



Experimental Study and Numerical Simulation of Ductile Fracture on In-Situ Tensile Specimens Using GTN Micromechanical Damage Model

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Gholipour H.¹ MSc,

Biglari F.R.*¹ PhD

How to cite this article

Gholipour H, Biglari F.R. Experimental Study and Numerical Simulation of Ductile Fracture on In-Situ Tensile Specimens Using GTN Micromechanical Damage Model. Modares Mechanical Engineering. 2020;20(8):2087-2099.

ABSTRACT

The present study is devoted to experimental and numerical investigation of in-situ tensile tests to recognize the mechanisms of ductile fracture under different stress states. The GTN model, which is a micromechanical based damage model, has used for numerical simulations. The parameters related to this model for St12 steel were identified by response surface method (RSM) through minimizing the difference between numerical and experimental results of the tensile test on a standard specimen. The void related parameters of GTN model were determined 0.00107, 0.00716, 0.01, and 0.15 for f_v , f_N , f_d and f_p respectively. After calibrating the damage model for the studied material, the tensile tests were carried out on the in-situ specimens with different geometries. The fractographic analysis was performed to identify the ductile fracture under a wide range of stress states and two failure mechanisms were observed. The calibrated damage model was applied to FE simulations of in-situ tensile specimens for numerical study of the experimentally observed fracture phenomenon. The extracted numerical results showed a good agreement with experimental observations comparing load-displacement plots with a margin of error within 5%. The location of fracture initiation, crack growth orientation, and the displacement at fracture zone in numerical studies also showed close correspondence with experiments.

Keywords Ductile Fracture; GTN Model; Void Nucleation; Growth and Coalescence; Stress State

¹Manufacturing and Production Department, Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: Mechanical Engineering Faculty, Amirkabir University of Technology, Hafez Street, Tehran, Iran. Postal Code: 158754413.

Phone: +98 (21) 64543434

Fax: -

biglari@aut.ac.ir

Article History

Received: June 29, 2019

Accepted: May 19, 2020

ePublished: August 15, 2020

CITATION LINKS

[1] A continuous damage mechanics model for ... [2] A criterion for ductile fracture by the ... [3] On the ductile enlargement of voids in triaxial ... [4] On the mechanisms of ductile failure ... [5] Continuum theory of ductile rupture ... [6] Void nucleation effects in biaxially ... [7] Influence of voids on shear band ... [8] Influence of void nucleation on ... [9] Approximate models for ductile ... [10] Analysis of the cup-cone fracture in ... [11] A ductile fracture analysis using a local ... [12] Damage-based finite-element modeling ... [13] Modelling of damage and failure in ... [14] Application of response surface methodology ... [15] A study of local deformation and damage ... [16] Tearing failure of ultra-thin sheet-metal involving ... [17] Investigation of tube fracture in the ... [18] Plastic instability under plane ... [19] Comparison between Lemaitre ... [20] Damage mechanics analysis ... [21] Some phenomenological and ... [22] Identification of material parameters ... [23] Description of numerical techniques ... [24] Numerical investigations on sheet ... [25] Simulation of ductile fracture of S235JR ... [26] Gurson model parameters for ductile fracture ... [27] Numerical integration of an advanced ... [28] Experimental characterization and numerical ... [29] Experimental and numerical analysis ... [30] On the extension of the Gurson-type porous ... [31] Numerical determination of the forming limit ... [32] Experimental and numerical analysis of ... [33] Modified GTN model for a broad range of stress ... [34] A complete Gurson model approach ... [35] Micromechanical modelling of the behaviour ... [36] Estimation of Gurson material parameters in ... [37] Identification of material parameters of the Gurson ... [38] Modification of the Gurson model for shear ... [39] Constitutive modeling of void shearing effect in ... [40] An extended GTN model for ductile fracture ... [41] Failure analysis based on microvoids damage ...

بررسی تجربی و شبیه‌سازی عددی شکست نرم در نمونه‌های کششی با به‌کارگیری مدل آسیب میکرومکانیکی جی‌تی‌ان

حامد قلی‌پور MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

فریدرضا بیگلری PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

چکیده

مطالعه حاضر به بررسی تجربی و عددی نمونه‌های کششی برای مطالعه و شناسایی مکانیزم شکست نرم تحت حالت‌های مختلف تنش می‌پردازد. مدل جی‌تی‌ان که یک مدل آسیب میکرومکانیکی است، برای شبیه‌سازی‌های عددی استفاده شده است. پارامترهای مرتبط با این مدل برای فولاد اس‌تی‌۱۲ با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) با حداقل اختلاف بین نتایج عددی و تجربی آزمون کشش بر روی نمونه استاندارد تعیین شدند. پارامترهای مربوط به حفره در مدل جی‌تی‌ان به ترتیب f_0 ، f_1 ، f_2 و f_3 برای $0/15$ و $0/01$ ، $0/00716$ ، $0/00107$ و f_c تعیین شدند. پس از کالیبراسیون مدل آسیب برای ماده مورد مطالعه، آزمون‌های کشش بر روی نمونه‌های کششی با هندسه‌های مختلف انجام شدند. بررسی شکست‌نگاری برای فهم مکانیزم شکست نرم تحت طیف گسترده‌ای از حالت‌های تنش انجام و دو مکانیزم شکست شناسایی شد. مدل آسیب کالیبره‌شده، برای شبیه‌سازی امان محدود نمونه‌های کششی به‌منظور مطالعه عددی مکانیزم‌های شکست مشاهده‌شده در آزمون‌های تجربی استفاده شد. نتایج عددی استخراج‌شده مطابقت خوبی با مشاهدات تجربی داشت، به‌طوری که نمودار نیرو- جابه‌جایی حاشیه خط حدود ۵٪ را نشان می‌دهد. محل شروع شکست، جهت رشد ترک و مقدار جابه‌جایی در نقطه شکست در مطالعات عددی نیز نشان‌دهنده مطابقت نزدیک با آزمایشات تجربی بود.

کلیدواژه‌ها: شکست نرم، مدل جی‌تی‌ان، جواهرزنی، رشد و به‌هم‌پیوستن حفره‌ها، حالت تنش

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۳۰

*نویسنده مسئول: biglari@aut.ac.ir

مقدمه

در حوزه شکست روش‌های مختلفی برای مطالعه و بررسی شکست نرم وجود دارد. مکانیک آسیب پیوسته یکی از پرکاربردترین روش‌های مدل‌سازی آسیب نرم است که از رویکردهای مختلفی برای فرمول‌بندی معادلات ساختاری آسیب نرم استفاده می‌کند. یکی از این رویکردها تعریفی پدیدارشناختی از آسیب ارائه می‌دهد. [۱] با استفاده از مفهوم تنش موثر یک مدل برای این روش پیشنهاد کرد. روش‌های پدیدارشناختی براساس چارچوب ترمودینامیکی بوده و واماندگی در آنها سازگاری کامل با قوانین ترمودینامیک دارد.

برخی از مدل‌های مکانیک آسیب پیوسته بر مبنای توصیف میکرومکانیکی ماده استوار است. از جنبه میکرومکانیکی، یکی از

مکانیزم‌های شکست نرم در فلزات و آلیاژها در حین تغییر شکل پلاستیک تحت عنوان جواهرزنی، رشد و به‌هم‌پیوستن میکروحفره‌ها شناخته می‌شود. مک‌کلینتوک [۲]، رایس و تریسی [۳] و هانکوک و مک‌نزی [۴] مطالعات اولیه را درباره جواهرزنی، رشد و به‌هم‌پیوستن حفره‌های استوانه‌ای و کروی در ماده جامد پلاستیک با ابعاد بی‌نهایت انجام داده‌اند. ایده اولیه مدل آسیب جی‌تی‌ان که یک مدل آسیب میکرومکانیکی بر مبنای جواهرزنی، رشد و به‌هم‌پیوستن میکروحفره‌ها است، توسط گرسون مطرح شد. گرسون [۵] یک مدل میکرومکانیکی پیشنهاد کرد که تاثیر رشد حفره‌های کروی را بر روی رفتار ماده حاوی حفره توصیف می‌کرد. پس از ارایه مدل توسط گرسون تحقیقات بسیاری بر توسعه کاربرد این مدل برای تحلیل شکست نرم در شرایط مختلف انجام شده است. چو و نیلمن [۶] مدل‌هایی برای جواهرزنی حفره‌ها پیشنهاد و به مدل گرسون اضافه کردند که با تنش و کرنش پلاستیک کنترل می‌شد. تی‌ورگارد [۷، ۸] کاربرد مدل گرسون را با واردکردن دو پارامتر اضافی برای در نظرگرفتن اثر تداخل حفره‌ها و کارسختی ماده توسعه داد. گولوگانو و همکاران [۹]، مدل گرسون را برای پیش‌بینی شکست نرم برای حفره‌های غیرکروی توسعه دادند. تی‌ورگارد و نیلمن [۱۰] شکست نهایی ماده توسط به‌هم‌پیوستن حفره‌ها را از طریق وابستگی تابع تسلیم به کسر حجمی حفره وارد مدل گرسون کردند. این مدل توسعه‌داده‌شده توسط تی‌ورگارد و نیلمن، از روی مدل گرسون و اصلاحات انجام‌گرفته بر روی آن، به‌عنوان مدل جی‌تی‌ان (گرسون- تی‌ورگارد- نیلمن) شناخته می‌شود که یکی از پرکاربردترین مدل‌های آسیب بر مبنای جواهرزنی، رشد و به‌هم‌پیوستن حفره‌ها در ماده است.

از زمان معرفی مدل آسیب جی‌تی‌ان توسط تی‌ورگارد و نیلمن، مطالعات زیادی بر روی آنالیز خرابی و شکست مواد مختلف با استفاده از قابلیت این مدل انجام گرفته است. بنسیدیک و عماد [۱۱]، به‌منظور آنالیز شکست نرم در فولاد نیکل- کرم آزمون‌های تجربی و مدل‌سازی عددی با استفاده از مدل جی‌تی‌ان بر روی نمونه‌های ناچدار گرد انجام دادند. بوچر و همکاران [۱۲]، برای شبیه‌سازی عددی فرآیند هیدروفرمینگ لوله‌های از جنس فولاد دوفازی از مدل جی‌تی‌ان استفاده کردند. یوسیس‌سانگوک و همکاران [۱۳]، به بررسی آسیب و شکست در فولادهای چندفازی با استحکام بالا پرداخته و برای توصیف شکست نرمی که غالباً در فاز نرم فریت اتفاق می‌افتد، از مدل جی‌تی‌ان استفاده کردند. عباسی و همکاران [۱۴]، به‌منظور به‌دست‌آوردن پارامترهای مدل جی‌تی‌ان از روش سطح پاسخ استفاده کرده و مدل کالیبره‌شده را برای تعیین نمودار حد شکل‌دهی پلانک‌های جوش‌داده‌شده به‌کار بردند. سیریناکون و همکاران [۱۵]، به بررسی تغییر شکل‌های موضعی و آسیب در فولاد دوفازی پرداخته و به‌منظور نشان‌دادن تکامل آسیب در میکروساختار ماده از مدل آسیب جی‌تی‌ان بهره بردند. پارگی در فرآیند برش دقیق ورق‌های بسیار نازک فلزی با استفاده از مدل جی‌تی‌ان توسط وانگ و همکاران [۱۶] بررسی شد.

با صرف‌نظر کردن از کرنش‌های حجمی الاستیک، بنا به اصل پایستگی جرم و تراکم‌ناپذیری پلاستیک $\dot{\rho}_m = 0$ است و عبارت زیر حاصل می‌شود:

$$\dot{f} = -\frac{\dot{\rho}}{\rho_m} = -\frac{\dot{\rho}}{\rho}(1-f) \quad (۴)$$

نرخ کرنش حجمی را می‌توان با در نظر گرفتن اصل پایستگی جرم تعیین کرد.

$$\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_v^e + \dot{\epsilon}_v^p = -\frac{\dot{\rho}}{\rho} \quad (۵)$$

در رابطه بالا $\dot{\epsilon}_v^e$ و $\dot{\epsilon}_v^p$ نرخ کرنش حجمی الاستیک و پلاستیک هستند. به دلیل فرض صلب-پلاستیک بودن ماده در مدل گرسون، بعد از صرف‌نظر کردن از نرخ کرنش الاستیک، نرخ کسر حجمی حفره را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\dot{f} = -\frac{\dot{\rho}}{\rho_m} = \dot{\epsilon}_v^p(1-f) \quad (۶)$$

مطابق با قانون جریان پلاستیک و با در نظر گرفتن تابع تسلیم گرسون خواهیم داشت:

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{\gamma} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = \dot{\epsilon}_d^p + \dot{\epsilon}_v^p = \dot{\gamma} S + \frac{1}{3} \dot{\gamma} f \sigma_y \sinh\left(\frac{3p}{2\sigma_y}\right) I \quad (۷)$$

در رابطه بالا $\dot{\epsilon}_d^p, \dot{\epsilon}_v^p, \dot{\gamma}, \dot{\epsilon}_v^p$ ضریب پلاستیک، کرنش پلاستیک انحرافی، کرنش پلاستیک حجمی و تانسور نرخ کرنش پلاستیک هستند. با جایگزینی $\dot{\epsilon}_v^p$ در رابطه قبلی، قانون تکامل کسر حجمی حفره به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\dot{f} = (1-f)\dot{\epsilon}_v^p = \frac{1}{3}(f-f^2)\dot{\gamma} \sigma_y \sinh\left(\frac{3p}{2\sigma_y}\right) \quad (۸)$$

مدل آسیب جی‌تی‌ان

در مدل گرسون تکامل کسر حجمی حفره به تاریخچه کرنش ماده وابسته نیست و در حالتی که کسر حجمی حفره اولیه صفر باشد هیچ انباشت کسر حجمی حفره‌ای اتفاق نخواهد افتاد. به منظور رفع این نقیصه مدل گرسون چندین مکانیزم برای جوانه‌زنی حفره معرفی شده است تا جوانه‌زنی حفره‌ها براساس تاریخچه کرنش اتفاق بیفتد. چو و نیلمن^[۶] یک قانون برای جوانه‌زنی حفره پیشنهاد دادند که بعداً توسط تورگارد^[۷] در مدل گرسون استفاده شد. مکانیزم جوانه‌زنی حفره‌ها که نتیجه شکست ذرات ناخالصی و یا جدایش ناخالصی‌ها و ذرات فاز ثانویه از ماتریس است، می‌تواند توسط کرنش پلاستیک یا فشار هیدرواستاتیک کنترل شود. تعریف جوانه‌زنی حفره براساس کرنش پلاستیک به صورت زیر است:

$$\dot{f}^n = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\bar{\epsilon}^p - \epsilon_N}{S_N}\right)^2\right] \dot{\epsilon}^p \quad (۹)$$

در رابطه بالا f_N کسر حجمی تمام ذرات دارای پتانسیل برای جوانه‌زنی حفره، ϵ_N کرنش پلاستیک متوسط برای جوانه‌زنی و S_N انحراف استاندارد توزیع است. متغیرهای $\bar{\epsilon}^p$ و $\dot{\epsilon}^p$ کرنش پلاستیک معادل و نرخ کرنش پلاستیک انباشته هستند. در نتیجه تغییر در نرخ کسر حجمی حفره به دلیل جوانه‌زنی حفره‌های جدید و رشد حفره‌های موجود است.

$$\dot{f} = \dot{f}^n + \dot{f}^g \quad (۱۰)$$

از دست رفتن کامل ظرفیت تحمل بار در تابع تسلیم گرسون زمانی اتفاق می‌افتد که $f = 1$ و این مقدار به صورت غیرواقعی بزرگ‌تر

صفدریان^[۱۷] از مدل آسیب جی‌تی‌ان در شبیه‌سازی عددی فرآیند خمش چرخشی برای بررسی شکست لوله استفاده کرده است.

در ادامه مطالعات پیشین انجام گرفته، در کار حاضر مدل آسیب جی‌تی‌ان به منظور بررسی پدیده شکست نرم در ورق‌های فولادی از جنس اس‌تی‌۱۲ (St12) به کار گرفته شده است. بررسی مکانیزم شکست نرم در نمونه‌های آزمون کششی با هندسه‌های مختلف که تحت کشش تک‌محوری شرایط تنش متفاوت در ناحیه شکست ایجاد می‌کنند انجام شده است. به منظور بررسی و مطالعه مکانیزم شکست با استفاده از مدل آسیب جی‌تی‌ان، پارامترهای ورودی مدل مذکور برای مواد تحت مطالعه برای اولین بار و با بهره‌گیری از آزمون‌های تجربی و بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ استخراج شده است. آزمون‌های کشش تک‌محوری و شبیه‌سازی المان محدود با مدل آسیب جی‌تی‌ان کالیبره شده، برای مطالعه شکست در چهار نمونه کششی با هندسه ناچ مختلف به کار گرفته شده‌اند. آنالیز فرکتوگرافی به منظور بررسی مکانیزم شکست نرم تحت شرایط تنش متفاوت در نمونه‌های با هندسه مختلف انجام شده است. همچنین تاثیر تغییرات هندسه نمونه‌ها و شرایط تنش در منطقه تغییر شکل بر روی شکل نهایی لبه شکست در آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار گرفته است.

مدل‌سازی ساختاری مواد حفره‌دار

مدل گرسون

گرسون مدل خود را با استفاده از تئوری پلاستیسیته کران بالایی، به عنوان یک مدل میکرومکانیکی برای توصیف آسیب و شکست نرم ارایه کرد. معادلات حاکم با در نظر گرفتن یک حفره کروی در داخل یک مکعب صلب-پلاستیک به دست آمد. تابع تسلیم مدل گرسون با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی ایزوتروپیک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\Phi(\sigma, k, f) = J_2(S) - \frac{1}{3}\left\{1 + f^2 - 2f \cosh\left(\frac{3p}{2\sigma_y}\right)\right\} \sigma_y^2 \quad (۱)$$

در رابطه بالا σ_y, p, f, J_2 به ترتیب نامتغیر دوم تانسور تنش انحرافی (S)، کسر حجمی حفره، فشار هیدرواستاتیکی و قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک هستند. قانون سخت‌شوندگی ایزوتروپیک را می‌توان به صورت $\sigma_y = k - \sigma_0$ تعریف کرد که k نیروی ترمودینامیکی مربوط به متغیر حالت سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و σ_0 تنش تسلیم اولیه است.

کسر حجمی حفره در مدل گرسون با در نظر گرفتن پایستگی جرم برای ماده صلب-پلاستیک و تراکم‌ناپذیری پلاستیک به دست آمد. چگالی یک المان حجمی نمونه حاوی حفره را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\rho = \rho_m(1-f) \quad (۲)$$

که در آن، ρ چگالی المان حجمی نمونه و ρ_m چگالی ماتریس است. پس از مشتق‌گیری نسبت به زمان نرخ چگالی المان حجمی نمونه را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\dot{\rho} = \dot{\rho}_m(1-f) - \rho_m \dot{f} \quad (۳)$$

پارامترهای کارسختی

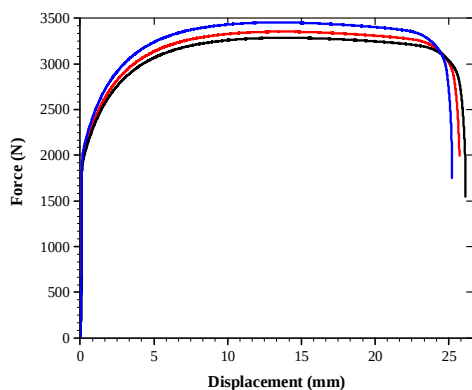
به‌منظور تعیین رفتار مکانیکی و کارسختی فولاد اس‌تی‌۱۲، آزمون کشش بر روی نمونه استاندارد انجام گرفت. به‌منظور حصول اطمینان از تکرارپذیری آزمایش، آزمون سه‌بار تکرار شد که تصویر نمونه‌ها بعد از آزمون در شکل ۲ و نمودار نیرو-جابجایی در نمودار ۱ ارائه شده است. با استفاده از منحنی نیرو-جابجایی به‌دست‌آمده از دستگاه منحنی‌های تنش- کرنش مهندسی و حقیقی استخراج شد که در نمودار ۲ ارائه شده است. به‌منظور توصیف رفتار کارسختی ماده قانون شناخته‌شده سویت [18] به‌کار گرفته شده که مطابق زیر است:

$$Y(\bar{\epsilon}^p) = K(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^p)^n \quad (13)$$

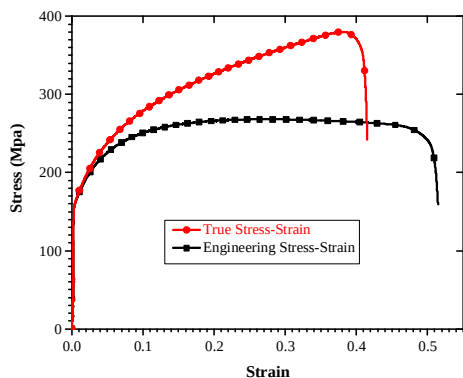
در رابطه بالا ϵ_0, n و K ثابت‌های کارسختی ماده هستند که با استفاده از برازش ناحیه پلاستیک منحنی تنش- کرنش حقیقی به روش حداقل مربعات به‌دست آمده‌اند (نمودار ۳). مقادیر به‌دست‌آمده برای پارامترهای الاستیک- پلاستیک ماده در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲) نمونه‌های استاندارد کشش قبل و بعد از آزمون



نمودار ۱) منحنی نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های استاندارد کشش



نمودار ۲) منحنی تنش- کرنش حقیقی و مهندسی نمونه‌های آزمون کشش

از مشاهدات تجربی است. تورگارد و نیدلمن [10] کسر حجمی حفره موثر، f^* ، را برای مدل کردن از دست‌رفتن سریع ظرفیت تحمل بار در یک سطح واقعی از کسر حجمی حفره پیشنهاد کردند که توسط تابع زیر تعریف می‌شود:

$$f^* = \begin{cases} f & \text{for } f < f_c \\ f_c + \left(\frac{1}{q_1} - f_c\right) \frac{f - f_c}{f_f - f_c} & \text{for } f_c \leq f \leq f_f \end{cases} \quad (11)$$

در رابطه بالا f_c کسر حجمی حفره بحرانی است که حفره‌ها شروع به هم‌پیوستن می‌کنند و f_f کسر حجمی حفره در نقطه شکست است. تکامل آسیب سه مکانیزم جوانه‌زنی، رشد و به هم‌پیوستن حفره‌ها را شامل می‌شود. زمانی که کسر حجمی حفره‌ها کمتر از f_c است کسر حجمی حفره موثر، f^* ، دو مکانیزم جوانه‌زنی و رشد را شامل می‌شود در صورتی که مکانیزم به هم‌پیوستن حفره‌ها زمانی فعال می‌شود که کسر حجمی حفره‌ها بیشتر از f_c است.

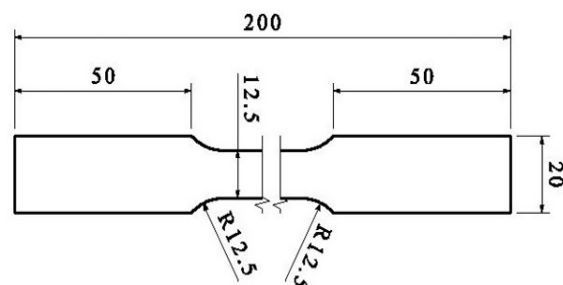
به‌منظور بهبود قابلیت پیش‌گویی مدل و آوردن نتایج آن در یک مطابقت نزدیک‌تر با نتایج تجربی و همچنین در نظر گرفتن اثر تداخل حفره‌ها، تورگارد [7, 8] سه پارامتر تنظیم‌کننده q_1, q_2 و q_3 را معرفی کرد.

با تمامی اصلاحات انجام‌شده که در بالا ارائه شد، تابع تسلیم مدل گرسون به رابطه ۱۲ تبدیل شد که به‌عنوان تابع تسلیم جی‌تی‌ان شناخته می‌شود.

$$\Phi(\sigma, k, f) = J_2(S) - \frac{1}{3} \left\{ 1 + q_3 f^{*2} - 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3q_2 p}{2\sigma_y}\right) \right\} \sigma_y^2 \quad (12)$$

تعیین پارامترهای ماده برای مدل جی‌تی‌ان

به‌کاربردن مدل جی‌تی‌ان برای آنالیز خرابی نیاز به تعیین ۱۴ پارامتر ماده شامل پارامترهای الاستیک (E, ν) ، پارامترهای سخت‌شوندگی (K, ϵ_0, n) ، ضرایب تابع تسلیم (q_3, q_2, q_1) ، پارامترهای جوانه‌زنی حفره $(f_0, f_N, S_N, \epsilon_N)$ و پارامترهای کسر حجمی حفره بحرانی و شکست (f_f, f_c) دارد. به‌منظور تعیین این پارامترها آزمون‌های کشش تک‌محوری بر روی نمونه‌های تهیه‌شده از ورق فولادی از جنس اس‌تی‌۱۲ با ضخامت یک میلی‌متر در راستای نورد انجام شده است. ابعاد نمونه‌های تهیه‌شده مطابق با استاندارد ASTM A8 بوده و در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمون‌ها بر روی دستگاه کشش هیدرولیکی مجهز به اکستنسومتر و با سرعت یک میلی‌متر بر دقیقه و طول گیج ۵۰ میلی‌متر انجام شده است. فرآیند طی‌شده برای تعیین ۱۴ پارامتر در ادامه توضیح داده می‌شود.

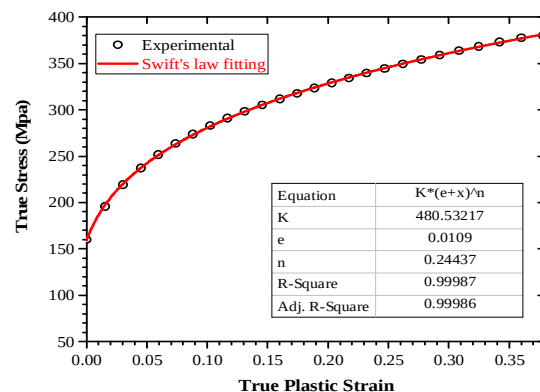


شکل ۱) ابعاد نمونه تخت استفاده‌شده در آزمون‌های کشش

به‌ترتیب اثر سه‌محوری تنش و کسر حجمی حفره را در نظر می‌گیرند. به‌منظور فهم بهتر پارامترهای مدل جی‌تی‌ان یک بررسی در مراجع مختلف انجام شد که نتایج آن در جدول ۲ ارایه شده است. از آنجایی که اغلب این مراجع برای ضرایب تابع تسلیم از مقادیر پیشنهادشده توسط تی‌ورگارد و نیلمن^[10] استفاده کرده‌اند، در کار حاضر هم از همان مقادیر ($q_1=1/5$, $q_2=1$, $q_3=2/25$) استفاده شده است.

جدول ۱) پارامترهای الاستیک- پلاستیک تعیین‌شده برای ماده

پارامتر	مقدار
n	۰/۲۴
ϵ_0	۰/۰۱۰۹
K (مگاپاسکال)	۴۸۰/۵۳
ν	۰/۳
E (گیگاپاسکال)	۲۰۰



نمودار ۳) تقریب منحنی تنش- کرنش پلاستیک حقیقی برای به‌دست‌آوردن ضرایب کارسختی قانون سویت

ضرایب تابع تسلیم

این پارامترها شامل q_1, q_2, q_3 است که q_1 از دست‌رفتن مقاومت به‌دلیل تداخل حفره‌ها را نشان می‌دهد در حالی که q_2, q_3

جدول ۲) پارامترهای مدل جی‌تی‌ان در مراجع مختلف

نویسندگان	f_f	f_c	f_N	f_0	S_N	ϵ_N	q_3	q_2	q_1	مواد
تی‌ورگارد و نیلمن ^[10]	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۰۴	۰	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	-
هامبلی ^[19]	-	-	۰/۰۴	-	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	کربن‌استیل
اشمیت و همکاران ^[20]	۰/۲۱۲	۰/۰۶	۰/۰۰۲	۰	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	۲۰MnMoNi۵۰
راچیک و همکاران ^[21]	۰/۱۰۱	۰/۱	۰/۰۴	-	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	Steels DD۱۳, X6Cr۷
اسپیرینگمان و کونام ^[22]	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	استیل
لمیال و همکاران ^[23]	۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۰۴	-	۰/۱	۰/۲	۲/۲۵	۱	۱/۵	Mild steel XES
ماروانی و همکاران ^[24]	۰/۱۲	۰/۱۱	۰/۰۴	-	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	FeSi (۳wt.%) steel
کاساوسکی ^[25]	۰/۶	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۰۱۷	۰/۰۵	۰/۳	۳/۶۵	۰/۷۹	۱/۹۱	S۲۳۰JR steel
کیران و خاندلوال ^[26]	۰/۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۰	۰/۰۵	۰/۴۵	۲/۲۵	۱	۱/۵	ASTM A۹۹۲
آچوری و همکاران ^[27]	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۴	۰	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	HSLA
آچوری ^[28, 29]	۰/۱۳	۰/۰۸	۰/۰۲	۰/۰۰۱۵	۰/۱	۰/۲	۱/۴۴	۰/۸	۱/۲	HSLA
ژرو و همکاران ^[30]	۰/۰۸	۰/۰۳	۰/۰۱۲	۰	۰/۰۲	۰/۱	۲/۲۵	۱	۱/۵	Zircaloy-۴
کامی و همکاران ^[31]	۰/۱۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۰۰۳۵	۰/۱	۰/۳	۲/۲۵	۱	۱/۵	AA۱۰۶۱-T۴
ژائو و همکاران ^[32]	۰/۰۹	۰/۰۲۸	۰/۰۲	۰/۰۰۰۸	۰/۱	۰/۲	۲/۲۵	۱	۱/۵	DP۶۰۰
جیانگ و همکاران ^[33]	۰/۱۵	۰/۰۲۵	۰/۰۲	۰/۰۰۴	۰/۱	۰/۲	۲/۲۵	۱	۱/۵	Al۲۰۲۴T۳

پارامترهای مربوط به حفره

در حالت کلی دو روش مستقیم و غیرمستقیم یا معکوس برای تعیین پارامترهای مدل جی‌تی‌ان وجود دارد. روش مستقیم شامل بررسی میکروساختار نمونه شکسته‌شده با میکروسکوپ نوری یا میکروسکوپ الکترونیکی روبشی و تفسیر تصاویر میکروسکوپی، و شبیه‌سازی مدل سلول واحد^[34] است. تعیین پارامترها به‌وسیله روش مستقیم کاملاً به محل امان حجمی نمونه انتخاب‌شده از ماده وابسته است. علاوه‌بر این برخی از بررسی‌ها نشان دادند که کسر حجمی ناخالصی استخراج‌شده از بررسی‌های میکروساختاری را نمی‌توان مستقیماً در مدل جی‌تی‌ان به‌کار برد، چون همه این ناخالصی‌ها در جوانه‌زنی حفره شرکت نمی‌کنند^[35, 36]. در نتیجه پیشنهاد می‌شود که پارامترهای مدل به روش غیرمستقیم/ معکوس/ ماکروسکوپی تعیین شود. روش معکوس^[14, 37, 38] براساس کالیبره‌کردن پارامترهای مدل جی‌تی‌ان به‌وسیله فیت‌کردن

نتایج عددی و تجربی فرآیندی مثل آزمون کشش تک‌محوری انجام‌شده روی نمونه استاندارد استوار است. روش کالیبره‌کردن معکوس برای تعیین پارامترهای مرتبط با حفره در مدل جی‌تی‌ان استفاده شده است.

بعد از تعیین ثابت‌های تابع تسلیم، پارامترهای باقی‌مانده مدل جی‌تی‌ان را می‌توان به دو دسته پارامترهای تابع نرخ جوانه‌زنی (ϵ_N, S_N) و پارامترهای کسر حجمی حفره f_0, f_N, f_c, f_f تقسیم کرد. از آنجایی که شبیه‌سازی و تعیین دقیق چندین پارامتر با روش معکوس یک روند چالش‌برانگیز است، تصمیم گرفته شد که تعداد پارامترهای مد نظر برای تعیین کم شده تا دقت تعیین پارامترهای باقی‌مانده افزایش یابد. بنابراین برای مقادیر پارامترهای ϵ_N و S_N از مراجع استفاده شد. با بررسی جدول ۲ مشاهده می‌شود که اغلب مراجع از مقادیر ۰/۳ و ۰/۱ برای ϵ_N و S_N استفاده کرده‌اند که به این مقادیر اکتفا شد.

شبیه‌سازی‌های عددی در نظر گرفته شد. پاسخ‌ها شامل $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ است که به‌ترتیب مربوط به ازدیاد طول در نقطه شکست، نیرو در نقطه شکست، ازدیاد طول در نیروی بیشینه، نیروی بیشینه، ازدیاد طول ۵۰٪ و نیرو در ازدیاد طول ۵۰٪ هستند.

مدل رگرسیون چندجمله‌ای مرتبه دو برای تخمین روابط بین پاسخ‌ها و چهار متغیر تاثیرگذار در روش سطح پاسخ انتخاب شد. وابستگی پاسخ‌ها به متغیرهای تاثیرگذار مطابق با روابط زیر است:

$$R_1 = 28.615 - 1071f_0 - 591.4f_n + 80.3f_c + 9158f_0f_n + 2260f_0f_c + 569f_0f_f + 315.8f_nf_c + 116.4f_nf_f - 7516f_c f_f \quad (17)$$

$$R_2 = 20173 - 799.2f_f + 16595f_n - 3085f_c - 257259f_n^2 + 29758f_nf_c + 3390f_c f_f \quad (18)$$

$$R_3 = 13.754 - 0.634f_f - 134.37f_n - 2.13f_c + 1072f_n^2 + 79.5f_nf_c + 18.69f_nf_f \quad (19)$$

$$R_4 = 3372.79 - 7995f_0 - 1676.3f_n + 9.08f_c + 3.23f_f + 11833f_n^2 + 13555f_0f_n + 3254f_0f_c + 915f_0f_f - 51.7f_nf_f - 26.2f_c f_f \quad (20)$$

$$R_5 = 14.263 - 461.3f_0 - 310.9f_n + 41.23f_c + 4.562f_f + 2270f_n^2 - 152.3f_c^2 + 5990f_0f_n + 1510f_0f_c + 139.8f_nf_c + 89.6f_nf_f - 35.26f_c f_f \quad (21)$$

$$R_6 = 3345.1 - 6604f_0 - 1523f_n + 162f_c + 25.3f_f - 22628f_n^2 + 7683f_nf_c + 2591f_nf_f - 614f_c f_f \quad (22)$$

آنالیز واریانس به‌منظور تعیین اهمیت آماری و اثربخشی مدل‌های درجه دو انجام گرفت. نتایج برای R^2 و R^2 پیش‌بینی در جدول ۴ ارائه شده است. در آنالیز رگرسیون R^2 نشانگر میزان مطابقت مدل با داده‌ها است در حالی که R^2 پیش‌بینی میزان دقت مدل را برای پیش‌بینی پاسخ مشاهدات جدید نشان می‌دهد. نتایج جدول ۴ قابلیت بالای ۶ مدل درجه دو را برای فیت‌کردن داده‌ها و پیش‌بینی پاسخ‌های موردهای جدید نشان می‌دهد.

جدول (۳) ترکیب پارامترهای آزمایش‌ها

شماره	f_0	f_n	f_c	f_f	شماره	f_0	f_n	f_c	f_f
۱	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۱	۰/۳۷۵	۱۷	۰/۰۰۰	۰/۰۵۰	۰/۰۱	۰/۶۰۰
۲	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۱۵	۰/۶۰۰	۱۸	۰/۰۰۰	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۳۷۵
۳	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۳۷۵	۱۹	۰/۰۰۲	۰/۰۵۰	۰/۰۸	۰/۳۷۵
۴	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۳۷۵	۲۰	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۶۰۰
۵	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۳۷۵	۲۱	۰/۰۰۰	۰/۰۵۰	۰/۱۵	۰/۱۵۰
۶	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۳۷۵	۲۲	۰/۰۰۰	۰/۰۵۰	۰/۱۵	۰/۶۰۰
۷	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۱۵	۰/۳۷۵	۲۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۱۵۰
۸	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۶۰۰	۲۴	۰/۰۰۴	۰/۰۵۰	۰/۱۵	۰/۶۰۰
۹	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۳۷۵	۲۵	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۳۷۵
۱۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۶۰۰	۲۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۸	۰/۳۷۵
۱۱	۰/۰۰۴	۰/۰۵۰	۰/۰۱	۰/۱۵۰	۲۷	۰/۰۰۰	۰/۰۵۰	۰/۰۱	۰/۱۵۰
۱۲	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۱۵۰	۲۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۰۱	۰/۱۵۰
۱۳	۰/۰۰۴	۰/۰۵۰	۰/۱۵	۰/۱۵۰	۲۹	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۱۵	۰/۶۰۰
۱۴	۰/۰۰۲	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۳۷۵	۳۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۱۵	۰/۱۵۰
۱۵	۰/۰۰۴	۰/۰۲۶	۰/۰۸	۰/۳۷۵	۳۱	۰/۰۰۴	۰/۰۵۰	۰/۰۱	۰/۶۰۰
۱۶	۰/۰۰۴	۰/۰۰۲	۰/۱۵	۰/۱۵۰	-	-	-	-	-

تعیین دقیق پارامترهای باقی‌مانده مدل جی‌تی‌ان برای آنالیز موفق شکست نرم با این مدل یک ضرورت محسوب می‌شود. به‌منظور رسیدن به این هدف از فرآیند کالیبراسیون معکوس با بهره‌گیری از روش سطح پاسخ استفاده شده است. روش سطح پاسخ از یک سری آزمایشات طراحی‌شده برای کشف ارتباط بین چندین متغیر تاثیرگذار و متغیر پاسخ به‌منظور رسیدن به پاسخ بهینه استفاده می‌کند. در این روش تکنیک‌هایی برای توسعه رابطه تابعی بین پاسخ، y و تعدادی متغیر کنترل‌کننده تحت عنوان $x_1, x_2, \dots, x_k$ استفاده می‌شود. به‌طور کلی، چنین رابطه‌ای ناشناخته است اما می‌تواند با استفاده از یک مدل چندجمله‌ای درجه پایین تقریب زده شود.

$$y = f'(x)\beta + \varepsilon \quad (14)$$

که در آن $f'(x) = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ یک تابع برداری از عناصر p است که از توان‌ها و ضرب توان‌های $x_1, x_2, \dots, x_k$ تا درجه مشخصی تشکیل شده است. β یک بردار از p ضریب ثابت ناشناخته به‌عنوان پارامترها است و ε یک خطای آزمایشی تصادفی است که فرض می‌شود میانگین صفر داشته باشد. این امر با اعتقاد به این که الگوی معادله ۱۴ نمایشی مناسب از پاسخ را ارائه می‌دهد، استوار است. در این حالت، مقدار $\beta' f'(x)$ نشان‌دهنده میانگین پاسخ، یعنی مقدار مورد انتظار y است و با $\mu(x)$ مشخص می‌شود. دو مدل مهم معمولاً در روش سطح پاسخ به‌عنوان مدل‌های درجه یک و درجه دوم استفاده می‌شوند. مدل درجه یک ($d=1$) به شرح زیر است.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \varepsilon \quad (15)$$

که در آن β_0 سطح اثر اصلی، $\beta_i x_i$ اثر اصلی و ε خطا است. همچنین می‌توان رابطه بین پاسخ و متغیرها را با استفاده از مدل چندجمله‌ای درجه دوم به فرم زیر ارزیابی کرد.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \varepsilon \quad (16)$$

در مدل درجه دوم $\beta_{ij} x_i x_j$ اثر تداخلی و $\beta_{ii} x_i^2$ اثر انحنایی است که از مدل درجه دوم استفاده شده است.

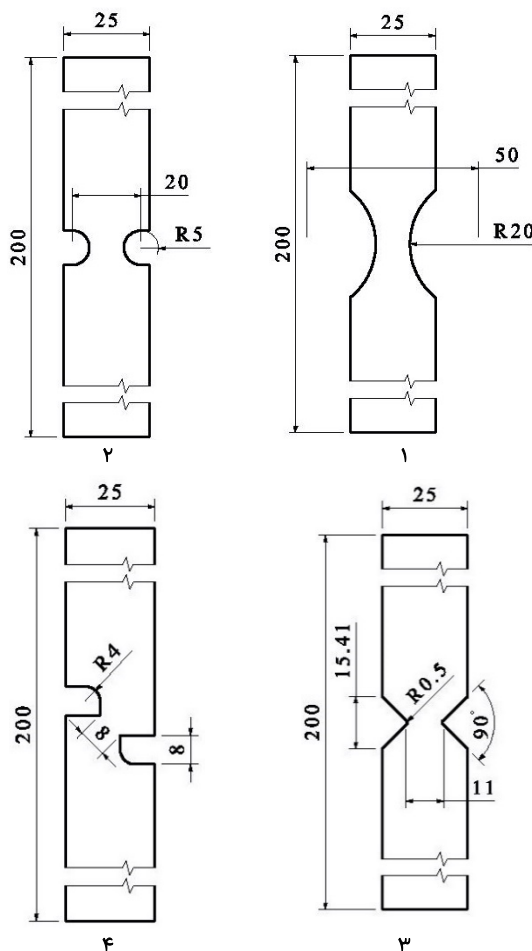
به‌منظور انجام بهینه‌سازی با روش سطح پاسخ، چهار پارامتر کسر حجمی حفره f_f, f_c, f_n, f_0 به‌عنوان متغیرهای پیوسته در نظر گرفته شده و طراحی مرکب مرکزی برای به‌دست‌آوردن ترکیب آزمایش‌ها استفاده شد. مقدار کمینه و بیشینه این پارامترهای پیوسته برای طراحی آزمایش با استفاده از جدول ۲ تعیین شد. یک طرح شامل ۳۱ آزمایش توسط طراحی مرکب مرکزی ایجاد شد که در جدول ۳ ارائه شده است. این آزمایش‌ها در واقع شبیه‌سازی عددی آزمون کشش تک‌محوری با ترکیب مشخص شده پارامترها در جدول ۳ هستند. این شبیه‌سازی‌های عددی در حل‌گر آباکوس/اکسپلیسیت و با هندسه شکل ۱ انجام گرفت. منحنی نیرو-جابجایی به‌عنوان متغیر پاسخ انتخاب شد. جهت مقایسه منحنی‌های تجربی و عددی، مولفه‌های نیرو و جابه‌جایی مربوط به سه نقطه مهم بر روی منحنی نیرو-جابجایی جهت استخراج از

بررسی رفتار شکست در نمونه‌های کششی

در بخش حاضر، مدل جی‌تی‌ان به‌منظور بررسی آسیب و پیش‌بینی شکست نمونه‌های کششی با هندسه‌های مختلف به‌کار گرفته می‌شود.

آزمون‌های کشش

به‌منظور مطالعه رفتار شکست تحت شرایط تنشی مختلف، آزمون کششی در چهار نمونه با مقطع مستطیل و هندسه‌های مختلف انجام شد. نمونه‌های شماره یک تا ۳ با شعاع متفاوت در منطقه تغییر شکل، منطقه شکست عمود بر جهت بار اعمال‌شده داشته و نمونه‌های ۹۰ درجه نامیده می‌شود. در حالی که نمونه شماره ۴، دارای ناحیه شکست ۴۵ درجه با جهت بار آزمون است و نمونه ۴۵ درجه نامیده می‌شود. ابعاد نمونه‌هایی که از یک ورق فولادی اس‌تی ۱۲ با ضخامت یک میلی‌متر در جهت نورد برش داده شده‌اند، در شکل ۳ داده شده است. برای اطمینان از تکرارپذیری آزمون‌ها و نیز دستیابی به نتایج دقیق، آزمون برای هر هندسه سه‌بار تکرار شد. تمام آزمایش‌ها بر روی یک ماشین آزمایش هیدرولیکی مجهز به اکستنسومتر با همان تنظیمات سرعت و طول گیج گفته‌شده برای نمونه استاندارد کشش انجام شده است. نمودارهای نیرو-جابجایی برای نمونه‌های ۱ تا ۳ در نمودار ۵ و برای نمونه ۴ در نمودار ۶ داده شده است.



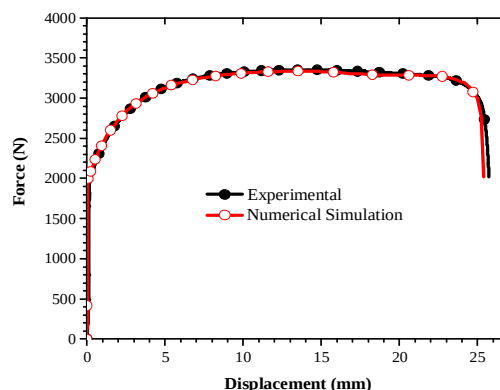
شکل ۳) چهار نمونه کششی با هندسه متفاوت

جدول ۴) مقادیر R^2 و R^2 پیش‌بینی‌شده برای ۶ متغیر پاسخ (برحسب درصد)

متغیرها	R^2 (R-squared)	R^2 پیش‌بینی‌شده
R_1	۹۹/۳۴	۹۶/۲۵
R_2	۹۱/۹	۸۴/۶۹
R_3	۹۷/۷۷	۹۴/۹۲
R_4	۹۹/۹۳	۹۹/۶۶
R_5	۹۹/۱۹	۹۶/۲۵
R_6	۸۵/۰۳	۷۹/۵۸

برای رسیدن به مقادیر بهینه، مقادیر ۶ پاسخ از منحنی تجربی نیرو-جابجایی به‌عنوان هدف به بهینه‌ساز روش سطح پاسخ وارد شده و مقادیر بهینه با کمینه‌کردن همزمان اختلاف ۶ پاسخ روش سطح پاسخ و مقادیر هدف واردشده تعیین شد. مقادیر بهینه تعیین‌شده با به‌کارگیری روش کالیبراسیون معکوس از طریق روش سطح پاسخ برای f_0 , f_N , f_c , f_f به‌ترتیب برابر ۰/۱۵، ۰/۰۱، ۰/۰۰۷۱۶ و ۰/۰۰۱۰۷ است. مطلوبیت مرکب این مقادیر بهینه برابر ۰/۹۲۴ است که نشان می‌دهد پارامترهای تعیین‌شده به‌خوبی مقادیر هدف تعیین‌شده برای پاسخ‌ها را برآورده می‌کنند.

به‌منظور صحت‌گذاری فرآیند بهینه‌سازی، آزمون کشش تک‌محوری با مقادیر بهینه‌شده مدل جی‌تی‌ان شبیه‌سازی و منحنی نیرو-جابجایی آن با منحنی تجربی مقایسه شد. این مقایسه در نمودار ۴ ارائه شده که مطابقت عالی را نشان می‌دهد. بنابراین فرآیند بهینه‌سازی در تعیین پارامترهای قابل اعتماد برای مدل جی‌تی‌ان موفق بوده است. مقادیر پارامترهای ورودی مدل جی‌تی‌ان برای ورق فولادی اس‌تی ۱۲ در جدول ۵ ارائه شده است.

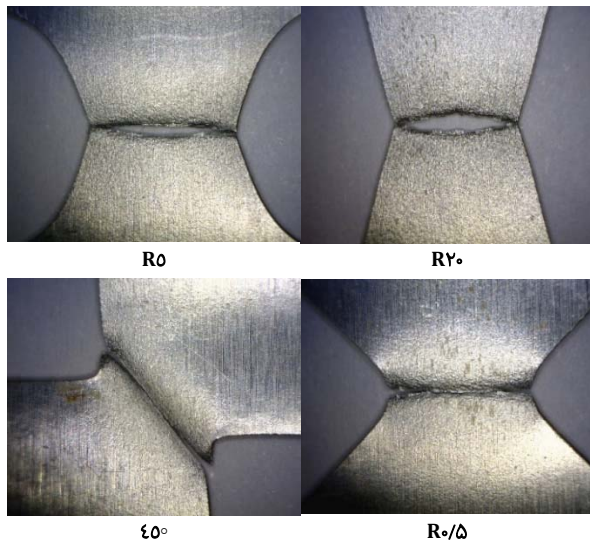


نمودار ۴) منحنی نیرو-جابجایی عددی با مقادیر بهینه شده مدل جی‌تی‌ان و منحنی نیرو-جابجایی تجربی

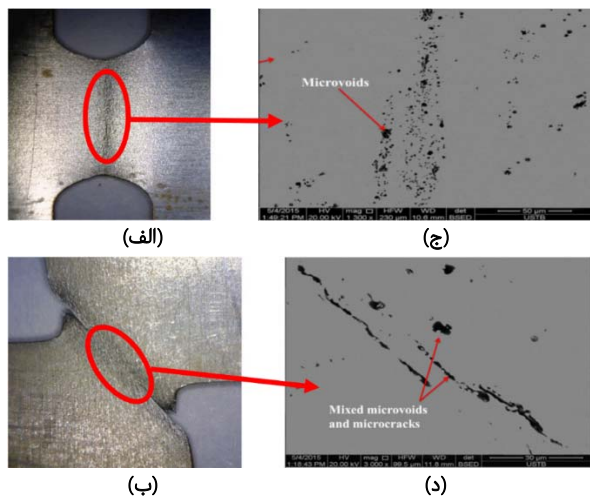
جدول ۵) پارامترهای مدل جی‌تی‌ان برای فولاد اس‌تی ۱۲

پارامتر	مقدار
q_1	۱/۵
q_2	۱
q_3	۲/۲۵
S_N	۰/۱
ϵ_N	۰/۳
f_0	۰/۰۰۱۰۷
f_N	۰/۰۰۷۱۶
f_c	۰/۰۱
f_f	۰/۱۵

به هم پیوستن این حفره‌ها باعث ایجاد ترک و شکست عمود بر جهت کشش می‌شود. در نمونه ۴۵ درجه، جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها در ناحیه تغییر شکل با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت کشش با نرخ پایین‌تری اتفاق می‌افتد. در عوض، شکست برشی که توسط میکروتُرک‌ها در ناحیه تغییر شکل فعال شده است، به همراه به هم پیوستن حفره‌ها باعث رخ دادن شکست ترکیبی می‌شود.



شکل (۴) لبه شکست در چهار نمونه کششی

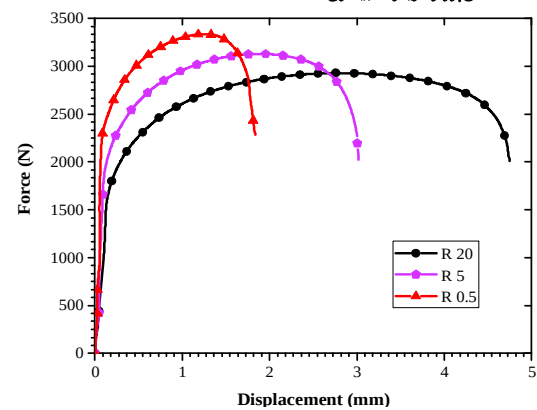


شکل (۵) تصاویر میکروسکوپ نوری از: الف) یک نمونه کششی ۹۰ درجه، ب) نمونه کششی ۴۵ درجه قبل از شکست نهایی، تصاویر SEM [41] نمونه‌های آزمون کشش با مناطق شکست؛ ج) عمود، د) ۴۵ درجه نسبت به سمت جهت کشش

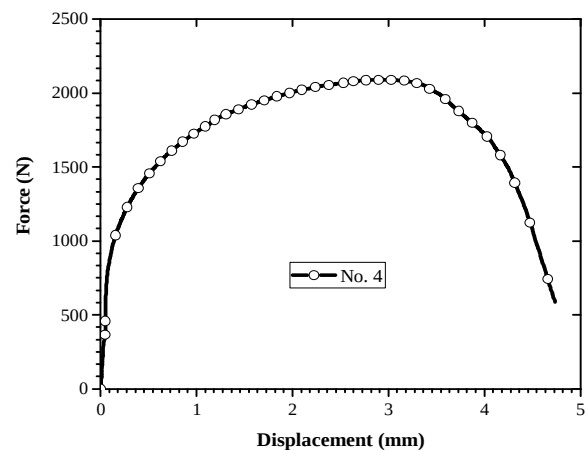
مدل‌سازی المان محدود

شبیه‌سازی المان محدود به منظور کالبره کردن پارامترها با استفاده از روش سطح پاسخ و همچنین برای مطالعات شکست در نمونه‌های کششی با استفاده از مدل آسیب جی-تی‌ان در آباکوس/اکسپلیسیت انجام شده است.

در شبیه‌سازی عددی آزمون کشش بر روی نمونه استاندارد با ترکیبات مختلف پارامترهای جی-تی‌ان، هندسه مدل‌سازی و با



نمودار (۵) منحنی نیرو- جابه‌جایی برای نمونه‌های ۱ تا ۳



نمودار (۶) منحنی نیرو- جابه‌جایی برای نمونه ۴

تحلیل شکست نگاری

تضعیف خواص مواد در طی شکست نرم توسط مکانیزم آسیب نرم کنترل می‌شود. از جنبه میکرومکانیکی، مکانیزم آسیب نرم به‌طور کلی شامل جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن عیوب میکرو است که نهایتاً منجر به شکست نرم می‌شود. میکروتُرک‌ها و میکروحفره‌ها، دو نوع اصلی عیوب میکرو در فلزات مهندسی هستند. آزمون کشش بر روی هندسه‌های مختلف برای ارزیابی نحوه شکست در شرایط مختلف تنش انجام شد. شکل ۴ لبه‌های شکست ۴ نمونه کششی را ارائه می‌دهد. این شکل در واقع تاثیر تغییرات هندسی و در نتیجه سه‌محوری تنش (Stress Triaxiality) در منطقه تغییر شکل را بر شکل لبه‌های شکست خورده نشان می‌دهد.

شکل‌های ۵- الف و ۵- ب مناطق تغییر شکل قبل از شکست نهایی را در نمونه‌های کششی ۹۰ و ۴۵ درجه و شکل‌های ۵- ج و ۵- د به ترتیب مکانیزم‌های شکست مربوطه را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شکست در نمونه‌های ۹۰ درجه به دلیل رویداد به هم پیوستن میکروحفره‌ها حادث می‌شود، در حالی که در نمونه ۴۵ درجه، شکست توسط هر دوی میکروحفره‌ها و میکروتُرک‌ها رخ می‌دهد. در نمونه‌های ۹۰ درجه، جوانه‌زنی حفره‌های جدید و رشد حفره‌های موجود تحت بارهای کششی در ناحیه با کمترین سطح مقطع منجر به تمرکز زیاد حفره‌ها می‌شود.

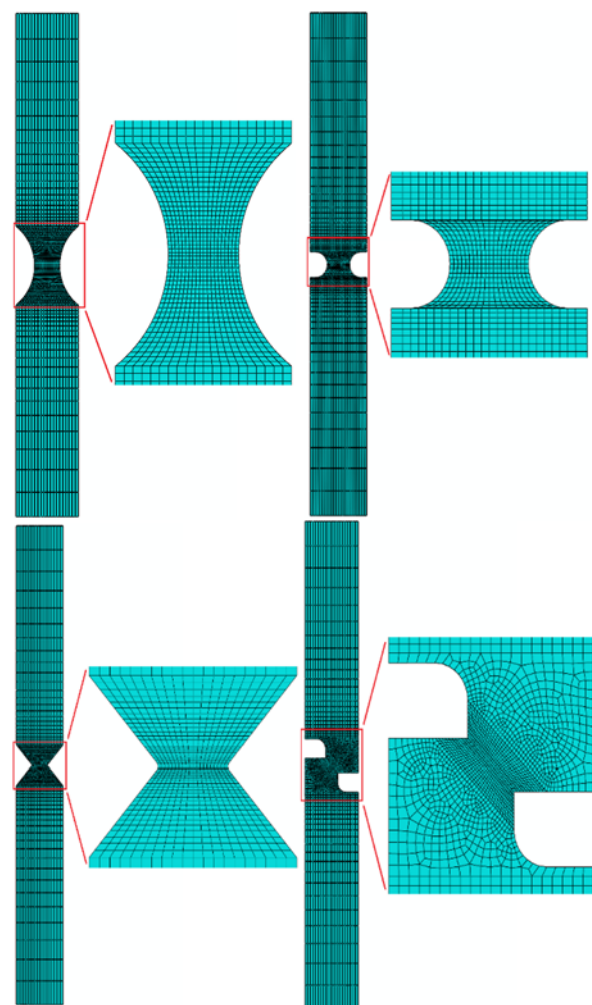
نتایج و بحث

نتایج شبیه‌سازی عددی نمونه‌های کششی با استفاده از مدل آسیب جی-تی‌ان با پارامترهای تعیین‌شده در بخش زیر ارایه شده است. نمودار ۷، منحنی‌های نیرو-جابجایی تجربی و عددی استخراج از شبیه‌سازی المان محدود را نشان می‌دهد. از نمودار ۷-الف تا ۷-ج دیده می‌شود که مطابقت خوبی بین نتایج عددی و تجربی برای نمونه‌های ۹۰ درجه وجود داشته و میزان خطا در حدود ۵٪ است. در نمونه‌های ۹۰ درجه به‌علت هندسه و جهت بار اعمال‌شده مقدار سهم‌محوری تنش متوسط به بالا بوده و حالت تنش کششی غالب است. مکانیسم شکست مدل جی-تی‌ان، شامل جوانه‌زنی، رشد و به‌هم‌پیوستن حفره‌ها، تحت شرایط تنش کششی به‌خوبی عمل می‌کند. نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه ۴۵ درجه (نمودار ۷-د) برخی تفاوت‌ها بین نتایج آزمایشگاهی و عددی را نشان می‌دهد. این به این دلیل است که ترکیبی از حالت تنش برشی و کششی در این نمونه (سازوکار شکست ترکیبی) حکم‌فرما است، اما سهم برش در شکست را نمی‌توان با مدل جی-تی‌ان از طریق مکانیسم جوانه‌زنی، رشد و به‌هم‌پیوستن حفره‌ها دخالت داد که این یکی از نقاط ضعف اصلی مدل جی-تی‌ان است که برخی از محققان^[38-40] آن را مطرح کرده‌اند. بنابراین برای نمونه ۴۵ درجه، شکست در آزمایش‌های تجربی پیش از آن نسبت به پیش‌بینی‌های عددی صورت می‌گیرد.

مقایسه لبه‌های شکست نمونه‌های کششی تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی برای ۴ نمونه در شکل ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که واضح است، هم‌پوشانی بسیار خوبی بین لبه‌های شکست تجربی و عددی برای تمام نمونه‌ها وجود دارد.

در شکل‌های ۸ و ۹ سهم‌محوری تنش و کسر حجمی حفره در شروع شکست ارایه شده است. در نمونه‌های ۹۰ درجه، با کاهش شعاع ناچ نمونه از ۲۰ میلی‌متر تا ۵ میلی‌متر، سهم‌محوری تنش افزایش می‌یابد. مقادیر بالاتر سهم‌محوری تنش موجب شتاب‌گرفتن فرآیند جوانه‌زنی، رشد و به‌هم‌پیوستن حفره‌ها شده و ماده در کرنش‌های پایین‌تر دچار شکست شده و جابه‌جایی در نقطه شکست کمتری خواهد داشت. در نمونه‌های ۹۰ درجه، ترک شروع‌شده عمود بر جهت جهت بارگذاری بوده و شکست در صفحه عمود به محور نمونه رخ می‌دهد. در نمونه‌های R_{20} و R_{45} مقدار سهم‌محوری تنش حداکثر مقدار خود را در مرکز نمونه داشته بنابراین کسر حجمی حفره زودتر به مقداری بحرانی در این نقطه می‌رسد و ترک در مرکز شروع شده و به سمت سطح نمونه رشد می‌کند. در مقابل، در نمونه $R_{0/5}$ ، ترک‌ها در نزدیکی سطح قسمت با کمترین مقطع نمونه از هر دو طرف شروع می‌شوند و به سمت مرکز نمونه رشد می‌کنند. برای نمونه ۴۵ درجه، شکست توانا ناشی از حفره‌ها و میکروتُرک‌ها در یک سطح با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت بارگیری اتفاق می‌افتد. در این نمونه به‌علت سهم‌محوری تنش و تمرکز تنش بالا در دو لبه صفحه شکست، دو ترک در این مناطق

المان از نوع C3D8R مش‌زنی شد. برای نمونه‌های ناچ‌دار هم از المان نوع C3D8R استفاده شد. به‌منظور شبیه‌سازی بهتر تغییر شکل‌های موضعی و آسیب و همچنین کاهش زمان محاسبات، مش‌های ریز و درشت به‌ترتیب در داخل و خارج از منطقه مرکزی استفاده شد. به‌منظور رسیدن به اندازه مش بهینه در منطقه مرکزی مدل، آنالیز حساسیت به مش با اندازه مش‌های مختلف انجام شد. اندازه مش بهینه پس از انجام آنالیز حساسیت برای نمونه‌های R_{20} ، R_{45} ، $R_{0/5}$ و ۴۵ درجه به‌ترتیب 0.5×0.5 ، 0.31×0.31 ، 0.14×0.14 و 0.06×0.06 میلی‌متر تعیین شد. برای شبیه‌سازی عددی شکست در ۴ نمونه، هندسه کامل هر نمونه مدل شد. مش تولیدشده برای شبیه‌سازی عددی روی ۴ نمونه در شکل ۶ داده شده است. مدل‌سازی المان محدود با استفاده از مدل جی-تی‌ان موجود در آباکوس که تحت عنوان Porous Plasticity قرار دارد انجام شده و پارامترهای تعیین‌شده در قسمت ۳ به‌عنوان ورودی به مدل وارد شده است. برای اعمال شرایط مرزی شبیه‌سازی، به‌منظور ایجاد شرایط مشابه آزمون‌های کششی قسمت پایینی نمونه‌ها ثابت شده و به قسمت بالایی شرط جابه‌جایی اعمال شده است.



شکل ۶) مش ایجادشده بر روی نمونه‌های کششی

به دلیل وضعیت تنش کششی ضعیف‌تر در سطح زاویه دار نسبت به راستای کشش بسیار کندتر نسبت به نمونه‌های ۹۰ درجه رخ می‌دهد.

تغییرات کرنش شکست و جابه‌جایی در نقطه شکست به عنوان تابعی از سه محوری تنش برای نمونه‌های کششی، در نمودار ۹ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، نمونه ۴۵ درجه با مکانیزم شکست ترکیبی پایین‌ترین کرنش شکست و جابه‌جایی در شکست نهایی را در مقایسه با سایر نمونه‌های کششی دارد. در نمونه‌های ۹۰ درجه، کرنش شکست و جابه‌جایی در نقطه شکست نهایی با کاهش شعاع ناچ کاهش می‌یابد.

آغاز شده و همزمان رشد می‌کنند. شکست نهایی هنگامی رخ می‌دهد که این ترک‌ها در مرکز صفحه شکست به هم می‌رسند. تغییرات کسر حجمی حفره با کرنش پلاستیک معادل در المان مرکزی نمونه‌های کششی، در نمودار ۸ نشان داده شده است. با توجه به حالت تنش متفاوت در نمونه‌های با هندسه‌های مختلف، تغییرات کسر حجمی حفره در نمونه‌های ۹۰ درجه با شعاع ناچ کوچک‌تر سریع‌تر رخ می‌دهد، به طوری که آسیب ناشی از حفره‌ها در نمونه با شعاع ۵/۰٪ زودتر از بقیه به مقدار بحرانی می‌رسد. با توجه به اینکه در مدل جی-تی‌ان، جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها تنها تحت شرایط تنش کششی رخ می‌دهد، همان طور که در نمودار ۸ مشخص است، تغییرات کسر حجمی حفره در نمونه ۴۵ درجه

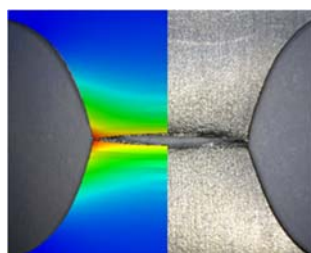
(الف)

(ب)

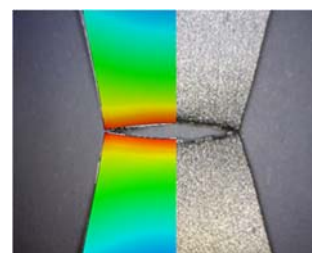
(ج)

(د)

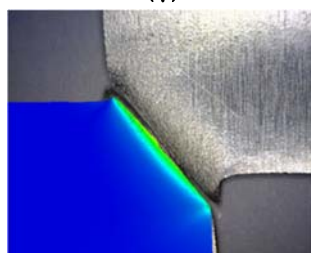
نمودار ۷) منحنی‌های نیرو- جابه‌جایی تجربی و عددی برای: الف) R_{20} ، ب) R_{45} ، ج) $R_{90}/5$ (د) نمونه ۴۵ درجه



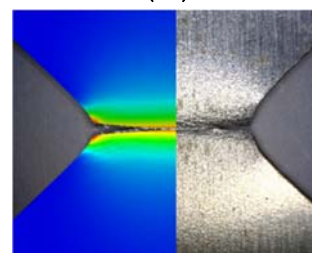
(ب)



(الف)

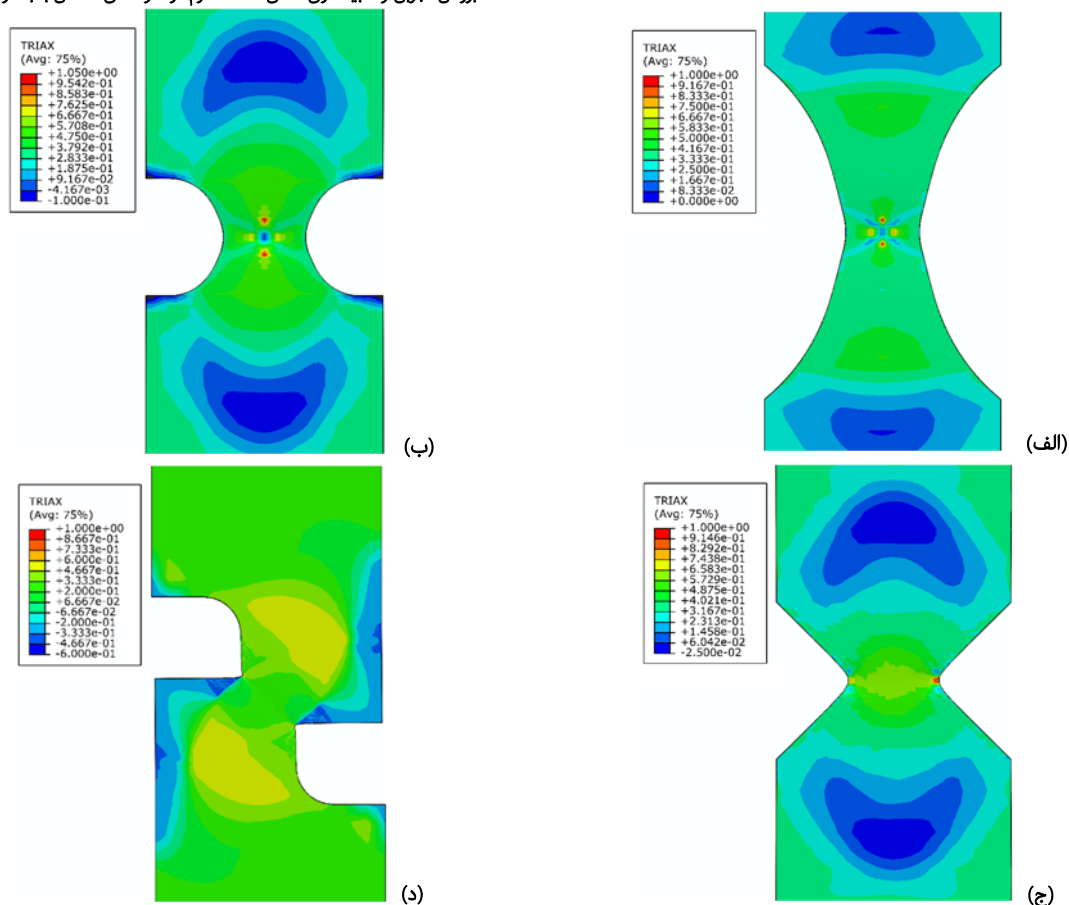


(د)

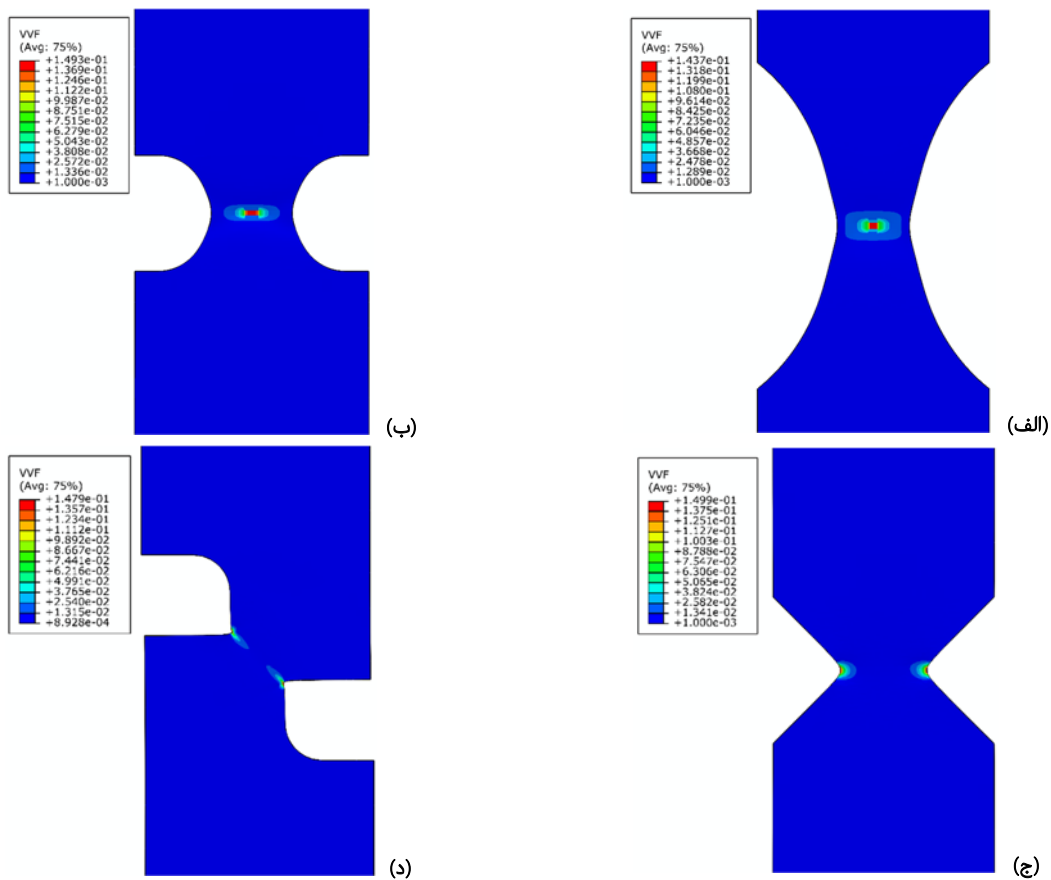


(ج)

شکل ۷) مقایسه لبه شکست نمونه‌های تجربی و عددی برای: الف) R_{20} ، ب) R_{45} ، ج) $R_{90}/5$ (د) نمونه ۴۵ درجه



شکل ۸) نمایش رنگی توزیع سه‌محوری تنش در نمونه‌های کششی؛ الف) R_{20} ، ب) R_5 ، ج) $R_{0/5}$ ، د) نمونه ۴۵ درجه



شکل ۹) نمایش رنگی توزیع کسر حجمی حفره در نمونه‌های کششی؛ الف) R_{20} ، ب) R_5 ، ج) $R_{0/5}$ ، د) نمونه ۴۵ درجه

تشکر و قدردانی: از معاونت پژوهشی دانشکده مکانیک برای همکاری در انجام آزمون‌های تجربی قدردانی می‌شود.

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان اعلام می‌دارند که همگی در انجام کار پژوهشی همکاری داشته‌اند و نام هیچ نویسنده‌ای بدون همکاری موثر قید نشده است.

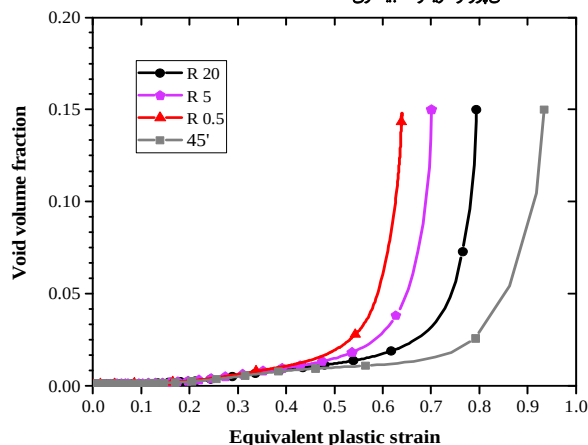
تعارض منافع: هیچ گونه تعارض منافعی وجود ندارد.

سهم نویسندگان: حامد قلی‌پور (نویسنده اول)، نگارنده مقدمه/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ فریدرضا بیگلری (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی/تحلیلگر آماری (۵۰٪).

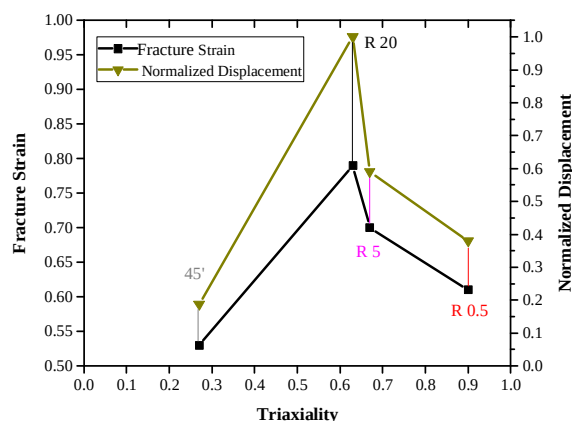
منابع مالی: تمامی هزینه‌ها توسط نویسندگان تأمین شده است.

منابع

- 1- Lemaitre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1985;107(1):83-89.
- 2- McClintock FA. A criterion for ductile fracture by the growth of holes. *Journal of Applied Mechanics*. 1968;35(2):363-371.
- 3- Rice JR, Tracey DM. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1969;17(3):201-217.
- 4- Hancock JW, Mackenzie AC. On the mechanisms of ductile failure in high-strength steels subjected to multi-axial stress-states. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1976;24(2-3):147-160.
- 5- Gurson AL. Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I—Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1977;99(1):2-15.
- 6- Chu CC, Needleman A. Void nucleation effects in biaxially stretched sheets. *Journal of Engineering Materials and Technology*. 1980;102(3):249-256.
- 7- Tvergaard V. Influence of voids on shear band instabilities under plane strain conditions. *International Journal of Fracture*. 1981;17(4):389-407.
- 8- Tvergaard V. Influence of void nucleation on ductile shear fracture at a free surface. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1982;30(6):399-425.
- 9- Gologanu M, Leblond J-B, Devaux J. Approximate models for ductile metals containing non-spherical voids—case of axisymmetric prolate ellipsoidal cavities. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1993;41(11):1723-1754.
- 10- Tvergaard V, Needleman A. Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metallurgica*. 1984;32(1):157-169.
- 11- Benseddig N, Imad A. A ductile fracture analysis using a local damage model. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2008;85(4):219-227.
- 12- Butcher C, Chen Z, Bardelcik A, Worswick M. Damage-based finite-element modeling of tube hydroforming. *International Journal of Fracture*. 2009;155(1):55-65.
- 13- Uthaisangsuk V, Prah U, Bleck W. Modelling of damage and failure in multiphase high strength DP and TRIP steels. *Engineering Fracture Mechanics*. 2011;78(3):469-486.
- 14- Abbasi M, Bagheri B, Ketabchi M, Haghshenas DF. Application of response surface methodology to drive GTN model parameters and determine the FLD of tailor welded blank. *Computational Materials Science*. 2012;53(1):368-376.



نمودار ۸) تغییرات کسر حجمی حفره در المان مرکزی نمونه‌های کششی



نمودار ۹) کرنش شکست و جابه‌جایی در نقطه شکست برای نمونه‌های کششی

جمع‌بندی

مدل جی‌تی‌ان برای بررسی شکست نرم در فولاد کم‌کربن به کار گرفته شد. فعالیت‌های انجام‌شده در دو بخش اصلی شامل تعیین پارامترهای مدل جی‌تی‌ان برای ماده مورد مطالعه و بررسی رفتار شکست ماده با نمونه‌های آزمون کششی صورت گرفت. آزمون‌های کشش تک‌محوره بر روی نمونه‌های تخت انجام و نمودار تنش-کرنش برای تعیین پارامترهای الاستیک-پلاستیک استفاده شد. پس از آن، روش سطح پاسخ برای تعیین پارامترهای مدل آسیب جی‌تی‌ان به کار گرفته شد. پارامترهای مربوط به حفره به ترتیب برابر ۰/۱۵، ۰/۰۱، ۰/۰۰۷۱۶ و ۰/۰۰۱۰۷ برای f_o ، f_N ، f_c ، f_f تعیین شد.

سپس آزمون‌های تجربی و مدل کالیبره‌شده برای بررسی شکست نرم در چهار نمونه کششی با هندسه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفت. اثر تغییر هندسه و شرایط سه‌محوری تنش در ناحیه تغییر شکل بر شکل لبه‌های شکست نتایج یکسانی را در آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های عددی نشان داد. رشد و به هم پیوستن حفره‌ها تحت تنش‌های کششی در نمونه‌های ۹۰ درجه و ترکیب میکروتکرک‌های برشی با حفره‌ها در نمونه‌های ۴۵ درجه به عنوان مکانیسم شکست شناسایی شد. محل شروع ترک، جهت‌گیری رشد ترک و جابه‌جایی در شکست نهایی برای شبیه‌سازی‌های عددی، مطابقت خوبی با نتایج تجربی نشان داد.

of micromechanical damage under different stress states. *Materials & Design*. 2013;50:207-222.

29- Achouri M, Germain G, Dal Santo P, Saidane D. Experimental and numerical analysis of micromechanical damage in the punching process for high-strength low-alloy steels. *Materials & Design*. 2014;56:657-670.

30- Zhou J, Gao X, Sobotka JC, Webler BA, Cockeram BV. On the extension of the Gurson-type porous plasticity models for prediction of ductile fracture under shear-dominated conditions. *International Journal of Solids and Structures*. 2014;51(18):3273-3291.

31- Kami A, Mollaei Dariani B, Sadough Vanini A, Comsa DS, Banabic D. Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage model. *Journal of Materials Processing Technology*. 2015;216:472-483.

32- Zhao PJ, Chen ZH, Dong CF. Experimental and numerical analysis of micromechanical damage for DP600 steel in fine-blanking process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2016;236:16-25.

33- Jiang W, Li Y, Su J. Modified GTN model for a broad range of stress states and application to ductile fracture. *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 2016;57:132-148.

34- Zhang ZL, Thaulow C, Ødegård J. A complete Gurson model approach for ductile fracture. *Engineering Fracture Mechanics*. 2000;67(2):155-168.

35- Steglich D, Brocks W. Micromechanical modelling of the behaviour of ductile materials including particles. *Computational Materials Science*. 1997;9(1-2):7-17.

36- Chhibber R, Arora N, Gupta S, Dutta B. Estimation of Gurson material parameters in bimetallic weldments for the nuclear reactor heat transport piping system. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2008;222(12):2331-2349.

37- Springmann M, Kuna M. Identification of material parameters of the Gurson-Tvergaard-Needleman model by combined experimental and numerical techniques. *Computational Materials Science*. 2005;33(4):501-509.

38- Nahshon K, Hutchinson JW. Modification of the Gurson model for shear failure. *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 2008;27(1):1-17.

39- Xue L. Constitutive modeling of void shearing effect in ductile fracture of porous materials. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008;75(11):3343-3366.

40- Malcher L, Andrade Pires FM, Cesar De Sá JMA. An extended GTN model for ductile fracture under high and low stress triaxiality. *International Journal of Plasticity*. 2014;54:193-228.

41- Zhao PJ, Chen ZH, Dong CF. Failure analysis based on microvoids damage model for DP600 steel on in-situ tensile tests. *Engineering Fracture Mechanics*. 2016;154:152-168.

15- Sirinakorn T, Wongwises S, Uthaisangsuk V. A study of local deformation and damage of dual phase steel. *Materials & Design*. 2014;64:729-742.

16- Wang S, Chen Z, Dong C. Tearing failure of ultra-thin sheet-metal involving size effect in blanking process: Analysis based on modified GTN model. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017;133:288-302.

17- Safdarian R. Investigation of tube fracture in the rotary draw bending process using experimental and numerical methods. *International Journal of Material Forming*. 2019;1-24.

18- Swift HW. Plastic instability under plane stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 1952;1(1):1-18.

19- Hambli R. Comparison between Lemaitre and Gurson damage models in crack growth simulation during blanking process. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2001;43(12):2769-2790.

20- Schmitt W, Sun DZ, Blauel JG. Damage mechanics analysis (Gurson model) and experimental verification of the behaviour of a crack in a weld-cladded component. *Nuclear Engineering and Design*. 1997;174(3):237-246.

21- Rachik M, Roelandt JM, Maillard A. Some phenomenological and computational aspects of sheet metal blanking simulation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002;128(1-3):256-265.

22- Springmann M, Kuna M. Identification of material parameters of the Gurson-Tvergaard-Needleman model by combined experimental and numerical techniques. *Computational Materials Science*. 2005;32(3-4):544-552.

23- Lemiale V, Chambert J, Picart P. Description of numerical techniques with the aim of predicting the sheet metal blanking process by FEM simulation. *Journal of Materials Processing Technology*. 2009;209(5):2723-2734.

24- Marouani H, Ben Ismail A, Hug E, Rachik M. Numerical investigations on sheet metal blanking with high speed deformation. *Materials & Design*. 2009;30(9):3566-3571.

25- Kossakowski PG. Simulation of ductile fracture of S235JR steel using computational cells with microstructurally-based length scales. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2012;50(2):589-607.

26- Kiran R, Khandelwal K. Gurson model parameters for ductile fracture simulation in ASTM A992 steels. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 2014;37(2):171-183.

27- Achouri M, Germain G, Dal Santo P, Saidane D. Numerical integration of an advanced Gurson model for shear loading: Application to the blanking process. *Computational Materials Science*. 2013;72:62-67.

28- Achouri M, Germain G, Dal Santo P, Saidane D. Experimental characterization and numerical modeling