



## تحلیل رفتار مکانیکی خطوط لوله کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی مدفون در خاک و مقایسه با خطوط لوله فولادی

احسان فلاحی<sup>۱</sup> و حشمت‌اله حقیقت<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

<sup>۲</sup> دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۵/۱۵؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۹/۱۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۲/۰۱

### چکیده

جایگزینی لوله‌های فولادی با کامپوزیتی یکی از راه‌های روبرویی با پدیده خوردگی در خطوط لوله انتقال سیالات است. کامپوزیت‌های پلیمری الیاف شیشه مقاوم در برابر خوردگی بوده و علاوه بر داشتن استحکام بالا یک گزینه ارزان‌تر نسبت به لوله‌های فولادی می‌باشند. در این مقاله، رفتار مکانیکی لوله کامپوزیتی و فلزی مورد استفاده در خطوط لوله انتقال نفت برای زوایای گسل در ۴۵، ۶۱، ۷۵ درجه تحت گسلش معکوس با استفاده از نرم‌افزار آباکوس بررسی شده‌است. استحکام مکانیکی و اندازه بیشینه جابه‌جایی در لوله‌های کامپوزیتی مدفون تحت گسلش معکوس با لوله‌های فولادی مقایسه شده‌اند. معیار ون‌میسز برای بررسی تسلیم لوله فولادی و معیار شکست هاشین و مودهای چهارگانه آسیب برای بررسی خرابی در لوله کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی، استفاده شده‌اند. مقایسه نتایج نشان داد، به منظور بهره‌برداری ایمن از لوله مدفون و خنثی نمودن تنش فشاری که عامل اصلی تسلیم لوله‌های مدفون است، باید لوله‌های فولادی در زوایای بالای ۶۱ درجه گسلش معکوس و لوله‌های کامپوزیتی تک جهته در زوایای کوچکتر از ۶۱ درجه به کار گرفته شوند؛ همچنین اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسل معکوس در زوایای گوناگون گسل، برای لوله کامپوزیتی حدود ۷۰ درصد بیشتر از نمونه فولادی بوده است. نتایج حاصل در این پژوهش می‌تواند در مطالعات طراحی خطوط لوله مدفون کامپوزیتی در مناطق دارای خاک خورنده و محل عبور گسل‌های فعال مورد استفاده قرار گیرد.

**کلمات کلیدی:** خطوط لوله مدفون؛ کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی؛ گسل معکوس؛ بارگذاری استاتیکی.

## Mechanical Behavior Analysis of Buried Glass Fiber Reinforced Epoxy Composites Used in Pipelines and Comparison with Steel

E. Fallahi<sup>1</sup>, H. Haghghat<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Master of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.

### Abstract

Replacing steel pipes with composites is one way to combat corrosion in fluid transfer pipelines. Glass fiber polymer composites are corrosion resistant and in addition to having high strength, they are a cheaper option than steel pipes. In this paper, the mechanical behavior of composite and steel pipes used in oil transmission pipelines for fault angles at 45, 61, 75° under reverse fault is investigated using Abaqus software. The mechanical strength and maximum displacement size of composite pipes buried under reverse faulting are compared with steel pipes. The onset of damage in GREs and the yielding point of steel were predicted using Hashin's initiation criteria considering four failure modes and the von Mises Stress, respectively. The results showed that In reverse faulting, the compressive force will often be the yielding factor of buried pipes and In order to safely operate the buried pipe, steel pipes should be used at angles above 61° of reverse fault and unidirectional composite pipes at angles less than 61°. In addition, the maximum allowable displacement of the reverse fault at different angles of the fault is at least 70% higher for the unidirectional composite pipes of glass-epoxy fibers than the steel pipes. The results of this study can be used in the design studies of composite buried pipelines in areas with corrosive soils and active fault crossings.

**Keywords:** Buried pipelines – The reinforced composite by glass fiber – Reverse faulting – Static loading.

## ۱- مقدمه

به تازگی لوله‌های کامپوزیت الیاف شیشه-اپوکسی<sup>۱</sup>، به صورت گسترده، برای انتقال سیالات بسیار خورنده در خطوط لوله مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱]. این لوله‌ها به علت داشتن مشکلات کمتر از نظر مقاومت به خوردگی، افزون‌بر تحمل و استحکام بالا برای فشار سیال و بارهای خارجی، یک گزینه ارزان‌تر نسبت به لوله‌های فولادی شمرده می‌شوند [۲]. با نگاه به پهنه گسترده موارد کاربرد لوله‌های کامپوزیتی، شناسایی ویژگی‌های رفتاری و ضعف‌های احتمالی به‌کارگیری این گونه لوله‌ها، ضروری می‌باشد. بررسی‌ها نشان داده که بیشترین آسیب به خطوط لوله مدفون، توسط تغییر مکان ماندگار زمین<sup>۲</sup> صورت می‌گیرد [۳]. از این روی، مطالعه و بررسی پاسخ لوله‌های مدفون کامپوزیتی در برابر بارهای وارده همچون گسل‌ها، ضروری است. جلالی و همکاران<sup>۳</sup> [۴] به مدل‌سازی رفتار لوله‌های مدفون در برابر حرکات گسل معکوس پرداختند. آن‌ها برخلاف روش‌های رایج مدل‌سازی به کمک دستگاه سانتیفریوژ، اقدام به ساخت دستگاه دوبخشی همسان با ابعاد بزرگ نمودند تا با فراهم کردن شرایط شبه‌استاتیکی رفتار دو لوله فولادی ۴ و ۶ اینچی را تحت شبیه‌ساز گسلش معکوس و به صورت بزرگ‌مقیاس مورد بررسی قرار دهند. عمق دفن لوله در آزمایش یک متر و اندازه جابه‌جایی گسل ۶۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شده بود. تن لانگ<sup>۴</sup> و همکاران [۵] لوله کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی مدفون در خاک را توسط روش اجزا محدود مدل‌سازی کردند. آن‌ها پاسخ لوله مدفون، برای تنش‌های حلقه‌ای و محوری ناشی از جابه‌جایی لوله و پاسخ لوله تحت تأثیر فشار داخلی بررسی گردید و پارامترهای دیگری مانند تنش‌های حاصل از خاک و فرونشست زمین نیز مورد واکاوی قرار گرفته است. جیاناروس و همکاران<sup>۵</sup> [۶] به پاسخ لوله کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی مدفون در خاک در برابر موج انفجار به روش تکنیک‌های اجزا محدود پرداختند. نتایج نشان دادند که آسیب‌پذیری لوله استوانه‌ای به گونه‌ای چشمگیر، تحت تأثیر جرم انفجاری، عمق دفن،

ضخامت دیواره لوله و فشار داخلی لوله قرار دارد؛ همچنین تغییر شکل لوله خالی حدود چهار برابر بیشتر از تغییر شکل لوله تحت فشار (درب‌گیرنده سیال) است. نزارا و همکاران<sup>۶</sup> [۷] لوله کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی تحت تنش چندمحوره را شبیه‌سازی کردند. با نگاه به نتایج حاصل، اندازه تنش ایجاد شده وابسته به زاویه پیچش الیاف در لوله است. نتایج نشان دادند که لوله‌های الیاف شیشه-اپوکسی برای انتقال سیالات فشار بالا بسیار مناسب هستند. المحاکری و همکاران<sup>۷</sup> [۸] خمش طولی و خرابی لوله‌های مدفون در خاک تحت تغییر شکل ماندگار زمین را به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند و نشان دادند که هرچه نسبت عمق دفن به قطر لوله افزایش یابد، متناسب با آن، تنش بیشینه در لوله افزایش می‌یابد. منشی‌زاده و همکاران<sup>۸</sup> [۹] با شبیه‌سازی سه‌بعدی اجزا محدود لوله‌های فلزی مدفون، افزون‌بر نقد و بررسی روش دو بعدی تیر و فنر، نشان دادند که افزایش نسبت قطر به ضخامت لوله، کاهش زاویه شیب گسل معکوس و افزایش زاویه اتساع خاک، سبب افزایش مقادیر کرنش‌های فشاری ایجاد شده در لوله می‌شود. حاج‌نوروزی و همکاران<sup>۹</sup> [۱۰] تحلیل اجزا محدود لوله‌های فلزی مدفون تحت گسلش معکوس را مورد بررسی قرار دادند و نتایج حاصل از این شبیه‌سازی عددی نشان داد که در لوله‌های مدفون تحت گسلش معکوس، مقادیر کرنش فشاری ایجاد شده همواره نسبت به کرنش کششی بحرانی‌تر است. سویطی و همکاران<sup>۱۰</sup> [۱۱]، رفتار مکانیکی لوله‌های مدفون تحت گسل‌های امتداد لغز را از دیدگاه قطر لوله، لایه‌چینی کامپوزیت و سفتی خاک روی لوله‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار دادند و نتایج نشان داد، زاویه پیچش الیاف کامپوزیت، تأثیر قابل ملاحظه‌ای در پاسخ لوله در رویارویی با حرکت گسل خواهد داشت، همچنین ثابت شد که تغییرات در اندازه سفتی خاک، تأثیر چندانی در انتخاب بهینه لایه‌چینی لوله‌های کامپوزیتی ندارد.

پژوهش‌های گسترده‌ای روی لوله‌های کامپوزیتی مدفون در خاک صورت پذیرفته ولی پاسخ این گونه لوله‌ها و مقایسه

<sup>۶</sup> Nazirah.

<sup>۷</sup> Mohamed Almahakeri et al.

<sup>۸</sup> Amin Monshizadeh Naeen et al.

<sup>۹</sup> Mohammad Mehdi Hajnorouzi et al.

<sup>۱۰</sup> Salem Soveiti et al.

<sup>۱</sup> Glass Reinforced Epoxy (GRE)

<sup>۲</sup> Permanent Ground Deformation (PGD)

<sup>۳</sup> Jalali et al.

<sup>۴</sup> Tan Long Bin et al.

<sup>۵</sup> E Giannaros et al.

گسل با حرکت ۶۰۰ میلی‌متری جعبه متحرک<sup>۱</sup>، مدل گردید؛ همچنین خاک در بین دیواره‌های جعبه، محصور گردیده و تنها بالای جعبه در معرض سطح آزاد قرار داشت. شبیه‌سازی رفتار لوله مدفون، به صورت شماتیک در شکل ۱ قابل مشاهده است. ابعاد گسل ۶۱ درجه و جایگاه قرارگیری آن برابر با شکل ۱ فرض شده است. بعد از حرکت جعبه متحرک به اندازه ۶۰۰ میلی‌متر، لوله دچار تغییر شکل به شکل S شد. در ادامه به صورت گام‌به‌گام مراحل شبیه‌سازی اجزا محدود، رفتار لوله مدفون در خاک تحت بارگذاری گسلش معکوس برابر شرایط این آزمایش، آورده شده و در پایان نتایج تنش‌ها و کرنش‌های ایجاد شده در نقاط گوناگون لوله برای اعتبارسنجی این مدل‌سازی با نتایج آزمایش مرجع، مقایسه شده‌اند.

## ۲-۲- ابعاد و هندسه مدل

ابعاد و محل قرارگیری لوله و بخش‌های متحرک و ثابت خاک مدل مفروض، مطابق شکل ۲ در نرم‌افزار آباکوس ساخته شد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده، لوله با قطر ۶ اینچ در عمق ۱ متری از سطح زمین و داخل خاک قرار داشته و نسبت عمق دفن به قطر لوله  $\frac{H}{D} = 5/94$  است.

## ۲-۲-۱- ترسیم مدل

لوله ۶ اینچ با ضخامت دیواره ۴/۴ میلی‌متر (جدول ۱) از جنس فولاد API 5L Grade B مدل شده است. مدول یانگ، نسبت پواسون و چگالی فولاد به کار رفته به ترتیب برابر  $200,000 \text{ MPa}$  و  $7800 \text{ kg/m}^3$  می‌باشند.

پیش‌بینی کارکرد فولادها پس از جاری شدن و رفتار تنش - کرنش لوله بر پایه (رابطه ۱) رامبرگ - اسگود<sup>۲</sup> تعیین شده است [۱۲]. برای لوله فولادی ساخته شده بر پایه استاندارد API 5L Grade B اندازه ضریب  $\alpha$ ، رابطه رامبرگ - اسگود جهت پیش‌بینی اندازه تنش - کرنش لوله بعد از لحظه تسلیم، مطابق جدول ۲ تعیین [۱۳] و همچنین تنش تسلیم  $\sigma_y$  برابر ۲۴۱ مگاپاسکال است [۴].

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_i} \left[ 1 + \frac{\alpha}{(r+1)} \left( \frac{\sigma}{\sigma_y} \right)^r \right] \quad (1)$$

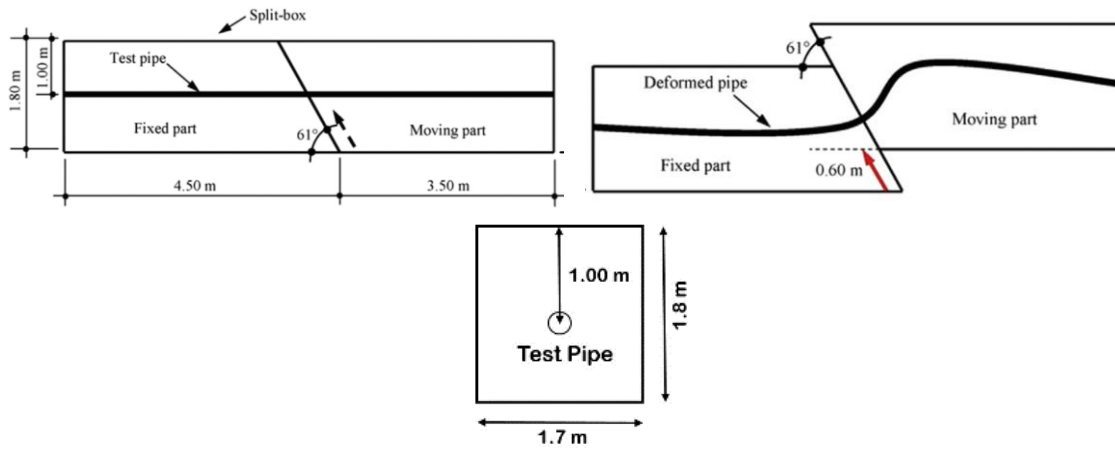
<sup>1</sup> Moving part

<sup>2</sup> Ramberg-Osgood.

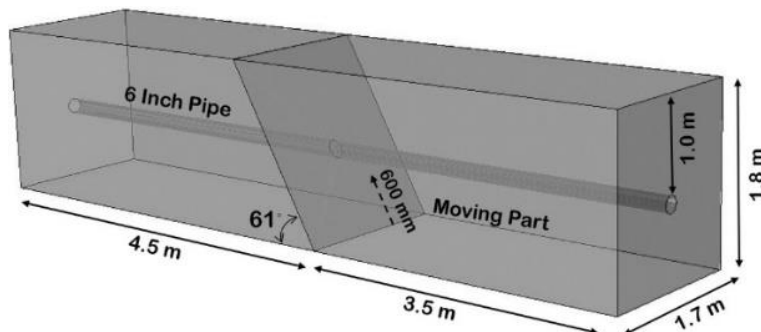
با لوله‌های فلزی مرسوم، تحت گسلش معکوس مورد بررسی قرار نگرفته است. در پژوهش حاضر رفتار مکانیکی لوله‌های کامپوزیتی مدفون تحت گسلش معکوس در مقایسه با لوله‌های فولادی از جمله میزان استحکام مکانیکی و اندازه بیشینه جابه‌جایی گسلی که لوله تحت آن همچنان در حالت الاستیک باقی می‌ماند، بررسی شده است. مهمترین نوآوری این پژوهش که سبب دستیابی به نتایج نزدیک به واقعیت می‌گردد، مدل‌سازی اندرکنش خاک و لوله کامپوزیتی با اجازه جدایش خاک از لوله در سطح مشترک و همچنین اعمال جابه‌جایی گسل روی تمام گره‌های بخش متحرک خاک است. نتایج این پژوهش می‌تواند در مطالعات طراحی خطوط لوله مدفون کامپوزیتی در مناطق دارای خاک خورنده و محل عبور گسل‌های فعال مورد استفاده قرار گیرد. در مقاله حاضر در ابتدا مدل‌سازی لوله فولادی مدفون تحت گسلش معکوس با زاویه ۶۱ درجه انجام گرفته است و نتایج تنش‌های وارده و همچنین کرنش تاج لوله در طول مسیر با نتایج مرجعی معتبر مقایسه گردیده و انطباق خوبی مشاهده شده است. در ادامه اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسل، قبل از تسلیم لوله فولادی محاسبه و سپس با اندازه تحمل لوله کامپوزیتی الیاف شیشه - اپوکسی (آستانه خرابی) در شرایط یکسان، مقایسه گردیده است. در گام دوم، مقایسه رفتار مکانیکی لوله کامپوزیتی و فولادی برای سایر زوایای گسل معکوس (۴۵° و ۷۵°) انجام شده است. در این پژوهش تنها مقایسه استحکام لوله کامپوزیتی و فلزی در برابر حرکت گسل از لحاظ جنس، بررسی شده و بررسی‌های بیشتر در رابطه با لوله‌های مدفون دربرگیرنده سیال خورنده و دارای فشار و یا استحکام لوله‌های فلزی تقویت شده با پوشش کامپوزیت به آینده موکول شده‌اند.

## ۲- مدل‌سازی و اعتبارسنجی

۲-۱- لوله فولادی مدفون در خاک تحت گسلش معکوس  
برای شبیه‌سازی رفتار لوله مدفون در خاک تحت گسلش معکوس از شرایط تست آزمایشگاهی جلالی و همکاران [۴] استفاده شده است. در این مدل، گسل معکوس با زاویه ۶۱ درجه توسط جعبه‌ای دوبرخی دربرگیرنده خاک به ابعاد ۸×۱.۸×۱.۷ متر شبیه‌سازی شد، لوله ۶ اینچی فولادی (API 5L Grade B) در عمق ۱ متر در خاک دفن و حرکت



شکل ۱- شبیه‌سازی رفتار لوله مدفون، به صورت شماتیک در آزمایش جلالی و همکاران [۴]



شکل ۲- مدل‌سازی خاک و لوله در محیط نرم‌افزار آباکوس

جدول ۲- پارامترهای رابطه رامبرگ اسگود برای لوله بر پایه API 5L و لوله‌های سری X [۱۳]

| X-52 | X-42 | Grade B |                    |
|------|------|---------|--------------------|
| ۳۵۸  | ۳۱۰  | ۲۴۱     | Yield stress (Mpa) |
| ۹    | ۱۵   | ۱۰      | $\alpha$           |
| ۱۰   | ۳۲   | ۱۰۰     | $r$                |

است. در واقع اندازه تنش به دست آمده ( $529/9 \text{ MPa}$ ) به ازای کرنش نهایی (گسیختگی کامل لوله  $\epsilon=0/246$ ) به عنوان استحکام کششی نهایی لوله محاسبه گردیده‌است.

#### ۲-۲-۲- مدل‌سازی خاک

خاک، از نوع ماسه متراکم دانه‌بندی شده با رطوبت ۵٪ مدل شده است [۴]؛ همچنین از معیار تسلیم موهر کولمب برای

جدول ۱- ویژگی‌های هندسی لوله مدل شده [۴]

| Value | The geometric dimensions of pipe |
|-------|----------------------------------|
| ۱۶۸/۳ | D(mm)                            |
| ۴/۴   | t(mm)                            |
| ۳۸    | D/t                              |
| ۱     | H(m)                             |
| ۵/۹   | H/D                              |
| ۶۱    | Fault Dip Angle (°)              |
| ۶۰۰   | Displacement (mm)                |

مقادیر استخراج شده از رابطه رامبرگ - اسگود وابسته به رفتار غیر الاستیک فولاد مورد بررسی در شکل ۳ آورده شده

جدول ۳- ویژگی‌های خاک با رطوبت ۵٪ مورد استفاده در

مدل‌سازی [۴]

| Value | Soil parameter                       |
|-------|--------------------------------------|
| ۱۸۷۰  | Dry Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> ) |
| ۶۷۸۷  | Young's Modulus (Kpa)                |
| ۰/۳   | Poisson's Ratio                      |
| ۳۳/۵  | Friction angle $\phi$                |
| ۳/۵   | Dilation Angle                       |
| .     | Absolute Plastic Strain              |
| ۵۰۰۰  | Soil Cohesion C (Pa)                 |

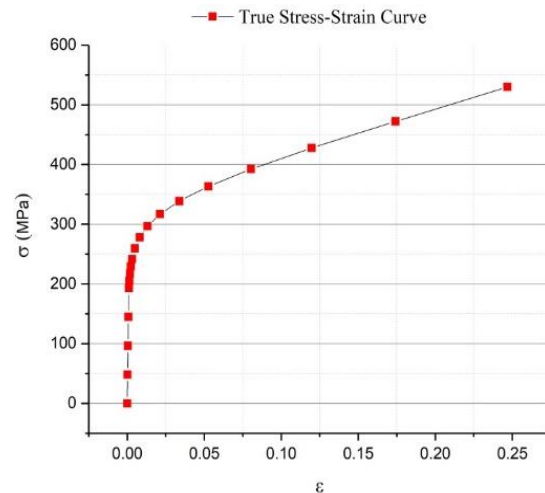
مرحله، اندازه مش تا مرزی که پاسخ لوله در عین همگرایی، ثابت باقی بماند، ریز در نظر گرفته شد.

۲-۲-۴- اندرکنش خاک و لوله در مدل ساخته‌شده

مدل‌سازی اندرکنش خاک و لوله بایستی به گونه‌ای انجام شود که در سطح مشترک اجازه جدا شدن لوله و خاک اطراف آن را فراهم سازد. برای این منظور از الگوریتم تماسی<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی سطح مشترک بین خاک اطراف لوله و سطح بیرونی لوله استفاده شد. برای در نظر گرفتن خواص سطح درگیر از روش پنالتی<sup>۳</sup> و اصطکاک تماسی<sup>۴</sup> با اندازه ۰/۴۱ به همراه اصطکاک عمودی از نوع تماس سخت<sup>۵</sup> استفاده گردید [۴]، مهمترین ویژگی این پژوهش تعیین پارامترهای اندرکنش خاک و لوله است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی انطباق بسیار خوبی با مدل آزمایشگاهی داشت. در شکل ۵ شمای کلی از سطح درگیر لوله و خاک قابل مشاهده است.

۲-۲-۵- شرایط مرزی

در مدل‌سازی تغییر شکل لوله و خاک تحت حرکت گسل، مدل به سه قسمت تقسیم شد، یک قطعه متحرک<sup>۶</sup> (M) تحت



شکل ۳- نمودار تنش- کرنش استخراج شده از رابطه رمبرگ- اسگود برای لوله فولادی API 5L Grade B

بیان رفتار خاک استفاده شده است؛ زیرا تئوری کولمب- موهر<sup>۱</sup> برای موادی به کار می‌رود که مقاومت فشاری آن‌ها بسیار بیشتر از مقاومت کششی باشد (مانند خاک). ویژگی‌های خاک از جمله ضریب چسبندگی خاک C و زاویه اصطکاک داخلی خاک  $\phi$ ، در جدول ۳ آمده است [۴].

۲-۲-۳- مش‌بندی لوله و خاک

المان پوسته‌ای به صورتی که یکی از ابعاد مدل (ضخامت) در برابر دو بعد دیگر بسیار کوچک‌تر باشد و تنش‌ها در جهت ضخامت مدل، قابل چشم‌پوشی کردن باشند، قابل تعریف است؛ بنابراین لوله با المان‌های پوسته‌ای چهار گره‌ای (S4R) و مش یک‌دست، مش‌بندی شده و مجموعاً ۷۳۴۸ مش به لوله اختصاص داده شده‌است، گفتنی است که با تغییر اندازه مش لوله در نزدیکی خط گسل نتایج مشابهی مشاهده شد. قبل از بارگذاری نهایی و انتخاب مش بهینه، حساسیت مش و استقلال نتایج بررسی شده است. برای مش‌بندی خاک از المان‌های پیوسته هشت گره‌ای سه‌بعدی (C3D8R) استفاده و در اطراف محل گسل از مش‌های ریزتری استفاده شد. تعداد کل المان‌ها برای خاک ۴۵۵۸۴ است که در شکل ۴ قابل مشاهده است. در مش‌بندی لوله و خاک در چندین

<sup>2</sup> Surface-To-Surface Contact

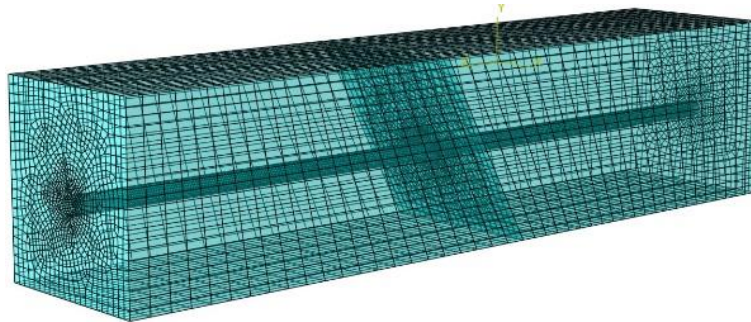
<sup>3</sup> Penalty

<sup>4</sup> Tangential Behavior

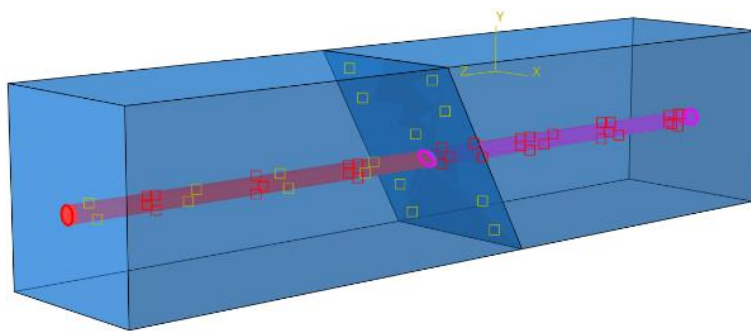
<sup>5</sup> Hard Contact

<sup>6</sup> Movable

<sup>1</sup> Mohr-Coulomb theory



شکل ۴- مش بندی لوله و خاک



شکل ۵- اندرکنش خاک و لوله در مدل ساخته شده

با نگاه به شکل ۷، درجات آزادی بخش ثابت خاک (S) در تمام جهات به جز سطح آزاد، مقید گردیده و یک طرف لوله ثابت شده است. شرایط مرزی در بخش متحرک (M) با پیچیدگی‌های خاصی همراه است و با یک اقدام ابتکاری جابه‌جایی گسل روی تمام گره‌های موجود به همراه انتهای لوله، در جهت‌های محوره‌های y و z اعمال شدند.

#### ۲-۲-۶- بارگذاری

از آنجایی که در مدل واقعی خاک - لوله، خاک همیشه نیروی ژئواستاتیک را تجربه می‌کند، بنابراین برای به‌کارگیری این حالت در مدل عددی، تحلیل در دو مرحله انجام گرفت، تحلیل نیروی ثقل و تحلیل حرکت گسل. روش صریح<sup>۲</sup> در حل هر دو مرحله<sup>۳</sup> به نتیجه بهتری می‌رسد، بنابراین برای هر دو مرحله از حل تحلیلی صریح<sup>۴</sup> استفاده شد. در گام اول

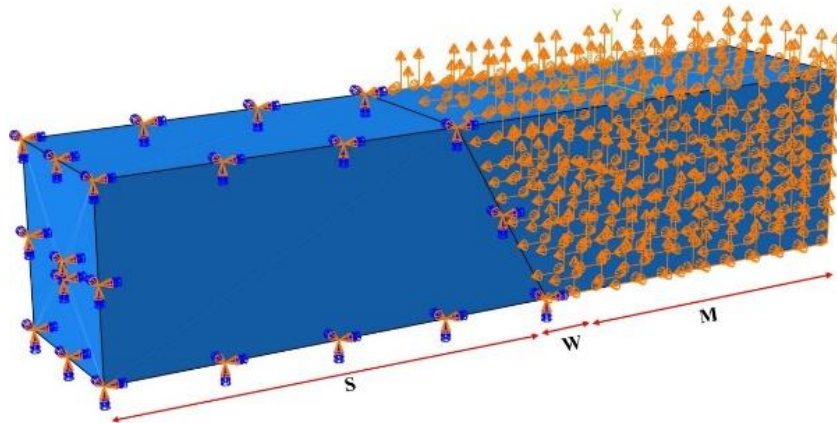
تأثیر حرکت گسل معکوس مورب، یک خط گسل کم عرض (W) و یک قطعه ثابت<sup>۱</sup> (S) که در شکل ۶ نشان داده شده است. در پژوهش‌های عددی سال‌های اخیر، یک شگرد رایج برای مدل کردن اندرکنش گسل-فونداسیون، اعمال حرکت گسل در یک منطقه باریک با عرض W است. بر پایه این دیدگاه می‌توان از ناپیوستگی خاک در منطقه گسل، که باعث بروز مشکلات عددی و ایجاد پرش در نمودار تنش می‌شود، جلوگیری کرد، همچنین این شگرد همخوانی بیشتری با نتایج آزمایشگاهی شبیه‌سازی گسل در مقیاس کوچک دارد. بررسی پارامتری توسط گواراسینو و همکارانش [۱۴] نشان داد که اندازه این عرض (W) تأثیری بر پاسخ لوله مدفون ندارد. در مقاله حاضر اندازه این ناحیه باریک ۰/۵ متر در نظر گرفته شده است. ارتباط بین خاک و لوله با تعریف سطح خارجی لوله به‌عنوان سطح اصلی و خاک به‌عنوان سطح پیرو، ارتباط سطح به سطح با ضریب اصطکاک ۰/۴۱ در آباکوس تعریف شد.

<sup>۲</sup> Abaqus/Explicit

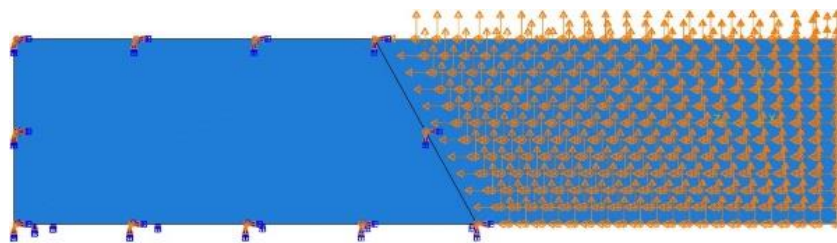
<sup>۳</sup> Step

<sup>۴</sup> Explicit

<sup>۱</sup> Station-Fix part



شکل ۶- مدل سه بخشی لوله و خاک تحت اثر گسل معکوس



شکل ۷- آرایش شرایط تکیه‌گاهی مدل خاک و لوله تحت گسل معکوس

تغییر داده شد و از آنجایی که با زمان ۱۰ ثانیه و بالاتر همچنان پاسخ لوله ثابت بود، لذا در سایر بارگذاری‌های این پژوهش از زمان ۱۰ ثانیه استفاده گردید.

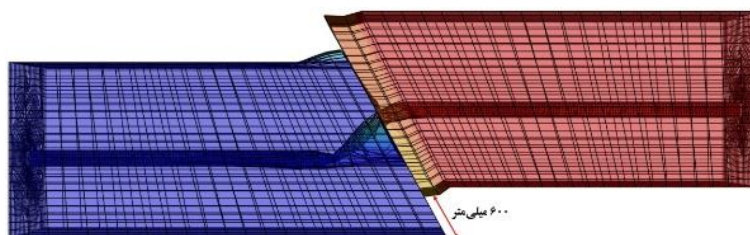
### ۲-۳- اعتبارسنجی

برای صحت‌سنجی مدل شبیه‌سازی شده، نتایج به دست آمده از آزمایش صورت گرفته توسط جلالی و همکاران [۴] که گسلش معکوس به اندازه ۶۰۰ میلی‌متر است، مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از تعریف مفهوم مسیر<sup>۳</sup> کرنش لوله در تمام جهات لوله محاسبه و استخراج گردید که مقایسه کرنش لگاریتمی تاج<sup>۴</sup> لوله برای هر دو مدل آزمایشگاهی و عددی در شکل ۹ قابل مشاهده است و نتیجه مقایسه قابل قبول بود. با نگاه به صحت مدل‌سازی انجام شده و اعتبار نتایج حاصله، می‌توان با تغییر ویژگی‌های لوله مدفون از جمله جنس به نتایج قابل اعتمادی دست یافت.

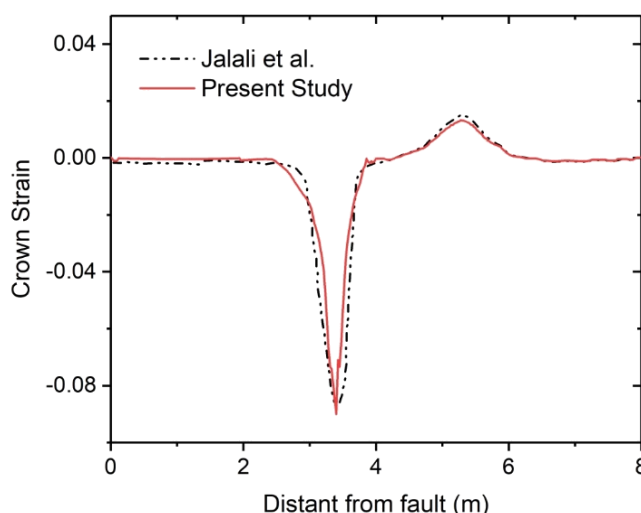
نیروی جاذبه بر مدل اعمال شد و در گام دوم حرکت گسل اعمال گردید. به دلیل کمناش موضعی (چروکیدگی) و تغییر شکل زیاد سطح مقطع لوله، روش حل به صورت غیرخطی و رفتار لوله و خاک، پلاستیک در نظر گرفته شده است. روش حل به دلیل ماهیت گسل به صورت شبه‌استاتیکی<sup>۱</sup> و به صورت گام نرم<sup>۲</sup> است، زیرا دیگر روش‌های اعمال جابه‌جایی منجر به پاسخ‌های غیردقیق و گاهی غیر همگرا می‌گردد. جابه‌جایی از طریق گره‌ها بر بلوک متحرک خاک و انتهای لوله اعمال شده است. از آنجایی که جابه‌جایی گسل معکوس ۶۰۰ میلی‌متر در نظر گرفته شد، لذا بیشینه جابه‌جایی در جهت افقی ۵۲۴ میلی‌متر و در جهت قائم ۲۹۰ میلی‌متر به صورت کنترل شده به قطعه متحرک اعمال گردید تا بتواند گسلش معکوس ۶۰۰ میلی‌متری در زاویه ۶۱ درجه را به دست دهد (شکل ۸). زمان بارگذاری و حرکت گسل از ۱ ثانیه تا ۲۰ ثانیه

<sup>3</sup> Path  
<sup>4</sup> Crown

<sup>1</sup> Quasi Static  
<sup>2</sup> Smooth Step



شکل ۸- بارگذاری و اعمال جابه‌جایی گسل معکوس بر روی مدل ساخته‌شده با زمان بارگذاری ۱۰ ثانیه



شکل ۹- مقایسه کرنش لگاریتمی تاج لوله مدل آزمایشگاهی [۴] و عددی از ابتدا تا انتهای طول لوله

لوله کامپوزیتی بر پایه تئوری شکست هاشین و مودهای چهارگانه آسیب صورت گرفت.

### ۳-۱- بررسی استحکام لوله فولادی تحت زوایای گوناگون گسل معکوس

با نگاه به آزمایش جلالی و همکاران [۴] و صحت‌سنجی انجام‌گرفته، اقدام به اندازه‌گیری حد استحکام لوله فولادی در برابر جابه‌جایی تحت گسل معکوس ۶۱ درجه تا لحظه تسلیم و آغاز بیضوی<sup>۲</sup> شدن گردید. استاندارد DNV-OS-F101<sup>۳</sup> حد مجاز بیضوی شدن خطوط لوله را ۳ درصد [۱۷] و اتحادیه خطوط لوله آمریکا<sup>۴</sup> بیشترین حد مجاز بیضوی شدن لوله‌های فلزی را ۱۵ درصد دانسته است [۱۸]. هدف از این مدل‌سازی محاسبه اندازه بیشینه جابه‌جایی مجازی بود که در آن لوله

### ۳- نتایج و بحث

در این پژوهش مطالعات برای گذر لوله فولادی از گسل معکوس با نسبت عمق دفن به قطر لوله  $\frac{H}{D} = 5/94$  و زاویه‌های ۴۵، ۶۱ و ۷۵ درجه انجام شده‌است. در تمام حالت‌ها از ویژگی‌های خاک و لوله فولادی برابر آزمایش جلالی و همکاران [۴] استفاده شده‌است. معیار تنش بحرانی لوله فولادی بر پایه معیار ون‌میسز و برابر تنش تسلیم فولاد API 5L Grade B و به اندازه ۲۴۱ مگاپاسکال در نظر گرفته شد [۴]. در ادامه، میزان استحکام لوله کامپوزیتی تحت گسلش معکوس در زوایای گوناگون بررسی و با رفتار لوله فولادی مقایسه گردید. برای مدل‌سازی لوله کامپوزیتی تک‌جهته<sup>۱</sup> از داده‌های مقاله پرلیو و همکاران [۱۵] و نحوه مدل‌سازی و محاسبه تنش بحرانی از مقاله ارژنگ پی و همکاران [۱۶] بهره‌برداری شده‌است. بررسی تنش بحرانی در

<sup>2</sup> Ovalization

<sup>3</sup> Det Norske Veritas rules and standards

<sup>4</sup> American Lifelines Alliance

<sup>1</sup> Unidirectional



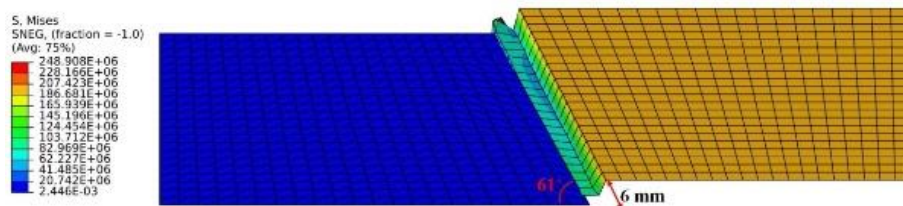
صورت گرفت. نتیجه این مدل‌سازی در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.

با مقایسه نتایج حاصل شده از مدل‌سازی لوله فولادی مدفون تحت گسلش معکوس با زاویه ۴۵ و ۶۱ درجه گویای این مطلب است که هرچه زاویه گسل کمتر شود (از ۶۱ درجه به ۴۵ درجه)، وضعیت لوله بحرانی‌تر و در جابه‌جایی کمتری از گسل، لوله به حد تسلیم می‌رسد. در شکل ۱۱ مشخص شد که با جابه‌جایی ۳/۵ میلی‌متری گسل، لوله به حالت تسلیم می‌رسد. در ادامه با تغییر زاویه گسل به ۷۵ درجه نتایج جدیدی حاصل گردید که در شکل ۱۲ قابل مشاهده است.

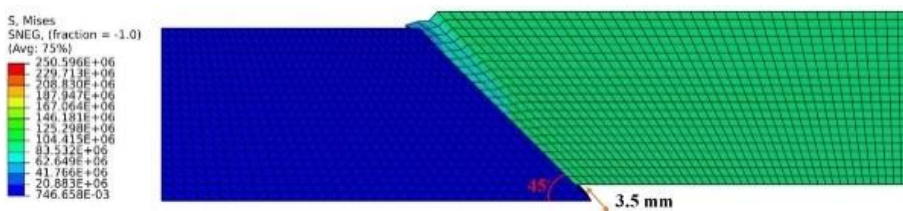
لوله فولادی مدفون مورد بررسی چنانچه تحت گسل معکوس با زاویه ۷۵ درجه قرار گیرد با جابه‌جایی ۶/۵ میلی‌متر به حد تسلیم می‌رسد که با نگاه به نتایج دو بررسی قبلی می‌توان چنین نتیجه‌گیری کرد که لوله‌های فولادی مدفون تحت گسل معکوس با زاویه‌های بزرگ‌تر (بالای ۶۰ درجه)، ایمن‌تر می‌باشند، به صورت کلی و با نگاه به شکل ۱۳

در آستانه تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گرفت. تنش حد الاستیک و ایمن لوله فولادی مورد بررسی (API 5L Grade B) برابر ۲۴۱ مگاپاسکال است. از این‌روی ویژگی‌های پلاستیک لوله فولادی در نرم‌افزار در نظر گرفته نشد و تنها خواص الاستیک فولاد تعریف گردید. بارگذاری روی مدل به صورت کنترل شده و جابه‌جایی تا لحظه‌ای که تنش در لوله به حد تسلیم می‌رسید (۲۴۱ مگاپاسکال) اعمال شد. نتیجه این مدل‌سازی در شکل ۱۰ قابل مشاهده است.

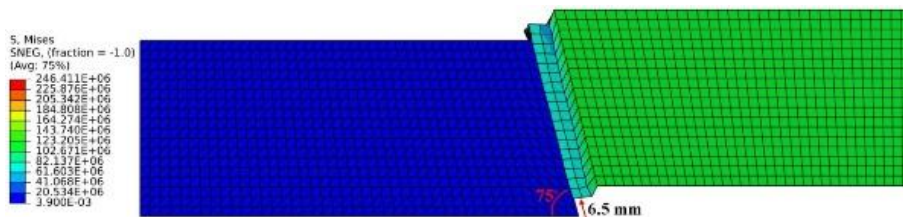
نتیجه به دست آمده به این معنا است که لوله فولادی مدفون مورد بررسی، چنانچه تحت گسل معکوس با زاویه ۶۱ درجه قرار بگیرد، با جابه‌جایی حدود ۶ میلی‌متر به تسلیم می‌رسد و از این لحظه به بعد با افزایش اندازه جابه‌جایی گسل، لوله فولادی از حد الاستیک خارج و لوله از لحاظ عملیاتی به دلیل بیضوی شدن، قابل بهره‌برداری نخواهد بود. برای بررسی بیشتر رفتار لوله فولادی تحت گسل معکوس با حفظ تمام ویژگی‌های مدل نسبت به حالت قبل، اقدام به تغییر زاویه گسل گردید و مدل‌سازی در زاویه ۴۵ درجه



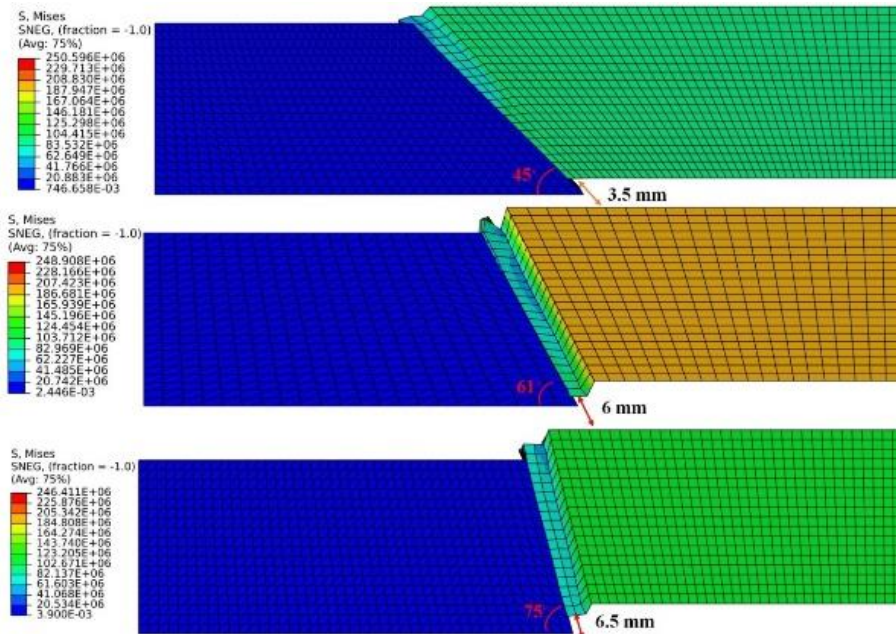
شکل ۱۰- لوله فولادی در آستانه تسلیم تحت گسل معکوس با جابه‌جایی ۶ میلی‌متر و زاویه ۶۱ درجه گسل



شکل ۱۱- لوله فولادی در آستانه تسلیم تحت گسل معکوس با جابه‌جایی ۳/۵ میلی‌متر و زاویه ۴۵ درجه گسل



شکل ۱۲- لوله فولادی در آستانه تسلیم تحت گسل معکوس با جابه‌جایی ۶/۵ میلی‌متر و زاویه ۷۵ درجه گسل



شکل ۱۳- مقایسه رفتار لحظه تسلیم لوله فولادی API 5L در سه زاویه گوناگون گسلش معکوس

چگالی، خواص الاستیک یک لوله کامپوزیتی به صورت ثوابت مهندسی<sup>۲</sup> وارد گردد. گفتنی است، مقادیر  $X_1$  و  $X_2$  به ترتیب برابر استحکام نهایی لوله کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه- اپوکسی تحت تنش کششی و فشاری است، همچنین  $Y_1=Z_1$  و  $Y_2=Z_2$  به ترتیب برابر استحکام نهایی ماتریس تحت تنش کششی و تنش فشاری است.

نحوه مدل سازی و لایه چینی لوله کامپوزیتی در نرم افزار بر پایه بررسی ارژنگ پی و همکاران [۱۶] و برابر جدول شماره ۵ در آباکوس، وارد گردید. ضخامت و هندسه لوله کامپوزیتی دقیقاً مشابه لوله فلزی در نظر گرفته شد تا امکان مقایسه میسر گردد. همچنین از آنجایی که روش تولید لوله به دلیل نیاز به سرعت بالا در ساخت، پالتروژن فرض شده است، جهت گیری الیاف در ماتریس به صورت طولی و در راستای طول لوله است؛ همچنین از قاعده انتگرال گیری سیمپسون<sup>۳</sup> در این بخش استفاده شده است.

استحکام مکانیکی لوله در جهت طول لوله به دلیل حضور الیاف تقویت کننده در این جهت، نسبت به سایر جهات

نتیجه گیری گردید که لوله فولادی تحت گسل معکوس در برابر تنش های فشاری از استحکام کمتری برخوردار است (نسبت به نیروی برشی و خمشی).

### ۳-۲- بررسی استحکام لوله کامپوزیتی GRE<sup>۱</sup> تحت گسلش معکوس

#### ۳-۲-۱- شبیه سازی لوله کامپوزیتی

برای مقایسه خواص مکانیکی و استحکام لوله کامپوزیتی در مقایسه با لوله فولادی در شرایط یکسان هندسی و بارگذاری، اقدام به مدل سازی لوله کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه- اپوکسی شد. از این روی از ویژگی های جدول ۴، لوله های کامپوزیتی الیاف شیشه- اپوکسی با فرض تک جهته بودن الیاف در راستای طولی و تولید شده به روش پالتروژن و با فرض خصوصیات ذکر شده در مقاله پیریلو و همکاران [۱۵]، استفاده گردید. فرآیند پالتروژن یکی از بهترین روش های تولید با سرعت بالای لوله های کامپوزیتی تک جهته با استفاده از رزین های ترموست است [۱۹ و ۲۰]. در بخش تعریف ویژگی های ماده، در نرم افزار بایستی افزون بر

<sup>۲</sup> Engineering Constants

<sup>۳</sup> Simpson Integration Rule

<sup>۱</sup> Glass reinforced epoxy (GRE)

معین گردید. در معیار هاشین، تخریب کششی و فشاری الیاف و همچنین تخریب کششی و فشاری ماتریس جداگانه بررسی می‌شوند. هرگاه اندازه مودهای تخریب به اندازه واحد (عدد ۱) رسیدند، تخریب در آن نقطه از ماده آغاز می‌گردد. معیار هاشین سه‌بعدی که در آن از معیارهای تنش بیشینه برای مؤلفه تنش نرمال و عرضی استفاده می‌شود، به صورت روابط ۲ تا ۵ بیان می‌شود [۲۱].

۱- شکست الیاف:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_T}\right)^2 + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = F_{ft} \begin{cases} \geq 1 \text{ failure} \\ < 1 \text{ no failure} \end{cases} \quad (2)$$

۲- کماتش و پیچ‌خوردگی الیاف:

$$\left(\frac{\sigma_{11}}{X_c}\right)^2 = F_{fc} \begin{cases} \geq 1 \text{ failure} \\ < 1 \text{ no failure} \end{cases} \quad (3)$$

۳- ترک‌خوردگی ماتریس:

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})}{Y_T^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = F_{mt} \begin{cases} \geq 1 \text{ failure} \\ < 1 \text{ no failure} \end{cases} \quad (4)$$

۴- شکست ماتریس تحت برش و فشار عرضی:

$$\left[ \left( \frac{Y_c}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] \left( \frac{\sigma_{22} + \sigma_{33}}{Y_c} \right) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{S_{12}^2} = F_{mc} \begin{cases} \geq 1 \text{ failure} \\ < 1 \text{ no failure} \end{cases} \quad (5)$$

شروع ناحیه پلاستیک لوله فولادی به‌عنوان مبنای حد تحمل لوله در برابر اندازه مجاز جابه‌جایی گسل انتخاب شد و همچنین در لوله کامپوزیتی آستانه خرابی و شکست به‌عنوان سنجه در برابر اندازه مجاز جابه‌جایی گسل، مفروض است. از این‌روی تنها ویژگی‌های الاستیک لوله کامپوزیتی در نرم‌افزار در نظر گرفته و تعریف شد. بارگذاری روی مدل به‌صورت کنترل شده و جابه‌جایی گسل تا لحظه‌ای که تنش در لوله به حد تسلیم و آغاز خرابی (یکی از مودهای آسیب در آستانه تخریب قرار گیرد) برسد، اعمال گردید. با محاسبه تنش‌های ایجاد شده بر روی لوله در راستای x,y,z برابر شکل ۵ و قرار دادن خروجی نرم‌افزار  $\sigma_{11} \sigma_{22} \sigma_{33} \sigma_{12} \sigma_{13} \sigma_{23}$  در روابط چهارگانه ۲ تا ۵ و محاسبه مودهای گوناگون تئوری هاشین، جابجایی و حرکت گسل تا لحظه‌ای ادامه یافت که اندازه یکی از مودها به عدد واحد نزدیک گردد.

بیشتر است. تنش حد الاستیک و ایمن لوله کامپوزیتی (آستانه خرابی) مورد بررسی بر پایه معیار شکست هاشین،

جدول ۴- ویژگی‌های لوله کامپوزیتی بر پایه مقاله پیریلو و همکاران [۱۵] با فرض الیاف تک جهته

| Value | Specifications of GRE Pipe                              |
|-------|---|
| ۶۲    | Fiber Volume Fraction (%)                               |
| ۱۲۳۰  | Density (kg/m <sup>3</sup> )                            |
| ۳۸/۶  | E <sub>۱</sub> (Gpa)                                    |
| ۱۱    | E <sub>r</sub> =E <sub>r</sub> (GPa)                    |
| ۳/۰۷  | G <sub>۱۲</sub> =G <sub>۱۳</sub> =G <sub>۲۳</sub> (GPa) |
| ۰/۳   | $\nu_{۱۲} = \nu_{۱۳}$                                   |
| ۰/۵   | $\nu_{۲۳}$  |
| ۴۱۴   | Strength X <sub>t</sub> (Mpa)                           |
| ۸۵۵   | Strength X <sub>c</sub> (Mpa)                           |
| ۳۹    | Y <sub>t</sub> =Z <sub>t</sub> (Mpa)                    |
| ۱۱۲   | Y <sub>c</sub> =Z <sub>c</sub> (Mpa)                    |
| ۴۲    | S <sub>۱۲</sub> =S <sub>۱۳</sub> =S <sub>۲۳</sub> (Mpa) |

جدول ۵- لایه‌چینی لوله کامپوزیتی تک جهته در نرم‌افزار

| Value  | Composite Pipe Layer   |
|--------|------------------------|
| ۰/۰۰۴۴ | Pipe Wall Thickness(m) |
| ۰      | Rotation angle (°)     |
| ۳      | Integration Points     |

جدول ۶- مقایسه وزنی لوله فلزی و کامپوزیتی مورد بررسی

| Weight (kg) | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | 6 Inch Pipe |
|-------------|------------------------------|-------------|
| ۲۲          | ۱۲۳۰                         | GRE Pipe    |
| ۱۴۱         | ۷۸۰۰                         | Steel Pipe  |

### ۳-۲-۲- بررسی استحکام لوله کامپوزیتی تحت زوایای گوناگون گسل معکوس

در ابتدا جهت محاسبه اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسل، قبل از خرابی لوله کامپوزیتی تحت گسلش معکوس و مقایسه آن با لوله فولادی، با اعمال جابه‌جایی کنترل شده و به اندازه ۲۵ میلی‌متر، لوله الیاف شیشه- اپوکسی تحت گسلش معکوس با زاویه ۶۱ درجه در آستانه تخریب قرار گرفت و با نگاه به  $F_{mt}$  (ترک‌خوردگی ماتریس) که برابر ۰/۹۳۱ محاسبه شد، نتیجه‌گیری می‌شود که لوله در آستانه تخریب مود III (ترک‌خوردگی ماتریس تحت بار کششی و برشی) قرار گرفته‌است. شکل ۱۴ مدل خاک و لوله با گسلش معکوس با زاویه ۶۱ درجه را نشان می‌دهد.

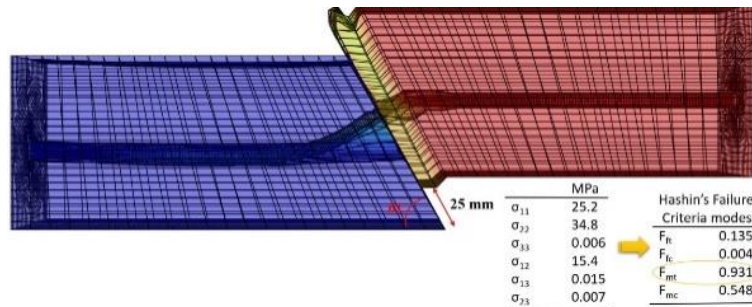
برای بررسی بیشتر رفتار لوله‌های کامپوزیتی تک‌جهته تحت گسلش معکوس با تغییر زاویه گسل از ۶۱ به ۴۵ درجه، معادلات هاشین دوباره با شرایط جدید محاسبه گردید. نتیجه این مدل‌سازی در شکل ۱۵ قابل مشاهده است. با اعمال جابه‌جایی کنترل شده و به اندازه ۴۵ میلی‌متر، لوله کامپوزیتی مفروض تحت گسلش معکوس با زاویه ۴۵

درجه در آستانه تخریب قرار گرفت و با نگاه به اندازه به‌دست‌آمده  $F_{ft}$  و  $F_{mc}$ ، نتیجه‌گیری شد که لوله در آستانه تخریب مود I (شکست الیاف) و مود IV (شکست ماتریس تحت برش و فشار عرضی) قرار گرفته‌است. در ادامه با تغییر زاویه گسل به ۷۵ درجه، نتایج جدیدی حاصل شد که در شکل ۱۶ مشاهده می‌گردد.

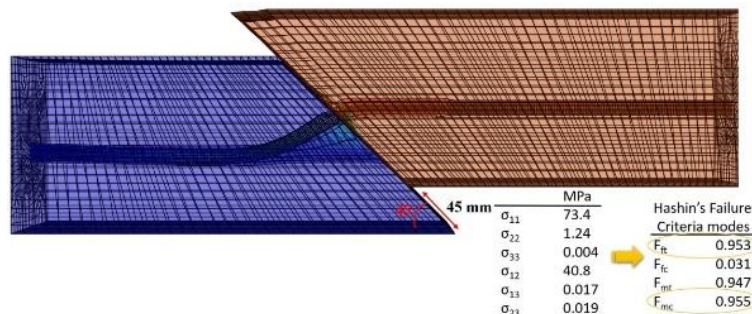
با اعمال جابه‌جایی کنترل شده و به اندازه ۱۱ میلی‌متر، لوله الیاف شیشه- اپوکسی تحت گسل معکوس با زاویه ۷۵ درجه در آستانه تخریب قرار گرفت و با نگاه به اندازه  $F_{mt}$  که برابر ۰/۹۷۳ محاسبه شد، نتیجه گرفته شد که لوله در آستانه تخریب مود III (ترک‌خوردگی ماتریس تحت بار کششی و برشی) قرار گرفته‌است.

### ۳-۳- مقایسه استحکام لوله کامپوزیتی نسبت به لوله فولادی تحت گسلش معکوس

از آنجایی‌که هدف اصلی این پژوهش محاسبه اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسل، قبل از خرابی لوله کامپوزیتی تحت



شکل ۱۴- لوله کامپوزیتی در آستانه آسیب مود III تحت گسلش معکوس و زاویه ۶۱ درجه گسل



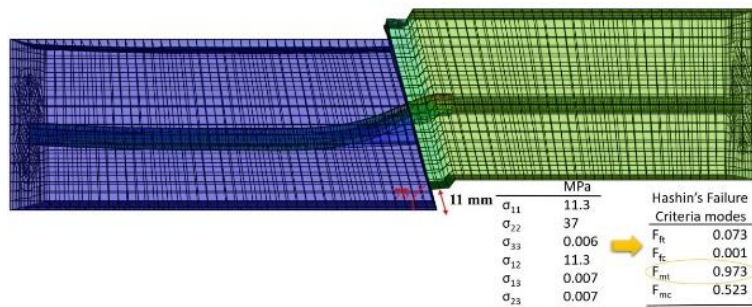
شکل ۱۵- لوله کامپوزیتی در آستانه آسیب مود I و IV تحت گسلش معکوس و زاویه ۴۵ درجه گسل

شرایط نیز همچون گسل ۴۵ درجه، لوله کامپوزیتی توانایی تحمل گسلش تا جابه‌جایی ۲۵ میلی‌متر را داشت و این در صورتی است که لوله فولادی در گسل معکوس با زاویه ۶۱ درجه، تنها ۶ میلی‌متر جابه‌جایی را تحمل کرد. نتایج بررسی یادشده در شکل ۱۸ قابل مشاهده است.

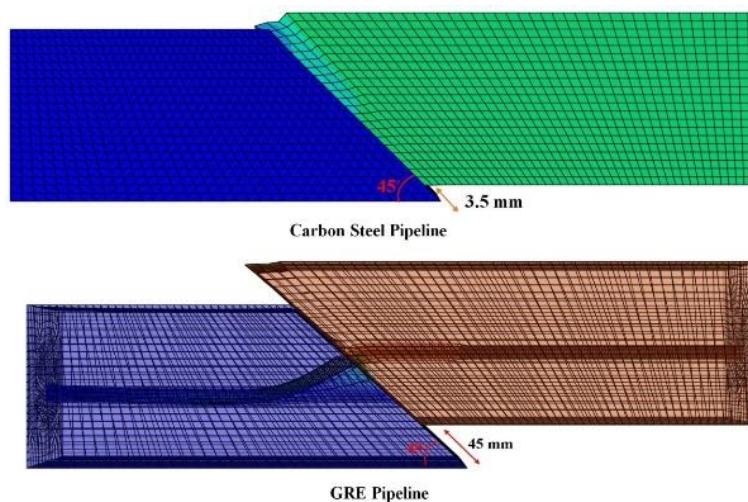
اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسل برای لوله کامپوزیتی بیش از ۳۰۰ درصد بالاتر از نمونه فولادی، محاسبه شد و دوباره برتری آشکار لوله کامپوزیتی نسبت به فولادی به اثبات رسید. در نمونه سوم لوله مدفون در معرض گسل معکوس و زاویه ۷۵ درجه، مورد بررسی قرار گرفته است، همان‌گونه که در شکل ۱۹ قابل مشاهده است، توانایی تحمل گسلش در کامپوزیت تا ۱۱ میلی‌متر و برای لوله فولادی ۶/۵ میلی‌متر به‌دست‌آمده است. اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسل برای لوله کامپوزیتی حدود ۷۰ درصد بالاتر از نمونه فولادی محاسبه شد.

گسلش معکوس و مقایسه آن با لوله فولادی مدفون در خاک می‌باشد، به بررسی و مقایسه مورد به مورد لوله فولادی و کامپوزیتی در شرایط مدل‌سازی یکسان پرداخته شد. در اولین بررسی، گسل معکوس با زاویه ۴۵ درجه مورد بررسی قرار گرفت. همان‌گونه که در شکل ۱۷ قابل مشاهده است، سطح مقطع لوله کامپوزیتی تا جابه‌جایی ۴۵ میلی‌متری گسل، در حالت الاستیک و با مقطع دایروی باقی ماند و این در صورتی است که جابه‌جایی مجاز گسل برای لوله فولادی تنها ۳/۵ میلی‌متر بود و پس از آن لوله تسلیم گردید. نسبت جابه‌جایی مجاز گسل برای لوله کامپوزیتی به فولادی بیش از ۱۱۰۰ درصد محاسبه شد که این عدد نشان از استحکام بالای مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف شیشه- اپوکسی نسبت به فولاد دارد.

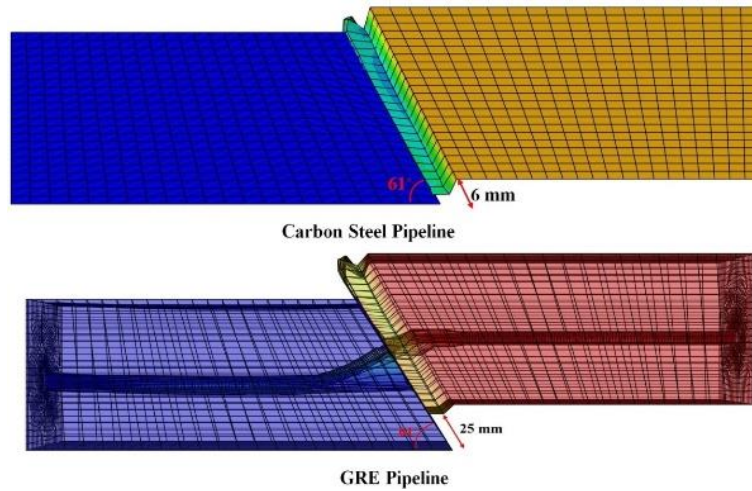
در بررسی دوم، گسل معکوس با زاویه ۶۱ درجه برای هر دو لوله در شرایط یکسان مورد بررسی قرار گرفت، در این



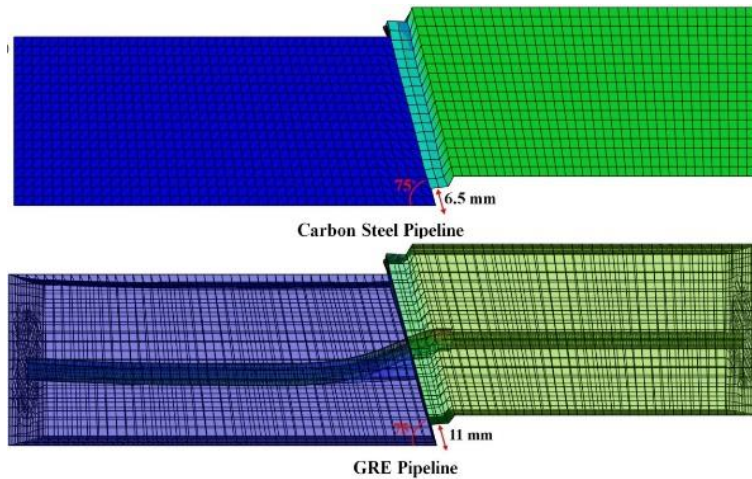
شکل ۱۶- لوله کامپوزیتی در آستانه آسیب مود III تحت گسلش معکوس و زاویه ۷۵ درجه گسل



شکل ۱۷- مقایسه استحکام لوله کامپوزیتی نسبت به لوله فولادی تحت گسلش معکوس ۴۵ درجه گسل



شکل ۱۸- مقایسه استحکام لوله کامپوزیتی نسبت به لوله فولادی تحت گسلش معکوس ۶۱ درجه گسل



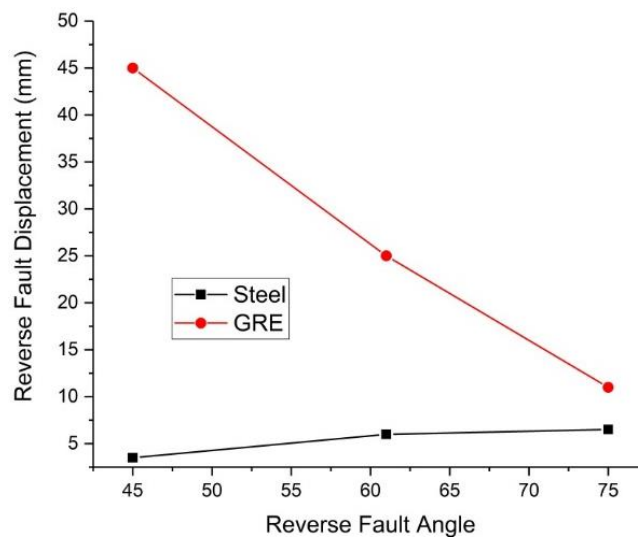
شکل ۱۹- مقایسه استحکام لوله کامپوزیتی نسبت به لوله فولادی تحت گسلش معکوس ۷۵ درجه گسل

بیشتری را تحمل می‌کند. با نگاه به نتایج ذکر شده در جدول ۷ هرچه زاویه گسل معکوس بزرگتر شود و به حالت قائم (۹۰ درجه) نزدیک گردد، اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسل برای لوله کامپوزیتی و لوله فولادی به یکدیگر نزدیک می‌گردند. به‌طور کلی در گسل‌های معکوس حتی در بحرانی‌ترین حالت (گسل‌های با زاویه بالای ۷۵ درجه برای کامپوزیت‌ها) نسبت جابه‌جایی مجاز گسل برای لوله کامپوزیتی به فولادی حدود ۷۰ درصد بیشتر است که این عدد نشان از استحکام مکانیکی بالای کامپوزیت‌های الیاف شیشه-اپوکسی نسبت به فولاد دارد (شکل ۲۰).

با نگاه به جدول ۷ چنین نتیجه‌گیری شد که در گسلش معکوس غالباً نیروی فشاری عامل تسلیم لوله مدفون خواهد بود و از این‌روی در زوایای کوچک گسل (کمتر از ۶۱ درجه) که نیروی فشاری در جهت طول لوله بیشینه است، استحکام لوله فولادی در کمترین حالت قرار خواهد گرفت و در جابه‌جایی کوچک‌تر گسل، لوله به نقطه تسلیم می‌رسد؛ اما در لوله‌های کامپوزیتی الیاف شیشه-اپوکسی به دلیل وجود الیاف تقویت‌کننده در راستای طولی لوله، هرگاه زاویه گسل کوچک باشد، لوله تحت بار فشاری در راستای طول قرار می‌گیرد که به دلیل حضور الیاف در همین راستا، استحکام لوله بیشینه است و نسبت به حالت‌های دیگر، جابه‌جایی

جدول ۷- مقایسه اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسلش معکوس در زوایای گوناگون گسل (شروع پلاستیسیته در فولاد و شروع خرابی در کامپوزیت‌ها)

| GRE Pipe | Carbon Steel Pipe | maximum allowable displacement of Buried Pipelines |
|----------|-------------------|--|
| ۴۵ mm    | ۳/۵ mm            | گسل معکوس ۴۵ درجه                                  |
| ۲۵ mm    | ۶ mm              | گسل معکوس ۶۱ درجه                                  |
| ۱۱ mm    | ۶/۵ mm            | گسل معکوس ۷۵ درجه                                  |



شکل ۲۰- مقایسه اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسلش معکوس در زوایای گوناگون، برای لوله کامپوزیتی و لوله فولادی

و (۷۵°) انجام گرفت. نتایج مقایسه استحکام لوله فولادی با نسبت عمق دفن به قطر لوله  $H/D=5/94$  در برابر لوله کامپوزیتی تحت گسلش معکوس به صورت خلاصه در زیر بیان می‌شود.

۱. در گسلش معکوس غالباً نیروی فشاری عامل تسلیم لوله‌های مدفون خواهد بود.
۲. برای بهره‌برداری ایمن از لوله مدفون بایستی لوله‌های فولادی در زوایای بالای ۶۱ درجه گسلش معکوس و لوله‌های کامپوزیتی تک جهته در زوایای کوچکتر از ۶۱ درجه به کار گرفته شوند.
۳. اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسل معکوس در زوایای گوناگون گسل، برای لوله کامپوزیتی تک جهته الیاف شیشه- اپوکسی دست کم ۷۰ درصد بیشتر از نمونه فولادی است.

گفتنی است که لوله کامپوزیتی مورد بررسی از نوع تک جهته بوده و الیاف تقویت‌کننده در راستای طولی لوله قرار گرفته‌اند و از این‌روی لوله‌های کامپوزیتی تحت بار کششی و فشاری، برتری آشکار نسبت به لوله‌های فولادی دارند.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر با استفاده از نرم‌افزار آباکوس لوله کامپوزیتی مورد استفاده در انتقال نفت تحت گسلش معکوس مدل‌سازی و استحکام مکانیکی آن با لوله فولادی مقایسه گردیده است. در قدم اول، اندازه بیشینه جابه‌جایی مجاز گسل، قبل از تسلیم لوله فولادی محاسبه و سپس با اندازه تحمل لوله کامپوزیتی GRE در زاویه ۶۱ درجه گسل و در شرایط یکسان، مقایسه گردیده است. در ادامه، مقایسه رفتار مکانیکی لوله کامپوزیتی و فولادی برای سایر زوایای گسل معکوس (۴۵°)

reverse fault. In Persian. Modares Civil Engineering Journal 17(2): 67-80.

- [11] Soveiti S, Mosalmani R (2020) Mechanical behavior of buried composite pipelines subjected to strike-slip fault movement. Soil dyn earthq eng 135: 106195.
- [12] Ramberg W, Osgood W (1943) Description of stress-strain curves by three parameters. National Advisory Committee for Aeronautics.
- [13] Davis H (1964) The testing and inspection of engineering materials. 3rd edn. Hill series in civil engineering Book McGraw Hill.
- [14] Guarracino F, Walker A (2009) Effects of boundary conditions on testing of pipes and finite element modelling. Int J Pres Ves Pip 86(2):196-206.
- [15] Perillo G, Vedivik, N Echtermeyer (2015) Numerical and experimental investigation of impact on filament wound glass reinforced epoxy pipe. J Compos Mater 49(6).
- [16] Arjangpay A, Darvizeh A, Yarmohammad Tooski, Ansari R (2016) Modeling damage evolution of composite laminates under low velocity off-center impact. In Persian. J Sci Technol Compos 3(3): 243-252.
- [17] Ju Ming, Xiaodong Xing, Liquan Wang, Feihong Yun, Xiangyu Wang, Hongqian Liao (2021) Numerical Simulations and Experimental Study on the Reeling Process of Submarine Pipeline by R-Lay Method. J Mar Sci Eng 9(6-579).
- [18] Dadfar Behrang, El Nagggar, Hesahm M, Nastev Miroslav (2015) Ovalization of steel energy pipelines buried in saturated sands during ground deformations. Comput Geotech 69: 10-1016.
- [19] Vedernikov A, Safonov A, Tucci F, Carlone P, Akhatov I (2020) Pultruded materials and structures: A review. J Compos Mater 54(26): 4081-4117.
- [20] Gopanna A, Prasad Rajan k, Thomas S, Chavali M (2019) Materials for biomedical engineering: thermoset and thermoplastic polymers book.
- [21] Shahrooz M, Saboktakin A (2020) Progressive damage analysis of plain woven composites under tensile loading. in Persian. J Sci Technol Compos 6(4): 609-614.

## ۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان مراتب تشکر صمیمانه خود را از حمایت معنوی شرکت خطوط لوله و مخابرات نفت ایران برای گشودن مسیری جهت ارتباط دانشگاه با صنعت اعلام می کنند.

## ۶- مراجع

- [1] Rafiee R (2013) Experimental and theoretical investigations on the failure of filament wound GRP pipes. Compos part B-eng 45.
- [2] Mahdavi H, Sherbaf R (1394) Analysis of behavior of composite pipes under internal cyclic pressure and external pressure. In Persian. MSc Thesis. Tarbiat Modares University (TMU).
- [3] Mokhtari M, Alavi Nia A (2015) The influence of using CFRP wraps on performance of buried steel pipelines under permanent ground deformations. Soil dyn earthq eng 73.
- [4] Jalali H, Rofooei R (2016) Experimental and finite element study of the reverse faulting effects on buried continuous steel gas pipelines. Soil dyn earthq eng 86.
- [5] Tan K, M Kwong Ming (2015) Finite element modeling of buried glass-reinforced composite pipe. In 10th International Conference on key eng mater -ICCST/10.
- [6] Giannaros E, Kotzakolios T (2015) Blast response of composite pipeline structure using finite element techniques. J compos mater 50(25).
- [7] Nazira Z, Abdul Majid MS (2015) Performance Simulation of Glass Fibre/Epoxy Composite Pipes Under Multiaxial Stress Loading. Appl mech mater 695.
- [8] Almahakeri M, Amir Fam, Ian D Moore (2013) Longitudinal Bending and Failure of GFRP Pipes Buried in Dense Sand under Relative Ground Movement. J compos constr 17(5).
- [9] Monshizadeh A, Houseinia ES (2017) Three-Dimensional Finite Element Simulation of Buried Pipelines Subjected to Reverse Fault Motions. In Persian. Earthquake Science and Engineering 4(3): 49-66.
- [10] Hajnorouzi MM, Tahghighi H (2017) Finite element analysis of buried pipelines crossing