بهبود خواص مکانیکی لوله پی وی سی با الیاف

چالش استفاده از لوله‌های پلاستیکی از جنس پلی‌وینیل کلرید (PVC) بهبود خواص آن‌ها بدون افزایش هزینه است . در حال حاضر، خطوط لوله PVC مقرون به صرفه‌ترین روش انتقال آب و زهکشی فاضلاب هستند . این مطالعه کامپوزیت پلیمر تقویت‌شده با الیاف شیشه (GFRP[1]) را برای تقویت سطح خارجی لوله‌های PVC پیشنهاد می‌کند، که مقاومت خمشی لوله‌ها را بهبود خواهد بخشید. بر این اساس، یک آزمایش جامع برای بررسی رفتار خمشی کامپوزیت GFRP پیچیده شده بر روی لوله‌های پلاستیکی PVC طراحی و اجرا شده‌است .این مطالعه شامل فرآیند ساخت و انواع مختلف آزمایش‌ها برای ارزیابی خواص لوله‌های GFRP / PVC می باشد. نتایج نشان داد که GFRP پوشش شده بر روی لوله پی وی سی به طور قابل‌توجهی مقاومت خمشی را بهبود می‌بخشد و مقاومت خمشی در نقطه تسلیم از ۶۴ به N ۱۱۴۰ افزایش یافت. همچنین نتایج نشان داد که رفتار خمشی به طور قابل‌توجهی تحت‌تاثیر زاویه جهت گیری الیاف می باشد . لازم به ذکر است که ترک‌خوردگی ماتریس، جدایش الیاف از ماتریس و شکستگی الیاف تعیین کننده حالت شکست لوله‌های GFRP/PVC می باشد.

مقدمه

خطوط لوله پلاستیکی در ساخت شبکه‌های فاضلاب، آب و دیگر شبکه‌های زهکشی استفاده می‌شوند .استفاده گسترده آن‌ها را می توان به طبیعت و خواص منحصر به فرد آن‌ها و توانایی انتقال مقادیر زیادی از مایعات نسبت داد. هر روز شبکه لوله‌های آب گسترده تر می شود تا انتقال آب به مناطقی که دسترسی کمی به آب دارند یا اصلا به آن دسترسی ندارند را تامین کند. همچنین، لوله‌های قدیمی‌تر با لوله‌های مدرن جایگزین می‌شوند تا کارایی آنها را بهبود بخشند. اغلب لوله‌های پلاستیکی به دلیل هزینه‌های کم‌تر نسبت به لوله‌های فلزی ترجیح داده می‌شوند .این لوله ها برای استفاده در طیف گسترده‌ای از کاربردها در حمل و نقل آب و فاضلاب استفاده می‌شوند. بیشتر لوله‌های پلاستیکی از مواد پلی‌اتیلن و پلی پروپیلن ساخته شده‌اند. مزیت لوله‌های پلاستیکی عمدتا از موادی است که با آن‌ها ساخته می‌شوند .این مواد می‌توانند حرکات زمین را بدون ایجاد شکاف تحمل کنند .آن‌ها همچنین به اندازه کافی مقاوم هستند تا از هر گونه تغییر شکل که ممکن است در نتیجه نیروهای محیطی رخ دهد، جلوگیری کنند .مزیت دیگر استفاده از لوله‌های پلاستیکی در مقایسه با سایر موادی که در توزیع آب یا دفع فاضلاب مورد استفاده قرار می‌گیرند، مقاومت در برابر نشت می باشد .مواد پلاستیکی هنگام اتصال لوله‌ها به اتصالات کمتری نیاز دارند .در لوله‌های بتنی یا لوله‌های رسی، تعداد اتصالات نزدیک به سه برابر تعداد اتصالات در لوله‌های پلاستیکی است .

علاوه بر این، لوله‌های پلاستیکی نرخ جریان بهتری را در هر متر نسبت به مواد دیگر مورد استفاده در توزیع آب و فاضلاب ایجاد می‌کنند .لوله‌های پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف، با پلیمر ترموست که در خانواده پلی استر قرار دارند ساخته شده و با الیاف شیشه یا الیاف دیگری تقویت شده‌اند .نوع رزین مورد استفاده در ساخت لوله‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه، رزین ایزوفتالیک است که مقاومت در برابر حرارت و فشار محیط را افزایش میدهد .در فرآیند تولید لوله‌های پلاستیکی تقویت‌شده با شیشه، خواص آن‌ها را می توان با تنظیم نسبت‌های مواد تغییر داد .لوله‌های پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف شیشه‌ای دارای سه‌لایه مختلف هستند که هر یک از آن‌ها مشخصات متفاوتی دارند .اولین لایه، لایه داخلی است .این لایه از پوشش مواد شیشه‌ای و رزین ساخته شده‌است که با توجه به تماس مستقیم آن با سیال جاری در لوله است، مقاوم به مواد شیمیایی است. به این ترتیب مهم است که لایه‌ای تقویت‌شده با الیاف شیشه و رزین داشته باشیم زیرا به لوله کمک می‌کند تا با جلوگیری از خوردگی شیمیایی در برابر نفوذپذیری مقاومت کند . علاوه بر این این لایه باعث می شود سطح داخلی لوله صاف تر باشد که با توجه به اینکه به کاهش اصطکاک بین لوله و سیال کمک می کند بسیار مهم است. همچنین صیقلی بودن لایه داخلی از رشد جلبک ها که در لوله های آب رایج است جلوگیری می کند. لایه میانی پی وی است و در نهایت لایه سوم لایه خارجی

است که مانند لایه داخلی از الیاف شیشه‌ای و رزین ساخته شده‌است .این لایه که به آن پوشش نیز گفته می‌شود، به طور عمده از رزین به عنوان ماده تقویت‌کننده اولیه، با روکشی که برای تکمیل خواص آن استفاده می‌شود، ساخته شده‌است .این

1- Glass fiber reinforced polymer

سه‌لایه مسئول حصول اطمینان از این موضوع هستند که آستر داخلی لوله به اندازه کافی صاف است به طوری که اصطکاک را کاهش می‌دهد و الیاف شیشه استفاده شده در لایه بیرونی به گونه‌ای طراحی شده‌اند که می‌توانند به مقاومت لوله در برابر هر گونه فشار مکانیکی و حرارتی ناشی از محیط خارجی کمک کنند .

هدف از این مطالعه تعیین بهترین مکانیزم برای تقویت لوله‌های آب است. بهترین روش استفاده از الیاف در نظر گرفته شده است که مقاومت خمشی و مقاومت به فشار داخلی را تقویت میکند.

3– آزمایش

3-1- فرآیند ساخت لوله‌های پلاستیکی پوشیده شده با کامپوزیت

تحقیقات نشان می دهد روش پیچش الیاف، مناسب‌ترین روش تولید در ساخت لوله‌های کامپوزیتی و یا استفاده از پوشش خارجی بر روی لوله‌های پلاستیکی یا فلزی می‌باشد. در این مطالعه، از ماشین‌های الیاف‌پیچ پنج محوری استفاده شده‌است .

رزین مورد استفاده، رزین با پخت آهسته (رزین اپوکسیEL2) مخلوط شده با سخت کننده اپوکسی سریع AT30 است، که دارای زمان اولیه خشک شدن حدود ۴۸ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد است.. نسبت اختلاط رزین و سخت کننده ۱۰ به ۳ وزنی است .تعداد لایه‌ها به گونه‌ای انتخاب شدند که ضخامت آن‌ها مشابه ضخامت لوله پلاستیک باشد .پس از پیچیدن لایه‌های کامپوزیت، لوله به مدت یک شب برای پخت کامل کنار گذاشته شد.

1a.

(a) (b) (c) (d)

2-3- پارامتر های طراحی

تاثیر پوشش کامپوزیتی بر رفتار خمشی لوله پلاستیک مورد بررسی قرار گرفته‌است .برای این منظور، یک لوله پلاستیکی با قطر ۲۵ میلیمتر به عنوان نمونه استفاده شد .بر این اساس برای انجام تست خمش چهار نقطه‌ای ، یک کامپوزیت GFRP با جهت گیری الیاف ۵۵ بر روی لوله پلاستیک پیچیده شده است. لازم به ذکر است که دستگاه اینسترون[2] برای انجام تست خمش چهار نقطه‌ای در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفت .دستگاه برای انجام تست خمشی با سرعت (mm / min) 5، تنظیم شد و حداکثر انحراف 60 mm درنظر گرفته شدبا توجه به تجربیات الیاف پیچی، زاویه جهت گیری الیاف تاثیر قابل‌توجهی بر رفتار سیستم‌های پیچیده شده کامپوزیتی دارد. بر این اساس، چهار جهت گیری زاویه الیاف مختلف برای بررسی اثر آن‌ها بر رفتار خمشی لوله‌های پلاستیکی پیچیده شده با الیاف شیشه‌ای مورد استفاده قرار گرفت .شکل ۱ نمونه‌های ساخته‌شده به کار رفته برای بررسی اثر جهت گیری الیاف بر رفتار خمشی لوله‌های پلاستیکی پیچیده شده GFRPرا نشان می‌دهد. همچنین تاثیر قطر لوله پلاستیک بر رفتار خمشی لوله‌های پلاستیکی پیچیده شده کامپوزیتی در این فاز مورد بررسی قرار گرفته‌است .لوله‌های پلاستیکی با قطرهای مختلف با کامپوزیت GFRP پوشانده شدند تا رفتار خمشی آن‌ها تحت خمش چهار نقطه‌ای بررسی شود . سه قطر ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ میلی متر انتخاب شدند .

4- نتایج

در این بخش، لوله PVC بدون پوشش و لوله پی وی سی پوشیده شده با الیاف شیشه‌ای مورد آزمون قرار گرفته‌است .تست خمش چهار نقطه‌ای بر روی لوله پلاستیکی PVC بدون پوشش و لوله‌های پلاستیکی پوشش شده با الیاف شیشه‌ای انجام شد . علاوه بر این، لوله های کامپوزیتی GFRP با چهار زاویه جهت گیری الیاف برای بررسی تاثیر آن‌ها بر رفتار خمشی مورد استفاده قرار گرفت.

4-1- اثر پوشش کامپوزیت GFRP بر رفتار خمشی لوله PVC

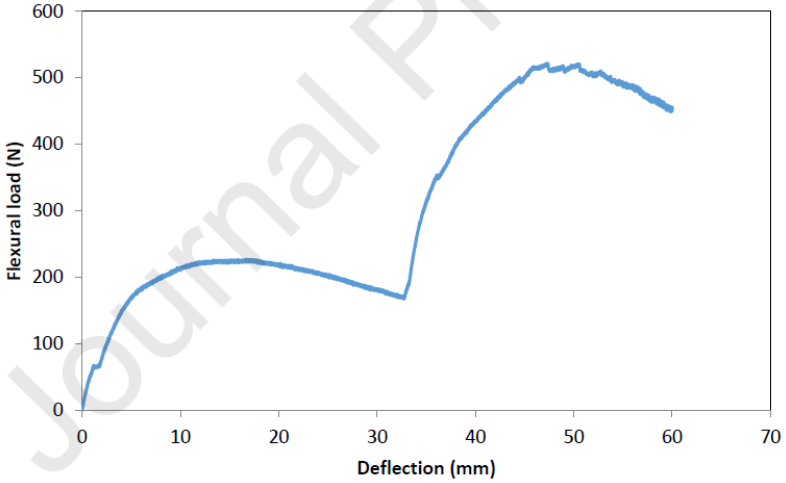
در این بخش، رفتار خمشی لوله پی وی سی بدون پوشش و لوله پی وی سی پوشش شده با GFRP به صورت دقیق مورد بررسی قرار گرفته‌است.

4-1-1- لوله PVC بدون پوشش با قطر ۲۵ میلی متر

شکل 2a منحنی نیرو بر حسب انحراف را برای لوله پی وی سی با قطر ۲۵mm و طول ۴۰۰mm در تست خمش چهار نقطه‌ای نشان می دهد .از سوی دیگر، شکل 2b لوله پلاستیکی بدون تغییر شکل و تغییر شکل داده‌شده تحت تست خمش چهار نقطه‌ای را نشان می‌دهد .رفتار خمشی لوله PVC را می توان به شش مرحله تقسیم کرد .در مرحله اول (مرحله ۱)، شکست خمشی اولیه در انحراف 1/21 mm رخ داد و نیروی خمشی 64/24 N بود. نیرو برای مدت کوتاهی با نوسان 0/5 mm پایدار می‌ماند .سپس نیروی خمشی به صورت غیرخطی افزایش می‌یابد تا زمانی که به حداکثر ظرفیت نیروی خمشی

2-Instron

خمشی N 225/5 در انحراف mm 17/5 برسد .سپس، نیروی خمشی شروع به کاهش می‌کند تا زمانی که به پایین‌ترین مقدار خود یعنی N ۱۶۹،۸۳ در mm 32/78 برسد(مرحله IV). سپس، نیرو به تدریج افزایش می یابد تا به بالاترین نقطه خود در مقدار N ۵۱۶ و انحراف mm ۵۰ برسد(مرحله V)



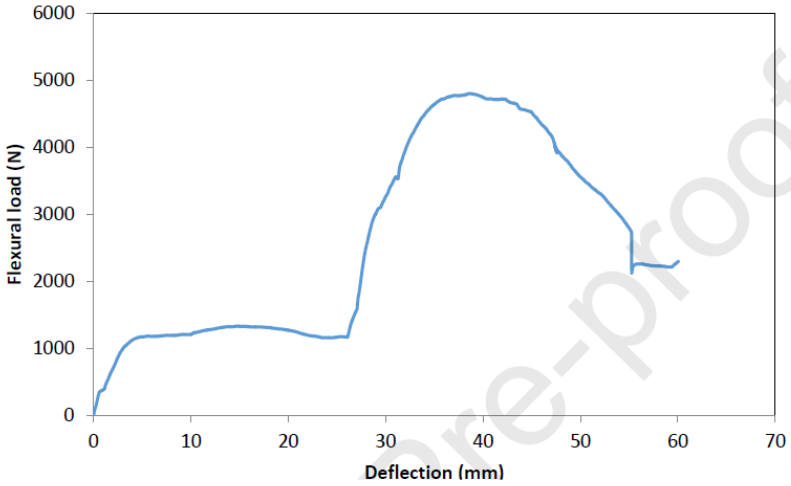
2a.

2b.

1-4- 2- کامپوزیت GFRP پوشش شده بر روی لوله پلاستیکی PVC با قطر ۲۵ میلی متر

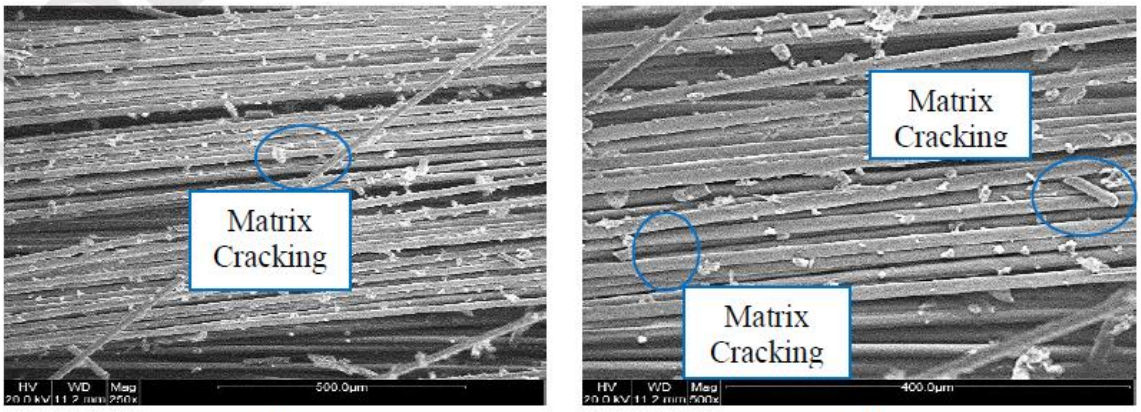
شکل‌های ۳a و۳b نمودار خمش کامپوزیت GFRP پوشش شده بر روی لوله پلاستیکی با قطر ۲۵ میلی متر و طول ۴۰۰ میلی متر با جهت گیری الیاف ۵۵ درجه را نشان می‌دهند .رفتار خمشی لوله مورد آزمایش را می توان در چهار مرحله مشاهده کرد .در مرحله اول، انحراف الاستیک 0/63 mm بود .با انحراف لوله بالاتر از این نقطه ، نیروی خمشی دیگر متناسب با انحراف نبود و منحنی از حالت خطی خارج شد .تغییر در رفتار لوله از الاستیک خطی به الاستیک غیر خطی به صورت یک فرآیند تدریجی مشاهده شد که منجر به شروع ترک‌های ماتریس در چهار مکان، دو مکان در نقاط بار گذاری و دو مکان دیگر در نقاط واکنش می‌شود که در شکل ۳c و ۳d نشان‌داده شده‌است. مشخص شد که آغاز ترک‌ها ناشی از شروع ترک‌خوردگی ماتریس در هر دو تنش است .

همانطور که در شکل‌های ۳c و ۳d نشان‌داده شده‌است ترک‌خوردگی ماتریس در بار خمشی N ۱۱۴۰ و انحراف mm ۴ رخ می‌دهد .در ادامه بدون هیچ افزایش قابل‌توجهی در ظرفیت تحمل نیروی خمشی ، انحراف تا mm 26 افزایش یافت. سپس ظرفیت تحمل بار لوله شروع به افزایش به منظور رسیدن به حداکثر ظرفیت N ۴۸۰۰ در انحراف عمودی mm ۳۸ می‌کند . پس از آن، لوله شروع به تجربه ترک‌های بزرگ در چهار مکان به دلیل تنش کششی در بیرونی‌ترین سطح می‌کند .این حالت شکست منجر به کاهش تدریجی ظرفیت تحمل نیروی لوله می‌شود .ظرفیت تحمل بار لوله در انحراف عمودی mm ۵۵ ، N ۲۲۰۱ بود .



3a.

3b.



3c .

3-1-4- مقایسه لوله پلاستیکی با پوشش کامپوزیت GFRP با لوله PVC بدون پوشش

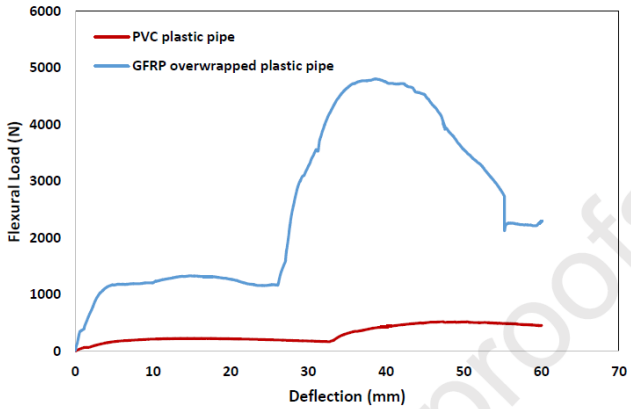
الیاف شیشه‌ای با جهت گیری الیاف ۵۵ درجه برای بررسی اثر پوشش کامپوزیت بر رفتار خمشی لوله PVC ، مورد استفاده قرار گرفته‌است .شکست اولیه برای لوله پوشش دار و بدون پوشش همان طور که در شکل ۳e و جدول ۱ نشان‌داده شده‌است غیر مشابه است. در مرحله 2، جایی که نیرو ثابت است هر دو نمونه رفتار مشابهی را نشان می دهند. با این حال، در مرحله ۳، لوله پوشش شده با کامپوزیت GFRP دارای مقاومت خمشی بالاتری در مقایسه با لوله بدون پوشش بود.

Table 1: Summary of the effect of the GFRP composite overwrapping system

Test pipe	Initial flexural failure		Ultimate flexural	
	Load (N)	Deflection(mm)	Load (N)	Deflection(mm)
Unwrapped PVC plastic pipe	64.2	1.21	516	50
wrapped PVC plastic pipe	1140.0	4.00	4800	38

Table 2: Initial Failure, ultimate load and corresponding deflection values in test pipes

	Initial Failure (N)	Deflection (mm)	Ultimate Failure (N)	Deflection (mm)
Unwrapped PVC plastic pipe				



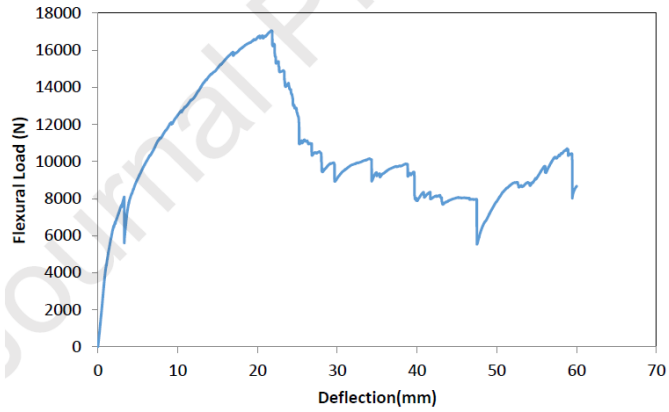
4-2- اثر جهت گیری الیاف بر روی مقاومت خمشی

در این بخش، نتایج تست خمش چهار نقطه ای برای لوله پلاستیکی با پوشش کامپوزیت GFRP آورده شده است .لوله‌های پلاستیکی مورد آزمون همگی قطر ۵۰ میلیمتر، طول ۴۰۰ میلیمتر و سه‌لایه الیاف داشتندو فقط جهت گیری الیاف در این لوله ها متفاوت است .چهار جهت گیری که در این بخش مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند عبارت بودند از: 45، 55 ، 65 و90 درجه .شکل ۴a تا 4f تاثیر جهت گیری الیاف بر روی مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

4-2-1- کامپوزیت GFRP پوشش شده بر روی لوله پلاستیکی PVC با زاویه ۹۰ درجه

در این آزمایش از لوله پلاستیکی کامپوزیتی با جهت گیری الیاف 90° استفاده شد و نتایج در شکل 4a نشان‌داده شده‌است . بررسی رفتار خمشی لوله‌های پلاستیکی PVC تقویت‌شده با الیاف شیشه سه مرحله را نشان می دهد. مرحله اول جایی است که نمونه رفتاری را نشان می‌دهد که بسیار نزدیک به الاستیک است و این را می توان فقط در زمان شروع بارگذاری مشاهده کرد .در این مرحله، نیرو خمشی به۸۰۰۰ N افزایش می‌یابد، در حالی که انحراف مربوطه در حدودmm ۳ است .از ۸۰۰۰

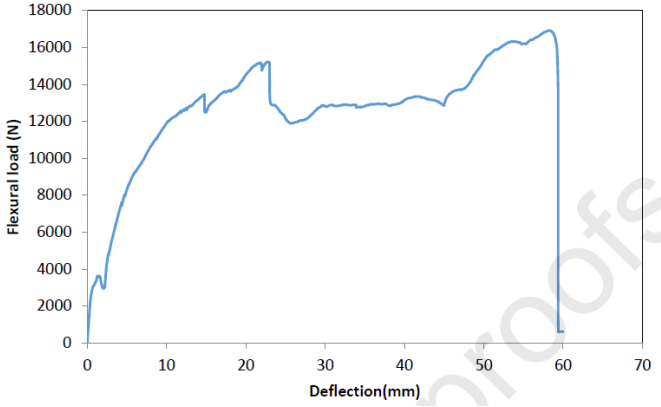
N، برخی نوسانات جود دارد و نیرو به حدود ۵۶۰۰ N کاهش می‌یابد در حالی که انحراف در حدود 3 mm ثابت می‌ماند .در این مرحله تغییر شکل پلاستیک داریم و به وضوح دیده می‌شود که نیروی خمشی دیگر متناسب با انحراف نیست . تغییر در رفتار نمونه‌ها از الاستیک به پلاستیک تدریجی است . در مرحله تغییر شکل پلاستیک، مشاهده می شود نیروی خمشی تا زمانی که لوله مورد آزمایش به تنش تسلیم نهایی خود در ۱۷۲۰۰ N در انحراف ۲۲ میلیمتر می‌رسد، افزایش می‌یابد .پس از نقطه تنش تسلیم ، وارد مرحله شکست می‌شویم، که در آن یک الگوی کلی کاهش نیروی خمشی با افزایش انحراف تا نقطه شکست داریم .در مسیر شکست، نیروی خمشی تا نقطه مینیمم ۵۶۰۰ N و انحراف حدود ۴۸ mm کاهش یافت و در نهایت در نیروی خمشی ۸۸۰۰ N با انحراف ۶۰ mm دچار شکست شد. همانگونه که در نمودار مشاهده می شود بعد از نقطه تنش تسلیم ، انحراف لوله از پیک نمودار تا شکست بیشتر از ۲۸ میلیمتر افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد لوله شکننده نیست.



4a . منحنی نیروی خمشی بر حسب انحراف برای لوله کامپوزیت با جهت گیری الیاف 90 درجه

۴ - ۲ – 2- کامپوزیت GFRP پیچیده شده بر روی لوله پلاستیکی PVC با زاویه ۶۵ درجه

در این آزمایش از لوله پی وی سی پوشیده شده با الیاف GFRP با زاویه 65 درجه استفاده شد و نتایج در شکل 4b نشان‌داده شده‌است. در مرحله اول نمونه رفتاری را نشان می‌دهد که بسیار نزدیک به الاستیک است و این را می توان فقط در زمان شروع بارگذاری مشاهده کرد .در این مراحل، نیروی خمشی به ۳۶۰۰ N افزایش می‌یابد، در حالی که انحراف متناظر کمی کم‌تر از ۱ mm است.



4b . منحنی نیروی خمشی بر حسب انحراف برای لوله کامپوزیت با جهت گیری الیاف 65 درجه

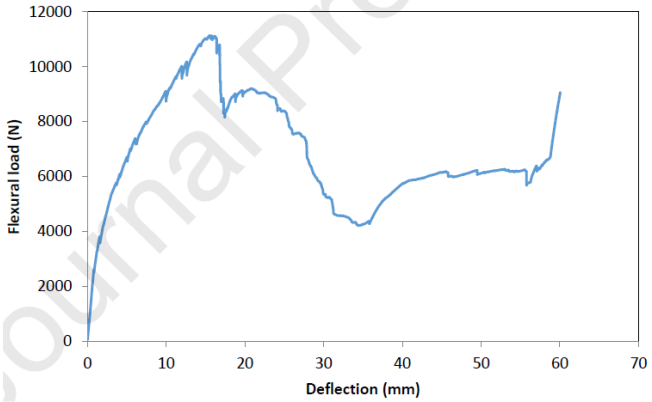
از نیروی ۳۶۰۰ N ، نیرو به حدود ۲۸۰۰N به طور لحظه‌ای کاهش می‌یابد، در حالی که انحراف تا کمی بالاتر از۱ mm افزایش می‌یابد . فراتر از این نقطه، تغییر شکل پلاستیک وجود دارد، که در آن می توان دید که نیروی خمشی دیگر متناسب با انحراف نیست .همچنین می‌توان گفت که تغییر در رفتار نمونه‌ها از الاستیک به پلاستیک تدریجی است .در مرحله

تغییر شکل پلاستیک، نیرویی که فرآیند را ادامه می‌دهد و مشاهده می‌شود که به مقدار پیک اول ۱۴۸۰۰ با انحراف ۲۳ mm افزایش می‌یابد؛ سپس نیرو تا حدود ۱۲۰۰۰ N کاهش می‌یابد و انحراف همچنان ادامه دارد .

پس از آن نیرو تا حداکثر سطح ۱۶۸۰۰ N با انحراف ۵۸ mm افزایش می‌یابد، و در نهایت با افت نیرو تا تقریبا صفر در انحراف 60 mm دچار شکست می شود. همانطور که در شکل دیده می‌شود پس از تنش تسلیم، نیرو به شدت کاهش یافت، و این نقطه‌ای است که در آن لوله مورد آزمون شکست خورد که به وضوح نشان می دهد ماده در این نقطه بسیار شکننده بوده است .

4-2-3- کامپوزیت GFRP پوشش شده بر روی لوله PVC با زاویه ۵۵ درجه

در این آزمایش از لوله پلاستیکی کامپوزیت با پوشش الیاف GFRP با زاویه 55 درجه استفاده شد و نتایج در شکل 4c نشان‌داده شده‌است .رفتار لوله مورد آزمون شامل سه مرحله است، . در مرحله اول در زمان شروع بارگذاری رفتارنمونه نزدیک به الاستیک است . در این مرحله، نیروی خمشی به ۴۰۰۰ N افزایش می‌یابد، در حالی که انحراف مربوطه کمی کم‌تر از mm ۲ است .واضح است که در این نمونه، گذار از تغییرشکل الاستیک به تغییرشکل پلاستیک کاملا مبهم می‌باشد .نقطه ۴۰۰۰ N جایی است که تغییر شکل پلاستیک داریم، که به وضوح نشان می‌دهد نیروی خمشی دیگر متناسب با انحراف نیست .



4c . منحنی نیروی خمشی بر حسب انحراف برای لوله کامپوزیت با جهت گیری الیاف 55 درجه

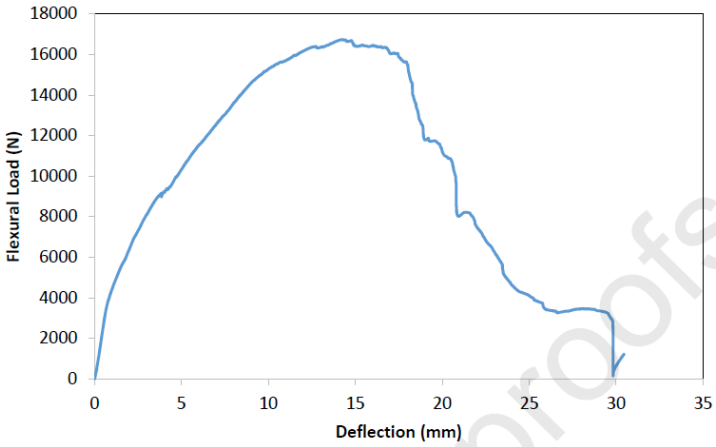
در مرحله تغییر شکل پلاستیک، نیرو تا سطح تنش تسلیم ۱۱۲۰۰ N با انحراف متناظر ۱۶ mm افزایش می‌یابد، که در آن نقطه بارگذاری تا آخرین مرحله جایی که شکست رخ می‌دهد می‌رود .در این مرحله آخر که نمونه به سمت شکست اجتناب‌ناپذیر می‌رود، یک افت ناگهانی در نیروی خمشی تا حدود ۸۲۰۰ N داریم .افزایش اندکی در نیرو، همراه با یک خیز به سطح نیرو خمشی ۹۲۰۰ N با یک انحراف ۲۱ mm سپس یک افت بیشتر در نیرو خمشی ۴۱۰۰ N و انحراف ۳۵ mm وجود دارد .سپس، نیرو خمشی دوباره شروع به افزایش کرد، با عبور از یک دوره نیرو ثابت، و در نهایت، شکست در نیرو خمشی ۹۰۰۰ N رخ داد، که خیز مربوطه ۶۰ mm بود .همانگونه که در نمودار مشاهده می شود از نقطه تسلیم تا شکست، انحراف لوله تا حدود ۴۴ mm افزایش می‌یابد، که نشان‌دهنده این است که لوله شکننده نیست .با این حال، با بارگذاری بیشتر، شکست نهایی در سطح نیرو ۹۰۰۰ N رخ داده است.

4-2-4- کامپوزیت GFRP پیچیده شده بر روی لوله پلاستیکی PVC با زاویه ۴۵ درجه

در این آزمایش، یک لوله پلاستیکی با پوشش الیاف GFRP با جهت گیری 45 درجه به کار رفته و نتایج در شکل 4d نشان‌داده شده‌است .رفتار نمونه شامل سه مرحله است. مرحله اول جایی است که نمونه رفتاری را نشان می‌دهد که بسیار نزدیک به الاستیک است و این را می توان فقط در زمان شروع بارگذاری مشاهده کرد . با افزایش نیرو به ۴۰۰۰ N ، انحراف مربوطه در حدود mm ۱ است .نقطه ۴۰۰۰ N جایی است که فرض می‌شود فراتر از این نقطه، تغییر شکل پلاستیک داریم، که در آن می‌توان به وضوح نشان داد که نیرو خمشی دیگر متناسب با انحراف نیست .در مرحله تغییر شکل پلاستیک، نیرو تا سطح مقاومت نهایی ۱۶۸۰۰ N با انحراف متناظر ۱۴ mm افزایش می‌یابد، پس از نقطه تسلیم، نمونه تحت خمش قرار می‌گیرد در حالی که نیروکاهش می‌یابد تا جایی که نیروی خمشی تقریبا صفر ، و انحراف 30 mm است .

شکل 4d نشان می‌دهد که یک انحراف پیوسته از لوله در هنگام حرکت به سمت شکست وجود داشته و نشان می‌دهد که در این نقطه، لوله تغییر شکل پلاستیک از خود نشان داده‌است.

خلاصه یافته‌های اصلی این بخش در شکل 4e و جدول ۳ نشان‌داده شده‌است. جهت گیری الیاف ۶۵ درجه GFRP دارای تنش تسلیم ۱۶۸۰۰ N می‌باشند .کم‌ترین تنش تسلیم 11200 N بود که مربوط به جهت گیری الیاف GFRP ۵۵ درجه می باشد. این امر به این دلیل است که در جهت ° ۹۰ / ۰ ممکن است حداکثر نیروی کششی به عنوان نیرو تک محوری در هر دو جهت تنش در لوله‌های تحت خمش وجود داشته باشد. در ° ۴۵ ، ° ۵۵ و ° ۶۵ و همچنین تمام زوایای دیگر به جز °۹۰ نیروهای برشی همیشه در هر دو جهت تنش رخ می‌دهند. در واقع، با توجه به مقاومتGFRP ، جهت گیری الیاف یکی از سه عامل مهم در میزان تنش تسلیم می باشد.



4d . منحنی نیروی خمشی بر حسب انحراف برای لوله کامپوزیت با جهت گیری الیاف 45 درجه

Table 3: Initial flexural failure, ultimate flexural and corresponding deflection values in test pipes

Test pipe	Initial flexural failure		Ultimate flexural	
	Load (N)	Deflection(mm)	Load (N)	Deflection(mm)
90° GFRP	800	3	17200	22
65° GFRP	3600	1	16800	58
55° GFRP	4000	2	11200	16
45° GFRP	400	1	16800	14

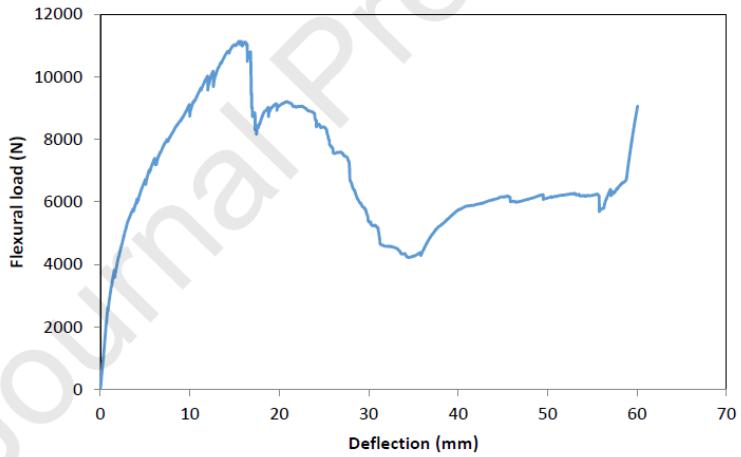
Pre-proofs

3-4- اثر قطر لوله بر مقامت خمشی لوله‌های پلاستیکی PVC

در این بخش، نتایج تست خمش چهار نقطه‌ای برای لوله‌های مختلف ارائه، تحلیل و مورد بحث قرار گرفته‌است. قطر لوله‌های مورد آزمون ۲۵ mm، ۵۰ mm و۱۰۰ mm می باشد و همچنین لوله‌های پلاستیکی با قطر 25 mm، ۵۰ mm و ۱۰۰ mm و با پوشش کامپوزیت GFRP با یک لایه الیاف، با طول ۴۰۰ mm و جهت گیری ۵۵ درجه داریم .این لوله‌ها شامل سه لوله پلاستیکی و سه‌لایه فیبر GFRP در ۵۵ درجه میلیمتر می‌باشند. نتایج لوله پلاستیکی PVC بدون پوشش با قطر 25 mm قبلا مورد بحث قرار گرفته‌است .بنابراین در بخش بعدی تنها نتایج برای لوله‌های پلاستیکی سایز ۵۰ و ۱۰۰ میلی‌متری به طور مفصل مورد بحث قرار گرفته است.

4-3-1- لوله‌های پلاستیکی PVC بدون پوشش با قطر ۵۰ میلی متر

شکل ۵ (الف)نتایج به‌دست‌آمده در هنگام قرار گرفتن لوله پلاستیکی ۵۰ میلی‌متری در معرض بارگذاری خمشی را نشان می‌دهد .همانطور که مشاهده می شود یک رابطه تقریبا خطی بین نیروی خمشی و انحراف وجود دارد، اما منحنی بعد از نیروی خمشی ۸۰۰ N به حالت افقی است که انحراف در این نقطه ۱۱mm است. در نیروی خمشی بالاتر از ۸۰۰ N ، می توان دید که منحنی مسطح است، که نشان‌دهنده افزایش نرخ انحراف است، با ماکزیمم نیروی خمشی 1180N و انحراف متناظر۳۰ mm پس از آن نیروی خمشی در انحراف ۴۳ mm به حدود۸۸۰ N کاهش یافت . نیروی خمشی تا حد نهایی ۱۷۶۰۰ N ، با انحراف متناظر ۶۰ mm افزایش می‌یابد، که در آن نقطه شکست اتفاق می افتد .شکل ۵b یک لوله پلاستیکی ۵۰ میلی‌متری بدون پوشش که تحت تست خمش چهار نقطه‌ای تغییر شکل داده‌شده نشان می‌دهد .



4d. منحنی نیروی خمشی بر حسب انحراف برای لوله کامپوزیت با جهت گیری الیاف 55 درجه

4-3-2- لوله‌های پلاستیکی PVC بدون پوشش با قطر ۱۰۰ میلیمتر

شکل ۵c نتایج به‌دست‌آمده در هنگام قرار گرفتن لوله پلاستیکی ۱۰۰ میلی‌متری در معرض بارگذاری خمشی را نشان می‌دهد . در این شکل مشاهده می شود با افزایش نیرو، افزایش ثابتی در انحراف وجود دارد، با رابطه بین نیرو خمشی و انحراف بسیار نزدیک به خطی از شروع بارگذاری تا نقطه زمانی که لوله نمونه به مقاومت نهایی در حدود ۱۰۰۰ N رسید، با یک خیز که در آن نقطه ۸۳ mm بود .از این شکل، شکست اولیه در نیروی خمشی در حدود ۲۰۰ N، که در آن انحراف در حدود ۱۱ mm بود، تشخیص داده شد .از نیروی خمشی اوج، با کاهش نیروی خمشی، افزایش در انحراف وجود داشت .در نهایت، لوله در انحراف ۱۲۰ mm شکست خورد، با قرائت خمشی در این نقطه ۵۲۰ N است .شکل ۵ d یک لوله پلاستیکی ۱۰۰ میلی‌متری بدون پوشش و تغییر شکل داده‌شده را تحت تست خمش چهار نقطه‌ای نشان می‌دهد .

4-3-3- لوله‌های پلاستیکی PVC با پوشش کامپوزیت با قطر ۱۰۰ میلیمتر

شکل ۵ e نتایج حاصل از پوشش کامپوزیت GFRP بر روی PVC را نشان می‌دهد. قطر لوله پلاستیکی ۵۰ mm در معرض بارگذاری خمشی قرار گرفته‌است .مشاهده شد که رفتار خمشی سه مرحله دارد .

در مرحله اول، ما لوله آزمایش را داریم، که رفتاری را نشان می‌دهد که بسیار نزدیک به الاستیک است، که در آن تغییر بین نیروی و انحراف خطی است، و نیروی خمشی در شکست اولیه ۱۴۰۰ N با انحراف متناظر ۱ mm است .بعد از مرحله اول، ما مرحله دوم را داریم، که در آن می توان مشاهده کرد که نرخ تغییر شکل در مقایسه با مرحله اول افزایش‌یافته است .

بعد از مرحله اول، ما مرحله دوم را داریم، که در آن می توان مشاهده کرد که نرخ تغییر شکل در مقایسه با مرحله اول افزایش‌یافته است .stage.

تغییر در رفتار نشان‌داده‌شده در نمونه از الاستیک به پلاستیک تدریجی بود .در این مرحله دوم، نیروی خمشی تا سطح نهایی N۳۷۰۰ ، با خیز متناظر حدود ۸۰ mm افزایش یافت .پس از مرحله نهایی بارگذاری، مرحله شکست تنظیم می‌شود، که در آن نیروی به طور پیوسته با انحراف نمونه کاهش می‌یابد و سپس به شکست منتهی می‌شود که در آن نیروی خمشی ۳۲۰۰ Nو خیز ۱۲۰ mm است .شکل ۵ f یک لوله پلاستیکی ۵۰ میلی‌متری GFRP تغییر شکل‌یافته و تغییر شکل‌یافته را تحت تست خمش چهار نقطه‌ای نشان می‌دهد .از سوی دیگر، شکل‌های ۵ g و h۵ ، ترک‌خوردگی ماتریس تنش و فشار را نشان می‌دهند .این شروع به ظاهر شدن در نیروی خمشی N۱۴۰۰ ، با یک انحراف ۱ mm می‌کند .لوله ترک‌ها را در چهار ناحیه به دلیل تنش کششی در پایین‌ترین سطح تجربه کرد .این امر منجر به کاهش ظرفیت حمل بار لوله می‌شود .

4-3-4- لوله‌های پلاستیکی PVC با پوشش کامپوزیت با قطر ۱۰۰ میلیمتر

شکل ۵ (الف)نتایج به‌دست‌آمده در هنگام قرار گرفتن لوله ۱۰۰ میلی‌متری پلاستیک کامپوزیت GFRP در معرض بارگذاری خمشی را نشان می‌دهد .از این شکل، می توان مشاهده کرد که یک رابطه تقریبا خطی بین نیروی خمشی و خیز تا نقطه‌ای که نیروی خمشی ۱۰۰۰ N بود، با خیز متناظر ۲ mm وجود دارد .فراتر از نیروی خمشی N۱۰۰۰ ، می توان مشاهده کرد که منحنی مسطح‌تر است، که به عنوان نشانه‌ای از این است که نرخ انحراف افزایش‌یافته است، و نقطه ماکزیمم اولیه با نیروی خمشی ۴۶۰۰ N و خیز مربوطه ۳۰ mm است .سپس نیروی خمشی در انحراف حدود ۴۵ mm به حدود ۳۲۰۰ N کاهش می‌یابد .نیروی خمشی تا حد نهایی ۷۸۰۰ N با انحراف متناظر ۶۰ mm افزایش می‌یابد، که در آن نقطه ما شکست داریم . شکل ۵ j یک لوله پلاستیکی ۱۰۰ mm PVC کامپوزیتی GFRP تغییر شکل‌یافته و تغییر شکل‌یافته تحت تست خمش چهار نقطه‌ای را نشان می‌دهد .همان طور که در شکل ۵ k و ۵ l نشان‌داده شده‌است، ترک‌ها در هر دو سطح کششی و فشاری شروع به رخ دادن کرده‌اند .هنگامی که نیروی خمشی به ۱۰۰۰ N می‌رسد، ماتریس شروع به ترک با انحراف عمودی ۲ mm می‌کند .

لوله به انحراف ادامه داد تا اینکه به حداکثر ظرفیت ۷۸۰۰ N خود با انحراف ۶۰ mm رسید .همانطور که در شکل‌های ۵ k و ۵ l نشان‌داده شده‌است، شکست فیبر در نتیجه ترک‌خوردگی رخ داده‌است که در طول آزمایش رخ داده‌است .یکی از نتایج مهم این است که خروجی شکست به طور مداوم ظرفیت تحمل بار لوله را کاهش می‌دهد .

خلاصه یافته‌های اصلی این بخش در جدول ۳ و شکل ۵ m نشان‌داده شده‌است .نیروی الاستیک و خیز مربوطه، سپس نیروی خمشی نهایی با خیز مربوطه .مشاهده می‌شود که حداکثر انحراف در نقطه شکست در چهار لوله در ۶۰ mm یک‌سان می‌باشد .با توجه به مقاومت نهایی، به وضوح نشان می‌دهد که GFRP

با توجه به مقاومت نهایی، به وضوح نشان می‌دهد که GFRPtseT

نتایج نشان داد که لوله‌های کامپوزیتی به طور کلی استحکام بالاتری دارند .در لوله‌هایGFRP ، بالاترین مقاومت در لوله ۵۰ میلی‌متری GFRP برابر با ۷۸۰۰ نیوتن بود .بالاترین مقاومت بعدی لوله GFRP ۲۵ mm با مقاومت نهایی ۴۸۰۰ N و ۱۰۰GFRP mm با مقاومت ۳۷۰۰ N بود .با این حال، برای لوله‌های پلاستیکی، بیش‌ترین مقاومت نهایی مربوط به لوله ۵۰ میلی‌متری و پس از آن لوله ۱۰۰ میلی‌متری با مقاومت نهایی ۱۰۰۰ N بود، در حالی که لوله ۲۵ میلی‌متری کم‌ترین مقاومت نهایی ۵۲۲ N را داشت .در مقاومت نهایی لوله‌ها به ترتیب ۶۰، ۸۳ و ۴۸ میلی متر بود .مقاومت GFRP یکی از ویژگی‌هایی است که باعث می‌شود ماده کاربردهای متعددی پیدا کند .این نتیجه یک جلوه واضح است که لوله GFRP می‌تواند به عنوان یک آلمان ساختاری اصلی عمل کند .این بدان معنی است که با مقاومت بالا، لوله‌های GFRP مورد استفاده در تامین آب می‌توانند از موانعی مانند راه‌آهن بر روی رودخانه‌ها با فاصله قابل‌توجهی از هم عبور کنند .همچنین مشاهده شد که GFRP در ساختمان نماها به کار می‌رود که مقاومت مصالح را نشان می‌دهد .علاوه بر مقاومت، وقتی GFRPماده انتخابی برای لوله‌هایی است که لوله‌های GFRP سبک‌تر هستند، وزن وارد عمل می‌شود که هزینه ساخت را کاهش می‌دهد.

5- نتیجه‌گیری

رفتار خمشی برای چهار زاویه جهت گیری الیاف مورد بررسی قرار گرفت .نتایج نشان داد که سیستم پیچیده شده بر روی لوله به طور قابل‌توجهی مقاومت خمشی را بهبود می‌بخشد.

۱ .استفاده از کامپوزیت GFRP پیچیده شده بر روی لوله‌های پلاستیکی PVC منجر به بهبود قابل‌توجه ظرفیت تحمل خمش در مقایسه با لوله‌های PVC بدون پوشش می‌شود.

۲ لوله پی وی سی با پوشش کامپوزیت GFRP با جهت گیری الیاف ۹۰ درجه، بیشترین ظرفیت تحمل بار خمشی را نشان داد.

۳ .لوله پی وی سی با پوشش کامپوزیت GFRP با قطر بزرگ، بالاترین تنش تسلیم را در مقایسه با سایر قطرها نشان داد .

۴ .اثر یک لایه GFRP بر روی مقاومت خمشی در مقایسه با لوله‌های بدون پوشش قابل‌توجه بود، که این مقدار قابل‌توجه بیش از ده برابر است.

۵ .کامپوزیت GFRP پیچیده شده بر روی لوله‌های پلاستیکی PVC تحمل بالاتری نسبت به لوله‌های PVC بدون پوشش دارند.