Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(5) (2020) 295-298
DOI: 10.22060/mej.2019.14708.5947

Failure Analysis of Glass Fiber Reinforced Plastic Pipes and Crack Inlet Opening with *J*-Integral Criteria Under Internal Pressure

A. Khodabakhshi and H. Asadi Gilakjani*

Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT: Inspection of the damage caused by glass fiber reinforced plastic tubes, which are subjected to internal pressure due to different angles that can be exposed under the creep phenomenon in the long-term, has not been sufficiently considered. Therefore, in the present research, it has been tried to simulate the fracture by Tsai-Wu, Hashin criterions and the crack inlet opening with *J*-integral criterion in these pipes with different layering at internal pressure using finite element method and ABAQUS. The results of this research show that the fibers under compressive and tensile stress and the resin of tube have not fractured by tensile stress, but the fracture has occurred in the resin of composite tubes that were under pressure. According to the results, the fracture index is less than one for each of ten layers, when layering angle varies from $[(\pm30)_5]$ to $[(\pm60)_5]$, but the fracture index is more than one, layering decoration for $[(\pm70)_5]$, $[(\pm80)_5]$ and $[(\pm90)_5]$ of composite tubes has been fractured. However, the value of the stress intensity factor was immediately decreased for layering decoration angle of $[(\pm55)_5]$, but this factor has improved when layering angle increased.

Review History:

Received: 8/8/2018
Revised: 12/18/2018
Accepted: 2/4/2019
Available Online: 2/17/2019

Keywords:

Failure analysis
Finite element method
J-Integral
Stress intensity factor

1. INTRODUCTION

If metal pipes are buried less than freezing depth underground due to extensive thermal expansion and contraction, they undergo unwanted deformations and phenomena that affect the structural interaction of the soil. Because the potential difference between the pipe and the surrounding soil in the underground metal pipes causes corrosion in this type of pipes results in leakage of metal tubes from the vulnerable parts. While Glass Fiber Reinforced Composite Pipes (GRP) that play a major role in engineering structures in the current plumbing systems are able to withstand difficult and complex conditions, such as thermal, humidity, radiation, tensile environments, and in particular against a wide range of fluids, such as chemicals, industrial and petroleum. Therefore, they do not require additional insulation from outside or inside. On the other hand, these pipes, despite their low weight, have a lot of strength, so the sturdy structure of these pipes, their high corrosion resistance, as well as their low or light weight make it a great alternative to metal and concrete pipes [1].

2. FRACTURE MECHANICS EQUATIONS

The value of the I_F fracture index is calculated using the Tsai-Wu criterion [2] from Eq. (1)

$$I_F = F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + \\ + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} \tag{1}$$

where $F_1, F_2, F_{11}, F_{22}, F_{66}$ and F_{12} in Eq. (1) can be calculated from Eq. (2).

$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c},\quad F_2 = \frac{1}{Y_t} + \frac{1}{Y_c},\quad F_{11} = -\frac{1}{X_t X_c},$$
$$F_{22} = -\frac{1}{Y_t Y_c},\quad F_{66} = \frac{1}{S_{12}^2},$$
$$F_{12} = \frac{1}{2\sigma^2}\left(1 - [F_1 + F_2]\sigma - [F_{11} + F_{22}]\sigma^2\right) \tag{2}$$

Hashin proposed two criteria for yielding of fibrous-reinforced layer composites, in which the fibers and texture fracture were independent together. These two criteria include the following four modes [3]:

1- Fracture index of composite pipe fiber under stretching (F_f^t).

2- Fracture index of composite pipe fiber under pressure (F_f^c).

3- Fracture index of the matrix composite pipe under stretching (F_m^t).

4- Fracture index of the matrix composite pipe under pressure (F_m^c).

$$\begin{aligned}
&if \quad \sigma_{11} \ge 0; \qquad F_f^t = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2},\\
&if \quad \sigma_{11} < 0; \qquad F_f^c = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2,\\
&if \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33}) \ge 0;\\
&\quad F_m^t = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_t^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2},\\
&if \quad (\sigma_{22} + \sigma_{33}) < 0;\\
&\quad F_m^c = \left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2 - 1\right]\left(\frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_c}\right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \\
&\quad + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2}
\end{aligned} \tag{3}$$

*Corresponding author's email: hasadi@guilan.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

3. SIMULATION

Since the GRP pipes are tested separately under standard pressure conditions with standard methods, hence, in this paper, the results of each test are used for validation. GRP tube for this study consists of ten layers of reinforcing fibers in the form of axisymmetric, in which their mechanical properties are a function of the volume fraction of the fiber and the texture. The fiber used is E-Glass and epoxy matrix. The layout is considered as $[(\pm\theta)_5]$ in this research. In addition, the mechanical properties and damage fracture energy for the GRP pipe in this study is based on Ref. [4]. The studied GRP pipe, with a nominal DN500 specification with a thickness of 2 mm, is affected by the internal pressure of 5 MPa and closed-closed boundary conditions. In this research, the simulation of fracture with the mentioned criteria and crack opening at $[(\pm30)_5]$, $[(\pm45)_5]$, $[(\pm55)_5]$, $[(\pm60)_5]$, $[(\pm70)_5]$, $[(\pm80)_5]$, and $[(\pm90)_5]$ angles have been investigated.

4. RESULTS

As shown in Table 1, a composite pipe with $[(\pm70)_5]$, $[(\pm80)_5]$ and $[(\pm90)_5]$ layering angle in the all layers has the I_F fracture index more than one, therefore we can conclude the failure phenomena for these layers.

On the other hand, the highest and lowest amount of composite pipe destruction is respectively related to the tenth layer of makeup $[(\pm90)_5]$ and the sixth layer of makeup $[(\pm80)_5]$, as shown in Table 1.

Table 1. Fracture index I_F in the composite tube with Tsai-Wu criterion

Layer	$[(\pm30)_5]$	$[(\pm45)_5]$	$[(\pm55)_5]$	$[(\pm60)_5]$	$[(\pm70)_5]$	$[(\pm80)_5]$	$[(\pm90)_5]$
First layer	0.8782	0.7431	0.6573	0.7905	1.009	1.130	1.165
Second layer	0.7292	0.6637	0.5985	0.7997	1.021	1.141	1.176
Third layer	0.5620	0.6881	0.4813	0.8222	1.038	1.154	1.187
Forth layer	0.4250	0.6953	0.4258	0.8320	1.050	1.166	1.199
Fifth layer	0.2459	0.7219	0.4529	0.8564	1.068	1.179	1.210
Sixth layer	0.1957	0.7398	0.4673	0.8744	1.084	1.192	1.222
Seventh layer	0.1980	0.7478	0.4679	0.8847	1.096	1.205	1.234
Eighth layer	0.2283	0.7774	0.4981	0.9118	1.117	1.219	1.247
Ninth layer	0.2449	0.7858	0.4993	0.9224	1.129	1.232	1.259
Tenth layer	0.2779	0.8173	0.5312	0.9512	1.150	1.247	1.272

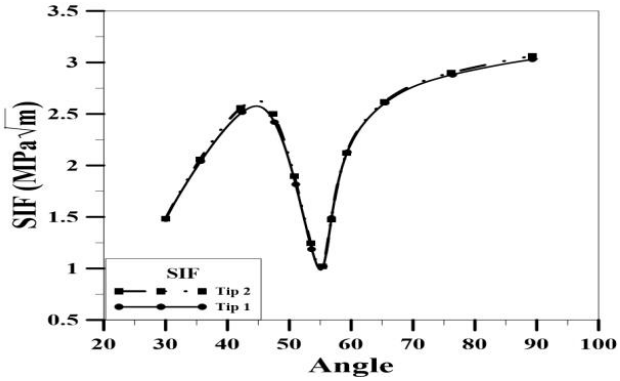


Fig. 1. Stress intensity factor variations by increasing the composite tube layering in the first and second headings

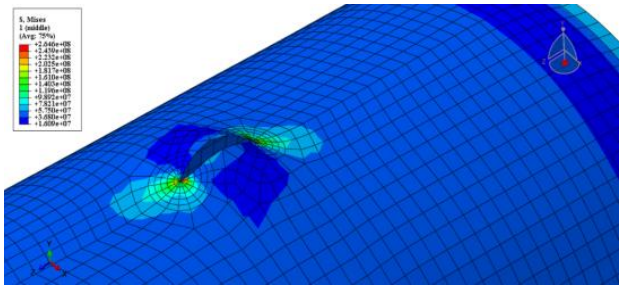


Fig. 2. Von Mises tension contour display of crack opening under internal pressure with layering angle $[(\pm80)_5]$.

In general, the increasing trend of the pipe fracture index was reduced at an angle of $[(\pm55)_5]$ and from this angle, the variations in the index of failure increased, as shown in Fig. 1.

On the other hand, Fig. 2 shows a view of the opening of the crack opening under the internal pressure with layering angle $[(\pm30)_5]$.

5. CONCLUSIONS

The main conclusions of this study can be summarized as follows:

– Based on the Tsai-Wu criterion, a composite pipe with a $[(\pm70)_5]$, $[(\pm80)_5]$ and $[(\pm90)_5]$ layering angle in each of the ten layers has been defeated. The highest and lowest amount of composite tube destruction is related to the tenth layer of makeup $[(\pm90)_5]$ and the sixth layer of makeup $[(\pm30)_5]$, respectively.

– Based on the Hashin criterion, the underlying extension tubes and the fibers of this tubing, which are under compression and extension, have not been broken, but the underlying composite pipe under pressure has failed.

– A composite pipe under internal pressure with a $[(\pm55)_5]$, $[(\pm90)_5]$ layering angle in the first and second cracks has the lowest and highest value of the *J*-Integral.

– The stress intensity factor at the angle $[(\pm55)_5]$ has suddenly decreased by increasing angle. The maximum value of this factor occurs in the layering angle $[(\pm90)_5]$.

– The most optimum and minimum displacement of the crack inlet opening has been occurred in the layering angle $[(\pm55)_5]$, as the angle increases, displacement increases.

REFERENCES

[1] P. Laney, Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas, Idaho falls, Idaho 83415, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2002.

[2] S.W. Tsai, E.M. Wu, A General Theory of Strength for Anisotropic Materials, Composite Materials, 5 (1971) 58-80.

[3] Z. Hashin, Failure Criteria for Unidirectional Fiber Composites, ASME Journal of Applied Mechanics, 47(2) (1980) 329-334.

[4] S.W. Tsai, H.T. Hahn, Introduction to Composite Material, Westport, CT 06880, Technomic Publishing Company, 1980.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۵، سال ۱۳۹۹، صفحات ۱۱۷۹ تا ۱۱۹۲
DOI: 10.22060/mej.2019.14708.5947

تحلیل شکست لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه و بازشدگی دهانه ترک با معیار انتگرال J تحت فشار داخلی

امیر خدابخشی، حسن اسدی گیلاکجانی *

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

خلاصه: بررسی میزان آسیب وارد بر لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه تحت زوایای مختلف در اثر فشار داخلی که در درازمدت در اثر پدیده خزش ممکن است دچار شکست شوند کمتر مورد توجه قرار گرفته است. از این‌رو، در تحقیق حاضر به شبیه‌سازی شکست با معیارهای تسای-وو و هاشین با روش اجزاء محدود و با استفاده از آباکوس و همچنین بازشدگی دهانه ترک در اثر فشار داخلی در این لوله‌ها با لایه‌چینی‌های مختلف با معیار انتگرال J پرداخته شده است. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد که زمینه لوله کامپوزیتی تحت کشش و الیاف این لوله که تحت فشار و کشش قرار دارند دچار شکست نشده اما زمینه لوله کامپوزیتی تحت فشار، دچار شکست شده است. با توجه به نتایج بدست آمده برای هر ده لایه در زوایای لایه‌چینی از $[(\pm 30)_5]$ تا $[(\pm 60)_5]$ میزان شاخص شکست کمتر از یک است اما، در آرایش‌های لایه‌چینی $[(\pm 70)_5]$، $[(\pm 80)_5]$ و $[(\pm 90)_5]$ مقدار این شاخص بیشتر از یک بوده در نتیجه، لوله کامپوزیتی دچار گسیختگی شده است. همچنین، ضریب شدت تنش در زاویه لایه‌چینی $[(\pm 55)_5]$ دچار افت ناگهانی شده اما با افزایش زاویه، مقدار این ضریب افزایش یافته است.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷-۰۵-۱۷
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۹-۲۷
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۱-۱۵
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۱-۲۸

کلمات کلیدی:
لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده
با الیاف شیشه
تحلیل شکست
روش اجزاء محدود
انتگرال J
ضریب شدت تنش

۱- مقدمه

پدیده خوردگی شایع‌ترین آسیب در میان لوله‌های فلزی است که می‌تواند باعث بروز مشکلاتی نامطلوب در سیستم‌های انتقال سیال گردد. اگر لوله‌های فلزی در عمقی کمتر از عمق انجماد در زمین دفن شوند، بدلیل انبساط و انقباض‌های گسترده حرارتی، دستخوش تغییرشکل‌هایی ناخواسته و پدیده‌هایی که بر تعامل ساختاری خاک اثر می‌گذارد می‌شوند، زیرا اختلاف پتانسیل بین لوله و خاک اطراف در لوله‌های فلزی زیرزمینی، باعث بروز خوردگی در این نوع از لوله‌ها شده درنتیجه، لوله‌های فلزی از قسمت آسیب‌پذیر دچار نشت می‌شوند. در حالی‌که، لوله‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه[1] یا جی.آر.پی که نقش عمده و برجسته‌ای از ساختارهای مهندسی در سیستم‌های لوله‌کشی حاضر ایفا می‌کنند قادر به تحمل شرایطی سخت و پیچیده، نظیر محیط‌های حرارتی، رطوبتی، تابشی، تنشی و خصوصاً در مقابل طیف وسیعی از سیالات (نظیر مواد شیمیایی، صنعتی و نفتی) مقاوم هستند. از این‌رو، نیاز به عایق‌کاری اضافی از بیرون یا درون ندارند. از طرفی، این لوله‌ها با وجود وزن کم، استحکام زیادی داشته بنابراین، ساختار محکم این لوله‌ها، مقاومت به خوردگی بالای آن‌ها و همچنین وزن کم یا سبکی آن‌ها باعث شده بعنوان جایگزینی بسیار مناسب برای لوله‌های فلزی و بتونی مطرح شوند [۱]. لوله‌های کامپوزیتی جی.آر.پی بر خلاف لوله‌های فلزی هنگام نشت مایع، امکان جوش‌کاری حرارتی را ندارند همچنین، خواص مکانیکی آن‌ها هنگام قرار گرفتن در مجاورت آب، تغییر می‌کند. عمده اشکال آن‌ها این است که باید با افزایش قطر، ضخامت دیواره‌ای آن‌ها هم بیشتر شود تا استحکام لازم برای کاربری داشته باشند. اما این اشکال هم با استفاده از لایه‌چینی در زوایای مختلف که منجر به مطلوب‌ترین حالت استحکام لوله می‌شود قابل رفع است [۱ و ۲]. از این‌رو، تقویت الیاف نقش تعیین‌کننده‌ای در تولید لوله‌های جی.آر.پی فشار بالا دارد. معمولاً از الیاف ای-گلس[2] بعنوان انتخاب ترجیحی در الیاف تقویت‌کننده استفاده می‌شود، این الیاف در افزایش

1 Glass-Fiber Reinforced Plastic (GRP)

2 E-Glass

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: hasadi@guilan.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

مقاومت به خوردگی و افزایش طول عمر لوله‌ها نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند. از این‌رو، مطابق شکل ۱ لوله‌های جی.آر.پی را می‌توان برای انواع پروژه‌های کاربردی نظیر انتقال مواد شیمیایی، دوغاب و پسماندهای خطرناک و گازهای فشرده حتی در زیرزمین مانند سیستم‌های آتش‌نشانی، سیستم‌های انتقال نفت، سیستم‌های انتقال گاز، سیستم‌های آب آشامیدنی و سیستم‌های فاضلاب استفاده نمود.

اگر کامپوزیت از اختلاط الیاف تقویت‌کننده در زمینه‌ای از ترموست کامپوزیتی تعریف شود، لوله‌های ترموست را می‌توان بعنوان لوله‌های کامپوزیتی درنظر گرفت. در واقع، لوله‌ی ترموست در آ.اِس.تی.اِم[1] به فرآورده‌ای استوانه‌ای اطلاق می‌شود که دارای الیاف تقویت‌کننده شیشه‌ای در ساختار خود بوده و در بستری پخته‌شده از زمینه ترموست قرار گرفته باشد این ماده تقویت‌کننده، بار وارد به قطعه را تحمل کرده و در زمینه شیمیایی ترکیب می‌شود. حداکثر مقاومت مکانیکی لوله کامپوزیتی با زمینه ونیل‌استر بر پایه الیاف شیشه، حدود psi۲۴۰۰۰ (۱۶۵/۵ MPa) است که تقریباً ۶۷ درصد از مقاومت فولاد آ.۳۶[2] را در بر می‌گیرد [۱]. در طول سال‌ها، تنوع و گستردگی مواد مورد استفاده در ساخت لوله ترموست، اسامی مختلفی برای این لوله‌ها مطرح شده است. از جمله، نام‌هایی نظیر لوله‌های مقاوم در برابر حرارت[3]، پلیمر تقویت‌شده[4]، اپوکسی تقویت‌شده ترموست[5]، پلاستیک تقویت شده شیشه‌ای[6] و پلاستیک تقویت‌شده با الیاف[7] [۱].

نکته‌ای که در اینجا ذکر آن ضروری بنظر می‌رسد این است که هدف، بالا بردن مقاومت کامپوزیت تا حد فلز نیست، بلکه هدف این است که نسبت مقاومت مکانیکی به وزن کامپوزیت آنقدر بالا باشد که بتوان لوله کامپوزیتی را بعنوان کاندیدایی مناسب برای لوله‌های با قطر و فشار بالا مورد استفاده قرار داد. اصولاً بدلیل قابلیت کنترل موضعی مقاومت، لوله کامپوزیتی یک کاندیدای ایده‌آل برای خطوط انتقال تحت فشار شده است. بطوری‌که می‌توان گفت مقاومت به وزن لوله‌های کامپوزیتی نسبت به لوله‌های فلزی بیشتر است. نکته مهم دیگری که باید به آن اشاره نمود، پدیده شکست است که معمولاً بدلیل رشد ترک در زمینه رخ می‌دهد. در نتیجه، مایع از دیواره لوله

1 American Society for Testing and Materials (ASTM)
2 A36
3 Reinforced Thermosetting Resin Pipe (RTRP)
4 Reinforced Plastic Mortar Pipe (RPMP)
5 Fiberglass Reinforced Epoxy (FRE)
6 Glass Reinforced Plastic (GRP)
7 Fiberglass Reinforced Plastic (FRP)

شکل ۱: کاربرد لوله‌های جی.آر.پی در شبکه‌های زیرزمینی انتقال نفت

Fig. 1: Application of GRP pipes in underground oil transfer networks

خارج می‌شود. نشت مایع و تشکیل قطرات مایع بر سطح خارجی لوله، نشان‌دهنده شکست در لوله است. برای تشخیص شکست هر یک از لایه‌ها به صورت عملی، می‌توان مسیر نشت مایع را از داخلی‌ترین لایه تا بیرونی‌ترین لایه مورد بررسی قرار داد. اگر در لایه‌ای شکست اتفاق افتد خواص مکانیکی مربوط به آن لایه دچار زوال می‌شود.

وسترگارد [۳] یک روش نیمه‌معکوس برای تحلیل تنش و جابجایی در نوک ترک پیشنهاد نمود. ایروین[8] [۴] مفهوم نرخ آزادسازی انرژی را گسترش داد و در حقیقت نظریه گریفیث[9] [۵] را به گونه‌ای مطرح کرد که برای حل مسائل مهندسی مناسب‌تر بود. ویلیامز [۶] اولین بار به ارائه یک چارچوب نظری برای تجزیه و تحلیل میدان الاستیک نوک ترک در مود بازشوندگی در مواد مرکب رسید. این راه حل برای بسیاری از پژوهشگران دیگر نیز مفید بود که پس از آن، روش‌های مختلفی برای ارزیابی علائم ترک بین دو ماده توسعه داده شد. رایس [۷] برای مشخص کردن رفتار غیرخطی مواد در جلوی نوک ترک، معیار انتگرال J را معرفی نمود. با ایده‌آل‌سازی رفتار پلاستیک به کمک رفتار الاستیک غیرخطی، رایس توانست رابطه‌ای برای نرخ آزادسازی انرژی در مواد غیرخطی بدست آورد. او نشان داد که این مقدار را می‌توان به صورت انتگرال خط مستقل از مسیر تعریف نمود. مایر و همکاران [۸] شکست لوله‌های تقویت شده با الیاف شیشه را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها تست چند محوری تحت نسبت‌های مختلف تنش محوری و تنش محیطی در یک سیستم تست ام.تی.

8 Irwin
9 Griffith Theorem

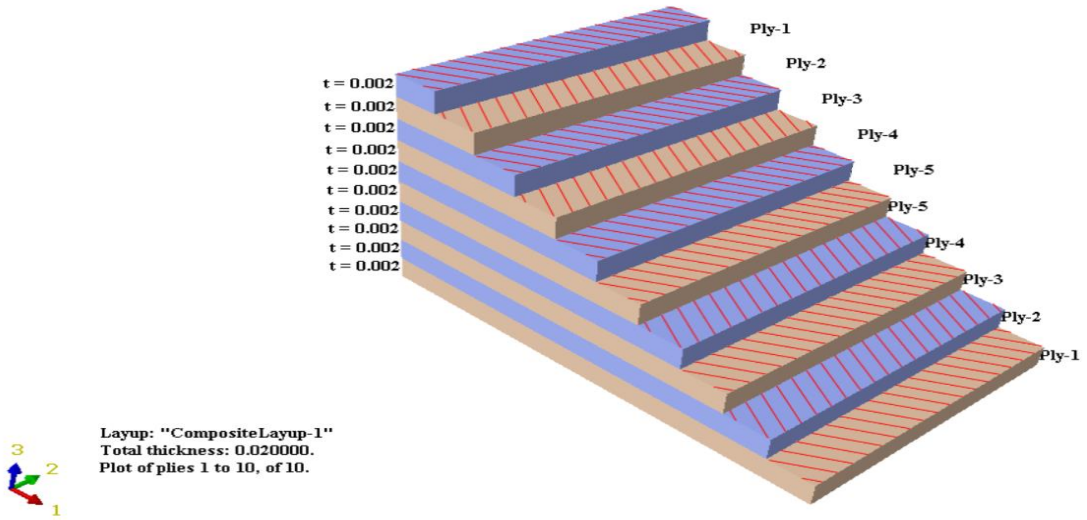
اس[1] در لوله‌های تولید شده با الیاف انجام دادند و برای اولین حالت شکست، نتایج را گزارش کردند. ملو و همکاران [۹] تحقیقاتی را بر روی فشار شکست لوله‌های جی.آر.پی از طریق مشاهدات تجربی و همچنین پیش‌بینی برای شکست لایه اول با استفاده از روش اجزاء محدود و معیارهای شکست کامپوزیت انجام دادند. فاریا و همکاران [۱۰] به پیش‌بینی عملکرد طولانی‌مدت لوله‌های جی.آر.پی پس از ۵۰ سال که تحت فشار داخلی[2] یا خارجی به مدت ۱۰۰۰۰ ساعت قرار داشت پرداخته، دریافتند که اختلاف بین عملکرد طولانی‌مدت پس از ۵۰ سال با ۱۰۰۰ ساعت و ۱۰۰۰۰ ساعت، در پیش‌بینی مقاومت فشاری طولی، کمتر از ۱۰/۵ درصد است. از این‌رو، ادعا کردند که عملکرد طولانی‌مدت پس از ۵۰ سال با توجه به داده‌های آزمایش ۱۰۰۰ ساعت، توسط روش‌های جایگزین قابل پیش‌بینی بوده هرچند، نوع مواد و ساخت و ساز این لوله‌ها متفاوت است. جین و همکاران [۱۱] رفتار خمشی و کششی لوله‌های جی.آر.پی تحت فشار عمودی و افقی زمین و بار وارد شده را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها روش‌هایی برای تعیین بهینه‌سازی ضخامت دیواره لوله از طریق تجزیه و تحلیل توزیع نیروی خمشی در بالا، پایین و دیواره جانبی لوله‌های جی.آر.پی زیرزمین پیشنهاد دادند. پارک و همکاران [۱۲] به تحقیق بر روی سختی لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه، که در زیرزمین قرار می‌گرفت پرداختند و استحکام کششی این نوع لوله‌ها را با سه روش معمول (با استفاده از آزمایش بارگذاری صفحات موازی و تحلیل اجزاء محدود و روش تحلیلی) مورد بررسی قرار دادند. بعد از انجام تست‌های مورد نظر دریافتند که تفاوت بین نتایج تجربی، تحلیلی و عددی کمتر از ۱۰ درصد است. از این‌رو، در پیش‌بینی سختی لوله می‌توان از روش‌های تحلیلی و عددی بجای انجام آزمون تجربی بارگذاری صفحات موازی استفاده نمود. یون و همکاران [۱۳] به مطالعه فشار و زمان شکست پس از اعمال فشار داخلی ثابتی به مدت ۱۰۰۰۰ ساعت پرداخته و عملکرد رفتار طولانی‌مدت لوله‌های جی.آر.پی را پیش‌بینی نمودند. آن‌ها دریافتند هنگامی‌که فشار داخلی ثابتی بر روی لوله‌های جی.آر.پی اعمال شود مقدار فشار شکست تا ۱۰۰۰ ساعت افزایش داشته اما، بعد از ۱۰۰۰ ساعت به‌طور پیوسته کاهش می‌یابد. ضریب همبستگی بین نتایج آزمون و معادله خطی برابر ۰/۸۴۲ و نسبت ضریب رگرسیون و واریانس برابر ۶/۴۵۱ نشانه مناسب بودن معادله خطی است. بر پایه نسبت ضریب رگرسیون بین فشار شکست ۶ دقیقه اول و ۵۰ سال ملاحظه گردید که عملکرد طولانی مدت لوله‌های جی.آر.پی پس از ۵۰ سال به ۵۷ درصد از عملکرد اولیه کاهش می‌یابد.

از آنجایی‌که، بررسی میزان آسیب وارد بر لوله‌های جی.آر.پی تحت زوایای مختلف در اثر فشار داخلی که در درازمدت ممکن است دچار شکست شوند کمتر مورد توجه قرار گرفته از این‌رو، در تحقیق حاضر با استفاده از روش اجزاء محدود، به شبیه‌سازی شکست با معیارهای تسای-وو[3] و هاشین[4] و همچنین بازشدگی دهانه ترک با معیار انتگرال J لوله‌های جی.آر.پی با لایه‌چینی‌های مختلف در اثر فشار داخلی پرداخته شده است.

۲- شبیه‌سازی

در تحقیق حاضر، با روش اجزاء محدود و با استفاده از آباکوس به شبیه‌سازی شکست با معیارهای تسای-وو و هاشین و همچنین بازشدگی دهانه ترک لوله‌های جی.آر.پی با لایه‌چینی‌های مختلف با معیار انتگرال J در اثر فشار داخلی پرداخته شده است. از آنجایی‌که، لوله‌های جی.آر.پی بطور جداگانه تحت شرایط فشار داخلی با روش‌های استاندارد، مورد آزمایش قرار می‌گیرند ازاین‌رو، در این مقاله از نتایج هر یک از آزمون‌ها برای صحت‌سنجی استفاده شده است. لوله جی.آر.پی این تحقیق از ده لایه الیاف تقویت‌کننده به شکل پادمتقارن، به نحوی‌که خواص مکانیکی آن‌ها تابعی از کسر حجمی الیاف و زمینه می‌باشد تشکیل شده است. الیاف بکار رفته از نوع و جنس ای-گلس و ماتریس مورد نظر از جنس اپوکسی می‌باشد. نحوه چیدمان لایه‌ها در این تحقیق، به صورت $[(\pm\theta)_5]$ در نظر گرفته شده و نمونه $[(\pm 30)_5]$ این چیدمان در شکل ۲ نشان داده شده است. همچنین، خواص مکانیکی در تحقیق حاضر، برای لوله جی.آر.پی در جدول ۱ و انرژی‌های شکست برای تکامل آسیب معیار هاشین در جدول ۲ با استناد به مرجع [۱۴]، آورده شده است. لوله جی.آر.پی مورد مطالعه، دارای مشخصات اسمی DN500[5] و ضخامت لایه‌ای ۲ میلی‌متر است که تحت تأثیر فشار داخلی ۵ مگاپاسکال با شرایط مرزی بسته-بسته، قرار گرفته است. شبیه‌سازی شکست با معیارهای

1 Methods Testing Specific (MTS)
2 Internal Pressure
3 Tsai-Wu
4 Hashin
5 Diameter Nominal



شکل ۲: نمایی از کاربرد لایه‌چینی لوله کامپوزیتی با آرایش $[(\pm 30)_5]$

Fig.2: The view of application of layering in composite pipe with makeup $[(\pm 30)_5]$

جدول ۱: خواص مکانیکی لوله جی.آر.پی [۱۴]

Table 1: Mechanical properties of GRP pipe [14]

خواص	مفهوم	مقدار	واحد
v_f	درصد حجمی الیاف	0/45	-
E_1	مدول الاستیک در جهت الیاف	38/6	GPa
E_2	مدول الاستیک در جهت عرضی عمود بر الیاف	8/27	GPa
v_{12}	ضریب پواسون	0/26	-
G_{12}	مدول برشی در صفحه الیاف	4/14	MPa
X_t	استحکام کششی در جهت الیاف	1/62	MPa
X_c	استحکام فشاری در جهت الیاف	610	MPa
Y_t	استحکام کششی در جهت عرضی عمود بر الیاف	31	MPa
Y_c	استحکام فشاری در جهت عرضی عمود بر الیاف	118	MPa
S_{12}	استحکام برشی در صفحه الیاف	72	MPa
ρ	چگالی	1785	kg/m^3

ذکر شده و بازشدگی دهانه ترک با زوایای $[(\pm 30)_5]$، $[(\pm 45)_5]$، $[(\pm 55)_5]$، $[(\pm 60)_5]$، $[(\pm 70)_5]$، $[(\pm 80)_5]$ و $[(\pm 90)_5]$ مورد بررسی قرار گرفته است.

۳- معادلات مکانیک شکست

در تحقیق حاضر، ماده به‌گونه‌ای در نظر گرفته شده تا رفتار مواد تقویت شده با الیاف را پیش‌بینی نماید بدون آن‌که تغییرشکل قابل‌ملاحظه پلاستیکی در ماده ایجاد گردد. همچنین، مقدار شاخص شکست (I_F) با استفاده از معیار تسای-وو، از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۵]. اگر این شاخص کمتر از یک باشد، گسیختگی اتفاق نمی‌افتد در غیر این‌صورت لایه کامپوزیتی دچار تخریب می‌شود. (۱)

$$I_F = F_1\sigma_{11} + F_2\sigma_{22} + F_{11}\sigma_{11}^2 + F_{22}\sigma_{22}^2 + F_{66}\sigma_{12}^2 + 2F_{12}\sigma_{11}\sigma_{22} \qquad (۱)$$

که در این رابطه، σ_{11} تنش وارد شده در راستای الیاف، σ_{22} تنش وارد شده در راستای عمود بر الیاف و σ_{12} تنش برشی در صفحه الیاف می‌باشد. لازم به ذکر است که مقادیر F_1، F_2، F_{11}، F_{22}، F_{66} و F_{12} در رابطه (۱) با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شوند:

$$F_1 = \frac{1}{X_t} + \frac{1}{X_c};$$

جدول ۲: انرژی‌های شکست [۱۴]
Table 2: Failure energies [14]

خواص	مفهوم	مقدار	واحد
G_f^t	انرژی شکست کششی الیاف	107640	J/m^2
G_f^c	انرژی شکست فشاری الیاف	34160	J/m^2
G_m^t	انرژی شکست کششی زمینه	4844/7	J/m^2
G_m^c	انرژی شکست فشاری زمینه	10414/5	J/m^2

$$
\begin{aligned}
&F_2=\frac{1}{Y_t}+\frac{1}{Y_c};\\
&F_{11}=-\frac{1}{X_tX_c};\\
&F_{22}=-\frac{1}{Y_tY_c};\\
&F_{66}=\frac{1}{S_{12}^2};\\
&F_{12}=\frac{1}{2\sigma^2}\left[1-\left[\frac{1}{X_t}+\frac{1}{X_c}+\frac{1}{Y_t}+\frac{1}{Y_c}\right]\sigma+\left[\frac{1}{X_tX_c}+\frac{1}{Y_tY_c}\right]\sigma^2\right];
\end{aligned}
\tag{۲}
$$

که در این رابطه، مفهوم پارامترهای X_t، X_c، Y_t، Y_c و S_{12} در جدول 1 آورده شده است. همچنین مقدار ضریب F_{12} علاوه بر اینکه به استحکام‌های شکست کامپوزیت در جهت‌های مختلف بستگی دارد، به مقاومت دو محوره تک‌لایه σ نیز بستگی دارد. هاشین برای تسلیم کامپوزیت‌های لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف، دو معیار پیشنهاد کرد که شکست الیاف و زمینه در آن از هم مستقل بودند. این دو معیار شامل چهار حالت زیر می‌باشند: شکست الیاف تحت کشش (F_f^t)، شکست الیاف تحت فشار (F_f^c)، شکست زمینه تحت کشش (F_m^t) و شکست زمینه تحت فشار (F_m^c). معادلات هاشین برای چهار حالت ذکر شده به صورت زیر نوشته می‌شوند [۱۶]:

$$
\begin{aligned}
&if \quad \sigma_{11}\geq 0; && F_f^t=\left(\frac{\sigma_{11}}{X_t}\right)^2+\frac{\sigma_{12}^2+\sigma_{13}^2}{S_{12}^2},\\
&if \quad \sigma_{11}<0; && F_f^c=\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2,\\
&if \quad (\sigma_{22}+\sigma_{33})\geq 0; && F_m^t=\frac{(\sigma_{22}+\sigma_{33})^2}{Y_t^{\,2}}+\frac{\sigma_{23}^2-\sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2}+\frac{\sigma_{12}^2+\sigma_{13}^2}{S_{12}^2},\\
&if \quad (\sigma_{22}+\sigma_{33})<0; && F_m^c=\left[\left(\frac{Y_c}{2S_{23}}\right)^2-1\right]\left(\frac{\sigma_{22}+\sigma_{33}}{Y_c}\right)+\frac{(\sigma_{22}+\sigma_{33})^2}{4S_{23}^2}+\frac{\sigma_{23}^2-\sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2}+\frac{\sigma_{12}^2+\sigma_{13}^2}{S_{12}^2}
\end{aligned}
\tag{۳}
$$

که در این رابطه، σ_{11} تنش وارد بر راستای الیاف، σ_{22} تنش وارد شده در راستای عمود بر الیاف، σ_{33} تنش طولی بین‌لایه‌ای، σ_{12} تنش برشی در صفحه الیاف، σ_{13} و σ_{23} تنش برشی بین‌لایه‌ای، S_{12} استحکام برشی در صفحه الیاف و S_{23} استحکام برشی بین‌لایه‌ای می‌باشند. آباکوس برای پیش‌بینی شکست در کامپوزیت‌های لایه الیافی با استفاده از معادله هاشین، از شاخص F که دقیقاً عملکردی مانند شاخص شکست (I_F) دارد استفاده می‌کند. از این‌رو، اگر مقدار F در هر یک از حالت‌های ذکر شده کمتر از یک باشد، شکست در لایه کامپوزیتی اتفاق نمی‌افتد و در غیر این‌صورت لایه کامپوزیتی دچار تخریب می‌شود.

۴- انتگرال J

مفهوم اساسی انتگرال J به وسیله اشلبی[1] [۱۷] به کار برده شد تا توسط آن نیروهای تعمیم‌یافته بر روی نابجایی‌ها و عیوب نقطه‌ای در میدان‌های الاستیک و به کمک یک مؤلفه ایستایی تانسور انرژی مقدار حرکت مشخص گردد. تعریف اصلی انتگرال J به وسیله رایس [۷] یک جسم همگن از یک ماده با رفتار الاستیک خطی یا غیرخطی عاری از هر نیروی داخلی و تغییرشکل اولیه و تحت یک میدان تغییرشکل دوبعدی در فضای دکارتی را در بر می‌گیرد.

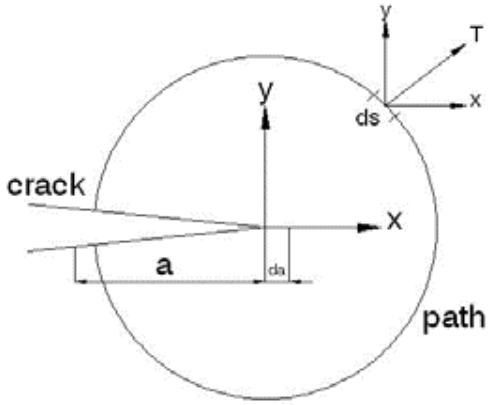
همچنین هاتچینسون [۱۸] با همکاری رایس و رزنگرن [۱۹] نشان دادند که انتگرال J به صورت یگانه قادر است که تنش و کرنش را در نوک ترک برای مواد غیرخطی معین نماید. بنابراین انتگرال J را می‌توان بعنوان پارامتر انرژی و یا پارامتر شدت تنش شناخت. قبل از این نرخ آزادسازی انرژی برای مواد خطی تعریف شده بود و یک تعریف مشابه توسط رایس برای مواد الاستیک غیرخطی صورت گرفت.

$$
J=\int_\Gamma W dy-\int_\Gamma T\,\frac{\partial u}{\partial x}ds \tag{۴}
$$

که در آن W، دانسیته انرژی کرنشی، T بارهای کششی سطحی و Γ محیط سطح مورد نظر می‌باشد.

یکی از نتایج مهم تعمیم اعتبار معادله (۴) برای رفتار غیرخطی آن است که تحت محدودیت‌های خاص، می‌توان از آن برای مدل کردن رفتار پلاستیک استفاده کرد. محدودیت اصلی اینجاست که جسم باید تحت بارگذاری با افزایش یکنواخت قرار گیرد و نباید هیچ‌گونه برداشت بار (حذف بار) بر آن تحمیل شود. بنابراین J

1 Eshelby



شکل ۳: مشخصات سیستم مختصات

Fig. 3: Specifications of coordinate system

میزانی است برای کار ورودی به سیستم و نه مقدار کار برگشت‌پذیر در هنگام حذف یا برداشتن بار. برای تغییرات بی‌نهایت کوچک در شکل هندسی یک ترک نوک پهن و یا تغییرشکل پلاستیک، عبارت انتگرال خطی موثرتر است. برعکس، در حالت یک ترک نوک تیز، میزان بازشدگی ترک[1] قابل چشم‌پوشی بوده و عبارت انتگرال سطح در معادله انتگرال J همواره مستقل از مسیر است [۲۰].

عدم وابستگی انتگرال J به مسیر باعث می‌شود که نرخ رهایی انرژی الاستیک خطی، غیرخطی و کار الاستوپلاستیک دور نوک ترک محاسبه شود. بهترین منطق برای استفاده از انتگرال‌های ناوابسته به مسیر در این حقیقت نهفته است که، اطلاعات مربوط به حالت‌های تنش و کرنش در یک ناپیوستگی را می‌توان از نتایج انتگرال‌ها بر روی یک مسیر یا فاصله‌ای دورتر از آن ناپیوستگی در محلی که سینگولاریتی یا رفتار الاستوپلاستیک غیرخطی دیده نمی‌شود، بدست آورد. برای رفتار الاستیک خطی نرخ رهایی انرژی کرنشی G چنین است:

$$G = -\frac{1}{B}\left(\frac{\partial U_P}{\partial a}\right) \qquad (۵)$$

بطور مشابه، برای جسم الاستیک غیرخطی، اندازه J میزان افت انرژی پتانسیل برای هر گسترش مجازی ترک به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$J = -\frac{1}{B}\left(\frac{\partial U_P}{\partial a}\right) \qquad (۶)$$

که در آن، B ضخامت است. در حقیقت اگر قطعه رفتار الاستیک خطی از خود نشان دهد J به G تبدیل می‌شود که با ضریب شدت تنش K[2] تنش صفحه‌ای، با رابطه (۷) مرتبط می‌شود.

$$J = \frac{K^2}{E} \qquad (۷)$$

قابل توجه است که برای مواد الاستوپلاستیک، کمیت U_P را نمی‌توان فقط به عنوان انرژی پتانسیل تفسیر کرد بلکه به عنوان کار الاستوپلاستیک مورد نیاز جهت ایجاد تغییرشکل در عضو ترک‌دار تعریف نموده در این حالت، انتگرال J اهمیت فیزیکی خود را به عنوان میزانی برای اندازه‌گیری شدت میدان کرنش مشخصه نوک ترک حفظ می‌کند. این موضوع به نوعی از دید فلسفی با مفهوم ضریب شدت تنش که شدت میدان الاستیک تنش در مجاورت نوک ترک را می‌دهد، مشابه است.

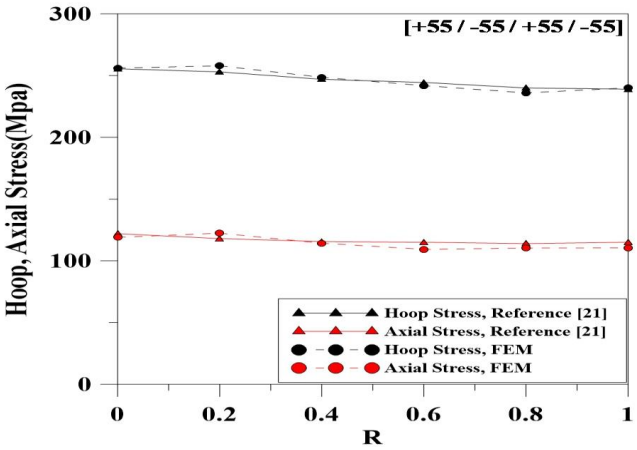
۵- صحت‌سنجی نتایج

برای حصول اطمینان از نتایج بدست آمده در این مقاله، نتایج مدل‌سازی اجزاء محدود آباکوس با نتایج بدست آمده از مدل تئوری زیا و همکاران [۲۱]، مقایسه گردیده است. بطوری‌که در این تحلیل، طول لوله کامپوزیتی ۲ متر و آرایش زاویه لایه‌ها به صورت [۵۵−/۵۵+/۵۵−/۵۵+] با ضخامت لایه‌ای ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همچنین، مقادیر حاصل شده از تنش‌های مماسی و محوری لوله کامپوزیتی تحت فشار داخلی ۱۰ مگاپاسکال با شرایط مرزی بسته-بسته، مطابق شکل ۴ با نتایج تئوری مورد مقایسه قرار گرفته است.

برای حصول اطمینان از نتایج بدست آمده در شکست لوله کامپوزیتی، نتایج مدل‌سازی شکست اجزاء محدود آباکوس با نتایج بدست آمده از مدل یونیال و همکاران [۲۲]، همانطورکه در شکل ۵ هم قابل مشاهده است، با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در اینجا لازم به توضیح است که تجزیه و تحلیل شکست کامپوزیت‌های چندلایه‌ای که توسط یونیال و همکاران [۲۲] انجام گرفته در قالب چهار مدل آرایش لایه‌چینی الیاف و زمینه مختلف نظیر $[۰/\theta, \theta/۰, \theta/\theta, \theta]$ ، $[\theta/۹۰, -\theta/\theta, ۹۰-\theta]$، $[\theta/-\theta, \theta/-\theta]$ و $[\theta/\theta, \theta/\theta]$ بوده که در تحقیق حاضر بر اساس معیارهای مختلف

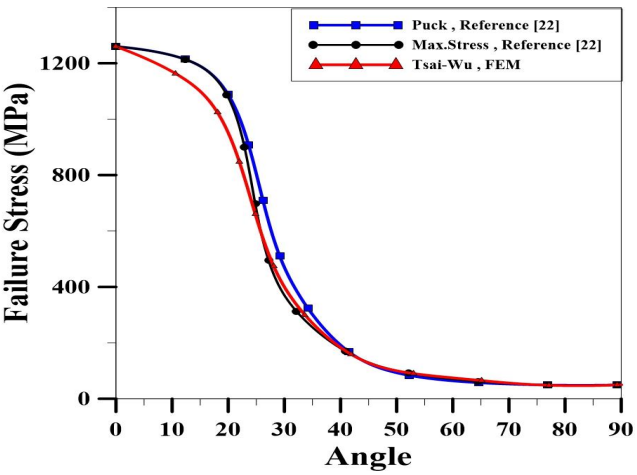
1 Crack Opening Displacement (COD)

2 Stress Intensity Factor



شکل ۴: مقایسه روش تئوری و اجزاء محدود برای لوله کامپوزیتی با آرایش $[(\pm 55)_5]$

Fig :4 .Comparison of the theoretical method and the finite element method for the composite pipe with makeup $[(\pm 55)_5]$



شکل ۵: مقایسه تغییرات تنش شکست روش اجزاء محدود آباکوس و مدل یونیال و همکاران برای مدل کامپوزیتی

Fig.5: Comparison of the variation of fracture tension on ABAQUS finite element method and Yonial et. al. model for composite model

یکی از این آرایش‌های لایه‌چینی مورد بررسی قرار گرفته است.

همانطورکه در شکل ۵ ملاحظه می‌شود، تنش شکست با معیارهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. نتایجی که بر اساس معیار تسای-ووی آباکوس حاصل شده با نتایج معیار تنش بیشینه[1] و پاک[2] از مدل یونیال و همکاران در آرایش لایه‌چینی $[\theta/-\theta,\theta/-\theta]$ با هم مقایسه شده‌اند.

همانطورکه در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود، مطابقت بسیار خوبی بین نتایج بدست‌آمده از روش اجزاء محدود آباکوس و روش تحلیلی انجام شده، وجود دارد که صحت نتایج عددی بدست آمده این مقاله را نشان می‌دهد.

۶- نتایج

۶-۱- معیارهای شکست

شاخص شکست (I_F) برای هر لایه، در لوله کامپوزیتی تحت فشار داخلی ۵ مگاپاسکال با معیار تسای-وو در جدول ۳ آورده شده است.

با توجه به ثابت بودن تعداد لایه‌ها، با افزایش آرایش لایه‌چینی در لوله کامپوزیتی شاخص شکست افزایش می‌یابد و لوله به شرایط بحرانی می‌رسد. در این شرایط، مطابق با معیار تسای-وو الیاف و زمینه دچار کشیدگی می‌شوند و استحکام خود را از دست می‌دهند [۲۳]. همانطورکه در جدول ۳ مشاهده می‌شود، لوله کامپوزیتی با آرایش لایه‌چینی $[(\pm 70)_5]$، $[(\pm 80)_5]$ و $[(\pm 90)_5]$در هر ده لایه دچار شکست شده است. بیشترین و کمترین میزان تخریب لوله کامپوزیتی به ترتیب، مربوط به لایه دهم آرایش $[(\pm 90)_5]$ و لایه ششم آرایش $[(\pm 30)_5]$می‌باشد. اما در حالت کلی روند افزایشی شاخص شکست لوله در زاویه $[(\pm 55)_5]$ کاهش یافته و از این زاویه به بعد تغییرات شاخص شکست افزایش یافته است. در این تحقیق، شاخص شکست (I_F) بطور جداگانه برای هر یک از چهار حالت معیار هاشین و برای هر یک از لایه‌های لوله کامپوزیتی تحت فشار داخلی ۵ مگاپاسکال، در جداول ۴ تا ۷ آورده شده است.

لوله کامپوزیتی با آرایش لایه‌چینی $[(\pm 70)_5]$، $[(\pm 80)_5]$ و $[(\pm 90)_5]$ با توجه به جدول ۳ در هر ده لایه دچار شکست شده است. نتایج جداول اخیر با استناد به معیار هاشین صحت این موضوع را تأیید می‌کنند. الیاف لوله کامپوزیتی تحت فشار و کشش و زمینه لوله تحت کشش، دچار شکست نشده اما زمینه لوله کامپوزیتی تحت فشار دچار شکست شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که در هر ده لایه، با تغییر زاویه لایه‌چینی از $[(\pm 30)_5]$ تا $[(\pm 60)_5]$ شاخص شکست کمتر از یک و در آرایش‌های لایه‌چینی $[(\pm 70)_5]$ ، $[(\pm 80)_5]$ و $[(\pm 90)_5]$ بیش از یک است در نتیجه، لوله کامپوزیتی دچار گسیختگی می‌شود. در شکل۶ کانتورهای احتمال وقوع شکست در لایه اول تحت فشار داخلی با زاویه لایه‌چینی $[(\pm 70)_5]$، $[(\pm 80)_5]$ و $[(\pm 90)_5]$ مشاهده می‌شود.

1 Maximum Stress
2 Puck

جدول ۳: شاخص شکست (I_F) در لوله کامپوزیتی با معیار تسای-وو

Table 3: Fracture index (I_F) in a composite pipe with a Tsai-Wu criterion

	$[(\pm۳۰)_۵]$	$[(\pm۴۵)_۵]$	$[(\pm۵۵)_۵]$	$[(\pm۶۰)_۵]$	$[(\pm۷۰)_۵]$	$[(\pm۸۰)_۵]$	$[(\pm۹۰)_۵]$
لایه اول	0/8782	0/7431	0/6573	0/7905	1/009	1/130	1/165
لایه دوم	0/7292	0/6637	0/5985	0/7997	1/021	1/141	1/176
لایه سوم	0/5620	0/6881	0/4813	0/8222	1/038	1/154	1/187
لایه چهارم	0/4250	0/6953	0/4258	0/8320	1/050	1/166	1/199
لایه پنجم	0/2459	0/7219	0/4529	0/8564	1/068	1/179	1/210
لایه ششم	0/1957	0/7398	0/4673	0/8744	1/084	1/192	1/222
لایه هفتم	0/1980	0/7478	0/4679	0/8847	1/096	1/205	1/234
لایه هشتم	0/2283	0/7774	0/4981	0/9118	1/117	1/219	1/247
لایه نهم	0/2449	0/7858	0/4993	0/9224	1/129	1/232	1/259
لایه دهم	0/2779	0/8173	0/5312	0/9512	1/150	1/247	1/272

جدول ۴: شاخص شکست الیاف لوله کامپوزیتی تحت کشش (F_f^t)

Table 4: Fracture index of composite pipe fiber under stretching (F_f^t)

	$[(\pm۳۰)_۵]$	$[(\pm۴۵)_۵]$	$[(\pm۵۵)_۵]$	$[(\pm۶۰)_۵]$	$[(\pm۷۰)_۵]$	$[(\pm۸۰)_۵]$	$[(\pm۹۰)_۵]$
لایه اول	0	0	0	0	0/08451	0/09169	0/1050
لایه دوم	0	0	0	0	0/1861	0/06162	0/07175
لایه سوم	0	0	0	0	0/05295	0/04655	0/04482
لایه چهارم	0	0	0	0	0/1192	0/04837	0/02417
لایه پنجم	0	0	0	0	0/02791	0/01779	0/00980
لایه ششم	0	0	0	0	0/01953	0/01390	0/00686
لایه هفتم	0/00008	0/00007	0/0030	0/00061	0/07118	0/03281	0/03824
لایه هشتم	0/00005	0/00032	0/00138	0/00247	0/02054	0/07204	0/09502
لایه نهم	0/00138	0/00366	0/00744	0/01017	0/05758	0/1453	0/1773
لایه دهم	0/00103	0/00395	0/00961	0/01397	0/07167	0/2218	0/2852

جدول ۵: شاخص شکست الیاف لوله کامپوزیتی تحت فشار (F_f^c)

Table 5: Fracture index of composite pipe fiber under pressure (F_f^c)

	$[(\pm۳۰)_۵]$	$[(\pm۴۵)_۵]$	$[(\pm۵۵)_۵]$	$[(\pm۶۰)_۵]$	$[(\pm۷۰)_۵]$	$[(\pm۸۰)_۵]$	$[(\pm۹۰)_۵]$
لایه اول	0	0	0	0	0/4037	0/03889	0/1220
لایه دوم	0	0	0	0	0/04598	0/03184	0/1081
لایه سوم	0	0	0	0	0/3114	0/03560	0/1313
لایه چهارم	0	0	0	0	0/01616	0/03324	0/1870
لایه پنجم	0	0	0	0	0/2761	0/07759	0/2113
لایه ششم	0	0	0	0	0/2594	0/09980	0/2391
لایه هفتم	0/00037	0	0/00021	0/0004	0/02836	0/08623	0/2746
لایه هشتم	0/00461	0/00395	0/00539	0/0059	0/2279	0/1498	0/2902
لایه نهم	0/01465	0/01096	0/01065	0/00988	0/02746	0/1384	0/3953
لایه دهم	0/02967	0/028	0/02960	0/02850	0/189	0/16	0/4371

جدول ۶: شاخص شکست زمینه لوله کامپوزیتی تحت کشش (F_m^t)

Table 6: Fracture index of the matrix comosite pipe under stretching (F_m^t)

	$[(\pm۳۰)_۵]$	$[(\pm۴۵)_۵]$	$[(\pm۵۵)_۵]$	$[(\pm۶۰)_۵]$	$[(\pm۷۰)_۵]$	$[(\pm۸۰)_۵]$	$[(\pm۹۰)_۵]$
لایه اول	0	0	0	0	0/4037	0/03889	0/1220
لایه دوم	0	0	0	0	0/04598	0/03184	0/1081
لایه سوم	0	0	0	0	0/3114	0/03560	0/1313
لایه چهارم	0	0	0	0	0/01616	0/03324	0/1870
لایه پنجم	0	0	0	0	0/2761	0/07759	0/2113
لایه ششم	0	0	0	0	0/2594	0/09980	0/2391
لایه هفتم	0/00037	0	0/00021	0/0004	0/02836	0/08623	0/2746
لایه هشتم	0/00461	0/00395	0/00539	0/0059	0/2279	0/1498	0/2902
لایه نهم	0/01465	0/01096	0/01065	0/00988	0/02746	0/1384	0/3953
لایه دهم	0/02967	0/028	0/02960	0/02850	0/189	0/16	0/4371

جدول ۷: شاخص شکست زمینه لوله کامپوزیتی تحت فشار (F_m^c)

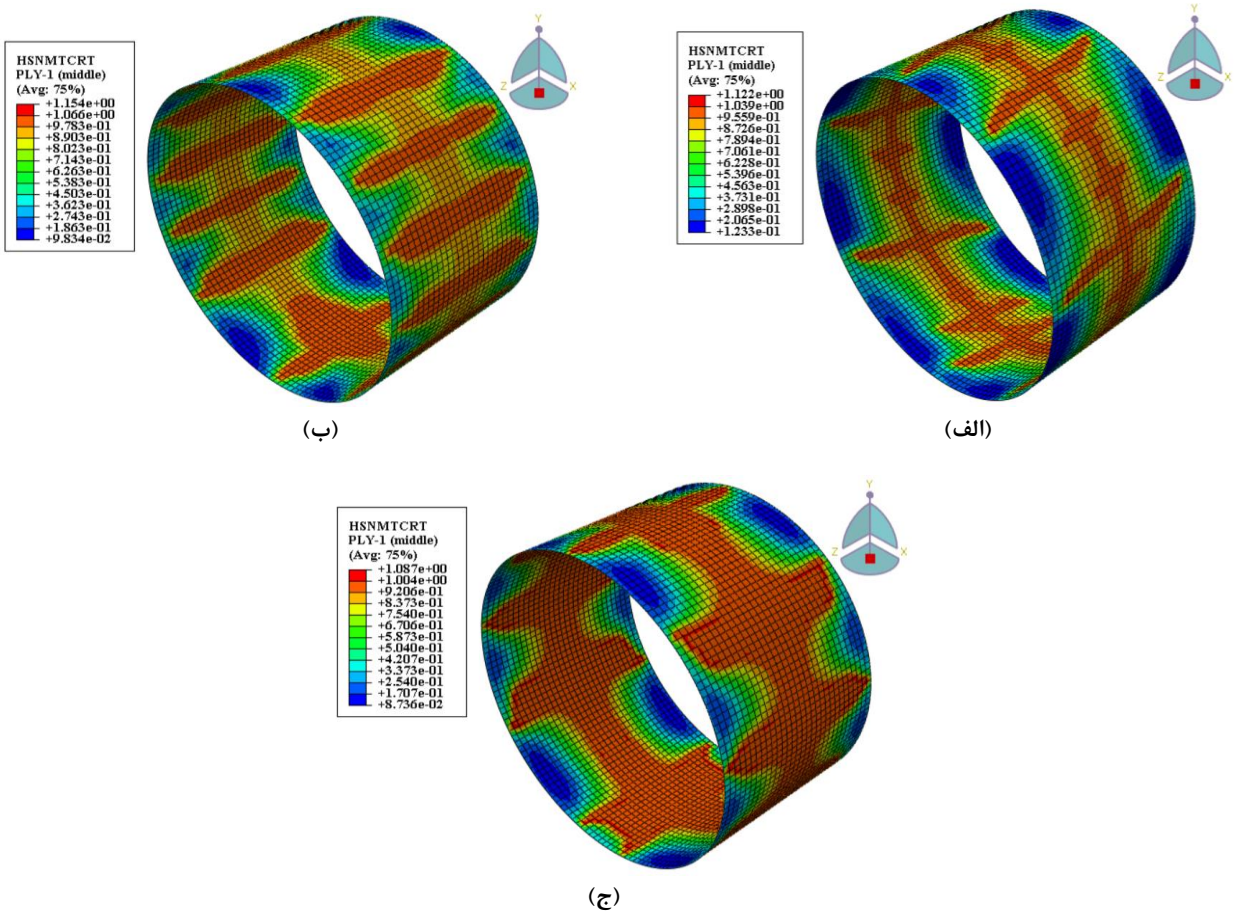
Table 7: Fracture index of the matrix composite pipe under pressure (F_m^c)

	$[(\pm۳۰)_۵]$	$[(\pm۴۵)_۵]$	$[(\pm۵۵)_۵]$	$[(\pm۶۰)_۵]$	$[(\pm۷۰)_۵]$	$[(\pm۸۰)_۵]$	$[(\pm۹۰)_۵]$
لایه ا ول	0/7720	0/5646	0/4040	0/5902	1/122	1/154	1/087
لایه دوم	0/5342	0/3682	0/4190	0/6133	1/171	1/199	1/113
لایه سوم	0/31177	0/2379	0/4576	0/6576	1/171	1/096	1/116
لایه چهارم	0/1824	0/1748	0/4740	0/6822	1/096	1/138	1/145
لایه پنجم	0/0616	0/2011	0/5177	0/7314	1/171	1/287	1/638
لایه ششم	0/03684	0/2172	0/5503	0/7708	1/132	1/307	1/195
لایه هفتم	0/04154	0/2207	0/5689	0/7974	1/148	1/333	1/752
لایه هشتم	0/05589	0/2530	0/6205	0/8543	1/140	1/318	1/241
لایه نهم	0/06576	0/2572	0/6402	0/8821	1/164	1/242	1/330
لایه دهم	0/08505	0/2936	0/6973	0/9443	1/143	1/233	1/315

۶-۲- اثر ترک

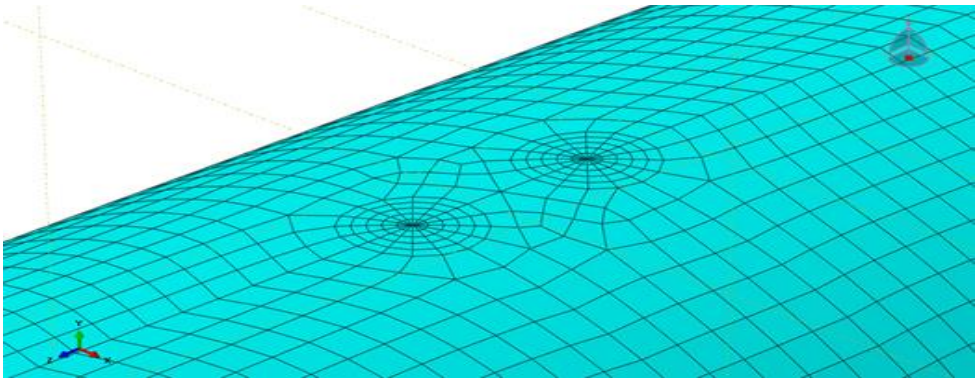
تمام مسائل مکانیک شکست، دارای دو مشخصه مشترک هستند. اولاً میدان تنش در اطراف نوک ترک منفرد است، ثانیاً میدان جابه‌جایی در طول ترک دارای ناپیوستگی است. برای رسیدن به پاسخ مطلوب در روش‌های عددی باید هر دو مشخصه فوق مورد توجه قرار گیرد. به همین دلیل المان‌های اطراف نوک ترک باید از درجه دوم و دارای گره میانی باشند و همچنین المان‌های نوک ترک، می‌بایست دارای وجه ترک متقارن و نوک ترک منفرد باشند [۲۴]. برای شبیه‌سازی بازشدگی دهانه ترک تحت فشار داخلی ۵ مگاپاسکال، ترک بر روی سطح لوله مدل‌سازی شده است. در شکل ۷ نحوه شبکه‌بندی دو رأس ترک مشاهده می‌شود. جدول ۸ مقادیر مختلف انتگرال J که بر مبنای انرژی آزاد شده در طول ترک است را برای لوله کامپوزیتی با زاویه لایه‌چینی $[(\pm۳۰)_۵]$، $[(\pm۴۵)_۵]$، $[(\pm۵۵)_۵]$، $[(\pm۶۰)_۵]$، $[(\pm۷۰)_۵]$، $[(\pm۸۰)_۵]$ و $[(\pm۹۰)_۵]$ تحت فشار داخلی نشان می‌دهد.

همان‌طورکه مشاهده می‌شود لوله کامپوزیتی با زاویه لایه‌چینی $[(\pm۵۵)_۵]$ و $[(\pm۹۰)_۵]$ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار انتگرال J در ترک اول و دوم، تحت فشار داخلی می‌باشد. با استفاده از مقادیر بدست آمده و رابطه (۷) می‌توان ضریب شدت تنش در لوله کامپوزیتی را برای هر دو رأس ترک محاسبه نمود. شکل ۸ نمودار ضریب تنش بر حسب آرایش زاویه‌های مختلف لوله کامپوزیتی در



شکل ۶: کانتور احتمال وقوع شکست زمینه تحت فشار در لایه اول لوله کامپوزیتی با استفاده از (الف) زاویه لایه‌چینی $[(\pm ۷۰)_۵]$، (ب) زاویه لایه‌چینی $[(\pm ۸۰)_۵]$ و (ج) زاویه لایه‌چینی $[(\pm ۹۰)_۵]$

Fig. 6: The contour of the probability of the occurrence of the underlying pressure failure in the first layer of the composite tube using A) Layering angle $[(\pm 70)_5]$ B) Layering angle $[(\pm 80)_5]$ C) Layering angle $[(\pm 90)_5]$



شکل ۷: نحوه شبکه‌بندی دو رأس ترک در لوله کامپوزیتی با اجزاء ۴ گره‌ای پوسته‌ای (S4R)

Fig. 7: The view of the networking on two tips of the crack in composite pipe with 4-node shell components (S4R)

ترک اول و دوم را نشان می‌دهد.

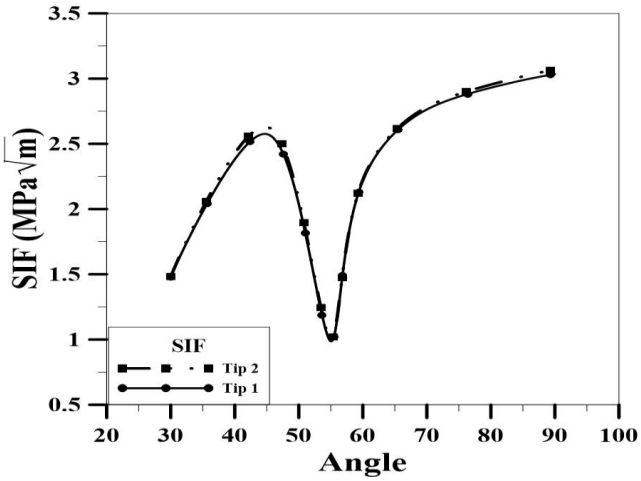
مطابق با نتایج بدست‌آمده بر اساس معیارهای تسای-وو و هاشین انتظار می‌رود که رشد ترک لوله کامپوزیتی با آرایش لایه‌چینی $[(\pm ۷۰)_۵]$، $[(\pm ۸۰)_۵]$ و $[(\pm ۹۰)_۵]$ در اثر فشار داخلی افزایش یابد.

لازم به ذکر است که محاسبات اجزاء محدود در نوک ترک از دقت کافی برخوردار نبوده و توام با خطای غیر قابل‌قبول می‌باشد، و ویژگی استقلال از مسیر انتگرال J می‌تواند این نقیصه را رفع نماید. با توجه به معیار تسای-وو در حالت کلی روند افزایشی شاخص شکست لوله

جدول ۸: مقادیر انتگرال J رأس اول و دوم در آرایش‌های مختلف لوله کامپوزیتی

Table 8: J-Integral values of frst and second vertices in different

	$[(\pm۳۰)_۵]$	$[(\pm۴۵)_۵]$	$[(\pm۵۵)_۵]$	$[(\pm۶۰)_۵]$	$[(\pm۷۰)_۵]$	$[(\pm۸۰)_۵]$	$[(\pm۹۰)_۵]$
رأس اول	1/10785	0/36621	0/162448	0/820577	1/27595	1/43435	1/53765
رأس دوم	1/15655	0/367017	0/166973	0/826695	1/29303	1/45766	1/57359



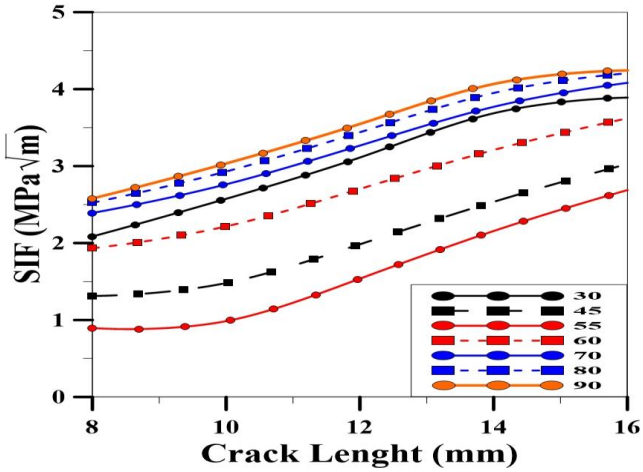
شکل ۸: تغییرات ضریب شدت تنش با افزایش آرایش لایه‌چینی لوله کامپوزیتی در رأس اول و دوم

Fig. 8: The variation of the stress intensity factor by increasing the layering angle of the composite pipe in the first and second vertices

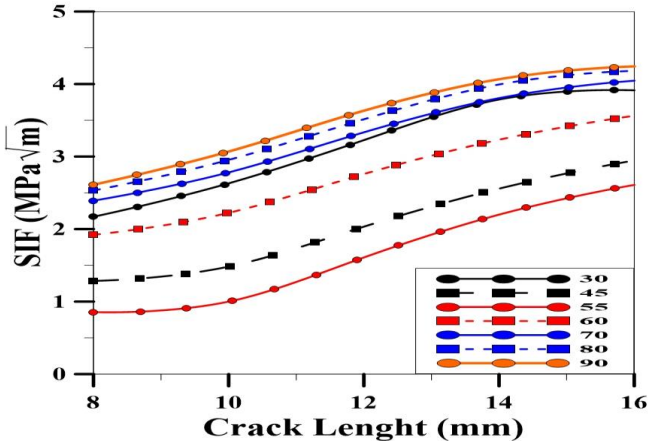
در زاویه $[(\pm۵۵)_۵]$ کاهش یافته و از این زاویه به بعد تغییرات شاخص شکست رو به افزایش است. تغییرات ضریب شدت تنش محاسبه شده با استفاده از انتگرال J در شکل ۸ نیز صحت این موضوع را تأیید می‌کند. همان‌طورکه مشاهده می‌شود ضریب شدت تنش در زاویه $[(\pm۵۵)_۵]$ دچار افت ناگهانی شده و با افزایش زاویه، این ضریب افزایش یافته است. مقدار بیشینه این ضریب در آرایش لایه‌چینی $[(\pm۹۰)_۵]$ رخ می‌دهد، پس در صورت افزایش فشار داخلی، رشد از سطح آزاد نوک ترک امتداد می‌یابد و لوله دچار تخریب شدیدتری می‌شود. در شکل ۹ تغییرات ضریب شدت تنش برای هر دو رأس ترک مورد نظر در لایه‌چینی‌های مختلف به ازای تغییر طول ترک ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴ و ۱۶ میلی‌متر نشان داده شده است.

مطابق با نتایج بدست آمده در شکل ۸ ضریب شدت تنش در زاویه $[(\pm۵۵)_۵]$ دچار افت ناگهانی شده و با افزایش زاویه، این ضریب افزایش یافته است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با تغییرات طول ترک کمترین مقدار ضریب شدت تنش در زاویه $[(\pm۵۵)_۵]$ بوده و با افزایش زاویه لایه‌چینی این ضریب در زاویه $[(\pm۹۰)_۵]$ به بیشینه خود رسیده است.

در شکل ۱۰ تغییرات گشودگی دهانه ترک با آرایش لایه‌چینی‌های مختلف نشان داده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، آرایش زاویه $[(\pm۵۵)_۵]$ کمترین جابه‌جایی گشودگی دهانه ترک و بهینه‌ترین حالت ممکن را دارد و با افزایش زاویه، گشودگی دهانه ترک نیز



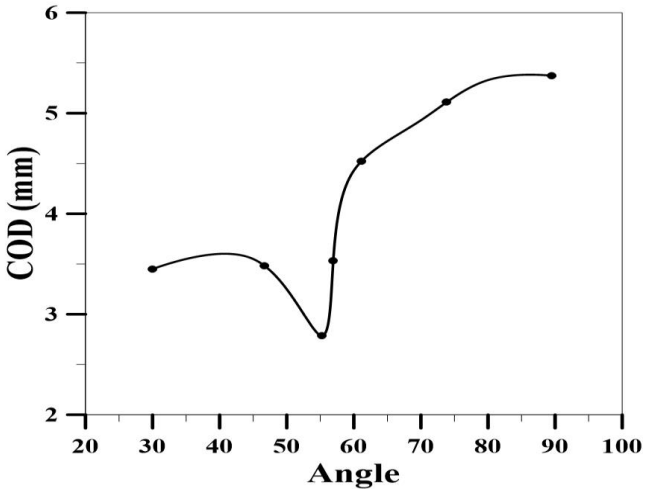
(الف) رأس اول



(ب) رأس دوم

شکل ۹: تأثیر افزایش طول ترک و تغییرات زاویه لایه‌چینی بر روی ضریب شدت تنش دو رأس ترک

Fig. 9: The effect of increasing the length of the crack and variations in the layering angle on the stress intensity factor of two ends of the crack



شکل ۱۰: تغییرات گشودگی دهانه ترک با آرایش لایه‌چینی‌های مختلف

Fig. 10: Variations in the crack inlet opening with different makeup arrangements

افزایش یافته و در زاویه $[(\pm ۹۰)_۵]$ به بیشینه خود رسیده است. در شکل ۱۱ نمایی از بازشدگی دهانه ترک تحت فشار داخلی با زاویه لایه‌چینی $[(\pm ۵۵)_۵]$ مشاهده می‌شود.

۷- بحث و جمع‌بندی

با توجه به نتایج بدست‌آمده در این تحقیق، می‌توان نتیجه‌گیری و جمع‌بندی را به صورت زیر خلاصه نمود:

بر اساس معیار تسای-وو، لوله کامپوزیتی با آرایش لایه‌چینی $[(\pm ۷۰)_۵]$، $[(\pm ۸۰)_۵]$ و $[(\pm ۹۰)_۵]$ در هر ده لایه دچار شکست شده است. بیشترین و کمترین میزان تخریب لوله کامپوزیتی به ترتیب مربوط به لایه دهم آرایش $[(\pm ۹۰)_۵]$ و لایه ششم آرایش $[(\pm ۳۰)_۵]$ می‌باشد.

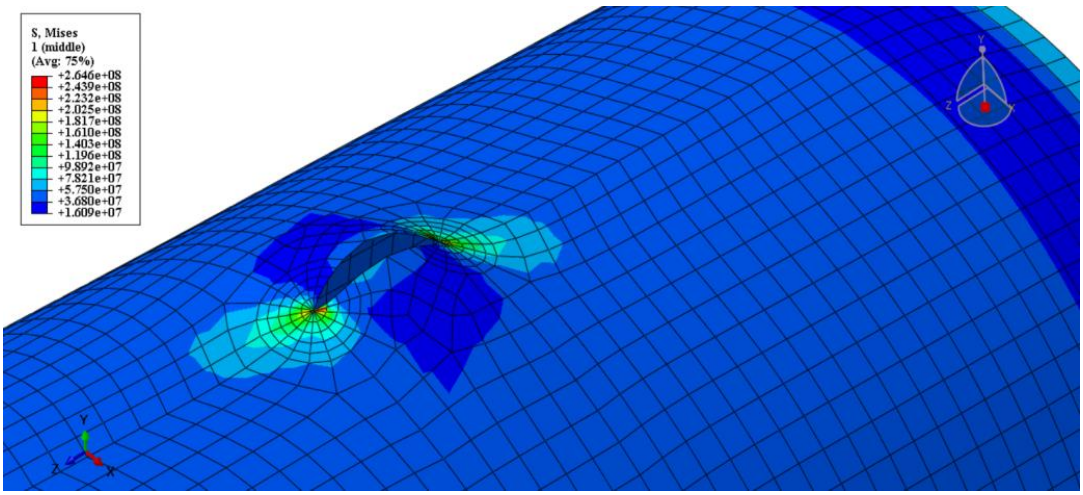
بر اساس معیار هاشین، الیاف لوله کامپوزیتی تحت فشار و کشش و زمینه لوله تحت کشش دچار شکست نشده اما زمینه لوله کامپوزیتی تحت فشار دچار شکست شده است. همچنین در هر ده لایه با تغییر زاویه لایه‌چینی از $[(\pm ۳۰)_۵]$ تا $[(\pm ۶۰)_۵]$ شاخص شکست کمتر از یک و در آرایش‌های لایه‌چینی $[(\pm ۷۰)_۵]$، $[(\pm ۸۰)_۵]$ و $[(\pm ۹۰)_۵]$ بیش از یک است در نتیجه، لوله کامپوزیتی دچار گسیختگی می‌شود.

لوله کامپوزیتی با زاویه لایه‌چینی $[(\pm ۵۵)_۵]$ و $[(\pm ۹۰)_۵]$ به ترتیب دارای کمترین و بیشترین مقدار انتگرال J در ترک‌های اول و دوم تحت فشار داخلی می‌باشد.

ضریب شدت تنش در زاویه $[(\pm ۵۵)_۵]$ دچار افت ناگهانی شده و با افزایش زاویه، این ضریب افزایش یافته است. مقدار بیشینه این ضریب در آرایش لایه‌چینی $[(\pm ۹۰)_۵]$ رخ می‌دهد.

بهینه‌ترین و کمترین جابه‌جایی گشودگی دهانه ترک در زاویه $[(\pm ۵۵)_۵]$ بوده و با افزایش زاویه، این جابه‌جایی افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری در تحقیق حاضر، برای بررسی شکست الیاف و زمینه لوله کامپوزیتی از معیارهای شکست استفاده شده است. همچنین با استفاده از انتگرال J مکمل و روش اجزاء محدود به تحلیل بازشدگی دهانه ترک و پیش‌بینی رشد ترک در لوله کامپوزیتی پرداخته شده است. از آنجایی‌که، محاسبات اجزاء محدود در نوک ترک از دقت کافی برخوردار نیست و با خطای غیر قابل‌قبولی همراه می‌باشد می‌توان از



شکل ۱۱: نمایش کانتور تنش فون میسز از بازشدگی دهانه ترک تحت فشار داخلی با زاویه لایه‌چینی $[(\pm ۳۰)_۵]$

Fig. 11: Von Mises stress contour display of the crack inlet opening under internal pressure with layering angle

ویژگی استقلال از مسیر انتگرال J، این نقیصه را رفع نمود. عدم وابستگی انتگرال J به مسیر باعث می‌شود که نرخ رهایی انرژی الاستیک خطی دور نوک ترک محاسبه گردد در نتیجه، با استفاده از مفهوم ضریب شدت تنش که شدت میدان الاستیک تنش در مجاورت نوک ترک را بدست می‌دهد، به بررسی رشد ترک پرداخته شده است. بر اساس نتایج اخیر، زمینه لوله کامپوزیتی تحت فشار داخلی در آرایش‌های لایه‌چینی $[(\pm۷۰)_۵]$، $[(\pm۸۰)_۵]$ و $[(\pm۹۰)_۵]$ دچار شکست شده، از این‌رو در این زاویه‌ها، لوله کامپوزیتی هرچه دارای الیاف مستحکم‌تری باشد، لایه حاصل از آن در مقابل پدیده شکست مقاوم‌تر است. اما همان‌طورکه اشاره شد شکست ایجاد شده در زمینه لوله اتفاق افتاده و این به معنی گسیختگی کامل لوله نیست. از این‌رو، در شرایط اخیر لوله کامپوزیتی با کاهش فشار می‌تواند در مقابل رشد ترک مقاومت نماید. با توجه به اینکه در تحلیل الاستیک خطی، انتگرال J همان نرخ آزادسازی انرژی می‌باشد، در حالت‌های مختلف آرایش لایه‌ها و محاسبه انتگرال J تحت فشار داخلی می‌توان نتیجه گرفت که بهینه‌ترین آرایش لایه‌چینی مربوط به زاویه $[(\pm۵۵)_۵]$ برای لوله کامپوزیتی می‌باشد. به عبارت بهتر، این زاویه لایه‌چینی که کمترین ضریب شدت تنش در مجاورت نوک ترک را دارا می‌باشد، در مقابل رشد ترک پایدارتر است. از طرفی، با توجه به اینکه بیشترین ضریب شدت تنش در مجاورت نوک ترک در آرایش لایه‌چینی $[(\pm۹۰)_۵]$ اتفاق افتاده، لوله کامپوزیتی حاصل از این آرایش، شرایط نامطلوبی را تحت فشار داخلی دارد و به بحرانی‌ترین حالت خود می‌رسد و با توجه به این‌که نرخ آزادسازی انرژی به بیشترین مقدار خود رسیده، رشد ترک در این حالت نیز افزایش می‌یابد. همین‌طور در صورت افزایش فشار داخلی، چون رشد ترک از سطح آزاد نوک ترک امتداد می‌یابد، لوله دچار تخریب شدیدتری می‌شود.

مراجع

[1] P. Laney, Use of Composite Pipe Materials in the Transportation of Natural Gas, Idaho falls, Idaho 83415, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, 2002.

[2] D. Hull, T.W. Clyne, An Introduction to Composite Materials, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

[3] H.M. Westergard, Bearing Pressures and Cracks, Journal of Applied Mechanics, 6 (1939) 49-53.

[4] G.R. Irwin, Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Travers a Plate, Journal of Applied Mechanics, 24 (1957) 361-364.

[5] A.A. Griffith, The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Philosophical Transactions of the Royal Society, 221 (1921).

[6] M.L. Williams, The Stresses Around a Fault or Crack in Dissimilar Media, Bulletin of the Seismological Society of America, 49 (1959) 199-204.

[7] J.R. Rice, A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentrations by Notches and Cracks, Journal of Applied Mechanics, 35 (1968) 379-386.

[8] G. Meijer, F. Ellyin, A failure envelope for ±60 filament wound glass fiber reinforced epoxy tubular, Composites Part A, (39) (2006) 555-564.

[9] J.D.D. Melo, F.L. Neto, G.A. Barros, F.N.A. Masquita, Mechanical Behavior of GRP Pressure Pipes with Addition of Quarts sand Filler, Composite Materials, (45) (2010) 717-726.

[10] H. Faria, R.M. Guedes, Long-term Behaviour of GFRP Pipes: reducing the prediction test duration, Polymer Testing, (29) (2010) 337-345.

[11] N.J. Jin, H.G. Hwang, J.H. Yeon, Structural Analysis and Optimum Design of GRP Pipes Based on Properties of Materials, Construction and Building Materials, (38) (2013) 316-326.

[12] J.S. Park, W.H. Hong, W. Lee, J.H. Park, Y. S.J., Pipe Stiffness Prediction of Buried GFRP Flexible Pipe, Polymers and Polymer Composites, (22) (2014) 17-24.

[13] S.H. Yoon, J.O. Oh, Prediction of Long term Performance for GRP Pipes Under Sustained Internal Pressure, Composite Structures, (134) (2015) 185-189.

[14] S.W. Tsai, H.T. Hahn, Introduction to Composite Material, Westport, CT 06880, Technomic Publishing Compony, 1980.

[15] S.W. Tsai, E.M. Wu, A General Theory of Strength

for Anisotropic Materials, Composite Materials, 5 (1971) 58-80.

[16] Z. Hashin, Failure Criteria for Unidirectional Fibre Composites, ASME Journal of Applied Mechanics, 47(2) (1980) 329-334.

[17] J.D. Eshelby, The Continuum Theory Of Lattice Defects In Solid State Physics, Academic Press, New York, 3 (1956) 79-144.

[18] J.W. Hutchinson, Singular Behavior at the End of a Tensile Crack Tip in a Hardening Material, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 16 (1968) 13-31.

[19] J.R. Rics, G.F. Rosengren, Plane Strain Defomation near a Crack Tip in a Power-Law Hardening Material, Journal of the Mechanics and Physics of Soilds, 16 (1968) 1-12.

[20] S.A. Meguid, Engineering Fracture Mechanics, Elsevier Science Pub, New York Sole distributor in the USA and Canada, 1989.

[21] M. Xia, H. Takayanagi, K. Kemmochi, Analysis of Multi-layered Filament-wound Composite Pipes Under Internal Pressure, Composite Structures, (53) (2001) 483-491.

[22] P. Uniyal, D. Gunwant, A. Misra, Multi Scale Modeling and Failure Analysis of Laminated Composites, Journal of Applied Mechanical Engineering, 5 (2016).

[23] C.T. Sun, B.J. Quinn, J. Tao, D.W. Oplinger, W.J. Hughes, Comparative Evaluation of Failure Analysis Methods for Composite Laminates, Springfield, Virginia 22161., U.S. Public through the National Technical Information Service (NTIS). 1996.

[24] M. Shiratori, Analysis and application of influence coefficient for round bar with semielliptical surface crack, Stress intensity factor hand book,oxford uk, (1987) 659-665.