



## بررسی تجربی و عددی شکست اتصال جوش نقطه‌ای مقاومتی AA6061-T6 با استفاده از روش مکانیک آسیب GTN

داود افشاری<sup>1\*</sup>، امید حمیدی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

2- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان

\* زنجان، کد پستی 45371-38791. dafshari@znu.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

هدف از این مطالعه بررسی تجربی و عددی شکست اتصال جوش نقطه‌ای مقاومتی آلومینیم AA 6061-T6 تحت آزمون کششی-برشی با استفاده از روش مکانیک آسیب می‌باشد. امروزه استفاده از آلیاژهای آلومینیمی در بدنه خودروها بعنوان یک فلز سبک جهت کاهش وزن خودرو و مصرف سوخت رو به افزایش می‌باشد. استحکام بدنه یک خودرو بطور کامل وابسته به استحکام و کیفیت اتصال‌های جوش نقطه‌ای آن می‌باشد. لذا بررسی و تحلیل جوش نقطه‌ای در بدنه خودروها دارای اهمیت بسیار زیادی می‌باشد. در این مطالعه جهت بررسی شکست اتصال جوش نقطه‌ای از روش مکانیک آسیب گارسون-تورگارد-نیدلمن استفاده شده است. بدین منظور ابتدا یک مدل المان محدود جهت شبیه‌سازی شکست اتصال جوش تحت بارگذاری کششی-برشی ایجاد شده و از روش مکانیک آسیب برای تحلیل شکست استفاده شده است. جهت صحت سنجی مدل، 7 نمونه اتصال جوش نقطه‌ای با قطرهای دگمه جوش متفاوت، حداقل 5/72 میلی‌متر و حداکثر 8/41 میلی‌متر، جوش کاری شده و استحکام شکست آنها تحت آزمون کششی-برشی اندازه‌گیری شده است. مقایسه میان نتایج مدل مکانیک آسیب و آزمون تجربی نشان می‌دهد که اختلاف نتایج بدست آمده در حدود 2% می‌باشد و مدل ارائه شده دارای قابلیت اعتماد مطلوبی در پیش‌بینی نیروی شکست می‌باشد. همچنین نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که از مدل المان محدود ارائه شده می‌توان بخوبی برای پیش‌بینی نقطه شروع و چگونگی شکست در اتصال جوش نقطه‌ای استفاده نمود.

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: ۲۹ تیر ۱۴۰۰  
داوری اولیه: ۱۶ مرداد ۱۴۰۰  
پذیرش: ۲۷ شهریور ۱۴۰۰

### کلیدواژگان:

جوش مقاومتی نقطه‌ای  
مکانیک آسیب  
گارسون-تورگارد-نیدلمن  
آلیاژ آلومینیم AA6061-T6  
مدل المان محدود

## Experimental and numerical study on failure of resistance spot welded AA6061-T6 joint under tensile-shear test using GTN model

Davood Afshari\*, Omid Hamidi

Department of Mechanical Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

\* 45371-38791 Zanjan, Iran, dafshari@znu.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper  
Received: 20 July 2021  
First Decision: 7 August 2021  
Accepted: 18 September 2021

### Keywords:

Resistance Spot Weld  
Damage Model  
Gurson-Tvergaard-Needleman  
AA6061-T6  
Finite Element Model

### Abstract

The main purpose of this study is experimental and numerical investigation on failure of resistance spot welded AA6061-T6 joint under tensile-shear test using damage model. Today using aluminum alloys in automobiles' structure is increases to reduce weight and fuel consuming. The strength of an automobile's structure completely depends on the quality of the strength and the quality of the welded joints. So, study the strength of these welded joints is very essential to obtain safe structures. In this study Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) model is utilized to study the failure of welded joint. A finite element (FE) model is developed to simulate failure of the welded joint under tensile-shear test. To validate the FE model, 7 series of samples are welded with different welding parameters (minimum 5.72 mm and maximum 8.41 mm) to obtain altered nugget size. The comparison between experimental and FE model results' shows that the different between results is approximately 2% and the GTN model has a good reliability to predict the failure force. In addition the results show that the FE model can predict truly the starting of failure in the welded joint.

### 1- مقدمه

آلیاژها باعث ایجاد مشکلاتی در جوش کاری مقاومتی آنها شده است، جوش نقطه‌ای مقاومتی همچنان پر مصرف‌ترین روش برای اتصال ورق‌های آلومینیمی در صنایع خودروسازی می‌باشد. جوش کاری نقطه‌ای مقاومتی روشی آسان، سریع، ارزان، با قابلیت خودکار سازی و پربازده جهت اتصال ورق‌ها به یکدیگر

افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی، مسائل مرتبط با آلودگی هوا و محیط زیست منجر به استفاده از آلیاژهای آلومینیمی به‌عنوان یک فلز سبک در بدنه خودروها جهت کاهش وزن آنها در صنایع خودروسازی شده است. هرچند ویژگی‌های خاص حرارتی این

Please cite this article using:

D. Afshari, O. Hamidi, Experimental and numerical study on failure of resistance spot welded AA6061-T6 joint under tensile-shear test using GTN model, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 7, pp. 43- 51, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

نیلسن و تورگارد [5] با استفاده از روش اصلاح شده برشی گارسون به صورت عددی شکست را در جوش نقطه‌ای فولاد DP600 آنالیز کردند. محمد مشایخی و اسماعیل شریفی [6] در مطالعه‌ای اعتبار مدل آسیب گارسون به صورت تجربی و عددی را برای فولاد A533B مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ابتدا با انجام یک آزمون کشش تحت شرایط تنش سه بعدی، شرایط لازم جهت استخراج پارامترهای مدل گرسون فراهم شده است. سپس مدل گرسون برای نمونه‌ی کششی به روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس شبیه‌سازی، و ضرایب مدل آسیب گرسون بر اساس فرآیند کالیبراسیون اجزای محدود استخراج می‌گردد. در ادامه مدل گرسون حاصل، جهت پیش‌بینی شکست در نمونه استاندارد کشش به کار گرفته شده است.

سان و همکارانش [7] جهت بررسی استحکام اتصال جوش اصطکاکی اغتشاشی از مدل GTN استفاده کرده‌اند. آنها پارامترهای مدل GTN را در هر یک از نواحی جوش اصطکاکی اغتشاشی شناسایی نموده‌اند. در سال 2019 ژیانگ و همکارش [8] با استفاده از یک مدل المان محدود و روش مکانیک آسیب GTN شکست در اتصالات لوله‌ای فولادی جوش کاری شده را شبیه‌سازی نموده‌اند. رمل و هکارانش نیز [9] از مدل GTN جهت پیش‌بینی رشد ترک در لوله‌های جوش کاری شده از جنس سوپرآلیاژ اینکونل استفاده کرده‌اند. رشد ترک و شکست در اتصال لوله‌ای جوش کاری شده فولادی نیز موضوع بررسی و همکارانش [10] بوده است. بیلدیز و ویلماز [11] نیز به صورت تجربی پارامترهای مدل GTN را برای آلیاژ آلومینیم 6061 استخراج نموده‌اند. آنها با استفاده از آزمون کشش، تصاویر میکروسکپ نوری و روبشی و نیز آزمون پراش اشعه ایکس پارامترهای مورد نیاز مدل GTN را برای این آلیاژ بدست آورده‌اند.

مطالعه پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که استفاده از روش مکانیک آسیب در بررسی اتصال جوش نقطه‌ای متمرکز بر فولادها بوده است و بررسی آلیاژهای آلومینیمی بندرت انجام شده است. با توجه به استفاده روزافزون از آلیاژهای آلومینومی در صنایع خودروسازی جهت کاهش وزن خودروها و وابستگی کیفیت بدنه خودرو به استحکام جوش‌های نقطه‌ای بدنه، بررسی نحوه شکست جوش نقطه‌ای آلیاژهای آلومینیمی دارای اهمیت زیادی می‌باشد. لذا هدف از این مطالعه استفاده از روش مکانیک آسیب جهت بررسی شکست در اتصال جوش نقطه‌ای مقاومتی آلیاژ آلومینیم AA 6061-T6 می‌باشد. بدین منظور از روش گارسون- تورگارد-نیدلمن بعنوان یک روش مکانیک آسیب

می‌باشد. در این روش جوش کاری، عبور جریان الکتریکی از میان الکترودها و فشار اعمالی از سوی آنها منجر به تشکیل دگمه جوش و اتصال دو ورق به یکدیگر می‌گردد. بیشترین متقاضی این روش جهت اتصال ورق‌ها به یکدیگر، صنایع خودروسازی و لوازم خانگی هستند. به طوری که در بدنه ماشین‌های مدرن حدود 2 تا 5 هزار نقطه جوش وجود دارد [1]. لذا ایمنی و استحکام بدنه یک خودرو بطور کامل وابسته به کنترل کیفیت و استحکام جوش‌های نقطه‌ای بدنه می‌باشد.

یکی از روش‌های اطمینان از کیفیت و استحکام مناسب اتصال جوش کاری شده، پیش‌بینی شکست اتصال می‌باشد. امروزه مکانیک آسیب به عنوان عضو مهمی از خانواده تئوری مکانیک شکست یکی از روش‌های مناسب جهت بررسی شکست در سازه‌ها می‌باشد. مکانیک آسیب حوزه‌ای از مکانیک است که یکی از واقعیت‌های موجود در ماده را که همانا ترک‌های ریز، ریز حفره‌ها و سایر عیوب هستند، با ظرافت مدل کرده و با استفاده از تکنیک‌های خاص قابلیت پیاده‌سازی عددی آنها را فراهم می‌سازد. مدل‌های ریزمکانیکی آسیب، تقریباً مناسب‌ترین روش برای بررسی شکست در مواد نرم به حساب می‌آیند. شبیه‌سازی فرآیند فیزیکی جوانه‌زنی، رشد و به هم پیوستن حفره‌ها در مدل‌های آسیب، بر مبنای اصول مکانیک محیط‌های پیوسته استوار است. یکی از پرکاربردترین روش‌های توصیف اثرات ریزمکانیکی آسیب در فلزات شکل پذیر، روش گارسون-تورگارد-نیدلمن (GTN) می‌باشد.

استفاده از روش گارسون جهت بررسی شکست در اتصال جوش نقطه‌ای برای اولین بار توسط اسپیرنگمن و کونا [2] صورت گرفته است. اسپیرنگمن و همکارش از مدل گارسون برای توصیف تغییر شکل پلاستیک و همچنین رفتار شکست اتصال جوش نقطه‌ای فولاد StE690 استفاده کردند. آنها برای حل شرایط مرزی غیرخطی از کد نویسی المان محدود استفاده کرده و با نتایج تجربی آزمون کشش برای نمونه‌های ناچ دار مقایسه نموده‌اند. نیلسن [3] از جدیدترین روش‌های توسعه یافته مدل گارسون برای توصیف و بررسی شکست در حالت‌های مختلف اتصال برای فولاد DP600 استفاده کرده و نتایج را با نتایج تجربی مقایسه نموده است. سامر [4] تغییر شکل و رفتار شکست را در جوش نقطه‌ای فولاد DP600 مدل کرده است. سامر به منظور یافتن ضخامت قطعه، ظرفیت تحمل بارگذاری و مود شکست در اتصال جوش نقطه‌ای از یک مدل دقیق المان محدود شامل فلز پایه، ناحیه تحت حرارت و فلز جوش در شرایط بارگذاری کششی-برشی استفاده کرده است.

قطرهای متفاوت دگمه جوش انجام شده است. پیش از جوش کاری نمونه‌ها لازم است که کمینه و بیشینه قطر دگمه جوش برای ورق با ضخامت 2 میلی‌متر تعیین شود. در این مطالعه انتخاب کمینه قطر دگمه جوش بر اساس توصیه استاندارد AWS [12] برای ورق‌ای با ضخامت 2 میلی‌متری، 5/7 میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین انتخاب بیشینه قطر دگمه جوش نیز با توجه به اجتناب از پاشش مذاب در فرآیند جوش کاری، 8/5 میلی‌متر تعیین شده است [13]. با توجه به آزمون‌های انجام شده، در نهایت 7 نمونه اتصال جوش مقاومتی نقطه‌ای با استفاده از پارامترهای مختلف جوش کاری جهت دستیابی به قطر دگمه جوش‌های متفاوت مطابق جدول 1 جوش کاری شده‌اند. لازم به ذکر است که برای تمامی نمونه‌های ارائه شده در جدول 1 نیروی الکتروود و زمان پیش جوش ثابت و به ترتیب 4000 نیوتن و 20 میلی ثانیه در نظر گرفته شده است. پس از مشخص شدن پارامترهای جوش کاری، 6 نمونه اتصال توسط هر سری از پارامترهای جوش کاری ارائه شده در جدول 1 آماده گردید. از این 6 نمونه آماده شده، 3 نمونه جهت اندازه‌گیری قطر دگمه جوش و 3 نمونه جهت تست کششی-برشی استفاده شده است. برای اندازه‌گیری قطر دگمه جوش نمونه‌ها، هر اتصال از مرکز جوش بریده شده و پس از مانت و پولیش هر نمونه، اندازه‌گیری قطر دگمه جوش توسط میکروسکپ نوری NIKON Optiphot انجام شده است.

جدول 1 پارامترهای جوش مقاومتی نقطه‌ای

شماره نمونه	1	2	3	4	5	6	7
شدت جریان الکتریکی (kA)	36	39	37	38	39	40	37
زمان جوش کاری (msec)	80	60	80	80	80	80	140

همچنین در این مطالعه جهت آزمون کششی-برشی نمونه‌های جوش کاری شده از ماشین تست کششی یونیورسال INSTRON 5567 استفاده شده است. سرعت کشش ماشین مطابق با استاندارد AWS [12] برابر 10 mm/sec تنظیم گردید. شکل 2 تصویر نمونه تحت تست کششی-برشی را نمایش می‌دهد.

## 2-2- مدل مکانیک آسیب گارسون-تورگارد-نیدلمن (GTN)

در شکست مواد شکل پذیر، ایجاد حفره، رشد حفره‌ها و بهم پیوستن آنها یک الگوی رایج می‌باشد. اساس مدل مکانیک آسیب گارسون-تورگارد-نیدلمن نیز بر مبنای همین الگوی رایج می‌باشد.

استفاده شده است. در این مطالعه ابتدا یک مدل المان محدود جهت شبیه‌سازی شکست اتصال جوش نقطه‌ای در آزمون کششی-برشی و استخراج پارامترهای مدل مکانیک آسیب ایجاد شده است. همچنین برای ارزیابی مدل المان محدود نتایج بدست آمده از مدل با نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی مقایسه شده است.

## 2- روش تحقیق

### 1-1- روش‌های تجربی

در این مطالعه برای بررسی شکست اتصال جوش نقطه‌ای مقاومتی از ورق آلیاژ آلومینیم AA6061-T6 با ضخامت 2 میلی‌متر استفاده شده است. ورق‌ها پس از آماده سازی توسط دستگاه جوش نقطه‌ای مقاومتی NIMAK مدل PMP11 DGS از نوع AC و با توان اسمی 200 kVA مطابق استاندارد AWS [12] با ابعاد شکل 1 جوش کاری شده‌اند.

به جهت وجود لایه اکسیدی مرسوم بر روی آلیاژهای آلومینیم، پیش از انجام جوش نقطه‌ای نیاز به زدودن این لایه اکسیدی وجود دارد. وجود لایه اکسیدی می‌تواند مانع رسیدن جریان به ناحیه اتصال و هدر رفت انرژی گردد. بدین جهت در این مطالعه تنها با استفاده از یک ماشین سنباده ناحیه اتصال سنباده زنی شد و از هیچ محلول شیمیایی جهت آماده سازی نمونه‌ها استفاده نشده است. کیفیت اتصال‌های جوش کاری شده نیز نشان می‌دهد که نیازی به استفاده از محلول شیمیایی جهت زدودن لایه اکسیدی وجود ندارد.

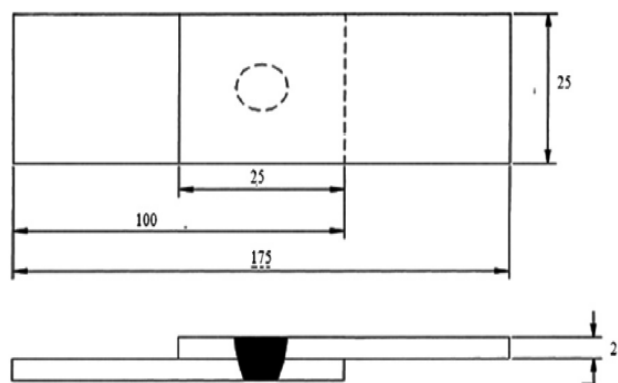


Fig. 1 The dimension of spot welded joint (in mm)

شکل 1 ابعاد اتصال جوش نقطه‌ای (ابعاد به میلی‌متر)

برای اعتبار سنجی مدل المان محدود نیاز به اتصال جوش با قطرهای دگمه جوش متفاوت می‌باشد. بدین منظور جوش کاری نمونه‌ها با پارامترهای مختلف جوش کاری جهت دستیابی به

داده‌های تجربی صورت پذیرفت.  $f^*$  نیز یک تابع برای ضریب تخلخل ماده  $f$  است که برای تعیین اثر به هم پیوستن ریزحفره‌ها از رابطه (2) بدست می‌آید [5]:

$$f^* = \begin{cases} f & f \leq f_c \\ f_c + \frac{f_u^* - f_c}{f_F - f_c} (f - f_c) & f_c < f < f_F \\ f_u^* & f \geq f_F \end{cases} \quad (2)$$

$f_c$  و  $f_F$  به ترتیب معرف کسر حجمی حفره بحرانی (جایی که حفره‌ها به یکدیگر می‌پیوندند) و کسر حجمی حفره در هنگام شکست نهایی ماده هستند.  $f_u^*$  نیز مقدار نهایی پارامتر آسیب است که از رابطه (3) بدست می‌آید [5]:

$$f_u^* = \frac{1}{q_1} \quad (3)$$

$f^* = 0$  معرف ماده کاملاً متراکم بوده و در این حالت سطح تسلیم GTN به سطح تسلیم فون-میزز کلاسیک تقلیل می‌یابد. هم‌چنین  $f^* = 1$  بر ماده کاملاً متخلخل (حفره‌دار)، که فاقد ظرفیت تحمل تنش است، دلالت دارد.

نرخ رشد کسر حجمی حفره  $f^*$  بر حسب نرخ کرنش پلاستیک،  $\dot{\epsilon}_p$  برابر است با [5]:

$$f^* = \left[ \frac{3}{2} q_1 q_2 f \sinh \left( \frac{3}{2} q_2 \frac{\sigma_m}{\sigma_0} \right) + A_n(\epsilon) \right] \dot{\epsilon} \quad (4)$$

و  $A_n(\epsilon)$  برابر است با [5]:

$$A_n(\epsilon) = \frac{f_N}{S_N \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \sinh^2 \left( \frac{\epsilon - \epsilon_n}{S_N} \right) \right] \quad (5)$$

که در این رابطه  $S_N$  و  $\epsilon_n$  به ترتیب انحراف استاندارد و مقدار میانگین کرنش پلاستیک هستند که می‌توان به ترتیب 0/1 و 0/3 در نظر گرفت [5]. همچنین  $f_N$  کسر حجمی جوانه زنی حفره‌ها و  $\epsilon$  کرنش پلاستیک موثر می‌باشند.

### 2-3- مدل المان محدود

در این مطالعه از نرم‌افزار تجاری آباکوس جهت شبیه‌سازی شکست اتصال جوش نقطه‌ای تحت آزمون کششی-برشی استفاده شده است. هندسه اتصال مطابق با نمونه‌های جوش کاری شده بوده و در مرکز اتصال دگمه جوشی مطابق با قطر دگمه جوش اندازه‌گیری شده در آزمون‌های تجربی ایجاد شده است. در شکل 3 نمونه مدل‌سازی و مش‌بندی مدل المان محدود ارائه شده است. همچنین برای پیاده‌سازی مدل مکانیک آسیب گارسون-تورگارد-نیدلمن از ساب روتین نویسی در محیط یومت استفاده شده است.



Fig. 2 The tensile-shear test of spot welded joint

شکل 2 آزمون کششی-برشی اتصال جوش کاری شده

گارسون [14] در سال 1977 یک جریان پتانسیل برای رشد حفره در یک فلز ایده آل پلاستیک ارائه کرد که بعداً توسط تورگارد و نیدلمن توسعه داده شد. آنالیز جریان پلاستیک در مدل گارسون در یک محیط متخلخل و با فرض رفتار پیوسته ماده صورت می‌پذیرد. حفره‌ها در این مدل به طور غیر مستقیم حضور داشته و تنها بر رفتار کلی ماده تاثیر می‌گذارند. این تاثیر در سراسر ماده میانگین‌گیری شده و اثر آن بر شرایط تسلیم ماده لحاظ می‌گردد. استحکام تسلیم در مدل گارسون به مقدار اندکی به تنش هیدرواستاتیک وابسته است، در حالی که استحکام تسلیم در پلاستیسیته کلاسیک مستقل از تنش هیدرواستاتیک در نظر گرفته می‌شود. همچنین برخلاف برخی مدل‌های مشابه، امکان پیش‌بینی شکست بر اساس یک معیار گسیختگی در این مدل مکانیک آسیب وجود دارد. اساس مدل گارسون بر استفاده از کسر حجمی حفره در تابع تسلیم برای یک ماده پلاستیک متخلخل استوار است [5]. بعدها تورگارد و نیدلمن پارامترهای دیگری از ماده را به این مدل اضافه کردند تا مدل GTN به صورت زیر ارائه گردد [15]:

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

که در این رابطه  $\sigma_{eq}$  تنش موثر ون مایرز،  $\sigma_0$  تنش تسلیم برای ماده آسیب ندیده،  $\sigma_m$  تنش متوسط عمودی،  $q_1$  و  $q_2$  نیز متغیرهای آسیب ماده هستند که توسط تورگارد و نیدلمن معرفی شدند. درواقع معرفی این دو ضریب به منظور توجه آثار متقابل حفره‌ها در آرایش چند حفره‌ای و نیز تطبیق با

همچنین شکل 5 نتایج اندازه‌گیری میانگین قطر دگمه جوش در هر سری از نمونه‌ها را ارائه می‌کند. همان‌طور که در این شکل مشخص می‌باشد، حداقل و حداکثر قطر دگمه جوش اندازه‌گیری شده به ترتیب 5/72 و 8/41 میلی‌متر می‌باشند.

شکل 6 رابطه میان نیروی شکست آزمون کششی-برشی اتصال جوش و قطر دگمه جوش بدست آمده از آزمون‌های تجربی را نمایش می‌دهد. لازم به ذکر است که بیشترین بار تحمل شده ارائه شده در شکل 6 مربوط به میانگین بیشترین بار تحمل شده اتصال جوش پیش از شکست اتصال در 3 نمونه آزمون شده برای هر سری از نمونه‌ها می‌باشد.

همان‌طور که در این شکل مشخص است رابطه مستقیمی میان نیروی شکست اتصال جوش و قطر دگمه جوش در هر سری از نمونه‌ها وجود دارد. با افزایش قطر دگمه جوش بیشترین نیروی تحمل شده توسط نمونه پیش از شکستن اتصال جوش افزایش پیدا کرده است. در این آزمون کمترین نیروی تحمل شده توسط اتصال جوش 3280 نیوتن برای کمینه قطر دگمه جوش (5/7 میلی‌متر) و بیشترین نیروی تحمل شده 4750 نیوتن برای بیشینه قطر دگمه جوش (8/4 میلی‌متر) ثبت شده است.

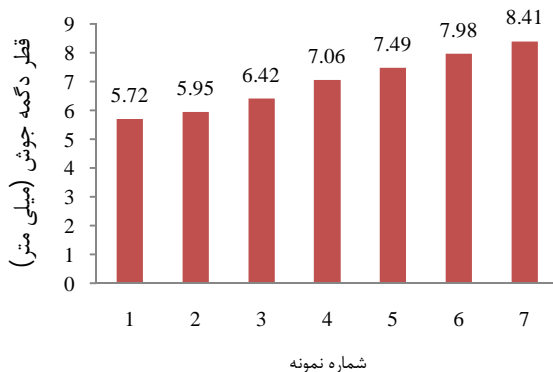


Fig. 5 The nugget diameter of spot welded joints

شکل 5 قطر دگمه جوش در نمونه‌های جوش کاری شده

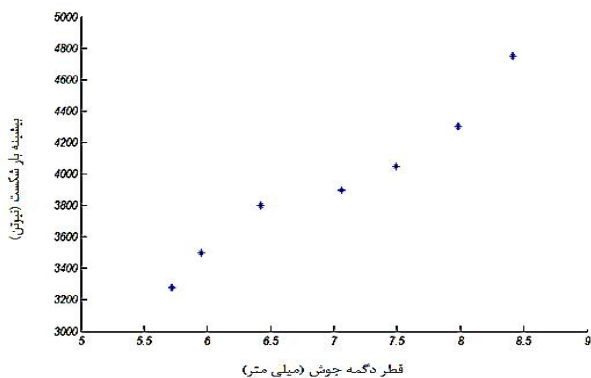


Fig. 6 The diagram of failure load in tensile-shear test -nugget diameter

شکل 6 نمودار تغییرات نیروی شکست در آزمون کششی-برشی بر حسب قطر دگمه جوش

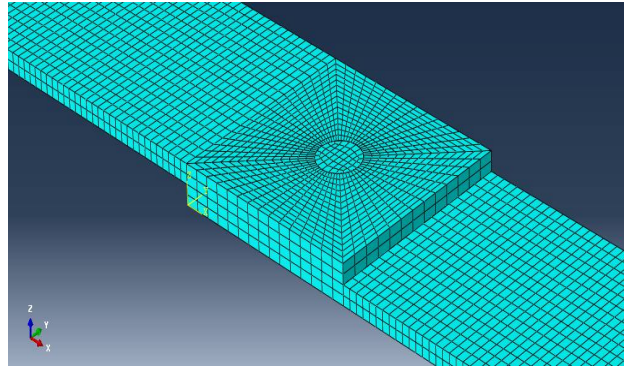


Fig. 3 The finite element model of spot welded joint

شکل 3 مدل المان محدود اتصال جوش کاری شده

مدل آسیب GTN با استفاده از مکانیسم رشد حفره‌ها، محل و زمان رخ دادن پارگی در حین تغییر شکل مواد فلزی نرم را پیش‌بینی می‌کند. یکی از مراحل اساسی در استفاده از مدل‌های مختلف آسیب تنظیم صحیح پارامترهای آن مدل است که این کار به کمک داده‌های حاصل از آزمایش‌های تجربی صورت می‌گیرد. مدل GTN دارای 9 پارامتر اصلی است که جهت به کارگیری صحیح این مدل لازم است با دقت بالایی مقدار دهی شوند. باید توجه داشت که با توجه به تعداد بالای این پارامترها، در عمل تنها بخشی از آن‌ها بر اساس داده‌های حاصل از آزمایش‌های مختلف مقداردهی می‌شوند و بقیه پارامترها بر اساس مقادیر پیشنهادی در مراجع تنظیم می‌شوند. بعنوان مثال  $q_1$  و  $q_2$  پارامترهای مناسب مدل هستند که با یک مقدار ثابت منطقی برای فلزات به ترتیب برابر با 1/5، 1 و لحاظ می‌شوند [5].

### 3- نتایج و بحث

همان‌طور که پیش از این ذکر شد، 7 سری نمونه با استفاده از پارامترهای جوش کاری ارائه شده در جدول 1 جوش کاری شده است. شکل 4 تصویر دگمه جوش در نمونه شماره 3 را نمایش می‌دهد.

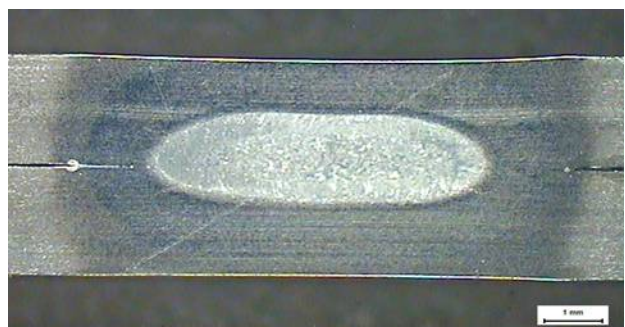


Fig. 4 The nugget of spot welded joint (sample No.3)

شکل 4 دگمه جوش اتصال جوش نقطه‌ای (نمونه شماره 3)



دارد و در این بین اطراف دایره اتصال بیشترین مقدار تنش را دارد. از این رو انتظار می‌رود بیشترین میزان کسر حجمی حفرات در این ناحیه باشد و شکست از این ناحیه رخ دهد. نتایج مربوط به سایر نمونه‌ها نیز مشابه نمونه شماره 6 می‌باشد؛ لذا از ارائه نتایج سایر نمونه‌ها اجتناب می‌شود.

شکل 10 کسر حجمی حفره در نمونه شماره 6 را نمایش می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود در المان‌هایی که در اطراف ناحیه اتصال جوش وجود دارند و بیشترین تنش وجود دارد میزان کسر حجمی حفرات بیشتر از المان‌های دیگر است. نتایج مربوط به جوش نقطه‌ای فولادها [2-5] نیز مشابه نتایج بدست آمده می‌باشد و بیشترین تنش و کسر حجمی حفره‌ها اطراف ناحیه جوش می‌باشند.

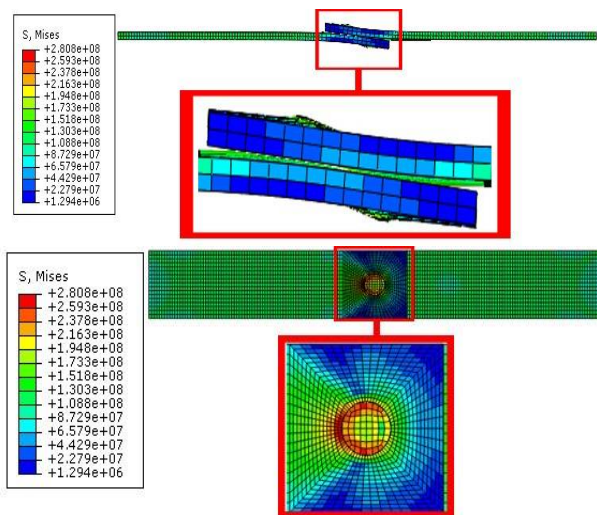


Fig. 9 The distribution of von-Mises equivalent stress in spot welded joint (sample No.6)

شکل 9 توزیع تنش ون مایزر در نمونه جوش کاری شده (نمونه شماره 6)

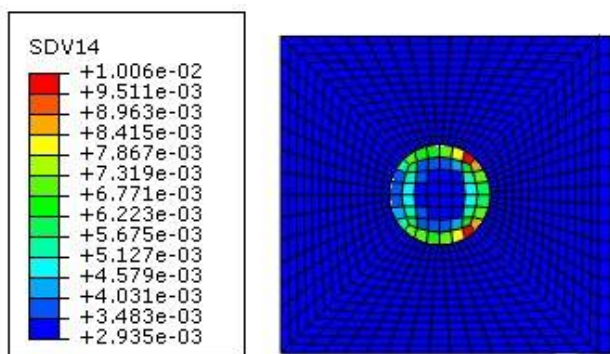


Fig. 10 The void volume fraction in spot welded joint (sample No.6)

شکل 10 کسر حجمی حفره در نمونه جوش کاری شده (نمونه شماره 6)

نتایج بدست آمده از بررسی نرخ رشد حفره‌ها در لحظه شکست نیز مشابه نتایج کسر حجمی حفره‌ها می‌باشد؛ در واقع

نکته مهم در این آزمون، شکست اتصال جوش نقطه‌ای از محل جوش و اطراف دگمه جوش به صورت برشی برای تمامی نمونه‌ها می‌باشد. با وجود افزایش بیشترین نیروی تحمل شده توسط اتصال برای نمونه‌های با قطر دگمه جوش بزرگتر، همچنان تنها این نوع شکست در نمونه‌ها مشاهده گردید (شکل 7).

همان‌طور که ذکر شد در این مطالعه شکست اتصال جوش نقطه‌ای در آزمون کشش-برشی با استفاده از مدل المان محدود و مدل GTN شبیه‌سازی شده است. شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی در آزمون کششی-برشی حاصل از مدل المان محدود را برای نمونه شماره 6 نمایش می‌دهد. مقایسه نتایج حاصل از مدل المان محدود با آزمون تجربی نشان از دقت مناسب مدل المان محدود دارد.



Fig. 7 The failure mode of spot welded joints

شکل 7 نوع شکست در نمونه‌های جوش کاری شده

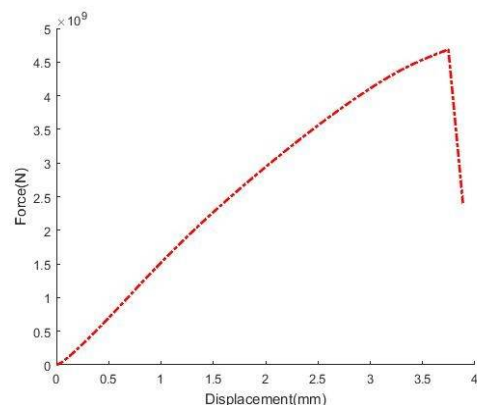


Fig. 8 The diagram of displacement-force in tensile-shear test (sample No.6)

شکل 8 نمودار نیرو-جابجایی آزمون کششی-برشی (نمونه شماره 6)

شکل 9 توزیع تنش موثر ون مایزر حاصل از مدل المان محدود را در لحظه شکست در نمونه شماره 6 نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشخص است تمرکز تنش در ناحیه اتصال وجود

پیش‌بینی می‌باشد.

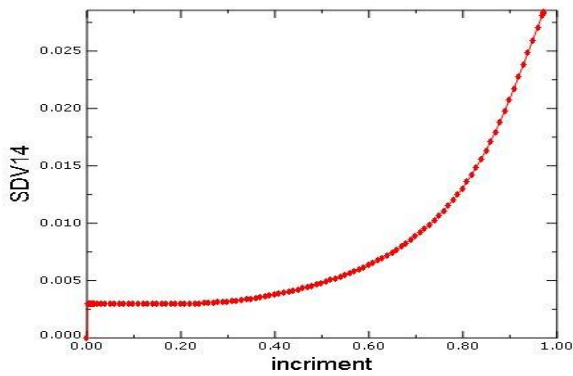


Fig. 13 The diagram of void volume fraction-force in tensile-shear test (sample No.2)

شکل 13 نمودار تغییرات کسر حجمی حفره‌ها بر حسب نیرو در آزمون کششی-برشی (نمونه شماره 2)

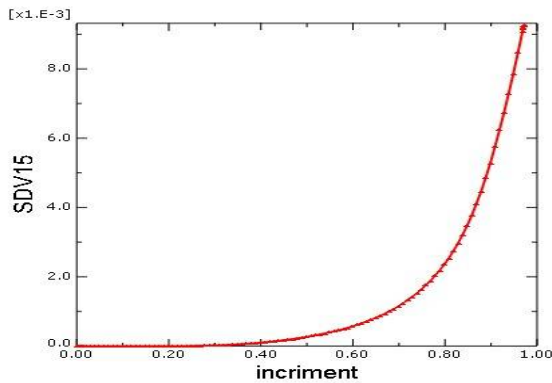


Fig. 14 The diagram of growth of exiting voids-force in tensile-shear test (sample No.2)

شکل 14 نمودار نرخ رشد حفره‌ها بر حسب نیرو در آزمون کششی-برشی (نمونه شماره 2)

همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدای حل که کسر حجمی حفرات ثابت بود نرخ رشد حفرات نیز صفر است. در ادامه به یکباره تا رسیدن به کسر حجمی نهایی افزایش می‌یابد. در واقع در ابتدای حل مقدار نیروی وارد به اتصال کم می‌باشد لذا تنها حفره‌های موجود در اتصال وجود دارند و رشد پیدا نمی‌کنند. با افزایش نیرو و رسیدن آن به مقدار بحرانی حفره‌ها شروع به رشد کرده و در نتیجه کسر حجمی آنها افزایش پیدا می‌کند. ادامه این روند منجر به ایجاد حفره‌های جدید نیز می‌شود که نمودار آن در شکل 15 ارائه شده است. با افزایش نیرو، این نرخ رشد و افزایش کسر حجمی تا رسیدن به نقطه شکست ادامه خواهد کرد.

نمودار نرخ جوانه زنی حفره‌ها (شکل 15) نیز دقیقاً مشابه نمودار نرخ رشد می‌باشد. به این ترتیب که در ابتدای حل با

نواحی که تنش‌های بیشتری را تحمل کرده‌اند دارای نرخ رشد حفره بیشتری نیز می‌باشند (شکل 11).

همین نتایج برای نرخ جوانی زنی حفره‌ها نیز تکرار شده است. نواحی که تنش‌های بیشتری را تحمل کرده‌اند دارای نرخ جوانه زنی حفره بیشتری نیز می‌باشند (شکل 12).

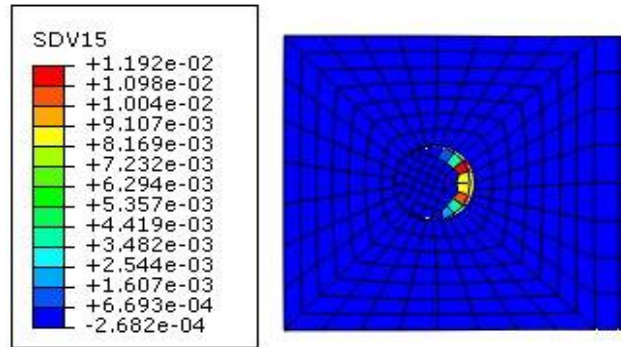


Fig. 11 The growth of exiting voids in spot welded joint (sample No. 6)  
شکل 11 نرخ رشد حفره‌ها در نمونه جوش کاری شده (نمونه شماره 6)

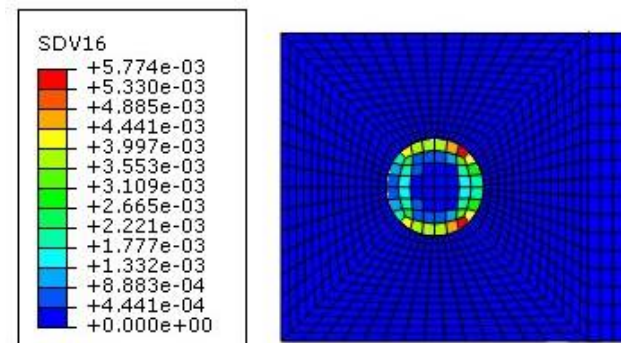


Fig. 12 The nucleation rate of new voids in spot welded joint (sample No. 6)  
شکل 12 نرخ جوانه زنی حفره‌ها در نمونه جوش کاری شده (نمونه شماره 6)

شکل 13 نمودار تغییرات کسر حجمی حفره‌ها نسبت به نیرو (نمونه بار گذاری در حالت نسبی نسبت به نیروی نهایی شکست) در آزمون کششی-برشی در نمونه شماره 2 را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در این شکل قابل مشاهده می‌باشد، در ابتدای آزمون، کسر حجمی مقدار تقریباً ثابتی است که این همان ناحیه الاستیک فلز است. در ادامه با وارد شدن به ناحیه پلاستیک کسر حجمی به صورت تصاعدی تا شکست نهایی افزایش می‌یابد.

نمودار تغییرات نرخ رشد حفره‌ها نسبت به افزایش نیرو (نمونه بار گذاری در حالت نسبی نسبت به نیروی نهایی شکست) در نمونه 2 در شکل 14 ارائه شده است. با در نظر داشتن نمودار کسر حجمی حفره‌ها (شکل 13) نمودار نرخ رشد حفرات قابل

همان‌طور که در این شکل مشخص می‌باشد، تطابق مطلوبی مابین نتایج وجود دارد و مدل مکانیک آسیب GTN با دقت بالایی و با خطای مطلق متوسط در حدود 2 درصد قادر به پیش‌بینی نیروی شکست در اتصال جوش نقطه‌ای می‌باشد.

#### 4- نتیجه‌گیری

در این مطالعه شکست اتصال جوش نقطه‌ای مقاومتی آلیاژ آلومینیم AA6061-T6 تحت آزمون کششی-برشی با استفاده از مدل مکانیک آسیب گارسون-تورگارد-نیدلمن (GTN) مورد بررسی قرار گرفت. جهت شبیه‌سازی شکست اتصال از یک مدل المان محدود استفاده شده و مدل مکانیک آسیب بوسیله زیر برنامه نویسی در این مدل اعمال گردید. همچنین 7 سری نمونه با قطرهای مختلف دگمه جوش آماده شده و نیروی شکست اتصال در آزمون کششی-برشی جهت صحت‌سنجی مدل المان محدود اندازه‌گیری شد. با استفاده از مدل المان محدود کسر حجمی حفره‌ها، نرخ رشد و نرخ جوانه زنی حفره‌ها در اتصال جوش نقطه‌ای مقاومتی استخراج گردید. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در ابتدای شبیه‌سازی که مقدار نیرو کم می‌باشد، مقدار کسر حجمی حفره‌ها ثابت و نرخ رشد و جوانه زنی حفره‌ها صفر می‌باشند. به تدریج با افزایش نیرو، نرخ رشد و جوانه‌زنی حفره‌ها افزایش پیدا کرده و متناسب با آن کسر حجمی حفره‌ها نیز افزایش پیدا می‌کند. این روند افزایش تا نقطه شکست ادامه پیدا کرده و نیروی شکست اتصال پیش‌بینی شده است. نتایج بدست آمده از مقایسه نتایج مدل المان محدود و آزمون تجربی نشان می‌دهد که مدل GTN استفاده شده دارای دقت مطلوبی (در حدود 2 درصد) در پیش‌بینی نیروی شکست اتصال می‌باشد. همچنین این مدل می‌تواند به‌خوبی محل ایجاد شکست را نیز پیش‌بینی کند.

#### 5- مراجع

- [1] X. Sun, E. V. Stephens, M. A. Khaleel, Effects of fusion zone Size and failure mode on peak load and energy absorption of advanced high-strength steel, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 15, No. 4, pp. 18–25, 2008.
- [2] M. Springmann, M. Kuna, Identification of material parameters of the Gurson-Tvergaard-Needleman model by combined experimental and numerical techniques, *Computational Materials Science*, Vol. 32, No. 4, pp. 544–552, 2005.
- [3] K. L. Nielsen, Predicting failure response of spot welded joints using recent extensions to the Gurson model, *Computational Materials Science*, Vol. 48, No. 1, pp. 71–82, 2010.

ثابت بودن کسر حجمی حفره‌ها نرخ جوانه زنی صفر است و سپس به صورت تصاعدی تا رسیدن به شکست نهایی افزایش می‌یابد.

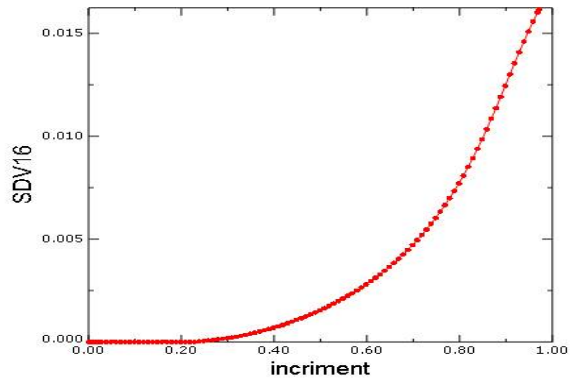


Fig. 15 The diagram of nucleation of new voids-force in tensile-shear test (sample No. 2)

شکل 15 نمودار نرخ جوانه زنی حفره‌ها بر حسب نیرو در آزمون کششی-برشی (نمونه شماره 2)

در پایان با استفاده از نتایج حاصل از آزمون تجربی کششی-برشی و نتایج بدست آمده از مدل المان محدود، پارامترهای مدل GTN استخراج شده و با استفاده از این مدل نیروی شکست پیش‌بینی شده است. همان‌طور که پیش از این اشاره شد نتایج آزمون تجربی میانگین نیروی شکست در 3 نمونه از هر سری از پارامترهای جوش کاری ارائه شده در جدول 1 می‌باشند. در مجموع 21 نمونه تحت آزمون کششی-برشی قرار گرفته‌اند. نتایج مدل المان محدود نیز مربوط به شبیه‌سازی هر نمونه با قطر دگمه جوش اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی آزمون کششی-برشی می‌باشد. شکل 16 مقایسه نتایج حاصل از آزمون تجربی و مدل GTN حاصل از مدل المان محدود را نمایش می‌دهد.

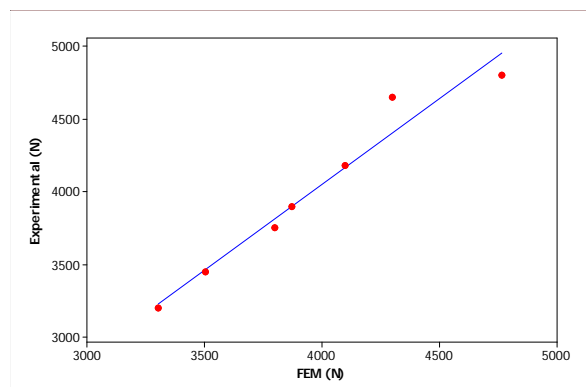


Fig. 16 The comparison between failure loads in tensile-shear test obtained from experimental test and FEM

شکل 16 مقایسه نتایج نیروهای شکست اتصال در آزمون کششی-برشی حاصل از آزمون تجربی و مدل المان محدود



- [10] X. Wu, J. Shuai, K. Xu, Z. Lv, K. Shan, Determination of local true stress-strain response of X80 and Q235 girth-welded joints based on digital image correlation and numerical simulation, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 188, 2020.
- [11] R. A. Yildiz, S. Yilmaz, Experimental investigation of GTN model parameters of 6061 Al alloy, *European Journal of mechanics*, Vol. 83, pp. 1-10, 2020.
- [12] AWS/SAE D8.9M:2012, *Recommended practice for test methods for evaluating the resistance spot welding behavior of automotive sheet steel materials*, An American National Standard, 2012.
- [13] D. Afshari, M. Sedighi, Z. Barsoum, R. L. Peng, An approach in prediction of failure in resistance spot welded aluminum 6061-T6 under quasi-static tensile test, *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 226, No. 6, pp. 1026–1032, 2012
- [14] A. L. Gurson, 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*, Vol. 99, No. 1, pp. 2-19, 1977.
- [15] V. Tvergaard, A. Needleman, Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar, *Acta Metallurgica*, Vol. 32, pp. 157–169, 1984.
- [4] S. Sommer, Modeling of the fracture behavior of spot welds using advanced micro-mechanical damage models, *Materials Science Engineering*, Vol. 10, 2010.
- [5] K. L. Nielsen, V. Tvergaard, Ductile shear failure or plug failure of spot welds modelled by modified Gurson model, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 7, pp. 1031–1047, 2010.
- [6] M. Mashaieki, E. Sharifi, Damage models and steel parameters' investigation, *Scientific Journal of aerospace Mechanics*, Vol. 5, pp. 65-75, 2009 (in Persian فارسی).
- [7] G. Q. Sun, F. Y. Sun, F. L. Cao, s. J. Chen, M. E. Barkey, Numerical simulation of tension properties for Al-Cu alloy friction stir –welded joints with GTN Damage model, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 24, pp. 4358-4363, 2015.
- [8] B. Qiang, X. Wang, Ductile crack growth behaviors at different locations of a weld joint for an X80 pipeline steel: A numerical investigation using GTN models, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 213, pp. 264-279, 2019.
- [9] A. M. Remmal, V. VassiliParaskevaidis, S. Marie, A. Blouin, S. Chapuliot, Prediction of ductile crack growth in a narrow gap Inconel dissimilar weld, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 173, pp. 94-100, 2019.