

مقایسه عددی و تجربی دیدگاه مکانیک آسیب پیشرفته و اصلاح شده گرسون بر روی شکست فولاد با گرید API X70

چکیده: فولادهای API X70 به طور گسترده در خطوط انتقال گاز ایران استفاده می شوند. این فولادها که به روش ترمومکانیکی کنترل شده تولید می شوند، به دلیل ناهمسانگردی ناشی از فرآیند نورد و خم کاری، رفتار پیچیده ای در محدوده های مختلف تنش از خود نشان می دهند که مدل های کلاسیک قادر به پیش بینی دقیق آن نیستند. در این تحقیق، مدل آسیب گرسون-تیورگارد-نیدلمن (GTN) با معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل ترکیب و در نرم افزار آباکوس به صورت زیروال (VUMAT) پیاده سازی شد. ضرایب ناهمسانگردی ماده در زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب ۰/۵۶، ۰/۷۹ و ۰/۵۴ به دست آمد که نسبت به لوله های بدون درز مقادیر بالاتری دارد. نتایج حاصل از آزمون های کشش و شیشه سازی نشان داد که مدل گرسون پیشرفته نسبت به اصلاح شده، رفتار سخت شوندگی و ناحیه پس از گلویی شدن را با دقت بالاتری پیش بینی می کند. با وجود این، هر دو مدل در بازه خطای کم با داده های تجربی منطبق شدند. در مجموع، یافته ها نشان می دهد که در تحلیل شکست این ماده، استفاده از مدل گرسون پیشرفته با در نظرگیری ناهمسانگردی، پیش بینی واقع بینانه تری از پدیده شکست در ماده دارد.

واژه های راهنما: مکانیک آسیب، مدل GTN، فولاد API X70، معیار تسلیم ناهمسانگرد هیل، مدل گرسون پیشرفته

مهديه خسروی خضري
دانشجوی دکتری

علیرضا افسری مقدم
دانشجوی دکتری

سید یوسف
احمدی بروغنی*
استاد،
دانشکده مهندسی مکانیک،
دانشگاه بیرجند،
بیرجند

مقاله علمی پژوهشی
دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۸
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۱۵
پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۲۱

Mahdijeh Khosravi
Khezri
PhD Student

Alireza Afsari
Moghaddam
PhD Student

Seyyed Yoosef
Ahmadi Brooghani*
Professor,
Faculty of Mechanical
Engineering, Birjand
University, Birjand

Numerical and experimental comparison between advanced and modified Gurson model for API X70 steel fracture

Abstract: API X70 steels are widely used in natural gas transmission pipelines across Iran. These steels, produced through controlled thermo-mechanical processing, exhibit complex mechanical behavior due to anisotropy induced by rolling and pipe-forming operations, which cannot be accurately predicted by classical constitutive models. In this study, the Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) damage model was combined with the Hill's anisotropic yield criterion and implemented as a user-defined subroutine (VUMAT) in *Abaqus/Explicit*. The measured anisotropy coefficients in the 0°, 45°, and 90° directions were 0.56, 0.79, and 0.54, respectively — higher than those of seamless pipes — revealing a noticeable change in mechanical response induced by the forming process. Results from tensile tests and numerical simulations indicated that the advanced GTN model provided a more accurate prediction of strain-hardening and post-necking behavior compared with the modified version. Nevertheless, both models showed good agreement with the experimental data within a small error range. Overall, the findings demonstrate that, for reliable fracture assessment of this anisotropic pipeline steel, the advanced GTN model incorporating anisotropy yields a more realistic prediction of material failure behavior.

Keywords: Damage mechanic, GTN model, API X70 steel, Hill anisotropic yield criteria, Advanced Gurson model

۱- مقدمه

بیشتر فلزات درجات مختلفی از ناهمسانگردی را نشان می‌دهند. در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، تأثیر ناهمسانگردی بر نحوه تغییر شکل، قابل توجه و تعیین کننده است. شواهد تجربی اخیر نشان می‌دهد که بسیاری از شکست‌های سازه‌ای با پدیده آسیب ناهمسانگردی مرتبط هستند؛ حتی در شرایطی که ماده اولیه از دیدگاه خواص فیزیکی همسانگرد باشد. به‌طور معمول، ریزحفره‌ها و ریزترک‌ها در صفحات عمود بر محور تنش اصلی پیشینه رشد می‌کنند. از این رو، انجام تحلیل‌های مکانیکی بدون در نظر گرفتن اثر ناهمسانگردی در رفتار آسیب می‌تواند موجب نتایجی مشکوک و غیرقابل اتکا گردد [۱].

وسعت ناحیه گسستگی در مواد نرم و محدودیت نواحی نوک ترک، توصیف رفتار ماده بر اساس مکانیک شکست را با دشواری روبه‌رو می‌کند. امروزه مکانیک آسیب پیوسته^۱ ابزاری کاربردی برای شبیه‌سازی شکست نرم بوده و به خوبی رفتار شکست در مواد نرم را ارزیابی می‌کند. مدل‌های مکانیک آسیب می‌توانند با استفاده از معادلات مکانیک محیط‌های پیوسته فرآیند جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها را شبیه‌سازی کنند. مزیت بارز این روش در مقایسه با مکانیک شکست کلاسیک، وابستگی متغیرهای مدل به نوع ماده و استقلال آنها از هندسه مدل است. مدل‌های مکانیک آسیب، امکان ارزیابی آسیب در هر نقطه از ماده را بدون توجه به هندسه مدل و بارگذاری اعمالی بر آن، به کمک سازوکار رشد آسیب و میدان تنش-کرنش فراهم می‌سازند [۲].

مبانی اولیه مکانیک آسیب در سال ۱۹۵۸ با ارائه اولین مدل آسیب توسط کاجانف^۲ پایه‌ریزی گردید. این مدل اثرات توزیع همسانگرد حفرات کروی در جریان پلاستیک را توصیف می‌نمود. رشد آسیب در مدل کاجانف به ریزترک‌های ماده نسبت داده شده و به کمک یک متغیر آسیب ماکروسکوپی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. از سال ۱۹۵۸ تاکنون، مدل‌های آسیب متعددی معرفی شده است که می‌توان آن‌ها را در سه گروه مدل‌های بر مبنای معیار شکست ناگهانی، مانند مدل رایس و تریسی^۳، پلاستیسیته متخلخل^۴، مانند مدل گرسون و اصلاحات انجام شده توسط تی-ورگارد و نیدلمن و مکانیک آسیب پیوسته مانند مدل مکانیک آسیب لمتر^۵ تقسیم‌بندی نمود [۳-۵].

چانگ کین^۶ و همکاران مدل GTN را برای بررسی شکست نرم فولاد X65 به کار بردند. آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود آسیب روی نمونه‌های مدور شیاردار و نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای نشان داد که این مدل قادر است شکست نرم را در لوله‌های دارای نقص پیش‌بینی نماید [۶]. آشاریا^۷ و همکارش با بهره‌گیری از مدل GTN و مجموعه‌ای از متغیرهای تنظیم‌شده، رفتار نیرو-جابجایی و روند رشد ترک را در لوله‌ای از جنس فولاد 22NiMoCr37 دارای ترک محیطی، تحت آزمون خمش چهارنقطه‌ای شبیه‌سازی کردند. نتایج تحلیل آنها نشان داد که مدل GTN توانایی مناسبی در پیش‌بینی وقوع شکست نرم در این نوع لوله دارد [۷]. کوفیانی^۸ در پژوهشی به بررسی لوله‌های فولادی بدون درز X70 و درز جوش مستقیم X100 پرداخته است. با به دست آوردن ضرایب لنگفورد^۹ برای این دو نوع فولاد به این نتیجه رسید که ضرایب فولاد X100 در سه جهت مختلف به دلیل فرآیند ساخت آن مقادیر متفاوتی دارد و اعداد ناهمگنی و ناهمسانگردی زیادی را نشان می‌دهد؛ در حالی که ضرایب در سه جهت برای X70 تقریباً به هم نزدیک می‌باشند [۸]. مینبراگن^{۱۰} و همکاران معیار ناهمسانگردی هیل را به کار بردند تا اثر ناهمسانگردی را در سه جهت طولی، عرضی و ۴۵ درجه نسبت به جهت غلتک‌کاری برای لوله با درز جوش مارپیچ از جنس فولاد X70 به دست آورند [۹]. در پژوهشی دیگر شهزمانیان مدل GTN را بر اساس نظریه تسلیم ناهمسانگرد درجه دوم هیل با تعریف یک ضریب ناهمسانگرد مؤثر برای نشان دادن رفتار الاستیک-پلاستیک ماده AA6016-T4 به کار گرفت [۱۰]. وو^{۱۱} و همکاران برای پیش‌بینی دقیق شکست نرم مدل GTN ناهمسانگردی را توسعه دادند که تأثیر سه محوری بودن تنش بر هسته‌زایی حفره‌ها در آن لحاظ شد [۱۱]. خطیب و همکاران روشی ساده و بدون نیاز به تکرار برای گسترش مدل GTN ارائه دادند که با استفاده از نمودارهای حاصل از شبیه‌سازی‌های نظام‌مند، متغیرها را تعیین می‌کند [۱۲]. ژانگ و همکاران مدل GTN اصلاح‌شده برای برش و کرنش‌های بزرگ بر اساس نظریه الاستوپلاستیک ارائه دادند. مدل معرفی‌شده بر پایه بهینه‌سازی ظرفیت جذب انرژی پلاستیک به کار گرفته شده است [۱۳]. لیا و همکاران متغیرهای مدل آسیب ناهمسانگرد GTN را به روش پاسخ سطح بهینه‌سازی کردند [۱۴].

⁷ Acharyya⁸ Kofiani⁹ Lankford¹⁰ Minnebruggen¹¹ Wu¹ Continuum damage mechanics² Kachanov³ Rice and Tracy⁴ Porous plasticity⁵ Lemaitre⁶ Chang-Kyun

و ذرات فاز ثانویه است. در اثر بارگذاری، فلز به نقطه ناپایداری می‌رسد، حفره‌ها تشکیل و رشد می‌یابند و در نهایت با ایجاد جریان پلاستیک موضعی، شکست نرم اتفاق می‌افتد [۱۷].

۲-۱- مدل آسیب گرسون

تحلیل مدل اولیه شکست نرم، توسط گرسون انجام شد [۱۸]:

$$\phi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_0^2} + 2f \cosh\left(\frac{3\sigma_0\sigma_m}{2}\right) - 1 - f^2$$

در این رابطه σ_0 تنش تسلیم، σ_{eq} تنش مؤثر و σ_m تنش هیدرواستاتیک می‌باشد. مبنای مدل گرسون بر تابع تسلیم آن یعنی ϕ استوار است که رفتار یک ماده پلاستیک متخلخل را با در نظر گرفتن کسر حجمی حفره‌ها (f) توصیف می‌کند. این شرط تسلیم بر اساس نسبت حجم حفره‌ها به حجم کل ماده بیان می‌شود و نقش اصلی را در مدل‌سازی اثر وجود حفره‌ها بر پاسخ مکانیکی ماده دارد.

تحلیل جریان پلاستیک در مدل گرسون در یک محیط متخلخل با فرض رفتار پیوسته ماده صورت می‌گیرد. حفره‌ها در این مدل به صورت غیرمستقیم حضور داشته و تنها بر رفتار کلی ماده تأثیرگذار هستند. در این مدل، تأثیرات درون‌ماده‌ای به صورت میانگین لحاظ شده و بر شرایط تسلیم ماده اعمال می‌شود. سطح تسلیم در مدل گرسون تا حدی به تنش هیدرواستاتیک وابسته است، در حالی که در پلاستیسیته کلاسیک این سطح مستقل از تنش هیدرواستاتیک در نظر گرفته می‌شود. برخلاف مدل‌های مشابه مانند ریس و تریسی، مدل گرسون قابلیت پیش‌بینی شکست را بر اساس یک معیار گسیختگی داراست [۳].

تنش کوشی^۱ به صورت نیروی وارد بر سطح واحد متشکل از ماده و حفره، تعریف می‌شود. $f=0$ معرف ماده کاملاً متراکم بوده و بر این اساس سطح تسلیم گرسون به سطح تسلیم ون میز^۲ کلاسیک با سختی همسانگرد، تقلیل می‌یابد. $f=1$ بر ماده کاملاً متخلخل (حفره‌دار) که فاقد ظرفیت تحمل تنش است، دلالت دارد. پیش‌بینی کرنش‌های نهایی هنگام شکست در مواد حقیقی بر اساس معادله (۱) بسیار فراتر از حد واقعی است، که این موضوع از ضعف‌های بارز مدل گرسون به شمار می‌رود [۱۷].

مدل گرسون به وسیله تی‌ورگارد (۱۹۸۲) و در ادامه توسط تی‌ورگارد و نیدلمن (۱۹۸۴) مورد اصلاح قرار گرفت [۱۹]. این

در پژوهشی مشابه قلی‌پور و همکاران از طریق به حداقل رساندن اختلاف بین نتایج عددی و تجربی و به روش پاسخ سطح متغیرهای مدل GTN را به‌دست آوردند [۱۵]. در پژوهش جوان‌گروه و همکاران برای تحلیل دقیق فرآیند آغاز ترک از مدل غیرمحلّی GTN با در نظر گرفتن جوانه‌زنی و رشد حفره‌ها استفاده شد. همچنین به‌منظور بررسی اثر ناهمسانگردی، مدل پلاستیک Hill48 در قالب مدل GTN-Thomason به‌کار گرفته شد و با مدل‌سازی تأثیر ناهمسانگردی بر چقرمگی شکست ارزیابی گردید [۱۶].

مدل‌های میکرومکانیکی شکست نرم، مناسب‌ترین روش‌ها برای بررسی شکست در مواد نرم به حساب می‌آیند. شبیه‌سازی فرآیند جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها بر مبنای اصول مکانیک محیط‌های پیوسته استوار است. مزیت عمده این روش‌ها در مقایسه با مکانیک شکست کلاسیک، وابستگی کامل متغیرهای مدل به ماده مورد بررسی و عدم وابستگی آنها به هندسه مدل است. مدل‌های میکرومکانیکی شکست نرم، امکان ارزیابی شکست نرم را در هر نقطه از سازه، بدون توجه به هندسه مدل و بارگذاری اعمالی بر آن مهیا می‌سازند. این خصوصیت شرایط انتقال مدل تنظیم‌شده در آزمایشگاه را به سازه واقعی فراهم می‌کند [۱۷].

این مطالعه نخستین پژوهشی است که در آن ضرایب مدل‌های میکرومکانیکی GTN اصلاح‌شده با در نظر گرفتن ناهمسانگردی ناشی از جهت غلتک‌کاری برای فولاد API X70 تنظیم و مقایسه شده‌اند. بدین ترتیب امکان پیش‌بینی شکست نرم در جهات مختلف ماده و ارزیابی اثر تانسور ناهمسانگردی بر توزیع آسیب فراهم می‌شود. هدف این مقاله مقایسه رفتارهای آسیب نرم مدل میکرومکانیکی الاستوپلاستیک، وابسته به تنش هیدرواستاتیک، GTN و مدل گرسون پیشرفته در شکست نرم فولاد API X70 می‌باشد. در این پژوهش خواص مکانیکی خط لوله فولادی با گرید API X70 شناسایی شده است. در این مطالعه نتایج آزمایش کشش در جهات طولی، عرضی و ۴۵ درجه نسبت به جهت غلتک‌کاری ارائه شده و نتایج با شبیه‌سازی که در قالب کد VUMAT نوشته شده، مقایسه شده است. تاکنون تحقیقی روی تنظیم ضرایب مدل GTN در جهات سه‌گانه و همچنین بررسی اثر ناهمسانگردی برای فولاد X70 انجام نشده است.

۲-۲- مدل آسیب

شکست نرم در مواد شکل‌پذیر حاصل جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌های میکروسکوپی در نواحی شامل ناخالصی‌ها

² Von Mises

¹ Cauchy stress

معادله (۷) سهم حفره‌های جدید را تعیین می‌کند که با کرنش پلاستیک جوانه زده‌اند. متغیرهای f_N ، S_N و ε_N گروه دیگری از متغیرهای مدل گرسون هستند که به فرآیند جوانه‌زنی حفره ارتباط دارند. در رابطه (۷) محدوده کرنش پلاستیک در جوانه‌زنی حفره‌های جدید، از یک توزیع نرمال با مقدار میانگین ε_N ، انحراف استاندارد S_N و کسر حجمی حفرات در حال جوانه‌زنی f_N تبعیت می‌کند [۱۷].

مدل GTN تحلیل مود اول شکست را به خوبی انجام می‌دهد، چون بر اساس قید تنش سه‌بعدی حداکثر (حالت کرنش صفحه‌ای) طراحی شده است. این قید در مرکز نمونه آزمایش تحت کشش در محل گلوپی شدن^۱ حداکثر مقدار خود را دارد؛ لذا در این ناحیه رشد حفره‌ها حداکثر می‌باشد و رشد ترک به‌صورت تخت است. با نزدیک شدن ترک به سطح از مقدار این قید کاسته شده و تنش به حالت دوبعدی تبدیل می‌شود که حالت تنش صفحه‌ای است و ترک به‌صورت برشی رشد می‌کند که نشان دهنده مود دوم شکست می‌باشد [۲۳].

۲-۲- مدل گرسون پیشرفته

یکی از محدودیت‌های مدل GTN آن است که تابع تسلیم زمینه فلزی را به‌صورت همسانگرد فرض می‌کند. در حالی که مشاهدات تجربی نشان می‌دهند ناهمسانگردی زمینه اطراف حفرات می‌تواند بر رفتار تنش معادل و روند آسیب تأثیر قابل توجهی داشته باشد. از این‌رو، برای لحاظ کردن این اثر، به‌جای تابع تسلیم همسانگرد، از تابع تسلیم غیرهمسانگرد هیل استفاده می‌شود [۲۴]. مدل گرسون پیشرفته دارای تابع تسلیم ناهمسانگرد به‌صورت معادله زیر می‌باشد [۲۵]:

$$F_p = \frac{\bar{\sigma}_{eqv}^2}{\sigma_y^2} + 2q_1 f^* \cosh\left(-\frac{3q_2 \bar{\sigma}_m}{\kappa \sigma_y}\right) - 1 - q_3 f^{*2} \quad (۸)$$

در این رابطه $\bar{\sigma} = (\sigma - X)$ تانسور تنش منتقل شده^۲ است که به‌صورت اختلاف تانسور تنش کوشی و تانسور تنش برگشتی^۳ تعریف می‌شود. $\bar{\sigma}_{eqv}$ تنش معادل منتقل شده ناهمسانگرد (به نسبت معیار درجه دو هیل می‌باشد) که از رابطه $\bar{\sigma}_{eqv} = \sqrt{1/2(\bar{\sigma} : \underline{H} : \bar{\sigma})}$ محاسبه می‌شود. در این معادله $\underline{H}$ ماتریس هیل است که تابعی از ضرایب لنگفورد r_0 ، r_{45} و r_{90} می‌باشد. σ_y

مدل یکی از مشهورترین مدل‌ها برای پیش‌بینی شکست نرم می‌باشد. این مدل کسر حجمی حفرات کروی تصادفی توزیع شده در ماده متخلخل را توصیف می‌کند [۲۰]. تابع تسلیم اصلاح شده ϕ ، مدل GTN نام دارد [۲۱]:

$$\phi = \frac{\sigma_{eq}^2}{\sigma_0^2} + 2q_1 f^* \cosh\left(\frac{3q_2 \sigma_m}{2\sigma_0}\right) - (1 + q_3 f^{*2}) = 0 \quad (۲)$$

تی‌ورگارد و نیدلمن دو ثابت q_1 و q_2 را به منظور توجیه اثرات متقابل حفره‌ها در آرایش چند حفره‌ای و نیز تطبیق با داده‌های تجربی معرفی کردند. در این رابطه $q_3 = q_1^2$ می‌باشد. اعمال این تغییرات در مدل گرسون به تقویت تأثیر تنش هیدرواستاتیک منجر گردید. کسر حجمی مؤثر حفره، f^* توسط تی‌ورگارد و نیدلمن معرفی شد تا به‌هم پیوستن حفره‌ها را شبیه‌سازی کند [۲۲]:

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) & f_c < f < f_F \\ f_u^* & f \geq f_F \end{cases} \quad (۳)$$

در عبارت فوق f_c و f_F به ترتیب معرف کسر حجمی حفره بحرانی و کسر حجمی حفره در هنگام جدایی نهایی ماده است که تحت عنوان متغیرهای معیار گسیختگی متخلخل شناخته می‌شوند.

$$f_u^* = 1/q_1 \quad (۴)$$

با رسیدن f^* به مقدار حدی $1/q_1$ ، ظرفیت تحمل بارگذاری در ماده ناچیز می‌شود. در تحلیل مدل GTN نرخ رشد حفره به صورت مجموع نرخ جوانه‌زنی و رشد حفره در نظر گرفته می‌شود:

$$\dot{f} = \dot{f}_{\text{growth}} + \dot{f}_{\text{nucleation}} \quad (۵)$$

$$\dot{f}_{\text{growth}} = (1 - f) \dot{\varepsilon}_{kk}^p \quad (۶)$$

معادله (۶) نرخ حفره‌های از قبل موجود را تعریف می‌کند.

$$\begin{aligned} \dot{f}_{\text{nucleation}} &= A \dot{\varepsilon}_0 \\ &= \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon_0^p - \varepsilon_N}{S_N}\right)^2\right] \dot{\varepsilon}_0 \end{aligned} \quad (۷)$$

³ Back stress

¹ Necking

² Shifted stress

$$G = \frac{2}{1 + r_0} \quad (۱۲)$$

$$H = \frac{2r_0}{1 + r_0} \quad (۱۳)$$

$$L = M = N = (F + G)(r_{45} + 0.5) \quad (۱۴)$$

تانسور $\underline{\underline{H}}$ به صورت رابطه زیر تعریف می شود:

$$\underline{\underline{H}} = \begin{bmatrix} G + H & -H & -G & 0 & 0 & 0 \\ -H & H + F & -F & 0 & 0 & 0 \\ -G & -F & F + G & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2M \end{bmatrix} \quad (۱۵)$$

در رابطه (۸)، K به صورت زیر تعیین می شود:

$$K = \sqrt{1.6 \left[\frac{h_1 + h_2 + h_3}{(h_1 h_2) + (h_2 h_3) + (h_1 h_3)} \right] + 0.8 \left[\left(\frac{1}{h_4} \right) + \left(\frac{1}{h_5} \right) + \left(\frac{1}{h_6} \right) \right]} \quad (۱۶)$$

ضرایب h_i در معادله (۱۶) از روابط زیر به دست می آیند:

$$h_1 = -\frac{2}{3} \left[\frac{r_0 r_{90} - 2r_0 - 2}{1 + r_0} \right] \quad (۱۷)$$

$$h_2 = h_1 \left[1 - \frac{3(r_0 r_{90} - 1)}{r_0 r_{90} - 2r_0 - 2} \right] \quad (۱۸)$$

$$h_3 = h_1 \left[1 - \frac{3r_0(r_{90} - 1)}{r_0 r_{90} - 2r_0 - 2} \right] \quad (۱۹)$$

$$h_4 = h_1 \left[-0.5 \left(\frac{3(r_{90} - 1)}{r_0 r_{90} - 2r_0 - 2} \right) \right] \quad (۲۰)$$

$$h_5 = h_1 \left[-0.5 \left(\frac{3r_0(r_{90} - 1)}{r_0 r_{90} - 2r_0 - 2} \right) \right] \quad (۲۱)$$

$$h_6 = h_1 \left[-0.5 \left(\frac{(2r_{45} + 1)(r_{90} - 1)}{r_0 r_{90} - 2r_0 - 2} \right) \right] \quad (۲۲)$$

تنش تسلیم ماده زمینه است که تابع عددی کرنش پلاستیک معادل زمینه است که سخت شونده گی را توصیف می کند. $\bar{\sigma}_m$ تنش منتقل شده میانگین است که مساوی $\frac{1}{3} tr(\bar{\sigma})$ می باشد. f^* تابعی از تخلخل f است. در این مدل به هم پیوستن حفرات در نظر گرفته نمی شود. f کسر حجمی حفره است که نسبت بین حجم حفره، V_v و حجم کل، $V_m + V_v$ می باشد که V_m حجم ماده زمینه است. متغیر K اثر ناهمسانگردی پلاستیک را نشان می دهد که توسط بنزرگا و بسون^۱ از تحلیل میکرومکانیکی به دست می آید [۲۶]. این متغیر تابعی از ضرایب لنکفورد r_0 و r_{45} است که برای ماده همسانگرد مساوی ۲ می باشد [۲۷].

جزء بعدی مدل ماده شامل قانون سخت شونده گی می باشد که با معادله زیر مدل می شود و به قانون سوئیفت^۲ معروف است:

$$\bar{\sigma} = K(\bar{\varepsilon} + \varepsilon_0)^n \quad (۹)$$

که در این رابطه K ضریب استحکام، ε_0 پیش کرنش و n توان کارسختی نامیده می شود [۸].

به طور کلی، ناهمسانگردی پلاستیک در ورق های فلزی ناشی از جهت گیری ترجیحی دانه ها در ساختار چند کریستالی فلز است. تغییر رفتار پلاستیک با تغییر جهت را معمولاً با استفاده از ضریب لنکفورد (ضریب ناهمسانگردی) مورد سنجش و ارزیابی قرار می دهند [۲۸]. این ضریب با آزمون کشش تک محوری تعیین می شود. ضریب ناهمسانگردی r با رابطه زیر تعریف می شود:

$$r = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{33}} \quad (۱۰)$$

در این رابطه، ε_{22} و ε_{33} به ترتیب نشان دهنده کرنش در جهت عرضی و کرنش در جهت ضخامت هستند. در مواد همسانگرد، مقدار این ضریب برابر با یک است و در نتیجه کرنش های عرضی و ضخامت برابرند. در صورتی که مقدار ضریب بیش از یک باشد، بیانگر مقاومت بیشتر ماده در برابر کاهش ضخامت است.

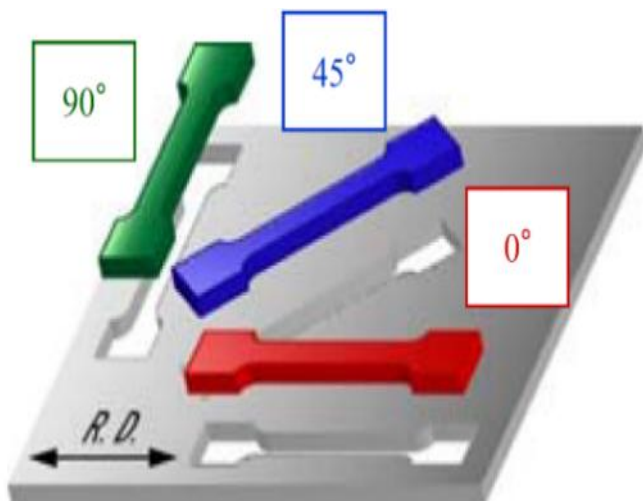
معیار تسلیم هیل شامل شش متغیر ناهمسانگردی است که برای انجام تحلیل رفتار ناهمسانگرد باید مقادیر آن ها تعیین شوند. این متغیرها، یعنی F ، G ، H ، N ، L و M به صورت تابعی از ضرایب لنکفورد (ضریب های ناهمسانگردی) محاسبه می گردند [۲۵]:

$$F = \frac{2r_0}{r_{90}(1 + r_0)} \quad (۱۱)$$

² Swift

¹ Benzerga and Besson

۳- مواد و روش‌ها



شکل ۱ راستای نمونه‌های آزمایش کشش [۲۷]

بارگذاری با نرخ کرنش ثابت 0.002 بر ثانیه اعمال شده و داده‌های حاصل از آزمون برای تحلیل رفتار ناهمسانگردی و تعیین ضرایب مکانیکی ماده مورد استفاده قرار گرفت. برای انجام آزمایش کشش، علاوه بر اندازه‌گیری کرنش طولی، ثبت دقیق کرنش عرضی نیز ضروری است تا بتوان رفتار ناهمسانگرد فولاد را در راستاهای مختلف بررسی کرد. پس از نصب نمونه در فک دستگاه کشش، کرنش طولی توسط اکستنسومتر با دقت بالا اندازه‌گیری و ثبت می‌شود.

برای اندازه‌گیری کرنش عرضی نیز از کرنش‌سنج عرضی مدل TML ساخت ژاپن استفاده شده است که به‌صورت مستقیم روی سطح نمونه نصب می‌شود و تغییرات عرضی ناشی از تغییرشکل پلاستیک را ثبت می‌کند. شکل (۲) ابعاد نمونه‌ها، نحوه نصب کرنش‌سنج و قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه کشش را نشان می‌دهد. به‌منظور دریافت و پردازش داده‌های کرنش عرضی، از یک سیستم جمع‌آوری داده استفاده شده که شامل مدار الکتریکی، آمپلی‌فایر تقویت‌کننده سیگنال و واحد ثبت دیجیتال است. این سیستم تغییرات ولتاژ خروجی ناشی از کرنش‌سنج را با دقت بالا اندازه‌گیری کرده و داده‌های ولتاژ به‌صورت پیوسته در نرم‌افزار MATLAB ذخیره می‌شوند. سپس با به‌کارگیری روابط کالیبراسیون و تبدیل ریاضی در این برنامه ولتاژهای ثبت‌شده به مقادیر واقعی کرنش عرضی تبدیل شده‌اند.

این روش امکان تحلیل دقیق رفتار کرنشی در راستاهای مختلف و تعیین ضریب پواسون و ضرایب ناهمسانگردی فولاد API X70 را فراهم می‌سازد.

برای تولید لوله‌های درزدار با درز مستقیم، ابتدا پیش از تبدیل ورق فولادی به لوله، دو لبه طولی آن توسط دستگاه‌های پرس شکل‌دهی، ماشین‌کاری دقیق می‌شوند. سپس ورق وارد پرس U شده و تحت فشار مطابق قالب، به شکل U درمی‌آید. در مرحله بعد، ورق U شکل به دستگاه پرس O منتقل شده و با اعمال فشار نهایی به لوله درزدار تبدیل می‌شود. پس از شکل‌گیری، درز طولی لوله به‌صورت خودکار از داخل و خارج جوشکاری می‌شود. لوله فولادی مورد بررسی از جنس فولاد API X70 و تولید شده به روش جوش درز مستقیم است. ضخامت دیواره و قطر خارجی لوله به ترتیب $19/8$ و $1422/4$ میلی‌متر می‌باشد. لوله‌های تولیدشده از این نوع هم‌اکنون در خطوط انتقال گاز طبیعی پرفشار ایران مورد استفاده قرار دارند. فولاد به‌کاررفته از خانواده فولادهای کم‌کربن پراستحکام بوده و در کارخانه لوله‌سازی اهواز ساخته شده است.

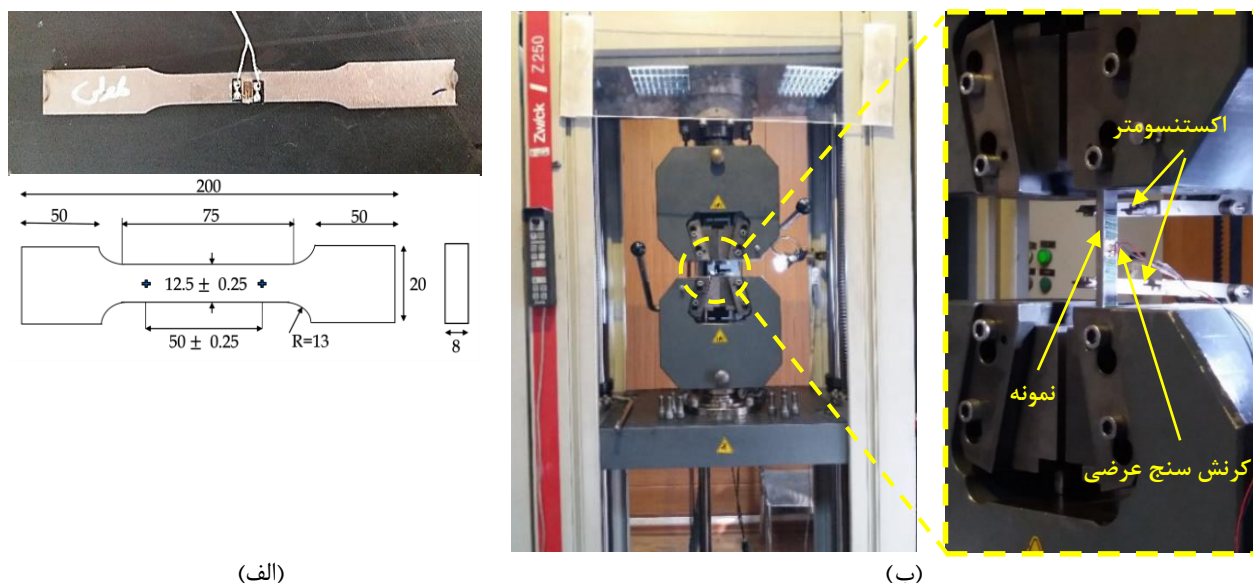
جدول (۱) ترکیب شیمیایی عناصر موجود در فولاد API X70 را که از طریق آزمایش فلوئورسانس پرتوی ایکس^۱ به‌دست آمده، همراه با مقایسه آن با مقادیر استاندارد API 5L نشان می‌دهد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی لوله فولادی از جنس API X70 (wt.%)

نام عنصر	کربن	سیلیسیم	منگنز	مولیبدن
درصد وزنی	۰/۰۵۳	۰/۶۹	۱/۴۲	۰/۱۱
حداکثر [۲۹]	۰/۲۴۰	-	۱/۴۰	-
نام عنصر	نیوبیوم	آلومینیوم	کروم	گوگرد
درصد وزنی	۰/۰۰۰۶	۰/۱۴	۰/۲۶	۰/۰۰۰۸
حداکثر [۲۹]	-	-	-	۰/۰۱۵

فرآیند تولید تأثیر قابل‌توجهی بر میزان ناهمسانگردی مواد دارد؛ از این‌رو به‌منظور ارزیابی دقیق خواص مکانیکی و رفتار ناهمسانگرد لوله فولادی API X70 تولید شده به روش UOE، نمونه‌هایی از لوله در سه راستای طولی، عرضی و ۴۵ درجه نسبت به جهت نورد یا غلتک‌کاری تهیه و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. برای تعیین خواص مکانیکی فولاد، آزمایش کشش تک‌محوره روی نمونه‌های تخت در سه جهت صفر درجه (محوری)، ۹۰ درجه (محیطی) و ۴۵ درجه مطابق با شکل (۱) انجام شد.

^۱ X-Ray fluorescence analysis

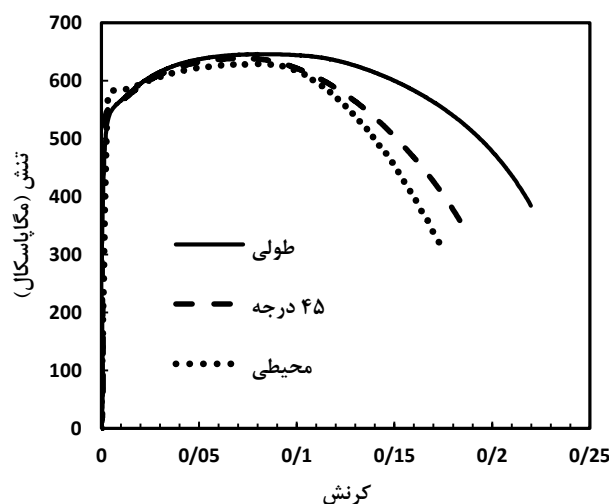


شکل ۲ الف- ابعاد نمونه آزمون کشش، نحوه اتصال کرنش سنج و ب- دستگاه کشش و نحوه قرارگیری نمونه و تجهیزات به دستگاه

۴- نتایج و بحث

۴-۱- نتایج حاصل از آزمایش کشش

نمودار تنش-کرنش مهندسی نمونه‌ها پس از آزمون کشش تک محوری در جهات مختلف در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳ تنش-کرنش در جهات سه گانه

خواص مکانیکی فولاد X70 شامل تنش‌های تسلیم و نهایی، مدول یانگ و ضریب پواسون و همچنین مقایسه مقادیر به‌دست‌آمده با استاندارد API 5L در جدول (۲) ارائه شده‌اند. به منظور اطمینان از صحت و دقت نتایج خواص مکانیکی، آزمون کشش برای هر یک از راستاهای نمونه‌برداری سه بار تکرار شد و نتایج نهایی به صورت میانگین $\pm$ انحراف معیار گزارش شده‌اند.

انحراف معیار محاسبه‌شده بیانگر میزان پراکندگی داده‌ها و عدم قطعیت ناشی از ناهمگنی موضعی ماده است. همچنین شایان ذکر است از کرنش سنج با حساسیت حدود ۰/۸ درصد استفاده گردید. نیروی اعمالی نیز توسط لودسل دستگاه با دقت $\pm ۰/۵$ درصد (مطابق با استانداردهای کالیبراسیون آزمایشگاهی) اندازه‌گیری و ثبت شده است.

نتایج نشان می‌دهد استحکام تسلیم در جهت طولی کمتر از جهت ۴۵ درجه و نیز در جهت ۴۵ درجه کمتر از جهت محیطی است. از آن‌جا که لوله در راستای طولی نورد شده، وجود میزان اندکی تنش پسماند در این جهت طبیعی است. در واقع، فرآیند نورد سبب بروز رفتار ناهمسانگرد در صفحات فلزی می‌شود. جهت‌گیری خاص دانه‌ها در ساختار فلز، منجر به ایجاد خواص مکانیکی جهت‌دار و غیریکنواخت می‌گردد. در فلزاتی که تحت عملیات ترمومکانیکی قرار می‌گیرند، بافت حاصل از تبلور مجدد و رشد دانه‌ها پس از آن، نقش تعیین‌کننده‌ای در کنترل ویژگی‌های مکانیکی ماده نهایی دارد. احمدی و همکاران با ارزیابی خواص مکانیکی فولادهای 112 HR و SAPH440 در سه جهت نورد، عمود بر نورد و ۴۵ درجه گزارش کردند که مقدار تنش تسلیم در جهت ۴۵ درجه بین مقادیر متناظر در دو جهت دیگر قرار می‌گیرد [۳۱]. گائو و همکاران با بررسی فولاد X70 نشان دادند که در لوله‌های تولیدشده به روش UOE فرایند کارسرد تنش‌های بالایی ایجاد می‌کند که عمدتاً در راستای محیطی جهت‌گیری دارند [۳۲]. پاردس و همکاران برای نمونه‌های فولاد X70 استخراج‌شده در جهات ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه به‌ترتیب مقادیر تنش تسلیم ۵۳۵، ۵۵۳ و ۵۷۳ مگاپاسکال را

مشخصه‌یابی جامع رفتار پلاستیک ناهمسانگرد و تکامل آسیب در لوله فولادی درزجوش مارپیچ X70 نشان دادند که تسلیم ماده به جهت‌پذیری وابسته است و این موضوع رفتار ناهمسانگرد آن را تأیید می‌کند؛ اما رفتار موضعی در ناحیه شکست برای این ماده عملاً نسبت به ناهمسانگردی حساس نمی‌باشد [۳۴].

گزارش کرده‌اند. در این پژوهش نیز مقادیر ۵۱۶، ۵۴۶ و ۵۵۳ مگاپاسکال به‌دست آمده است که در محدوده نتایج ارائه‌شده توسط آن‌ها قرار می‌گیرد و روند افزایش تنش تسلیم با تغییر جهت نمونه‌برداری را تأیید می‌کند. این مقایسه نشان می‌دهد نتایج حاضر از نظر مرتبه بزرگی و رفتار مکانیکی با داده‌های معتبر پیشین تطابق مناسبی دارد [۳۳]. لوب و همکاران پس از

جدول ۲ نتایج آزمایش کشش در جهات سه‌گانه

راستای نمونه آزمون کشش	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون	استحکام تسلیم (MPa)	استحکام نهایی (MPa)	استحکام تسلیم / استحکام نهایی	ازدیاد طول (%)
صفر درجه	۲۱۰	۰/۳	۵۱۶±۱۱	۶۴۵±۱۵	۰/۸۰	۲۱/۹±۱/۳
۴۵ درجه	۲۱۰	۰/۳	۵۴۶±۱۲	۶۳۸±۱۴	۰/۸۵	۱۸/۳±۱/۰
۹۰ درجه	۲۱۰	۰/۳	۵۵۳±۱۳	۶۲۹±۱۶	۰/۸۸	۱۷/۳±۱/۱
کمینه [۳۵]	-	-	۴۸۵	۵۷۰	-	-
بیشینه [۳۵]	-	-	۶۳۵	۷۶۰	۰/۹۳	-

در بازه ۰/۰۹۹ تا ۰/۱۶۸ و ϵ_0 بین ۰/۰۰۳ تا ۰/۰۱۱. این مقایسه نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش از نظر مرتبه بزرگی و روند تغییرات با داده‌های گزارش‌شده در مطالعات پیشین تطابق قابل‌قبولی دارد [۳۶]. مقایسه مقادیر ضرایب قانون توانی گزارش‌شده در پژوهش حاضر با پژوهش پاردس و همکاران (K برابر ۸۷۳ مگاپاسکال، n و ϵ_0 به ترتیب ۰/۱۱ و ۰/۰۲۵) هم‌راستایی قابل‌توجهی دارد. هرچند تفاوت‌های اندکی ناشی از جهت‌گیری نمونه‌ها مشاهده می‌شود؛ اما مرتبه بزرگی متغیرها در هر دو مطالعه مشابه است. این مقایسه نشان می‌دهد که ضرایب استخراج‌شده در این پژوهش در بازه معتبر گزارش‌شده برای فولادهای API X70 قرار می‌گیرد و از دقت و اعتبار کافی برخوردار است [۳۳].

مقدار ضرایب ناهمسانگردی r برای فولاد موردنظر طبق استاندارد از آزمایش کشش به‌دست آمد که نتایج آن در جدول (۴) خلاصه شده است. این ضرایب با استفاده از نسبت کرنش‌های عرضی به کرنش در راستای ضخامت محاسبه شدند.

جدول ۴ ضرایب ناهمسانگردی فولاد API X70

راستای نمونه آزمون کشش	صفر درجه	۴۵ درجه	۹۰ درجه
پژوهش حاضر	۰/۵۶	۰/۷۹	۰/۵۴
[۸]	۰/۷۷	۰/۶۹	۰/۸۴

برای لحاظ کردن رفتار پلاستیک ماده باید منحنی تنش بر حسب کرنش پلاستیک وارد نرم‌افزار شود. در شبیه‌سازی مدل GTN، از داده‌های تنش و کرنش حقیقی برای تعریف بخش سخت‌شوندگی استفاده می‌گردد. پس از به‌دست آوردن مقادیر تنش‌ها و کرنش‌های حقیقی در جهات سه‌گانه، منحنی توانی با استفاده از روش کمترین مربعات بر منحنی‌های تنش-کرنش مربوطه برازش و ضرایب قانون توانی طبق جدول (۳) به‌دست آمده است.

جدول ۳ ضرایب معادله سوئیفت برای نمونه فولادی API X70

راستای نمونه آزمون کشش	ضریب استحکام K(MPa)	توان کارسختی n	پیش کرنش ϵ_0
صفر درجه	۸۷۹	۰/۰۹۳۰۶	۰/۰۰۰۸۶۹
۴۵ درجه	۸۹۳	۰/۱۰۴۱۰	۰/۰۰۴۵۱۶
۹۰ درجه	۸۶۵	۰/۰۹۸۵۶	۰/۰۰۸۲۴۷

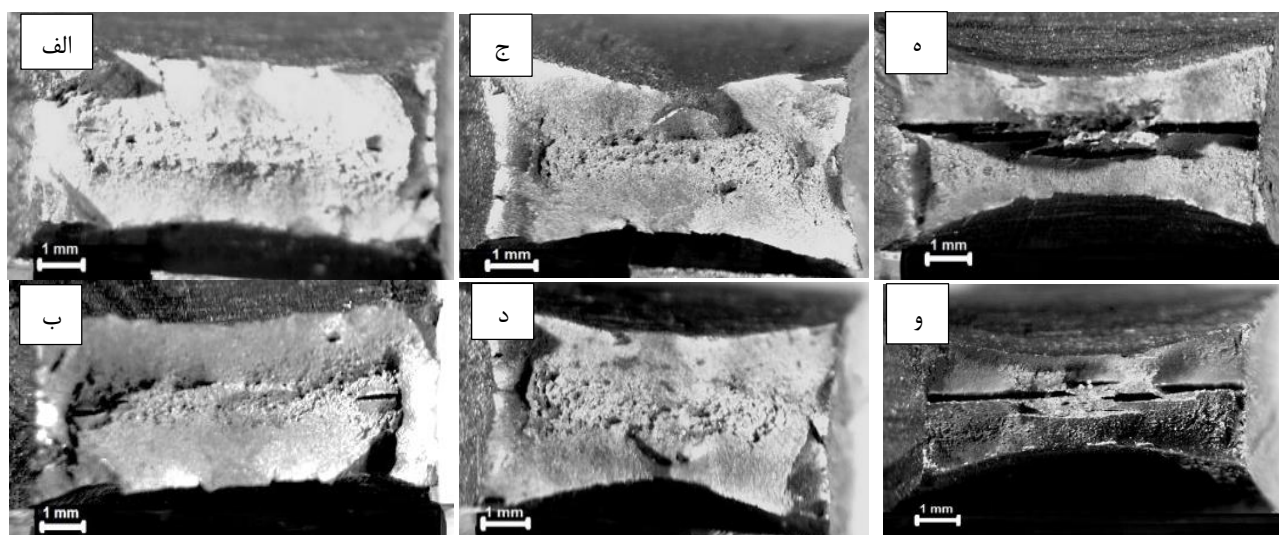
بر اساس داده‌های جدول (۳) ضرایب قانون توانی به‌دست‌آمده در این مطالعه برای فولاد API X70 شامل n در بازه بین ۰/۰۹۳ تا ۰/۱۰۴ و پیش‌کرنش ϵ_0 در بازه ۰/۰۰۹ تا ۰/۰۰۸۳ در محدوده‌ای قرار می‌گیرند که در مطالعه هوانگ برای نمونه‌های X70 با شرایط حرارتی مختلف گزارش شده است (n

پاردس و همکاران با بررسی ناهمسانگردی در ناحیه پلاستیک و به دست آوردن ضرایب لنگفورد در معیار تسلیم Hill'48 برای فولاد X70 نشان دادند نابجایی صفحه‌ای در جهت عرضی محسوس‌تر است، در حالی‌که در جهت طولی و مورب شدت کمتری دارد [۳۳].

۴-۲- بررسی سطوح شکست

پس از آغاز پدیده گلوپی شدن، میکرو حفره‌هایی در سطح مقطع ناحیه گلوپی تشکیل می‌شوند. با ادامه تغییر شکل پلاستیک، این میکرو حفره‌ها رشد کرده و به یکدیگر نزدیک می‌شوند تا در نهایت با ادغام، یک ترک اصلی را در مرکز ناحیه گلوپی ایجاد نمایند. در مرحله نهایی، رشد سریع ترک در اطراف ناحیه گلوپی رخ داده و مسیر آن معمولاً در امتداد زاویه‌ای حدود ۴۵ درجه نسبت به محور کشش گسترش می‌یابد؛ زاویه‌ای که در آن تنش برشی بیشینه است. این نوع شکست که با سطحی دارای الگوی گودی و برآمدگی (دیمپل) مشخص می‌شود، بیانگر شکست چقرمه ناشی از رشد و هم‌جوشی میکرو حفره‌ها است. در شکل (۴) تصاویر سطح شکست نمونه‌های کششی در سه جهت مختلف که توسط میکروسکوپ XTL500 ثبت شده‌اند، نمایش داده شده است.

نتایج ضرایب ناهمسانگردی حاصل از آزمایش کشش برای لوله فولادی API X70 که به روش درز جوش مستقیم تولید شده است، در جهات ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب ۰/۷۹، ۰/۵۴ و ۰/۵۴ به دست آمده است. این مقادیر بیانگر وجود مقداری ناهمسانگردی در رفتار پلاستیک ماده است. اختلاف مقادیر ضرایب در سه راستا ناشی از جهت‌گیری دانه‌ها و تنش‌های پسماند به‌جامانده از فرآیند نورد و خم‌کاری در حین تولید لوله است. در فرایند تولید لوله‌های درز جوش مستقیم، ورق فولادی پس از نورد و عملیات خم‌کاری، از طریق جوش مقاومتی در امتداد درز به یکدیگر متصل می‌شود. توالی این فرایندها موجب اعمال تغییر شکل‌های چندمحوره و ایجاد تغییرات موضعی در بافت کریستالوگرافی و ایجاد تنش‌های پسماند در ناحیه جوش می‌گردد. در نتیجه، لوله‌های حاصل از این روش نسبت به لوله‌های بدون درز رفتار مکانیکی ناهمسانگردتری را از خود نشان می‌دهند. مقایسه با لوله فولادی API X70 بدون درز که ضرایب ناهمسانگردی آن در جهات ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب ۰/۷۷، ۰/۶۹ و ۰/۸۴ گزارش شده است [۸] نشان می‌دهد که لوله درزدار دارای تفاوت بیشتر میان ضرایب در سه جهت است. این تفاوت حاکی از تأثیر قابل ملاحظه فرآیند خم‌کاری بر بافت و ریزساختار ماده می‌باشد. درواقع، جهت‌گیری ترجیحی دانه‌ها در اثر نورد، موجب می‌شود که رفتار تسلیم و تغییر شکل لوله در راستاهای مختلف یکسان نباشد.



شکل ۴ سطح شکست فوقانی و تحتانی نمونه‌ها؛ الف و ب- صفر درجه، ج و د- ۴۵ درجه، ه و و- ۹۰ درجه

نزدیک به سطح نمونه، مسیر رشد ترک معمولاً با زاویه‌ای حدود ۴۵ درجه نسبت به محور بارگذاری دنبال می‌شود. مطابق با شکل (۴) سطح شکست نمونه‌ها ترکیبی از شکست مسطح (محوری)

با آغاز پدیده گلوپی شدن در مرکز نمونه، حالت تنش سه‌محوره در این ناحیه به‌وجود می‌آید و ترک تمایل دارد در مناطقی با شدت بالاتر تنش سه‌بعدی گسترش یابد. در نواحی

هستند و قابلیت انتقال مدل از مقیاس آزمایشگاهی به سازه واقعی را فراهم می‌کنند. به منظور استخراج ضرایب بهینه از فرآیند تکراری و تنظیم پارامتری استفاده شد. نتایج نهایی در جدول (۵) نوشته شده است.

جدول ۵ متغیرهای تنظیم‌شده مدل GTN برای فولاد API X70

راستا	q_1	q_2	ϵ_N	S_N	f_N	f_f	f_c
صفر درجه	۱/۴۲	۰/۹۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۰۳	۰/۲۹	۰/۱۹
۴۵ درجه	۱/۴۲	۰/۹۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۴۰	۰/۱۵	۰/۱۰
۹۰ درجه	۱/۴۲	۰/۹۵	۰/۳	۰/۱	۰/۰۰۷	۰/۱۸	۰/۱۲

ضرایب q_1 و q_2 معرف شکل سطح تسلیم ماده متخلخل بوده و معمولاً به ترتیب ۱/۴۲ و ۰/۹۵ برای فولادهای کربنی انتخاب می‌شوند. ضرایب ϵ_N ، S_N و f_N به مکانیزم ایجاد و رشد حفره‌ها مربوط می‌باشند؛ در حالی که f_c و f_f حدود بحرانی برای هم‌جوشی حفره‌ها و شکست نهایی را مشخص می‌کنند. نتایج به‌دست آمده با سایر پژوهش‌ها مطابقت دارد [۳۹]. به علت اینکه قسمت ابتدایی و انتهایی نمونه که در فک‌ها قرار می‌گیرند در شبیه‌سازی تأثیری ندارند، تنها قسمت سنجه نمونه به طول ۵۰ میلی‌متر شبیه‌سازی شده است. اندازه المان در ناحیه رشد ترک بر اساس میانگین فاصله بین ذرات ناخالصی ماده تعیین شد و مقدار ۰/۲ میلی‌متر به‌عنوان اندازه مناسب شبکه انتخاب گردید [۴۰]. برای انجام شبکه‌بندی از المان سه‌بعدی C3D8R (هشت‌گره‌ای) استفاده شد. برای بررسی اثر اندازه المان بر نتایج مدل‌سازی شکست، تحلیل حساسیت به مش انجام شد. در این بررسی، اندازه المان مؤثر (L_0) در ناحیه تشکیل ترک برابر ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شد. این مقدار بیانگر متوسط فاصله بین ذرات ناخالصی ماده است که در مدل GTN نقش مهمی در تنظیم متغیرهای آسیب دارد. نتایج تحلیل در شکل (۵) و جدول (۶) نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که با کاهش اندازه المان‌ها، همگرایی داده‌های عددی با نتایج تجربی افزایش می‌یابد و منحنی‌های نیرو-جابجایی به‌طور محسوسه به نتایج آزمون کشش واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که اندازه مش انتخاب شده (۰/۲ میلی‌متر) دقت مناسب و پایداری عددی مطلوبی برای شبیه‌سازی رشد ترک در فولاد API 5L X70 فراهم کرده است.

در مرکز و شکست برشی در پیرامون ناحیه گلویی را نشان می‌دهد. در شکل (۴- و و) پدیده جداشدگی لایه‌لایه^۱ مشاهده می‌شود. این ترک‌های ثانویه به‌صورت موازی با صفحه نورد ورق ایجاد شده و مشخصه‌ای از رفتار شکست در فولادهای پراستحکام به شمار می‌آیند. از آنجا که در فرآیند تولید، لوله در راستایی عمود بر جهت نورد خم‌کاری شده است، این پدیده صرفاً در نمونه برداشت‌شده در جهت ۹۰ درجه مشاهده شده و در سایر جهت‌ها رخ نداده است.

۴-۳- نتایج حاصل از تنظیم مدل گرسون برای فولاد API X70

در این پژوهش، شبیه‌سازی آزمون کشش نمونه‌های تخت فولاد API X70 به منظور تنظیم مدل GTN و اجرای زیروال اختصاصی VUMAT در نرم‌افزار آباکوس انجام شده است [۳۷]. پس از این مرحله، خواص مکانیکی ماده کالیبره گردیده و به‌صورت پارامتری تعریف شده تا امکان شبیه‌سازی سایر آزمون‌های مرتبط بر روی این فولاد و مواد مشابه فراهم شود. برای شبیه‌سازی آزمون کشش تک‌محوری، از مدل آسیب GTN استفاده شد که مدلی مبتنی بر رفتار شکست مواد نرم و متخلخل است. این مدل، در حالت کامل خود، هم رفتار پلاستیک و هم رشد حفره‌ها را در بر می‌گیرد و در محیط آباکوس تحت عنوان "Porous Metal Plasticity" موجود است. برای استفاده از آن، ضرایب مختص ماده باید تعریف شوند. مدل GTN در هر جهت شامل ۹ متغیر است که با در نظر گرفتن رابطه $q_3 = q_1^2$ به ۸ متغیر مستقل کاهش می‌یابد. این ضرایب ذاتاً وابسته به جنس ماده بوده و مستقل از هندسه یا شرایط بارگذاری مدل هستند در حالت اولیه و بدون تغییر شکل، ماده دارای کسر حجمی حفره‌های اولیه f_0 است که مقدار آن بر اساس ترکیب شیمیایی فولاد با معادله فرانکلین محاسبه می‌شود [۳۸]:

$$f_0 = 0.054 \left(S\% - \frac{0.1}{Mn\%} \right) \quad (23)$$

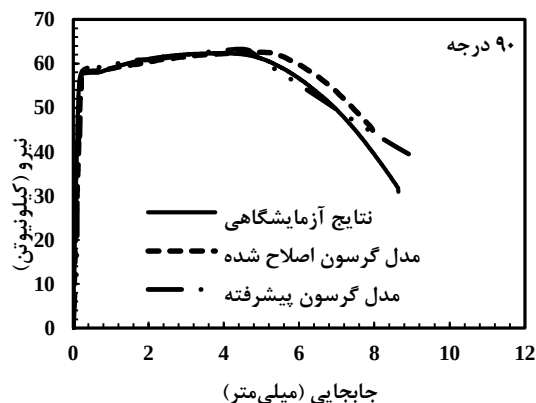
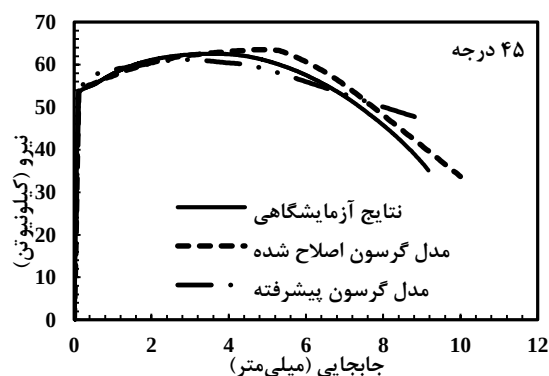
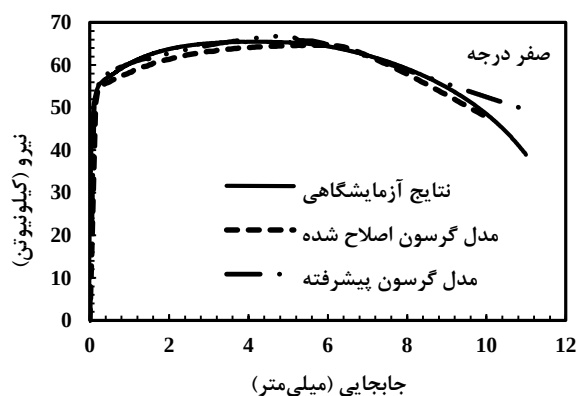
در این تحقیق، مقدار اولیه حفره‌ها برای این فولاد برابر با $f_0 = 0.0038$ در نظر گرفته شد. مراحل کالیبراسیون ضرایب GTN به‌گونه‌ای انجام گرفت که منحنی‌های نیرو-تغییر طول حاصل از شبیه‌سازی، بیش‌ترین تطابق را با نتایج تجربی در سه راستای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه داشته باشند. تطابق این منحنی‌ها نشان می‌دهد ضرایب به‌دست‌آمده مستقل از هندسه و بارگذاری

¹ Delamination

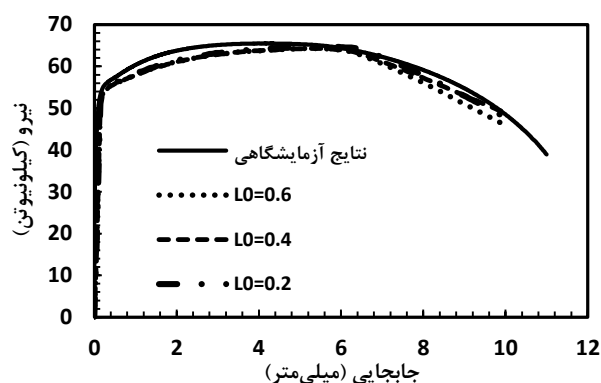
در زیروال نوشته شده برای VUMAT، کلیه خواص الاستیک (مدول ینگ و ضریب پواسون)، خواص پلاستیک (تنش تسلیم و ضرایب قانون سوئیفت)، ضرایب مدل های GTN و هیل در ساختار کد تعریف و به نرم افزار آباکوس منتقل شدند تا رفتار ماده در هر سه راستا به صورت دقیق شبیه سازی شود. شکل (۶) گردش کار زیروال VUMAT نوشته شده را نشان می دهد.

۴-۴- مقایسه نتایج تجربی و شبیه سازی

در شکل (۷) نمودارهای نیرو-تغییر طول حاصل از آزمایش کشش، شبیه سازی اجزاء محدود مدل اصلاح شده و پیشرفته گرسون نشان داده شده است.



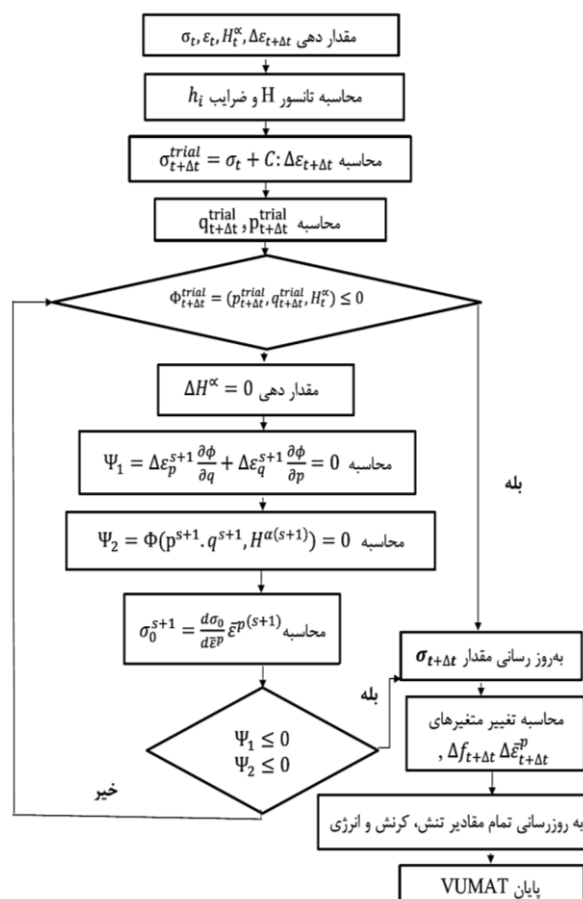
شکل ۷ نیرو-تغییر طول حاصل از آزمایش کشش و شبیه سازی



شکل ۵ تحلیل حساسیت مدل نسبت به اندازه شبکه المان ها در فرایند شبیه سازی

جدول ۶ تعیین کمی درصد خطا در تحلیل حساسیت به شبکه

اندازه المان	نیروی حداکثر (kN)	درصد خطا
۰/۲	۶۴/۶۵	۱/۲۹
۰/۴	۶۴/۳۱	۱/۸۱
۰/۶	۶۴/۳۲	۱/۸۰
مقدار تجربی	۶۵/۵۰	-



شکل ۶ گردش کار زیروال VUMAT

۰/۵۴ به دست آمد که بیانگر ناهمسانگردی بالاتر در لوله‌های درزجوش مستقیم نسبت به لوله‌های بدون درز است. به‌طور کلی مدل GTN پیشرفته با در نظر گرفتن قانون سخت‌شوندگی سوئیفت و ضرایب ناهمسانگردی قابلیت بالایی در پیش‌بینی رفتار شکست لوله‌های فولادی دارد. فرایند رشد و به هم پیوستگی حفره‌ها در این مدل به صورت دقیق‌تر از مدل کلاسیک گرسون بازنمایی شده و امکان تحلیل موضعی شکست نرم را فراهم می‌سازد. بنابراین، استفاده از مدل گرسون پیشرفته در محیط اجزاء محدود ابزاری مؤثر و قابل اعتماد برای ارزیابی دوام و پیش‌بینی شکست در خطوط لوله فولادی انتقال گاز محسوب می‌شود.

۶- فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی

f	کسر حجمی حفره
f^*	کسر حجمی مؤثر حفره
$f_N S_N \varepsilon_N$	متغیرهای مربوط به جوانه‌زنی حفرات
f_0	کسر حجمی حفره اولیه
f_c	کسر حجمی بحرانی حفره
f_F	کسر حجمی حفره در شکست
f_u^*	کسر حجمی مؤثر حفره نهایی
$\dot{f}$	نرخ کسر حجمی حفره
$\dot{f}_{growth}$	نرخ رشد حفره
$\dot{f}_{nucleation}$	نرخ جوانه‌زنی حفره
$q_1 q_2 q_3$	ضرایب گرسون-تی و رگارد-نیدلمن

علائم یونانی

σ	تنش مهندسی
σ_{eq}	تنش معادل ون میز
σ_0	تنش تسلیم
σ_m	تنش هیدرواستاتیک
ϕ	تابع تسلیم
ε	کرنش مهندسی
ε_{kk}^p	مجموع نرخ کرنش پلاستیک
ε_0	نرخ کرنش اولیه
ε_0^p	کرنش پلاستیک اولیه

۷- مراجع

- [1] J.-F. Charler, Y. Y. Zhu, A.-M. Habraken, S. Cescotto, and M. Traversin, A fully coupled elasto-plastic damage theory for anisotropic materials fully coupled elasto-plastic damage theory for anisotropic materials, *Studies in applied mechanics*, Vol. 45, pp. 33-42, 1997, [https://doi.org/10.1016/S0922-5382\(97\)80005-0](https://doi.org/10.1016/S0922-5382(97)80005-0)

با مقایسه نمودارها ملاحظه می‌شود که همگرایی خوبی بین دو تحقیق وجود دارد و نشان از صحت عملکرد زیرروال استفاده شده در مدل گرسون پیشرفته است. در مدل گرسون پیشرفته و اصلاح‌شده داده‌های تنش-کرنش در قسمت الاستیک بر هم منطبق هستند. مدل گرسون پیشرفته به دلیل استفاده از قانون سوئیفت در ناحیه سخت‌شوندگی تطابق بهتری با رفتار واقعی ماده نشان می‌دهد؛ زیرا با در نظر گرفتن رشد و هم‌جوشی حفره‌ها و نیز اصلاح ضرایب حساس به تنش سه‌محوره توانسته است تغییرات واقعی کرنش پلاستیک را دقیق‌تر نشان دهد. چون مدل گرسون کلاسیک قادر به تحلیل شکست برشی نمی‌باشد نمودارهای شبیه‌سازی در آباکوس و زیروال هر دو در ناحیه پس از آغاز گلویی از داده‌های تجربی انحراف پیدا می‌کنند. این اختلاف به دلیل عدم پیش‌بینی مناسب مکانیزم برش موضعی و چرخش محورهای اصلی تنش در این ناحیه است. با این حال، مدل گرسون پیشرفته در تحلیل نمونه‌های عرضی (۹۰ درجه نسبت به جهت نورد) دقت بالاتری از خود نشان می‌دهد که بیانگر توانایی بهتر آن در لحاظ کردن ناهمسانگردی و جهت‌مندی ساختار میکروسکوپی ماده است. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که مدل گرسون پیشرفته تخمین بهتری از رفتار ماده در ناحیه پس از گلویی نسبت به مدل گرسون اصلاح‌شده ارائه می‌دهد و از نظر پیش‌بینی توزیع کرنش پلاستیک و آغاز شکست عملکرد واقع‌بینانه‌تری دارد. در پژوهشی رانا و همکاران نشان دادند که مدل استاندارد GTN قادر به شبیه‌سازی ناهمسانگردی نیست. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل‌هایی که قادر به لحاظ ناهمسانگردی هستند، عملکرد بهتری در شبیه‌سازی شکست دارند [۴۱].

۵- نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد فولاد میکروآلیاژی API 5L X70 دارای رفتار مکانیکی ناهمسانگرد است که از فرایند ترمومکانیکی و جهت نورد ناشی می‌شود. اختلاف قابل‌توجه در استحکام تسلیم و استحکام نهایی بین جهات طولی، ۴۵ درجه و محیطی بیانگر تأثیر بافت و ریزساختار بر خواص ماده است. آزمون‌های کشش و مدل‌سازی عددی با استفاده از کد VUMAT مخصوص مدل گرسون پیشرفته در Abaqus/Explicit نشان دادند که منحنی‌های شبیه‌سازی تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارند و اختلاف در بار بیشینه کمتر از ۲ درصد است. ضرایب ناهمسانگردی به ترتیب در جهات صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه به ترتیب برابر با ۰/۵۶، ۰/۷۹ و

- [13] G. Zhang, and K. Khandelwal, Gurson–Tvergaard–Needleman model guided fracture - resistant structural designs under finite deformations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 123(14), pp. 3344-3388, 2022. <https://doi.org/10.1002/nme.6971>
- [14] M. Liu, , et al., Parameter optimization and fracture mechanism study of anisotropic GTN damage model for magnesium alloys based on response surface-particle swarm algorithm. *Materials Today Communications*, Vol. 49, p. 113867, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.113867>
- [15] H. Gholipour, F. Biglari, and K. Nikbin, Experimental and numerical investigation of ductile fracture using GTN damage model on in-situ tensile tests. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 164, p. 105170, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105170>
- [16] S. Javangorouh, et al. Investigation of Strain Hardening and Plastic Anisotropy Effect on Ductile Crack Propagation. in ESIS Technical Committee on Numerical Methods (TC8) and DVM-Working Group Simulation. 2025. <http://hdl.handle.net/2078.1/304468>
- [17] T. L. Anderson, Fracture mechanics fundamentals and applications. CRC Press. Inc, New York, 2005.
- [18] A. L. Gurson, Continuum theory of ductile rupture by void nucleation and growth: part I yield criteria and flow rules for porous ductile media, *Engineering Materials and Technology*, Vol. 99, pp. 2-15, 1977. <https://doi.org/10.1115/1.3443401>
- [19] A. Needleman, V. Tvergaard, An analysis of ductile rupture in notched bars, *Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 32, pp. 461-490, 1984. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(84\)90031-0](https://doi.org/10.1016/0022-5096(84)90031-0)
- [20] Z. L. Mansouri, H. Chalal, F. Abed-Meraim, Ductility limit prediction using a GTN damage model coupled with localization bifurcation analysis, *Mechanics of Materials*, Vol. 76, pp. 64–92, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2014.06.005>
- [21] M. Junior, E. Souza Neto, P. Munoz-Rojas, Advanced computational materials modeling: from classical to multi-scale techniques. WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Germany, 2011. <https://doi.org/10.1002/9783527632312>
- [22] M. Achouri, G. Germain, P. Dal Santo, D. Saidane, Numerical integration of an advanced gurson model for shear loading: application to the blanking process, *Computational Materials Science*, Vol. 72, pp. 62–67, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2013.01.035>
- [2] M. Mashayekhi, Damage models and identification procedures for A533B steel, *Aerospace Mechanics*, Vol. 5, No. 2, pp. 65-75, 2009. (In Persian) JR.MEASEJT-5-2_006
- [3] J. R. Rice, D. M. Tracy, On ductile enlargement of triaxial stress field, *Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 17, pp. 210-217, 1969. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(69\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(69)90033-7)
- [4] J. Lemaitre, A Course on damage mechanics, Springer Verlag, Berlin, 1992.
- [5] N. Bonora, D. Gentile, A. Pirondi, G. Newaz, Ductile damage evolution under triaxial state of stress: theory and experiments, *International Journal of Plasticity*, Vol. 21, pp. 981-1007, 2005. <https://doi.org/10.1016/J.IJPLAS.2004.06.003>
- [6] O. Chang-Kyun, A phenomenological model of ductile fracture for API X65 steel, *Internatinal Journal of Mechanical Science*, Vol. 49, pp. 1399-1412, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2007.03.008>
- [7] S. Acharyya, S. Dhar, A complete GTN model for prediction of ductile failure of pipe, *Materials Science*, Vol. 43, pp. 1897-1909, 1999. DOI:[10.1007/s10853-007-2369-0](https://doi.org/10.1007/s10853-007-2369-0)
- [8] K. N. Kofiani, *Ductile fracture and structural integrity of pipelines & risers*, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2013. <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/7582>
- [9] K. Minnebruggen, S. Hertele, P. Thibaux, W. Waele, Effects of specimen geometry and anisotropic material response on the tensile strain capacity of flawed spiral welded pipes, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 148, pp. 350–362, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.04.031>
- [10] M. Shahzamanian, Anisotropic Gurson - Tvergaard - Needleman plasticity and damage model for finite element analysis of elastic - plastic problems. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 115(13), pp. 1527-1551, 2018. <https://doi.org/10.1002/nme.5906>
- [11] H.Wu, et al., Anisotropic Gurson–Tvergaard–Needleman model considering the anisotropic void behaviors. *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 248, p. 108229, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108229>
- [12] O. El Khatib, et al., A non-iterative parameter identification procedure for the non-local Gurson–Tvergaard–Needleman model based on standardized experiments. *International Journal of Fracture*, Vol. 241(1), pp. 73-94, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10704-023-00689-9>

- steel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 79(6), pp. 403-412, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0308-0161\(02\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0308-0161(02)00039-X)
- [33] M. Paredes, T. Wierzbicki, and P. Zelenak, Prediction of crack initiation and propagation in X70 pipeline steels. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 168, pp. 92-111, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2016.10.006>
- [34] F. Iob, et al., Influence of mechanical anisotropy on micro-voids and ductile fracture onset and evolution in high-strength low alloyed steels. *Metals*, Vol. 9(2), p. 224, 2019. <https://doi.org/10.3390/met9020224>
- [35] ANSI/API Specification 5L, Specification for line pipe, , 46th edition, American Petroleum Institute, 2018.
- [36] B. Hwang, et al., Effects of microstructure on inverse fracture occurring during drop-weight tear testing of high-toughness X70 pipeline steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 36(2), pp. 371-387, 2005. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0309-7>
- [37] Abaqus/6.14 Software, Abaqus analysis user's manual (6.14), porous metal plasticity; 2014.
- [38] I. Tsouppis, M. Merklein, A new way for the adaption of inverse identified GTN-Parameters to bending processes, *13th International LS-DYNA Users Conference*, Dearborn, Michigan USA, pp. 1-14, 2014.
- [39] A. Ouladbrahim, et al., Sensitivity analysis of the GTN damage parameters at different temperature for dynamic fracture propagation in X70 pipeline steel using neural network. *Fracture and Structural Integrity*, Vol. 15(58), pp. 442-452, 2021. <https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.58.32>
- [40] S. H. Hashemi, M. Rezaei, V. Soleimani, Local damage modeling of ductile fracture in API pipeline steels of grade X65 and X70, *Proceeding of ISME2011*, The University of Birjand, 2011.
- [41] A. Rana, R.E. Miller, and X. Wang, Numerical simulation of ductile damage in pipeline steels across different constraint conditions using a combined void growth and coalescence model. *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 320, pp. 111027, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2025.111027>
- [23] K. Nahshon, J. Hutchinson, Modification of the Gurson model for shear failure, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 27, pp. 1-17, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2007.08.002>
- [24] R. Hill, A theory of the yielding and plastic flow of anisotropic metals, *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. A193, pp. 281-297, 1948. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0045>
- [25] M. B. Bettaieb, X. Lemoine, L. Duchêne, and A. Habraken, On the numerical integration of an advanced Gurson model, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 85, pp. 1049-1072, 2011. <https://doi.org/10.1002/NME.3010>
- [26] A.A. Benzerga, and J. Besson, Plastic potentials for anisotropic porous solids. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 20(3), pp. 397-434, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0997-7538\(01\)01147-0](https://doi.org/10.1016/S0997-7538(01)01147-0)
- [27] J. Fansi, *Prediction of DP steel fracture by FEM simulations using an advanced Gurson model*, PhD thesis, Universite de Liege, Belgique, 2013.
- [28] W. I. Lankford, S. C. Snyder, and J. A. Bauscher, New criteria for predicting the press performance of deep-drawing sheets, *Transaction ASM*, Vol. 42, pp. 1196-1232, 1950. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-88113-1>
- [29] S. Hashemi, et al., On the relation of microstructure and impact toughness characteristics of DSAW steel of grade API X70. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 32(1): pp. 33-40, 2009. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2008.01312.x>
- [30] ASTM Standards, Standard test methods for tension testing of metallic materials, ASTM international, 2021.
- [31] F. Ahmadi, M. Zabihi Gargari, and H. Shahverdi, Investigating the microstructure, mechanical properties and hole expansion of advanced high strength steel with the approach of application in the car body. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 10(6), pp. 16-28, 2023. (In Persian) <https://doi.org/10.22034/ijme.2023.392262.1770>
- [32] Guo, W., et al., The coupled effects of thickness and delamination on cracking resistance of X70 pipeline