

## مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.24767131.1403.10.1.10.2

درصد همانندی: ۰٪

## تقویت لوله‌های زیر دریا تحت بار انفجار با استفاده از GFRP

محمد اسماعیل زاده<sup>۱</sup>، مهدی بهداروندی عسکر<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سواحل و بنادر و سازه‌های دریایی گروه مهندسی دریا - عمران، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر ایران.  
m.esmaeilzadeh@kmsu.ac.ir

<sup>۲\*</sup> نویسنده مسئول، دانشیار گروه مهندسی دریا - عمران، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه علوم و فنون دریایی خرمشهر، خرمشهر، ایران.  
m.behdarvandi@kmsu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۳

## چکیده

تحلیل رفتار لوله‌های فولادی زیر آب در معرض بارگذاری‌های انفجاری زیرآبی اهمیت زیادی دارد، چراکه این لوله‌ها نقش اساسی در زیرساخت‌های دریایی دارند. در این پژوهش، با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار آباکوس، تأثیر انفجارهای زیرآبی با سه جرم متفاوت TNT در فاصله ۵ متری از لوله بررسی شد. نتایج شامل انرژی کرنشی و جنبشی به‌منظور تأیید اثر جرم TNT استخراج شد. در ادامه اثر تقویت لوله با استفاده از پیکربندی متفاوت GFRP بررسی شد و اثربخشی چهار پیکربندی تقویت لوله با ورق‌های GFRP ارزیابی شد. پیچش پیوسته GFRP مؤثرترین روش شناخته شد و حداکثر تغییر شکل موضعی لوله را بیش از ۵۲ درصد کاهش داد. درحالی‌که حلقه‌های گسسته GFRP محافظتی نسبی ارائه کردند، تنش‌های موضعی در محل اتصال را در حدود بیست درصد محدود کرد. یافته‌ها نشان داد که انفجارهای زیرآبی به دلیل میرایی بیشتر در محیط آب، آسیب کمتری نسبت به انفجارهای هوایی به لوله وارد می‌کنند. این پژوهش، راهکارهایی کاربردی برای بهبود مقاومت خطوط لوله در برابر بارگذاری‌های انفجاری ارائه می‌دهد و می‌تواند در طراحی و تقویت لوله‌های زیرآبی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: لوله‌های فولادی، انفجارهای زیر آبی، GFRP، UNDEX

## ۱. مقدمه

شیهه‌سازی را گزارش کردند درصد خطا در نتایج عددی و آزمایشگاهی کمتر از ۸٪ بوده است [۹]. در سال ۱۳۹۹ قادی و همکاران مطالعه‌ای را بر روی اثرات انفجار زیر آب بر یک زیردریایی انجام دادند. این مطالعه با استفاده از مدل‌سازی در نرم‌افزار آباکوس تغییرات تنش و سرعت زیردریایی را بررسی کرد. نتایج نشان داد که انفجار زیر آب موجب ایجاد تنش‌های قابل توجه و تغییرات سریع در مکان زیردریایی می‌شود [۱۰]. در سال ۱۴۰۱، نصیری و همکارانش پاسخ دینامیکی لوله انتقال استوانه‌ای مدفون در دریا تحت اثر انفجار را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس شیهه‌سازی کردند. نتایج تحقیق نشان داد که فشار موج انفجار و رفتار حباب‌های گازی تحت تأثیر پارامترهایی همچون عمق انفجار و شرایط محیطی قرار دارد [۱۱]. عباسی در سال ۱۴۰۱ تحقیقی مروری بر پدیده‌های فیزیکی انفجار زیر آب ارائه داد و تفاوت‌های انفجار در زیر آب را با انفجار در هوا مقایسه کرد. وی همچنین نشان داد که انفجار در عمق‌های کمتر از ۱۰ متر موجب ایجاد تغییرات عمده در رفتار حباب‌های گازی و فشار سیال می‌شود [۱۲]. شیاوسی و همکاران با استفاده از نرم‌افزار اتوداین به شیهه‌سازی انتشار موج فشاری ناشی از انفجار در زیر آب پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که نرم‌افزار اتوداین قادر به پیش‌بینی دقیق فشار حداکثری در نزدیک‌ترین فاصله از هسته انفجار است [۱۳]. وهاب رجائی و همکارانش انفجار زیرزمینی بر لوله فولادی خط انتقال آب را تحلیل کردند. نتایج شیهه‌سازی عددی نشان داد که پارامترهایی همچون عمق انفجار، ضخامت لوله و قطر آن تأثیرات قابل توجهی بر پاسخ لوله به انفجار دارند [۱۴]. پاسبانی و همکارانش در سال ۲۰۱۹ روند انتشار موج ناشی از انفجار زیر آب را با استفاده از مدل اجزای محدود بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که فشار انفجار به سرعت به حداکثر مقدار خود می‌رسد و سپس به‌طور نمایی کاهش می‌یابد [۹]. مونتیرو و همکاران فروپاشی دینامیکی پوسته‌های استوانه‌ای غوطه‌ور شده تحت بارهای فشار ضربه‌ای را با استفاده از رویکرد ترکیبی تجربی و عددی بررسی کردند [۱۵]. آن‌ها لوله‌های آلومینیومی با نسبت قطر به ضخامت ۳۲٫۳ را در معرض انفجارهای زیر آبی در فواصل مختلف

در چشم‌انداز فناوری در حال تحول امروز، نگهداری و بهره‌برداری از زیرساخت‌های صنعتی اهمیت ویژه‌ای دارد. در نتیجه، ایمنی و مقاومت در برابر انفجار سازه‌های فلزی به چالش‌های مهمی تبدیل شده است. انفجارهای زیر آبی پدیده‌ای فیزیکی هستند که در آب یا سایر سیالات رخ می‌دهند و امواج شوک و پالس‌های فشار تولید می‌کنند. اگرچه این انفجارها معمولاً با محیط‌های آبی یا رخدادهای نزدیک به سطح مرتبط هستند، اما می‌توانند در انواع مختلف محیط‌های سیال بروز کنند. چنین رویدادهایی معمولاً به عوامل مختلفی مانند فشار بالا، گرمای شدید، شوک مکانیکی یا ترکیبی از آن‌ها نسبت داده می‌شوند. انفجارهای زیر آبی به دلیل ماهیت پیچیده خود، مدت‌هاست که محققان و مهندسان را مجذوب خود کرده است و آن‌ها را به کانون مطالعاتی برای تصمیم‌گیری در مورد طراحی مربوط به مهندسی سازه، ایمنی دریایی و سایر کاربردهای آبی تبدیل کرده است. علاوه بر این، تحقیقات درباره مقاومت در برابر انفجار سازه‌ها و خطوط لوله زیر آبی اهمیت بیشتری یافته است. در این زمینه، خطوط لوله فولادی که برای حمل و نقل زیردریایی مواد مختلف استفاده می‌شوند، نقش اساسی ایفا می‌کنند [۱]. با توجه به خطرات احتمالی انفجار در صنایع نفت و گاز و سایر بخش‌های مرتبط، تقویت این خطوط لوله با استفاده از مواد پیشرفته مانند فیبر شیشه به‌طور فزاینده‌ای ضروری شده است. استفاده از پلیمرهای تقویت‌شده با فیبر (FRP) برای بازسازی و تقویت سازه‌های فولادی همچنان یک حوزه فعال تحقیقاتی است [۱-۷]. به‌منظور بررسی تأثیر انفجار زیر آب بر خطوط لوله مستغرق، پوربھی و همکارانش با استفاده از روش اجزای محدود و نرم‌افزار آباکوس، رفتار دینامیکی لوله‌ها را تحت اثر نیروهای ناشی از انفجار و حباب گاز تحلیل کردند. نتایج نشان داد، تنش‌ها در منطقه دور از انفجار خطی باقی می‌مانند و کاویتاسیون در عمق کمتر اهمیت دارد [۸]. نصیری و همکاران نیز با ترکیب روش عددی و آزمایشگاهی، پاسخ دینامیکی لوله‌های انتقال زیر آب به انفجار را بررسی کرده و انطباق نتایج آزمایش و

قرار دادند. آزمایش‌ها فشار دینامیکی و رفتار فروپاشی را ثبت کردند، درحالی‌که مدل‌های اجزای محدود برای شبیه‌سازی کل فرایند توسعه یافتند. این مطالعه بینش ارزشمندی در مورد پاسخ پوسته‌های استوانه‌ای به بارگذاری‌های فشار ضربه‌ای ارائه کرد. درلی و همکاران با پیشنهاد یک روش FEA MDOF کارآمدتر با استفاده از Abaqus/Explicit به محدودیت‌های تحلیل انفجار لوله‌های سنتی پرداختند [۱۶]. رویکرد آن‌ها غیرخطی بودن را در نظر می‌گیرد و از یک ابزار اسکریپت‌نویسی برای تبدیل داده‌های موجود برای تحلیل سریع‌تر استفاده می‌کند. این روش در مقایسه با روش‌های سنتی نیاز به تکیه‌گاه‌های اضافی لوله را کاهش می‌دهد. امامزاده و همکاران پاسخ دینامیکی غیرخطی یک سکوی ثابت فراساحلی را تحت انفجارهای زیر آبی (UNDEX) در فواصل مختلف بررسی کردند [۱۷]. مدل آن‌ها تأثیر نوسانات حباب انفجار و برهم‌کنش آب بر فرکانس‌های طبیعی سکو را در نظر می‌گیرد. این مطالعه نشان داد که انفجارهای نزدیک میدان باعث آسیب موضعی می‌شوند، درحالی‌که رویدادهای میدان متوسط تا دور باعث ایجاد برش پایه قابل توجهی تا ۴۰ درصد بیشتر به دلیل قرار گرفتن منطقه وسیع تری در معرض فشار انفجار می‌شوند. یافته‌های آن‌ها بر اهمیت ارزیابی ریسک UNDEX و تقویت بالقوه اعضای سکو برای ایمنی سکوه‌های فراساحلی تأکید می‌کند. جورج و همکاران اثربخشی تعمیر کامپوزیتی زیر آبی با پلیمرهای تقویت‌شده با فیبر (FRP) برای اعضای سازه‌ای فرسوده فراساحلی را بررسی کردند [۱۷]. مطالعه تجربی آن‌ها بر اعضای لوله‌ای فولادی تحت بارهای محوری متحدالمرکز و خارج از مرکز نشان داد که تعمیرات زیر آبی می‌توانند به استحکام نهایی مشابه تعمیرات معمولی در هوا دست یابند. یک مدل اجزای محدود رفتار آزمایشی را با دقت پیش‌بینی کرد که نشان‌دهنده امکان‌پذیری تعمیرات FRP زیر آبی برای کاربردهای فراساحلی است. با این حال، تحقیقات بیشتری برای ارزیابی عملکرد بلندمدت و رفتار چرخه‌ای این تعمیرات لازم است (مهندسی سازه‌ها، بررسی تجربی و عددی تعمیر کامپوزیتی زیر آبی با پلیمرهای تقویت‌شده با فیبر در اعضای سازه‌ای فرسوده لوله‌ای فراساحلی تحت

بارهای محوری متحدالمرکز و خارج از مرکز). مطالعه هسو و همکاران استفاده از لایه‌های پلیمر تقویت‌شده با فیبر شیشه (GFRP) را برای سازه‌های کشتی تحت بارگذاری شوک زیر آبی بررسی کرد [۱۸]. آن‌ها خواص مواد به‌دست‌آمده از طریق آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی را مقایسه کردند و بر تأثیر نرخ کرنش بالا بر رفتار تنش-کرنش تأکید کردند. شبیه‌سازی‌های اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس نشان داد که خواص مواد دینامیکی منجر به پاسخ کرنش برجسته‌تر نسبت به خواص استاتیکی می‌شود. یافته‌های آن‌ها اهمیت در نظر گرفتن رفتار دینامیکی مواد را هنگام طراحی سازه‌های کامپوزیتی FRP برای مقاومت در برابر شوک زیر آبی نشان می‌دهد. لیو و همکاران خطوط لوله زیر دریا را تحت انفجارهای زیر آبی برای حذف مهمات منفجره عمل‌نکرده با استفاده از یک روش کوپله اویلری-لاگرانژی شبیه‌سازی می‌کنند [۱۹]. این روش بستر دریا را در نظر می‌گیرد و تأثیر آن را بر پاسخ خط لوله در جابه‌جایی‌های مختلف انفجار ثبت می‌کند. کار آن‌ها ابزاری ارزشمند برای بهبود ارزیابی‌های ایمنی در حین عملیات حذف مهمات منفجره عمل‌نکرده ارائه می‌دهد. کریستوفرسن و همکاران از C-4 زنده برای بررسی تأثیر بارگذاری انفجاری بر لوله‌های بتنی استفاده کردند که تهدیدات بالقوه برای تونل‌های شناور زیر آب را تقلید می‌کرد [۲۰]. آن‌ها مواد منفجره را داخل و خارج لوله‌های بدون تقویت منفجر کردند. دوربین‌های پرسرعت و حس‌گرها پاسخ را ثبت کردند. قابل توجه است که برای شکستن لوله هنگام انفجار خارجی به بار C-4 بزرگ‌تری نیاز بود که اثر محدودسازی بتن را نشان می‌دهد. لام و همکاران خطوط لوله لایه‌ای را بررسی کردند، نتایج در مورد پاسخ سازه‌های زیر آبی به بارگذاری شوک ارائه می‌دهد. مطالعه آن‌ها از یک مدل اندرکنش سیال-سازه برای تحلیل یک خط لوله زیر آبی ساده تحت انفجار زیر آبی استفاده می‌کند. پاسخ لوله به‌عنوان تغییر شکل محلی مشخص می‌شود که جهت شعاعی به دلیل مقاومت ضعیف‌تر نسبت به جهات محیطی تا ۳۰ درصد حالت‌های اولیه جابه‌جایی را تجربه می‌کند [۲۱]. این مطالعه همچنین تأثیر پارامترهایی مانند وزن خرج انفجار، فاصله مؤثر و طول لوله را بررسی

FRP بررسی کرده و به بهبود قابلیت اطمینان و ایمنی در شرایط محیطی مختلف اشاره کرده‌اند [۲۶]. داوری پور و همکاران استفاده از CFRP را برای کاهش تنش‌های حرارتی و جلوگیری از خستگی در خم‌های لوله‌های مدفون پیشنهاد داده‌اند و آن را برای مقاوم‌سازی لوله‌ها توصیه کردند [۲۷]. همچنین، زنگ و همکاران مدل‌سازی المان محدود پیشرفته‌ای برای لوله‌های زیر آب و محصور شده در FRP توسعه دادند که عملکرد مکانیکی و آسیب‌های متقابل این ساختارها را با دقت بالا پیش‌بینی می‌کند [۲۸]. به‌طور کلی در سال‌های اخیر روش‌های شبیه‌سازی متنوعی توسعه داده شده‌اند که می‌تواند انفجار زیر آب را با تخمین قابل قبولی شبیه‌سازی کند که در این تحقیق از روش UNDEX استفاده شده است [۲۹ و ۳۰]. به‌طور کلی استفاده از GFRP برای مقاوم‌سازی اجزای تحت انفجار مرسوم است ولی بررسی پیکربندی متفاوت استفاده از آن همچنان مورد بررسی نبوده که در این تحقیق برای انفجار زیر آب مورد مطالعه قرار گرفت.

## ۲. مواد و روش‌ها

این پژوهش به منظور بررسی رفتار دینامیکی خطوط لوله فولادی زیر آبی تحت بارگذاری انفجارهای زیر آبی، با بهره‌گیری از روش عددی تحلیل اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس صورت گرفت. برای شبیه‌سازی انفجار، از روش استاندارد UNDEX استفاده خواهد شد که روشی معتبر برای مدل‌سازی پدیده‌های ناشی از انفجارهای زیر آبی است [۲۹]. در این روش، انتقال انرژی انفجار در محیط آب و اثرات متقابل موج شوک و حباب انفجار با ساختار در نظر گرفته می‌شود. ابتدا مدل اجزای محدود با استفاده از داده‌های معتبر از پژوهش‌های پیشین صحت‌سنجی می‌شود تا دقت شبیه‌سازی تضمین شود. سپس، سه سناریوی انفجار زیر آبی با مقادیر مختلف TNT در فاصله ۵ متری از خطوط لوله شبیه‌سازی خواهد شد. برای بررسی تأثیر تقویت، پیکربندی‌های مختلف تقویت با GFRP شامل پوشش پیوسته، حلقه‌های گسسته و سایر الگوهای تقویتی بر روی خطوط لوله اعمال شد. در ادامه، پاسخ دینامیکی خطوط لوله

کرد. لیانگ و تای از رویکرد ترکیبی اجزای محدود و برای شبیه‌سازی پاسخ شوک تحت انفجارهای زیر آبی استفاده کردند [۲۲]. این روش تئوری دینامیکی همبسته، غیرخطی‌های هندسی، پلاستیک مواد و برهمکنش سیال-سازه را در بر گرفت. این مطالعه تشکیل منطقه پلاستیک و الگوهای تغییر شکل بدنه را شناسایی کرد که به طراحی کشتی‌های جنگی با مقاومت بهبود یافته در برابر آسیب شوک زیر آبی کمک می‌کند. لیو و همکاران یک رویکرد المان محدود اولیری پیوسته برای شبیه‌سازی انفجارهای زیر آبی معرفی کردند [۲۳]. این روش بر محدودیت‌های روش‌های قبلی با شبیه‌سازی کل انفجار (شوک و حرکت حباب) به‌عنوان یک فرایند واحد بررسی شده است. مدل آن‌ها کل توالی انفجار را ثبت می‌کند و بر ارزش شبیه‌سازی پیوسته برای حرکت دقیق حباب در نزدیکی دیوارها تأکید می‌کند. پنگ و همکاران رویکرد عددی برای شبیه‌سازی آسیب ناشی از انفجارهای زیر آبی نزدیک منبع انفجار را ارائه می‌دهند [۲۴]. روش آن‌ها هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) را برای سیال استفاده کرده است. جنبه کلیدی کار آن‌ها الگوریتم تشخیص تماس برای فرمولاسیون پیوسته است که برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌های بزرگ در حین انفجارهای زیر آبی ضروری است. آن‌ها از یک روش شار نرمال استفاده می‌کنند و ساختار را به‌عنوان یک مرز متحرک برای سیال و فشار سیال به‌عنوان بار روی ساختار در نظر می‌گیرند. کو و همکاران از یک مدل سه‌بعدی اجزای محدود برای شبیه‌سازی تأثیر بارهای غیر کروی بر توزیع فشار انفجار زیر آبی استفاده می‌کنند [۲۵]. کار آن‌ها بر تأثیر شکل و جهت‌گیری بر فشار تأکید می‌کند و انحرافات قابل توجهی از بارهای کروی پیدا می‌کند این انحرافات بیشتر از ۲۵ درصد می‌تواند باعث خطا در نتایج شود. این بر اهمیت در نظر گرفتن این عوامل در طراحی انفجار زیر آبی تأکید می‌کند. مطالعات دیگری نشان داده‌اند که استفاده از مواد کامپوزیتی FRP برای تقویت و تعمیر خطوط لوله در صنعت نفت و گاز دریایی به دلیل مقاومت به خوردگی و نسبت بالای استحکام به وزن، مؤثر است. نقش شبیه‌سازی اجزای محدود را در پیش‌بینی عملکرد خطوط لوله تقویت‌شده با

از جنبه‌هایی مانند توزیع تنش، تغییر شکل موضعی و حالات خرابی ارزیابی می‌شود. همچنین، تأثیر پیکربندی‌های مختلف تقویت در کاهش تنش و تغییر شکل ناشی از انفجار مقایسه خواهد شد.

### ۳. تئوری و محاسبات

#### موج شوک انفجار

برای تعیین موج شوک ایجادشده در اثر انفجار زیر آب، تئوری‌ها و روابط تجربی متعددی ارائه شده است. از جمله مهم‌ترین این تئوری‌ها می‌توان به مدل‌های بت-کرکود<sup>۱</sup> و پنی<sup>۲</sup> اشاره کرد [۳۱]. موج شوک ایجادشده در هر نقطه، فشار حداکثری در حدود ۷-۷ مگاپاسکال را تجربه می‌کند که در کمتر از ۱۰ میکروثانیه از لحظه انفجار ایجاد می‌شود و سپس به صورت نمایی کاهش می‌یابد.

$$P_m = 52.16 \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{1.13} \quad (1)$$

در شرایط متقارن کروی، حداکثر فشار شوک مرتبط با ماده منفجره TNT را می‌توان با استفاده از رابطه تجربی زیر (برحسب مگاپاسکال) محاسبه کرد

$$P(t) = P_m e^{-t/\theta} \quad (2)$$

که در آن W وزن ماده منفجره TNT برحسب کیلوگرم و R فاصله از نقطه انفجار برحسب متر است و t زمان برحسب ثانیه است.

در این رابطه،  $\theta$  ثابت زمانی است (زمانی که فشار به مقدار  $P_m/e$  می‌رسد) که می‌توان آن را با استفاده از رابطه تجربی زیر (برحسب میکروثانیه) محاسبه کرد [۱۶].

$$\theta = 96.5 (W^{1/3}) \left( \frac{W^{1/3}}{R} \right)^{-0.22} \quad (3)$$

روش انفجاری (UNDEX) مخصوص بارگذاری بر روی سازه‌هایی است که در آب شناور یا غوطه‌ور هستند. در این روش نیاز به محاسبه تاریخچه فشار در نقاط مشخصی دارد؛ این نقاط به فاصله مشخصی از سازه و منبع انفجار واقع می‌شوند. این نقطه به نام "stand-off" شناخته می‌شود و فاصله بین این نقطه و منبع انفجار به عنوان "stand-off"

"distance" شناخته می‌شود. به منظور بهینه‌سازی و ذخیره زمان، تحلیل نقطه "stand-off" یا در روی سطح جامد یا نزدیک به آن در نظر گرفته می‌شود تا در آنجا موج شوک انفجاری منعکس شود. با توجه به اصول شبیه‌سازی، اگر ابعاد خطی خرج و دیگر طول‌ها به یک نسبت یکسان تغییر دهند، موج ضربه در فواصل متناظر بر اساس این نسبت فشار یکسانی خواهد داشت. این اصل به ما راهنمایی می‌کند تا به سمت یک روش ساده برای پیشرفت در شبیه‌سازی حرکت موج‌ها در سیستم‌های انفجاری برویم. در روابط زیر فشار ناشی از انفجار یک ماده منفجره تشریح و تعیین شده است:

$$P(R, t) = P_c \left[ \frac{a_c}{R} \right]^{1+A} f(\tau) \quad (4)$$

$$\tau = \left[ \frac{a_c}{R} \right]^B \frac{V_c t}{a_c} \quad (5)$$

در این روابط R فاصله stand-off distance، فاصله از مرکز جرم مواد منفجره با شعاع  $a_c$  و همچنین  $P_c$  و  $V_c$  و A و B ثابت‌های مرتبط به جنس هر انفجار و t نیز زمان است.

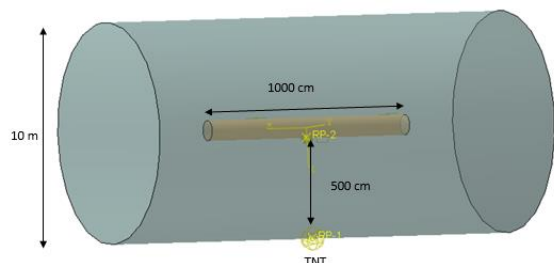
#### شبیه‌سازی عددی اجزا محدود

##### اعتبارسنجی با نرم‌افزار آباکوس

برای اعتبارسنجی مدل عددی، با توجه به ماهیت دینامیکی مسئله و تمرکز بر انفجارهای زیر آبی، پژوهش جین و همکاران به‌عنوان مقاله اعتبارسنجی انتخاب شده است که نمونه آن شبیه‌سازی و سپس اعتبارسنجی شده است. این مطالعه پاسخ بدنه بهینه‌شده تقویت‌شده با حلقه برای وسایل نقلیه کوچک زیر آبی تحت انفجارهای زیر آبی را بررسی کرد [۳۲ و ۳۳]. هدف، به حداقل رساندن وزن بدنه در عین افزایش استحکام آن برای مقاومت در برابر فشار هیدرواستاتیک، بارهای انفجار زیر آبی و سایر بارهای محیطی بود. آنان از یک روش بهینه‌سازی قوی برای طراحی بدنه فشار یک وسیله نقلیه زیر آبی بدون سرنشین با بدنه استوانه‌ای تقویت‌شده با حلقه و کلاهک‌های کروی تحت فشار هیدرواستاتیک استفاده کردند. پس‌از آن، یک مدل اجزای محدود از وسیله نقلیه برای شبیه‌سازی و تحلیل پاسخ دینامیکی گذرای بدنه فشار تحت فشار موج شوک ناشی از انفجار زیر آبی ایجاد شد. مدل اجزای محدود مورد استفاده

### شبیه‌سازی خط لوله

یک لوله زیر آب با قطر ۹۶ سانتی‌متر، ضخامت ۲۸ میلی‌متر و طول ۱۰ متر مدل‌سازی شد. لوله در یک محیط پر از آب غوطه‌ور بود، به طوری که مرکز آن ۵ متر زیر سطح آب قرار داشت. بار انفجاری نیز در عمق ۵ متری قرار داده شد و از نظر جرم تی‌ان‌تی تغییر یافت. شکل ۳ شماتیکی از لوله و محیط سیال اطراف آن را نشان می‌دهد.



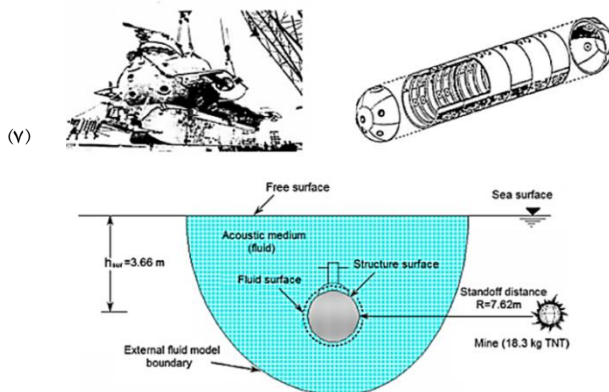
شکل ۳. جزئیات ابعادی در لوله و محیط سیال شبیه‌سازی شده در آباکوس

برای مدل‌سازی پوسته خط لوله از عنصر پوسته چهار گرهی S4R با شش درجه آزادی در هر گره (سه انتقال و سه چرخش) استفاده شد. اتصال عناصر به گونه‌ای است که هر نرمال پوسته به سمت سیال خارجی جهت‌گیری شده است. دامنه سیال خارجی با استفاده از عناصر تتراهدرال آکوستیک چهار گرهی از نوع AC3D4 مش‌بندی شده است.

### مشخصات مصالح

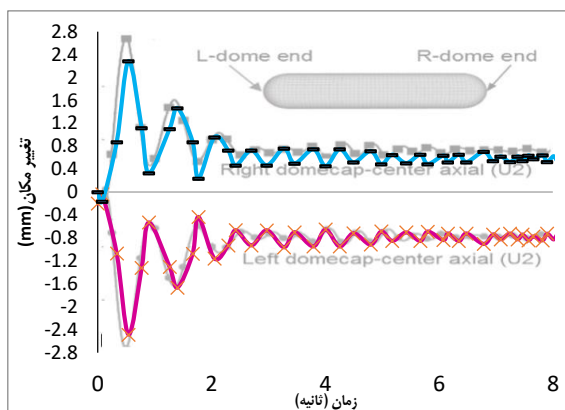
در این پژوهش از فولاد API 5L X70 برای لوله استفاده شد. با توجه به نرخ بالای بارگذاری مرتبط با انفجارهای زیر آبی، پاسخ ماده به‌طور قابل‌توجهی از رفتار شبه استاتیکی آن منحرف می‌شود. برای در نظر گرفتن این موضوع، از مدل کوپر-سیمونز برای در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش در مدل ماده استفاده شد. مدل کوپر-سیمونز یک عامل سخت شدن دینامیکی (DHF) را برای مقیاس کردن تنش تسلیم استاتیکی برای به دست آوردن تنش تسلیم دینامیکی معرفی می‌کند. این رابطه در معادله (۶) بیان شده است. علاوه بر این، برای در نظر گرفتن کاهش انعطاف‌پذیری تحت بارگذاری دینامیکی، از مدل جونز برای اصلاح کرنش شکست استفاده شد، همان‌طور که در معادله (۷) ارائه شده است. پارامترهای مدل

در این مطالعه، نمایش ساده‌ای از وسایل نقلیه شناور زیر آبی تحت شوک انفجار زیر آبی بود، همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است. روش شبیه‌سازی انفجار زیر آبی به کار رفته در این مقاله UNDEX بود که مشابه روشی است که در این تحقیق استفاده شده و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس اعتبارسنجی شده است.



شکل ۱. سناریوی انفجار برای شناور زیر دریایی

مقایسه نتایج نشان داد که نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و شبیه‌ساز انفجار زیر آبی UNDEX می‌توانند نتایج مقاله را تا با خطای حداکثر ۵ درصد پیش‌بینی کنند. شکل ۲ (الف) تغییر شکل شناور زیر آبی را در نقاط اولیه و نهایی تحت نظارت نشان می‌دهد که حداکثر اختلاف در نتایج به ۶ درصد می‌رسد. علاوه بر این، کانتورهای کرنش پلاستیک در شکل ۲ (ب) ارائه شده است. در حالی که مدل تقریب خوبی ارائه می‌دهد، مهم است که توجه داشته باشیم که اختلاف ۶ درصدی نشان‌دهنده محدودیت‌های بالقوه در درک کامل پیچیدگی پدیده انفجار زیر آبی است.



شکل ۲. (الف) مقایسه تغییر مکان تحت شبیه‌سازی مقاله و شبیه‌سازی با آباکوس (ب) کرنش پلاستیک تحت شبیه‌سازی با آباکوس

جدول ۱. مشخصات GFRP به صورت لمینیت [۲۳]

E <sub>11</sub> (GPa)	E <sub>22</sub> (GPa)	E <sub>33</sub> (GPa)	μ <sub>12</sub>	μ <sub>13</sub>	μ <sub>23</sub>	پارامتر
48.6	8.5	8.5	0.33	0.33	0.38	مقدار
X <sub>T</sub> (MPa)	X <sub>C</sub> (MPa)	Y <sub>T</sub> (MPa)	S <sub>23</sub> (MPa)			پارامتر مقاومت
1900	550	43	50			مقدار

#### ۴. یافته‌ها

##### نتایج تحلیل اجزای محدود

در این تحقیق ابتدا سه سناریوی انفجاری با جرم TNT متفاوت از فاصله ۵ متری بررسی شده است و مدل بحرانی‌تر (با جرم تی ان تی بیشتر) جهت مقاوم‌سازی در نظر گرفته می‌شود. زمان در نظر گرفته شده برای انفجار ۰/۰۰۲ ثانیه است که در شکل ۴ تشکیل حباب انفجار در سیال به‌سوی لوله نشان داده شده است همچنین در شکل‌های زیر مقدار انرژی جنبشی و انرژی کرنشی لوله با توجه به خرج انفجار متفاوت آورده شده است.

تحلیل سناریوهای انفجار شامل ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم بار انفجاری تی ان تی در ۵ متری زیر آب، نشان داد که انرژی کرنشی لوله در فاز اولیه تا ۰/۰۰۱ ثانیه پس از انفجار کمتر از ۵ درصد اختلاف داشت. حداکثر اختلاف در انرژی کرنشی در حدود ۰/۰۰۱۶ ثانیه پس از انفجار مشاهده شد. در رابطه با انرژی جنبشی استخراج شده از نرم‌افزار (نمایش داده شده توسط ALLKE)، مشخص شد که در بین سناریوهای تحلیل شده، در ۰/۰۰۰۴ ثانیه پس از انفجار، اختلاف انرژی

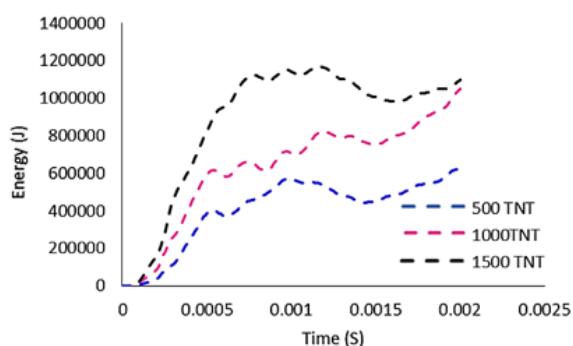
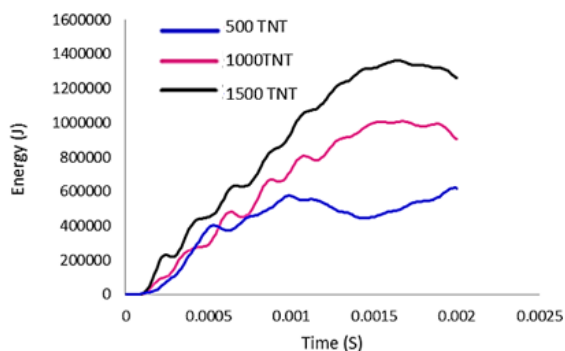
C و p که حساسیت نرخ کرنش ماده را کنترل می‌کنند، با ادغام این مدل‌های مواد، تحلیل با هدف ارائه نمایش واقع‌گرایانه‌تری از رفتار خط لوله تحت شرایط بارگذاری ضربه ناشی از انفجارهای زیر آبی انجام شد.

$$\sigma_y^d = \sigma_y^s \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^1 / p \right] \quad (6)$$

$$\epsilon_f^d = \xi \cdot \epsilon_f^s \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}^1}{C} / p \right) \right]^{-1} \quad (7)$$

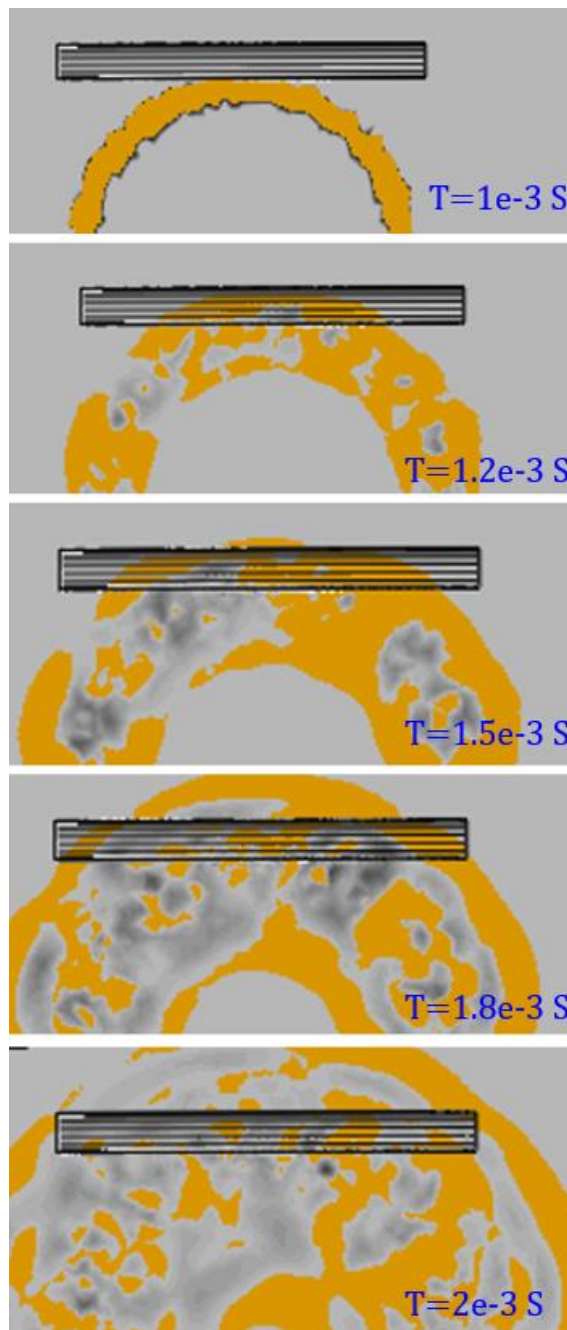
برای مدل‌سازی دقیق خواص آب، از یک معادله حالت (EOS) استفاده شد که در آن چگالی ثابت ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و ویسکوزیته ۰/۰۰۱ پاسکال ثانیه در نظر گرفته شد. ماده GFRP به‌عنوان یک لایه‌لایه مدل‌سازی شد که با یافته‌های لی و همکاران [۲۳] مطابقت دارد. معیار شکست هاشین برای توصیف رفتار شکست کامپوزیت GFRP به کار گرفته شد. برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی مواد تحت بارگذاری دینامیکی، از مدل کوپر-سیمونز استفاده شد که در آن تنش تسلیم دینامیکی (مقاومت تحت بارگذاری با نرخ کرنش بالا) با در نظر گرفتن تنش تسلیم استاتیکی (مقاومت تحت بارگذاری با نرخ کرنش پایین) و نرخ کرنش (سرعت تغییر شکل) و ثابت‌های مواد C و P (تأثیرگذار بر حساسیت نرخ کرنش) محاسبه می‌شود. همچنین، برای در نظر گرفتن کاهش انعطاف‌پذیری تحت بارگذاری دینامیکی، کرنش شکست دینامیکی (حداکثر کرنش قبل از شکست تحت نرخ کرنش بالا) با استفاده از مدل جونز و بر اساس کرنش شکست استاتیکی (حداکثر کرنش قبل از شکست تحت نرخ کرنش پایین) محاسبه شده است.

فشار و تنش بر روی لوله در طول انفجارهای زیر آبی می‌شود. علاوه بر این، چگالی آب به‌طور قابل توجهی بالاتر از هوا است که مقاومت آب در برابر تغییر شکل و انتشار امواج شوک را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، آب به‌عنوان یک خنک‌کننده طبیعی عمل می‌کند و از گرم شدن بیش‌ازحد لوله در طول انفجار جلوگیری می‌کند. گرم شدن بیش‌ازحد می‌تواند لوله را ضعیف و شکننده کند.



شکل ۵. الف) انرژی جنبشی لوله تحت انفجار (ب) انرژی کرنشی لوله تحت انفجار

نمودار نشان‌دهنده تغییرات انرژی (به‌خصوص انرژی جنبشی و انرژی فشار) در اثر انفجار است. این انرژی معمولاً با گذشت زمان به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد و سپس به علت کاهش فشار و اثرات جاب‌های انفجاری، کاهش پیدا می‌کند. در ابتدا، یک پیک بزرگ انرژی مشاهده می‌شود که ناشی از شوک اولیه انفجار است. این انرژی به‌سرعت به سطح لوله منتقل می‌شود و باعث ایجاد فشار بالا و همچنین ایجاد امواج شوک در آب می‌شود. این انرژی به سطح لوله منتقل می‌شود و باعث ایجاد تنش‌ها، کرنش‌ها و آسیب‌های مکانیکی در لوله می‌گردد. در تحلیل دینامیکی، می‌توان این



شکل ۴. تشکیل جاب انفجار در روش شبیه‌سازی اجزای محدود UNDEX

جنبشی کمتر از ۵ درصد بود. حداکثر اختلاف انرژی جنبشی بین سناریوهای ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در ۰/۰۰۰۸ ثانیه پس از انفجار رخ داد. به‌عنوان مثال، بر اساس نتایج عددی به‌دست آمده، انرژی جنبشی ۱۲۰۰۰۰۰ واحد می‌تواند حفره‌ای به قطر تقریبی ۱ متر و عمق ۶۰۰ سانتی‌متر در خاک ایجاد کند. انفجارهای زیر آبی به دلیل اثر میرایی آب بر روی امواج شوک، می‌توانند موج انفجار را به میزان قابل توجهی تضعیف و پراکنده کنند. این امر منجر به کاهش



### مقاوم‌سازی لوله مورد مطالعه با GFRP

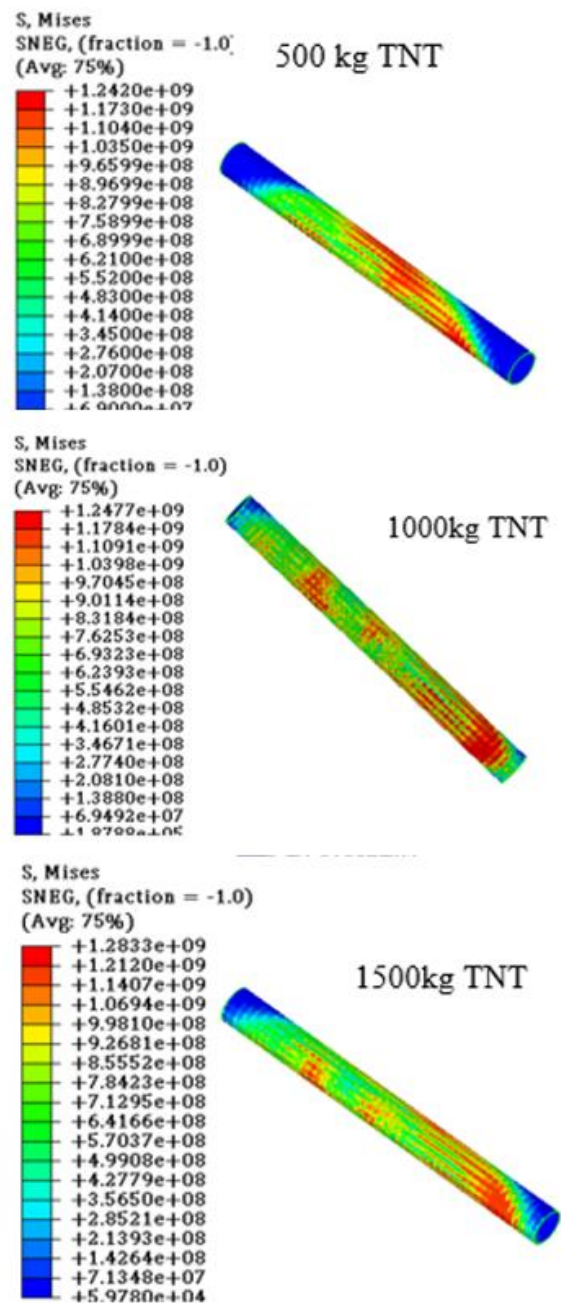
برای افزایش ظرفیت لوله، دو لایه ورق FRP به ضخامت ۳ میلی‌متر در مرحله دوم تحلیل به سازه چسبانده شدند. این ورق‌ها به صورت عمود بر هم قرار گرفتند و تحت الگوهای تقویت مختلف قرار گرفتند. نحوه مدل‌سازی آن به صورت استفاده از المان S4R به طوری که بردار نرمال آن مماس با لوله باشد و با تکنیک لایه‌بندی همسان با زوایای متفاوت صورت گرفته است. اندرکنش در نظر گرفته شده بین لوله و این صفحات Tie می‌باشد. نمایش شماتیک مدل‌های تقویت پیشنهادی در شکل ۷ ارائه شده است. یک مطالعه پارامتری برای ارزیابی عملکرد پیکربندی‌های مختلف تقویت FRP بر روی لوله‌های غوطه‌ور تحت بارگذاری انفجاری انجام شد. پنج مدل عددی برای این منظور توسعه یافت. مدل پایه، PIPE، یک لوله بدون تقویت را نشان می‌داد. برای ارزیابی تأثیر تقویت گسسته، مدل‌های PIPE و P+GFRP2 ایجاد شدند که شامل حلقه‌های FRP به عرض ۵۰ و ۲۰ سانتی‌متر با فاصله ۵۰ و ۹۰ سانتی‌متر در طول لوله بودند. یک پیچش مارپیچی FRP پیوسته با گام ۵۰۰ سانتی‌متر و عرض ۲۵ سانتی‌متر در مدل P+GFRP3 برای شبیه‌سازی توزیع تقویت یکنواخت‌تر استفاده شد. در نهایت، مدل P+GFRP4 یک لوله کاملاً پوشیده شده با FRP را نشان داد. با مقایسه پاسخ‌های این مدل‌ها، می‌توان پیکربندی تقویت بهینه برای کاهش اثرات انفجارهای زیر آبی را تعیین کرد.



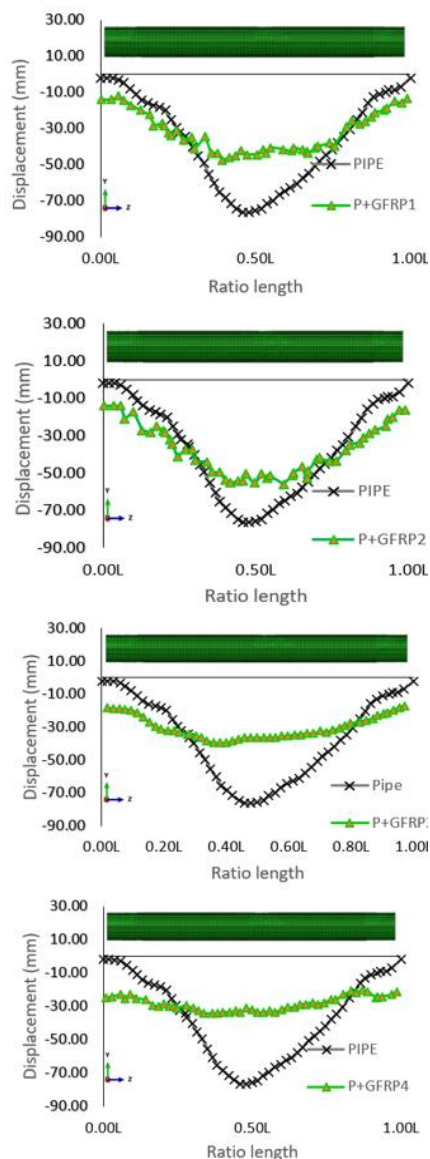
شکل ۷. شکل پیکربندی‌های متفاوت مقاوم‌سازی با GFRP

تحلیل مقایسه‌ای رفتار تغییر شکل پنج مدل لوله تحت انفجارهای زیر آبی، تغییرات قابل توجهی در پاسخ ساختاری آن‌ها را نشان داد. لوله بدون تقویت، PIPE، شدیدترین تغییر شکل را با حداکثر جابه‌جایی ۷۶ میلی‌متر نشان داد، همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است. این مدل کرنش پلاستیک موضعی را نشان داد که نشان‌دهنده آسیب احتمالی ساختاری، به ویژه در نزدیکی انفجار است. مدل‌های PIPE و P+GFRP2 که با حلقه‌های FRP گسسته تقویت شده بودند،

تغییرات انرژی را به طور مستقیم با جابه‌جایی‌ها و شکست‌های ماده مرتبط کرد. نتایج گرافیکی به وضوح نشان می‌دهند که توزیع تنش و میزان آسیب در سناریوهای مختلف انفجار به طور قابل توجهی متفاوت است. شکل ۶ تصویری از توزیع تنش فون میسس و کرنش پلاستیک در لوله را ارائه می‌دهد که نشان‌دهنده افزایش سطح آسیب است.



شکل ۶. توزیع تنش تحت سه سناریوی انفجاری



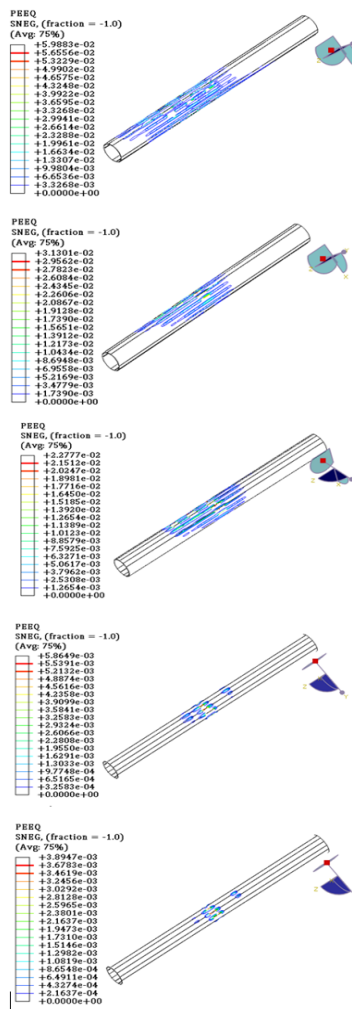
شکل ۸. مقایسه تغییر مکان لوله بعد و قبل از مقاوم سازی

### توزیع تنش در لوله

توزیع تنش در هر مدل لوله در شکل ۹ نشان داده شده است. لوله بدون تقویت، PIPE، تنش‌های موضعی بالایی در نزدیکی انفجار نشان داد که منجر به توسعه کرنش‌های پلاستیک گسترده شد. مدل‌های PIPE و P+GFRP2 که با حلقه‌های FRP گسسته تقویت شده بودند، کاهش تنش‌های پیک نسبت به PIPE را نشان دادند. باین‌حال، تنش‌های موضعی هنوز در گوشه‌های حلقه‌های FRP و در رابط بین FRP و لوله مشاهده شد. مدل P+GFRP3 با پیچش مارپیچی پیوسته FRP، توزیع تنش یکنواخت‌تری را ارائه کرد که احتمال تنش‌های موضعی را کاهش داده و عملکرد کلی

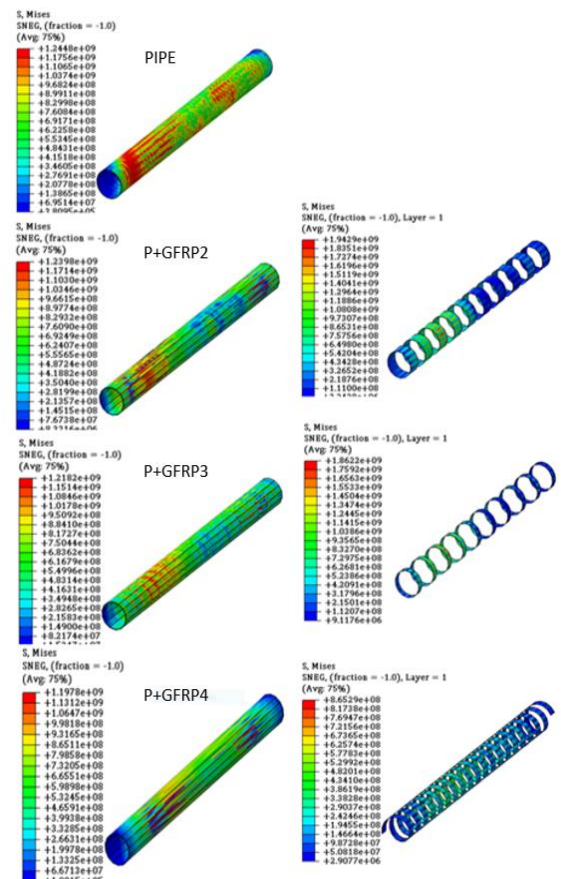
کاهش تغییر شکل حداکثر نسبت به PIPE را نشان دادند. باین‌حال، هر دو مدل تنش‌های موضعی در رابط FRP-لوله، به‌ویژه در نزدیکی منطقه انفجار، نشان دادند. PIPE با حلقه‌های بزرگ‌تر و فاصله‌دارتر، حداکثر جابه‌جایی تقریبی ۴۳ میلی‌متر را تجربه کرد. P+GFRP2 با حلقه‌های کوچک‌تر و فاصله نزدیک‌تر، عملکرد کمی بهتر نشان داد اما همچنان الگوهای تغییر شکل غیریکنواختی را نشان داد که نشان‌دهنده آسیب موضعی بالقوه تحت شرایط بارگذاری شدیدتر است. مدل P+GFRP3 با پیچش مارپیچی پیوسته FRP، بهبود قابل توجهی در رفتار تغییر شکل نسبت به مدل‌های تقویت شده گسسته نشان داد. حداکثر جابه‌جایی به ۳۶ میلی‌متر کاهش یافت و تنش‌های موضعی به‌طور قابل توجهی کاهش یافت. تقویت پیوسته توزیع بار یکنواخت‌تر و افزایش یکپارچگی ساختاری کلی لوله را فراهم کرد. در نهایت، مدل P+GFRP4 با پوشش کامل FRP، قوی‌ترین عملکرد را نشان داد. حداکثر جابه‌جایی به ۳۵ میلی‌متر کاهش یافت که نشان‌دهنده کاهش ۵۲ درصدی نسبت به لوله بدون تقویت است. توزیع یکنواخت FRP در اطراف محیط لوله منجر به توزیع تنش یکنواخت‌تر و حداقل تغییر شکل پلاستیک شد. درحالی‌که این مدل مؤثرترین محافظت در برابر بارگذاری انفجاری را ارائه کرد در نتیجه، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از تقویت FRP می‌تواند رفتار تغییر شکل لوله‌های غوطه‌ور تحت انفجارهای زیر آبی را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد. پیچش مارپیچی پیوسته FRP (P+GFRP4) مؤثرترین پیکربندی ثابت شد که محافظت برتر در برابر بارگذاری انفجاری را ارائه می‌دهد. باین‌حال، استراتژی تقویت بهینه به عوامل مختلفی از جمله شدت انفجار مورد انتظار، هزینه مواد و نصب و الزامات خاص کاربرد بستگی دارد.

کاهش گسترده‌تری کلی کرنش پلاستیک نسبت به PIPE را نشان دادند. با این حال، کرنش‌های پلاستیکی موضعی هنوز در رابط بین حلقه‌های FRP و لوله مشاهده شد که نشان‌دهنده احتمال جدا شدن یا شکست در این مناطق تحت شرایط بارگذاری شدیدتر است. مدل P+GFRP3 با پیش‌ساز مارپیچی پیوسته FRP، کاهش قابل توجهی در کرنش پلاستیک نسبت به مدل‌های تقویت‌شده گسسته نشان داد. تقویت پیوسته به‌طور مؤثر بار را توزیع کرد و توسعه مناطق پلاستیک موضعی را محدود کرد. مدل P+GFRP4 با پوشش کامل FRP، کمترین میزان کرنش پلاستیک را نشان داد که نشان می‌دهد پوشش کامل مؤثرترین محافظت در برابر تغییر شکل پلاستیک را ارائه می‌دهد. این یافته‌ها اهمیت تقویت پیوسته در کاهش کرنش پلاستیک و افزایش یکپارچگی کلی ساختاری لوله را برجسته می‌کند.



شکل ۱۰. کرنش پلاستیک در لوله‌ها در پیکربندی متفاوت GFRP

ساختاری لوله را بهبود بخشید. مدل P+GFRP4 با پوشش کامل FRP، یکنواخت‌ترین توزیع تنش را با حداقل تنش‌های موضعی نشان داد. لایه پیوسته FRP به‌طور مؤثر بارها را در اطراف محیط لوله منتقل کرد که منجر به پاسخ شکل‌پذیرتر شد. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از تقویت پیوسته FRP می‌تواند توزیع تنش را به‌طور قابل توجهی بهبود بخشد و احتمال خرابی‌های مرتبط با تنش در لوله‌های غوطه‌ور تحت بارگذاری انفجاری را کاهش دهد.



شکل ۹. توزیع تنش در لوله و در GFRP در مدل‌های مورد مطالعه

### آسیب پلاستیک در لوله‌ها

شکل ۱۰ توزیع کرنش پلاستیک در هر مدل لوله پس از رخداد بارگذاری انفجاری را نشان می‌دهد. لوله بدون تقویت، PIPE، گسترده‌ترین مناطق کرنش پلاستیک را نشان داد که نشان‌دهنده آسیب قابل توجه مواد است. تمرکز کرنش پلاستیک به‌ویژه در نزدیکی انفجار، جایی که ماده از حد الاستیک خود فراتر رفته بود، برجسته بود. مدل‌های PIPE و P+GFRP2 که با حلقه‌های FRP گسسته تقویت شده بودند،

- strengthened with CFRP under 3-point bending. Thin-walled structures. 2012 Apr 1;53:58-71.
- [4]. Xiong CN, Shao YB, Tong LW, Dai KS, Luo YX. Static strength of CFRP-strengthened preloaded circular concrete-filled steel tube stub columns, Part I: Experimental test. Thin-Walled Structures. 2023 Mar 1;184:110546.
- [5]. Alshamrani S, Rasheed HA, Salahat FH, Borwankar A, Divilbiss N. Seismic flexural behavior of CFRP strengthened reinforced concrete beams secured with fiber anchors. Engineering Structures. 2024 Apr 15;305:117728.
- [6]. Yu J, Xu W, Yu Y, Fu F, Wang H, Xu S, Wu S. CFRP strengthening and rehabilitation of inner corroded steel pipelines under external pressure. Journal of Marine Science and Engineering. 2022 Apr 26;10(5):589.
- [7]. Mokhtari M, Nia AA. The application of CFRP to strengthen buried steel pipelines against subsurface explosion. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 2016 Aug 1;87:52-62.
- [۸]. قادی صاحبی رامین، سلامت پور سیاوش. بررسی انفجار در زیر آب و اثر آن بر زیر دریایی. ارائه شده در: پنجمین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در علوم و مهندسی؛ ۱۳۹۹؛ تهران.
- [۹]. نصیری حمید، اسدیان قهفرخی محمد، قدسی حسن آباد مجید و بهمن پور امین. بررسی پاسخ دینامیکی لوله انتقال زیر آب تحت اثر انفجار به روش آزمایشگاهی و عددی. آنالیز سازه- زلزله. ۱۴۰۱؛ ۱۹(۲).
- [۱۰]. عباسی محمودرضا. مروری بر پدیده‌های فیزیکی حاصل از انفجار زیر آب. ارائه شده در: نهمین همایش ملی علوم و مهندسی دفاعی با محوریت فناوری‌های دانش‌بنیان دفاعی؛ ۱۴۰۱؛ تهران.
- [۱۱]. شیاوسی محمد، شانه‌ساززاده احمد. مطالعه انتشار موج فشاری ناشی از انفجار در زیر آب. ارائه شده در: هفتمین همایش بین‌المللی صنایع فراساحل؛ ۱۳۹۶؛ تهران.
- [۱۲]. وهاب رجائی جلال، حسینی مراغه سید احمد، خامچین مقدم فرهاد. تحلیل انفجار زیرزمینی بر روی لوله فولادی خط انتقال آب به کمک نرم‌افزار آباکوس. ارائه شده در: هفتمین کنفرانس ملی فناوری‌های نوین در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی؛ ۱۳۹۹؛ تهران.
- [۱۳]. پاسبانی خیاوی مجید، نصراله زاده گوکه آمنه. بررسی روند انتشار موج ناشی از انفجار زیر آب با استفاده از

## ۵. نتیجه گیری

این مطالعه از شبیه‌سازی‌های عددی برای ارزیابی اثربخشی یکپارچگی‌های مختلف تقویت GFRP در کاهش تأثیر انفجارهای زیر آبی بر خطوط لوله غوطه‌ور استفاده کرد. نتایج به‌وضوح نشان می‌دهند که سیستم‌های تقویت‌شده با GFRP یکپارچگی ساختاری را به‌طور قابل‌توجهی هنگام قرار گرفتن در معرض بارگذاری انفجاری افزایش می‌دهند. یک تحلیل مقایسه‌ای نشان داد که یک پیچش مارپیچی پیوسته GFRP عملکرد بهتری نسبت به استراتژی‌های تقویت دیگر داشته و حداکثر تغییر شکل محلی را بیش از ۵۰ درصد نسبت به خط پایه بدون تقویت کاهش می‌دهد. درحالی‌که حلقه‌های گسسته FRP تا حدی محافظت ارائه می‌دهند، تنش‌های موضعی در رابط حلقه-لوله اثربخشی کلی آن‌ها را به خطر می‌اندازد. در نتیجه، ادغام تقویت GFRP، به‌ویژه به شکل پیچش پیوسته، رویکردی امیدوارکننده برای بهبود مقاومت در برابر انفجار خطوط لوله غوطه‌ور ارائه می‌دهد. با این حال، طراحی تقویت بهینه به عوامل مختلفی از جمله شدت مورد انتظار رویداد انفجاری، ملاحظات اقتصادی و محدودیت‌های محیطی بستگی دارد. تحقیقات بیشتر می‌تواند تأثیر مواد مختلف GFRP، تکنیک‌های چسبندگی و سناریوهای بارگذاری بر عملکرد کلی خطوط لوله تقویت‌شده را بررسی کند.

## سپاسگزاری

بدین وسیله از داوران و ویراستاران محترم نشریه هیدروفیزیک کمال تشکر را داریم.

## مراجع

- [1]. Elchalakani M, Karrech A, Basarir H, Zhao XL, Fawzia S, Hassanein MF. Strengthening of mild steel struts using CFRP sheets subjected to uniform axial compression. Thin-Walled Structures. 2017 Jul 1;116:96-112.
- [2]. Bambach MR, Elchalakani M. Plastic mechanism analysis of steel SHS strengthened with CFRP under large axial deformation. Thin-walled structures. 2007 Feb 1;45(2):159-70.
- [3]. Elchalakani M, Fernando D. Plastic mechanism analysis of unstiffened steel I-section beams

- [24]. Liu WT, Ming FR, Zhang AM, Miao XH, Liu YL. Continuous simulation of the whole process of underwater explosion based on Eulerian finite element approach. *Applied Ocean Research*. 2018 Nov 1;80:125-35.
- [25]. Peng YX, Zhang AM, Ming FR. Numerical simulation of structural damage subjected to the near-field underwater explosion based on SPH and RKPM. *Ocean Engineering*. 2021 Feb 15;222:108576.
- [26]. Shahid MDA, Hashim MHM, Mustafa, WAW, Fadzil NM, Muda MF. Finite Element Analysis (FEA) of Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Repair Performance for Subsea Oil and Gas Pipelines: The Recent Brief Review (2018–2022). *Applied Research and Technology*. 2023; 32(3):366-79.
- [27]. Davaripour F, Roy K, Maghoul P. Application of CFRP wrap for reinforcing undamaged thin-walled pipe bends under thermal expansion loads. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*. 2022 Nov 1;13(4):04022040.
- [28]. Zeng Y, Xu L, Huang L, Yu M, Yu C, Chi Y. A refined finite element model for UHPC-filled FRP tube column. *Composite Structures*. 2023 Oct 15;322:117393.
- [29]. Qu Y, Wu J, Xu B, Li Q. Evaluating the shape and orientation effect of non-spherical charge on the pressure distribution of underwater explosion: Finite element analysis. *Ocean Engineering*. 2022 Dec 15;266:113209.
- [30]. Razic F, Miralem B. Underwater explosion effects of 60 mm HE mortar bomb on a cylindrical concrete structure-PIT. *Defence Technology*. 2019 Feb 1;15(1):65-71.
- [31]. Bethe HA, Kirkwood JG. The shock wave structure in a fluid. *Physical Review*. 2008;75(3):287-99.
- [32]. Jen CY. Coupled acoustic–structural response of optimized ring-stiffened hull for scaled down submerged vehicle subject to underwater explosion. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2009 Oct 1;52(2):96-110.
- [33]. Li L, Sun L, Wang T, Kang N, Cao W. Repeated low-velocity impact response and damage mechanism of glass fiber aluminium laminates. *Aerospace Science and Technology*. 2019 Jan 1;84:995-1010.
- مدل اجزای محدود. ارائه شده در: هجدهمین کنفرانس هیدرولیک ایران؛ ۱۳۹۸؛ تهران.
- [۱۴]. پوربهی محمدصادق، احمدی محمدتقی، امامزاده سید شهاب. تحلیل خطوط لوله مستغرق زیر دریا در معرض امواج دینامیکی ناشی از انفجار زیر آب. ارائه شده در: هفتمین همایش بین‌المللی سواحل، بنادر و سازه‌های دریایی؛ ۱۳۸۵؛ تهران.
- [15]. Montazeri E, Kazemi SM, Askariani SS. Finite element parametric study on the cyclic response of steel frames equipped with comb-teeth dampers. *Structures*. 2021 Jun 1; 31:111-126.
- [16]. Dereli O, Basu S, Ozbey M, Bhattacharyya R. Finite element analysis of piping system under blast load due to accidental explosion. In: *Pressure Vessels and Piping Conference 2022 Jul 17 (Vol. 86168, p. V003T05A018)*. American Society of Mechanical Engineers.
- [17]. Emamzadeh SS. Nonlinear dynamic response of a fixed offshore platform subjected to underwater explosion at different distances. *Journal of Marine Science and Application*. 2022 Dec;21(4):168-76.
- [18]. George JM, Kimiaei M, Elchalakani M, Fawzia S. Experimental and numerical investigation of underwater composite repair with fibre reinforced polymers in corroded tubular offshore structural members under concentric and eccentric axial loads. *Engineering Structures*. 2021 Jan 15;227:111402.
- [19]. Hsu CY, Chiang CC, Luo GM, Chen YH, Chu FC. Analysis of Ship Structure with GFRP Lamination Design Subjected to Underwater Shock Loading. *Advances in Science and Technology*. 2024 Feb 5;136:23-9.
- [20]. Liu Z, Tobias Gudmestad O, Iglund R. Numerical Simulation of a Subsea Pipeline Subjected to Underwater Explosion Loads With the Coupled Eulerian–Lagrangian Method. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2022 Dec 1;144(6):061901.
- [21]. Kristoffersen M, Hauge KO, Børvik T. Blast loading of concrete pipes using C-4 charges. In: *Proceedings 2018 Jun 8 (Vol. 60, No. 1)*. MDPI.
- [22]. Lam KY, Zong Z, Wang QX. Dynamic response of a laminated pipeline on the seabed subjected to underwater shock. *Composites Part B: Engineering*. 2003 Jan 1;34(1):59-66.
- [23]. Liang CC, Tai YS. Shock responses of a surface ship subjected to noncontact underwater explosions. *Ocean Engineering*. 2006 Apr 1;33(5-6):748-72.

#### پی‌نوشت‌ها

1. Bethe-Kirkwood
2. Penney