



بررسی تحلیلی اثر پارامترهای مدل GTN بر روی نمودار حد شکل دهی ورق های فلزی

میر عماد حسینی¹، سید جمال حسینی پور^{2*}، محمد بخشی جویباری³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل

* صندوق پستی 484، j.hosseini@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 29 خرداد 1394

پذیرش: 04 مهر 1394

ارائه در سایت: 10 آبان 1394

کلید واژگان:

منحنی حد شکل دهی

مدل GTN

شکست نرم

روش تحلیلی

فرآیند شکل دهی ورق فلزی

چکیده

منحنی حد شکل دهی، نموداری است که مقادیر کرنش های اصلی بزرگتر ϵ_1 را در مقابل مقادیر کرنش های اصلی کوچکتر ϵ_2 در لحظه وقوع گلوبی موضعی ترسیم می نماید. تعیین تجربی منحنی حد شکل دهی معمولاً فرآیند بسیار وقت گیر و پرهزینه ای است و نیاز به تجهیزات خاص دارد. از این رو، مدل های تحلیلی و عددی زیادی برای تعیین آن توسعه یافته اند. مدل گارسون- تورگارد- نیدلمن (GTN) یک مدل میکرومکانیکی برای پیش بینی و تشریح رفتار شکست نرم می باشد. این مدل رفتار رشد و تکامل حفره در ریز ساختار را توسط معادلات فیزیکی تشریح می نماید. در این پژوهش روابط و معادلات ساختاری حاکم بر تغییر شکل پلاستیک با استفاده از تابع پتانسیل پلاستیک گارسون و معیار رشد و تکامل حفره GTN جهت پیش بینی پارگی و شکست ورق های فلزی استخراج شده است. این روابط به صورت تحلیلی مورد حل قرار گرفتند. منحنی های حد شکل دهی مربوط به آلیاژهای مورد مطالعه سایر پژوهشگران به صورت تحلیلی با بکارگیری نرم افزار متلب پیش بینی و تعیین گردید. نتایج حاصل از روش تحلیلی با نتایج تجربی و عددی سایر پژوهشگران مقایسه گردیده و مطابقت خوبی را با یکدیگر نشان دادند. در ادامه اثر پارامترهای مدل GTN شامل مقادیر f_0, f_C, f_N, f_f و همچنین ضریب ناهمسانگردی و نمای کرنش سختی بر روی منحنی حد شکل دهی و روند رشد کسر حجمی حفره به روش تحلیلی مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

An analytical investigation into the effect of GTN model parameters on the forming limit diagram of sheet metals

Mir Emad Hosseini, Seyed Jamal Hosseinipour*, Mohammad Bakhshi Jooybari

Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran.

* P.O.B. 484, Mazandaran, Iran, j.hosseini@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 19 June 2015

Accepted 26 September 2015

Available Online 01 November 2015

Keywords:

Forming limit curve

GTN model

ductile fracture

analytical approach

sheet metal forming

ABSTRACT

A Forming Limit Diagram (FLD) is a graph which depicts the major strains versus values of the minor strains at the onset of localized necking. Experimental determination of a FLD is usually very time consuming and requires special equipment. Many analytical and numerical models have been developed to overcome these difficulties. The Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) damage model is a micromechanical model for ductile fracture. This model describes the damage evolution in the microstructure with physical equations, so that crack initiation due to mechanical loading can be predicted. In this work, by using the GTN damage model a failure criterion based on void evolution was examined. The aim is to derive constitutive equations from Gurson's plastic potential function in order to predict the plastic deformation and failure of sheet metals. These equations have been solved by analytical approach. The Forming Limit Diagrams of some alloys studied in the literature have been predicted using MATLAB software. The results of analytical approach have been compared with experimental and numerical results of some other researchers and showed good agreement. The effects of GTN model parameters including f_0, f_C, f_N, f_f , as well as anisotropy coefficient and strain hardening exponent on the FLD and the growth procedure of void volume fraction have been investigated analytically.

1- مقدمه

حفره ها ناشی می شود. برای حالت شکست ناشی از رشد و تکامل حفره های داخلی، برخی از پژوهشگران، مدل هایی را ارائه نمودند که شکست و آسیب را در آلیاژهای مورد بررسی، بسیار خوب تشریح می نماید. به خصوص، مدل هایی که شامل اثر کرنش-سختی و کرنش-نرمی مربوط به جوانه زنی و رشد حفره می باشند [2,3].

منحنی حد شکل دهی در فرآیندهای شکل دهی ورق های فلزی نشان دهنده قابلیت اعمال کرنش های دائمی در ورق بدون خطر وقوع شکست می باشد، که برای ارزیابی شکل پذیری و تشخیص اشکالات قالب مورد استفاده قرار می گیرد [1]. شکست در مواد فلزی از ناپایداری پلاستیک و یا رشد و تکامل

Please cite this article using:

M. E. Hosseini, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi Jooybari, An analytical investigation into the effect of GTN model parameters on the forming limit diagram of sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 242-252, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. E. Hosseini, S. J. Hosseinipour, M. Bakhshi Jooybari, An analytical investigation into the effect of GTN model parameters on the forming limit diagram of sheet metals, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 11, pp. 242-252, 2015 (In Persian)

آمدند. در پژوهش آنان، پارامترهای موثر با استفاده از روش معکوس ارائه شده توسط فراتینی و همکاران [21]، مورد مطالعه قرار گرفت. در سال‌های اخیر، مدل GTN برای مدلسازی رفتار ماده در نرم‌افزارهای اجزای محدود نظیر آباکوس اعمال گردیده است. با وجود اینکه بعضی محدودیت‌ها و مشکلات در اعمال نمودن تمام جنبه‌های مدل GTN در نرم افزار آباکوس وجود دارد، تعدادی مقاله در مورد شکست نرم بر پایه مدل GTN با استفاده از این نرم‌افزار استاندارد منتشر شده است [22-24].

همچنین عمده پژوهش‌ها در زمینه پیش‌بینی شکست، گلوبی و منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی با روش GTN با اعمال زیرروال در نرم‌افزار صورت گرفته است. عباسی و همکاران [25] منحنی حد شکل‌دهی فولاد IF را بصورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آنان جهت اعمال مدل GTN در نرم‌افزار آباکوس از زیرروال UMAT و معیار همسانگرد فون میزز استفاده نمودند. همچنین جهت مقایسه و صحت‌آزمایی روند شبیه‌سازی خود، آزمایشات تجربی آزمون منحنی حد شکل‌دهی بر پایه روش هکر را انجام دادند. مین و همکاران [26]، منحنی حد شکل‌دهی آلیاژ آلومینیوم 5052 را بصورت تجربی و شبیه‌سازی مورد بررسی قرار دادند. آنان جهت اعمال مدل GTN در نرم‌افزار آباکوس از زیرروال VUMAT و معیار ناهمسانگرد هیل استفاده نمودند.

تعداد بسیار اندکی پژوهش به پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی با مدل GTN به روش تحلیلی پرداخته‌اند. در این مقاله معادلات و روابط ساختاری از تابع پتانسیل پلاستیک مدل گارسون استخراج شده و در یک کد محاسباتی الاستیک-پلاستیک استفاده شده است. این کد محاسباتی قادر است تغییرشکل پلاستیک و شکست ورق‌های فلزی از جنس ماده شکل‌پذیر را پیش‌بینی نماید. این معادلات ساختاری پلاستیک به طور مجزا در نرم‌افزار برنامه‌نویسی متلب حل شده و نتایج تغییر شکل پلاستیک و شکست ماده به صورت تحلیلی استخراج گردیده است. بخش اصلی و بسیار مهم مدل GTN تابع پتانسیل تسلیم آن می‌باشد. مقاومت در برابر تسلیم با افزایش کرنش پلاستیک به خاطر پدیده کرنش-سختی افزایش می‌یابد. این پدیده کرنش-سختی با پدیده کرنش-نرمی به علت جوانه‌زنی و رشد حفره همراه خواهد شد. پدیده کرنش-نرمی با افت شدید ظرفیت تحمل بار که به صورت افت شدید تنش مؤثر و فشرده شدن و کاهش شعاع سطح تسلیم رویت می‌شود، قابل تشخیص است. از اینرو، سخت‌شدگی و نرم‌شدگی متوالی به طور مناسب در برنامه مدل شده است.

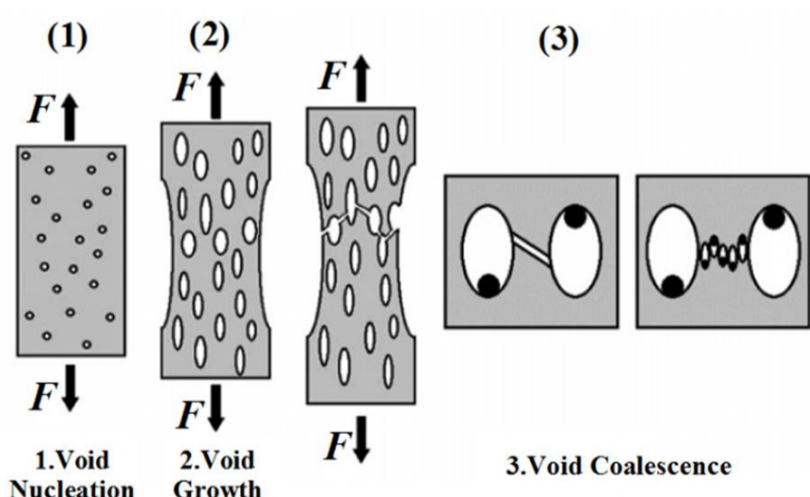


Fig. 1 Three steps of ductile fracture including nucleation, growth and coalescence of voids

شکل 1 سه مرحله شکست نرم شامل جوانه‌زنی، رشد و انعقاد حفره‌ها

تئوری کلاسیک فون-میزز برای تسلیم مواد شکل‌پذیر، قسمت هیدرواستاتیک مؤلفه‌های تنش را در نظر نمی‌گیرد. اما، در برخی از پژوهش‌ها مشاهده شده است که تسلیم مواد نرم دارای ذرات سخت فاز دوم، نه تنها به تنش مؤثر σ_e ، بلکه به بخش هیدرواستاتیک مؤلفه تنش σ_H نیز وابسته می‌باشد [4-6]. در میان بسیاری از توابع پتانسیل تسلیم، که اثرات بخش هیدرواستاتیک مؤلفه‌های تنش و کسرهای حجمی حفره را در نظر می‌گیرند، تابع پتانسیل تسلیم گارسون به طور گسترده برای شکست نرم مورد استفاده قرار می‌گیرد [7،8]. نیدلمن و تورگارد [9] رشد ترک را بر پایه مدل گارسون مورد تحقیق و بررسی قرار دادند. آنان شکست را به صورت نتیجه طبیعی فرآیند تغییر شکل، همراه با جوانه‌زنی، رشد و در نهایت انعقاد حفره‌ها که منجر به تشکیل ریزترک می‌گردد، مدل نمودند. تصویر شماتیک مراحل مدل آسیب گارسون-تورگارد-نیدلمن (GTN) در شکل 1 نشان داده شده است. چنگ ویوو [10] رشد یک حفره استوانه‌ای را بر روی نوک ترک با استفاده از تحلیل المان محدود در نمونه‌های با ترک‌های از پیش موجود بر اساس مدل گارسون مورد بررسی قرار دادند. دکمپ و همکاران [11] اثر اندازه دانه و هندسه را بر روی شکست نرم با بکارگیری مدل گارسون بر روی میله‌های شیاردار از جنس فولادهای کربنی منگن‌دار مورد مطالعه قرار دادند. راگاب [12] کرنش شکست را برای ماده نرم بر پایه تابع پتانسیل گارسون پیش‌بینی نمود و با نتایج تجربی مقایسه کرد. در نهایت او یک معیار شکست بر پایه کرنش را پیشنهاد و ارائه نمود. پینو [13] اثر اندازه و پراکندگی را بر روی شکست ترد و نرم با بکارگیری مدل‌های میکرومکانیکی، مورد مطالعه قرار داد. مشخص گردید که با افزایش اندازه نمونه، شکل‌پذیری یا چقرمگی شکست کاهش می‌یابد. لی و ژانگ [14]، مدل ترکیبی گارسون با مدل جوانه‌زنی کنترل شده توسط تنش و کرنش را در فشار ساده تک محوری سیلندرها تحت اصطکاک چسبان مورد استفاده قرار دادند. آن‌ها اثرات کرنش-سختی، مدل‌های جوانه‌زنی، سطح تسلیم و هندسه را بر روی توزیع و افزایش تنش، کرنش، کسر حجمی حفره و انعقاد حفره مورد مطالعه قرار دادند.

کیو و ونگ [15]، تخمین‌های تحلیلی برای تابع تسلیم ماده الاستیک-پلاستیک با توزیع متراکم از حفره‌های بیضوی موازی یا با جهت‌گیری اتفاقی ارائه نمودند. آنان هیچ شباهت اساسی با پیش‌بینی‌های گارسون در زمینه وضعیت خاص حفره شبه کره‌ای نیافتند. ژانگ و همکاران [16]، یک مدل شامل ترکیبی از مدل اصلاح شده گارسون و مدل بار حدی پلاستیک بیان شده توسط توماسون ارائه نمودند. راکین و همکاران [17]، آغاز شکست فولاد فریتی کم آلیاژ را با استفاده از مدل GTN تحلیل نمودند. همچنین آنان قابلیت تعمیم دادن پارامترهای میکرومکانیکی حاصل از نمونه‌های بدون ترک اولیه به نمونه‌های دارای ترک اولیه را مورد بررسی قرار دادند. پاونکومار و همکاران [18]، از پارامترهای آسیب مدل گارسون برای تحلیل نمونه‌های کششی شیاردار استفاده نموده و همچنین به منظور پیش‌بینی رفتار مقاومت در برابر شکست یک لوله ترک‌دار از این نمونه بهره جستند و در نهایت مطابقت بسیار خوبی بین این نتایج و نتایج آزمایش‌های تجربی بدست آوردند. برون و همکاران [19]، توانستند مدل GTN را در تعیین منحنی‌های حد شکل‌دهی ورق فلزی پایه نیکل و یک ورق فلزی از جنس آلیاژ آلومینیوم به کار ببندند. برون و همکاران [20]، در پژوهشی دیگر منحنی‌های حد شکل‌دهی سه ورق فلزی آلومینیومی به همراه یک ورق فلزی فولاد نرم را با استفاده از مدل GTN مورد بررسی قرار دادند. با فرض اینکه ضرایب تورگارد ثابت باشند، پارامترهای مدل با بکارگیری آزمون کشش تک محوره بدست

$$A = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left[\frac{\bar{\epsilon}_p - \epsilon_N}{S_N} \right]^2 \right] \quad (7)$$

در رابطه (7)، f_N ، بیانگر کسر حجمی حفره‌های مستعد جوانه‌زنی است و بیشترین مقدار جوانه‌زنی حفره می‌باشد. ϵ_N ، کرنش میانگین جوانه‌زنی بوده و S_N انحراف معیار می‌باشد. فرض می‌شود که تابع جوانه‌زنی A/f_N یک توزیع نرمال دارد.

3- معادلات تحلیلی

با در نظر گرفتن $f^* = q_1 f^* = \bar{f}^2$ خواهیم داشت $f^* = \bar{f}^2 = (q_1 f^*)^2 = q_3 f^{*2}$ ، با فرض $q = q_2$ ، رابطه (1) به صورت رابطه (8) خلاصه خواهد شد:

$$\omega = \left(\frac{\sigma_e}{\bar{\sigma}} \right)^2 + 2(\bar{f}) \cdot \cosh \left(\frac{3}{2} q \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right) - (1 + \bar{f}^2) = 0 \quad (8)$$

قانون تعامد برای مسایل پلاستیک به صورت رابطه (9) بوده و در نتیجه تانسور گام کرنش پلاستیک b به صورت (9) تعریف می‌گردد:

$$b = \bar{b} + \frac{\text{tr}b}{3} I = \lambda \cdot \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} \quad (9)$$

$$b = \lambda \left\{ \frac{2\sigma_e}{\bar{\sigma}^2} \cdot \frac{2\sigma_e}{2\sigma} + \frac{q(\bar{f})}{\bar{\sigma}} \cdot \sinh \left(\frac{3}{2} q \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right) \cdot I \right\} \quad (10)$$

در رابطه (10) \bar{b} تانسور گام کرنش انحرافی، I تانسور واحد درجه دوم و λ فاکتور افزایش پلاستیک می‌باشد. این عبارات می‌توانند به صورت روابط (11) و (12) تعریف گردند:

$$b = \bar{b} + \frac{\text{tr}b}{3} I = \lambda \frac{\partial \omega}{\partial \sigma} \quad (11)$$

$$\text{tr}b = \frac{3\lambda q(\bar{f})}{\bar{\sigma}} \cdot \sinh \left(\frac{3}{2} q \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right) \quad (12)$$

گام کار پلاستیک dW ، مربوط به تغییر شکل پلاستیک به صورت رابطه (13) می‌باشد:

$$dW = \sigma \cdot b = \sigma_e \cdot d\bar{\epsilon} \quad (13)$$

و از این‌رو، فاکتور افزایش پلاستیک λ به صورت (14) تعیین می‌گردد:

$$\lambda = \frac{\sigma_e \cdot d\bar{\epsilon}}{\sigma \cdot \frac{\partial \omega}{\partial \sigma}} \quad (14)$$

رابطه تنش مؤثر σ_e براساس معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل به صورت (15) بیان می‌شود:

$$\sigma_e = \left[\frac{r_0(\sigma_y - \sigma_z)^2 + r_{90}(\sigma_z - \sigma_x)^2 + r_0 r_{90}(\sigma_x - \sigma_y)^2}{r_{90}(r_0 + 1)} \right]^{1/2} \quad (15)$$

در رابطه (15) پارامترهای r_0, r_{90} به ترتیب ضرایب ناهمسانگردی در زوایای صفر و 90 درجه نسبت به راستای نورد ورق می‌باشند. در شرایط ناهمسانگردی نرمال (همسانگردی صفحه‌ای) $r_0 = r_{90} = r_{45} = r$ ، تنش مؤثر هیل به صورت (16) و (17) خواهد شد:

$$\sigma_e = \phi \sigma_1 \quad (16)$$

$$\phi = \left(1 - \left[\frac{2r}{1+r} \right] \alpha + \alpha^2 \right)^{1/2} \quad (17)$$

در روابط (16) و (17)، r ضریب ناهمسانگردی نرمال می‌باشد. با جایگزینی مقدار $r=1$ ، تنش مؤثر σ_e براساس معیار تسلیم همسانگرد فون-میزز بدست می‌آید. مقدار نسبت تنش α به صورت رابطه (18) بیان می‌شود:

$$\alpha = \left(\sigma_2 / \sigma_1 \right) \quad (18)$$

فاکتور افزایش پلاستیک به صورت رابطه (18) و (19) بدست می‌آید:

$$\lambda = \frac{\phi \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}}{2C_1 \phi + C_2(1 + \alpha)} \quad (19)$$

استفاده و کاربرد مدل GTN برای شکست نرم نیازمند چندین ویژگی ماده می‌باشد که تحت عنوان پارامترهای گارسون به عنوان ورودی به مدل اعمال می‌شود. این پارامترهای ماده به صورت تجربی اندازه‌گیری می‌شوند. در بیشتر موارد، بجای برآورد و تعیین دقیق این پارامترها، تنها تخمین و تقریبی از آنان امکان‌پذیر است [27-29]. هدف از این پژوهش بررسی اثر پارامترهای مدل GTN بر روی شکل و نحوه تغییرات نمودار حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد مقدار پارامتر کسر حجمی بحرانی حفره f_C نقش بسیار مهمی ایفا می‌نماید. این اهمیت بدین خاطر است که در این مقدار از کسر حجمی حفره، فرآیند رشد حفره به شدت تسریع یافته و به انعقاد حفره‌ها منجر می‌شود.

2- مدل آسیب GTN

تابع پتانسیل آسیب پلاستیک در مدل ساختاری اصلاح شده گارسون و تورگارد برای ماده شکل‌پذیر متخلخل به صورت رابطه (1) بیان می‌گردد:

$$\omega = \left(\frac{\sigma_e}{\bar{\sigma}} \right)^2 + 2q_1(f^*) \cdot \cosh \left(\frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right) - (1 + q_3(f^*)^2) = 0 \quad (1)$$

در رابطه (1)، σ_e تنش مؤثر با توجه به معیار تسلیم و $\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n$ ، تنش سیلان ماده، K ضریب استحکام ماده، $\bar{\epsilon}$ کرنش معادل و n توان کرنش سختی می‌باشند. σ_h تنش میانگین (تنش هیدرواستاتیک)، f^* کسر حجمی حفره با در نظر گرفتن پدیده انعقاد و q_1, q_2, q_3 ثوابت مدل GTN می‌باشند. تورگارد دریافت که مقادیر $q_2 = 1$ و $q_1 = 1.5$ به نتایج بهتری می‌انجامد. تابع کسر حجمی حفره f^* به صورت رابطه (2) تعریف می‌گردد:

$$f^*(f) = \begin{cases} f & \text{برای } f < f_C \\ f_C + \frac{1/q_1 - f_C}{f_f - f_C} \cdot (f - f_C) & \text{برای } f_C \leq f \leq f_f \end{cases} \quad (2)$$

در رابطه (2)، f_C کسر حجمی حفره بحرانی و f_f کسر حجمی حفره در نقطه شکست می‌باشد. انعقاد حفره زمانی به وقوع می‌پیوندد که کسر حجمی حفره به مقدار بحرانی f_C برسد و ماده زمانی می‌شکند که کسر حجمی حفره به مقدار f_f برسد. مقدار q_3 از رابطه (3) بدست می‌آید:

$$q_3 = (q_1)^2 \quad (3)$$

رشد و تکامل کسر حجمی حفره شامل دو بخش می‌باشد: رشد حفره-های موجود و جوانه‌زنی حفره‌های جدید. افزایش کسر حجمی حفره در مدل به صورت رابطه (4) بیان می‌گردد:

$$f = f_g + f_n \quad (4)$$

از آنجایی که ماتریس ماده، تراکم ناپذیر است، قسمت رشد حفره‌های موجود، f_g ، مربوط به بخش کرنش پلاستیک می‌باشد و به صورت رابطه (5) بیان می‌گردد:

$$f_g = (1 - f) \cdot \bar{\epsilon}_p \quad (5)$$

در رابطه (5)، $\bar{\epsilon}_p$ نشان‌دهنده کرنش پلاستیک معادل می‌باشد. جوانه‌زنی حفره، f_n ، می‌تواند توسط کرنش یا تنش القا شود. کسر حجمی حفره‌های جوانه زده توسط عبارت (6) بیان می‌گردد:

$$f_n = A\bar{\epsilon}_p + B\sigma_h \quad (6)$$

فرض می‌شود که جوانه‌زنی حفره، توسط کرنش پلاستیک کنترل می‌گردد، لذا در رابطه بالا، $A > 0$ و $B=0$ می‌باشد. تنش هیدرواستاتیک σ_h به صورت رابطه $\sigma_h = 1/3 \sigma_{kk}$ تعریف می‌گردد. در این رابطه $\sigma_{kk} = \delta_{ij} \sigma_{ij}$ بوده و δ_{ij} دلتای کرانکر و $i, j=1,2,3$ می‌باشند. مقدار A از رابطه (7) بدست می‌آید:

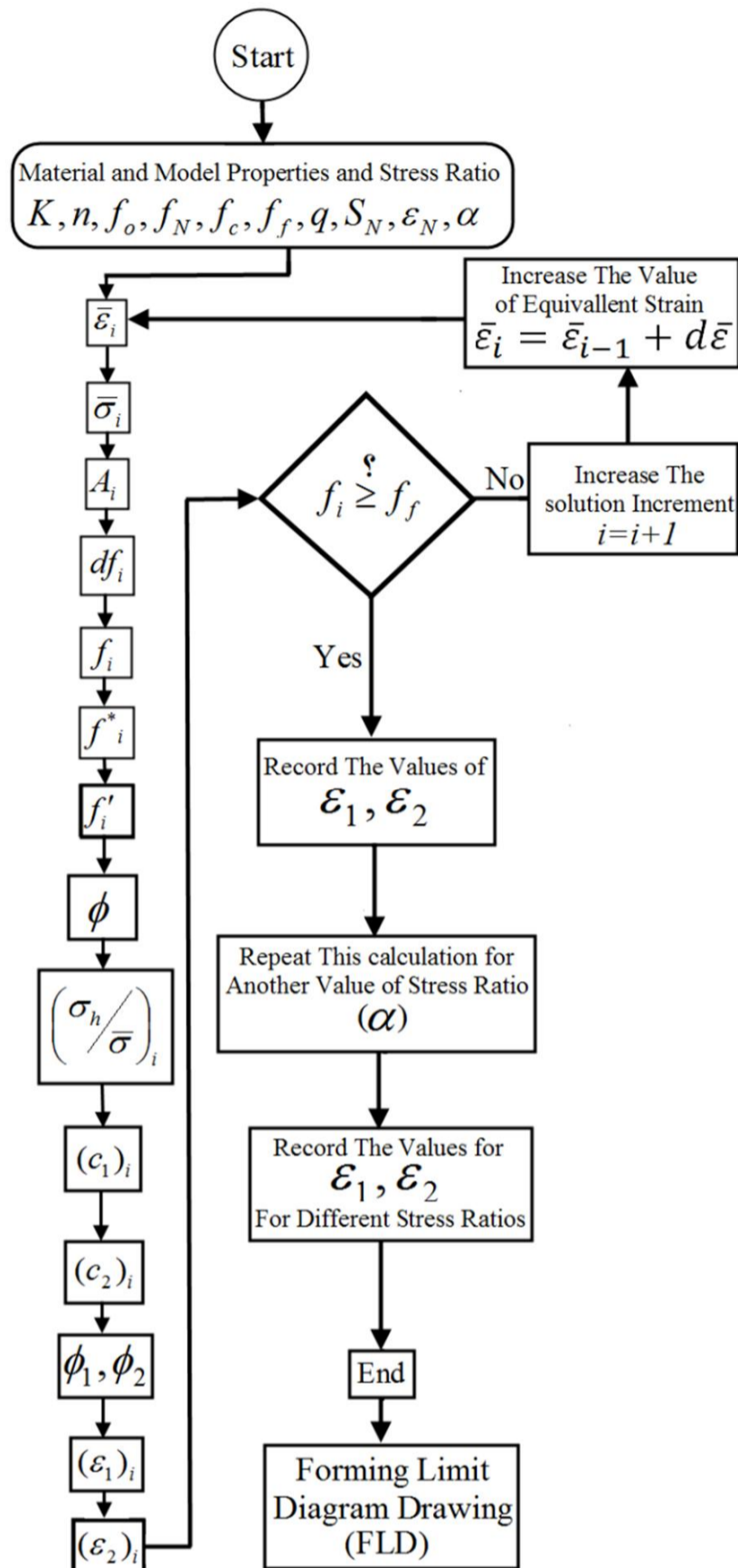


Fig. 2 The calculation procedure flowchart in this research
 شکل 2 فلوجارت روند محاسبات صورت گرفته در این پژوهش

$$\frac{(\sigma_h)_i}{\bar{\sigma}_i} = \frac{1}{3\phi} (1 + \alpha) \quad (35)$$

11- محاسبه مقدار پارامتر $(C_1)_i$ در نمو i ام:

$$(C_1)_i = \left\{ 1 + (f_i)^2 - 2(f_i) \cdot \cosh \left[\frac{3}{2} q \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right)_i \right] \right\}^{1/2} \quad (36)$$

12- محاسبه مقدار پارامتر $(C_2)_i$ در نمو i ام:

$$(C_2)_i = q(f_i) \cdot \sinh \left(\frac{3}{2} q \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right)_i \right), i = 1, 2, \dots, N \quad (37)$$

13- محاسبه مقدار پارامترهای ϕ_1 و ϕ_2 :

$$\phi_1 = 2 - \left[\frac{2r}{(1+r)} \right], \phi_2 = 2\alpha - \left[\frac{2r}{(1+r)} \right] \quad (38)$$

14- محاسبه مقدار پارامتر ϵ_1 در نمو i ام:

$$(\epsilon_1)_i = (\epsilon_1)_{i-1} + \frac{(C_1)_i \cdot \phi_1 + (C_2)_i \cdot \phi}{2(C_1)_i \cdot \phi + (C_2)_i \cdot (1 + \alpha)} \times 0.0001 \quad (39)$$

$$C_1 = \left\{ 1 + (f)^2 - 2(f) \cdot \cosh \left[\frac{3}{2} q \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right) \right] \right\}^{1/2} \quad (20)$$

$$C_2 = q(f) \cdot \sinh \left(\frac{3}{2} q \left(\frac{\sigma_h}{\bar{\sigma}} \right) \right) \quad (21)$$

بنابراین، روابط بین مؤلفه‌های گام کرنش پلاستیک $(d\epsilon_1, d\epsilon_2)$ و گام کرنش معادل $d\bar{\epsilon}$ به صورت رابطه (22) قابل محاسبه می‌باشد. که در آن مقادیر پارامترهای ϕ_1, ϕ_2 به صورت رابطه (23) محاسبه می‌گردد.

$$d\bar{\epsilon} = \frac{2C_1\phi + C_2(1 + \alpha)}{C_1\phi_1 + C_2\phi} d\epsilon_1 = \frac{2C_1\phi + C_2(1 + \alpha)}{C_1\phi_2 + C_2\phi} d\epsilon_2 \quad (22)$$

$$\phi_1 = 2 - \left[\frac{2r}{(1+r)} \right], \quad \phi_2 = 2\alpha - \left[\frac{2r}{(1+r)} \right] \quad (23)$$

4- روند محاسبات

فلوجارت روند محاسبات در شکل 2 نشان داده شده است. در شرایط بارگذاری متناسب، برای یک مسیر کرنش مشخص، نسبت‌های کرنش و تنش ثابت هستند و مقادیر این نسبت‌ها طبق روابط (24) و (25) قابل محاسبه می‌باشند.

$$\rho = \frac{d\epsilon_2}{d\epsilon_1} = \text{ctc1} = c \quad (24)$$

$$\alpha = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \text{ctc2} = \frac{2\rho + 1}{2 + \rho} \rightarrow \alpha = \frac{2c + 1}{2 + c} \quad (25)$$

در روند حل، مقدار کرنش پلاستیک معادل به صورت نموی $(d\bar{\epsilon} = 0.0001)$ افزایش داده می‌شود و بر اساس روابط مذکور مقدار نمو کسر حجمی حفره بدست می‌آید. مراحل حل به صورت زیر می‌باشد:

1- محاسبه مقدار کرنش پلاستیک معادل $(\bar{\epsilon}_i)$ در هر نمو:

$$\bar{\epsilon}_i = \bar{\epsilon}_{i-1} + 0.0001, \quad \bar{\epsilon}_0 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (26)$$

2- محاسبه مقدار تنش سیلان پلاستیک $\bar{\sigma}_i$ در هر نمو:

$$\bar{\sigma}_i = K \bar{\epsilon}_i^n, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (27)$$

3- محاسبه مقدار ضریب جوانه‌زنی حفره (A_i) در هر نمو:

$$A_i = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \cdot \exp \left[-0.5 \left[\frac{\bar{\epsilon}_i - \epsilon_N}{S_N} \right]^2 \right], \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (28)$$

4- محاسبه مقدار کسر حجمی حفره $(df)_i$ در هر نمو:

$$(df)_i = (1 - f_i) \cdot d\bar{\epsilon}_i + A_i \cdot (0.0001), \quad \bar{\epsilon}_0 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (29)$$

5- محاسبه مقدار کسر حجمی لحظه‌ای حفره f_i در نمو i ام:

$$(f)_i = (f)_{i-1} + (df)_i, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (30)$$

6- محاسبه مقدار کسر حجمی حفره اصلاح شده با در نظر گرفتن انعقاد حفره‌ها در هر نمو:

$$f^*(f_i) = \begin{cases} f_i & \text{برای } f_i < f_c \\ f_c + \frac{1/q_1 - f_c}{f_f - f_c} \cdot (f_i - f_c) & \text{برای } f_c \leq f_i \leq f_f \end{cases} \quad (31)$$

7- محاسبه مقدار کسر حجمی حفره اصلاح شده با ضریب هندسی در هر نمو:

$$\hat{f}_i = q \cdot (f^*)_i \quad (32)$$

8- محاسبه مقدار نسبت ϕ به ازای هر نسبت تنش:

$$\phi = \left(1 - \left[\frac{2r}{1+r} \right] \alpha + \alpha^2 \right)^{1/2} \quad (33)$$

9- محاسبه مقدار تنش هیدرواستاتیک در هر نمو:

$$(\sigma_h)_i = \frac{\bar{\sigma}_i}{3\phi} (1 + \alpha) \quad (34)$$

10- محاسبه مقدار نسبت تنش هیدرواستاتیک به تنش سیلان در نمو i ام:

جدول 2 مقادیر پارامترهای مدل GTN [25]

Table 2 The GTN model parameters values [25]

| مقدار متغیر | متغیر |
|-------------|-----------------|
| 1.5 | q_1 |
| 1 | q_2 |
| 2.25 | q_3 |
| 0.1 | S_N |
| 0.1 | ε_N |
| 0.0002 | f_0 |
| 0.0134 | f_c |
| 0.0106 | f_N |
| 0.02163 | f_f |

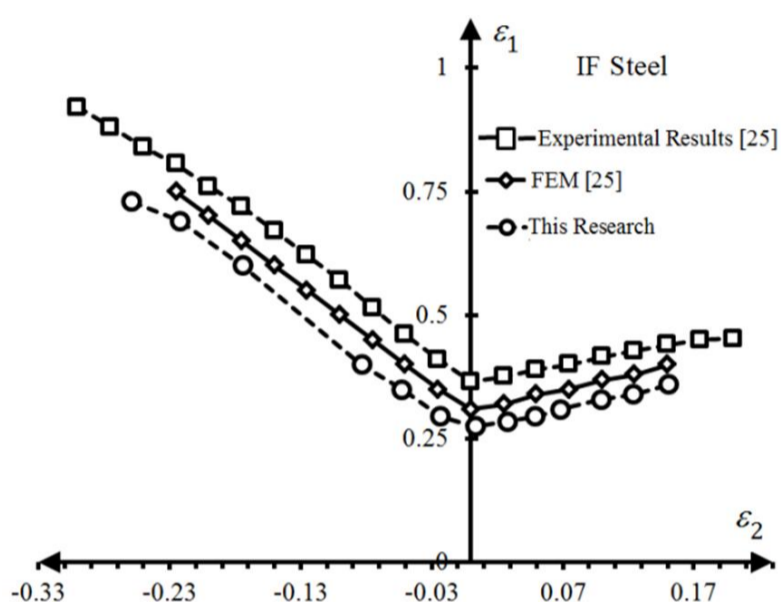


Fig. 3 Experimental and FEM FLDs in Ref.[25] and their comparison with this research FLD for IF steel

شکل 3 منحنی‌های حد شکل‌دهی تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مرجع [25] و مقایسه آن‌ها با منحنی حد شکل‌دهی مطالعه حاضر برای فولاد IF

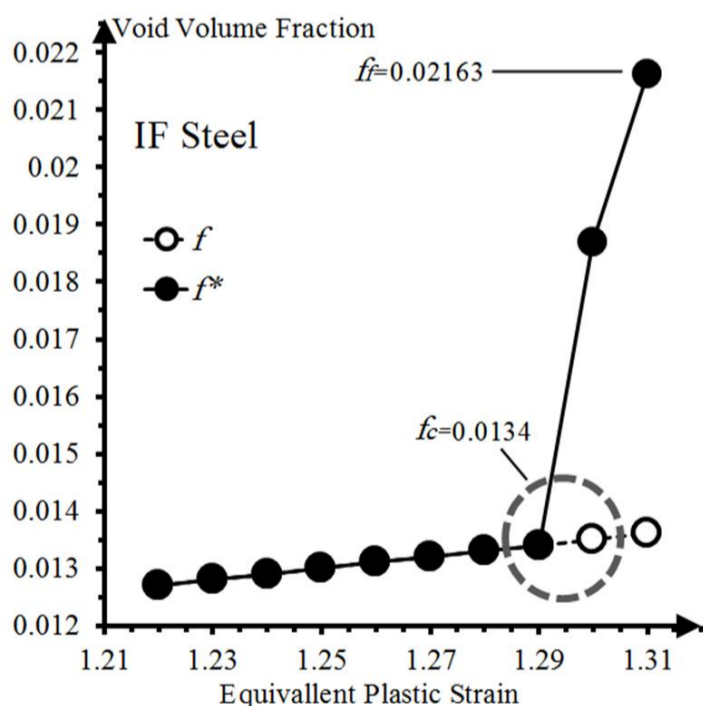


Fig. 4 Void volume fraction versus equivalent plastic strain for IF steel with material properties in Ref.[25]

شکل 4 نمودار کسر حجمی حفره در مقابل کرنش پلاستیک معادل برای فولاد IF با مشخصات ماده موجود در مرجع [25]

مقایسه دیگری با پژوهش صورت گرفته توسط آچاریا و چار [30] انجام شده است. ماده مورد مطالعه 22Ni Mo Cr 37 بوده است و از مدل GTN همسانگرد جهت پیش‌بینی شکست و آسیب در لوله از جنس ماده فوق استفاده گردید. ضرایب ثابت مربوط به رابطه ساختاری ماده و ثوابت مدل

15- محاسبه مقدار پارامتر ε_2 در نمو i ام :

$$(\varepsilon_2)_i = (\varepsilon_2)_{i-1} + \frac{(C_1)_i \cdot \Phi_2 + (C_2)_i \cdot \Phi}{2(C_1)_i \cdot \Phi + (C_2)_i \cdot (1 + \alpha)} \times 0.0001 \quad (40)$$

روند محاسبات فوق به ازای در نظر گرفتن یک مقدار مشخص برای پارامتر نسبت تنش، یک نقطه از منحنی حد شکل‌دهی را محاسبه و ارائه می‌دهد. با تکرار روند محاسبات فوق، برای مقادیر دیگر α نقاط دیگر منحنی حد شکل‌دهی نیز بدست می‌آید.

5- نتایج و بحث

جهت صحت‌آزمایی روند تحلیلی صورت گرفته در این پژوهش، منحنی‌های حد شکل‌دهی مربوط به آلیاژهای مورد مطالعه سایر پژوهشگران به صورت تحلیلی با بکارگیری نرم‌افزار متلب پیش‌بینی و تعیین گردید. نتایج حاصل از روش تحلیلی با نتایج تجربی و عددی سایر پژوهشگران در دو بخش بر پایه معیار همسانگرد فون-میززو و ناهمسانگرد هیل مقایسه گردیده است. در ادامه اثر پارامترهای مدل GTN شامل کسرهای حجمی حفره f_0, f_c, f_N, f_f و همچنین ضریب ناهمسانگردی نرمال و نمای کرنش سختی بر روی منحنی حد شکل‌دهی و روند رشد کسر حجمی حفره مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است.

1-5- بررسی مدل GTN بر پایه معیار همسانگرد فون-میززو

شکل 3 منحنی حد شکل‌دهی عباسی و همکاران [25] حاصل از آزمایشات تجربی بر روی فولاد IF و شبیه‌سازی اجزای محدود را در مقایسه با منحنی حد شکل‌دهی حاصل از حل تحلیلی صورت گرفته در این پژوهش نشان می‌دهد. ضرایب ثابت مربوط به رابطه ساختاری ماده و ثوابت مدل GTN به ترتیب در جدول‌های 1 و 2 ارائه گردیده است. این پژوهشگران در روند شبیه‌سازی خود مطابق مدل GTN اثر انعقاد حفره را با لحاظ نمودن پارامتر f_c در نظر گرفتند. همانطور که مشاهده می‌شود مطابقت خوبی بین منحنی حد شکل‌دهی حاصل از حل تحلیلی با شبیه‌سازی اجزای محدود وجود دارد. اما با منحنی تجربی اختلاف دارد. این اختلاف می‌تواند ناشی از خطا در اندازه‌گیری دقیق مقدار بحرانی f_c باشد. بدین منظور در ادامه اثر پارامتر کسر حجمی حفره بحرانی f_c بر روی منحنی حد شکل‌دهی و روند رشد کسر حجمی حفره مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل 4 منحنی کسر حجمی حفره در مقابل مقدار کرنش پلاستیک معادل برای ماده مرجع [25] بر اساس محاسبات تحلیلی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که حل تحلیلی به خوبی قادر است اثر انعقاد حفره را در فرآیند رشد و تکامل حفره پیش‌بینی نماید. مقدار کسر حجمی حفره از مقدار اولیه f_0 افزایش یافته تا به مقدار بحرانی f_c برسد. حال از این لحظه مقدار f ، افزایش شدیدتری یافته تا در نهایت به مقدار کسر حجمی شکست f_f برسد. از اینرو پیش‌بینی صحیح لحظه وقوع انعقاد حفره و مقدار کسر حجمی حفره در لحظه انعقاد از اهمیت بسزایی برخوردار است.

جدول 1 مقادیر ضریب و رابطه ساختاری ماده [25]

Table 1 The constitutive equation and its values [25]

| مقدار متغیر | متغیر |
|---------------------------------------|------------------------------|
| 435 MPa | Strength Coefficient(K) |
| 0.23 | StrainHardening Exponent (n) |
| $\bar{\sigma} = K\bar{\varepsilon}^n$ | Strain Hardening Law |

بوده است و از مدل GTN ناهمسانگرد بر پایه معیار هیل جهت پیش‌بینی شکست و منحنی حد شکل‌دهی استفاده گردید. ضرایب ثابت مربوط به رابطه ساختاری ماده و ثوابت مدل GTN به ترتیب در جدول‌های 5 و 6 ارائه گردیده است. شکل 6 نشان‌دهنده منحنی حد شکل‌دهی حاصل از حل تحلیلی و مقایسه آن با منحنی حد شکل‌دهی تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مرجع [26] می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود در شرایط ناهمسانگردی نرمال بر اساس معیار ناهمسانگرد هیل نیز مطابقت نسبتاً خوب بین نتایج حاصل از این پژوهش و نتایج حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود مرجع [26] وجود دارد. اما با نتایج تجربی اختلاف دارد. البته رفتار منحنی تجربی خیلی منطقی بنظر نمی‌رسد. در اینجا دلایل اختلاف علاوه بر خطا در اندازه‌گیری دقیق مقدار بحرانی f_c ، می‌تواند ناشی از خطا در اندازه‌گیری دقیق مقادیر ضریب ناهمسانگردی r باشد.

عباسی و همکاران [32]، در پژوهش دیگر خود از مدل GTN برای پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی ورق‌های فلزی جوش داده شده با دو ضخامت متفاوت استفاده نمودند. ماده مورد مطالعه ایشان ورق فولاد IF با

به ترتیب در جدول‌های 3 و 4 ارائه گردیده است. کسر حجمی حفره در این ماده و رشد آن با مقدار کرنش پلاستیک معادل مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه بین نتایج حاصل از حل تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود در شکل 5 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود شکل 5 نشانگر مطابقت خوب بین نتایج حاصل از حل تحلیلی با نتایج کسر حجمی حفره حاصل از پژوهش مرجع [30] بر پایه کد المان محدود می‌باشد. همچنین محل مشخص شده با دایره بیانگر توانایی مدل تحلیلی ارائه شده در این پژوهش در پیش‌بینی صحیح انعقاد حفره می‌باشد که در پیش‌بینی رفتار شکست ماده اهمیت زیادی دارد.

5-2- بررسی مدل GTN بر پایه معیار ناهمسانگرد هیل

جهت صحت‌آزمایی حل تحلیلی صورت گرفته در این پژوهش بر پایه مدل GTN با معیار ناهمسانگرد هیل، مقایسه با پژوهش صورت گرفته توسط مین و همکاران [26]، انجام شده است. ماده مورد مطالعه، آلیاژ آلومینیوم 5052

جدول 3 مقادیر ضریب و رابطه ساختاری ماده [30]

Table 3 The constitutive equation and its values [30]

| مقدار متغیر | متغیر |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| 950 MPa | Strength Coefficient (K) |
| 0.13 | Strain Hardening Exponent (n) |
| $\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$ | Strain Hardening Law |

جدول 4 مقادیر پارامترهای مدل GTN برای ماده مرجع [30]

Table 4 The GTN model parameters values [30]

| مقدار متغیر | متغیر |
|-------------|--------------|
| 1.5 | q_1 |
| 1 | q_2 |
| 2.25 | q_3 |
| 0.10 | S_N |
| 0.25 | ϵ_N |
| 0.0001 | f_0 |
| 0.028 | f_c |
| 0.008 | f_N |
| 0.18 | f_f |

جدول 5 مقادیر ضریب و رابطه ساختاری آلومینیوم 5052 [26]

Table 5 The constitutive equation and its values [26]

| مقدار متغیر | متغیر |
|-------------------------------------|---------------------------------|
| 424 MPa | Strength Coefficient (K) |
| 0.28 | Strain Hardening Exponent (n) |
| $\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n$ | Strain Hardening Law |
| 0.785 | Anisotropy Coefficient (r) [31] |

جدول 6 مقادیر پارامترهای مدل GTN آلومینیوم 5052 [26]

Table 6 The GTN model parameters values [26]

| مقدار متغیر | متغیر |
|-------------|--------------|
| 1.5 | q_1 |
| 1 | q_2 |
| 2.25 | q_3 |
| 0.10 | S_N |
| 0.1028 | ϵ_N |
| 0.002978 | f_0 |
| 0.030103 | f_c |
| 0.0249 | f_N |
| 0.04854 | f_f |

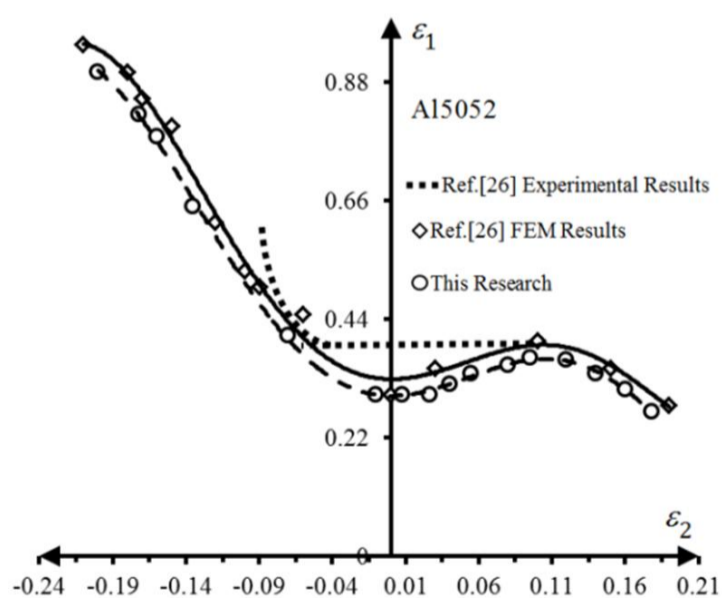


Fig. 6 The comparison of experimental and FEM FLDs of Ref.[26] and this research results

شکل 6 مقایسه منحنی‌های حد شکل‌دهی تجربی و حاصل از شبیه‌سازی اجزای محدود مرجع [26] و این پژوهش

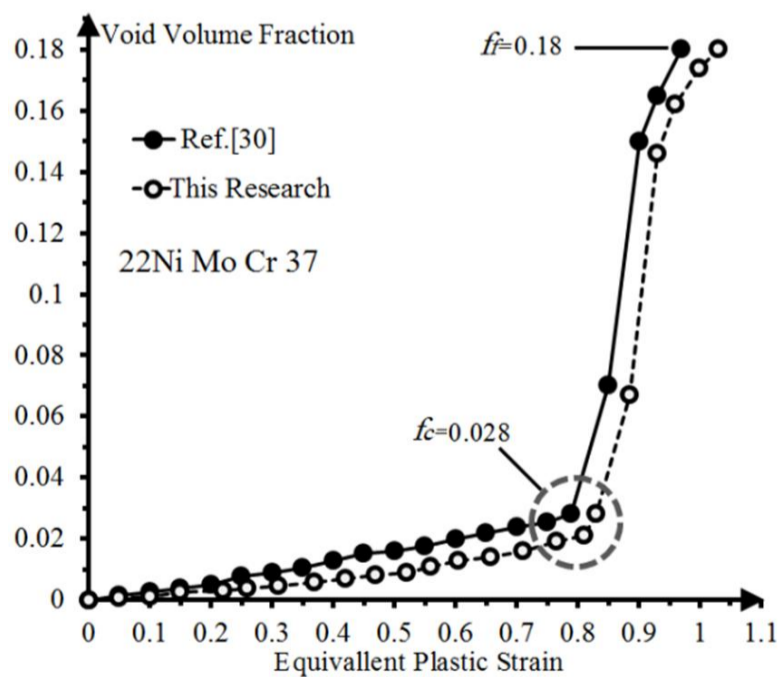


Fig. 5 Void volume fraction versus equivalent plastic strain for IF steel with material properties in Ref.[25]

شکل 5 مقایسه کسر حجمی حفره ماده مرجع [30] با مقادیر حاصل از این پژوهش [25]

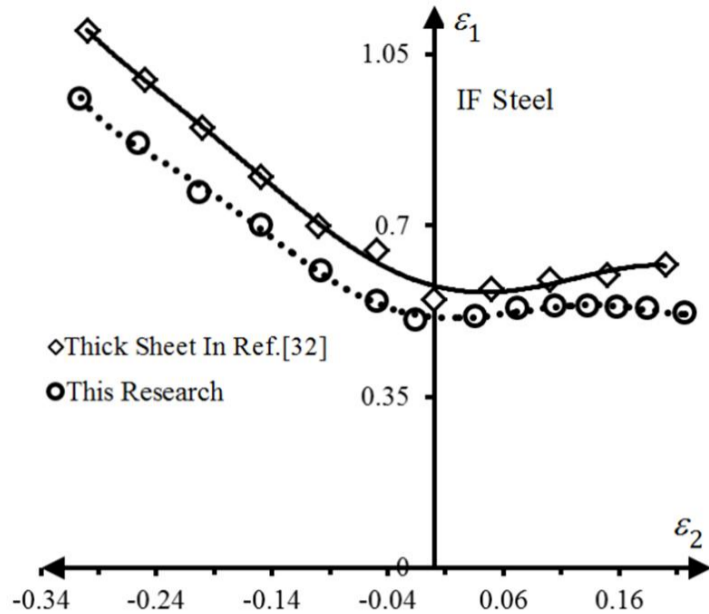


Fig. 8 The FLD of Ref.[32] and this research FLD for thick sheet of IF steel

شکل 8 منحنی حد شکل‌دهی مرجع [32] و این پژوهش برای ورق فولاد IF ضخیم

منحنی حد شکل‌دهی بر اساس اطلاعات ماده موجود در مرجع [25] و براساس روند حل تحلیلی، پارامتر کسر حجمی اولیه حفره در مقادیر 0.0001، 0.0002 و 0.0003 انتخاب گردید. نتایج حاصل از این مقادیر کسر حجمی اولیه حفره به صورت نمودار حد شکل‌دهی در شکل 9 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار اولیه کسر حجمی حفره، سطح منحنی حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد و شکل منحنی تغییر نمی‌کند. این امر منجر به بهبود شکل‌پذیری ورق می‌گردد اما تأثیر این تغییرات بر روی منحنی حد شکل‌دهی بسیار ناچیز می‌باشد.

5-3-2- بررسی اثر پارامتر کسر حجمی حفره بحرانی (f_c)

به منظور بررسی اثر پارامتر کسر حجمی حفره بحرانی (f_c) بر روی منحنی حد شکل‌دهی بر اساس اطلاعات ماده موجود در مرجع [25]، پارامتر کسر حجمی بحرانی حفره در مقادیر 0.011، 0.012، 0.0134 و 0.014 انتخاب گردید. نتایج حاصل از این مقادیر کسر حجمی حفره بحرانی در شکل 10 نشان داده شده‌اند.

مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار کسر حجمی حفره بحرانی (f_c)، سطح منحنی حد شکل‌دهی به سمت پایین کاهش می‌یابد و در واقع باعث کاهش شکل‌پذیری ماده می‌گردد. در شکل 11 نتایج حاصل از این بررسی به

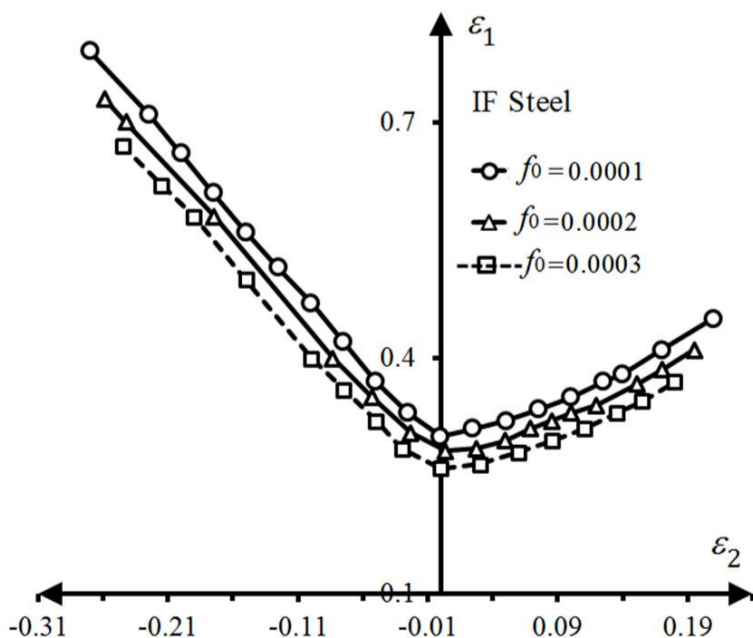


Fig. 9 The FLDs for different values of f_0 for IF steel in Ref.[25]

شکل 9 منحنی‌های حد شکل‌دهی به ازای مقادیر مختلف f_0 برای ورق فولاد IF مرجع [25]

ضخامت‌های 0.8 میلی‌متر و 1.2 میلی‌متر می‌باشد. ضرایب ثابت مربوط به رابطه ساختاری ماده و ثوابت مدل GTN به ترتیب در جدول‌های 7 و 8 ذکر گردیده‌اند. منحنی‌های حد شکل‌دهی ترسیم شده توسط عباسی و همکاران [32]، برای دو ضخامت ورق 0.8 میلی‌متر و 1.2 میلی‌متر و مقایسه آن‌ها با منحنی‌های حد شکل‌دهی حاصل از حل تحلیلی به ترتیب در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود مطابقت نسبتاً خوب بین نتایج حاصل از حل تحلیلی با نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود مشاهده می‌گردد. همانطور که ملاحظه می‌گردد با افزایش ضخامت ورق، سطح منحنی حد شکل‌دهی به صورت چشمگیر افزایش یافته و میزان شکل‌پذیری ماده، بهبود قابل توجهی یافته است.

5-3-3- بررسی اثر پارامترهای مدل GTN بر روی منحنی حد شکل‌دهی و روند رشد حفره

5-3-3-1- بررسی اثر پارامتر کسر حجمی اولیه حفره (f_0)

جهت بررسی تأثیر مقدار پارامتر کسر حجمی اولیه حفره (f_0) بر روی

جدول 7 مقادیر ضریب و رابطه ساختاری فولاد IF موجود در مرجع [32]

| 1.2 mm | 0.8 mm | ضخامت ورق |
|--------|--------|--|
| 0.227 | 0.224 | n |
| 493 | 491 | $K(\text{MPa})$ |
| 1.97 | 1.94 | r_0 |
| 2.03 | 1.98 | r_{45} |
| 2.37 | 2.25 | r_{90} |
| 2.10 | 2.04 | $\bar{r} = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$ |

جدول 8 مقادیر پارامترهای مدل GTN فولاد IF موجود در مرجع [32]

| 1.2 mm | 0.8 mm | ضخامت ورق |
|--------|--------|--------------|
| 0.005 | 0.005 | f_0 |
| 0.01 | 0.01 | f_N |
| 0.02 | 0.02 | f_C |
| 0.06 | 0.05 | f_f |
| 0.13 | 0.08 | ϵ_N |
| 0.07 | 0.06 | S_N |

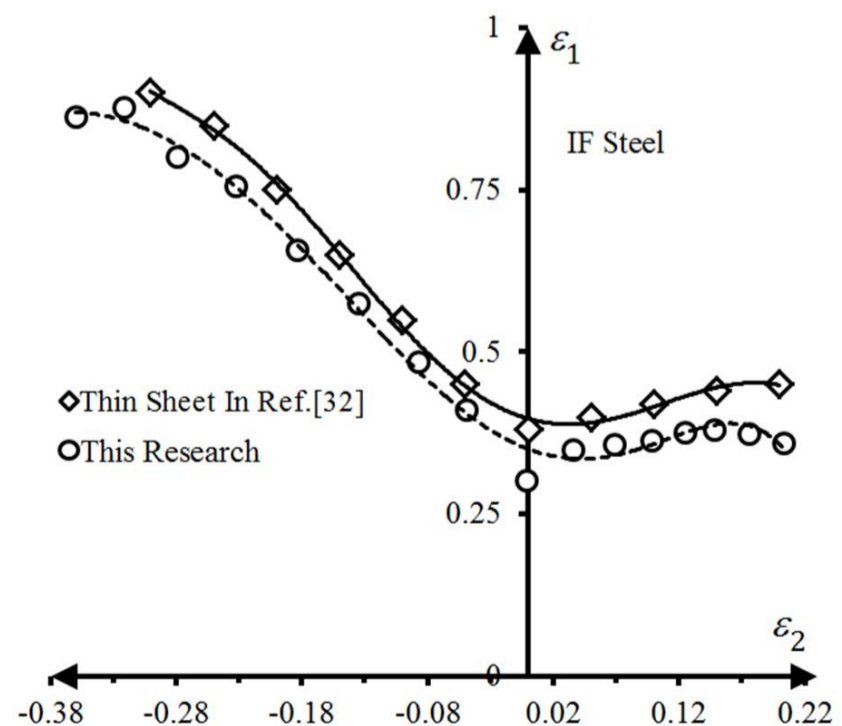


Fig. 7 The FLD of Ref.[32] and this research FLD for thin sheet of IF steel

شکل 7 منحنی حد شکل‌دهی مرجع [32] و پژوهش حاضر برای ورق فولاد IF نازک

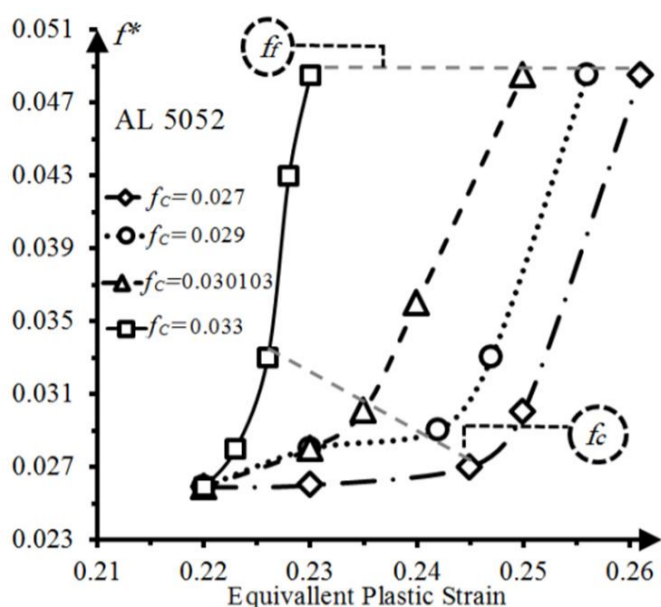


Fig. 12 VVF. versus equivalent plastic strain, AL5052 [26]
 شکل 12 کسر حجمی حفره در مقابل کرنش پلاستیک معادل آلومینیوم 5052 [26]

منحنی حد شکل‌دهی بر اساس اطلاعات ماده موجود در مرجع [25] پارامتر کسر حجمی نرمال حفره در مقادیر 0.005، 0.0106 و 0.015 انتخاب گردید. نتایج حاصل، در شکل 13 نشان داده شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود، با کاهش مقدار کسر حجمی نرمال حفره (f_N) سطح منحنی حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. در واقع، کاهش مقدار کسر حجمی نرمال حفره باعث بهبود شکل‌پذیری ماده می‌گردد. اما آنچه به وضوح از شکل 13 مشاهده می‌گردد، تأثیر چشمگیر مقدار کسر حجمی نرمال حفره بر روی منحنی حد شکل‌دهی می‌باشد. در سمت چپ منحنی حد شکل‌دهی تغییرات منحنی حد شکل‌دهی با تغییرات مقدار کسر حجمی نرمال حفره به صورت خطی است. اما در سمت راست منحنی حد شکل‌دهی با افزایش مقدار کسر حجمی نرمال حفره، شیب منحنی حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد.

5-3-4- بررسی اثر پارامتر کسر حجمی حفره در شکست (f_f)

به منظور بررسی اثر پارامتر کسر حجمی حفره در نقطه شکست (f_f) بر روی منحنی حد شکل‌دهی، بر اساس اطلاعات ماده موجود در مرجع [25]، پارامتر (f_f) در مقادیر 0.015، 0.02163 و 0.025 انتخاب گردید. منحنی‌های حد شکل‌دهی مربوط به این مقادیر، در شکل 14 با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. مشاهده می‌شود برخلاف روند نتایج بخش‌های قبلی با افزایش مقدار کسر حجمی حفره در نقطه شکست (f_f)، سطح منحنی حد شکل‌دهی افزایش یافته و باعث بهبود شکل‌پذیری ماده می‌گردد.

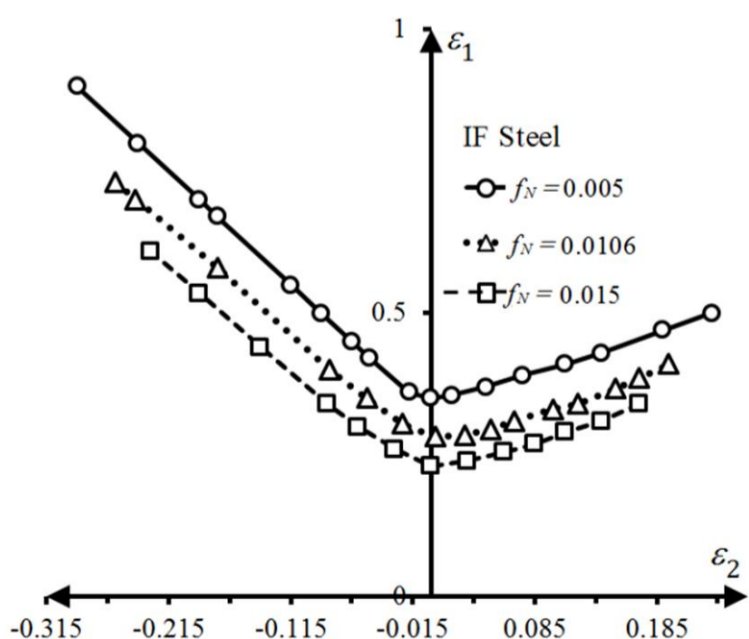


Fig. 13 The FLDs for different values of f_N for IF steel [25]
 شکل 13 منحنی‌های حد شکل‌دهی به ازای مقادیر مختلف f_N ماده مرجع [25]

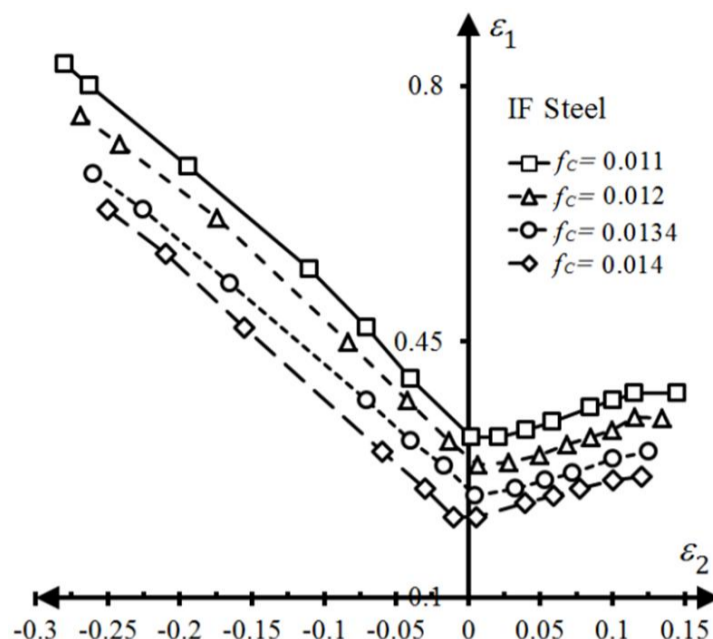


Fig. 10 The FLDs for different values of f_c for IF steel in [25]
 شکل 10 FLD های مختلف به ازای مقادیر مختلف (f_c) برای فولاد IF مرجع [25]

صورت کسر حجمی حفره در مقابل کرنش پلاستیک معادل نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار پارامتر f_c مقدار کرنش پلاستیک معادل در لحظه وقوع انقباض حفره، به مقادیر کوچکتر نزول پیدا می‌کند. و با افزایش مقدار f_c سرعت وقوع انقباض حفره به شدت افزایش می‌یابد و ماده در کرنش پلاستیک معادل کوچکتر به مقدار کسر حجمی حفره در نقطه شکست یعنی f_f می‌رسد و شکست ناشی از رشد حفره زودتر اتفاق می‌افتد. لذا تأثیر این تغییرات بر روی منحنی حد شکل‌دهی بسیار مهم می‌باشد. از اینرو تعیین مقدار صحیح پارامتر کسر حجمی حفره بحرانی f_c نقش بسیار مهمی در تعیین و پیش‌بینی شکست و منحنی حد شکل‌دهی خواهد داشت.

همچنین رشد کسر حجمی حفره در مقابل کرنش پلاستیک معادل بر اساس داده‌های ماده موجود در پژوهش صورت گرفته توسط مین و همکاران [26] با در نظر گرفتن ناهمسانگردی مورد بررسی قرار گرفت. با انتخاب f_c در مقادیر 0.027، 0.029، 0.030103 و 0.033 مقادیر کسر حجمی بحرانی حفره پس از لحظه وقوع انقباض حفره در شکل 12 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد روند تغییرات مشابه می‌باشد.

5-3-3- بررسی اثر پارامتر کسر حجمی نرمال حفره (f_N)

جهت بررسی تأثیر مقدار پارامتر کسر حجمی نرمال حفره (f_N) بر روی

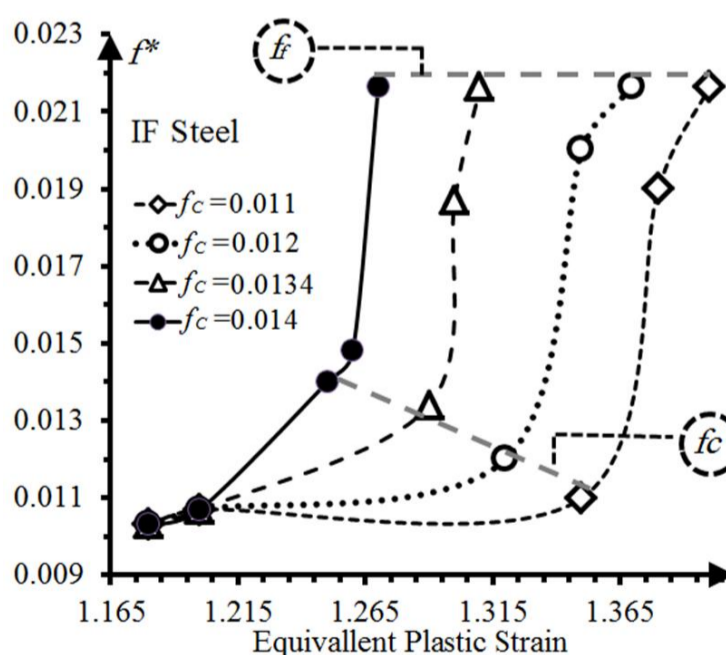


Fig. 11 Void volume fraction versus equivalent plastic strain for IF steel with material properties in Ref.[25]

شکل 11 کسر حجمی حفره در مقابل کرنش پلاستیک معادل برای فولاد IF [25]

جدول 9 مقادیر تغییرات نسبی f و تغییرات نسبی FLD_0 به درصد

Table 9 The Relative variation of f values and FLD_0 in percent

| متغیر | $\frac{\Delta(f)}{(f)_{Initial}}$ (%) | $\frac{\Delta(FLD_0)}{(FLD_0)_{Initial}}$ (%) |
|-------|---------------------------------------|---|
| f_0 | 200 | 15.38 |
| f_c | 27.3 | 52.4 |
| f_N | 200 | 48 |
| f_f | 66.7 | 28 |

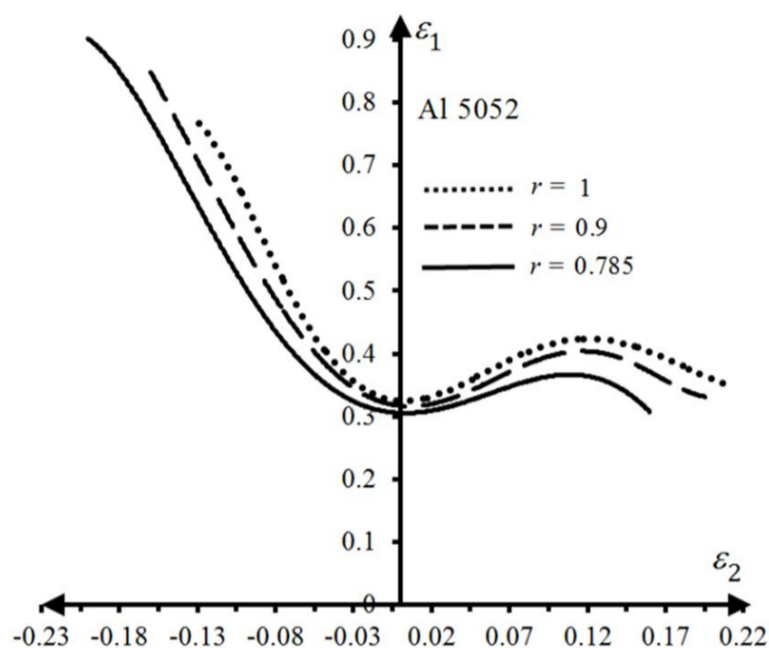


Fig. 15 Comparison of different FLDs for different values of anisotropy coefficient r for Al5052 in Ref.[26]

شکل 15 مقایسه منحنی‌های حد شکل‌دهی به ازای مقادیر مختلف ضریب ناهمسانگردی r برای آلومینیوم 5052 موجود در مرجع [26]

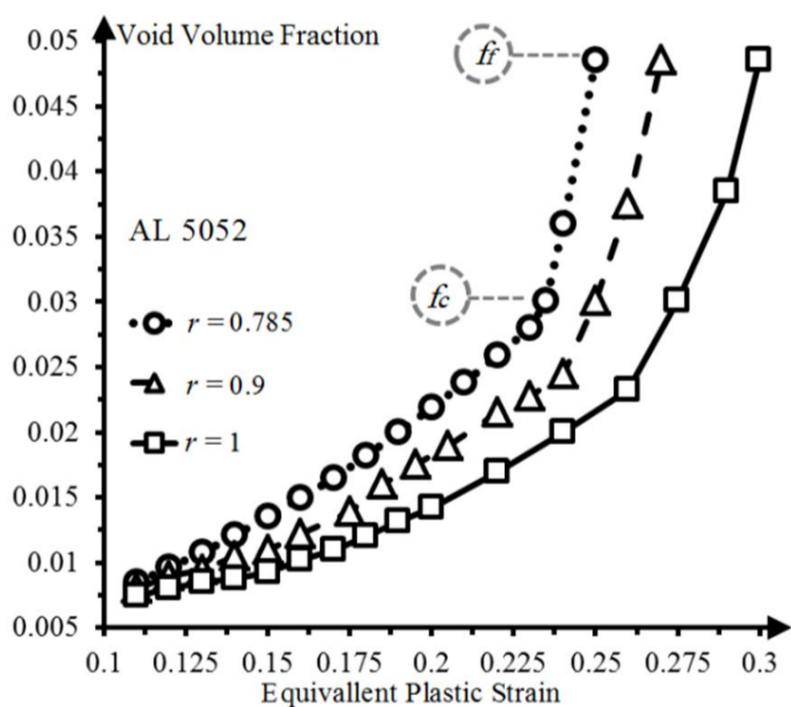


Fig. 16 Void volume fraction versus equivalent plastic strain for Al5052 with material properties in Ref.[26]

شکل 16 روند رشد کسر حجمی حفره در مقابل کرنش پلاستیک معادل برای آلومینیوم 5052 موجود در مرجع [26]

5-3-6- بررسی اثر پارامتر توان کار سختی (n)

به منظور بررسی اثر کار سختی بر روی منحنی حد شکل‌دهی، مقدار توان کار سختی (n) در مقادیر 0.28 مطابق مرجع [26]، و مقدار 0.38 انتخاب گردیده و منحنی حد شکل‌دهی مربوط به هر کدام از مقادیر توان کار سختی در شکل 17 نشان داده شده‌اند. همانطور که از شکل 17 مشاهده می‌گردد با افزایش توان کار سختی n ، سطح منحنی حد شکل‌دهی افزایش یافته است. این نتایج در پیش بینی منحنی حد شکل‌دهی با استفاده از سایر مدل‌های

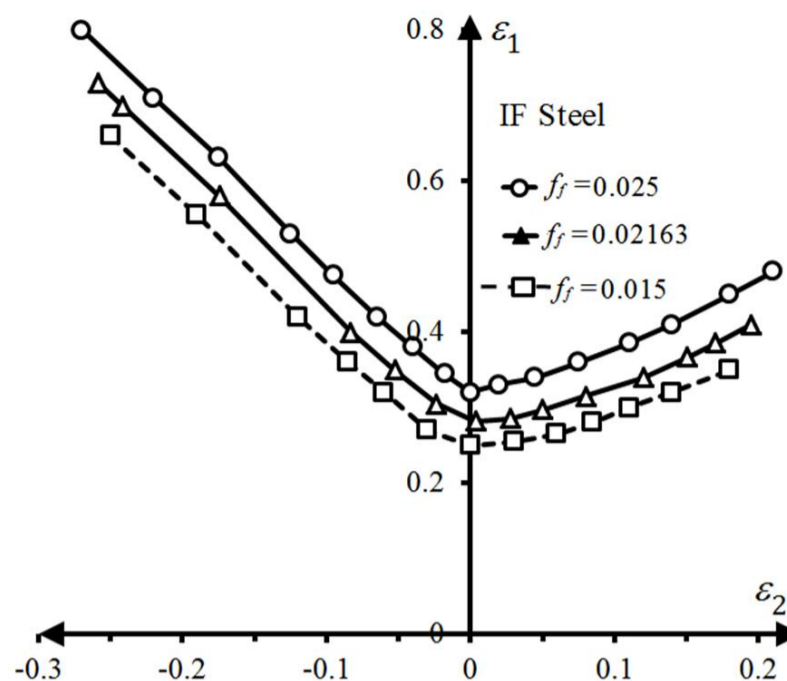


Fig. 14 The FLDs for different values of f_f for IF steel in Ref.[25]

شکل 14 منحنی‌های حد شکل‌دهی به ازای مقادیر مختلف f_f ماده مرجع [25]

جهت بررسی اهمیت تأثیر مقادیر پارامترهای کسر حجمی حفره در مدل GTN شامل f_0, f_c, f_N, f_f بر روی منحنی حد شکل‌دهی، در جدول 9 مقادیر نسبت تغییرات حد شکل‌دهی در کرنش $\epsilon_2 = 0$ (به مقدار اولیه بر حسب درصد در مقابل نسبت تغییرات مقادیر کسر حجمی حفره اولیه، بحرانی، نرمال و شکست به مقدار اولیه بر حسب درصد برای فولاد IF مرجع [25] و بر اساس محاسبات صورت گرفته به وسیله روند تحلیلی این پژوهش ارائه گردیده است. مشاهده می‌شود که در میان چهار پارامتر کسر حجمی حفره در مدل GTN شامل f_0, f_c, f_N, f_f ، پارامتر کسر حجمی حفره بحرانی f_c بیشترین اثر را بر روی مقدار FLD_0 و منحنی حد شکل‌دهی دارد. با تغییرات نسبی 27.3% مقدار پارامتر، مقدار FLD_0 به مقدار نسبی 52.4% افزایش یافته است. پارامتر کسر حجمی اولیه (f_0) کمترین اثر را بر روی پارامتر FLD_0 و منحنی حد شکل‌دهی دارد. با تغییرات نسبی 200% این پارامتر، مقدار FLD_0 به مقدار نسبی 15.38% افزایش یافته است.

5-3-5- بررسی اثر پارامتر ضریب ناهمسانگردی (r)

به منظور بررسی اثر پارامتر ضریب ناهمسانگردی r بر روی منحنی حد شکل‌دهی در مدل GTN، با استفاده از ویژگی‌های ماده مربوط به آلیاژ آلومینیوم 5052 موجود در مرجع [26]، مطابق جدول‌های 5 و 6، پارامتر r در مقادیر 0.785، 0.9 و 1 انتخاب گردید. منحنی‌های حد شکل‌دهی مربوط به این مقادیر در شکل 15 با یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. همانگونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ضریب ناهمسانگردی r ، یک چرخشی در دو بال دوطرف نمودار حد شکل‌دهی به سمت بالا بوجود می‌آید. این امر، وقوع شکست را به تأخیر می‌اندازد. اما تغییر بسیار ناچیزی در سطح منحنی (مقدار FLD_0) به وجود می‌آید. قابل توجه است که این رفتار با اثر پیش‌بینی شده در منحنی حد شکل‌دهی با استفاده از سایر مدل‌های شکست، بخصوص در سمت راست نمودار، کاملاً متفاوت است [33]. همچنین روند رشد کسر حجمی حفره با افزایش مقدار کرنش پلاستیک معادل مورد بررسی قرار گرفت. این روند رشد در شکل 16 نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش مقدار پارامتر ناهمسانگردی r ، مقدار کرنش پلاستیک در لحظه وقوع انعقاد حفره و شکست ناشی از حفره‌دار شدن افزایش می‌یابد. یعنی با افزایش پارامتر r لحظه وقوع انعقاد حفره و شکست ناشی از حفره‌دار شدن به تأخیر می‌افتد.

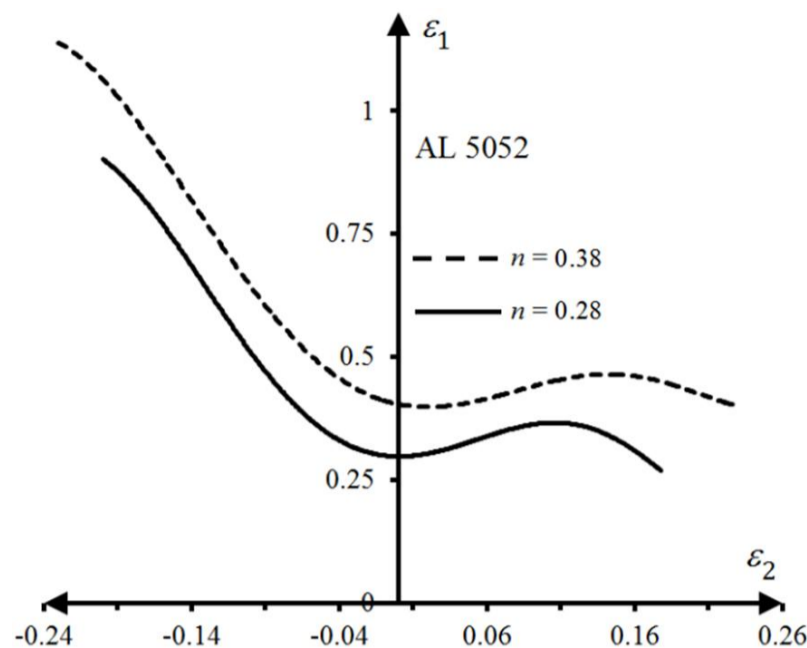


Fig. 17 Comparison of different FLDs for different values of strain hardening coefficient n for Al5052 in Ref.[26]

شکل 17 مقایسه منحنی‌های حد شکل‌دهی به ازای مقادیر مختلف توان کار سختی n برای آلومینیوم 5052 موجود در مرجع [26]

شکست نیز بدست آمده است [33].

6- نتیجه گیری

در این پژوهش، مدل GTN، جهت پیش‌بینی شکل‌پذیری ورق فلزی مورد استفاده قرار گرفت. با حل تحلیلی مکانیک شکست با استفاده از پارامترهای مدل GTN تعیین شده به وسیله برخی پژوهشگران، منحنی حد شکل‌دهی محاسبه و ترسیم گردید. منحنی‌های حد شکل‌دهی با منحنی‌های حد شکل‌دهی عددی تعیین شده توسط پژوهشگران مذکور مقایسه گردیده و مطابقت قابل قبولی نشان دادند. سپس اثر پارامترهای مدل GTN، علاوه بر ضریب ناهمسانگردی و توان کارسختی بر روی منحنی حد شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفته است.

- اثر پارامتر کسر حجمی اولیه حفره (f_0) بر روی منحنی حد شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. مشخص گردید که افزایش مقدار این پارامتر، باعث کاهش سطح منحنی حد شکل‌دهی و بهبود شکل‌پذیری ماده می‌گردد. اما تأثیر آن در مقایسه با سایر پارامترها ناچیز است.

- اثر پارامتر کسر حجمی حفره بحرانی (f_c) در روند رشد کسر حجمی حفره، مورد بررسی قرار گرفت. افزایش این پارامتر باعث کاهش مقدار کرنش پلاستیک معادل در لحظه وقوع انعقاد حفره، می‌گردد. شدت وقوع انعقاد حفره و سرعت آن به شدت افزایش می‌یابد و ماده سریعتر و در کرنش پلاستیک معادل کوچکتر به مقدار کسر حجمی حفره در نقطه شکست یعنی (f_f) می‌رسد و شکست زودتر اتفاق می‌افتد. لذا منجر به پایین آمدن سطح منحنی حد شکل‌دهی و کاهش میزان شکل‌پذیری ماده می‌شود.

- اثر پارامتر کسر حجمی نرمال حفره (f_N) بر روی منحنی حد شکل‌دهی مورد بحث و بررسی قرار گرفت. ملاحظه گردید که با افزایش مقدار این پارامتر، سطح منحنی حد شکل‌دهی و شکل‌پذیری ماده کاهش می‌یابد.

- اثر پارامتر کسر حجمی حفره در نقطه شکست (f_f) بر روی منحنی حد شکل‌دهی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده گردید که برخلاف پارامترهای قبلی با افزایش مقدار این پارامتر، افزایش سطح منحنی حد شکل‌دهی و بهبود شکل‌پذیری ماده حاصل می‌گردد.

- جهت بررسی مقایسه‌ای اثر پارامترهای کسرهای حجمی حفره شامل f_0, f_c, f_N, f_f بر روی پارامتر FLD_0 و منحنی حد شکل‌دهی، درصد تغییرات نسبی پارامتر FLD_0 در مقابل درصد تغییرات نسبی کسر حجمی حفره مورد بررسی قرار گرفت. ملاحظه گردید که به ترتیب پارامترهای (f_c) و سپس (f_N) بیشترین تأثیر و (f_f) و در نهایت (f_0) کمترین اثر را بر روی منحنی حد شکل‌دهی دارند. از اینرو مشخص نمودن مقدار صحیح و بهینه پارامتر کسر حجمی حفره بحرانی (f_c) نقش تأثیرگذاری در پیش‌بینی روند رشد کسر حجمی حفره، پیش‌بینی شکست و منحنی حد شکل‌دهی خواهد داشت.

- اثر پارامتر توان کارسختی بر نمودار حد شکل‌دهی بررسی گردید. مشخص گردید که با افزایش توان کار سختی، سطح منحنی حد شکل‌دهی افزایش می‌یابد. این نتایج در پیش‌بینی منحنی حد شکل‌دهی با استفاده از سایر مدل‌های شکست نیز بدست آمده است.

- با افزایش مقدار ضریب ناهمسانگردی r ، در دو طرف منحنی حد شکل‌دهی چرخش ایجاد می‌شود. در این شرایط با افزایش مقدار ضریب ناهمسانگردی، کرنش دیرتر به مقدار حدی رسیده و شکست دیرتر رخ می‌دهد. قابل توجه است که این رفتار با اثر پیش‌بینی شده در منحنی حد شکل‌دهی با استفاده از سایر مدل‌های شکست، بخصوص در سمت راست نمودار، کاملاً متفاوت است.

7- مراجع

- [1] D. Banabic, H. J. Bunge, K. Pohlandt, A. E. Tekkaya, *Formability of Metallic Materials*, Springer, Berlin, Vol. 1, pp. 205-208, 2000.
- [2] M. A. Khaleel, H. M. Zbib, E. A. Nyberg, Constitutive modeling of deformation and damage in superplastic materials, *International Journal of Plasticity*, Vol. 17, pp. 277-296, 2001.
- [3] J. Lin, B. H. Cheong, X. Yao, Universal multi-objective function for optimizing superplastic-damage constitutive equations, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 125-126, pp. 199-205, 2002.
- [4] JHAC. Mackenzie, JW. Hancock, DK. Brown, On the Influence of State of Stress on Ductile Failure Initiation in High Strength Steels, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 9, pp. 167-188, 1977.
- [5] J. Gurland, Observations on the fracture of cementite particles in a spheroidized 1.05% C steel deformed at room temperature, *Acta Metallurgica*, Vol. 20, pp. 735-741, 1972.
- [6] As. Argon, J. Im, Separation of second phase particles in spheroidized 1045 steel, Cu-0.6pct Cr alloy and maraging steel in plastic straining, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 6A, pp. 839-851, 1975.
- [7] G. Rosellier, Ductile Fracture Models and Their Potential in Local Approach of Fracture, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 105, pp. 97-106, 1987.
- [8] Al. Gurson, Continuum Theory of Ductile Rupture by Void

- the Prediction of Ductile Fracture Occurrence: an inverse approach, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, pp. 311-316, 1996.
- [22] A. Mkaddem, R. Hambli, A. Potiron, Comparison between Gurson and Lemaitre damage models in wiping die bending processes, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 23, pp. 451-461, 2004.
- [23] X. D. Qian, Y. S. Choo, J. Liew, J. Y. R. Wardenier, Simulation of Ductile Fracture of Circular Hollow Section Joints Using the Gurson Model, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, pp. 1161-1169, 2005.
- [24] X. Teng, T. Wierzbick, S. Hiermaier, I. Rohr, Numerical prediction of fracture in the Taylor test, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42:2929, pp. 1253-1276, 2005.
- [25] M. Abbasi, M. A. Shafaat, M. Ketabchi, D. F. Haghshenas, and Mo. Abbasi, Application of the GTN model to predict the forming limit diagram of IF-Steel, *Journal of Mechanical science and Technology*, Vol. 26(2), pp. 345-352, 2012.
- [26] H. Min, L. Fuguo, W. Zhigang, Forming Limit Stress Diagram Prediction of Aluminum Alloy 5052 Based on GTN Model Parameters Determined by In Situ Tensile Test, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 24, pp. 378-386, 2011.
- [27] L. F. Peng, F. Liu, J. Ni, et al., Size Effects in Thin Sheet Metal Forming and Its Elastic- Plastic Constitutive Model. *Materials & Design.*, Vol. 28(5), pp. 1731-1736, 2007.
- [28] G. Vadillo, R. Zaera, J. Fernandez-Saez, Consistent Integration of the constitutive Equations of Gurson Materials Under Adiabatic Conditions, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 197 (15), pp. 1280-1295, 2008.
- [29] F. Barlat, H. Avetiz, J. W. Yoon, et al., Linear Transformation-Based Anisotropic Yield Functions, *International Journal of Plasticity*, Vol. 21(5), pp. 1009-1039, 2005.
- [30] S. Acharyya, S. Dhar, A complete GTN model for prediction of ductile failure of pipe, *Journal of Materials Science*, Vol. 43, pp. 1897- 1909, 2008.
- [31] L. Fratini, G. Ambrogio, R. D. Lorenzo, L. Filice, F. Micari, Influence mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 53, pp. 207- 210, 2004.
- [32] M. Abbasi, B. Bagheri, M. Ketabchi, D. F. Haghshenas, Application of response surface methodology to drive GTN model parameters and determine the FLD of tailor welded blank, *Computational Materials Science*, Vol. 53, pp. 368-376, 2012.
- [33] W. F. Hosford, R. M. Caddell, *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University press, Cambridge, Vol. 1, pp. 237-254, 2007.
- Nucleation and Growth: Part I - Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, pp. 2-15, 1977.
- [9] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of Cup-Cone Fracture in a Round Tensile Bar, *Acta Metallurgica*, Vol. 32, pp. 157-169, 1984.
- [10] Yiu. Cheng, Numerical Investigation on Void Growth Ahead of A Blunt Crack Tip, In: *International Conference on nonlinear Mechanics, ICNM*, Shanghai, pp. 175-180, 1998.
- [11] K. Decamp, L. Bauvineau, J. Besson, A. Pineau, Size and geometry effects on ductile rupture of notched bars in a C-Mnsteel:experiments and modelling, *International Journal of Fracture*, Vol. 88, pp. 1-18, 1997.
- [12] AR. Ragab, Prediction of ductile fracture in axisymmetric tension by void coalescence, *International Journal of Fracture*, Vol. 105, pp. 391-409, 2000.
- [13] A. Pineau, Notch fracture toughness of a cast duplex stainless steel: modelling of experimental scatter and size effect, *14th International Conference of Structural Mechanics, Smirt 14*, Lyon, pp. 475-482, 1997.
- [14] J. H. Lee, Y. Zhang, A Finite-Element Work-Hardening Plasticity Model of the Uniaxial Compression and Subsequent Failure of Porous Cylinders Including Effects of Void Nucleation and Growth—Part I: Plastic Flow and Damage, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 116, pp. 69-79, 1994.
- [15] Y. P. Qiu, G. J. Weng, Plastic potential and yield function of porous materials with aligned and randomly oriented spheroidal voids, *International Journal of Plasticity*, Vol. 6, pp. 271-290, 1993.
- [16] Z. L. Zhang, C. Thaulow, J. Odegard, A complete Gurson Model based approach for ductile fracture, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 67(2), pp. 155-168, 2000.
- [17] M. Rakin, Z. Cvijovic, V. Grabulov, S. Putics, Prediction of ductile fracture initiation using micromechanical analysis, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 71, (4-6), pp. 813-827, 2004.
- [18] T. V. Pavankumar, M. K. Samal, J. Chattopadhyay, B. K. Dutta, H. S. Kushwaha, E. Roos, Transferability of fracture parameters from specimens to component level, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, Issue 5, pp. 386-399, 2005.
- [19] M. Brunet, F. Morestin, H. Walter, Damage Identification for Anisotropic Sheet Metals Using a Non- Local Damage Model, *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 13, pp. 35-57, 2004.
- [20] M. Brunet, S. Mguil, F. Morestin, Analytical and Experimental Studies of Necking in Sheet Metal Forming Processes, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80-81, pp. 40-46, 1998.
- [21] L. Fratini, A. Lombardo, F. Micari, Material Characterization for