

# بررسی تأثیر کامپوزیت بر مقاومت لوله‌های فولادی گاز شهری در برابر انفجار

محمد اسکندری: دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی پدافند غیرعامل، دکتری عمران- نقشه برداری گرایش سیستم‌های اطلاعات مکانی

محمد رضا فلاح قنبری\*: دانشجوی دکتری سلامت در بلایا و فوریت‌ها، دانشکده بهداشت و ایمنی دانشگاه علوم پزشکی شهید بهشتی تهران

Email: m.fallah.teh@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۹/۲۶

## چکیده

لوله‌های مدفون از مهمترین اجزای شریان‌های حیاتی هستند که برای توزیع آب، گاز، نفت و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. تجارب حاصل از جنگ‌های گذشته مؤید این نظر است که کشور مهاجم توجه خود را صرف بمباران و انهدام مراکز حیاتی و حساس می‌کند. لوله‌های انتقال گاز به‌عنوان یکی از شریان‌های مهم انتقال در زمان جنگ در صورت آسیب می‌تواند خسارات جانی مالی و محیط‌زیست زیادی وارد کند. در این مقاله روش مقاوم‌سازی لوله با کامپوزیت FRP مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور ضمن تهیه مدل سه بعدی از سیستم خاک-لوله-کامپوزیت نسبت به مطالعه اثر عوامل مؤثر بر رفتار لوله شامل نوع جنس کامپوزیت، ضخامت کامپوزیت بر ظرفیت تغییر شکل لوله مطابق با آیین نامه ALA بررسی شد. خاک با استفاده از المان‌های سه بعدی Solid و CFRP و لوله با المان Shell مدل شده و از اثر جدا شدگی لوله و CFRP صرف‌نظر شود. برای مطالعات پارامتریک، تحلیل‌ها با استفاده از روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS 6.10.1 انجام گرفت. مطالعات برای قطرهای ۴، ۱۲ اینچ با عمق دفن یک متر، میزان خرج انفجار ۱۵، ۳۰، ۴۵ کیلوگرم، کامپوزیت کربن و شیشه، زاویه پیچش ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰ درجه کامپوزیت به دور لوله، ضخامت کامپوزیت ۲، ۴، ۶ و ۸ میلیمتر انجام شد. نتایج نشان می‌دهد استفاده از کامپوزیت کربن با ضخامت و زاویه پیچش مطلوب تأثیر مناسبی را به‌منظور مقاوم‌سازی لوله در برابر تهدیدها دارد. **کلیدواژه‌ها:** خطوط لوله مدفون، پدافند غیرعامل، سیستم خاک-لوله-کامپوزیت، انفجار TNT، مقاوم‌سازی با کامپوزیت

## Analysis of composite textile effect on steel type city gas pipeline against explosion

Mohammad Eskandari<sup>1</sup>, Mohammad Reza Fallah ghanbari<sup>2\*</sup>

### Abstract

Buried pipes are the most important components of vital arteries used to distribute water, gas, oil, etc. The experiences of past wars support the view that the invading country is devoting its attention to the bombing and destruction of vital centers. Gas transmission pipelines as one of the most important transmission arteries during wartime in the event of damage can cause serious financial and environmental damage. In this paper, the method of reinforcing the pipe with FRP composite has been investigated. For this purpose, while preparing a three-dimensional model of soil-pipe-composite system, to study the effect of factors affecting tube behavior including composite material, composite thickness on tube deformation capacity according to the ALA regulation was investigated. The soil is modeled using Solid and CFRP 3D elements and a Shell element pipe and is excluded from the pipe separation and CFRP. For parametric studies, analyzes were performed using finite element method using ABAQUS 6.10.1 software. Studies for 4, 12 inches with a depth of 1 m, the cost of explosion 15, 30, 45 kg, carbon composite and glass, angle of twisting 0, 30, 60, 90 degrees composite around the tube, composite thickness 2, 4, 6 and 8 Mm was done. The results show that the use of carbon composite with the desired thickness and angle of twisting has a good effect in order to reinforce the pipe against the threats.

**Keyword:** Buried pipelines, Passive defense, composite-soil-pipe system, TNT explosion, strengthening pipeline

1 - PhD in GIS, Faculty of Passive Defense, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

2 - PhD student of Health in Disaster and Emergency, Faculty of Public Health and safety, Shadid Beheshti University of Medical Sciences

۴۷

ویژه نامه هفته  
پدافند غیرعامل  
پاییزه زمستان  
۱۳۹۹

دوفصلنامه  
علمی و پژوهشی



بررسی تأثیر کامپوزیت بر مقاومت لوله‌های فولادی گاز شهری  
در برابر انفجار

## مقدمه

با توجه به تهدیدهایی که کشور در برهه‌های زمانی مختلف و با گستردگی و شدت متفاوت با آن روبه‌رو است، نیاز به احداث سازه‌های مقاوم ضرورت ملی تلقی می‌شود. خطوط انتقال گاز یکی از مهمترین شریان‌های حیاتی در زندگی جوامع امروزی به‌منظور تأمین انرژی محسوب می‌شود. تجربه جنگ‌ها و تهدیدهای امنیتی نشان می‌دهد دشمن تمام توان خود را برای نابودی مراکز پالایشگاهی و منابع تأمین انرژی به کار می‌گیرد. از این رو حفظ عملکرد آنها در برابر انفجار عاملی مهم محسوب می‌شود؛ زیرا لوله‌های گاز حاوی مواد اشتعال‌زا هستند و نشت گاز و آتش‌سوزی‌های پس از آن می‌تواند موجب صدمات جانی، خسارت‌های مالی و زیان‌های زیست‌محیطی می‌شود. از طرف دیگر لوله‌های گاز شریان حیاتی محسوب می‌شوند که ویرانی آن تأثیری سوء بر شریان‌های حیاتی دیگر می‌گذارد و باعث مشکل و تأخیر در انتقال انرژی خواهد شد.

تاکنون پژوهش‌های مختلفی در زمینه آسیب‌پذیری لوله در برابر انفجار صورت گرفته است. از پژوهش‌های صورت‌گرفته می‌توان به پژوهش آقایان آقاسی، اکبردوست و اولاریواژ اشاره کرد. در پژوهش آقای آقاسی و همکاران [۱،۲] تأثیر مشخصات خاک بر تأسیسات فولادی مدفون در نرم‌افزار ABAQUS بررسی شد. در این پژوهش مدل خاک سه‌فازی از نوع دراگر پراگر<sup>۱</sup> لحاظ شد و لوله‌های با قطر بالای یک متر با عمق دفن بیشتر از ۳ متر بررسی شد. مطالعات آنها نشان داد که با افزایش مدول الاستیسته خاک اطراف لوله جابه‌جایی کمتری در لوله ایجاد می‌شود و تنش‌های ایجاد شده در لوله کاهش می‌یابد. آقای اولاریواژ<sup>۲</sup> و همکاران به‌منظور پیش‌بینی اثر انفجار بر روی لوله‌ها با به‌کارگیری نرم‌افزار آباکوس مطالعاتی را انجام دادند. [۳]

آقای اکبردوست و همکاران [۴] تأثیر موج انفجار را بر روی لوله‌های فولادی روی سطح زمین در نرم‌افزار Autodyne به‌صورت مدل‌سازی دوبعدی لوله بررسی کردند و میزان تغییر شکل‌های لوله را در انفجار و در فواصل مختلف بررسی کردند. مطالعات آنها نشان داد با کم شدن فاصله انفجار تغییر شکل زیادی در لوله ایجاد می‌شود؛ از این رو ضروری است که فاصله ایمنی انفجار رعایت شود. از آنجا که خطوط لوله حاوی مواد محترقه هستند، به دلیل مسائل امنیتی لازم است در بعضی از حوزه‌های انتقال گاز ایمنی لوله را افزایش و حد ریسک در برابر تهدیدهای خارجی را کاهش دهیم. امروزه مواد کامپوزیت به دلیل وزن کم، قابلیت نصب آسان و سختی بالا مورد استقبال مهندسان واقع شده است. از این رو هدف این مطالعه این است که این فناوری و روش جدید را برای افزایش سطح عملکرد در برابر انفجار ارزیابی کند.

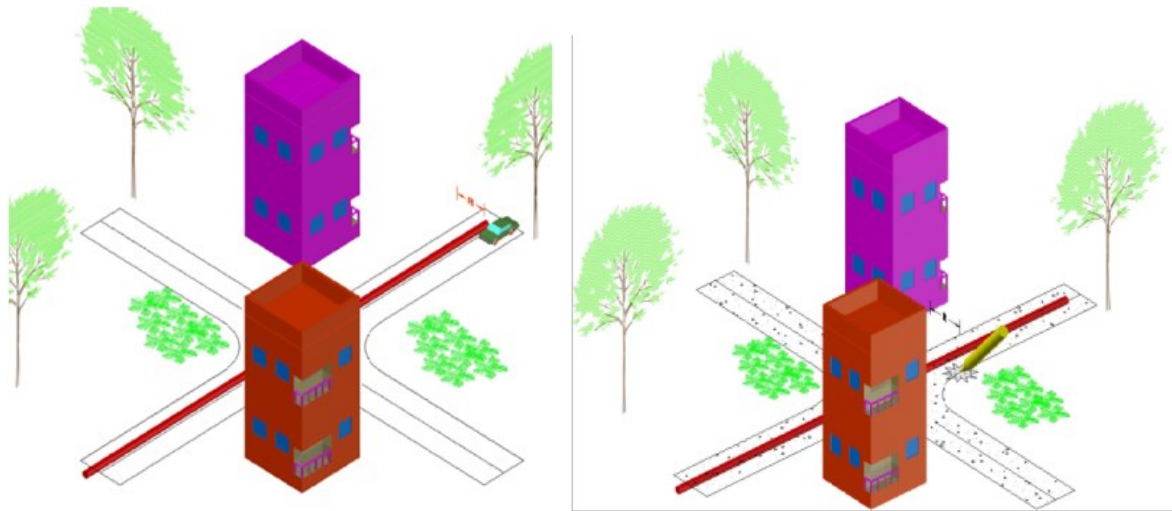
## روش تحقیق و ابزارها

به‌منظور مدل‌سازی اثر انفجار بر لوله‌های مدفون در خاک از نرم‌افزار آباکوس [۳] استفاده شد. بارگذاری انفجاری را در مدل از تحلیل دینامیکی Dynamic Explicit و با تعریف بارگذاری Amp تعریف و لحاظ شد. المان‌های خاک از نوع C3D8R انتخاب شد

که المان‌های مکعب مستطیلی هشت‌گه‌ای خطی شکننده با روش انتگرال‌گیری کاهش یافته هستند. خاک در این پژوهش با استفاده از معیار دراگر-پراگر<sup>۱</sup> و با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی مدل شده و مدل‌سازی برای چهار نوع خاک با تفاوت‌هایی در مشخصات مکانیکی خاک‌ها انجام شده است. لوله با استفاده از المان‌های S4R مدل شدند که از نوع المان پوسته‌ای چهارگه‌ای با انحنا دوطرفه برای پوسته‌های جدار نازک و جدار ضخیم از نوع انتگرال کاهش یافته هستند. هم‌چنین مشخصات مکانیکی لوله برای لوله‌های فولادی از جنس API-5L Grade B در نظر گرفته شده است. برای مدل کردن رفتار خمیری لوله فولادی از مدل فون میسر و با در نظر گرفتن سخت‌شوندگی ایزوتروپیک استفاده شده است. برای مدل کردن کامپوزیت از المان‌های ۴ گره‌ای پوسته‌ای (S4R) نرم‌افزار Abaqus استفاده شده است. کامپوزیت را در این مدل‌سازی به‌صورت لایه‌لایه که هر لایه ضخامت در حدود یک میلی‌متر دارد، در نظر گرفته شده است. به‌منظور مدل‌سازی کامپوزیت از گزینه Composit layup در آباکوس استفاده شده که در این شیوه مدل‌سازی می‌توان زاویه پیچش را در قسمت Orientation و تعداد لایه‌های کامپوزیت و ضخامت هر لایه را لحاظ کرد. به‌منظور مدل کردن CFRP رفتار الاستیک Lami-nate در نظر گرفته شد. برای گسیختگی کامپوزیت نیز از منوی Hashin Damage استفاده شد. در این پژوهش فرض شد، در طی اعمال بارگذاری موج انفجار کامپوزیت کاملاً به دور لوله پیچیده می‌ماند و جداشدگی بین آنها اتفاق نمی‌افتد. از این‌رو Contact بین کامپوزیت و لوله از نوع tie لحاظ شد. همچنین contact بین کامپوزیت و خاک از نوع hard contact با ضریب اصطحاک ۰٫۳ فرض شده است. ابعاد خاک با کمک آنالیز حساسیت ۱۰۰×۵۰×۲۵ لحاظ شد.

در این پژوهش دو سناریو فرض شده که گروهک‌های تروریستی، دشمن داخلی و خارجی مواد منفجره را با کمک نارنجک موشک انفجاری و خمپاره‌ها به محل دفن لوله‌ها پرتاب کرده و میزان آسیب‌دیدگی و حد مقاومت لوله بررسی می‌شود. در سناریوی دوم فرض شده که تروریست‌ها ماشینی را در کنار خیابان و در نزدیکی محل دفن لوله مسلح به ماده منفجره کرده‌اند و حد آسیب‌رسانی و میزان مقاومت آنها در پدافند غیرعامل مشخص شد (شکل ۱). [۵، ۶]

با توجه به ضرورت مقاوم‌سازی لوله‌های شهری و انتقال در پدافند غیرعامل کوشیده شد که از لوله‌های شهری به قطر ۴ اینچ و خطوط لوله‌های انتقال به قطر ۱۲ اینچ و لوله‌های شبکه توزیع به قطر ۸ و ۱۰ اینچ استفاده شود. مشخصات لوله‌های مورد استفاده در جدول ۱ آورده شده که با توجه به تنوع خطوط لوله‌ها در منطقه مورد مطالعه از چند نمونه لوله با ضخامت‌های مختلف برای مدل‌سازی استفاده شده است. مدل‌سازی برای لوله ۱۲ اینچ فشار ۲۵۰ psi و برای لوله ۶ و ۴ اینچ فشار ۶۰ psi در نظر گرفته شده است. با توجه به لوله‌های مورد استفاده در ایران خواص مکانیکی لوله فولادی از نوع ST-37 در نظر گرفته شد. چگالی لوله فولادی برابر ۷۸۵۰ Kg/m<sup>۳</sup> مدول یانگ برابر ۲۱۰Gpa و ضریب پواسون



شکل ۱: سناریوی برخورد موشک در فاصله مشخص R از محل دفن لوله (تصویر سمت راست) سناریوی انفجار ماشین حاوی مواد منفجره در کنار خیابان (تصویر سمت چپ)

جدول ۱- مشخصات لوله‌های به‌کارگرفته‌شده در مدل‌سازی

قطر (in)	ضخامت (mm)	قطر (in)	ضخامت (mm)	قطر (in)	ضخامت (mm)
۴	۶,۸	۱۲	۸,۷	۸	۱۱
۴	۸,۷	۱۲	۱۱	۸	۱۴,۳
۴	۱۰	۱۲	۱۴,۳	۱۰	۱۱
۴	۱۴	۱۲	۲۱	۱۰	۱۴,۳

جدول ۲- میزان ضریب کاهندگی و k برای انواع خاک‌ها

نوع خاک	ضریب کاهندگی (n)	ضریب k
رس اشباع	۱,۵	۳۰۰۰
لای و رس اشباع	۲,۵	۲۰۰۰
ماسه خیلی متراکم، خشک و مرطوب	۲,۵	۱۰۰۰
ماسه متراکم، خشک و مرطوب	۲,۷۵	۵۰۰
ماسه سست، خشک و مرطوب	۳,۰	۲۰۰
ماسه خیلی سست، خشک و مرطوب	۳,۲۵	۱۰۰

$x$  = حداکثر جابه‌جایی ذرات خاک برحسب متر  
 $W$  = جرم خراج معادل TNT برحسب کیلوگرم  
 $R$  = فاصله نقطه موردنظر برحسب متر  
 $c$  = سرعت لرزه‌ای برحسب متر بر ثانیه

$n$  = ضریب کاهندگی موج متناسب با نوع خاک انتخاب می‌شود و معیاری برای توان استهلاک انرژی امواج در خاک است. مقدار این ضریب از طریق آزمایش تک‌محوری بر روی نمونه غیرمحصور به دست می‌آید.

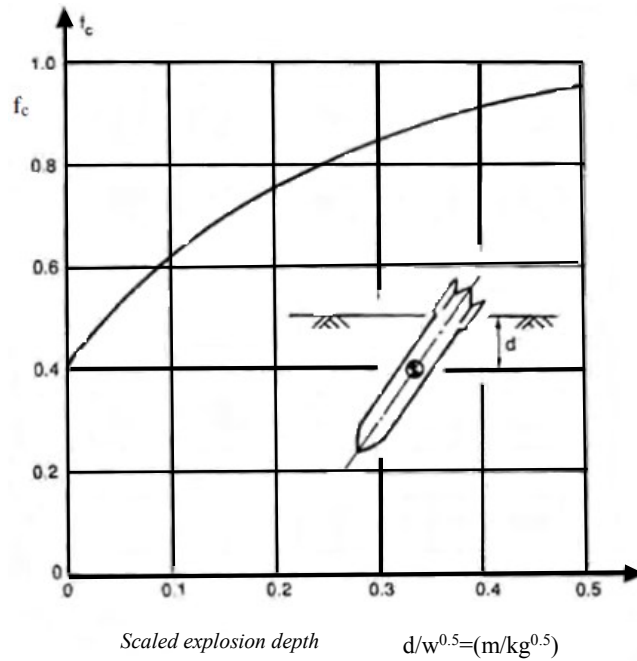
$f_c$  = ضریب اتصال (جفت‌شدگی) که با تعیین عمق مرکز انفجار از سطح زمین از شکل زیر به دست می‌آید. با افزایش جفت‌شدگی ماده انفجاری و زمین تأثیر سلاح را افزایش می‌دهد. در مورد خراج‌های انفجاری مدفون و خاک اطراف آن عددی کوچک‌تر از یک اختیار می‌شود. [۸، ۹]

برابر ۰,۳ است. به منظور مطالعه تأثیر خاک بر رفتار لوله‌ها تحت انفجار سه نوع خاک ماسه‌ای سخت، ماسه‌ای نرم و رسی بررسی شده و عمق دفن‌های ۱ و ۲ و ۳ و ۴ متر لحاظ شد. میزان خراج ماده منفجره نیز ۱۵، ۲۰، ۳۰، ۴۵ و ۱۰۰ کیلوگرم لحاظ شد.

### نظریه و محاسبات

از نکات مهم در بارگذاری انفجاری در خاک محاسبه مقدار حداکثر بیش‌فشار در فاصله معینی از مراکز انفجار است که به فشار مبنای انفجار معروف است و با PS نشان می‌دهند. معمولاً در مراجع معتبر برای محاسبه بیش‌فشار مبنای رابطه‌هایی برحسب Z بیان شده که مقدار آن از رابطه زیر بیان می‌شود [۷، ۸].

$$\frac{x}{W^{1/3}} = 60 \frac{f_c}{c} \left( \frac{2.52R}{W^{1/3}} \right)^{1-n} \quad \text{رابطه (۱)}$$



شکل ۲: میزان ضریب  $f_c$  بر اساس مقیاس (Z)

### سطح عملکردی خرابی لوله

سطوح عملکردی مطلوب لوله‌ها مطابق با دستورالعمل ALA3 [۱۲] انتخاب شده که این سطح عملکرد عبارت است از عدم شکست لوله و از دست ندادن قابلیت نگهداری محتویات درون لوله در موقع انفجار. به منظور دستیابی به سطح عملکرد مطلوب که به معنای عدم شکست لوله و از دست ندادن قابلیت نگهداری محتویات درون لوله است، به طور کمی روابط زیر باید برقرار باشد:

کرنش کششی: محدود کردن کرنش کششی حداکثر ۴ درصد برای لوله‌های فولادی  
کرنش فشاری: محدود کردن کرنش فشاری به مقدار به دست آمده از رابطه (۵)

رابطه (۵)

$$\log_{10} \left( \frac{t_d}{W^{1/3}} \right) = 0.3 \log_{10}(Z) + 0.28 \quad Z > 1$$

### بحث و نتایج

به منظور میزان تأثیرگذاری آنها در بهبود عملکرد لوله رفتار کامپوزیت‌های شیشه و کربن با مدول الاستیسیته و تنش‌های گسیختگی متفاوت بررسی شده است.

### عامل اثر جنس کامپوزیت

به منظور بررسی تأثیر مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی لوله کامپوزیت بر رفتار لوله، از یک جنس کامپوزیت شیشه و سه جنس کامپوزیت کربن با مدول الاستیسیته‌های متفاوت استفاده شده است.

مقدار فشار مبنای انفجار طبق رابطه ارائه شده به شرح زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{so} = \frac{6.7}{Z^3} + 1 \quad (p_{so} > 10 \text{ kg/cm}^2) \quad \text{رابطه (۲)}$$

زمان تداوم انفجار یا مدت زمان مثبت انفجار مدت زمانی است که در آن فشار انفجار بیش از فشار محیطی است. این زمان علاوه بر اینکه به مدت اعمال بیش فشار و مقدار فشار بازتاب انفجار بستگی دارد، به سرعت حرکت موج شوک نیز وابسته است. در دستورالعمل TM5-1300 نموداری برای محاسبه مدت زمان فاز مثبت ارائه شده که توسط ایزدی فرد ماهری با روابط خلاصه شده است.

$$p_{so} = \frac{0.975}{Z^1} + \frac{1.455}{Z^2} + \frac{5.85}{Z^3} - 0.019 \quad \text{رابطه (۳)}$$

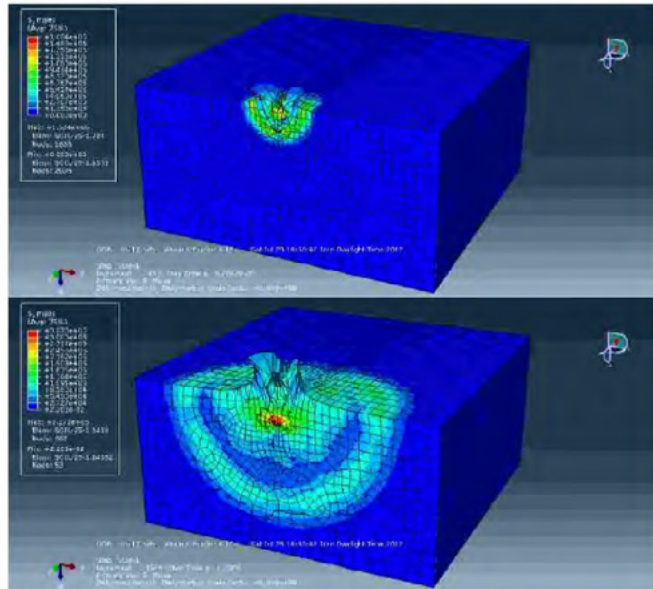
$$(0.1 < p_{so} < 10 \text{ kg/cm}^2)$$

تغییرات فشار زمان بر اساس رابطه فردلاند از طریق رابطه نمایی زیر بیان می‌شود.

رابطه (۴)

$$\log_{10} \left( \frac{t_d}{W^{1/3}} \right) = 2.5 \log_{10}(Z) + 0.28 \quad Z < 1$$

در این رابطه  $b$  مشخصه شکل موج است که تابعی از حداکثر فشار  $P_s$  بوده و مقدار آن متناسب با مشخصه‌های انفجار که در ادامه معرفی می‌شود، تعیین می‌شود.  $t_s$  میزان تداوم فاز مثبت است. فاز منفی موج اغلب خیلی ضعیف‌تر و بسیار تدریجی‌تر از فاز مثبت است و به همین دلیل از اثر آن در بمب‌گذاری صرف نظر می‌شود. [۸، ۱۰، ۱۱]



شکل ۳: تحلیل مدل در نرم افزار

جدول ۳: مشخصات کامپوزیت شیشه در مدل سازی بر حسب پاسکال

FRP Glass									
E1	E2	E3	v12	v13	v23	G12	G13	G23	
3.8E+10	8.27E+09	8.27E+09	0.26	0.26	0.33	4.14E+09	4.14E+09	3.10E+09	
Fail strain									
Et1		Ec1		ET2		EC2			
2.75E-02		1.58E-02		3.80E-03		1.42E-02			

جدول ۴: مشخصات کامپوزیت کربن ۱ در مدل سازی

CFRP Carbon 1						
E1(Pa)	E2(Pa)	v12	G12(Pa)	G13(Pa)	G23(Pa_)	
2.31E+11	2E+11	0.21	6E8	6E8	6E7	
Fail Stress						
XT(Pa)	XC(Pa)	YT(Pa)	YC(Pa)	S12(Pa)	S13(Pa)	
3.79E+09	2.00E+09	1.80E+09	1.00E+09	5.00E+08	5.00E+08	

جدول ۵: مشخصات کامپوزیت کربن ۲ در مدل سازی

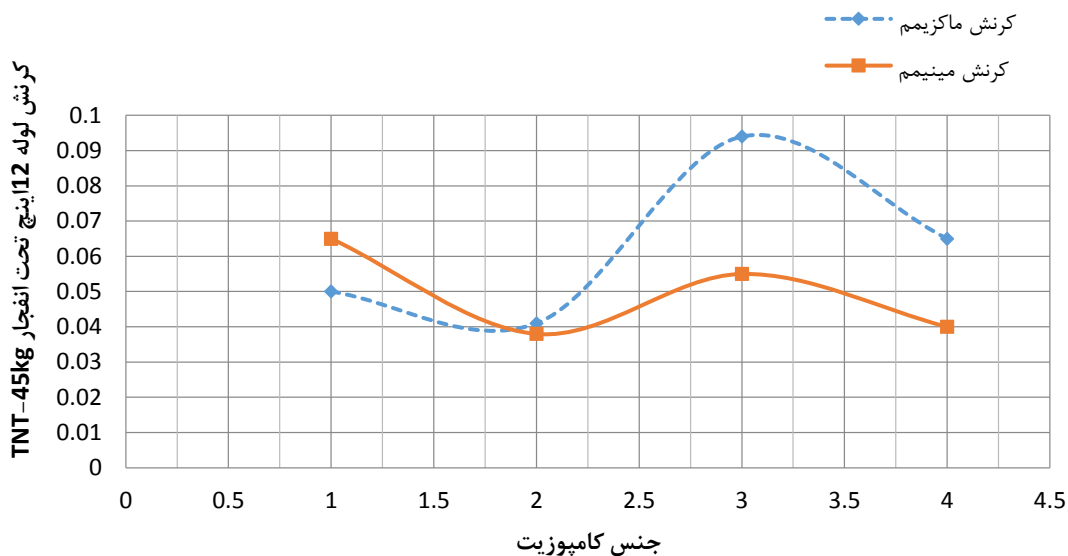
CFRP Carbon 2								
E1	E2	E3	v12	v13	v23	G12	G13	
1.35E+11	8.00E+09	8.00E+09	0.27	0.27	0.49	3.80E+09	3.80E+09	
Fail strain								
XT		XC		YT		YC		S12
1.86E+09		1.47E+09		7.60E+07		8.50E+07		9.8E+07

جدول ۶: مشخصات کامپوزیت کربن ۳ در مدل سازی

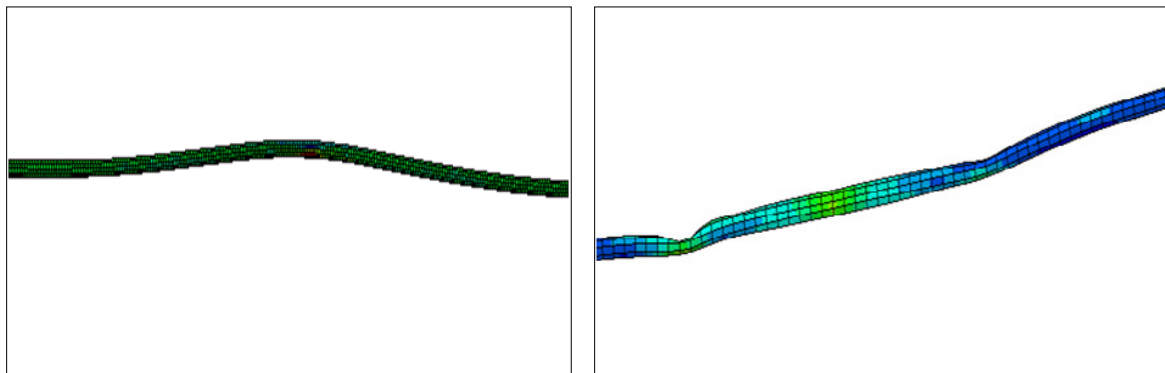
CFRP Carbon 3						
E1(Pa)	E2(Pa)	v12	G12(Pa)	G13(Pa)	G23(Pa)	
6.85E+10	6.85E+10	0.11	3.80E+09	3.80E+09	2.68E+09	
Fail Stress						
XT(Pa)	XC(Pa)	YT(Pa)	YC(Pa)	S12(Pa)	S2۳(Pa)	
7.95E+08	8.60E+08	7.95E+08	8.60E+08	9.80E+07	9.80E+07	

همان طور که در شکل ۴ ملاحظه می شود با افزایش مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی کامپوزیت حد مقاومت لوله در برابر موج انفجار کاهش می یابد و آسیب کمتری به لوله وارد می شود. از آنجا که در موقع انفجار آسیب زیادی به کرنش در جهت شعاعی لوله وارد می شود، از این رو توصیه می شود که کامپوزیت مورد استفاده در جهت شعاعی مدول الاستیسیته بالا و حد گسیختگی بالاتری داشته باشد تا رفتار لوله به موقع انفجار بهبود یابد.

با توجه به شکل می توان گفت که لوله های گاز با افزایش ۵۰ درصدی میزان خرج انفجار نسبت به حالت مقاوم سازی نشده افزایش یافته است و عملکرد بهتری را از خود موقع انفجار نشان می دهد. این افزایش ظرفیت معادل با حالتی است که عمق دفن لوله را یک متر افزایش دهیم. همان طور که در آورده شده، موقعی که لوله مقاوم سازی نشده در برابر موج انفجار قرار گیرد، لوله سختی کافی را در برابر موج انفجار مقدار ماده منفجره مورد بررسی نداشته و لوله در دو محل دچار تورفتگی می شود؛ ولی در مقایسه با حالتی که لوله با کامپوزیت تقویت شده باشد، لوله دارای سختی کافی در برابر انفجار شده و رفتاری با منحنی ملایم تر از خود نشان می دهد.



شکل ۴: تأثیر جنس کامپوزیت بر رفتار کرنش لوله ۱۲ اینچ (۱- شیشه، ۲- کربن جنس ۱، ۳- کربن جنس ۲، ۴- کربن جنس ۳)

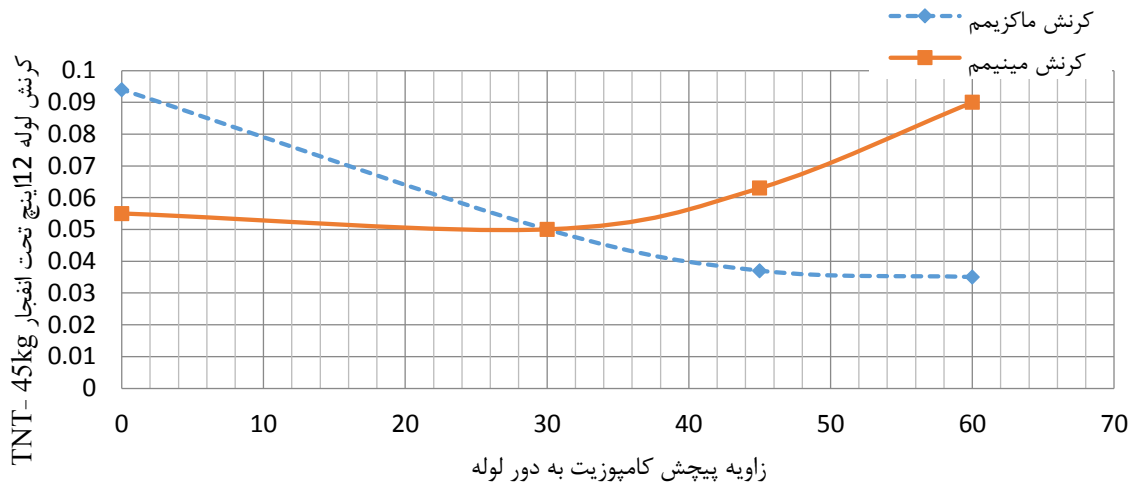


شکل ۵: رفتار لوله مقاوم سازی نشده در برابر انفجار و خرابی موضعی در لوله (تصویر سمت راست) رفتار لوله مقاوم سازی شده در برابر انفجار (تصویر سمت چپ)

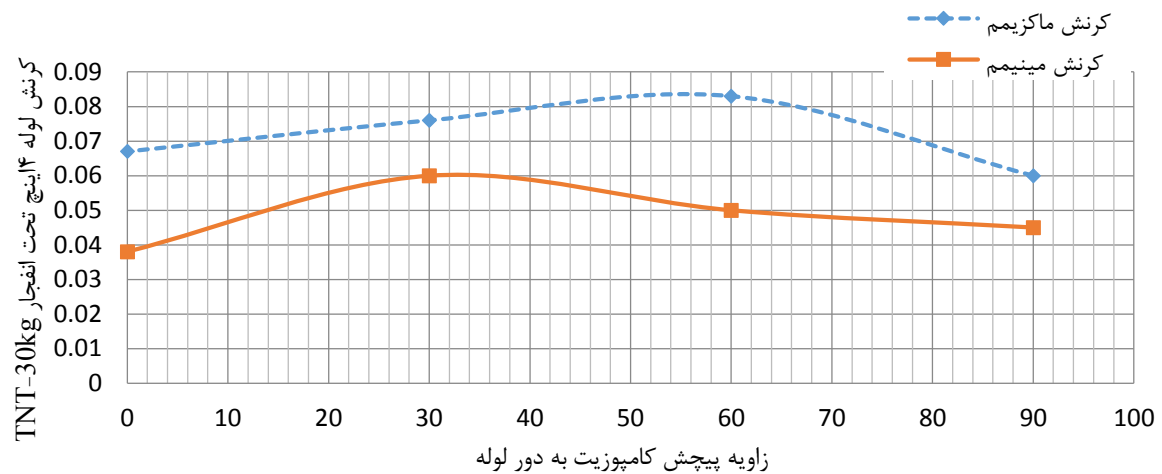
### عامل اثر زاویه پیچش در کامپوزیت ها

کامپوزیت ها به دلیل مدول الاستیسیته و تنش گسیختگی متفاوتی که در جهات مختلف دارند، تحت اثر زاویه پیچش های مختلف رفتار متفاوتی در عملکرد با لوله تحت انفجار از خود نشان می دهند. از آنجا که با تغییر زاویه پیچش کامپوزیت به دور لوله مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی معادل در جهت شعاعی نیز تغییر می یابد، عملکرد لوله تحت انفجار تغییر می کند.

با توجه به شکل ۵ و ۶ می توان گفت تحت زاویه پیچشی مناسب و نامناسب کرنش ها حداکثر ۵۰ درصد با یکدیگر اختلاف دارند و در مقایسه با حالت مقاوم سازی نشده می توان گفت که در صورت پیچش با زاویه نامناسب کرنش ها حداکثر ۶۰ درصد کاهش می یابد و در صورت پیچیدن با زاویه مناسب کرنش های ماکزیمم حدود ۷۵ درصد کاهش می یابد. از این رو دقت در زاویه پیچش اکیداً توصیه می شود. نگارنده با تحقیقاتی که در تحقیقات مختلف انجام داده، نتوانست رابطه مناسب برای پیچش پیشنهاد کند و تنها راه افزایش دقت را در مدل سازی با پارامترهای پیچشی مختلف توصیه می کند.



شکل ۶: تأثیر زاویه پیچش کامپوزیت شیشه بر رفتار لوله ۱۲ اینچ



شکل ۷: تأثیر زاویه پیچش کامپوزیت کربن ۱ بر رفتار کرنش لوله ۱۲ اینچ

همان‌طور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، می‌توان گفت: با تغییر زاویه پیچش از صفر تا ۹۰ درجه میزان کرنش ماکزیمم حدود ۳۰ درصد تغییر می‌کند. در مقایسه با حالت مقاوم‌سازی نشده می‌توان گفت: مقاوم‌سازی لوله با کامپوزیت و با انتخاب زاویه پیچشی مناسب کرنش ماکزیمم را حدود ۱۰ درصد نسبت به حالتی که زاویه پیچشی مناسبی انتخاب نشده باشد، بهبود می‌بخشد.

#### عامل اثر ضخامت کامپوزیت

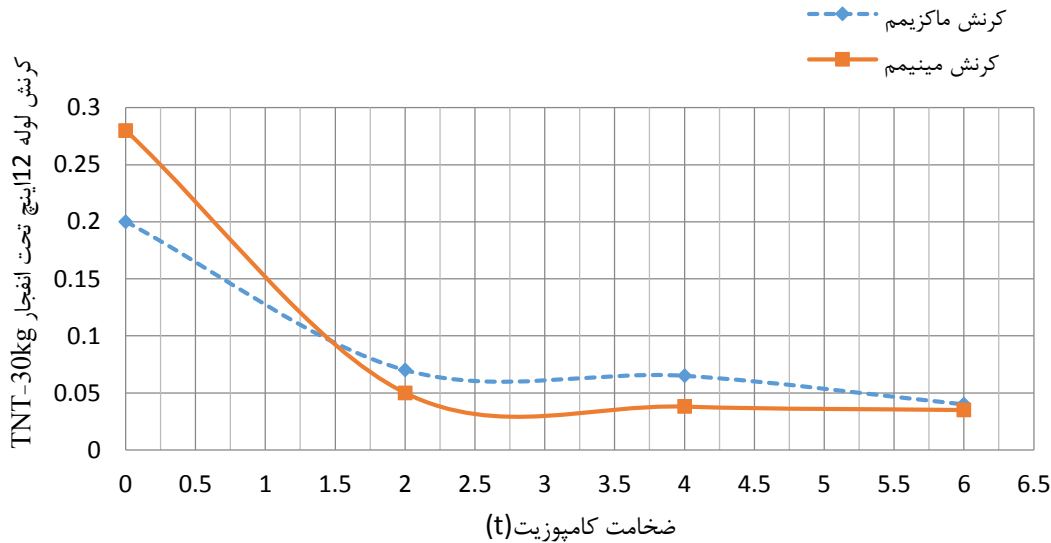
با افزایش ضخامت کامپوزیت به نوعی سختی لوله در برابر موج انفجار افزایش می‌یابد؛ قسمت زیادی از انرژی انفجار توسط کامپوزیت جذب می‌شود؛ لوله رفتار مناسب‌تری را نشان می‌دهد و کرنش‌های ماکزیمم در لوله کاهش می‌یابد.

همان‌طور که در شکل ۸ ملاحظه می‌شود می‌توان گفت: با مقاوم‌سازی لوله با دو لایه کامپوزیت با ضخامت هر لایه در حدود یک میلی‌متر است، کرنش‌های ماکزیمم حدود ۴۰ درصد کاهش می‌یابد که با افزایش تعداد لایه‌ها میزان بهبود در کرنش‌ها حداکثر حدود ۵ درصد نسبت به حالت قبلی است. از این‌رو توصیه می‌شود

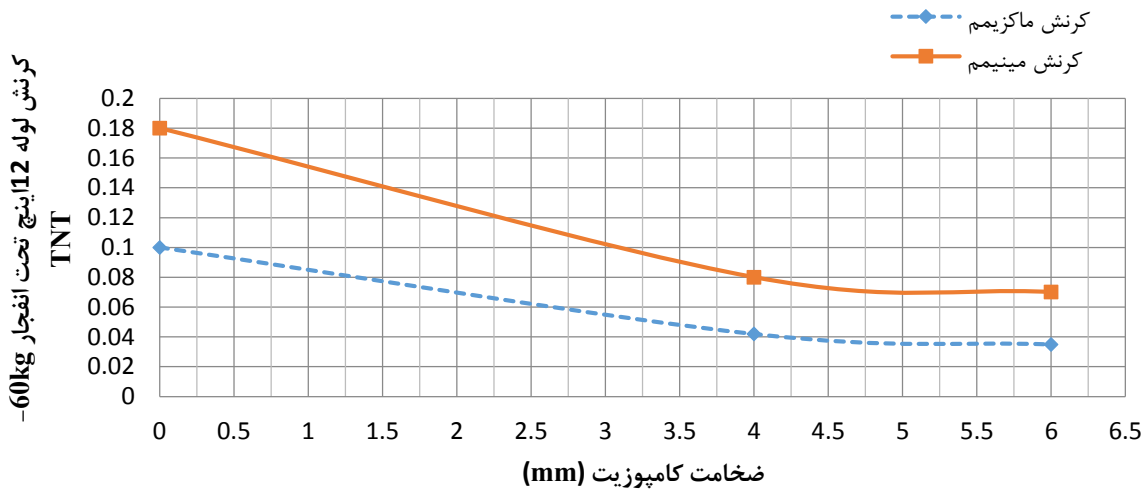
#### عامل اثر متقابل افزایش عمق دفن و کامپوزیت

که به منظور بهینه‌سازی در تعداد لایه‌های ۲ و ۴ لایه استفاده شود؛ زیرا با افزایش تعداد لایه‌ها بهبودی در عملکرد لوله مشاهده نشده است. از طرفی نسبت به حالت مقاوم‌سازی نشده میزان خرج ماده منفجره حدود ۵۰ درصد افزایش یافته است. در این مدل‌سازی با تعداد لایه‌های ۴ عدد لوله توانسته است تحت انفجار ۴۵ کیلوگرم عملکرد خود را در سطح عملکرد مطلوب حفظ کند.

در بین پارامترهای بررسی شده دو پارامتر عمق دفن لوله و به‌کارگیری کامپوزیت با ضخامت مناسب بیشترین تأثیر را در بهبود رفتار لوله در برخورد راکت در فاصله‌ای مشخص از آنها دارد. از این‌رو تأثیر همزمان این دو پارامتر را در بهبود رفتار لوله بر اساس میزان خرج ماده منفجره بررسی شد.



شکل ۸: تأثیر ضخامت کامپوزیت کربن بر رفتار کرنش لوله ۱۲ اینچ



شکل ۹: اثر افزایش ضخامت کامپوزیت بر لوله ۱۲ اینچ مدفون شده در عمق ۲ متر

بیشتر از فولاد است. از این رو ترکیب کامپوزیت و فولاد بر لوله تأثیر بهینه‌ای می‌گذارد و از شدت خرابی می‌کاهد. از پارامتر مهم در استفاده از کامپوزیت زاویه پیچش کامپوزیت به دور لوله است؛ زیرا تغییر زاویه پیچش کامپوزیت به دور لوله مدول الاستیسیته و کرنش گسیختگی معادل در جهت شعاعی نیز تغییر می‌یابد؛ از این رو به منظور استفاده بهینه لازم است تا قبل از اجرا مدل‌سازی مربوطه انجام شود تا زاویه بهینه پیدا شود. در بین پارامترهای مطالعه شده ضخامت کامپوزیت و عمق دفن لوله از مؤثرترین پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت لوله است که می‌تواند ظرفیت مقاومت در برابر انفجار را حدود ۵۰ درصد افزایش دهد و بسته به شرایط و بررسی جنبه اقتصادی از هر کدام می‌توان استفاده کرد. از آنجا که با کاهش ضخامت لوله سختی لوله در برابر انفجار کاهش می‌یابد، ضروری است که برای مقاوم‌سازی لوله‌ها تعداد لایه‌های کامپوزیت افزایش یابد. با افزایش تعداد لایه‌های کامپوزیت از چهار لایه به هشت لایه کرنش‌های ماکزیمم حدود ۵ درصد کاهش

به منظور بهینه‌سازی هر دو پارامتر افزایش عمق دفن لوله و به کارگیری کامپوزیت می‌توان کمبود کاهش عمق دفن را با به کارگیری کامپوزیت و ضخامت مناسب جبران کرد. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، ظرفیت انفجار لوله ۱۲ اینچ که حدود راکت ۳۰ کیلوگرمی بود تا ظرفیت راکت ۶۰ کیلوگرمی افزایش یافته که در حدود ۱۰۰ درصد افزایش ظرفیت مشاهده می‌شود.

### جمع بندی و نتیجه‌گیری

از پارامترهای مهم دیگر در روش مقاوم‌سازی نوع کامپوزیت مورد استفاده است. با استفاده کردن از کامپوزیت با مدول الاستیسیته بالاتر و کرنش خرابی بالاتر لوله در برابر موج انفجار مقاوم‌تر شده و رفتار مناسب‌تری را نشان می‌دهد. از پارامترهای تأثیرگذار دیگر بر رفتار لوله تعداد لایه‌های کامپوزیت است. تعداد لایه‌های کامپوزیت تأثیر زیادی بر رفتار خط لوله دارد. مواد کامپوزیت CFRP دارای سختی بالایی هستند و مقاومت آنها



می‌باید. از این رو توصیه می‌شود که به منظور بهینه‌سازی تعداد لایه‌ها از چهار لایه استفاده شود. جنس کامپوزیت از پارامترهایی است که تأثیر زیادی بر رفتار لوله دارد که توصیه می‌شود از کامپوزیت‌های کربن در مقاوم‌سازی استفاده شود [۱۳، ۱۴، ۱۵].

## پی‌نوشت

1. Drauger-Pruger
2. Olarewaju

## منابع

1. Introduction to Abaqus software, Available from: [Http\ Civilengineerspk.com/abaqus-6-1-10](http://Civilengineerspk.com/abaqus-6-1-10)
۲. آقاسی، م.، بررسی تأثیر مشخصات مکانیکی خاک بر تأسیسات فولادی مدفون تحت اثر انفجار، سومین کنفرانس ملی زلزله و سازه، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید عباس‌پور، ۱۳۹۱.
3. A. J. Olarewaju, N.S.V. Kameswara Rao, and M. A. Mannan Diemention Response of Underground Pipes due to Blast Loads by simulation, *electron.j. geotech. eng*, 2011; 16: 563-574
۴. بررسی استحکام لوله‌های نفت و گاز تحت بارگذاری انفجاری خارجی، جواد اکبردوست، آزمایشگاه خستگی و شکست دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.
5. Ngo, T.J., Mendis, J., Gupta, A. and Rams ay, J. Blast Loading and Blast Effects on Structures an Overview, *EJSE journal, Special Issue 2007*; 76-91
۶. مبحث ۲۱ پدافند غیر عامل، مقررات ملی ساختمان.
۷. حجت جلالی، هیمن، بررسی مقابله با اثر تخریبی گسل بر روی خطوط لوله، شبکه تغذیه و توزیع گاز و تعمیر آن در سطح کشور، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۹.
۸. تحلیل و طراحی ساختمان‌ها در برابر اثرات انفجار، دکتر آرش نیری.
9. Zyskowski, A. Sochet, I. Mavrot, G. Bailly, P. Renard, J. Study of the explosion process in a small scale experiment-structural loading. *Journal of Loss Prevention in the process industry*. S, 2004; (17)291-299
10. Boh, J. W., Louca, L. A. and Choo, Y. S. Finite Element Analysis of Blast Resistance
11. Structures in the Oil and Gas Industry, Singapore and UK, ABAQUS User's Conference, pp 1-15
12. Manfredi, C., Otegui, J.L., 2002. Failures by SCC in Buried Pipelines. *Engineering Failure Analysis*, vol. 9. Elsevier Science Ltd., Pergamon, pp. 495-509.
13. American society of civil engineering, Seismic Design and Retrofit of Piping Systems, July 2002; (119): 67-75
۱۴. عدالتی، م.، تحلیل تنش‌های میان رویه در تیرهای بتن مسلح تقویت شده خمشی با ورق‌های چسبیده خارجی FRP یا فولادی، رساله دکتری، گروه عمران دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۹۰.
۱۵. ریاحی، ه. و افضلی، م. ر.، مکانیک مواد مرکب، انتشارات گسترش علوم پایه، ۱۳۸۱.
۱۶. فرحید، ف.، مستوفی‌نژاد، د.، بررسی امکان شکل تأمین و بازتوزیع لنگر در تیرهای سراسری قاب‌های بتن مسلح تقویت‌شده با ورق‌های کامپوزیت CFRP، رساله دکتری سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۶.

