



بررسی تأثیر چیدمان‌های مختلف ورق‌های FRP در مقاوم‌سازی لوله‌های مدفون بتنی

صالح یعقوبی^۱، محمدرضا توکلی زاده^۲

۱- دانشجوی دکتری سازه، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

1- saleh.yaghoobi@gmail.com

2- drt@um.ac.ir

چکیده

لوله‌های مدفون بتنی تحت فشار، برای انتقال آب، جمع‌آوری فاضلاب و دیگر موارد در سطح جهان کاربردی وسیع دارند. از این خطوط به عنوان شریان‌های حیاتی شهری یاد می‌شود و خسارت به هر بخش از آن‌ها، هزینه‌های هنگفتی را در بر خواهد داشت. فرسودگی تدریجی و مدفون بودن این لوله‌ها، سبب خوردگی و پوسیدگی دیواره‌ها شده و در نتیجه خسارت‌های جبران ناپذیری را به همراه خواهد داشت. بازسازی این زیرساخت‌های حیاتی مستلزم صرف هزینه‌های کلان بوده و با بکارگیری روش‌های نوین بهسازی، به راحتی می‌توان عملکرد این سازه‌ها را بهبود بخشید. تقویت از درون با بکارگیری از ورق‌های پلیمر مسلح با الیاف (FRP) که می‌تواند زبری سطح لوله را نیز کاهش دهد یکی از روش‌های کار در بهسازی است. در این پژوهش، مکانیزم رفتاری لوله‌های مدفون بتنی با قطر بزرگ تقویت شده با ورق‌های FRP، توسط نرم‌افزار Abaqus CAE مورد بررسی قرار گرفته و میزان تأثیر روش مقاوم‌سازی بر این لوله‌ها مشخص می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزار نشان می‌دهد که پلیمرهای مسلح با الیاف کربنی (CFRP) مناسب‌تر و مؤثرتر از پلیمرهای مسلح با الیاف شیشه‌ای (GFRP) بوده و با مقاوم‌سازی لوله‌ها از داخل، تنش‌ها را می‌توان تا ۳۵ درصد کاهش داد. هرچه ضخامت و سختی ورق‌های تقویت بالاتر باشد و به صورت چیدمان محیطی در لوله چسبانده شده باشد، کارایی روش افزایش می‌یابد. در آخر، با بررسی نتایج حاصل از مقاوم‌سازی این لوله‌ها، راه حل مناسب ارایه و هزینه لازم جهت مقاوم‌سازی با این روش برآورد و با هزینه‌های لازم جهت تعویض لوله و یا مقاوم‌سازی لوله از بیرون آن، مقایسه می‌گردد.

کلمات کلیدی: بتن مسلح، لوله‌های مدفون، مقاوم‌سازی، بهسازی، FRP

۱. مقدمه

لوله‌های مدفون به لوله‌های دایروی زیر زمین اطلاق می‌شود که جهت انتقال محصولاتی نظیر هیدروکربن‌های گازی یا مایع-که از مشتقات گاز طبیعی یا نفت خام می‌باشند- یا بخارهایی با فشار بالا و یا آب و فاضلاب استفاده می‌شود [۱]. این لوله‌ها نقشی حیاتی در تولید انرژی، اقتصاد و سلامت جوامع دارد و از آن‌ها به عنوان شریان‌های حیاتی هر جامعه یاد شده‌اند انواع مختلفی نظیر لوله‌های چدنی، فولادی، بتنی، آریست سیمان و پلاستیکی دارند که بر اساس نوع کاربری شبکه لوله‌کشی، قطر لوله، دبی گذرنده از لوله و نوع خاک محل، از انواع مختلف آن، استفاده می‌شود [۲، ۳ و ۴]. در این پژوهش به مقاوم‌سازی شاه‌لوله‌های بتنی مدفون با قطرهای بالا پرداخته می‌شود.

فرسودگی لوله‌های آب و فاضلاب سبب می‌شود که این لوله‌ها مستعد خوردگی باشند. مدفون بودن این لوله‌ها و مجاورت آن‌ها با خاک‌های قلیایی یا اسیدی، مواد خورنده در خاک، رطوبت محیط و سیال‌های گذرنده از داخل لوله همگی شرایط لازم برای خوردگی این لوله‌ها را فراهم می‌نمایند. از سوی دیگر، حمله یون‌های سولفاتی زمانی که سولفید هیدروژن (H_2S) و مواد مشابه در لوله داشته باشیم، بسیار نگران کننده است. سولفید هیدروژن خود می‌تواند عامل خوردگی بتن باشد، ولی در عدم حضور اکسیژن، می‌تواند در آب حل شده و تبدیل به اسید سولفوریک شود که آن هم می‌تواند سبب به وجود آمدن خوردگی شدید در لوله شود [۵]. به طور کلی، خط لوله‌های مدفون که برای مدت بیشتر از پنج سال تحت بار سرویس هستند، دارای خوردگی زیاد یا ترک‌های نگران کننده‌ای می‌باشند که عامل آلودگی محیط زیست و تلفات انسانی و منابع مالی نیز می‌شود به طوری که تراوش و نشت در همه لوله‌های انتقال آب و فاضلاب وجود داشته و بسیار هزینه‌بر و گران تمام می‌شود. علاوه بر موارد بالا که سبب خوردگی و نیاز لوله به مقاوم‌سازی خواهد بود، بسیاری از لوله‌های مدفون، در گذشته بدون محاسبه و طراحی، برای انتقال آب و فاضلاب بکار گرفته و استفاده می‌شد، برخی دیگر نیز، گرچه بر اساس معیارهای آیین‌نامه‌ای آن روز طراحی شده‌اند، لیکن آیین‌نامه‌های قدیم، منطبق با شرایط بهره‌برداری امروزه



نیست. امروزه با پیشرفت تکنولوژی و تولید وسایل نقلیه گوناگون، سرباره و فشار خارجی که بر این لوله‌ها وارد می‌شود و در نتیجه، احتمال ترک برداشتن و خرابی در برخی از نقاط شبکه بیشتر می‌شود. همه این موارد ضرورت نیاز به بهسازی این لوله‌ها را نمایان می‌نماید [۶].

۲. بررسی اجمالی روش‌های بهسازی لوله‌های مدفون

برای بهبود وضع لوله‌های خورده شده و لوله‌هایی که مقاومت و سختی لازم برای کاربری خود را ندارند، می‌توان لوله را با لوله‌ای جدید و مناسب تعویض نمود، یا می‌توان بدون تعویض لوله، آن را از بیرون مقاوم‌سازی نموده و کماکان از لوله قدیمی استفاده کرد و یا بدون تعویض لوله، آن را از درون، مقاوم‌سازی نمود. یکی از این سه رویکرد را برای عدم قطع بخشی از شبکه حیاتی شهری باید انتخاب نمود. هنگامی که لوله‌ای دچار خوردگی، آسیب یا خرابی شود، تقویت و عملیات مسلح سازی در مقیاس بزرگ یا عملیات تعویض لوله‌ی مدفون زیر زمین ضروری خواهد بود. در این زمان، غالباً عملیات خاکبرداری استفاده می‌شود که اجازه می‌دهد لوله‌های جدید، جایگزین لوله‌های موجود آسیب‌دیده گردد. بدیهی است در منطقه‌ای بزرگ در نزدیک لوله و در مقیاس زیاد، راهندان به وجود آمده و بار اجتماعی و مالی بسیار سنگین بر اثر کاهش عرض معابر تردد وسایل نقلیه و افزایش حجم ترافیک، تراکم ترافیک و ریسک وقوع تصادف به جامعه تحمیل خواهد شد؛ همچنین، پس از تعویض لوله، خیابان نیاز به روسازی دوباره خواهد داشت که احتمال صدمه و آسیب رسیدن به سایر سازه‌های مدفون زیر زمین به جز لوله‌ی مورد نظر نیز وجود دارد. از طرفی، عمق شبکه‌ی فاضلابرو، باید به اندازه‌ای باشد که مجرا خطر یخزدگی نداشته باشند که رسیدن به این هدف، نیازمند خاکبرداری زیاد است و ازدیاد خاکبرداری، هزینه تمام شده کار را بسیار بالا خواهد برد. از طرف دیگر، هزینه خاکبرداری و ساخت دوباره خیابان‌ها پس از تعمیر، می‌تواند از ۸۰ تا ۸۵ درصد هزینه کل تعمیر و تعویض خط لوله فراتر رود و هزینه لوله در شبکه‌های لوله‌کشی تنها ۱۵ تا ۲۰ درصد هزینه‌ی کل خط لوله است [۵]؛ بنابراین تعویض لوله، علاوه بر این که عامل کاهش عرض معبر تردد، افزایش راهندان و بالا رفتن ریسک تصادف می‌شود، هزینه‌ی زیادی را در پی خواهد داشت [۷]. همچنین، نقطه یا نقاط بحرانی خط لوله تقویت نشده و احتمال خورده شدن، آسیب یا صدمه‌ی لوله‌ی تعویض شده، از همان نقطه یا نقاط بحرانی موجود، دور از تصور نیست؛ لذا، برای جبران عملیات خاکبرداری غیرمنطقی و ضمانت کردن دوام بیشتر و ایمن بودن محیط زیست، مقاوم‌سازی لوله‌ها از درون با FRP می‌تواند به یکی از کارا ترین روش‌های بهسازی لوله‌های مدفون تبدیل گردد که در این پژوهش مورد مطالعه قرار گرفته است [۶].

۳. پلیمرهای مسلح با الیاف (FRP)

آغاز کاربرد مواد مرکب به دهه ۱۹۴۰ میلادی باز می‌گردد؛ این مصالح در ابتدا در مهندسی مکانیک استفاده می‌شد ولی پس از دهه ۱۹۸۰ میلادی در مهندسی عمران نیز جهت تقویت سازه‌ها وارد شد [۸]. از مزایای این مواد می‌توان به مقاومت کششی و سختی بالا، وزن کم، مصونیت در برابر خوردگی، نصب آسان در فضاهای محدود، کاهش در هزینه‌ی نیروی انسانی، قابلیت نصب در طول‌های زیاد و قابلیت نامحدود در اندازه و ابعاد و هندسه اشاره نمود [۹]. اصطلاح FRP، به پلیمرهای مسلح با الیاف اطلاق می‌شود که از دو جزء اصلی الیاف و رزین تشکیل شده است. الیاف به عنوان بخش اصلی، دارای رفتاری کاملاً الاستیک و ترد با مقاومت کششی و ضریب کشسانی بسیار بالا می‌باشند. در این پژوهش از FRP های تولید شده با الیاف شیشه (GFRP) که بیشتر در دسترس بوده و ارزان نیز هستند و الیاف کربنی (CFRP) و رزین از نوع اپوکسی جهت مقاوم‌سازی لوله‌ها استفاده شده است. خصوصیات این مواد در جدول ۱ و جدول ۲ آورده شده است:

جدول ۱- خصوصیات FRP های شیشه‌ای و کربنی مورد بررسی [۱۰]

خصوصیات	E-galss/Epoxy	Carbon/Epoxy [AS4/3501-6]
چگالی [kg/m ³]	۲۱۰۰	۱۵۸۰
مدول الاستیسیته طولی E ₁ [GPa]	۳۹	۱۵۱
مدول الاستیسیته عرضی E ₂ [GPa]	۸/۶	۱۰/۱
مدول برشی درون‌صفحه‌ای G ₁₂ [GPa]	۳/۸	۵/۷
مدول برشی برون‌صفحه‌ای G ₂₃ [GPa]	۳/۰	۳/۴
ν ₁₂	۰/۲۸	۰/۲۴
ν ₂₁	۰/۰۶	۰/۰۲
مقاومت کششی طولی F _{1,t} [MPa]	۱۰۸۰	۲۲۸۰
مقاومت کششی عرضی F _{2,t} [MPa]	۳۹	۵۷

مقاومت برشی دورن صفحه‌ای F_6 [MPa]	۸۹	۷۱
مقاومت فشاری طولی $F_{1,c}$ [MPa]	۶۲۰	۱۴۴۰
مقاومت فشاری عرضی $F_{2,c}$ [MPa]	۱۲۸	۲۲۸

جدول ۲- خصوصیات رزین اپوکسی مورد بررسی [۹]

ماده	چگالی $[kg/m^3]$	مقاومت کششی [MPa]	مدول الاستیسیته [GPa]	درصد کرنش نهایی
اپوکسی	۱۱۰۰ - ۱۳۰۰	۵۵ - ۳۰۰	۲/۵ - ۴/۱	۱/۵ - ۹/۰

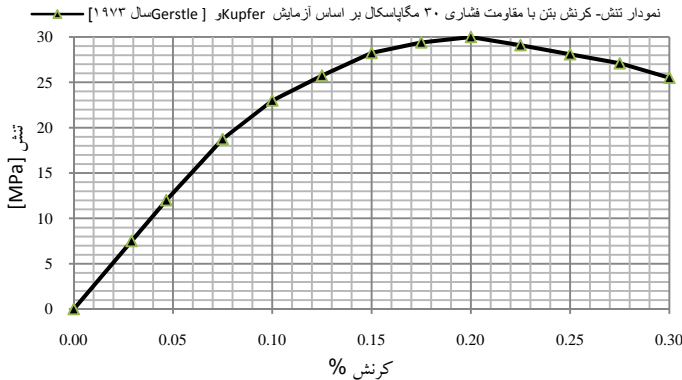
۴. مدل‌سازی لوله مقاوم‌سازی شده در نرم‌افزار Abaqus CAE [۱۱]:

جزئیات هندسه‌ی لوله، خصوصیات مصالح لوله، مواد FRP، المان‌های به‌کار گرفته شده، نوع بارگذاری و شرایط مرزی لوله در زیر آورده شده است:

۴-۱. هندسه:

لوله‌های دایره‌ای بتنی مسلح بر اساس استاندارد دارای قطر ۱۲ اینچ تا ۱۴۴ اینچ و دارای طول استاندارد ۸ فوت (۲/۴۴ متر) می‌باشند که بر اساس قطر لوله‌ها، ضخامت جداره را آیین نامه ASTM C 76 مشخص می‌نماید [۱۱ و ۳، ۲]. این لوله‌ها توسط درزبندهای لاستیکی یا ملات چسبنده به هم می‌چسبند [۱۱]. در این پژوهش، لوله‌های بتنی با قطرهای بالا مورد ارزیابی قرار گرفته است و لوله‌ای با قطر ۱۸۰۰ میلیمتر، طول استاندارد ۲/۴۴ متر و ضخامت جداره‌ی ۱۷۹ میلیمتر که بر روی بستر خاکی قرار گرفته است، مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد. با توجه به این که لوله‌های فاضلاب در قسمت زیرین لوله‌های آب قرار گرفته و چون انتقال فاضلاب در شبکه‌های فاضلاب‌رو، بر اساس نیروی گرانش و ثقل می‌باشد و لوله‌های با قطر بالاتر در اعماق بیشتر خاک قرار می‌گیرند، لذا خاک بار پیش‌تحکیمی زیادی را تحمل می‌نماید و لذا تراکم فرض شده است، همچنین تراکم‌سازی خاک کنار لوله، پس از قرار دادن لوله در هنگام نصب، سخت بوده، خاکی سست فرض شده است [۵ و ۲].

۴-۲. خصوصیات مواد:



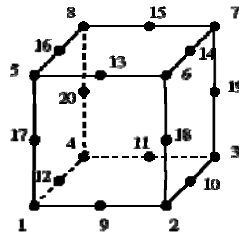
برای مدل‌سازی لوله‌ی بتنی، بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال و با رفتار غیرخطی خود در نرم‌افزار مدل شده است، نمودار تنش و کرنش بتن مدل شده در شکل ۱ آورده شده است:

شکل ۱- نمودار تنش و کرنش بتن

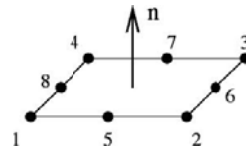
همچنین، بر اساس استاندارد ASTM C 469، نمودار تنش کرنش بتن تا ۴۰ درصد مقاومت فشاری یعنی ۱۲ مگاپاسکال خطی و تنش متناظر ترک‌خوردگی برای بتن با مقاومت فشاری ۳۰ مگاپاسکال برابر ۳/۳۸ مگاپاسکال و کرنش نهایی بتن در کشش برابر 10^{-3} فرض شده است [۳]. همچنین ضریب ارتجاعی بتن ۲۵/۷۴ گیگاپاسکال محاسبه شده است [۳]. خصوصیات FRP‌های کربنی و شیشه‌ای نیز در جدول ۱ آورده شده است.

۴-۳. نوع المان‌ها و نحوه‌ی مش‌بندی:

برای مدل‌سازی FRP در نرم‌افزار از جزء S8R و برای مدل‌سازی لوله‌ی بتنی، از جزء C3D20 استفاده نموده‌ایم؛ جزء S8R دارای ۸ نقطه و ۴ نقطه‌ی انتگرال‌گیری و جزء C3D20 دارای ۲۷ نقطه انتگرال‌گیری می‌باشد. این دو جزء در شکل ۲ و شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳- جزء آجری ۲۰ گرهی C3D20



شکل ۲- نمایش جزء پوسته‌ای S8 که در جزء S8R گره‌های انتگرال‌گیری، گره‌های گوشه‌ای در محل برخورد یال‌های جزء می‌باشد

۴-۴. بارگذاری لوله و شرایط مرزی آن:

شبکه‌های لوله‌کشی بسیار طویل می‌باشند و چون لوله‌ها دارای طول استاندارد ۲/۴۴ متر هستند، لذا مدل‌سازی شبکه به مدل کردن یک لوله با این طول خلاصه خواهد شد. لوله‌های بتنی را می‌توان با دو شرط تکیه گاهی متفاوت اجرا نمود، نخست آن که لوله بر روی تکیه‌گاه‌هایی قرار گرفته و توسط ملات و درزبند لاستیکی محکم بسته شود که در این شرایط می‌توان تکیه‌گاه‌های این لوله را کاملاً گیردار فرض نمود، زیرا تکیه‌گاه از تغییر مکان قائم بخش تحتانی لوله در تکیه‌گاه ممانعت می‌نماید و ملات و درزبند مانع دوران یا انتقال سایر بخش‌های لوله خواهند شد. همچنین، اگر لوله بر روی تکیه‌گاه قرار نداشته باشد، می‌توان فرض نمود که درجات آزادی ۲ و ۳ لوله در تکیه‌گاه آزاد خواهد بود به علت طولانی بودن لوله، درجه آزادی ۱ و به علت تقارن، دوران در هیچ جهتی نیز نداشته و درجات آزادی ۴، ۵ و ۶ نیز بسته خواهد بود. همچنین، برای مدل‌سازی خاک زیر لوله، خاک را به صورت شالوده کشسان در نرم افزار مدل و نشست خاک را، تا ۱ سانتیمتر به صورت یکنواخت فرض نموده و از اثرات پلاستیک خاک صرف نظر شده است. بر اساس ماهیت خاک زیر لوله که در عمق کمتر از ۸/۵ متر می‌باشد، مدول الاستیسیته‌ی خاک برابر ۷۰ مگا پاسکال فرض می‌شود [۱۴ و ۱۳]. همچنین، بارگذاری لوله تابع بار مرده‌ی خاک، بار زنده‌ی ترافیک، بار جانبی غیرفعال خاک و بار سیال داخل لوله است. در این پژوهش، برای سادگی و به علت سست بودن خاک کنار لوله، از فشار غیرفعال خاک به لوله صرف نظر می‌شود و افزایش ظرفیت لوله، توسط روش مقاوم‌سازی ارایه شده، در دو حالت لوله‌ی خالی از فاضلاب و لوله‌ی پر، بدست می‌آید. بار مرده‌ی خاک و زنده‌ی ترافیک که بار زنده‌ی حاصل از عبور یک کامیون ۸ تن می‌باشد، در یک راستا بوده و با هم جمع جبری می‌شوند؛ بنابراین با فرض ارتفاع ۷/۲ متر خاک بر روی لوله، بار وارد بر لوله برابر است با [۱۵]:

$$B = 1800 \frac{kg}{m^3} \text{ و } C_v = 1/5 \text{ cm}^{-2} \text{ و } OD = 1/8 \text{ m} \text{ و } p \text{ برای کامیون } 45 \text{ تن برابر } 8 \text{ تن و از جداولی محاسبه می‌شود که برابر با } 10^{-5} \times 35 \times 10^3 \text{ می‌باشد؛ بنابراین داریم:}$$

$$W_{Dead} = \frac{\gamma}{2K * tg \phi'} (1 - e^{-\frac{2K * tg \phi' * H}{B}}) * B = \frac{1800}{2 * 0.1925} (1 - e^{-\frac{2 * 0.1925 * 7.2}{2.5}}) * 2.5 = 7832 \frac{kg}{m^2}$$

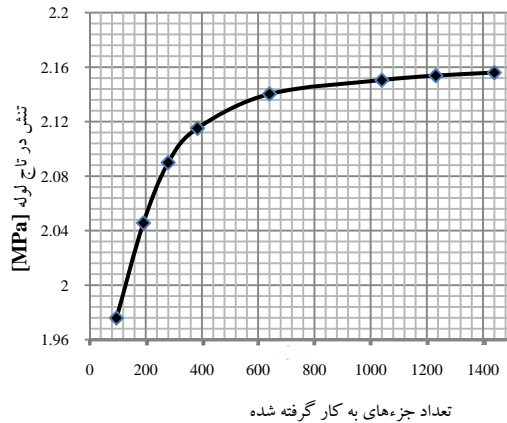
$$W_{Live} = C_v * p = 1.5 * 0.35 * 10^{-5} * (8 \text{ ton}) = 420 \frac{kg}{m^2}$$

$$W_{total} = 8250 \frac{kg}{m^2} \sim 85000 \text{ Pa}$$

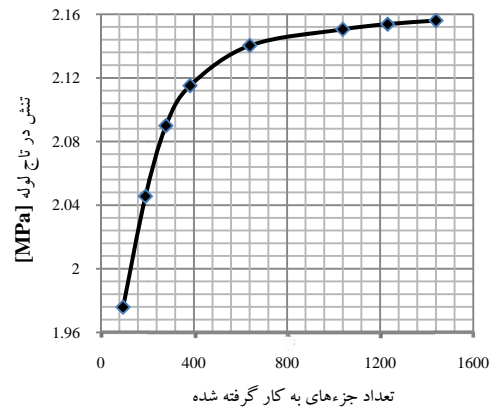
بار سیال با فرض وزن مخصوص $9810 \frac{N}{m^3}$ نیز دارای دو مؤلفه است که مؤلفه‌ی جانبی آن به صورت مثلثی و مؤلفه‌ی ثقلی آن به صورت قائم به لوله وارد می‌شود. همچنین برای بدست آوردن تنش‌ها در لوله از معیار تنش بیشینه به عنوان معیار گسیختگی لوله استفاده شده است.

۴-۵. بررسی همگرایی مدل‌ها:

آنالیز همگرایی برای دو مدل لوله‌ی بتنی بهسازی نشده و لوله‌ی بتنی مقاوم‌سازی شده با CFRP به ضخامت ۴ میلیمتر که به صورت محیطی به لوله متصل شده و تحت بار قائم ۸۵۰۰۰ پاسکال است، انجام و نتیجه‌ی آن، برای این دو نمونه در شکل ۴ و شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج حاصل از آنالیز همگرایی، نشان می‌دهد که مدل با استفاده از این اجزا همگرا خواهد شد. گفتنی است برای مدل‌سازی از مش‌های $15 \times 15 \times 17/9$ سانتی‌متری استفاده شده است و آنالیز همگرایی نشان می‌دهد که این گونه‌ی مش‌بندی نمونه، جواب‌های مناسب و با دقت لازم را در اختیار قرار خواهد داد و علاوه بر این، خطای عددی حاصله به علت مش‌های مکعبی ناچیز خواهد بود.



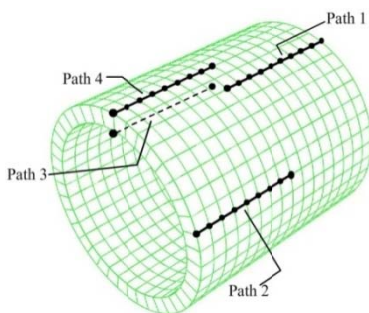
شکل ۵- نمودار همگرایی مدل لوله‌ی بتنی با ورق mm ۴ از نوع CFRP



شکل ۶- نمودار همگرایی مدل لوله‌ی بتنی بدون تقویت

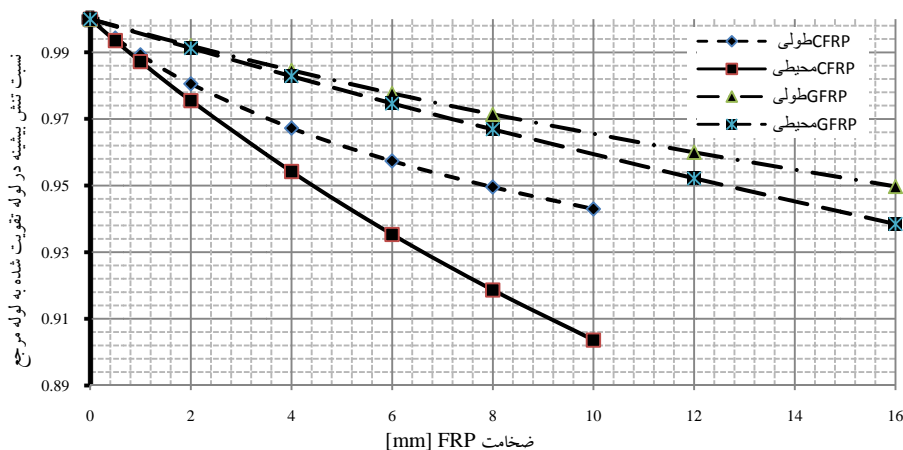
۵. نتایج حاصل از تحلیل داده‌ها در نرم‌افزار:

همانطور که بیان شد، برای لوله‌ها دو صورت مسأله وجود دارد، نخست لوله‌ای که هیچ گونه انتقال و دورانی در تکیه‌گاه‌های خود ندارد و دیگر لوله‌ای دارای درجات آزادی انتقالی در صفحه می‌باشد، همچنین هر کدام از این دو مسأله را در دو حالت لوله‌ی خالی و لوله‌ی پر بررسی نموده و در کلیه‌ی مسایل، افزایش ظرفیت لوله، در صورت استفاده از ضخامت‌های متفاوت ورق‌های CFRP و GFRP و چیدمان طولی و چیدمان محیطی بدست آورده شده و با یکدیگر مقایسه می‌شود. برای درک بهتر رفتار لوله، چند مسیر بر روی سطح درونی و بیرونی لوله تعریف شده و تنش‌ها در این مسیرها بدست آورده و میزان تأثیر روش مقاوم‌سازی برای کاهش تنش بیشینه که در تاج لوله اتفاق می‌افتد و تنش در هر کدام از این مسیرها بررسی می‌شود، این مسیرها در شکل ۶ نشان داده شده است. در نامگذاری لوله‌ها به ترتیب نوع تقویت، وضعیت چیدمان تقویت، نوع تکیه‌گاه، پر یا خالی بودن لوله و مسیر مورد بررسی می‌آید. برای ساده‌سازی، از عبارتهایی استفاده می‌شود که در ادامه نمونه‌ای از آن آورده شده است:



CFRP طولی: ورق CFRP نصب شده بصورت یکپارچه که الیاف بصورت طولی قرار گرفته‌اند.
GFRP محیطی: ورق GFRP نصب شده بصورت یکپارچه که الیاف بورت محیطی قرار گرفته‌اند.

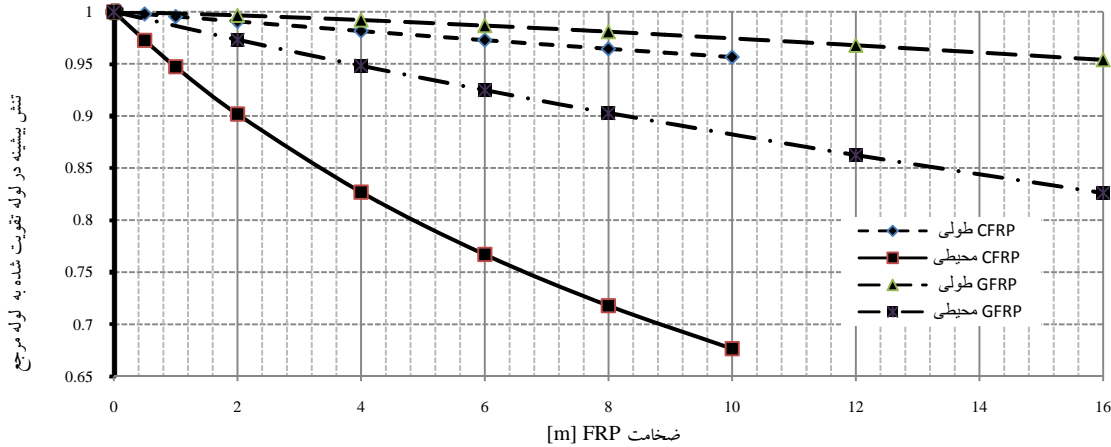
شکل ۶- نمایش مسیرهای مختلف تعریف شده در نرم‌افزار برای معلوم‌شدن توزیع تنش در لوله



شکل ۷- نمایش کارایی روش‌های مقاوم‌سازی توسط CFRP و GFRP با ضخامت‌های متفاوت با شرایط تکیه‌گاه‌های گیردار

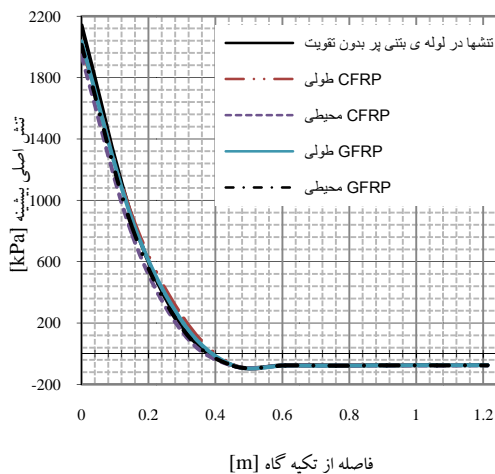
همانطور که از شکل ۷ دیده می‌شود، مقاوم‌سازی و تقویت لوله، رابطه‌ی مستقیم با ضخامت الیاف، سختی، چیدمان و جهت الیاف دارد، به این معنی که هرچه الیاف سخت‌تر باشد، میزان کارایی روش، با ضخامت کمتر تقویت، میسرتر است، به طوری که با ضخامت ۱۰ میلیمتر الیاف کربنی در جهت طولی چسبانده شده، به پاسخی مشابه ضخامت ۱۶ میلیمتر الیاف شیشه‌ای و در جهت محیطی می‌رسیم، همچنین، پس از سختی الیاف، چیدمان و

جهت الیاف میزان کارایی روش را مشخص می‌نماید؛ به بیان دیگر، زمانی که تقویت در جهت طولی قرار بگیرد، با افزایش ضخامت، کارایی روش کمتر از حالت قرارگیری تقویت در جهت محیطی خواهد بود، از طرف دیگر، با افزایش ضخامت در جهت طولی شیب متناظر نمودار فوق، کاهش می‌یابد. از طرفی، می‌توان با استفاده از الیاف کربنی و شیشه‌ای تنش‌ها را در لوله به ترتیب تا ۱۰ درصد و ۶ درصد کاهش داد. همین کار را برای لوله با تکیه‌گاه غیرگیردار تکرار می‌نمایم. نتایج این بررسی در شکل ۸ آمده است.

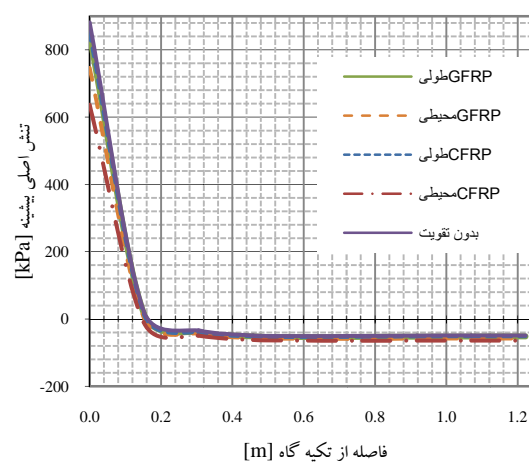


شکل ۸- نمایش کارایی روش‌های مقاوم‌سازی توسط CFRP و GFRP با ضخامت‌های متفاوت با شرایط تکیه‌گاه‌های غیرگیردار

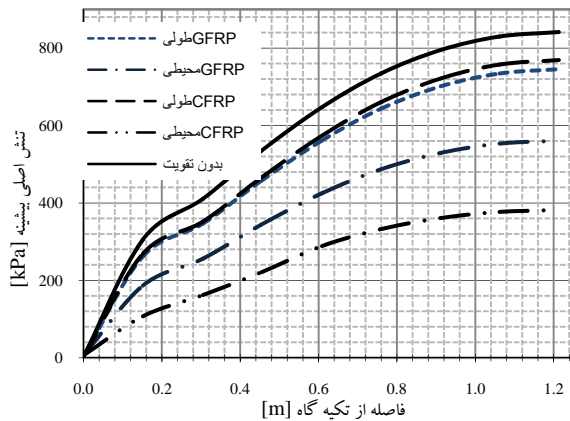
در این جا نیز می‌توان نتایج مشابه با حالت لوله با دو انتهای گیردار گرفت، یعنی مقاوم‌سازی و تقویت لوله، رابطه‌ی مستقیم با ضخامت الیاف، سختی، چیدمان و جهت الیاف دارد، به بیان دیگر، هرچه الیاف سخت‌تر باشد، میزان کارایی روش، با ضخامت کمتر تقویت، میسرتر است، به طوری که با ضخامت ۱۰ میلیمتر الیاف کربنی در جهت طولی چسبانده شده، پاسخ مشابه ضخامت ۱۶ میلیمتر الیاف شیشه‌ای و در جهت طولی خواهد بود، پس از سختی الیاف، چیدمان و جهت الیاف میزان کارایی روش را مشخص می‌نماید؛ به بیان دیگر، زمانی که تقویت در جهت طولی قرار بگیرد، با افزایش ضخامت، کارایی روش کمتر از حالت قرارگیری تقویت در جهت محیطی خواهد بود، از طرف دیگر، با افزایش ضخامت در جهت طولی شیب متناظر نمودار فوق، کاهش می‌یابد. در حالت لوله‌ی بتنی با دو انتهای غیرگیردار می‌توان با استفاده از الیاف کربنی و شیشه‌ای تنش‌ها را در لوله به ترتیب تا ۳۵ درصد و ۱۵ درصد کاهش داد. برای بررسی بیشتر میزان تأثیر روش پیشنهادی، تنش‌ها را در مسیرهای تعریف شده‌ی شکل ۶ برای ضخامت ۱۰ میلیمتر برای CFRP و ۱۶ میلیمتر برای GFRP بدست آورده می‌شود. در شکل‌های ۹ تا ۱۲ توزیع تنش‌ها در حالت‌های مختلف نشان داده شده است. در این نمودارها، تنش‌ها در مسیرهایی که در لوله تعریف شده نمایش داده شده‌است، به وضوح دیده می‌شود که ورق تقویت CFRP محیطی، GFRP محیطی به ترتیب برای تعدیل تنش‌ها مناسب‌تر و کارا تر می‌باشد، به بیان دیگر، با استفاده از تقویت به صورت محیطی بیشتر می‌توان تنش‌ها را کاهش داد، از طرفی بر اساس شکل ۹ و شکل ۱۰، میزان روش پیشنهادی در لوله‌های با دو انتهای گیردار کمتر از حالتی است که دو انتهای لوله غیرگیردار است.



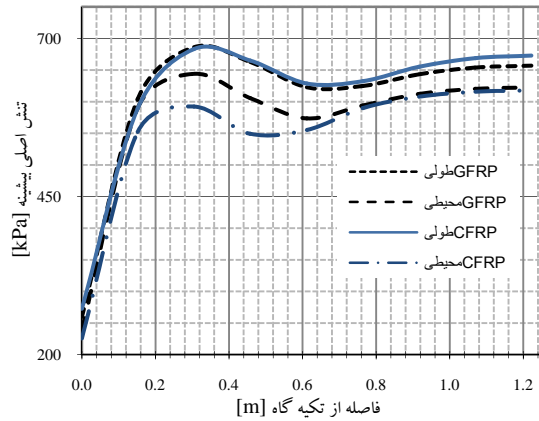
نمودار ۹-۱۰- توزیع تنش‌های لوله‌ی بتنی پر با دو انتهای گیردار در مسیر ۴



نمودار ۹- نمایش مقایسه‌ای توزیع تنش‌های لوله‌ی بتنی خالی با دو انتهای غیرگیردار خالی در مسیر ۱



نمودار ۱۲- نمایش مقایسه‌ای توزیع تنش‌های لوله‌های بتنی خالی با دو انتهای غیرگیردار در مسیر ۳



نمودار ۱۱- نمایش مقایسه‌ای توزیع تنش‌های لوله‌های بتنی خالی با دو انتهای غیرگیردار در مسیر ۲

گفتنی است برای سنجش درستی مدل‌سازی این پژوهش، در محیط نرم‌افزار، باید نمونه‌ای که خروجی‌های آن، آزمایش و گزارش شده و قابل استناد نیز باشد، مدل‌سازی نمود. با توجه به این که نمونه‌ی لوله‌های مدفون در آزمایشگاه تاکنون ساخته و بررسی دقیق نشده است؛ برای صحت پاسخ‌های بدست آمده از نرم‌افزار، نمونه‌ای بتن غیر مسلح که با الیاف FRP تقویت شده است مدل می‌شود تا نشان دهد فرایند مدل‌سازی نمونه‌ی پیش‌رو، قابل قبول و قابل استناد است. برای این منظور، از نتایج آزمایش‌های مستوفی‌نژاد و همکاران استفاده می‌شود [۱۵] که نتایج حاصل از مدل‌سازی، با اختلاف کمتر از ۱ درصد نسبت به نتایج آزمایش می‌باشد که نشان می‌دهد مدل دقت قابل قبول دارد.

جدول ۳- بررسی تنش بیشینه در لوله‌های مدفون بتنی با اتصال غیرگیردار در دو حالت پر و خالی و استفاده تقویت

اتصال غیرگیردار دو لوله به یکدیگر [$u_1 = \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 0.0, u_2 \neq 0.0, u_3 \neq 0.0$]				
وضعیت لوله (پر/خالی)	جنس ورق تقویت	چیدمان ورق تقویت (طولی/محیطی)	ضخامت ورق تقویت [mm]	بیشینه تنش در لوله تقویت شده [kPa]
خالی	CFRP	محیطی	۱۰	۶۴۸/۸
پر	CFRP	محیطی	۱۰	۵۸۹/۷
خالی	GFRP	محیطی	۱۶	۷۹۲/۱
پر	GFRP	محیطی	۱۶	۷۶۶/۱

۶. برآورد اقتصادی روش‌های بهسازی لوله‌ها بر اساس فهرست بها [۱۶]

بر اساس بندهای ۰۲۰۱۱۰ تا ۰۲۰۱۱۵ و ۰۸۰۶۰۴ تا ۰۸۰۷۰۱ فهرست‌بهای سال ۸۸ می‌توان هزینه‌ی تقریبی تعویض لوله یا مقاوم‌سازی لوله از بیرون را برآورد نمود؛ لوله‌های بتنی به صورت استاندارد به طول ۸ فوت ($2/5m \sim 2/44m$) ساخته می‌شوند؛ فرض کنیم در مسیر خط لوله، فقط یک لوله به قطر ۱۸۰۰ میلیمتر دچار خوردگی شده باشد؛ هزینه‌ی لازم برای تعویض لوله برابر است با:

$$\text{ریال} = 7,284,742 = 168,000 * 1/0 * 2/44 + (1,771,220 + 4,730) * 2/44$$

این رقم برای فقط تعویض یک لوله به قطر ۱۸۰۰ میلیمتر می‌باشد و در برآورد برآورد هزینه‌ی تمام شده‌ی آن قیمت کارگر و شرایط ترافیکی و نقش شهروندان دیده نشده است. این در حالی است که خوردگی لوله‌ها به یک لوله محدود نمی‌شود و بعضاً چند کیلومتر از لوله‌ها دارای خوردگی می‌باشند و نیاز به تعویض یا مرمت دارند. هزینه‌ی لازم برای مقاوم‌سازی لوله‌ای به قطر ۱۸۰۰ میلیمتر و از بیرون لوله برابر ۵,۸۲۷,۷۹۵ ریال می‌باشد، در حالی که مقاوم‌سازی لوله از درون آن، تنها محدود به هزینه‌ی تهیه FRP و نصب آن می‌باشد.

هزینه‌ی الیاف CFRP و GFRP به همراه رزین برای هر مترمربع این مواد در فروردین سال ۸۹ به ترتیب برابر با ۲۸۵,۰۰۰ ریال و ۱۱۵,۰۰۰ ریال می‌باشد، هزینه‌ی لازم برای مقاوم‌سازی یکپارچه لوله‌ی بتنی به قطر ۱۸۰۰ میلیمتر و طول ۲/۴۴ متر با الیاف CFRP و GFRP به ترتیب ۳,۹۳۲,۳۹۵ و ۱,۵۸۶,۷۵۶ ریال می‌باشد، بنابراین، توسط این روش حدود ۵۰ تا ۷۵ درصد هزینه کاهش خواهد یافت.



۷. نتیجه گیری:

- ۱- هرچه ضخامت تقویت افزایش یابد، ظرفیت باربری لوله بیشتر خواهد شد. و می توان با CFRP به ضخامت ۱۰ میلیمتر ظرفیت لوله را تا ۳۵ درصد بسته به نوع تقویت و شرایط دو انتهای لوله بهبود بخشید.
- ۲- چیدمان محیطی تقویت مناسب تر و کارا تر از چیدمان طولی آن در تقویت لوله ها است؛ با استفاده از چیدمان محیطی تقویت می توان در یک لوله ی خاص، تنش ها را بیش از ۲۰ درصد بیشتر کاهش داد.
- ۳- تقویت هرچه دارای سختی بیشتری باشد، ظرفیت لوله را بیشتر افزایش می دهد؛ به عنوان مثال الیاف کربنی محیطی مناسب تر از الیاف شیشه ای محیطی خواهد بود زیرا الیاف کربن دارای سختی بیشتری است.
- ۴- بهبود شرایط لوله های دو انتها غیرگیردار، توسط روش مقاوم سازی پیشنهادی، بهتر و مناسب تر خواهد بود، به بیان دیگر، با تقویت محیطی لوله های دو انتها غیرگیردار حدود ۳۵ درصد و لوله های گیردار حدود ۱۰ درصد کاهش تنش خواهند داشت.
- ۷- نتایج حاصل از تقویت لوله در حالت پر و خالی تقریباً مشابه یکدیگر است، زیرا بارهای وارد بر سطح بیرونی لوله ها از طرف خاک بسیار بیشتر از بار وارد از طرف سیال داخل لوله به دیواره ی داخلی آن هاست؛ لیکن، بحرانی ترین حالت برای لوله ها، در نظر گرفتن آن ها در حالت خالی است.

۸. مراجع:

1. Shipilov, Sergei A. and May, Iain Le, "Structural integrity of aging buried pipelines having cathodic protection," Engineering Failure Analysis, Vol.13, Elsevier; 2006. pp. 1159-1176
2. Moser, A. P., Folkman, Steven, "Buried pipe Design," 3rd edition, 2008, McGraw-Hill Book Company, New York, NY.
3. American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Underground Installation of Flexible Thermoplastic sewer pipe, D 2321. Pennsylvania, Philadelphia: ASTM.
4. ASCE., WPCF. 1982. "Gravity Sanitary Sewer Design and Construction," ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice; No.60, WPCF Manual of Practice; No. FD-5.
5. Levlin, Eric, "Water and Waste Pipes," Water Resources Engineering, Royal Institute Technology, 2001.
۶. یعقوبی، صالح و توکل زاده، محمدرضا، "بهبودی لوله های مدفون بتنی با ورق های FRP"، دومین کنفرانس ملی سالیانه بتن ایران، مهرماه ۱۳۸۹
7. Lee, Dai Gil and Chin, Woo Seok and Kwon, Jae Wook and Yoo, Ae Kwon, "Repair of Underground Buried Pipes with Resin Transfer Modeling," Composite Structures, Vol. 57, Elsevier; 2002. pp.67-77
8. American Concrete Institute (ACI) "Guide for the Design and Construction of Externally Barded FRP System for Strengthening of Concrete Structures," ACI 4402R-02, 2002
9. fib, "Externally Bonded FRP reinforcement for RC Structures," (CEB-FIP) Technical Report, 14., 2001.
10. Starbuck, J. M., Luttrell, C. R. and Aramayo, G., "Metals and Ceramics Division, Cooperative Research and Development Agreement Final Report for Cooperative Research and Development Agreement," January 2005, NO: ORNL00-0601
11. Griffin, Jeff, "History, choices for underground infrastructure pipes: pipes have been in service for over 4,500 years," Publication: Underground Construction," June 2005.
12. Hibbitt, Karlsson and Sorensen, Inc. ABAQUS/standard user's manual, v. 6.5, Pawtucket, Rhode Island; 2004.
۱۳. وزارت نیروی جمهوری اسلامی ایران، " طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور جزئیات تیپ ترانشه و بستر سازی،" استانداردهای مهندسی آب کشور، تیر ۱۳۸۰
14. Das, Braja M., "Principles of Geotechnical Engineering," 5th edition, 2002, McGraw-Hill Book Company, New York, NY.
15. Mostofinejad, Davood, Mahmoudabadi, Ehsan, "Grooving as an Alternative Method of Surface Preparation to Postpone Debonding of FRP Laminates in Concrete Beams," Journal of Composites for Construction, ASCE, Vol.14, No.6, pp. 804-811.
۱۶. فهرست بهای واحد پایه ی رشته ی شبکه ی جمع آوری و انتقال فاضلاب سال ۱۳۸۸.