



Research Article



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2041804.1972



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

A Novel Approach in Protecting Steel Pipelines against Explosions Using FRP

Mohammad Tabiee¹, Alireza Khaloo^{2*}

¹ Ph.D. student of department of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

² Professor of department of civil engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

Received: 23 Jul 2024 Accepted: 10 Nov 2024

Abstract

The expansion of pipeline transmission networks has increasingly highlighted the importance of protecting them against hazards, particularly blasts. The application of Fiber Reinforced Polymers (FRP) is one of the most suitable approaches to achieving this objective. This study presents the analytical relationships governing the behavior of FRP-reinforced pipelines under blasts, evaluating the protective effectiveness of FRP in steel pipelines under various conditions through the analysis of a case study. The results demonstrate that the application of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) can be particularly effective for protecting thin-walled pipes with shallow burial depths in hard soils, which are more vulnerable to blasts. Furthermore, FRP material thickness significantly impacts the resistance of the pipelines to blasts. In certain cases, adopting an appropriate value can enhance the pipeline blast resistance more than 2.5 times compared to the initial value.

Keyword: Pipeline, FRP, Composite Materials, Reinforcement, Blast Loading.

* khaloo@sharif.edu

Please Cite This Article Using:

Khaloo, A., Tabiee, M., "A Novel Approach in Protecting Steel Pipelines against Explosions Using FRP", Journal of Farayandno – Vol. 19 – No. 87, pp. 21-42, In Persian, (2024).



DOI: 10.22034/farayandno.2025.2041804.1972



This journal is an open access journal licensed under an Attribution-Non Commercial 4.0 International Licenses (CC BY-NC 4.0).

روشی نوین جهت حفاظت خطوط لوله فولادی در برابر انفجار با استفاده از FRP

محمد طبیعی¹، علیرضا خالو^{2*}

¹ دانشجوی دکتری مهندسی سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

² عضو هیأت علمی گروه سازه و زلزله، استاد ممتاز، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

دریافت: 1403/05/02 پذیرش: 1403/08/20

چکیده

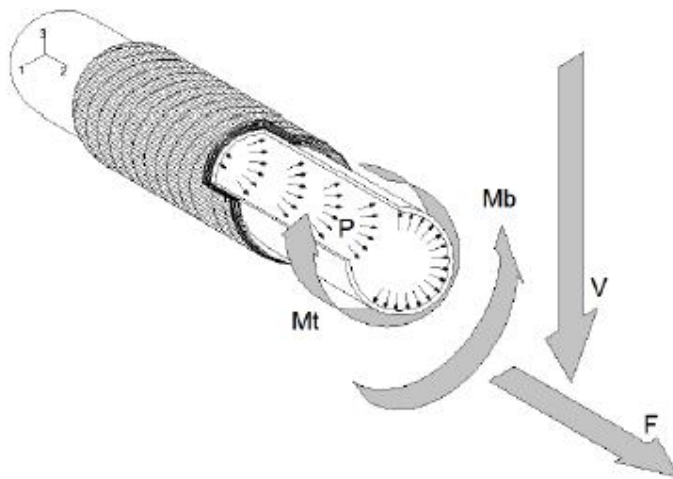
با توسعه شبکه خطوط لوله انتقال، حفاظت از آن در برابر خطرات، خصوصاً پدیده انفجار، بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. از مناسبترین راهکارها برای تحقق این موضوع، استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف (FRP) است. در این پژوهش ضمن ارائه روابط تحلیلی حاکم بر رفتار خطوط لوله تقویت شده با FRP تحت انفجار، با بررسی یک نمونه موردی، کیفیت حفاظت از خطوط لوله فولادی توسط FRP در شرایط گوناگون ارزیابی شده است. بر اساس نتایج حاصل، به کارگیری الیاف کربنی FRP (CFRP) بالاخص برای حفاظت از لوله‌های جدار نازک و با عمق دفن اندک در خاک‌های سخت که در برابر انفجار آسیب‌پذیرتر هستند، می‌تواند کارآمد باشد. همچنین مقدار ضخامت مصالح FRP، تأثیر بسزایی در افزایش مقاومت خط لوله در برابر انفجار داشته و اتخاذ مقداری مناسب برای آن می‌تواند در مواردی مقاومت خط لوله را به بیش از $2/5$ برابر مقدار اولیه ارتقا دهد. کلمات کلیدی: خط لوله، FRP، مصالح کامپوزیتی، مقاوم‌سازی، بارگذاری انفجاری.

* khaloo@sharif.edu

1- مقدمه

خطوط لوله کاربرد گسترده‌ای در انتقال گازها و مایعاتی همچون محصولات نفتی، آب و فاضلاب دارد و از این رو فراهم آوردن ایمنی لازم برای سازه خطوط لوله در کلیه کشورها از اهمیتی راهبردی برخوردار است. در کنار کاربرد گسترده و اهمیت قابل توجه خطوط لوله، خطرات و آسیب‌های متعددی سلامت این سازه‌ها را در طول عمر مفیدشان تهدید می‌کند که از جمله آن‌ها می‌توان به وارد آمدن بار انفجاری به بدنه لوله‌ها اشاره کرد. عوامل مختلفی در شکل‌گیری بارگذاری انفجاری در خطوط لوله نقش ایفا می‌کنند. از جمله این عوامل می‌توان به انجام عملیات‌های نظامی، انجام عملیات‌های تروریستی یا خرابکارانه، انجام عملیات‌های عمرانی، حفاری با انفجار و انفجار به علت ترکیدگی لوله ناشی از نقص یا فرسودگی اشاره کرد [1].

در دهه‌های اخیر استفاده از مصالح کامپوزیتی (FRPs) به منظور مقاوم‌سازی سازه‌ها و به‌طور خاص تقویت خطوط لوله رواج قابل توجهی یافته که علت آن ناشی از مزایای این روش در قیاس با راهکارهای سنتی است [2-3]. الیاف به‌کار رفته در این مصالح کامپوزیتی غالباً از جنس کربن (CFRP)، شیشه (GFRP)، آرامید (AFRP) و بازالت (BFRP) است که همراه با رزین به صورت نمایش داده شده در شکل 1 محیط لوله را پوشش می‌دهد. پیش از این از مصالح FRP عمدتاً به منظور ترمیم بخش‌های دارای سایش و خوردگی یا تقویت درزها و اتصالات خط لوله استفاده می‌شد [2، 4-5] اما در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی امکان به‌کارگیری این مصالح را در افزایش مقاومت سازه به جهت تحمل بارگذاری‌های غیر قابل پیش‌بینی همچون انفجار به اثبات رسانده‌اند که در ادامه به مرور گزیده‌ای از این پژوهش‌ها پرداخته می‌شود.



شکل 1- نمایش لوله تقویت شده با مصالح FRP و بارهای وارد بر آن [2]

مطالعاتی که در گذشته به بررسی اثر FRP در مقاوم‌سازی خطوط لوله در برابر انفجار پرداخته‌اند عمدتاً به صورت عددی بوده [1، 6-11] و بعضاً تحقیقات آزمایشگاهی نیز در این حوزه انجام گرفته است [3، 12]. گفتنی است که پژوهش‌های عددی و آزمایشگاهی غالباً با هدف امکان‌سنجی کاربرد الیاف FRP در خطوط لوله تحت بارگذاری انفجاری انجام گرفته و نقص اساسی آن‌ها عدم ارائه روابط و دستورالعمل‌های موردنیاز جهت انجام محاسبات لازم برای مراحل طراحی و اجرا است. علیرغم آن که مطالعه‌ای به صورت تحلیلی کاربرد الیاف FRP را در تقویت خطوط

لوله تحت بارگذاری انفجاری مورد بررسی قرار نداده با این وجود از گذشته پژوهش‌هایی منحصرأ بدنه خطوط لوله را تحت این بارگذاری مورد تحقیق قرار داده‌اند که در ادامه به آن‌ها اشاره می‌گردد.

کورتزیس¹ و همکاران [13] در طی تحقیق خود در سال 2007، کرنش‌های به وجود آمده از موج‌های P و رایله² ناشی از انفجار را به روش تحلیلی تعیین کردند. در این پژوهش، خط لوله به صورت یک پوسته سه بعدی استوانه‌ای شکل با ضخامت کم در نظر گرفته شده و از لحاظ اثر اندرکنش خاک و سازه صرف نظر شده است. همچنین به منظور تدوین روابطی کاربردی برای طراحان، مقدار بیشینه کرنش‌ها و محل آن‌ها نیز در طول خط لوله محاسبه و ارائه شده است. در نهایت به منظور صحت‌سنجی روابط استخراج شده، یک مدل عددی سه بعدی نیز بنا شده و نتایج تحلیلی و عددی با یکدیگر مقایسه گشته‌اند که نشان‌دهنده دقت قابل قبول معادلات پیشنهادی است.

در سال 2010 نورزاده و همکاران [14] در قالب یک پژوهش تحلیلی، پاسخ خط لوله مدفون را تحت بارگذاری انفجاری در زیر زمین تعیین نمودند. در این تحقیق خط لوله به صورت یک تیر بی‌نهایت³ بر روی یک بستر الاستیک⁴ شبیه‌سازی شده و بار انفجاری به صورت تابعی از زمان در نقطه‌ای دلخواه از تیر تعریف گشته بود. با اتکا بر این مفروضات، معادله حاکم بر پاسخ تیر تحت بارگذاری انفجاری استخراج و مؤلفه‌های اساسی پاسخ خط لوله اعم از تابع تغییرشکل، لنگر، تنش و کرنش در طول خط لوله حاصل گردید.

ون⁵ و همکاران [15] نیز در سال 2014 به بررسی تحلیلی لوله‌های چندلایه تحت بارگذاری انفجاری پرداختند. در این تحقیق با در نظر گرفتن خواص لایه‌ها، اثرات ناشی از تماس آن‌ها و به کمک معادلات لیم⁶ برای سطح استوانه‌ای جدار ضخیم، معادلات تحلیلی برای توزیع تنش در محل تماس لایه‌ها ارائه شده و سپس نتایج حاصل با مطالعات عددی و تجربی هماهنگ‌سازی یا اصطلاحاً کالیبره و صحت‌سنجی شده است.

در راستای تکمیل و کاربردی‌تر نمودن پژوهش نورزاده و همکاران [14]، عابدی و همکاران در سال 2016 [16]، پاسخ خط لوله مدفون را تحت انفجار، این بار با مدل‌سازی یک تیر با طول محدود و تحت یک بار پیوسته انفجاری به صورت تحلیلی تعیین نمودند. گفتنی است که در این مطالعه اثرات جرم نیز در معادله رفتاری خط لوله دیده شده است.

پاولو⁷ و کوریا⁸ در سال 2019 [17] به بررسی پاسخ دینامیکی لوله‌ها تحت بارهای شوک از جمله انفجار پرداخته‌اند. در این تحقیق یک پاسخ دقیق با استفاده از معادلات دیفرانسیل جزئی کوپل شده پیشنهاد شده است. در این مطالعه همچنین از تبدیل‌های دوگانه انتگرالی استفاده شده و تبدیل‌های فوریه سینوسی محدود و معکوس تبدیل لاپلاس برای تحلیل رفتار لوله‌ها تحت بارهای شوک هارمونیک به کار رفته است. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده کارآمدی رویکرد پیشنهادی در مدل‌سازی دقیق پاسخ لوله‌ها است.

¹ Kouretzis

² Rayleigh

³ Infinite beam

⁴ Elastic foundation

⁵ Won

⁶ Lamé's equation

⁷ Pavlou

⁸ Correia

تیان و همکاران در سال 2019 [18]، پاسخ‌های دینامیکی بلندمدت لوله‌ها تحت بارهای ضربه‌ای را هم به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت تحلیلی به کمک مدل تیر اویلر-برنولی و سری‌های فوریه مورد مطالعه قرار دادند. سنسورهای پیزوسرامیکی برای نظارت بر نیروهای ضربه‌ای و شتاب لوله‌ها در فرآیند آزمایش به کار رفته است. در این مطالعه، تأثیر پارامترهایی مانند ضخامت دیواره، قطر، عمق دفن و انرژی ضربه‌ای بر شتاب مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش، شبیه‌سازی‌های غیرخطی المان محدود با نتایج تجربی همخوانی داشته و نشان داد که حداکثر شتاب بدنه خط لوله با افزایش انرژی ضربه افزایش می‌یابد، در حالی که افزایش عمق دفن منجر به کاهش شتاب می‌گردد. کاکائی و حاجی‌عزیزی در سال 2021 [9] به مطالعه بر روی لوله API-X65 تحت انفجار 10 کیلوگرمی TNT پرداختند و نشان دادند که الیاف GFRP می‌تواند حداکثر کرنش معادل، تغییر شکل عرضی، کرنش طولی و انرژی انفجار را به ترتیب 35/3، 29/6، 13 و 63 درصد کاهش دهد و حفاظت مؤثری فراهم کند.

شیان⁹ و همکاران [19] در سال 2021، پژوهشی جامع جهت مطالعه تحلیلی رفتار لوله‌های قطور انعطاف‌پذیر تحت اثر بار انفجار انجام دادند. کلیت فرآیند طی شده در این پژوهش نیز مشابه تحقیقات قبل، متکی بر مدل‌سازی خطوط لوله به صورت یک تیر قرار گرفته بر روی یک بستر الاستیک است. با این حال در این مطالعه اولاً از تیر تیموشنکو¹⁰ به طول نامحدود جهت مدل‌سازی خط لوله استفاده شده و ثانیاً با انجام مطالعات عددی در برنامه‌های LS-DYNA و ANSYS در کنار آزمایش‌های تجربی، مشخصات بستر وینکلر¹¹ با استفاده از نتایج به دست آمده برای مدل‌سازی دقیق اندرکنش خاک و لوله هماهنگ‌سازی یا اصطلاحاً کالیبره شده است.

چادهوری¹² و چودهوری¹³ [20] در پژوهشی در سال 2022 به مطالعه لوله‌های مدفون تحت اثر انفجار پرداختند و روابط تحلیلی را در این راستا ارائه دادند. تیر به کار رفته در این مطالعه نیز از نوع اویلر-برنولی¹⁴ و بستر از نوع ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده است. همچنین فشار خاک بر روی لوله در کنار برش میان فنرهای وینکلر نیز در توسعه معادلات لحاظ شده است. در انتها، نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از یک آزمایش تجربی و مدل‌سازی‌های عددی جهت صحت‌سنجی مقایسه شده است. همچنین یک مطالعه پارامتری بر روی میزان اثر متغیرهایی چون وزن تی‌ان‌تی، فاصله تا محل انفجار، ضریب میرایی و سختی خمشی بر روی پاسخ خط لوله انجام شد. ضمناً روابط به دست آمده در این پژوهش، تخمین خوبی در مراحل اولیه طراحی برای مهندسان فراهم می‌آورد. لازم به ذکر است که مبنای راهبرد تحلیلی به کار گرفته شده در مطالعه حاضر نیز الگو گرفته از نتایج و دستاوردهای همین پژوهش است. صالحی و همکاران در سال 2022 [21]، آسیب‌پذیری لوله‌های فولادی گاز شهری در برابر انفجار را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق، با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی در نرم‌افزار ABAQUS، عوامل مؤثر بر رفتار لوله تحلیل شد. نتایج بیانگر این است که عمق دفن مناسب و استفاده از خاک ماسه‌ای نرم به طور قابل توجهی آسیب‌پذیری لوله‌ها را کاهش یافته و رفتار بهتری در برابر انفجار نشان می‌دهد.

⁹ Xia¹⁰ Timoshenko beam¹¹ Winkler Foundation¹² Chaudhuri¹³ Choudhury¹⁴ Euler-Bernoulli

چادهوری و چودهوری در سال 2023 [22] به بررسی شکست شبکه‌های لوله‌کشی به دلیل بارهای انفجاری ناشی از حملات تروریستی یا فعالیت‌های ساختمانی پرداختند. در این مطالعه یک پاسخ تحلیلی برای لوله مدفون دارای سیستم حفاظتی در برابر انفجار زیرسطحی، با استفاده از مدل خاک ویسکوالاستیک و فنرهای وینکلر¹⁵ استخراج شد. همچنین در قالب یک مطالعه پارامتری، تأثیر وزن TNT، جنس لوله، نسبت میرایی و موقعیت TNT بر پاسخ لوله مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که میزان جابه‌جایی حداکثر با افزایش وزن TNT افزایش و با افزایش مقدار نسبت میرایی و فاصله TNT کاهش می‌یابد. در این پژوهش اهمیت سیستم‌های حفاظتی در کاهش مقادیر پاسخ و ایجاد ایمنی برای خطوط لوله به خوبی روشن گردید.

گفتنی است که بر اساس مطالعات گذشته، شرایط خط لوله در حالت خالی نسبت به زمانی که در آن مملو از سیال است، در برابر بار انفجار بحرانی‌تر است [6]، از این رو در تحقیق حاضر نیز خط لوله به صورت خالی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

هدف این پژوهش به طور خلاصه مطالعه تحلیلی تأثیر انواع کامپوزیت‌های FRP در تقویت خط لوله تحت بارگذاری انفجاری است. به همین منظور در بخش بعد ابتدا روابط حاکم بر خط لوله تقویت شده با مصالح کامپوزیتی تحت این بارگذاری ارائه شده و سپس در مرحله بعد در قالب یک نمونه کاربردی بر روی متغیرهای اساسی این مسأله مطالعه پارامتری صورت می‌گیرد. از این طریق میزان کارایی مصالح کامپوزیتی FRP در مقاوم‌سازی لوله در برابر انفجار و تأثیر سایر پارامترهای کلیدی بر آن مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان ضمن بحث بر روی یافته‌های حاصل، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری‌های لازم بیان می‌گردد.

2- بیان مسأله و روابط تحلیلی حاکم

خط لوله‌ای به قطر خارجی D_b ، ضخامت t_b و طول L را در نظر بگیرید که به وسیله مصالح کامپوزیتی به ضخامت t_{FRP} و با زاویه تورب (زاویه پوشش الیاف) θ_{FRP} تقویت شده است. از آنجا که خطوط لوله عمدتاً به صورت مدفون و متکی بر بستر خاکی هستند. بنابراین فرض می‌شود که این خط لوله در عمق h از سطح زمین قرار گرفته است. برای خطوط لوله واقع شده بر روی سطح زمین می‌توان h را برابر صفر در نظر گرفت. مطابق شکل 2، در فاصله r از این خط لوله، ماده منفجره‌ای عمل کرده و سبب ایجاد بار انفجاری $q_D(x, t)$ می‌گردد. ضابطه بار انفجاری وارده بر اساس تئوری بولسون¹⁶ [23] عبارت است از:

$$q_D(x, t) = \frac{\pi D_b P_s}{2} \delta(x - x_0) \left(1 - \frac{t}{T_s}\right) e^{-\frac{bt}{T_s}} \quad (1)$$

در رابطه فوق، δ نماینده تابع دیراک است. همچنین با فرض بر آن که خرج انفجار معادل TNT ماده منفجره برحسب کیلوگرم برابر w باشد، آنگاه پارامترهای P_s و T_s از روابط زیر تبعیت می‌کنند [23]:

$$P_s = \frac{f k w \sqrt{r^2 - (\Delta z)^2}}{r^4} \quad (2)$$

¹⁵ Winkler

¹⁶ Bulson

$$T_s = 0,002w^{0,1}r^{0,33}k^{0,67} \quad (3)$$

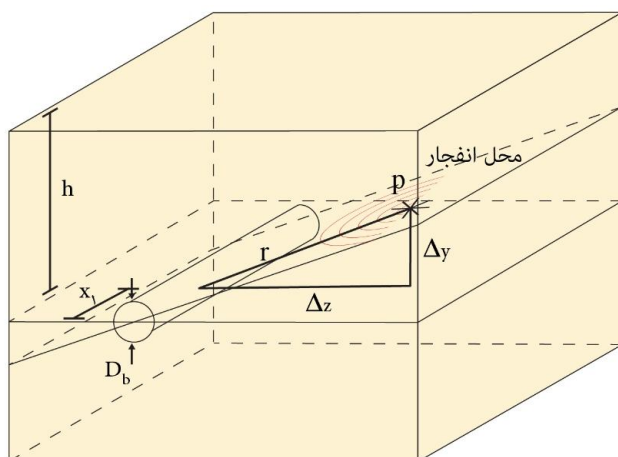
در روابط 2 و 3، ضرایب f و k به ترتیب تابع عمق مدفون لوله و شرایط خاک بوده و مقادیر آنها بر اساس تئوری بولسون قابل محاسبه است [23]. همچنین برای تخمین مقدار پارامتر b در رابطه 1، معادله زیر توسط کنگرلو [20]¹⁷ پیشنهاد شده است:

$$b = 1,5z^{-0,38} \quad (4)$$

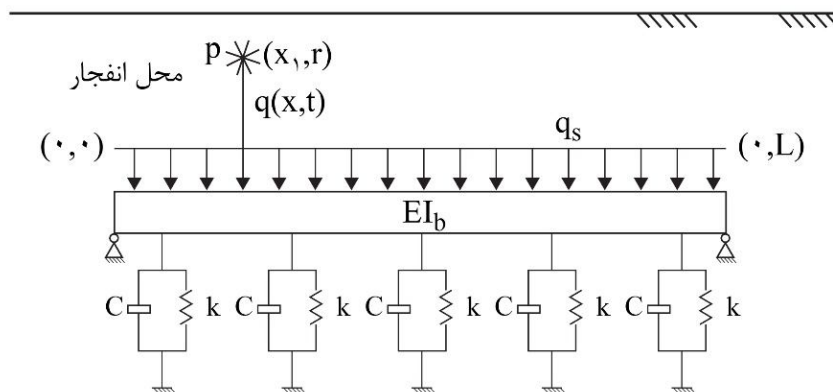
که در آن پارامتر z به صورت زیر قابل تعیین است:

$$z = \sqrt[3]{\frac{r^3}{w}} \quad (5)$$

در رابطه (5)، مقدار r بر حسب متر در نظر گرفته می شود.



(الف)



(ب)

شکل 2- الف) نمایش خط لوله مدفون تحت بارگذاری انفجاری، ب) مدل تحلیلی خط لوله واقع بر بستر خاکی

¹⁷ Kangarlou

بنابراین معادله حاکم بر خط لوله تحت بارگذاری انفجاری عبارت است از [20 و 25]:

$$m_b \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial y(x,t)}{\partial t} + E_b I_b \frac{\partial^4 y(x,t)}{\partial x^4} - G_s \frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} + k_f y + q_D(x,t) + q_s = 0 \quad (6)$$

در رابطه فوق، m_b نماینده جرم بر واحد طول لوله تقویت شده، C نماینده ضریب میرایی، $E_b I_b$ نماینده صلبیت خمشی لوله تقویت شده، G_s بیانگر مدول برشی مابین خاک و لوله، k_f بیانگر ضریب سختی خاک و q_s بیانگر بار استاتیکی یکنواخت ناشی از فشار خاک وارده به خط لوله است. برای تخمین ضریب میرایی می توان مقدار نسبت میرایی (ξ) را عددی بین 0,05 تا 0,25 در نظر گرفت [20]. برای محاسبه صلبیت خمشی خط لوله تقویت شده بر اساس دستورالعمل ALA می توان نوشت [26]:

$$E_b I_b = E_s I_s + E_{FRP} I_{FRP} \quad (7)$$

در رابطه فوق، E_s نماینده مدول الاستیسیته فولاد، I_s نماینده لنگر دوم سطح مقطع لوله تقویت نشده، E_{FRP} نماینده مدول الاستیسیته مصالح کامپوزیتی و I_{FRP} لنگر دوم سطح مقطع مصالح کامپوزیتی به کار رفته پیرامون خط لوله است. از طرفی مقدار E_{FRP} با توجه به زاویه تورب از رابطه زیر تبعیت می کند [27]:

$$E_{FRP} = \frac{1}{\frac{1}{E_1} \cos^4(\theta_{FRP}) + \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{2\nu_{12}}{E_1}\right) \sin^2(\theta_{FRP}) \cos^2(\theta_{FRP}) + \frac{1}{E_2} \sin^4(\theta_{FRP})} \quad (8)$$

در رابطه فوق، E_1 ، E_2 و G_{12} به ترتیب نماینده مدول های الاستیسیته و مدول برشی مصالح کامپوزیتی اجرا شده در راستاهای اصلی و ν_{12} نماینده ضریب پواسون اول است. مقادیر این چهار پارامتر با توجه به مشخصات مکانیکی و درصد حجمی الیاف و رزین به کار رفته به صورت زیر تعیین می گردد [28]:

$$E_1 = E_{fb1} V_f + E_r (1 - V_f) \quad (9)$$

$$E_2 = \frac{E_{fb2} E_r}{E_r V_f + E_{fb2} (1 - V_f)} \quad (10)$$

$$G_{12} = \frac{G_{fb} G_r}{G_r V_f + G_f (1 - V_f)} \quad (11)$$

$$\nu_{12} = \nu_{fb} V_f + \nu_r (1 - V_f) \quad (12)$$

در رابطه فوق، E_{fb1} و E_{fb2} به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته الیاف در راستاهای اصلی و G_{fb} و ν_{fb} به ترتیب نماینده مدول برشی و ضریب پواسون الیاف است. از طرفی E_r ، G_r و ν_r نیز به ترتیب بیانگر مدول الاستیسیته، مدول برشی و ضریب پواسون رزین به کار رفته در مصالح کامپوزیتی است. V_f نیز نماینده نسبت حجمی الیاف در داخل مصالح کامپوزیتی است.

همچنین برای تخمین مدول برشی G_s می توان از رابطه زیر استفاده کرد [29-30]:

$$G_s = \frac{1}{4(1 + \nu_f) \eta} \sqrt[3]{\frac{2E_b I_b D_b^2 E_f^2 (1 - 2\nu_f)(1 + \nu_f)}{(1 - \nu_s^2)(1 - \nu_f)}} \quad (13)$$

در رابطه فوق، v_s نماینده ضریب پواسون فولاد، v_f نماینده ضریب پواسون خاک بستر و E_f نماینده مدول الاستیسیته خاک بستر است. همچنین ضریب η بیانگر پارامتر تأخیر بوده که برابر واحد در نظر گرفته می‌شود [20].

برای برآورد k_f نیز می‌توان از رابطه پیشنهادی توسط دستورالعمل ALA به صورت زیر استفاده کرد [26]:

$$k_f = \frac{N_{ch}cD_b + N_{qh}\bar{\gamma}(h+0,5D_b)D_b}{\min(0,04(h+D_b),0,15D_b)} \quad (14)$$

در رابطه فوق، N_{qh} و N_{ch} به ترتیب نماینده ظرفیت باربری افقی خاک برای رس و ماسه هستند. $\bar{\gamma}$ نیز بیانگر وزن مخصوص مؤثر خاک است.

اکنون توابع تغییرشکل $(y(x,t))$ ، شیب $(\theta(x,t))$ ، لنگر $(M(x,t))$ و برش $(V(x,t))$ در راستای طول خط لوله به صورت زیر حاصل می‌گردد [20]:

$$y(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} Y_n(t) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (15)$$

$$\theta(x, t) = \frac{\pi}{L} \sum_{n=1}^{\infty} n Y_n(t) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (16)$$

$$M(x, t) = \frac{-\pi^2 E_b I_b}{L^2} \sum_{n=1}^{\infty} n^2 Y_n(t) \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (17)$$

$$V(x, t) = \frac{-\pi^3 E_b I_b}{L^2} \sum_{n=1}^{\infty} n^3 Y_n(t) \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad (18)$$

همچنین مقدار تنش محوری ماکزیمم در راستای طول خط لوله نیز از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

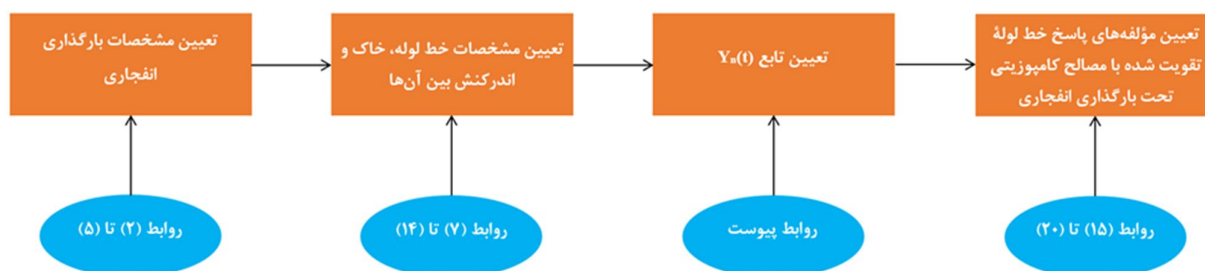
$$\sigma_{\max} = \frac{M(x, t)(D_b - 2t_{FRP})}{2I_b} \quad (19)$$

در روابط 15 تا 18، تابع $Y_n(t)$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y_n(t) = \frac{2}{m_b L \omega_{dn}} \left[A_n \left\{ B_n + \frac{P_n - Q_n - R_n + S_n}{T_s} \right\} + U_n V_n + X_n Z_n \right] \quad (20)$$

مقادیر کلیه پارامترهای به کار رفته در رابطه 20 در پیوست مقاله ارائه گردیده است.

به این ترتیب فرآیند یافتن پاسخ خط لوله تقویت شده با FRP را تحت بارگذاری انفجاری می‌توان در قالب روندنمای شکل 3 نمایش داد. لازم به ذکر است که به کمک این فرآیند می‌توان مقدار ضخامت مناسب از مصالح کامپوزیتی و نحوه چیدمان آرایش آن را به منظور مقاوم‌سازی خط لوله در برابر بار انفجاری طراحی نمود.



شکل 3- روندنمای تعیین پاسخ خط لوله تقویت شده با FRP تحت بارگذاری انفجاری.

گفتنی است که در چارچوب این مطالعه، برای حفاظت از خط لوله در برابر بارهای انفجاری، هم می‌توان عمق دفن را بیشتر نمود، هم می‌توان ضخامت مصالح FRP را افزایش داد و نیز می‌توان هر دو راهکار مزبور را به صورت توأمان اجرایی نمود.

برای حفاظت یک خط لوله با مشخصات هندسی و مکانیکی مفروض در برابر یک بار انفجاری مشخص، در صورتی که تنها راهکار افزایش عمق دفن مدنظر باشد، میزان عمق دفن بهینه (h_{opt}) از معادله زیر حاصل می‌شود:

$$\sigma_{\max}(h_{opt}) - \sigma_{all} = 0 \quad (21)$$

لازم به ذکر است که با توجه به مجهول بودن عمق دفن خط لوله، در رابطه فوق مقدار σ_{\max} تابعی از عمق دفن است و از رابطه 19 تبعیت می‌کند. همچنین مقدار σ_{all} نماینده حداکثر تنش مجاز در بدنه خط لوله بوده که براساس پیوست A از دستورالعمل ALA قابل تعیین است [26].

به طور مشابه، در صورتی که تنها راهکار افزایش ضخامت مصالح FRP برای حفاظت از خط لوله مدنظر باشد، آنگاه مقدار ضخامت بهینه FRP ($t_{FRP-Opt}$) از معادله زیر به دست می‌آید:

$$\sigma_{\max}(t_{FRP-Opt}) - \sigma_{all} = 0 \quad (22)$$

گفتنی است که در این شرایط تنها مجهول ضخامت مصالح FRP بوده و بنابراین مقدار σ_{\max} تابعی از این پارامتر است و از رابطه 19 تبعیت می‌کند.

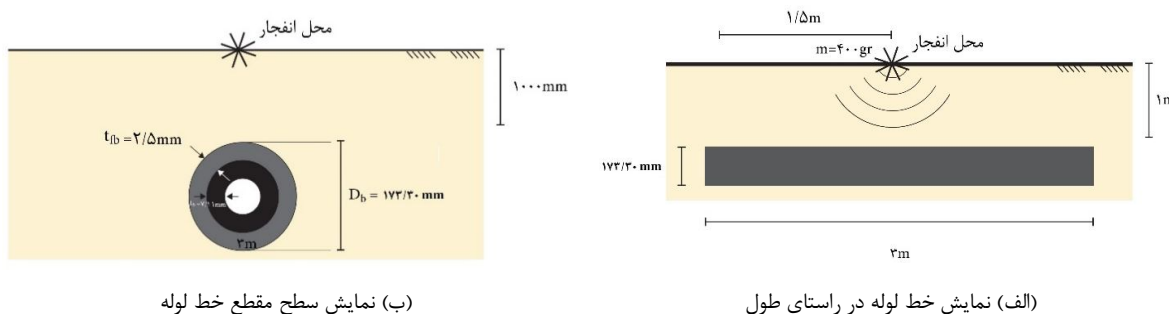
در صورتی که برای حفاظت از خط لوله در برابر انفجار، هر دو راهکار فوق به صورت توأمان مدنظر باشد، آنگاه مقادیر عمق دفن خط لوله و ضخامت مصالح FRP می‌بایست به گونه‌ای باشد که حداکثر تنش ایجاد شده در خط لوله از مقدار مجاز فراتر نرود و همچنین مجموع هزینه‌های اجرایی تا حد امکان کمینه باشد. از این رو مقادیر بهینه عمق دفن و ضخامت مصالح FRP، وابسته به هزینه‌های مرتبط با اجرای هر یک از این دو راهکار حفاظتی است. بنابراین در یک نگاه کلی برای یافتن مقادیر بهینه عمق دفن و ضخامت مصالح FRP می‌بایست مسأله بهینه‌سازی زیر را تحلیل نمود.

$$\begin{aligned} \min \quad & C_h h + C_{FRP} t_{FRP} \\ & \sigma_{\max}(h, t_{FRP}) \leq \sigma_{all} \end{aligned} \quad (23)$$

در عبارت 23، C_h هزینه اجرایی مرتبط با هر متر از عمق دفن و CFRP نماینده هزینه اجرایی مرتبط با هر واحد از ضخامت مصالح FRP است. گفتنی است که این مسأله بهینه‌سازی در حالت کلی غیرخطی بوده و برای حل آن می‌توان از روش‌های یادگیری ماشین، همچون الگوریتم ژنتیک استفاده کرد [31].

3- مطالعه پارامتری

در این بخش بناست تا در قالب یک مثال کاربردی که الهام گرفته از نمونه‌های مطالعه آزمایشگاهی دنگ¹⁸ و همکاران [32] تحت امواج شوک است، میزان تأثیر استفاده از مصالح کامپوزیتی FRP در تقویت خط لوله تحت بارگذاری انفجاری مورد ارزیابی قرار گرفته و اثر پارامترهای کلیدی بر پاسخ آن مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بدین منظور خط لوله‌ای به قطر خارجی 173/30mm، ضخامت 7/11mm و طول 3m را در نظر بگیرید که در عمق 1000mm از سطح زمین واقع شده و در طول خود با الیاف CFRP به ضخامت 2/5mm تقویت گردیده است. لازم به ذکر است که این عمق دفن از سطح زمین تا سطح فوقانی خط لوله بوده (شکل 4-الف) و بر اساس دستورالعمل اجرا و راه‌اندازی خطوط انتقال [33]، با توجه به شرایط نسبتاً سخت خاک محل، مقدار مزبور برای عمق لوله اتخاذ شده است. ضمناً در وسط این لوله و در سطح زمین ماده منفجره‌ای با خرج انفجاری معادل TNT برای 400 gr عمل کرده و سبب انتشار امواج انفجاری در خاک می‌گردد (شکل 4). در جداول 1 تا 4 به ترتیب به مشخصات مکانیکی فولاد به کار رفته در خط لوله، خاک محل، مصالح کامپوزیتی CFRP و رزین مورد استفاده جهت تقویت خط لوله اشاره شده است.



شکل 4- نمایش مشخصات هندسی مسأله پایه‌ای

جدول 1- مشخصات مکانیکی فولاد به کار رفته در خط لوله

نوع فولاد	تنش تسلیم f_y (MPa)	کرنش تسلیم ϵ_y ($\mu\epsilon$)	نسبت پواسون ν_b	تنش نهایی f_u (MPa)	مدول الاستیسیته E_b (GPa)	جرم حجمی فولاد ρ_b (kg/m^3)
A106.Gr.B	320	1711	0,3	500	200	7850

جدول 2- مشخصات مکانیکی خاک.

نوع خاک	مدول الاستیسیته E_f (MPa)	چسبندگی C (kPa)	نسبت پواسون ν_f	زاویه اصطکاک داخلی ϕ_f ($^\circ$)	وزن حجمی خاک γ_b (N/m^3)
ماسه متراکم	45	7,35	0,35	30	19117

¹⁸ Dong

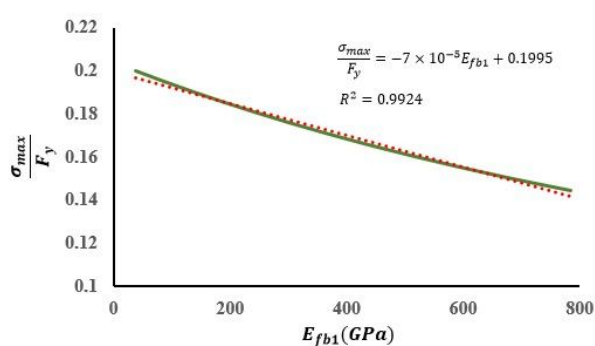
جدول 3- مشخصات مکانیکی مصالح کامپوزیتی CFRP [34]

نوع مصالح	مدول الاستیسیته طولی $E_{fb,1}$ (GPa)	مدول الاستیسیته عرضی $E_{fb,2}$ (GPa)	مدول برشی G_{fb} (GPa)	ضریب پواسون ν_{fb}	درصد حجمی الیاف V_{fb}	جرم حجمی مصالح کامپوزیتی ρ_{fb} (kg/m^3)
AS4/3501-G	150	10	6	0,3	٪60	1800

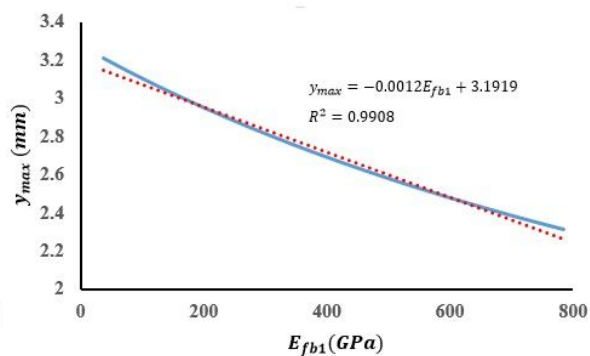
جدول 4- مشخصات مکانیکی رزین [35]

نوع رزین	مدول الاستیسیته E_r (GPa)	مدول برشی G_r (GPa)	ضریب پواسون ν_r	جرم حجمی رزین ρ_r (kg/m^3)
اپوکسی	4	2	0,4	1300

در ادامه نتایج حاصل از مطالعه پارامتری بر روی این مسأله پایه‌ای ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که در این پژوهش، عملکرد و کارایی مصالح کامپوزیتی (FRP) در حفاظت از خطوط لوله در برابر بارگذاری انفجاری، از طریق مطالعه تأثیر این مصالح در کنترل مقدار بیشینه تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در یک دسته‌بندی کلی پارامترهای اساسی مسأله به سه گروه تقسیم می‌شود. گروه اول پارامترهای مرتبط به مصالح کامپوزیتی (FRP) است که به منظور حفاظت از خطوط در برابر انفجار به کار رفته‌اند. این پارامترها به ترتیب عبارتند از جنس FRP، درصد حجمی الیاف (V_f)، زاویه تورب (θ_{FRP}) و ضخامت (t_{FRP}). در شکل‌های 5 تا 8 نتایج حاصل از انجام مطالعه پارامتری بر روی این متغیرها ارائه گردیده است. همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، مصالح FRP با توجه به الیاف مورد استفاده در آن‌ها، به چهار دسته رایج CFRP (دارای الیاف از جنس کربن)، GFRP (دارای الیاف از جنس شیشه)، AFRP (دارای الیاف از جنس آرامید) و BFRP (دارای الیاف از جنس بازالت) تقسیم‌بندی می‌شوند. دامنه مقادیر سختی این الیاف کاملاً با یکدیگر متفاوت است و از این رو تأثیر آن‌ها در حفاظت از خط لوله در برابر بارهای انفجاری یکسان نخواهد بود. از این رو در ابتدای این مطالعه پارامتری، تأثیر نوع FRP بر مقادیر پاسخ خط لوله مورد مطالعه قرار می‌گیرد. گفتنی است که مدول الاستیسیته طولی مصالح CFRP در بازه 37 GPa تا 784 GPa، مدول الاستیسیته طولی مصالح GFRP در بازه 35 GPa تا 86 GPa، مدول الاستیسیته طولی مصالح AFRP در بازه 41 GPa تا 175 GPa و مدول الاستیسیته طولی مصالح BFRP در بازه 50 GPa تا 65 GPa قرار دارد [35]. ضمناً سایر مشخصات مربوط به انواع مصالح FRP بر اساس اطلاعات مندرج در مرجع [35] برداشت شده است که به جهت رعایت اختصار از ارائه آن‌ها صرف نظر گردیده است. لازم به ذکر است که پس از بررسی تأثیر نوع الیاف مصالح FRP بر رفتار خط لوله، در ادامه فرآیند این مطالعه پارامتری، تنها مصالح CFRP با مشخصات مندرج در جدول 3 به عنوان پوشش محافظتی خط لوله در نظر گرفته شده است.

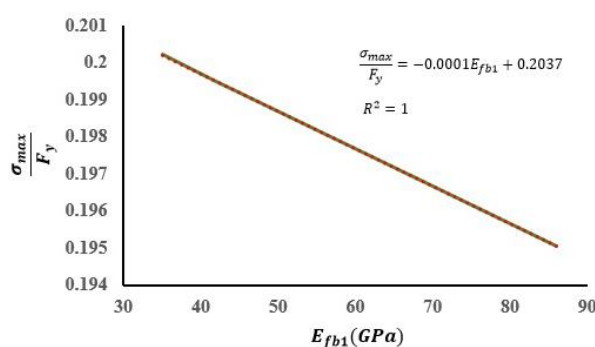


(ب) بیشینه تنش در وسط خط لوله

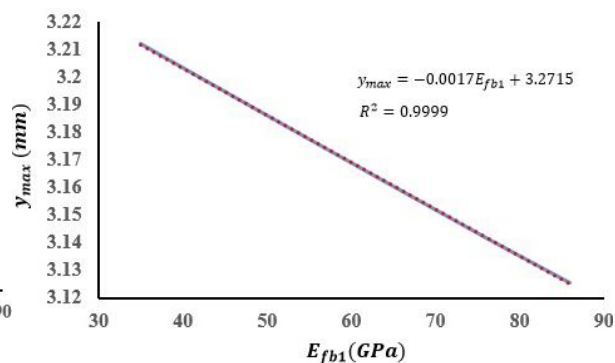


(الف) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

الیاف کربن (CFRP)

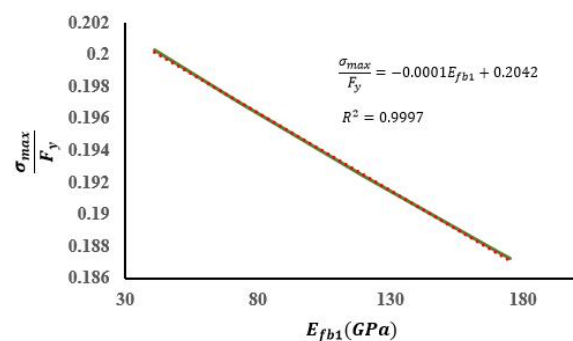


(د) بیشینه تنش در وسط خط لوله

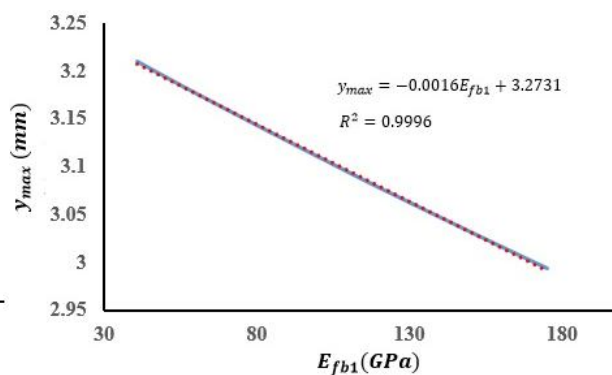


(ج) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

الیاف شیشه (GFRP)

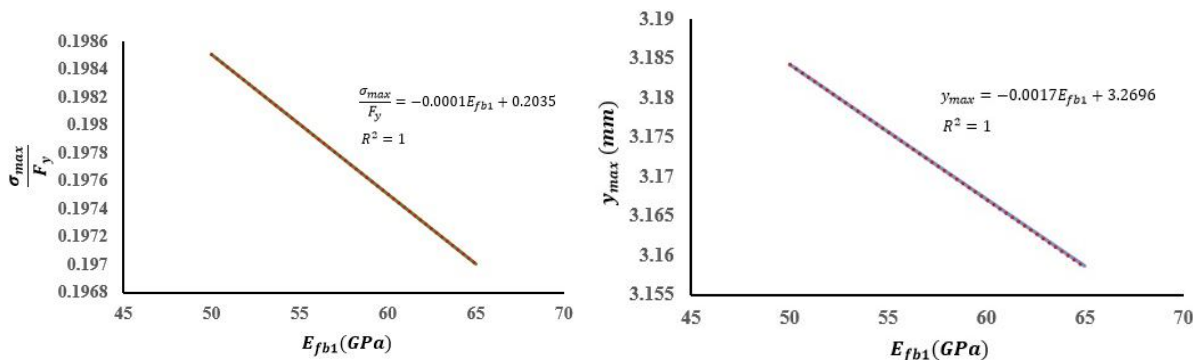


(و) بیشینه تنش در وسط خط لوله



(ه) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

الیاف آرامید (AFRP)



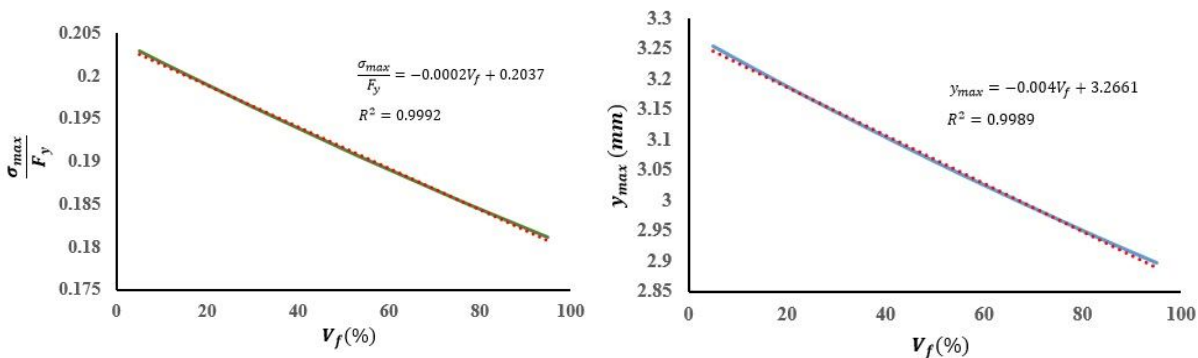
(ح) بیشینه تنش در وسط خط لوله

(ز) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

الیاف بازالت (BFRP)

شکل 5- مطالعه اثر جنس FRP بر بیشینه مقادیر تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله

همان‌طور که از نمودارهای ترسیم شده در شکل 5 پیداست، با افزایش مدول یانگ الیاف FRP، سختی و مقاومت بدنه خط لوله در برابر بارگذاری انفجاری وارده بیشتر شده و در نتیجه مقادیر بیشینه تغییر شکل و تنش طولی در وسط خط لوله کاهش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که در جمیع موارد فوق، با تقریب قابل قبولی نحوه کاهش میزان بیشینه تغییر شکل و تنش طولی در ازای افزایش مدول یانگ الیاف FRP به صورت خطی بوده و در موارد بررسی شده مقدار شیب خط برازش شده نیز تقریباً یکسان و نسبتاً اندک است. از این رو برای افزایش قابل توجه سختی و مقاومت خط لوله در برابر انفجار لازم است تا مدول یانگ مصالح کامپوزیتی مورد نظر از مقدار بالایی برخوردار باشد که این امر به‌طور مشهود در الیاف CFRP دیده می‌شود. بنابراین از این منظر، به‌کارگیری الیاف CFRP جهت تقویت خط لوله در برابر انفجار در قیاس با سایر الیاف FRP دارای عملکرد بهتری است.



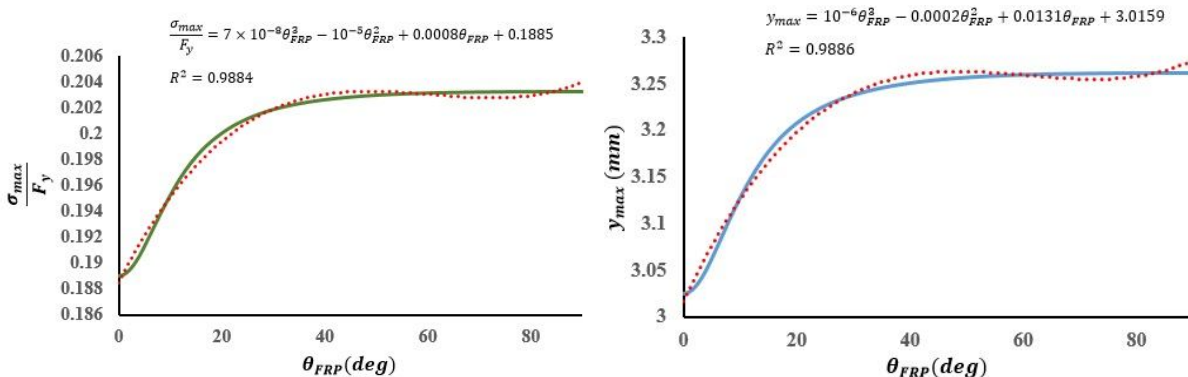
(ب) بیشینه تنش در وسط خط لوله

(الف) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

شکل 6- مطالعه اثر درصد حجمی الیاف بر بیشینه مقادیر تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله

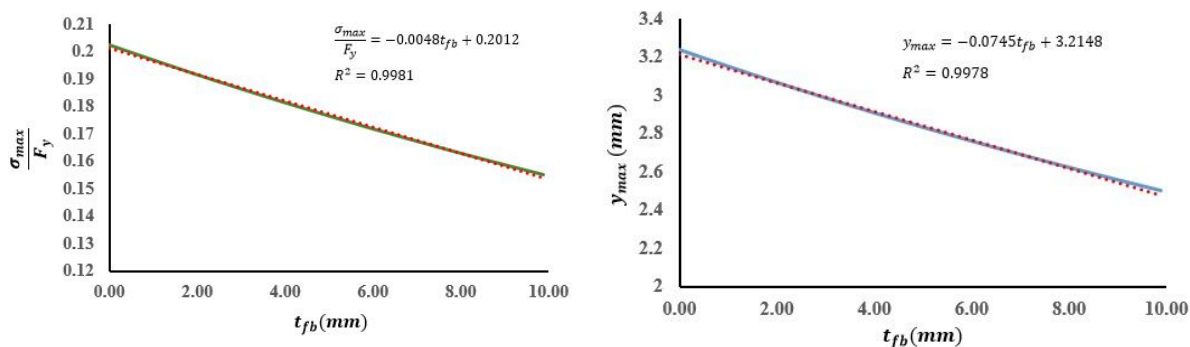
همان‌طور که در شکل 6 مشاهده می‌شود، با افزایش درصد الیاف به‌کار رفته در مصالح کامپوزیتی، مقادیر بیشینه تغییر شکل و تنش طولی در وسط خط لوله به صورت خطی کاهش می‌یابد که مؤید بالا رفتن سختی و مقاومت بدنه خط لوله است. با این وجود، اندازه شیب خطوط برازش شده بسیار اندک است. از طرفی دستیابی به درصد الیاف بالاتر از 70% در مصالح کامپوزیتی بسیار دشوار بوده و در عمل معمولاً درصد الیاف به‌کار رفته در محدوده 50% تا 65%

واقع است [36]. از این رو ایجاد تغییر در این پارامتر تأثیری کمتر از 5% در مقادیر پاسخ به دست آمده داشته و لذا کمک چندانی در بحث محافظت خط لوله در برابر انفجار نمی‌کند.



شکل 7- مطالعه اثر زاویه تورب بر بیشینه مقادیر تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله

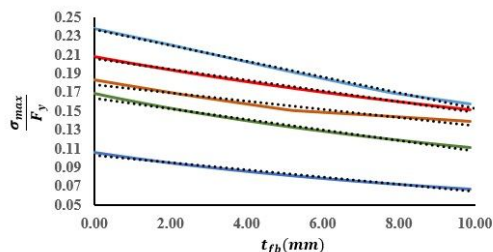
بر اساس نتایج شکل 7، با افزایش زاویه تورب الیاف FRP، مقادیر بیشینه تغییر شکل و تنش طولی در وسط خط لوله افزایش یافته و پس از عبور از زاویه 20° عملاً تغییر در مقادیر پاسخها مشاهده نمی‌شود که گواه بر کم رنگ شدن تدریجی اثر الیاف FRP در تقویت بدنه خط لوله در برابر انفجار است. علت این امر ناشی از اندک بودن سختی عرضی این الیاف (E_{fb2}) در مقایسه با سختی طولی آن‌هاست (E_{fb1}). از این رو بهتر است تا برای تقویت خط لوله در برابر انفجار، از الیاف دوجهته استفاده شود و در صورت به کارگیری الیاف یک‌جهته، الیاف در راستای خط لوله قرار گیرند.



شکل 8- مطالعه اثر ضخامت FRP بر بیشینه مقادیر تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله

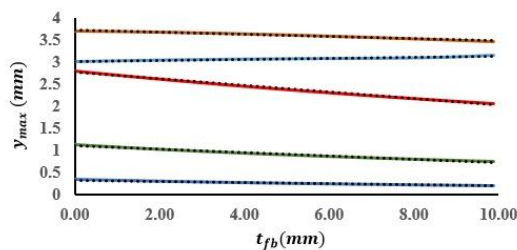
همان‌طور که انتظار می‌رود، با توجه به نمودارهای ارائه شده در شکل 8، با افزایش ضخامت مصالح کامپوزیتی، از میزان بیشینه تغییر شکل و تنش طولی در وسط خط لوله کاسته شده و بر اساس نتایج حاصل، تغییرات آن‌ها در ازای افزایش ضخامت مصالح کامپوزیتی به صورت خطی است. با توجه به مقدار شیب خط برازش شده و محدوده تغییرات ضخامت مصالح کامپوزیتی می‌توان نتیجه گرفت که این متغیر به عنوان یک پارامتر کلیدی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در تقویت خط لوله در برابر انفجار داشته و لازم است تا مقدار آن با در نظر داشتن جنبه‌های اقتصادی پروژه، به طور بهینه ارزیابی شود. گفتنی است که شیب خط برازش شده به منحنی‌های پاسخ خط لوله در ازای ضخامت مصالح

کامپوزیتی در شرایط گوناگون، نماینده مناسبی جهت سنجش کمی میزان کارآمدی مصالح کامپوزیتی در تقویت خطوط لوله فولادی در حالت‌های مختلف است. بر همین مبنا در ادامه به منظور ارزیابی کارایی مصالح FRP در حفاظت از خطوط لوله فولادی در برابر انفجار، بر روی سایر متغیرهای جانبی مسأله، مطالعه پارامتری صورت می‌گیرد. گروه دوم پارامترهای مرتبط با خط لوله است که به ترتیب عبارتند از قطر (D_b)، ضخامت (t_b) و طول (L). شکل‌های 9 تا 11 میزان کارایی استفاده از FRP به منظور حفاظت از بدنه لوله در برابر انفجار در ازای تغییر مقادیر سه پارامتر مذکور مورد مطالعه و نتایج آن ارائه گردیده است.



D_b	Regression Equation	R^2
$D_b = 50 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0085t_{fb} + 0.2375$	$R^2 = 0.9968$
$D_b = 100 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0044t_{fb} + 0.1738$	$R^2 = 0.9557$
$D_b = 200 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0057t_{fb} + 0.2057$	$R^2 = 0.9952$
$D_b = 400 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0057t_{fb} + 0.1644$	$R^2 = 0.9892$
$D_b = 800 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0038t_{fb} + 0.1028$	$R^2 = 0.9862$

(ب) بیشینه تنش در وسط خط لوله

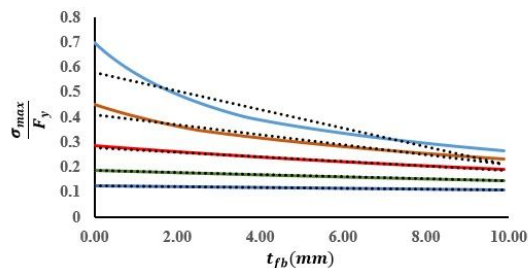


D_b	Regression Equation	R^2
$D_b = 50 \text{ mm}$	$y_{max} = 0.0107t_{fb} + 3.0191$	$R^2 = 0.9463$
$D_b = 100 \text{ mm}$	$y_{max} = -0.0231t_{fb} + 3.7171$	$R^2 = 0.9816$
$D_b = 200 \text{ mm}$	$y_{max} = -0.0751t_{fb} + 2.7781$	$R^2 = 0.9955$
$D_b = 400 \text{ mm}$	$y_{max} = -0.0386t_{fb} + 1.1102$	$R^2 = 0.9890$
$D_b = 800 \text{ mm}$	$y_{max} = -0.0128t_{fb} + 0.3435$	$R^2 = 0.9865$

(الف) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

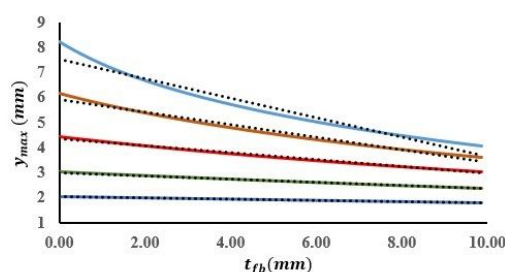
شکل 9- مطالعه اثر قطر خط لوله بر میزان کنترل بیشینه مقادیر تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله توسط FRP

براساس داده‌های ارائه شده در شکل 9، کارایی الیاف FRP در جهت حفاظت از خط لوله در برابر انفجار در ازای مقادیر مختلف از قطرهای خط لوله تفاوت قابل توجهی دارد. ملاحظه می‌شود که در ازای برخی مقادیر از پارامتر (D_b)، اندازه شیب نمودارهای پاسخ و در نتیجه میزان تأثیر الیاف FRP در حفاظت از خط لوله قابل ملاحظه و در ازای برخی مقادیر پارامتر (D_b)، اندازه شیب و در نتیجه میزان تأثیر الیاف FRP در حفاظت از خط لوله قابل صرف نظر کردن است. لذا برای هر خط لوله، با توجه به اندازه قطر و دیگر شرایط حاکم، لازم است با انجام مطالعه پارامتری بر روی ضخامت مصالح کامپوزیتی کارایی این روش مقاوم‌سازی را در حفاظت از خط لوله مورد بررسی قرار داد تا از مطلوبیت عملکرد آن اطمینان یافت.



t_b	Regression Equation	R^2
$t_b = 1 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0373t_b + 0.5806$	$R^2 = 0.8900$
$t_b = 2 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0199t_b + 0.4109$	$R^2 = 0.9486$
$t_b = 4 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0093t_b + 0.2800$	$R^2 = 0.9933$
$t_b = 8 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0041t_b + 0.1874$	$R^2 = 0.9987$
$t_b = 16 \text{ mm}$	$\sigma_{max}/F_y = -0.0016t_b + 0.1243$	$R^2 = 1.0000$

(ب) بیشینه تنش در وسط خط لوله

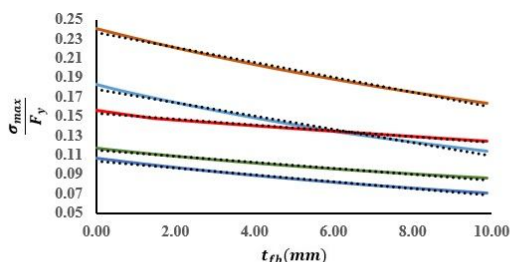


t_b	Regression Equation	R^2
$t_b = 1 \text{ mm}$	$y_{max} = -0.3889t_b + 7.5302$	$R^2 = 0.9589$
$t_b = 2 \text{ mm}$	$y_{max} = -0.2503t_b + 5.9316$	$R^2 = 0.9816$
$t_b = 4 \text{ mm}$	$y_{max} = -0.1388t_b + 4.3567$	$R^2 = 0.9929$
$t_b = 8 \text{ mm}$	$y_{max} = -0.0646t_b + 3.0100$	$R^2 = 0.9985$
$t_b = 16 \text{ mm}$	$y_{max} = -0.0260t_b + 2.0450$	$R^2 = 1.0000$

(الف) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

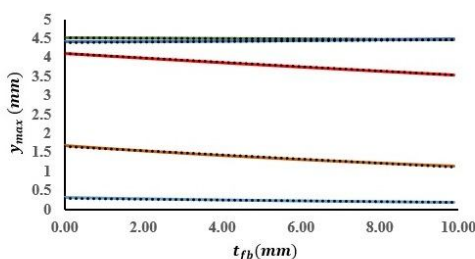
شکل 10- مطالعه اثر ضخامت خط لوله بر میزان کنترل بیشینه مقادیر تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله توسط FRP

شکل 10 به خوبی نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت لوله، میزان تأثیر مصالح کامپوزیتی FRP در حفاظت از بدنه خط لوله در برابر انفجار کاهش می‌یابد. از این رو این شیوه مقاومت‌سازی برای خطوط لوله جدار نازک از کارایی بهتری برخوردار است و با شیب تندتری مقادیر تغییر شکل و تنش تحت بارگذاری انفجار در ازای افزایش ضخامت مصالح کامپوزیتی کاهش می‌یابد.



L	Regression Equation	R ²
L = 1 m	$\sigma_{max}/F_y = -0.0069t_{fb} + 0.1778$	R ² = 0.9896
L = 2 m	$\sigma_{max}/F_y = -0.0077t_{fb} + 0.2364$	R ² = 0.9935
L = 4 m	$\sigma_{max}/F_y = -0.0031t_{fb} + 0.1532$	R ² = 0.9898
L = 8 m	$\sigma_{max}/F_y = -0.0032t_{fb} + 0.1154$	R ² = 0.9909
L = 16 m	$\sigma_{max}/F_y = -0.0035t_{fb} + 0.1041$	R ² = 0.9912

(ب) بیشینه تنش در وسط خط لوله



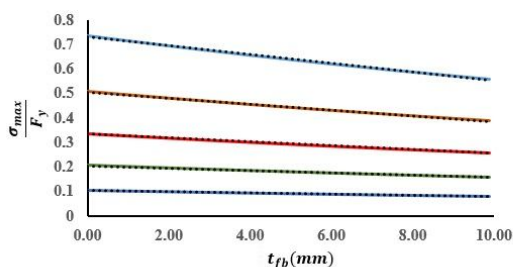
L	Regression Equation	R ²
L = 1 m	$y_{max} = -0.0119t_{fb} + 0.3057$	R ² = 0.9896
L = 2 m	$y_{max} = -0.0540t_{fb} + 1.6619$	R ² = 0.9935
L = 4 m	$y_{max} = -0.0570t_{fb} + 4.1087$	R ² = 0.9994
L = 8 m	$y_{max} = -0.0041t_{fb} + 4.5225$	R ² = 0.9982
L = 16 m	$y_{max} = 0.0081t_{fb} + 4.4002$	R ² = 0.9442

(الف) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

شکل 11- مطالعه اثر طول خط لوله بر میزان کنترل بیشینه تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله توسط FRP

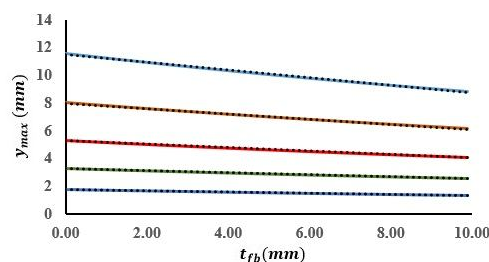
مشابه قطر خط لوله (D_b)، طول خط لوله (L) نیز در عملکرد مصالح FRP در حفاظت از خط لوله در برابر انفجار اثرگذار است. براساس شکل 11، در ازای مقادیری از خط لوله، تقویت بدنه خط لوله توسط FRP کارآمد و در ازای سایر مقادیر، میزان اثرگذاری الیاف FRP در حفاظت از خط لوله قابل اغماض است.

گروه سوم پارامترهای مرتبط با شرایط محیطی قرارگیری خط لوله است که از جمله آن‌ها می‌توان به عمق قرارگیری خط لوله از سطح زمین (h)، ضریب سختی خاک (k_f) و نسبت میرایی خاک (ξ) اشاره کرد. در شکل‌های 12 تا 14 میزان کارایی استفاده از FRP به منظور حفاظت از بدنه خط لوله در برابر انفجار در ازای تغییر سه پارامتر مذکور مورد مطالعه و نتایج آن ارائه گردیده است.



h	Regression Equation	R ²
h = 85 cm	$\sigma_{max}/F_y = -0.0177t_{fb} + 0.7308$	R ² = 0.9979
h = 90 cm	$\sigma_{max}/F_y = -0.0122t_{fb} + 0.5060$	R ² = 0.9979
h = 95 cm	$\sigma_{max}/F_y = -0.0080t_{fb} + 0.3355$	R ² = 0.9980
h = 100 cm	$\sigma_{max}/F_y = -0.0049t_{fb} + 0.2056$	R ² = 0.9981
h = 105 cm	$\sigma_{max}/F_y = -0.0025t_{fb} + 0.1063$	R ² = 0.9982

(ب) بیشینه تنش در وسط خط لوله

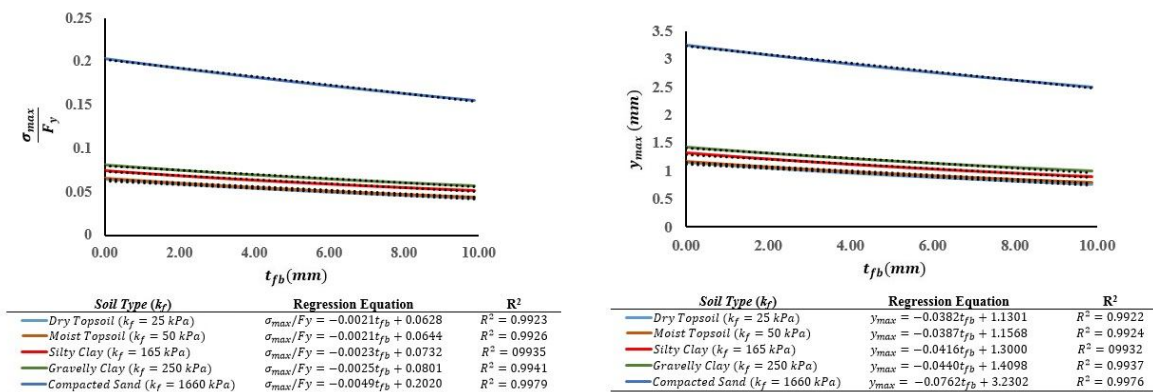


h	Regression Equation	R ²
h = 85 cm	$y_{max} = -0.2725t_{fb} + 11.485$	R ² = 0.9975
h = 90 cm	$y_{max} = -0.1871t_{fb} + 7.9542$	R ² = 0.9976
h = 95 cm	$y_{max} = -0.1235t_{fb} + 5.2947$	R ² = 0.9977
h = 100 cm	$y_{max} = -0.0760t_{fb} + 3.2832$	R ² = 0.9978
h = 105 cm	$y_{max} = -0.0406t_{fb} + 1.7584$	R ² = 0.9980

(الف) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

شکل 12- مطالعه اثر عمق دفن خط لوله بر میزان کنترل بیشینه تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله توسط FRP

با مشاهده شکل 12 می‌توان دید که مقدار شیب متناظر با کاهش در مقادیر تغییر شکل و تنش طولی برای خط لوله واقع در عمق کمتر، بیشتر است. لذا می‌توان اذعان داشت که برای خطوط لوله‌ای که به سطح زمین نزدیک‌تر بوده و خطر انفجار نیز برای آن‌ها تهدید جدی‌تری محسوب می‌شود، تقویت بدنه خط لوله توسط الیاف FRP از کارایی بهتری برخوردار است و این مصالح نقش شایانی در حفاظت از سازه خط لوله ایفا خواهد کرد.

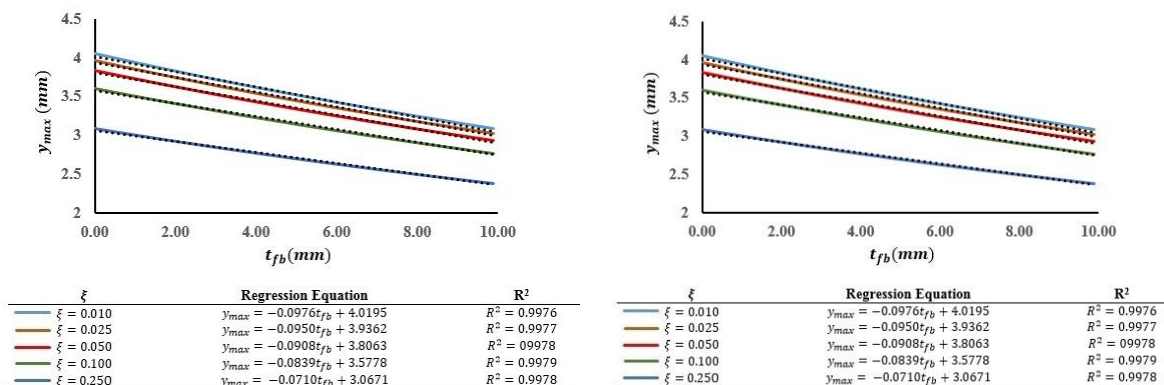


(ب) بیشینه تنش در وسط خط لوله

(الف) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

شکل 13- مطالعه اثر ضریب سختی خاک بر میزان کنترل بیشینه تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله توسط FRP

با توجه به یافته‌های نمایش داده شده در شکل 13، دو نتیجه کلیدی و مهم قابل استعمل است. نخست آن‌که با افزایش سختی بستر (k_f)، پاسخ خط لوله اعم از تغییر شکل و تنش، در نزدیکی محل انفجار بیشتر می‌شود یا به تعبیری شرایط خط لوله در برابر بارگذاری انفجاری بحرانی‌تر می‌گردد. مورد دوم آن‌که با افزایش سختی بستر، بر میزان کارایی الیاف FRP در حفاظت از خط لوله در برابر بارگذاری انفجار نیز افزوده می‌شود که علت آن ناشی از بیشتر بودن شیب نزول مقادیر تغییر شکل و تنش در ازای بالا رفتن ضخامت مصالح کامپوزیتی FRP است.



(ب) بیشینه تنش در وسط خط لوله

(الف) بیشینه تغییر شکل در وسط خط لوله

شکل 14- مطالعه اثر نسبت میرایی خاک بر میزان کنترل بیشینه تغییر شکل و تنش در وسط خط لوله توسط FRP

همان‌طور که انتظار می‌رود و از ملاحظه نمودارهای شکل 14 نیز پیداست، با افزایش نسبت میرایی (ξ) مقادیر تغییر شکل و تنش تحت بارگذاری انفجاری کاهش می‌یابد. از طرفی نزدیکی مقادیر پاسخ خط لوله تحت انفجار و

قربانت نسبی اندازه‌های شیب خطوط برازش شده به یکدیگر در اغلب موارد بررسی شده، مؤید حساسیت اندک مسأله نسبت به پارامتر نسبت میرایی در محدوده مورد مطالعه است.

4- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف پژوهش به‌طور خلاصه، بررسی کارایی مصالح کامپوزیتی FRP در تقویت و حفاظت از خطوط لوله فولادی در برابر بارگذاری انفجاری همراه با ارائه روابط مورد نیاز جهت تحلیل و طراحی اولیه به منظور استفاده توسط مهندسان و طراحان بود. به همین منظور ابتدا روابط تحلیلی مربوطه به‌طور کامل و جامع در بخشی مجزا بیان شد همچنین در ادامه براساس روابط ارائه شده، دستورالعملی برای محاسبه مقادیر بهینه عمق دفن خط لوله و ضخامت مصالح FRP ارائه گردید. سپس در قالب یک نمونه موردی، اثر پارامترهای مختلف اعم از پارامترهای مرتبط با مصالح FRP، پارامترهای مرتبط با خط لوله و پارامترهای مرتبط با شرایط محیطی بر کمیت و کیفیت حفاظت از خط لوله توسط FRP مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه اختصاراً یافته‌ها و نتایج کلیدی حاصل شده در این پژوهش ارائه می‌گردد.

- در میان انواع الیاف FRP، الیاف کربنی CFRP به علت دارا بودن سختی طولی بیشتر، در کنترل مقادیر تغییرشکل و تنش طولی و حفاظت از خط لوله در برابر انفجار عملکرد بهتری دارد.
 - با توجه به فشار همه جانبه ناشی از انفجار، بهتر است در صورت امکان از مصالح کامپوزیتی FRP با الیاف دو جهته استفاده کرد. در صورت به‌کارگیری الیاف یک جهته، بهتر است راستای این الیاف در جهت طول خط لوله قرار داشته باشد.
 - ضخامت مصالح کامپوزیتی (t_f) پارامتری تعیین کننده در تقویت و حفاظت از خط لوله در برابر انفجار است که در هنگام طراحی آن می‌بایست علاوه بر ویژگی‌های خط لوله همچون قطر و طول، به جنبه‌های اقتصادی نیز توجه گردد.
 - بر اساس نتایج مطالعه پارامتری، خطوط لوله جدار نازک که در عمق اندکی از سطح زمین واقع بوده و خاک بستر آن نیز دارای سختی قابل ملاحظه‌ای است، تحت بارگذاری انفجاری از آسیب‌پذیری بیشتری برخوردار است. از طرفی استفاده از مصالح FRP جهت حفاظت از خطوط لوله در این شرایط دارای کارایی بهتر بوده و با ضخامت کمتری از این مصالح می‌توان مقادیر تغییرشکل و تنش ایجاد شده ناشی از انفجاری را کاهش داد.
 - نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مقدار پارامتر نسبت میرایی در اغلب موارد بررسی شده تأثیر چندانی بر پاسخ خط لوله تحت بارگذاری انفجاری و میزان کارایی مصالح کامپوزیتی در حفاظت از بدنه خط لوله نداشته و از این رو تعیین اندازه این متغیر از حساسیت چندان بالایی برخوردار نیست.
- لازم به یادآوری است که روابط و داده‌های ارائه شده در این پژوهش، مرجع مناسبی برای مهندسان و طراحان جهت داشتن قضاوت مناسب در خصوص تقویت و مقاوم‌سازی خطوط لوله با استفاده از مصالح کامپوزیتی FRP در برابر پدیده انفجار است. ضمناً توصیه می‌شود که در مطالعات آتی، عملکرد مصالح FRP در تقویت و مقاوم‌سازی خطوط لوله مملو از سیال، در برابر بارگذاری انفجار مورد پژوهش قرار گیرد.

5- تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت و پشتیبانی شرکت ملی مهندسی و ساختمان نفت ایران در قالب قرارداد حمایت از پایان نامه‌ها با شناسه NIOEC8/RT-RT/OTH-EX06-00 انجام پذیرفته است و نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و قدردانی خود را از دست‌اندرکاران این مجموعه بالاخص آقای دکتر علی عربزاده اعلام می‌دارند.

6- منابع

- [1] M. Mokhtari, and A. Alavi Nia. "The application of CFRP to strengthen buried steel pipelines against subsurface explosion." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 87, pp. 52-62, Aug 2016.
- [2] N. Saeed. "Composite overwrap repair system for pipelines-onshore and offshore application." 2015.
- [3] M.M. Prabhakar, N. Rajini, N. Ayrilmis, K. Mayandi, S. Siengchin, K. Senthilkumar, S. Karthikeyan, and S.O. Ismail. "An overview of burst, buckling, durability and corrosion analysis of lightweight FRP composite pipes and their applicability." *Composite Structures*, vol. 230, p. 111419, Dec 2019.
- [4] S. Nawaseri. "Retrofitting corroded pipes for oil and gas transmission using FRP laminates." *Islamic Azad University Dezful Branch*, 2016.
- [5] G.R. M. "Retrofitting corroded oil and gas pipes with FRP." *Tehran University*, 2009.
- [6] E. Giannaros, T. Kotzakolios, and V. Kostopoulos. "Blast response of composite pipeline structure using finite element techniques." *Journal of Composite Materials*, vol. 50(25), pp. 3459-3476, Oct 2016.
- [7] H. Haeri, M. Farazmand, V. Sarfarazi. "Modeling fiber reinforced polymer (FRP) coating in retrofitting concrete walls against explosive loads." *Journal of Mining Science*, vol. 53, pp. 239-252, Mar 2017.
- [8] M. Hajiazizi, and R. Kakaei. "Numerical simulation of GFRP blanket effect on reducing the deformation of X65 buried pipelines exposed to subsurface explosion." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 166, pp. 9-23, Sep 2018.
- [9] R. Kakaei, and M. Hajiazizi. "The effect of GFRP on reinforcing the buried and internally pressurized steel pipes against terrorist attacks." *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol. 189, p. 104273, Feb 2021.
- [10] M. Eskandari. "Analysis of composite textile effect on steel type city gas pipeline against explosion." 2021.
- [11] M. Eskandari, M.R. Fallah Ghanbari. "Analysis of composite textile effect on steel type city gas pipeline against explosion." *Emergency Management*, vol. 9, pp. 47-55, 2021.
- [12] W. Toh, K. Raju, C.H. Yeo, S.H. Goh, V.B. Tan. "Experimental and Numerical Analysis of Fibre-Reinforced Composite Pipes Subjected to Underground Blasts." *Stress*, vol. 1(1), 2017.
- [13] G.P. Kouretzis, G.D. Bouckovalas, and C.J. Gantes. "Analytical calculation of blast-induced strains to buried pipelines." *International Journal of Impact Engineering*, vol. 34(10), pp. 1683-1704, Oct 2017.
- [14] D. Nourzadeh, S. Takada, and K. Bargi. "Response of buried pipelines to underground blast loading." *Australian Structural Engineering Conference*, Sydney, NSW: Engineers Australia, Jan 2010.
- [15] J.H. Won, M.K. Kim, G. Kim, S.H. Cho. "Blast-induced dynamic response on the interface of a multilayered pipeline." *structure and Infrastructure Engineering*, vol. 10(1), pp. 80-92, Jan 2014.
- [16] A.S. Abedi, N. Hataf, and A. Ghahramani. "Analytical solution of the dynamic response of buried pipelines under blast wave." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 88, pp. 301-306, Oct 2016.

- [17] D.G. Pavlou, J.A. Correia. "Dynamic response of pipelines under impact and harmonic loading". In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Maritime Engineering*, vol. 172(1), pp. 15-22, Mar 2019.
- [18] J.P. Tian, J. Zhang, F.F. Dong, G.F. Du. "Dynamic response of buried pipeline subject to impact loads using piezoceramic transducers". *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, vol.177, p. 103984, Nov 2019.
- [19] Y. Xia, N. Jiang, C. Zhou, X. Meng, X. Luo, T. Wu. "Theoretical solution of the vibration response of the buried flexible HDPE pipe under impact load induced by rock blasting." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 146, p. 106743, Jul 2021.
- [20] C.H. Chaudhuri, and D. Choudhury. "Buried pipeline subjected to underground blast load: Closed-form analytical solution." *International Journal of Geomechanics*, vol. 22(9), p. 06022024, Sep 2022.
- [21] B. Salehi, M. Eskandari, M.R. Fallah Ghanbari, and Z. Jamshidi. "Investigation the effective factors on reducing the vulnerability of urban gas pipelines against explosion threats". *Journal of Crisis Management and Emergency Situations*, vol. 15(2), pp. 103-120, Sep 2022.
- [22] C.H. Chaudhuri, D. Choudhury. "Dynamic analysis of buried pipeline with and without barrier system subjected to underground detonation". *Defence Technology*, vol. 29, pp. 95-105, Nov 2023.
- [23] P.S. Bulson. "Explosive loading of engineering structures". *London: Taylor & Francis*, 2003.
- [24] S. Ganpule, A. Alai, E. Plougonven, N. Chandra. "Mechanics of blast loading on the head models in the study of traumatic brain injury using experimental and computational approaches." *Biomechanics and modeling in mechanobiology*, vol. 12, pp. 511-531, Jun 2013.
- [25] W.C. Ray, and P. Joseph. "Dynamics of structures." *Computers & Structures*, Berkeley, CA, USA, 1993.
- [26] Alliance, Alliance Lifelines. "Guidelines for the design of buried steel pipe." *American Society of Civil Engineers*. 2001.
- [27] V. LUPĂȘTEANU, N. ȚĂRANU, R. HOHAN, P. CIOBANU. "Off-axis mechanical properties of FRP composites." *THE 5th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MATERIALS AND SYSTEMS*. Oct 2014.
- [28] M. Kulpa, A. Wiater, M. Rajchel, T. Siwowski. "Comparison of Material Properties of Multilayered Laminates Determined by Testing and Micromechanics." *Materials*, vol. 14, p. 761, 2021.
- [29] H. Tanahashi. "Differential settlement responses of beams on Pasternak Model." *J. of Structural Engineering*, vol. 38(57), 1992.
- [30] L. Wang, J. Ma, Y. Zhao, Q. Liu. Refined modeling and free vibration of inextensional beams on the elastic foundation. *Journal of Applied Mechanics*. 2013 Jul 1;80(4):041026. "Refined modeling and free vibration of inextensional beams on the elastic foundation." *Journal of Applied Mechanics*, vol. 80(4), p. 041026, Jul 2013.
- [31] X. Yang. "Nature-Inspired optimization algorithms." *Elsevier Science*, Aug 2016.
- [32] Dong, F., Bie, X., Tian, J., Xie, X., & Du, G. "Experimental and numerical study on the strain behavior of buried pipelines subjected to an impact load". *Applied Sciences*, vol. 9(16), p. 3284, Aug 2019.
- [33] National Iranian Gas Company. "Iranian Gas Standard IGS-C-PL-100(3), Jan 2021. (In Persian)
- [34] M. Naderi, and A.R. Maligno. "Fatigue life prediction of carbon/epoxy laminates by stochastic numerical simulation." *Composite Structures*, vol. 94(3), pp. 1052-1059, Feb 2012.
- [35] I.S. Abbood, S. aldeen Odaa, K.F. Hasan, M.A. Jasim. "Properties evaluation of fiber reinforced polymers and their constituent materials used in structures–A review." *Materials Today: Proceedings*, vol. 43, pp. 1003-1008, Jan 2021.
- [36] R.F. Gibson. "Principles of composite material mechanics." *CRC press*, May 2007.

پیوست

پارامترهای مورد نیاز جهت یافتن پاسخ خط لوله تحت بارگذاری انفجاری:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{E_b I_b \left(\frac{n\pi}{L}\right)^4 + G_s \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 + k_f}{m_b}} \quad (A1)$$

$$\omega_{dn} = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (A2)$$

$$A_n = \frac{\pi D}{2} P_s \sin\left(\frac{n\pi x_1}{L}\right) e^{-\omega_n \xi t} \quad (A3)$$

$$B_n = \frac{\omega_{dn} \left\{ e^{(\omega_n \xi - b/T_s)t} - \cos(\omega_{dn} t) \right\} - (\omega_n \xi - b/T_s) \sin(\omega_{dn} t)}{(\omega_n \xi - b/T_s)^2 + \omega_{dn}^2} \quad (A4)$$

$$P_n = \frac{(-\omega_n^2 \xi^2 + 2\omega_n \xi b/T_s + \omega_{dn}^2 - b^2/T_s^2) \sin(\omega_{dn} t)}{\left\{ (\omega_n \xi - b/T_s)^2 + \omega_{dn}^2 \right\}^2} \quad (A5)$$

$$Q_n = \frac{2\omega_{dn} (\omega_n \xi - b/T_s) \cos(\omega_{dn} t)}{\left\{ (\omega_n \xi - b/T_s)^2 + \omega_{dn}^2 \right\}^2} \quad (A6)$$

$$R_n = \frac{\omega_{dn} t e^{(\omega_n \xi - b/T_s)t}}{\left\{ (\omega_n \xi - b/T_s)^2 + \omega_{dn}^2 \right\}} \quad (A7)$$

$$S_n = \frac{2\omega_{dn} (\omega_n \xi - b/T_s) e^{(\omega_n \xi - b/T_s)t}}{\left\{ (\omega_n \xi - b/T_s)^2 + \omega_{dn}^2 \right\}^2} \quad (A8)$$

$$U_n = \frac{q_s L}{n\pi} \left(1 - (-1)^n \right) e^{-\omega_n \xi t} \quad (A9)$$

$$V_n = \frac{\omega_{dn} e^{\omega_n \xi t} - \omega_n \xi \sin(\omega_{dn} t) - \omega_{dn} \cos(\omega_{dn} t)}{\omega_n^2 \xi^2 + \omega_{dn}^2} \quad (A10)$$

$$X_n = \frac{q_s L}{n\pi \omega_n} \left(1 - (-1)^n \right) e^{-\omega_n \xi t} \quad (A11)$$

$$Z_n = \omega_{dn} \cos(\omega_{dn} t) + \xi \omega_n \sin(\omega_{dn} t) \quad (A12)$$