

پیش بینی تأثیر تنش عمودی بر نمودار های حدشکل دهی

حمید خاکپور^۱، رامین هاشمی^۲ و احمد عاصم پور^{۳*}

چکیده

مطالعات تئوری در زمینه تحلیل حد تحملیک ورق فلزی در مقابل کرنش های گوناگون، همگی به تحلیل نمودارهای حدشکل دهی برمی گردد. از آن جا که وقوع پدیده گلوبی شدگی در برخی از فرایندها مانند هیدروفرمینگ در نواحی از ماده فلزی رخ می دهد که افزون بر وجود تنش صفحه ای، تنش عمودی نیز وجود دارد، بنابراین، در نظر گرفتن فرض تنش صفحه ای برای تحلیل چنین فرایندهایی مناسب نمی باشد. بنابراین، در این پژوهش، پیش بینی نمودارهای حدشکل دهی با وجود تنش عمودی مدنظر قرار گرفته و اثر تنش عمودی روی نمودارهای یاد شده مورد بررسی قرار گرفته است. برای ترسیم نمودارهای حدشکل دهی با وجود تنش عمودی مدل مارشینیاک و کوزینسکی تعمیم یافته و برای بدست آوردن متغیرهای این مدل، عددی نیوتن رافسون مورداستفاده قرار گرفته است. ساختار الگوریتم ارائه شده برای پیش بینی نمودار حد شکل دهی به گونه ای است که امکان بکارگیری تابع تسلیم ون میزز و هیل ۱۹۴۸ و روابط سخت کاری گوناگون وجود دارد. نتایج بدست آمده نشان می دهند که با افزایش مقدار تنش عمودی فشاری، نمودارهای حدشکل دهی به سمت بالا جابه جا می شوند و حد شکل پذیری ماده افزایش می یابد. برای درک بهتر اثر وجود تنش عمودی، افزایش کرنش حدی در مورد شکل دهی کرنش صفحه ای به گونه کمی مورد بررسی قرار گرفته است. اعتبار نتایج بدست آمده با داده های تجربی چاپ شده در مقاله های دیگران مورد سنجش قرار گرفته است.

واژه های کلیدی : نمودار حد شکل دهی - تنش عمودی - مدل سازی.

۱- کارشناس ارشد، قطب رباتیک طراحی و اتوماسیون، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

۳- استاد، قطب رباتیک طراحی و اتوماسیون، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

*- نویسنده مسئول مقاله: assem@sharif.edu

پیشگفتار

امروزه فرآیندهای شکل دهی ورق های فلزی به دلیل صرفه اقتصادی در تولید انبوه در صنایع گوناگون کاربرد فراوانی پیدا کرده است. از سوی دیگر، ورق های مورد استفاده معمولاً شکل پذیری محدودی دارند. لذا، بررسی این فرآیندها جهت اجتناب از ایجاد قطعات معیوب و بهینه سازی عملیات تولید، دارای اهمیت می باشد. بنابراین، مطالعه جامع فرآیندهای شکل دهی و فاکتورهای محدودکننده آنها مهم است.

مطالعات تئوری در زمینه تحلیل حد تحملیک ورق فلزی در مقابل کرنش های گوناگون، به تحلیل منحنی های حدشکل دهی برمی گردد. استخراج منحنی های حدشکل دهی به صورت تجربی مستلزم آزمایش های دقیق و صرف زمان و هزینه زیاد می باشد. بدین لحاظ پژوهش های گسترده ای بمنظور محاسبه و ترسیم این منحنی ها با استفاده از روش های تحلیلی صورت گرفته است.

بوتوک و همکارانش [۱] برنامه ای انعطاف پذیر برای گلویی شدن روش مارشینیاکوکوزینسکی ارائه دادند. این برنامه روش حلی بر پایه روش عددی نیوتن - رافسو ندارد که از آن برای بدست آوردن متغیرهای موجود در روش مارشینیاکوکوزینسکی استفاده شده است. آنها در روش نیوتن، فقط پارامترهای جزء کرنش متوسط ناحیه شیار دار و تنش در جهت شیار را متغیرهای نامعلوم این روش قرار دادند. این دو پارامتر، بخشی از پارامترهای نامعلوم ناحیه شیاردار هستند. ذکر این نکته ضروری است که اگر در دیگر پارامترها در روش نیوتن به عنوان متغیر وارد نشود، باعث ایجاد خطا می گردد.

مشکسار و منصور زاده [۲]، منحنی حدشکل دهی ورق A13105 را به صورت تجربی تعیین کردند. در این کار، تمامی نمونه های آزمایش در جهت رولینگ آماده شده و پیش از تست آنیل شدند. منحنی ها برای دو حالت درون صفحه ای و خارج از صفحه به ترتیب بر اساس روش مارشینیاکوکوزینسکی و روش کشش اریچسن با استفاده از پانچسر کروی بدست آمدند. آنها اثر روانکاری را بر کرنش حدی و مکان شکست بررسی کردند.

عاصم پور و همکاران [۳]، با ترکیب مدل M-K و روش گرادیان کرنش، روشی برای پیش بینی منحنی حدشکل دهی در ورق های فلزی ارائه کردند. در این روش، ضخامت قسمت شیاردار به صورت تابعی کسینوسی تعریف شده است. مشکل حساسیت حدود شکل دهی به ضریب ناهمگنی اولیه که در مدل رایج M-K وجود دارد، در صورت استفاده از این مدل تا حدود زیادی برطرف می گردد. در این کار با مقایسه نتایج تجربی و منحنی های تئوری پیش بینی شده به وسیله روش های گوناگون نشان داده شده است که این روش، روشی موفق است.

شاکری و همکاران [۴] جهت تعیین تئوری منحنی های حدشکل دهی یک مدل گلویی موضعی ارائه کردند. در این مدل از تئوری تسلیم ناهمسانگرد درجه دو هیل استفاده شده و رفتار کرنش-سختی و حساسیت به نرخ کرنش برای ورق در نظر گرفته شده است. از ترکیب آزمایش های کشش تک محوری نوارهای برش دار و اتساع توسط قالب و سنبه نیم کروی جهت تعیین تجربی منحنی های حد شکل دهی استفاده کردند و اثر مسیر کرنش بر منحنی حدشکل دهی را به صورت تئوری و تجربی بررسی کردند.

هوانگ و همکاران [۵]، با استفاده از آزمایش بالچ، منحنی حدشکل دهی تیوب AA6011 را بدست آوردند. آنها با استفاده از مسیر کرنش بدست آمده به کمک شبیه سازی اجزاء محدود، فشار داخلی و بارگذاری محوری را به گونه ای کنترل کردند که در قسمت برآمده تیوب نسبت کرنش ها ثابت بماند. البته، آنها در تحلیل ناپایداری پلاستیک، از فرض برقراری حالت تنش صفحه ای استفاده کردند و اثر توان در تابع تسلیم هیل غیر درجه دوم و ناهمسانگردی عمودی را روی منحنی حد شکل دهی مورد بحث قرار دادند، اما اشکال مهمی که به بیش تر کارهای انجام شده در این زمینه وارد است، استفاده از فرض برقراری حالت تنش صفحه ای در استخراج منحنی های حدشکل دهی است. هر چند فرآیندهای بسیاری وجود دارند که استفاده از این فرض در آنها منطقی است، اما در فرآیندهایی نظیر هیدروفرمینگ، با توجه به فشار بالای سیال، کاربرد این فرض چندان منطقی نمی باشد. لذا، با توجه به اهمیت چنین فرآیندهایی، مناسب است که

تحلیل تئوری

در این بخش به کوتاهی، به الگوریتم محاسبه کرنش‌های حدی در بارگذاری تناسبی اشاره می‌شود. برای محاسبه این کرنش‌ها، مدل مارشینیاک-کوزینسکی [۹] انتخاب شده است. در این مدل، فرض می‌شود شیاری خیلی نازک در ورق وجود دارد که موجب ایجاد گلوبی در آن می‌شود (شکل ۱). منطقه داخل شیار b (منطقه شیاردار) و بیرون از شیار a (منطقه سالم) نامیده می‌شود که منطقه سالم تحت کرنش‌های تناسبی می‌باشد. افزون بر آن، فرض می‌شود که کرنش در امتداد شیار در دو ناحیه با هم برابرند. همچنین، در حین کشش نسبت کرنش‌ها (نسبت کرنش کمینه به کرنش بیشینه) خارج از شیار ثابت می‌ماند، در حالی که این نسبت درون شیار کاهش می‌یابد.

مشخصات ماده که در تحلیل الگوریتم استفاده می‌شود، شامل n توان سخت‌کاری، K ضریب استحکام ماده، f_0 ضریب ناهمگنی اولیه، a نسبت تنش‌ها در منطقه سالم و مقادیر T_{10} ، T_{45} و T_{90} ضرایب ناهمسانگردی نسبت به محور نورد می‌باشند. تمامی کرنش‌ها در مرحله نخست تحلیل صفر هستند و برای شروع محاسبه مقداری برای $d\bar{\epsilon}_a$ فرض می‌شود (۰,۰۰۱). محاسبات ابتدا برای منطقه سالم و پس از انتقال داده‌های مورد نیاز از منطقه سالم، برای منطقه شیاردار انجام می‌شود.

در این پژوهش، در مدل مارشینیاک و کوزینسکی فرض می‌شود که یک شیار خیلی نازک در ورق وجود دارد. همچنین، فرض می‌شود که تنش عمودی برای هر دو منطقه یکسان بوده و در هر دو منطقه به عنوان یکی از تنش‌های اصلی باشد. افزون بر این، فرض می‌شود که منطقه سالم تحت کرنش‌های تناسبی است و کرنش در امتداد شیار در دو ناحیه با هم برابر است.

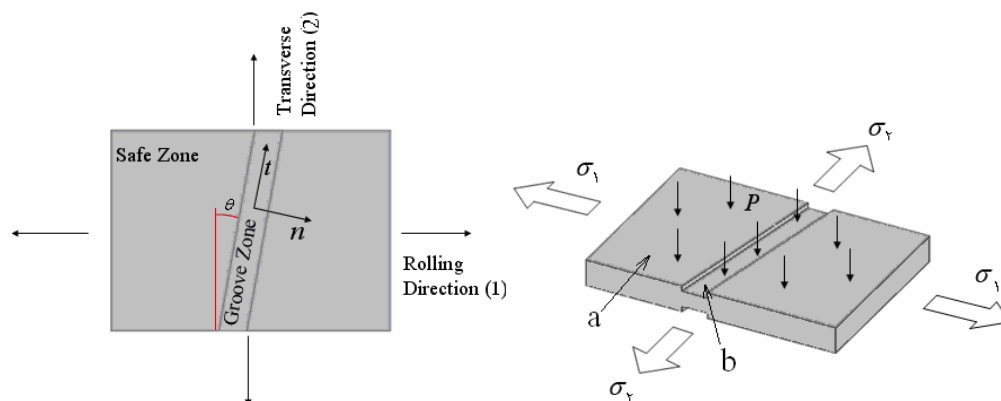
منحنی‌های حد شکل‌دهی با در نظر گرفتن تنش عمودی محاسبه شوند.

بروک^۱ گزارش می‌دهد که در فرآیندهای هیدروفرمینگ مربوط به صنعت اتومبیل، گستره فشار سیال تقریباً از ۴۸ تا ۲۷۵ مگاپاسکال می‌رسد [۶]. لذا، تحلیل نمودارهای حد-شکل دهی با در نظر گرفتن وجود تنش عمودی می‌بایست مورد توجه قرار گیرد. کارهای بسیار اندکی در زمینه منحنی‌های حد شکل دهی وجود دارد که اثر تنش عمودی را در نظر گرفته باشد. از جمله به کارهای اسمیت و همکاران [۶] و آلوود و شولر [۷] می‌توان اشاره کرد. تفاوت این کار پژوهشی با کارهای انجام شده پیشین [۶ و ۷]، امکان در نظر گرفتن تنش عمودی به صورت عددی و کاملاً مشخص در برنامه کامپیوتری نوشته شده می‌باشد. در کارهای دیگران اثر تنش عمودی به صورت نسبی (نسبت تنش عمودی به تنش اصلی در نقاط گوناگون) نشان داده شده است.

در این مقاله، یک متدولوژی برای تعیین نمودارهای حد شکل دهی زیر بارگذاری‌های تناسبی^۲، با در نظر گرفتن اثر تنش عمودی ارائه شده است. برای این کار، از توابع تسلیم فون میزز و هیل ۴۸ [۸] با فرض همسانگردی صفحه‌ای استفاده شده است. برای وارد کردن اثر تنش عمودی تغییراتی در مدل معروف مارشینیاک و کوزینسکی [۹] داده شده است. تغییرات لحاظ شده به کوتاهی عبارتند از: تغییر تابع تسلیم به حالت کلی‌تر و همچنین، تغییر در رابطه انرژی در منطقه شیار در مدل یاد شده. اعتبار نتایج بدست آمده با داده‌های تجربی چاپ شده در مقاله‌های دیگران مورد سنجش قرار گرفته. سپس تأثیر وجود تنش عمودی بر نمودارهای حد شکل دهی به صورت تئوری مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که افزایش تنش عمودی فشاری سبب افزایش حد شکل‌پذیری ورق‌های فلزی می‌شود. بنابراین، در نظر گرفتن اثر این پارامتر در طراحی فرایندهایی نظیر هیدروفرمینگ که در آن‌ها مقدار تنش عمودی فشاری بالاست ضروری می‌باشد.

¹-Brooke

²- Proportional loading



شکل ۱- مدل مارشینیاک کوزینسکی تعمیم یافته که در الگوریتم بدست آوردن نمودارهای حد شکل دهی با وجود تنش عمودی فشاری استفاده شده است.

ماتریس دوران T بدست می‌آید. با داشتن مقادیر جزء کرنش، مقدار خود کرنش‌ها را می‌توان بدست آورد:

$$e_{ij}|_{new} = e_{ij}|_{old} + de_{ij} \quad (3)$$

بدین ترتیب تمامی مجهولات منطقه سالم بدست می‌آیند.

محاسبه تنش و کرنش در منطقه شیاردار به سادگی منطقه سالم نیست. مجهول‌های این منطقه، مقادیر تنش و جزء کرنش‌ها هستند. مقادیر تنش شامل $\sigma_{mn}^b, \sigma_{nn}^b, \sigma_{nt}^b$ و جزء کرنش‌ها شامل $d\varepsilon_{mn}^b, d\varepsilon_{nn}^b, d\varepsilon_{nt}^b$ می‌باشند که در آن‌ها اندیس پایین نشانه راستا و اندیس بالا نشانه منطقه شیاردار است. از آن‌جا که با استفاده از قوانین سیلان مقادیر جزء کرنش $d\varepsilon_{ij}$ تابعی از $\sigma_{mn}^b, \sigma_{nn}^b, \sigma_{nt}^b$ می‌باشند، پس مجهول‌های این منطقه به $\sigma_{mn}^b, \sigma_{nn}^b, \sigma_{nt}^b$ و $d\bar{\varepsilon}_b$ کاهش می‌یابد. برای بدست آوردن این مجهول‌ها به یک سری معادله‌های کمی نیاز است. این معادله‌ها شامل معادله سازگاری و دو معادله تعادل نیروهاست. در این مقاله برای کامل‌تر شدن معادله‌ها از معادله انرژی در منطقه شیاردار استفاده شده است که البته با رابطه استفاده شده در حالت تنش صفحه‌ای اندکی متفاوت است چرا که در این‌جا به علت وجود تنش عمودی جمله حاصل ضرب تنش عمودی در جزء کرنش مربوطه نیز وارد رابطه می‌گردد:

$$(d\varepsilon_{ij} \sigma_{ij}) - d\bar{\varepsilon} \bar{\sigma}_y = 0 \quad (4)$$

که در آن تنش مؤثر ناشی از قانون سخت‌کاری را بدست می‌دهد و فرض می‌شود که تابع تسلیم به صورت ایزوتروپ منبسط شود. برای بدست آوردن مجهولات

مقادیر تنش و کرنش در منطقه سالم براحتی قابل محاسبه است چرا که در این منطقه تنش و یا کرنش برشی در راستای محورهای اصلی وجود ندارد و همه اجزای تنش و کرنش در راستای محورها مقادیر اصلی هستند. با فرض جزء کرنش معادل برای این منطقه $(d\bar{\varepsilon}_a = 0.0001)$ مقدار کرنش معادل بدست می‌آید $(\bar{\varepsilon}_{new} = \bar{\varepsilon}_{old} + d\bar{\varepsilon})$. با استفاده از قانون سخت‌کاری مقدار تنش تسلیم معادل $\bar{\sigma}_y = \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$ بدست می‌آید. حال با استفاده از مقدار از پیش فرض شده برای $a = s_y/s_x$ و σ_z و هم‌چنین، تابع تسلیم انتخابی $\bar{\sigma}_y = \bar{\sigma}(s_x, s_y, s_z, s_{xy})$ و مقدار تنش معادل بدست آمده از قانون سخت‌کاری، می‌توان تنش در راستای s_x, X را بدست آورد. با بدست آمدن s_x و a مفروض، تنش در جهت Y $(s_y = a s_x)$ نیز بدست می‌آید. چون در منطقه سالم تنش برشی در جهت محورها وجود ندارد، لذا، مولفه‌های ماتریس تنش در این منطقه بدست آمده است. برای بدست آوردن مقادیر جزء کرنش از قوانین سیلان و هم‌چنین، از ثابت ماندن حجم ماده استفاده می‌شود:

$$de_i = dl \frac{\bar{\sigma}_y}{s_i}, i = 1, 2 \quad (1)$$

$$de_{zz} \text{ or } de_3 = -de_1 - de_2 \quad (2)$$

با تشکیل ماتریس‌های تنش و جزء کرنش در جهات اصلی XYZ ، مولفه‌های آن‌ها در جهت ntz با استفاده از

$$\bar{S}_y = K(e_0 + \bar{e})^n \quad (۶)$$

اگر از تابع تسلیم فون مایز استفاده شود، با فرض عدم وجود تنش‌های برشی داریم [۱۰]:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\bar{\sigma}_y^2 \quad (۷)$$

با توجه به معلوم بودن نسبت $\alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ و همچنین، مقدار تنش عمودی σ_3 ، مقدار σ_1 بر حسب تنش معادل، چنین بدست می‌آید [۱۰]:

$$\sigma_1 = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A} \quad (۸)$$

که در آن داریم:

$$A = 1 - \alpha + \alpha^2$$

$$B = -\sigma_3(1 + \alpha) \quad (۹)$$

$$C = \sigma_3^2 - \bar{\sigma}_y^2$$

نکته قابل توجه در رابطه (۸) این است که علامت منفی پشت جذر قابل قبول نمی‌باشد زیرا در این صورت امکان منفی بودن σ_1 وجود دارد، اما در صورتی که از تابع تسلیم هیل ۴۸ استفاده شود، داریم [۱۱]:

ناحیه شیاردار، روش عددی نیوتن رافسون استفاده شده است.

محاسبات مربوط به منطقه سالم و شیاردار تا رسیدن به نقطه پارگی ادامه می‌یابد. این نقطه وقتی اتفاق می‌افتد که جزء کرنش مؤثر در منطقه شیاردار، به مقدار چشمگیری در برابر جزء کرنش مؤثر منطقه سالم برسد. در بیش‌تر پژوهش‌ها این مقدار چشمگیر، ۱۰ برابر انتخاب می‌شود ($d\bar{\epsilon}_b/d\bar{\epsilon}_a = 10$). برای شروع روش نیوتن مقدار اولیه‌ای برای زاویه θ فرض می‌شود که قائلتاً این زاویه پس از بارگذاری تغییر خواهد کرد. تغییرات مقدار θ از رابطه‌ی زیر تبعیت خواهد کرد [۱۰]:

$$tg(\theta + d\theta) = \exp[d\epsilon_1^a - d\epsilon_2^a]tg(\theta) \quad (۵)$$

محاسبات هنگام رسیدن به معیار پارگی متوقف می‌شود و کرنش‌ها $(\epsilon_1^a, \epsilon_2^a)$ در منطقه سالم به عنوان کرنش‌های حدی می‌باشند. اثبات روابط تغییر زاویه شیاردار در مدل مارشینیاک و کوزینسکی در پیوست الف آمده است.

روابط ساختاری

در این مقاله از رابطه سخت‌کاری معروف سویتف استفاده شده است که با ترکیب با رابطه توانی چنین تعریف می‌شود [۱۰]:

$$\bar{\sigma}_y = \sqrt{\frac{3}{2}} \left[\frac{F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2}{F+G+H} \right]^{1/2} \quad (۱۰)$$

با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱)، و این فرض که تنش‌های برشی σ_{xz}, σ_{yz} برابر صفر می‌باشند (چون جهت عمودی، یک جهت اصلی است)، تنش معادل چنین بدست می‌آید:

در حالت همسانگردی صفحه‌ای، روابط زیر برقرار می‌باشد [۱۱]:

$$\begin{aligned} R_0 = R_{45} = R_{90} = R \\ \Rightarrow R = \frac{H}{G} = \frac{H}{F} = \frac{2N - F - G}{2(F+G)} \quad (۱۱) \\ N = F + 2H, \quad F = G, \quad H = R * F \end{aligned}$$

$$\bar{\sigma}_y = \sqrt{\frac{3}{2}} \left[\frac{[(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + R(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2(1+2R)\sigma_{xy}^2]}{[2+R]} \right]^{1/2} \quad (۱۲)$$

نتایج بدست آمده در این پژوهش نیز بیانگر این موضوع می باشد. در شکل ۳، این اثر نشان داده شده است.

حال به اعتبارسنجی نتایج بدست آمده پرداخته می شود. برای این کار از داده‌های تجربی موجود در مرجع [۱۲] استفاده می‌شود. برای استخراج داده‌های یاد شده از روی نمودار، از نرم‌افزار digitiser استفاده شده است. تنش عمودی برابر با فشار پارگی^۲ اندازه‌گیری شده در مرجع [۱۲]، ۵۶ MPa- فرض شده است زیرا در این مورد نمونه بین یک قالب بالایی و یک قالب پایینی قرار گرفته است. فلز مورد استفاده در این آزمایش STKM-11A می‌باشد.

در شکل ۴، نمودارهای بدست آمده با نتایج تجربی مذکور (مرجع [۱۲]) مقایسه شده‌اند. روی هم رفته، می‌توان تطابق نمودارها را تأیید کرد، اما همان گونه که مشاهده می‌شود، نتایج بدست آمده برای تابع هیل ۴۸ بهتر است که منطقی می‌باشد.

از آنجا که برای کالیبره نمودن نمودارهای حد شکل دهی بدست آمده، مقدار f_0 تغییر داده می‌شود و از سوی دیگر، این کار موجب تغییر شکل کلی نمودار نمی‌شود و تنها کل نمودار را به سمت بالا یا پایین منتقل می‌کند [۱۶-۱۴] و از سوی دیگر، تعداد داده‌های تجربی موجود کم می‌باشد، لذا شیب نمودار در آن محدوده به عنوان معیار سنجش مد نظر قرار می‌گیرد. در شکل ۵، این مقایسه برای نتایج بدست آمده نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، شیب نمودار در صورت وارد نمودن اثر تنش عمودی، به شیب داده‌های تجربی نزدیک‌تر می‌شود و این امر می‌تواند بیانگر درستی نتایج بدست آمده باشد. همچنین، در مورد تابع هیل ۴۸ این شیب نزدیک‌تر از نتایج تابع فون میزز است. خلاصه این مقایسه در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

حال با فرض معلوم بودن تنش عمودی و هم‌چنین $\alpha = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$ و نیز با فرض صفر بودن σ_{xy} ، تنش اصلی درون-صفحه‌ای^۱، چنین بدست می‌آید:

$$\sigma_{xx} = \frac{-B \pm \sqrt{(B^2 - 4AC)}}{2A} \quad (13)$$

که در آن:

$$A = \alpha^2 + 1 + R(1 - \alpha)^2$$

$$B = -2\sigma_{zz}(\alpha + 1) \quad (14)$$

$$C = 2\sigma_{zz}^2 - \frac{2}{3} * (2 + R) * \sigma^{-2}$$

در رابطه (۱۳)، تنها علامت مثبت پیش از جذر، قابل قبول می‌باشد زیرا در غیر این صورت امکان منفی شدن σ_{xx} وجود دارد و این در حالی است که تنش یاد شده باید مثبت باشد.

نتایج و بحث

در این بخش ابتدا قابل قبول بودن نتایج بدست آمده برای حالت تنش صفحه‌ای، با توجه به کارهای پیشین انجام شده، بررسی می‌شود. مشخصات فلزات مورد استفاده برای بررسی نتایج، در جدول ۱ نشان داده شده است.

در شکل ۲، مقایسه بین نتایج الگوریتم ارایه شده در این پژوهش و نتایج مرجع [۱۲]، نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در حالت تنش صفحه‌ای، نتایج یکسان می‌باشد و این امر می‌تواند نشان‌دهنده درستی نتایج این پژوهش باشد.

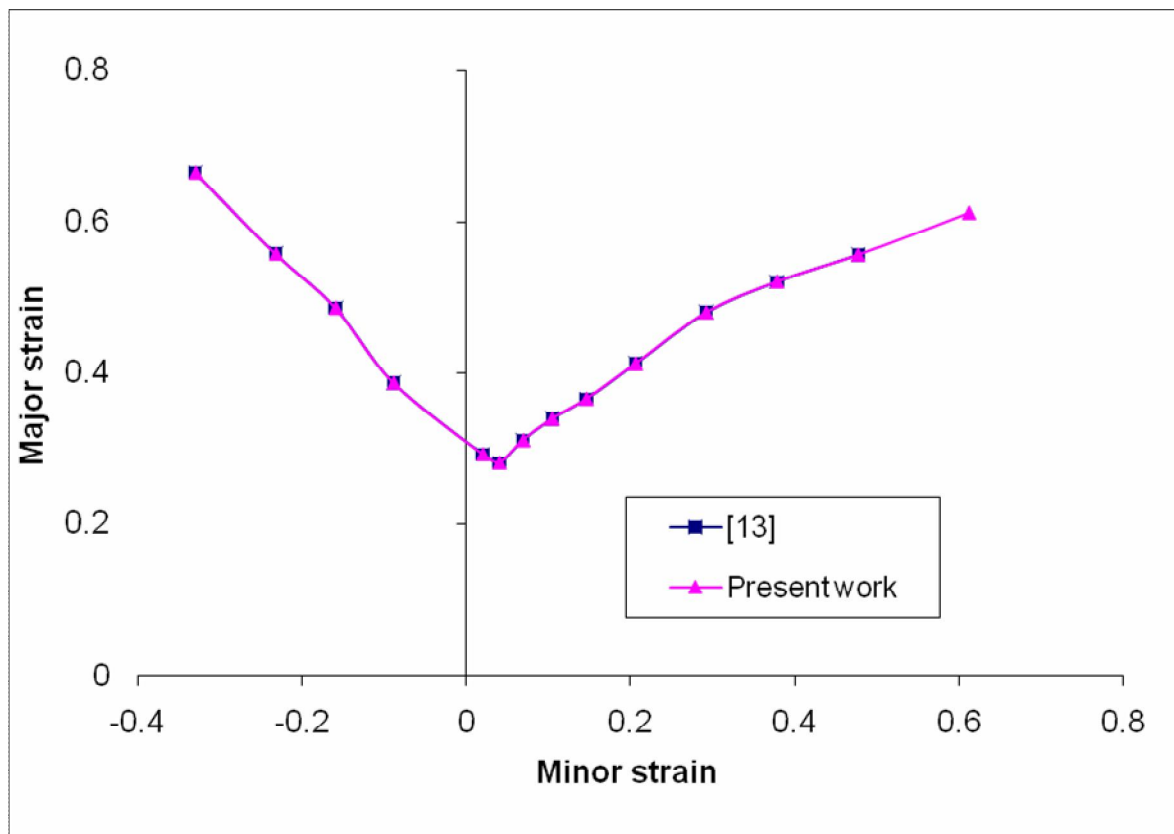
حال اثر تنش عمودی روی نمودار حد شکل دهی بررسی می‌شود. انتظار می‌رود که با افزایش مقدار تنش عمودی فشاری، نمودار حد شکل دهی، حدود بالاتری را نشان دهد [۶ و ۷]. شکست در فلزات، اغلب در ناهمگنی هندسی و یا در ناخالصی که تحت بارگذاری کششی است، رخ می‌دهد [۱۳]. کاهش این کشش در صورت وجود تنش عمودی، یکی از دلایلی است که می‌توان برای بالاتر رفتن نمودار و افزایش حد شکل پذیری ماده متذکر شد.

²-Bursting pressure

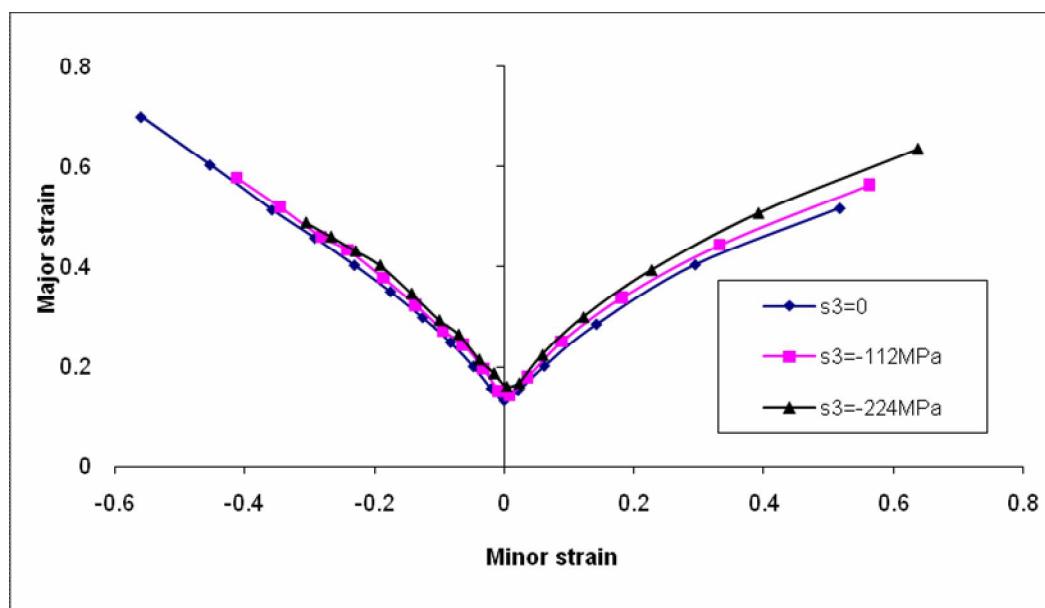
¹- In-plane major stress

جدول ۱- مشخصات مکانیکی و ضریب ناهمسانگردی نرمال فلزات استفاده شده در تحلیل نتایج

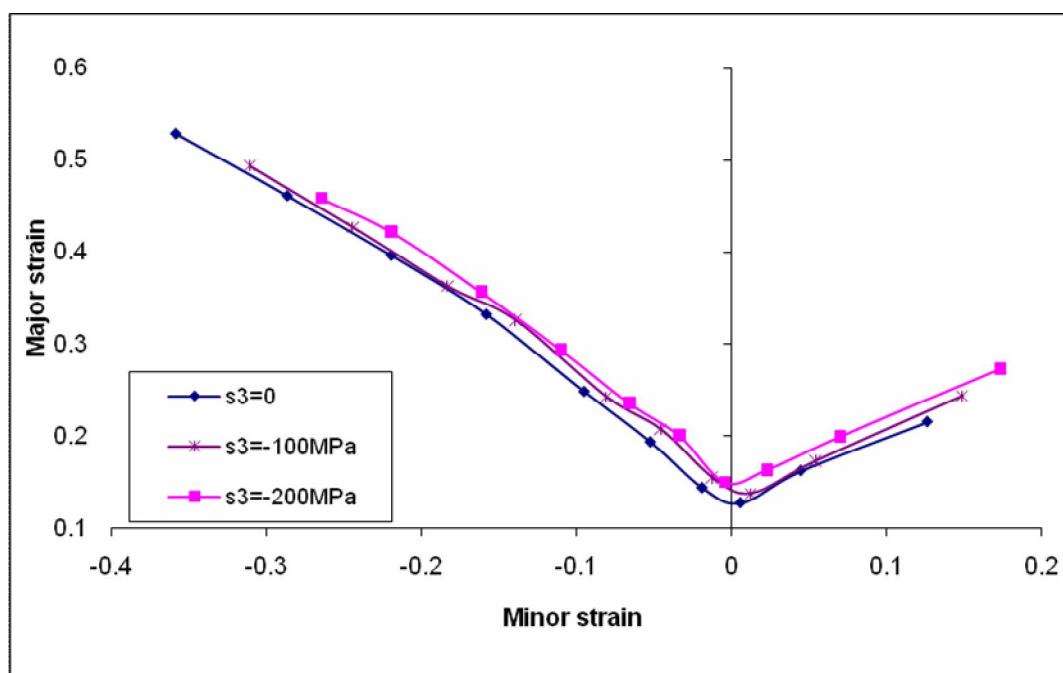
فلز					
	R	K (MPa)	ε_0	n	m
AK steel[۱۳]	۱/۲	۵۳۶	۰/۰۱	۰/۲۶	۰/۰۱۲
STKM-11A[۱۲]	۲/۱۴	۱۵۰۰	-	۰/۱۵	-
DP600[۱۵]	۱/۰۰	۹۸۸	-	۰/۱۸۲	-
Stainless steel [۱۶]	-	۶۵۰	۰/۰۰۹	۰/۱	-
AA6011[۶]	۰/۵۷۴	۲۵۴/۹	-	۰/۲۶۵	-



شکل ۲- نمودار حد شکل دهی برای فلز AK steel (از تابع تسلیم فون میزز استفاده شده است).

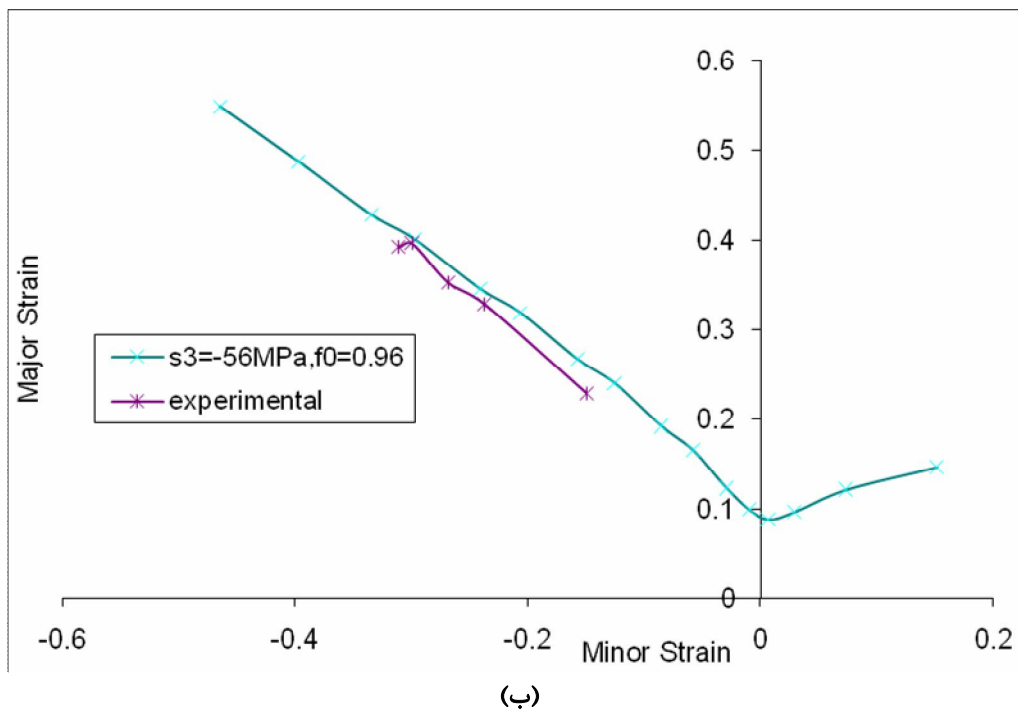
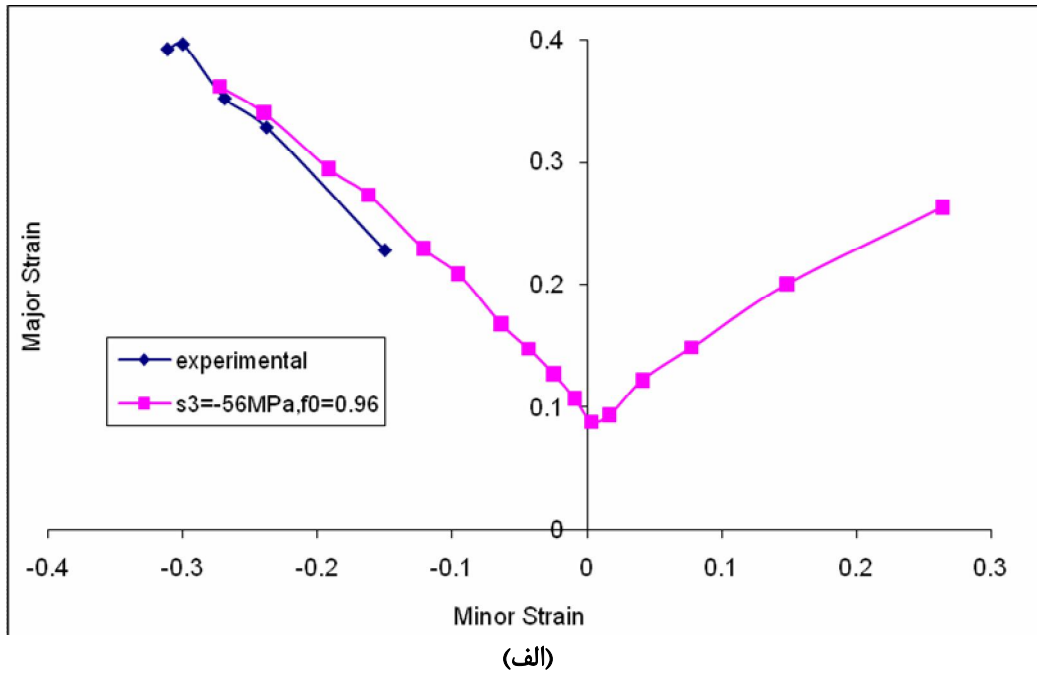


(الف)

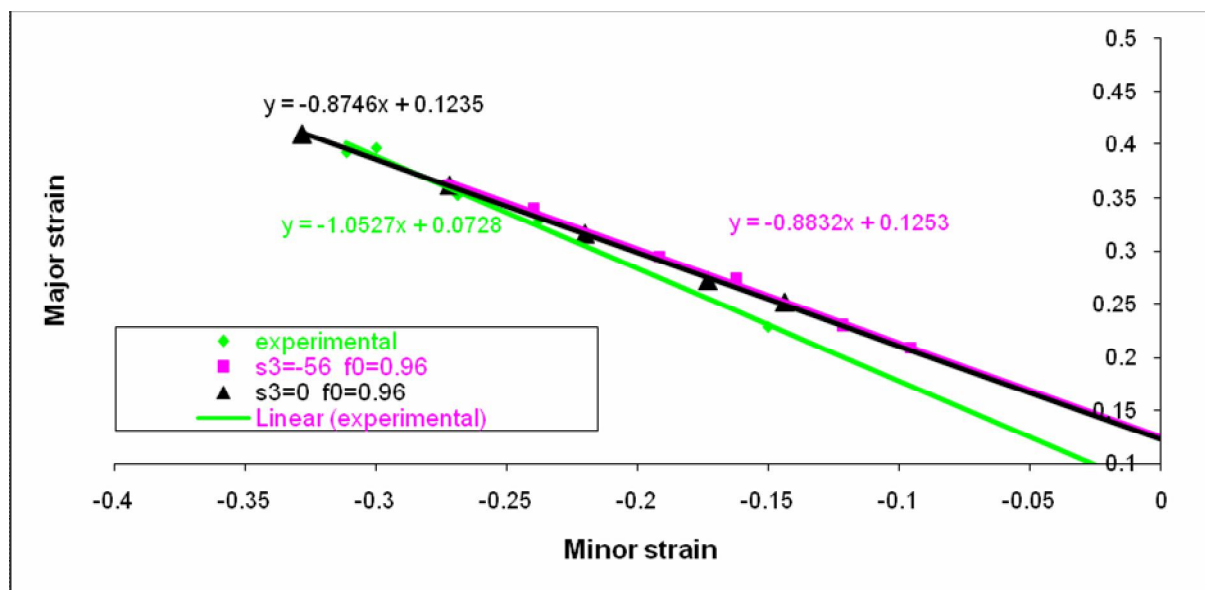


(ب)

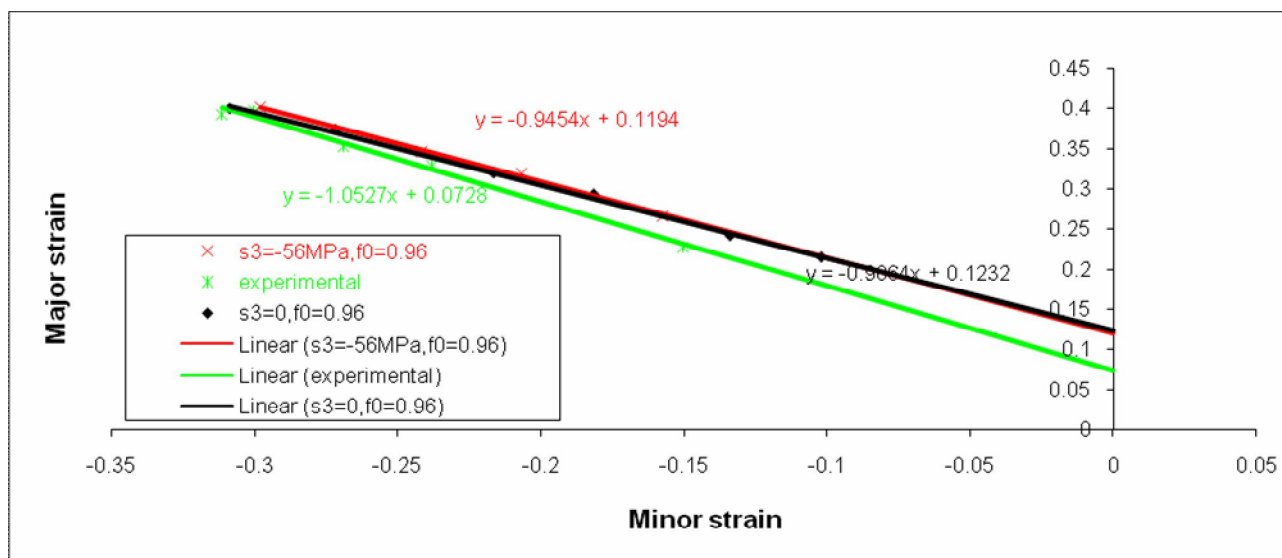
شکل ۳- اثر تنش عمودی روی نمودار حد شکل دهی، (الف) تابع فون میزز، (ب) تابع هیل ۴۸ با فرض همسانگردی صفحه‌ای.



شکل ۴- نمودار حد شکل‌دهی برای فلز STKM-11A، مقایسه بین نتایج تئوری و داده‌های تجربی، (الف) تابع تسلیم فون میزز، (ب) تابع تسلیم هیل ۴۸ با فرض همسانگردی صفحه‌ای.



(الف)



(ب)

شکل ۵- مقایسه شیب نتایج حاصل با شیب نتایج تجربی، (الف) تابع تسلیم فون میزز، (ب) تابع تسلیم هیل ۴۸ با فرض همسانگردی صفحه‌ای.

جدول ۲- مقایسه شیب نتایج بدست آمده با نتایج تجربی

	داده های تجربی	تابع تسلیم فون میزز		تابع تسلیم هیل ۱۹۴۸	
		s3=۰	s3=-۵۶ (MPa)	s3=۰	s3=-۵۶ (Mpa)
شیب نمودار	-۱/۰۵۲۷	-۰/۸۷۴۶	-۰/۸۸۳۲	-۰/۹۰۶۴	-۰/۹۴۵۴

تقسیم نمودن آن بر تنش تسلیم عمودی نرمالایز می‌گردد. پارامتر بدست آمده بی‌بعد بوده و با "S" نشان داده می‌شود:

حال به بررسی کمی اثر تنش عمودی بر نمودار حد شکل‌دهی، با استفاده از مدل ارایه شده در این پژوهش پرداخته می‌شود. برای این کار، مقدار تنش عمودی با

نکته دیگری که باید به آن اشاره شود، این است که با افزایش اندازه تنش عمودی فشاری، پایین‌ترین نقطه نمودار در شکل‌های ۷ و ۱۰ اندکی به سمت راست منتقل می‌شود که تا حدودی با نتیجه مرجع [۶] همخوانی دارد، اما در دو مورد دیگر روند یاد شده مشاهده نمی‌شود. به نظر می‌رسد که دلیل این رفتار، استفاده از فرض همسانگردی ورق در استخراج کرنش‌های حدی در مورد شکل‌های ۸ و ۹ باشد. به بیان دیگر، روند یاد شده (انتقال نمودار به سمت راست) در موردهایی که ضریب ناهمسانگردی در نظر گرفته شود، مشاهده می‌شود. بنابراین، می‌توان ادعا کرد که در حالتی که اثر تنش عمودی در نظر گرفته می‌شود، اعمال نقش ناهمسانگردی ورق بر نمودار حد شکل‌دهی مهم‌تر از حالت تنش صفحه‌ای می‌باشد.

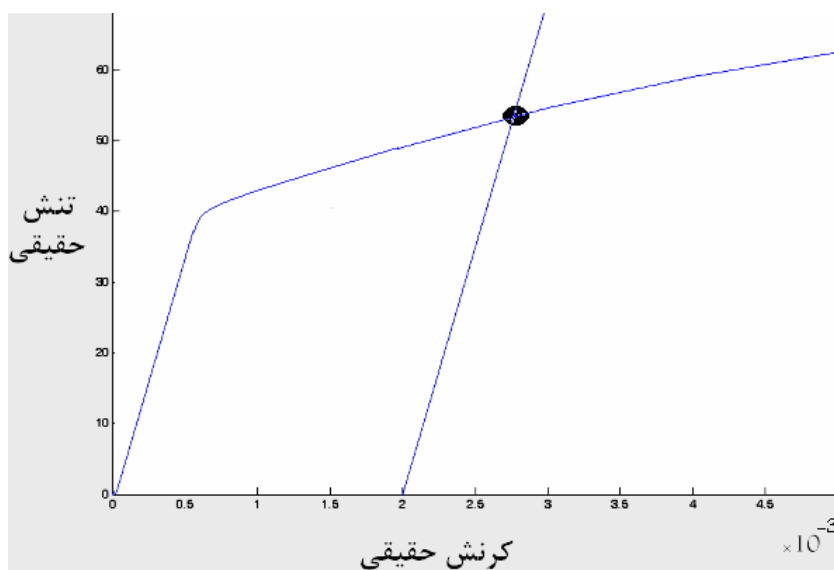
$$S = \frac{|\sigma_3|}{Y} \quad (15)$$

به همین منظور، مقدار عددی تنش تسلیم مورد نیاز می‌باشد. در صورتی که مقدار آن، در مرجع مربوطه اشاره نشده باشد، با ترسیم خط گذرنده از کرنش ۰/۲٪ و مشخص کردن محل تلاقی آن با منحنی تنش-کرنش ماده مربوطه، تنش تسلیم ماده بدست می‌آید. در شکل ۶، روند یاد شده به گونه شماتیک نشان داده شده است. جدول ۳ تنش تسلیم فلزات مورد استفاده را نشان می‌دهد.

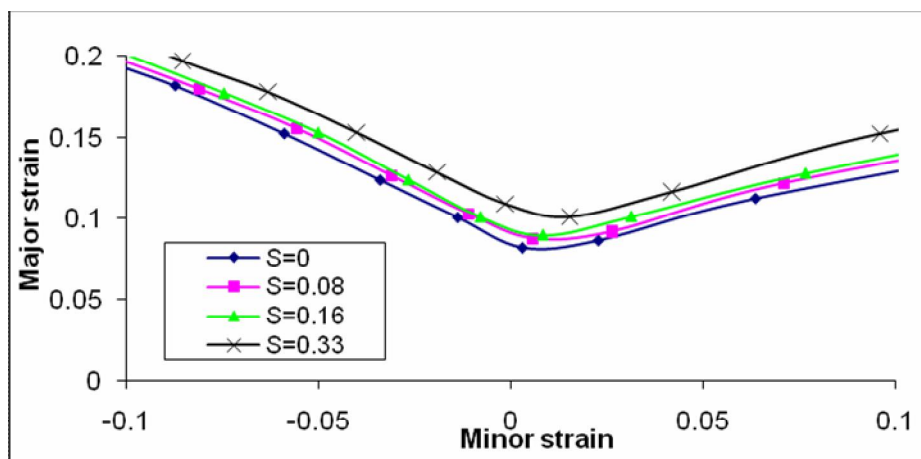
در شکل‌های ۷ تا ۱۰ اثر تنش عمودی بر نمودار حد شکل‌دهی با استفاده از مدل ارایه شده، برای چهار فلز *Stainless Steel* ، *DP600* ، *STKM-11A* و *AA6011* نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که این مدل نیز، رفتار مورد انتظار به هنگام وارد شدن اثر تنش عمودی، یعنی افزایش شکل‌پذیری را نشان می‌دهد.

جدول ۳- تنش تسلیم فلزات استفاده شده برای بررسی اثر تنش عمودی بر نمودار حد شکل‌دهی

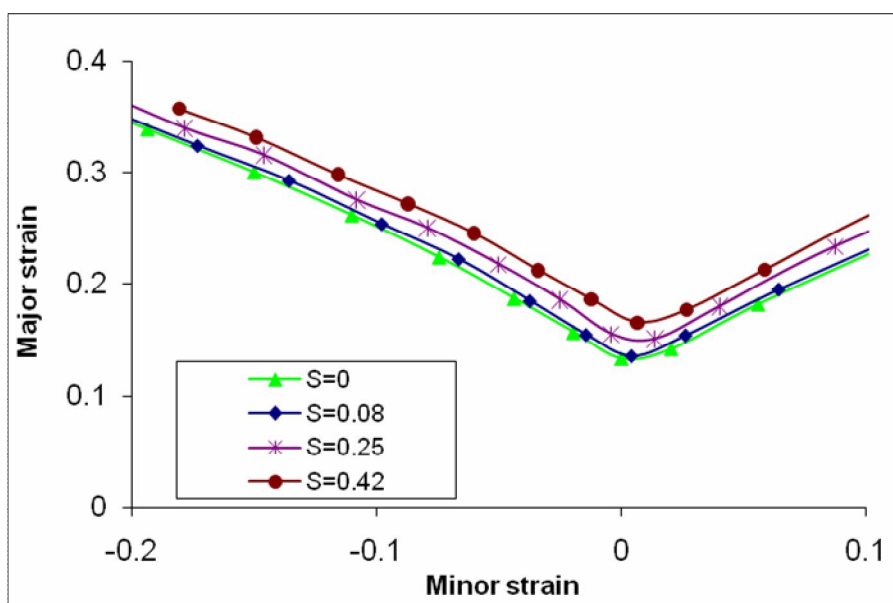
تنش تسلیم (MPa)	فلز
۶۸۴	STKM-11A
۳۵۵/۸	DP600
۳۷۷	Stainless Steel
۵۳/۴	AA6011



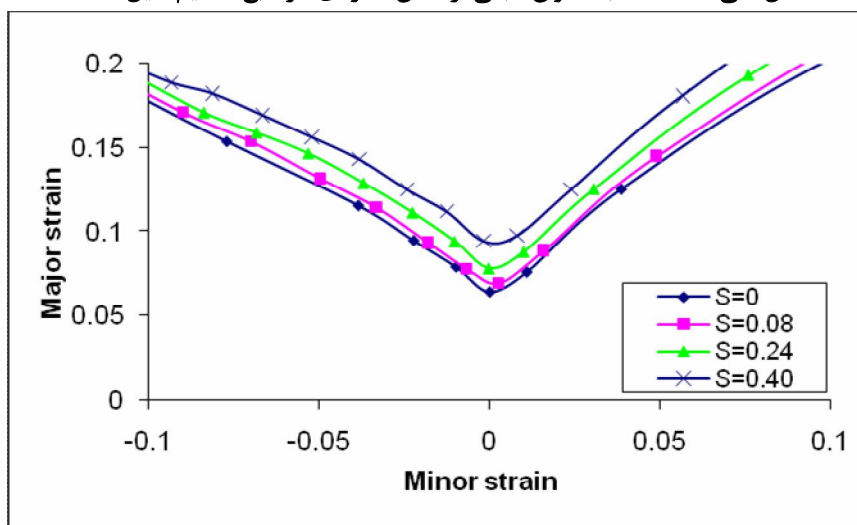
شکل ۶- تعیین تلاقی منحنی تنش-کرنش با خط ۰/۲٪ جهت مشخص نمودن تنش تسلیم



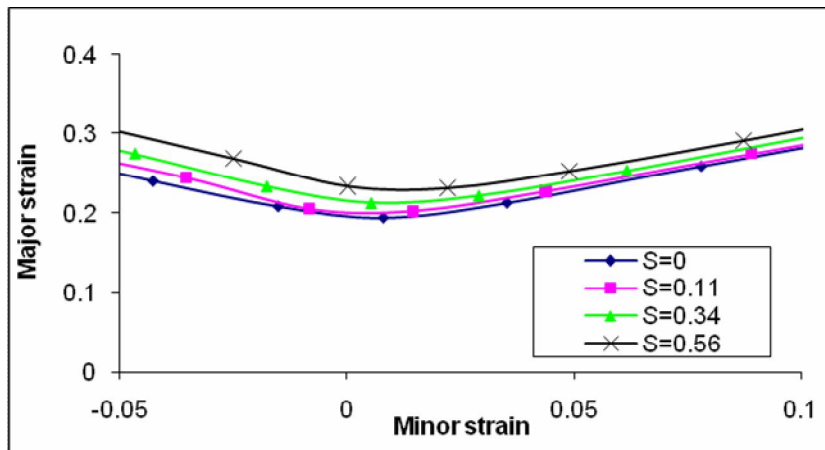
شکل ۷- نمودار حد شکل دهی STKM-11A برای مقادیر گوناگون S



شکل ۸- نمودار حد شکل دهی DP600 به عنوان تابعی از تنش عمودی (از تابع تسلیم هیل ۱۹۴۸ استفاده شده است).



شکل ۹- تأثیر تنش عمودی بر نمودار حد شکل دهی Stainless Steel



شکل ۱۰- نمودار حد شکل‌دهی AA6011 به ازای مقادیر گوناگون تنش عمودی

پارامتر ξ به ازای مقادیر گوناگون تنش عمودی نرمالایز شده S برای چهار نوع فلز محاسبه و در جدول ۴ نشان داده شده است.

همان گونه که مشاهده می‌شود، پارامتر ξ مقدار قابل ملاحظه‌ای را دارا می‌باشد و حتی در برخی موارد با اعمال تنش عمودی برابر با ۰/۳ تنش تسلیم، مقدار آن به ۲۷/۴٪ نیز می‌رسد که به معنی افزایش شکل پذیری ماده در حالت کرنش صفحه‌ای تا ۳۰٪ است.

حال اثر تنش عمودی بر شکل‌پذیری ورق، به صورت کمی مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این کار، مقدار کرنش بزرگ‌تر در حالت کرنش صفحه‌ای یا همان fld_0 را در حالتی که تنش عمودی وجود دارد، در نظر گرفته و مقدار افزایش آن نسبت به حالت تنش صفحه‌ای محاسبه می‌شود که با پارامتر ξ نشان داده شده و چنین تعریف می‌گردد:

$$\xi = \frac{fld_{0 \text{ with existence of normal stress}} - fld_{0 \text{ plane stress}}}{fld_{0 \text{ plane stress}}} \times 100$$

(۱۶)

جدول ۴- درصد افزایش fld_0 به ازای مقادیر گوناگون S

ξ	S	فلز
۸/۶	۰/۰۸	STKM-11A
۱۱/۱	۰/۱۶	
۲۷/۴	۰/۳۳	
۳/۳۷	۰/۰۸	DP600
۱۴/۴	۰/۲۵	
۲۷/۶	۰/۴۲	
۸/۸	۰/۰۸	Stainless Steel
۲۱/۵	۰/۲۴	
۴۶/۴	۰/۴۰	
۳/۱	۰/۱۱	AA6011
۱۰/۵	۰/۳۴	
۱۹/۴	۰/۵۶	

نتیجه گیری

۱- در این مقاله، ترسیم نمودارهای حد شکل دهی در حضور تنش عمودی، بر پایه مدل مارشینیاک و کوزینسکی انجام گرفته است. از روش عددی نیوتن رافسون برای بدست آوردن متغیرهای این مدل استفاده شده است. ساختار الگوریتم تعیین نمودارهای حد شکل دهی به گونه ای است که می توان توابع تسلیم ون میزز و هیل ۴۸ و نیز روابط کار سختی گوناگون را در آن اعمال کرد.

۲- حضور تنش عمودی فشاری در فرآیند شکل دهی، منجر به بهبود شکل پذیری ماده شده و در نتیجه، سطح منحنی حد شکل دهی بالاتر می رود. وجود تنش عمودی باعث کاهش بارهای کششی در مواضع ناهمگنی ماده و یا ناهمگنی هندسی که شکست از آن ها شروع می شود، می گردد. این امر می تواند یکی از دلایل پدیده بالا باشد. همچنین، افزایش تنش فشاری عمل کننده بر ورق فلزی، موجب افزایش تنش هیدرواستاتیک فشاری می شود که می تواند کرنش های حدی را افزایش دهد. نتایج بدست آمده از مدل ارائه شده در این پژوهش نشان می دهد که در برخی موارد، حضور تنش عمودی برابر با ۰/۳ تنش تسلیم ماده، شکل پذیری ماده در حالت کرنش صفحه ای را تا ۳۰٪ حالت تنش صفحه ای افزایش می دهد. لذا، چشم پوشی از اثر تنش عمودی، بویژه در فرآیند هایی همچون هیدروفرمینگ که مقدار تنش عمودی در آن ها بالاست، منطقی نبوده و باید این عامل در استخراج کرنش های حدی اعمال گردد.

۳- در مواردی که ضریب ناهمسانگردی در تعیین کرنش های حدی در نظر گرفته شود، با افزایش اندازه تنش عمودی فشاری، نمودار اندکی به سمت راست منتقل می شود. لذا، می توان ادعا کرد که درحالتی که اثر تنش عمودی در نظر گرفته می شود، اعمال نقش ناهمسانگردی ورق بر منحنی حد شکل دهی مهم تر از حالت تنش صفحه ای می باشد.

پیوست الف: لیست نشانه ها

a	منطقه سالم ورق
b	منطقه شیار ورق

f	ضریب ناهمگنی
fld_0	کرنش اصلی بزرگ تر در حالت کرنش صفحه ای
$[F] = [F_1 \ F_2 \ F_3 \ F_4]^T$	ماتریس معادله ها
F,G,H,L,M,N	ضرایب ناهمسانگردی
K	ضریب استحکام
m	نمای حساسیت نرخ کرنش
n	توان کارسختی
R	ضریب ناهمسانگردی عمودی
r_0, r_{45}, r_{90}	ضرایب ناهمسانگردی (نسبت به جهت نورد)
S	مقدار عمودی نرمالایز شده تنش عمودی
T	ماتریس دوران
t	ضخامت ورق
$[X] = [\sigma_{tt}^b \ \sigma_{mm}^b \ \sigma_{nt}^b \ d\bar{\epsilon}_b]^T$	ماتریس متغیرها
α	نسبت تنش های اصلی درون-صفحه ای (σ_2/σ_1)
$d\epsilon$	تانسور جزء کرنش
$\bar{\epsilon}$	کرنش مؤثر پلاستیک
ϵ_0	مقدار پیش کرنش
$\dot{\bar{\epsilon}}$	نرخ کرنش معادل
θ	زاویه شیار
$d\lambda$	ضریب ثابت لحظه ای
ξ	درصد افزایش fld_0 در اثر تنش عمودی
$\bar{\sigma}_Y$	تنش معادل به دست آمده از قانون کارسختی
$\bar{\sigma}_y$	تنش معادل بدست آمده از تابع تسلیم

پیوست ب: اثبات روابط تغییر زاویه شیار در مدل مارشینیاک کوزینسکی

۱. به تعریف کرنش مهندسی توجه گردد:

$$de = \frac{l_1 - l_0}{l_0}$$

که در آن l_0 طول اولیه و l_1 طول نهایی است. حال با توجه به شکل الف-۱ می توان روابط زیر را نوشت:

$$d\varepsilon_1 = \frac{a' - a}{a} \Rightarrow a' = a + ad\varepsilon_1 = a(1 + d\varepsilon_1) \quad (\text{الف-۱})$$

$$d\varepsilon_2 = \frac{b' - b}{b} \Rightarrow b' = b + bd\varepsilon_2 = b(1 + d\varepsilon_2) \quad (\text{الف-۲})$$

$$\text{tg}(\theta) = \frac{a'}{b'} = \frac{a}{b} \frac{1 + d\varepsilon_1}{1 + d\varepsilon_2} = \text{tg}(\theta_0) \frac{1 + d\varepsilon_1}{1 + d\varepsilon_2} \quad (\text{الف-۳})$$

حال به تعریف کرنش طبیعی توجه گردد:

$$de = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

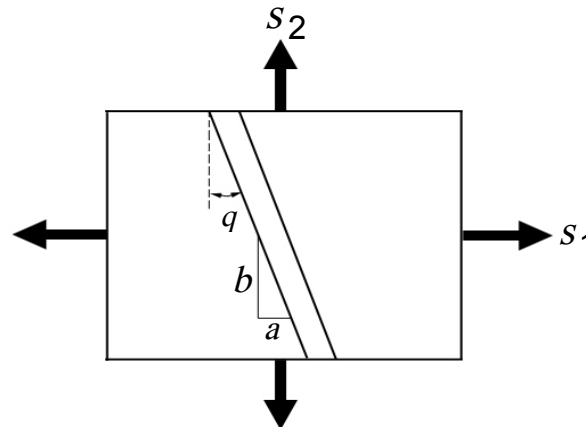
با توجه به شکل زیر خواهیم داشت:

$$d\varepsilon_1 = \ln \frac{a'}{a} \Rightarrow a' = a \exp(d\varepsilon_1) \quad (\text{الف-۲-۱})$$

$$d\varepsilon_2 = \ln \frac{b'}{b} \Rightarrow b' = b \exp(d\varepsilon_2) \quad (\text{الف-۲-۲})$$

$$\text{tg}(\theta) = \frac{a'}{b'} = \frac{a}{b} \exp(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2) = \text{tg}(\theta_0) \exp(d\varepsilon_1 - d\varepsilon_2) \quad (\text{الف-۲-۳})$$

که در آن a' و b' طول‌های تغییر یافته به ترتیب a و b هستند.



ورقی زیر بارگذاری است و شیار با زاویه نسبت به محورهای اصلی روی آن قرار دارد.

References

- 1-M.C. Butuc, A. Barata da Rocha, J.J. Gracio, and J. Ferreira Duarte, "A More General Model for Forming Limit Diagrams Prediction", J. Mater. Process. Technol., Vol. 125-126, pp. 213-18, 2002.
- 2-M. M. Moshksar, and S. Mansorzadeh, "Determination of the Forming Limit

Diagram for Al 3105 Sheet", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 141, pp. 138-142, 2003.

- 3- A. Assempour, A.R. Safikhani, and R. Hashemi, "An improved Strain Gradient Approach for Determination of Deformation Localization and Forming Limit Diagrams", Journal Materials

- Processing Technology, Vol. 209, pp. 1758-1769, 2009.
- 4- M. Shakeri, A. Sadough, and B.M. Dariani, "Effect of Pre-Straining and Grain Size on the Limit Strains in Sheet Metal Forming", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, Vol. 214, pp. 821-827, 2000.
- 5- Y.M. Hwang, Y.K. Lin, and H.C. Chuang, "Forming Limit Diagrams of Tubular Materials by Bulge Tests", J. Materials Processing Technology, Vol. 209, pp. 5024-5034, 2009.
- 6- L.M. Smith, R.C. Averill, J.P. Lucas, T.B. Stoughton, and P.H. Matin, "Influence of Transverse Normal Stress on Sheet Metal Formability", International Journal of Plasticity, Vol. 19, pp. 1567-1583, 2003.
- 7- J.M. Allwood, and D.R. Shouler, "Generalised Forming Limit Diagrams Showing Increased Forming Limits with Non-Planar Stress States", International Journal of Plasticity, Volume 25, Issue 7, pp. 1207-1230, 2009.
- 8- R. Hill, "A Theory of Yielding and Plastic Flow of Anisotropic Metals", Proc. Roy. Soc. Lond., 193A, pp 197-281, 1948.
- 9- Z. Marciniak, and K. Kuczynski, "Limits Strains in The Processes of Stretch-Forming Sheet Metal", Int. J. Mech. Sci., Vol. 9, pp. 609-620, 1967.
- 10- A. Assempour, R. Hashemi, K. Abrinia, M. Ganjiani, and E. Masoumi, "A methodology for Prediction of Forming Limit Stress Diagrams Considering the Strain Path Effect", Computational Materials Science, Vol. 45, pp. 195-204, 2009.
- 11- Z.G. Wei, and R.C. Batra, "Damage model for anisotropic materials, and its application to analysis of stability and spallation", International Journal of Impact Engineering, Vol. 34, pp. 1780-1796, 2007.
- 12- J. Kim, S-J. Kang, and B-S. Kang, "A prediction of bursting failure in tube hydroforming processes based on ductile fracture criterion", Int Adv Manuf Technol, Vol. 22, pp. 357-362, 2003.
- 13- R. Hashemi, "Consideration of Strain Path Effects on Prediction of Forming Limit Diagrams", M.Sc. Thesis, Department of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology; 2007.
- 14- R. Hashemi, A. Ghazanfari, K. Abrinia, and A. Assempour, "Forming Limit Diagrams of Ground St14 Steel Sheets with Different Thicknesses", SAE International Journal of Materials and Manufacturing, Vol. 5, pp. 60-64, 2012.
- 15- R. Hashemi, K. Abrinia, and A. Assempour, "The Strain Gradient Approach to Predict Necking in Tube Hydroforming", Journal of Manufacturing Processes, Vol. 15, Issue 1, pp. 51-55, 2013.
- ۱۶- ش. مولایی، م. شهباز، ر. ابراهیمی. تأثیر رفتار کارسختی ماده بر مقدار بشکه ایی شدن و توزیع تنش و کرنش در آزمایش فشار با استفاده از روش اجزاء محدود. مجله مواد نوین، جلد ۳، شماره ۴، تابستان ۱۳۹۲.