- شبیه‌سازی المان محدود

در این پژوهش با استفاده از دو مدل المان محدود که معیار گلوئی مارشینیاک-کوزینسکی در آن‌ها گنجانده شده نمودار حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده است. در مدل اول آزمون ناکازیمما شبیه‌سازی شده و در مدل دوم تئوری مارشینیاک-کوزینسکی شبیه‌سازی می‌شود. در تحلیل المان محدود برای تشخیص زمان گلوئی موضعی از نمودار افت نیرو استفاده شده است. در تحلیل اول اندازه مش را آن قدر کوچک کرده تا نمودار افت نیرو ثابت بماند و ابعاد مش مطلوب حاصل شود که ۲ میلی‌متر است.

#### ۴-۱- مدل ناکازیمما

این مدل متشکل از یک سنبه کروی، ورق گیر، قالب و ورق مطابق شکل ۷ است. این مدل بر اساس آزمون استاندارد ناکازیمما برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی ورق ساخته شده است. از آنجایی که تغییر شکل سنبه، قالب و ورق گیر در حین فرایند ناچیز است به صورت صلب مدل شده‌اند و به دلیل آنکه به‌عنوان جسم صلب در نظر گرفته شده‌اند نیازی

$(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)$ ، در شرایطی که کرنش‌های حدی در مدل المان محدود و آزمون کشش یکسان شده ارائه شده است به نحوی که کرنش اصلی کوچک  $(\varepsilon_2)$  و کرنش اصلی بزرگ  $(\varepsilon_1)$  است.



شکل ۹: کانتور کرنش در شرایط کالیبره شده مد کشش

- ضریب نقص که در مرحله قبل حاصل شد را در ورق با عرض‌های مختلف که بیان‌گر مدهای مختلف تغییر شکل (نسبت تنش‌های متفاوت) است ایجاد کرده و شیار را دوران داده و الباقی نقاط FLD به دست آورده شده است.
- بعد از این مراحل ابعاد ضریب نقص مدل مارشینیاک-کوزینسکی به دست آمده و در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴: ابعاد شیار مدل مارشینیاک-کوزینسکی

عرض شیار	ضخامت شیار	ضریب نقص ( $f$ )
۹/۵ mm	۱/۴۳۶۹۵ mm	۰/۹۹۱ mm

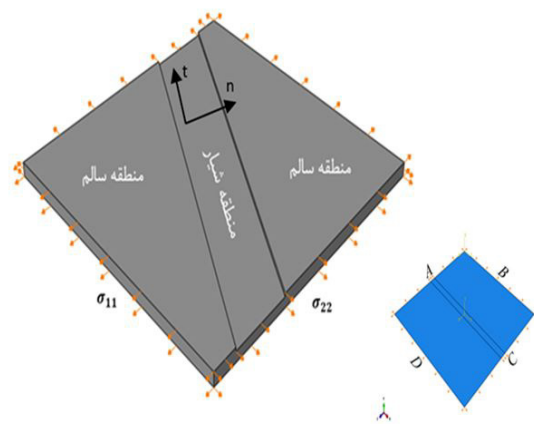
قابل ذکر است همین ابعاد شیار برای مدل تخت نیز استفاده شده است.

## ۵- نتایج

پس از به دست آوردن ابعاد شیار مدل مارشینیاک-کوزینسکی مدل ناکازیمما و تخت شبیه‌سازی می‌شود. در هر دو مدل المان محدود ۸ نقطه از نمودار حد شکل‌دهی به دست آورده شده است. در استخراج نمودار حد شکل‌دهی تجربی از ۶ نمونه استفاده شده است.

### ۵-۱- نتایج آزمون تجربی ناکازیمما

بعد از آماده‌سازی نمونه‌ها سطح آن‌ها با دستگاه حک الکتروشیمیایی



شکل ۸: مدل تخت

شیار مدل مارشینیاک-کوزینسکی در این مدل ایجاد و در هر نسبت بارگذاری، شیار را از ۰ تا ۹۰ درجه طی ۱۰ مرحله دوران داده و برنامه را اجرا کرده، زاویه‌ای که کمترین کرنش‌های حدی را دارد انتخاب شده و کرنش‌هایش یک نقطه از نمودار حد شکل‌دهی را حاصل می‌کند. در این مدل گلوئی موضعی هنگامی رخ می‌دهد که نسبت کرنش منطقه ناسالم به منطقه سالم ۱۰ شود.

### ۴-۳- به دست آوردن ضریب نقص مدل مارشینیاک-کوزینسکی

در قسمت ۲-۲-۲ کرنش‌های حدی برای حالت کشش تک‌محوره که با استفاده از آزمون کشش تک‌محوره به دست آمده ارائه شده است. در این قسمت ضریب نقص و ابعاد شیار مدل مارشینیاک-کوزینسکی حاصل می‌شود و برای این منظور مراحل زیر به ترتیب انجام شده است.

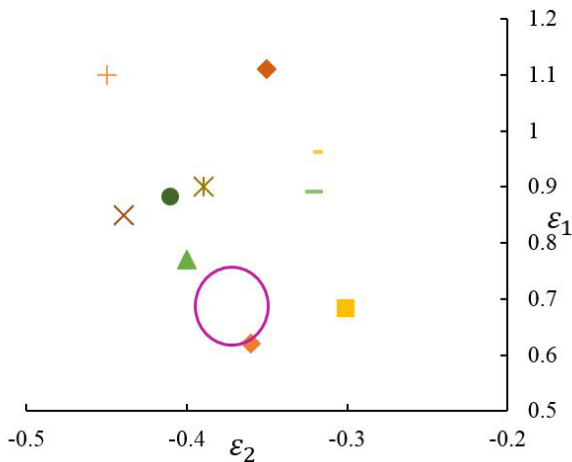
- ابتدا از طریق انجام آزمون کشش ساده کرنش‌های حدی برای نسبت بارگذاری کشش تک‌محوره به دست آورده شده است (بخش ۲-۲-۲).

- نمونه نسبت بارگذاری کشش تک‌محوره را بدون شیار در نظر گرفته و در لحظه افت نیرو پانچ عرض شیار مشخص شده است (فاصله المان‌هایی که کرنش‌هایی نزدیک به کرنش‌های نسبت کشش، تا محور تقارن مدل، عرض شیار را تعیین می‌کند).

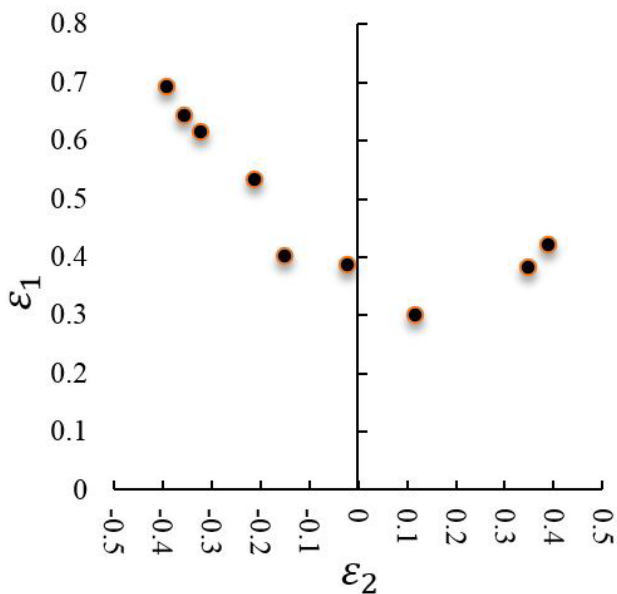
- شیار با عرض ۹/۵ میلی‌متر در زوایای ۰، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۹۰ در نسبت بارگذاری کشش تک‌محوره در مدل المان محدود طراحی شده است.

- در این مرحله ضریب نقص مدل مارشینیاک-کوزینسکی در نسبت بارگذاری کشش تک‌محوره بسیار کم در نظر گرفته شده ( $f=0/8$ ) و از این طریق زاویه بحرانی شیار برای این حالت تنش حاصل شده است. زاویه‌ای به‌عنوان زاویه بحرانی انتخاب شده که در زمان گلوئی شدن کمترین کرنش حدی را در منطقه سالم دارد.
- حال  $f$  مرحله قبل را در نمونه نسبت بارگذاری کشش تک‌محوره افزایش داده تا کرنش‌های حدی منطقه سالم در مدل المان محدود و آزمون کشش یکسان شود. در شکل ۹ کانتور کرنش‌های اصلی

- سی درجه × بیست درجه ▲ ده درجه ■ صفر درجه ◆
- چهل درجه \* پنجاه درجه ● شصت درجه + هفتاد درجه -
- نود درجه ◆ هشتاد درجه -



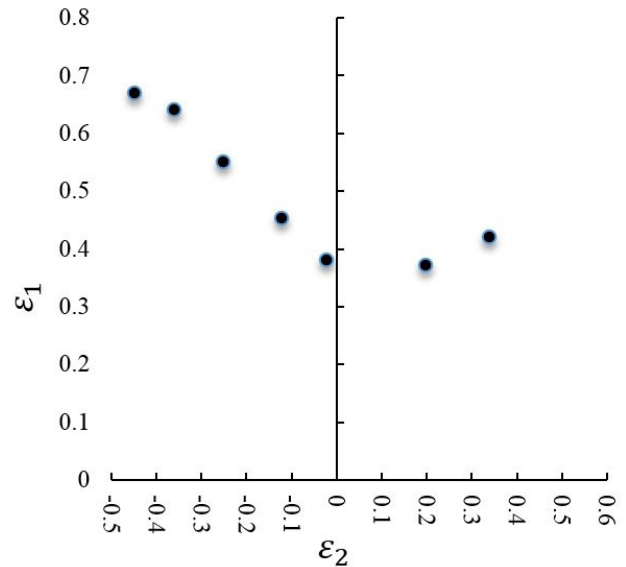
شکل ۱۱: کرنش‌های حدی برای زوایای شیار در نمونه با عرض ۱۰۰



شکل ۱۲: نمودار حد شکل‌دهی مدل المان محدود ناکازیما

سالم کمتر بوده یک نقطه از نمودار حد شکل‌دهی را حاصل می‌کند. در این مدل، گلوئی موضعی زمانی رخ می‌دهد که نرخ کرنش منطقه ناسالم به سالم، ۱۰ شود. در این مدل نمودار حد شکل‌دهی از طریق ۱۱ مسیر بارگذاری به دست آورده شده و در شکل ۱۴ نشان داده شده است. در شکل ۱۵ کانتور کرنش و نحوه تعیین گلوئی موضعی برای مد کرنش صفحه‌ای ارائه شده است. در این مدل در نسبت‌های بارگذاری کمتر از ۰/۲۵- این معیار گلوئی موضعی ارضاء نمی‌شود به عبارت دیگر گلوئی موضعی در ورق دیده نمی‌شود.

شبکه‌بندی شده است. نمونه‌ها بین ورق‌گیر و قالب قرار گرفته و پانچ حرکت کرده و هنگامی که در سطح ورق گلوئی موضعی یا پارگی مشاهده گردید فرایند متوقف شده و کرنش شبکه‌های سالم که بیشترین کرنش را تحمل کرده‌اند استخراج می‌شود. در شکل ۱۰ نمودار حد شکل‌دهی تجربی ارائه شده است.



شکل ۱۰: نمودار حد شکل‌دهی تجربی برای ورق St14

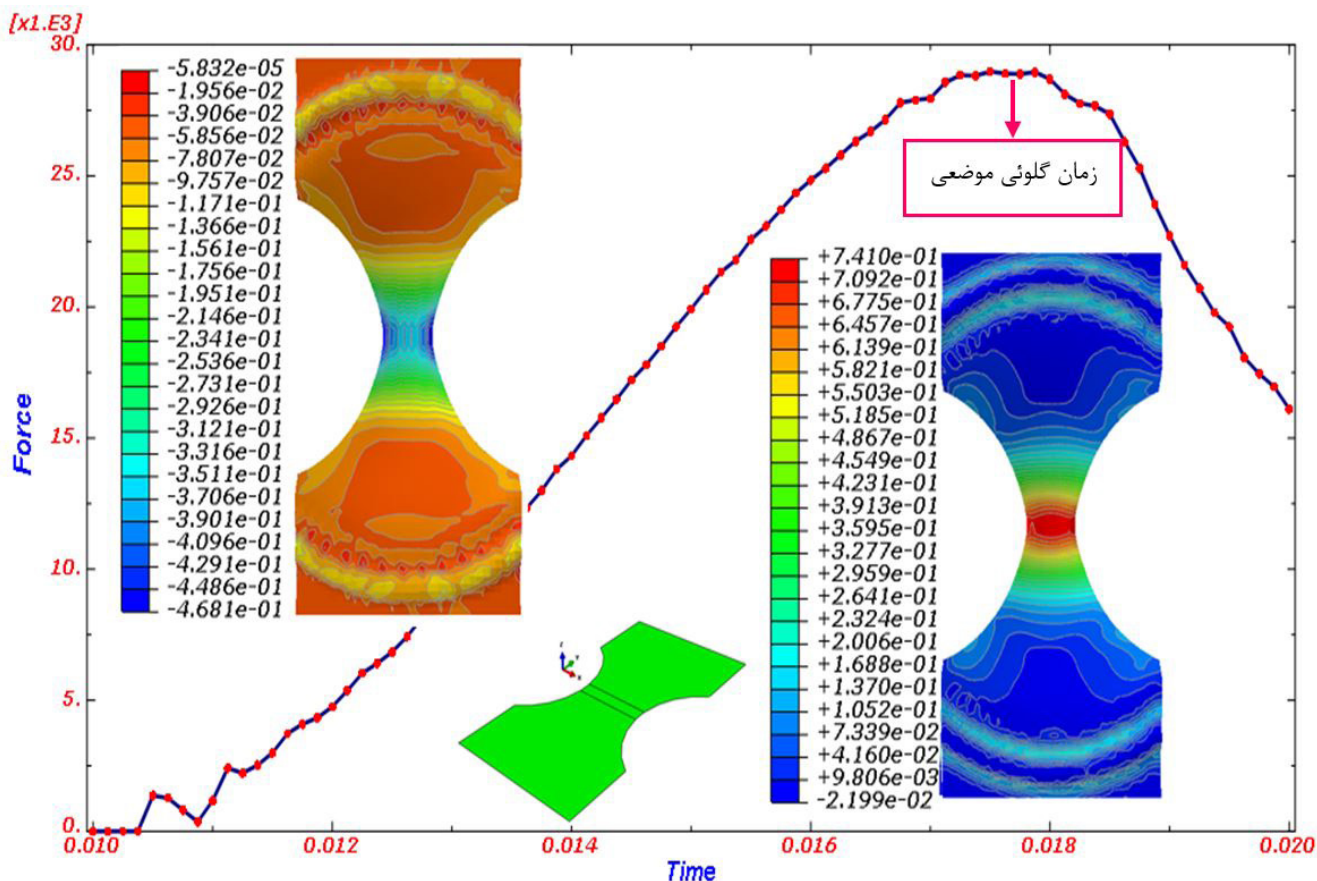
### ۲-۵- نتایج مدل المان محدود ناکازیما

در این مدل شیار مارشینیاک-کوزینسکی در نمونه‌های آزمون ایجاد شده و از ۰ تا ۹۰ درجه طی ۱۰ مرحله دوران داده شده و تحلیل انجام می‌شود. در لحظه افت نیرو کرنش‌های اصلی بزرگ و کوچک در منطقه سالم برای هر تحلیل استخراج شده و نقطه‌ای که در سطح پایین‌تری قرار می‌گیرد یک نقطه از نمودار حد شکل‌دهی را تشکیل می‌دهد. در شکل ۱۱ کرنش‌های حدی برای نمونه با عرض ۱۰۰ در ۱۰ زاویه شیار ارائه شده است. زاویه شیار صفر درجه کمترین کرنش حدی را دارد. کانتور کرنش و نمودار افت نیرو برای نمونه با عرض ۱۰۰ و زاویه شیار صفر (زاویه بحرانی شیار) در شکل ۱۳ آورده شده است.

در شکل ۱۰ نقطه‌ای که مشخص شده یک نقطه از نمودار حد شکل‌دهی را تشکیل می‌دهد و همین روند برای هشت نمونه دیگر نیز انجام شده و نمودار حد شکل‌دهی مدل المان محدود ناکازیما حاصل و در شکل ۱۲ ارائه شده است.

### ۳-۵- نتایج المان محدود مدل تخت

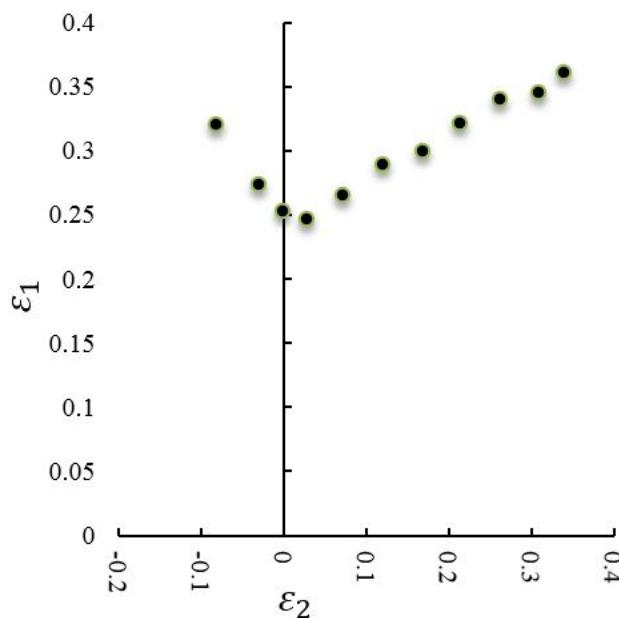
در این مدل مطابق تئوری مارشینیاک-کوزینسکی یک ورق مربعی طراحی و شیاری با عرض ۹/۵ میلی‌متر و ضریب نقص ۰/۹۹۱ در ورق ایجاد کرده و نسبت‌های مختلف بارگذاری از طریق قید جابجایی به وجوه ورق اعمال شده است. شیار برای هر حالت بارگذاری از ۰ تا ۹۰ درجه طی ۱۰ مرحله دوران داده شده و زاویه‌ای که کرنش‌های حدی آن در منطقه



شکل ۱۳: کانتور کرنش و نمودار افت نیرو برای نمونه با عرض ۱۰۰ و زاویه شیار صفر

تجربی ناکازیمما دارد.

علت اختلاف نتایج المان محدود تخت و نتایج تجربی را می‌توان خمش و شرایط مرزی دانست. در مدل ناکازیمما ورق بین قالب و ورق گیر ثابت شده و با یک سنبه در آن تغییر شکل ایجاد شده تا در ورق پارگی دیده شود و سپس کرنش‌های حدی حاصل می‌شود ولی در مدل تخت تغییر شکل درون صفحه‌ای است. در مدل ناکازیمما توسط سنبه تغییر شکل برون صفحه‌ای ایجاد می‌شود که موجب اعمال خمش در ورق شده است. با توجه به شکل ۱۶ مشخص است تغییر شکل برون صفحه‌ای موجب بهبود شکل‌پذیری شده است. عاصم پور و همکاران [۱۸] نشان دادند تنش نرمال ( $\sigma_{33}$ ) موجب بالا رفتن نمودار حد شکل‌دهی شده و با توجه به اینکه این درایه تانسور تنش موجب اعمال بارگذاری برون صفحه‌ای می‌شود درستی نتیجه حاصله را توجیه می‌کند. در مدل المان محدود نوع المان مورد استفاده S4R بوده، درجه آزادی در این المان خمش و شرایط تنش مطابق رابطه (۱۴) (تنش صفحه‌ای) است. بنابراین علت اختلاف نتایج مدل تخت با نتایج آزمون ناکازیمما عامل اصلی خمش است.



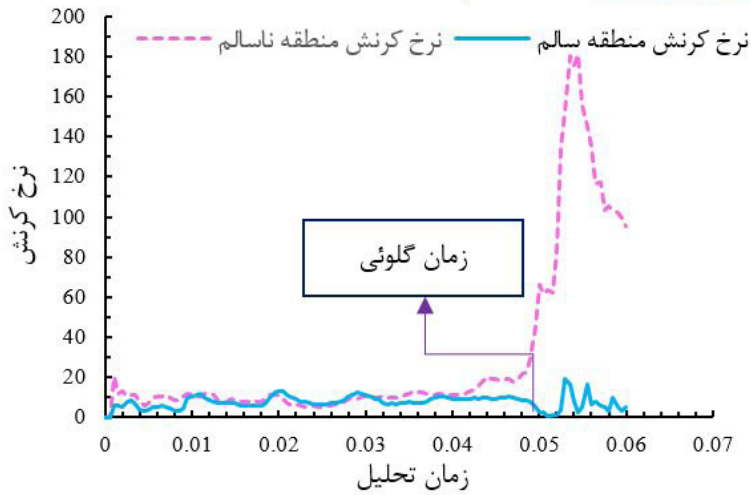
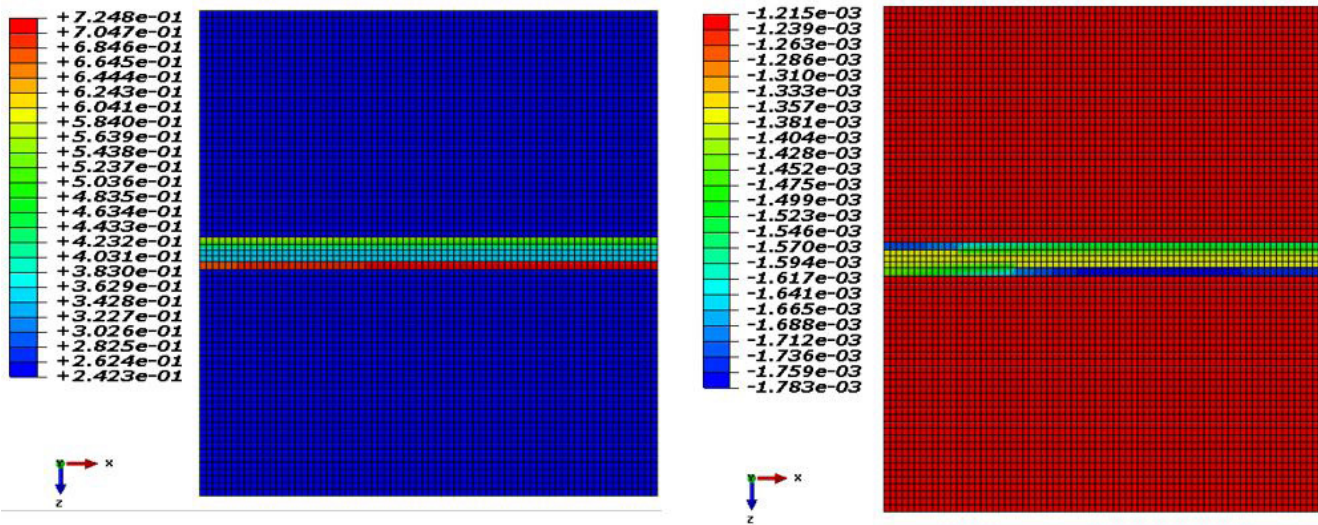
شکل ۱۴: نمودار حد شکل‌دهی مدل تخت

#### ۴-۵- مقایسه نتایج المان محدود و آزمون تجربی

در این بخش نمودار حد شکل‌دهی به دست آمده با مدل‌های المان محدود و تجربی مقایسه و در شکل ۱۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۶، مدل المان محدود ناکازیمما نتایجی نزدیک به نتایج آزمون

$$[\sigma_{ij}] = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \vdots & \sigma_{22} & 0 \\ SYM & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

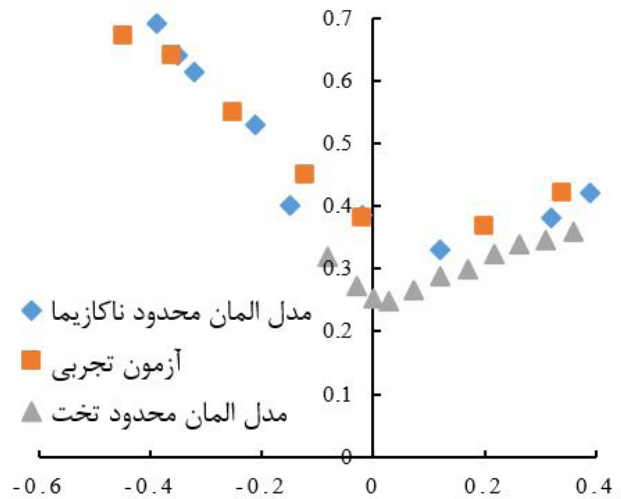




شکل ۱۵: کانتور کرنش و نحوه تعیین زمان گلوله‌ی موضعی برای مد کرنش صفحه‌ای

مدل مارشینیاک-کوزینسکی استفاده شده است. نتایج این تحقیق عبارت است از:

- نتایج مدل المان محدود ناکازیمان با نتایج آزمون تجربی ناکازیمان مطابقت بالایی داشته است.
- در مدل‌های المان محدود برای تشخیص زمان گلوله‌ی موضعی به معیاری نیاز است که در این پژوهش معیار گلوله‌ی مارشینیاک-کوزینسکی در مدل المان محدود ناکازیمان گنجانده و یک روش مناسب برای تعیین زمان گلوله‌ی موضعی است.
- نتیجه بسیار مهم دیگر این تحقیق این بوده که آزمون تجربی ناکازیمان برای بررسی درستی نتایج مدل مارشینیاک-کوزینسکی در شرایط تنش صفحه‌ای مناسب نبوده است.
- علت اختلاف در نتایج المان محدود تخت، نتایج المان محدود ناکازیمان و نتایج تجربی، خمش و شرایط مرزی است.
- با استفاده از مدل المان محدود ناکازیمان گستره کاملی از نمودار حد شکل‌دهی پیش‌بینی شده است. در مدل تخت در نسبت بارگذاری  $(\sigma_{11}/\sigma_{22})$  کمتر از ۰/۲۵- گلوله‌ی موضعی مشاهده نشده است.



شکل ۱۶: نمودار حد شکل‌دهی مدل تخت، ناکازیمان و تجربی

## ۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نمودار حد شکل‌دهی با دو مدل المان محدود پیش‌بینی و با نتایج آزمون تجربی ناکازیمان مقایسه شده است. در مدل‌های المان محدود برای به دست آوردن لحظه گلوله‌ی موضعی از

## ۷- مراجع

- diagram in the digital environment", *Journal of Mechanical Engineering*, 51, pp. 330-345.
- [10] Pepelnjak, T., Petek, A., and Kuzman, K., 2005. "Analysis of the forming limit diagram in digital environment", *Advanced Material Research*, 6-8, pp. 697-704.
- [11] Brun, R., Chambard, A., Lai, M. and de Luca, P., 1999. "Actual and virtual testing techniques for a numerical definition of materials", Proc NUMISHEET'99, Besançon France, pp. 393- 398.
- [12] Hashemi R., Assempour, A., Masoumi E., 2009. "Implementation of the forming limit stress diagram to obtain suitable load path in tube hydroforming", *Materials and Design*, 30, Issue 9, pp. 3545-3553.
- [13] Marciniak, Z. and Kuczynski, K., 1967. "Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal", *International Journal of Mechanical Science*, 9, pp. 609-620.
- [14] "Metals Test Methods and Analytical Procedures, Annual Book of ASTM Standards", ASTM-E8, West Conshohocken, PA Volume 03.01, 2000.
- [15] "Standard Test Method for Determining Forming Limit Curves", *ASTM E22*, pp. 18 - 02, 3, no. 1, 2008.
- [16] Hill, R., 1948. "A Theory of Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals", Proc. Roy. Soc. Lond., 193A, pp. 197-281.
- [17] "Abaqus User Guide, ABAQUS Analysis User's Manual". 1, pp. 130-147, 2013.
- [18] A. Assempour, H. Khakpour Nejadkhaki, R. Hashemi, 2010. "Forming Limit Diagrams with the Existence of Through Thickness Normal Stress", *Computational Materials Science*, 48, pp. 504-508.
- [1] Hashemi R., Ghazanfari A., Abrinia K., Assempour A., 2013. "The effect of the imposed boundary rate on the formability of strain rate sensitive sheets using the M-K method", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 22, issue 9, pp. 2522-2527.
- [2] Hecker, S.S., 1972. "A simple forming limit curve technique and results on aluminum alloys, sheet metal forming and formability", Proceedings of the 7th Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group, Amsterdam, 5.1-5.8.
- [3] Keeler, S.P. and Backofen, W.A., 1963. "Plastic instability and fracture in sheets stretched over rigid punches", *Transactions of the ASM*, 56.
- [4] Goodwin, G.M., 1968. "Application of strain analysis to sheet metal forming in the press shop", *SAE paper*, No. 680093.
- [5] Swift, H.W., 1952. "Plastic instability under plane stress", *Journal of Mechanics and Physics Solids*, 1, pp. 1-18.
- [6] Hill, R., 1952. "On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets", *Journal of Mechanics and Physics Solids*, 1, pp. 19-30.
- [7] Takuda, H., Mori, K., and Hatta, N., 1999. "The application of some criteria for ductile fracture to the prediction of the forming limit of sheet metals", *J. Mat. Proc. Tech.*, 95, pp. 116-121.
- [8] Storen, S., and Rice, J.R., 1975. "Localized Necking in Thin Sheets", *J. Mech. Phys. Solids*, 23, pp. 421-441.
- [9] Petek, A., Pepelnjak, and T., Kuzman, K., 2005. "An improved method for determining forming limit