

رفتار مکانیکی رزین پلی استر و بتن پلیمری در بارگذاری های استاتیکی و دینامیکی

Original Article

محمودههاد شکرپه* (استاد)

سینا رضوانی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
 دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

رضا مسلمانی (استادیار)

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

در این نوشتار با استفاده از رزین پلی استر ترکیب جدیدی برای کاهش هزینه‌ی ساخت بتن پلیمری ارائه شده است. مقایسه‌ی خواص مکانیکی بتن ارائه شده با بتن‌های پلیمری اپوکسی نشان می‌دهد که علی‌رغم کاهش قابل توجه هزینه‌های تولید، ترکیب جدید دارای خواص مکانیکی مطلوبی است. برای مطالعه‌ی تأثیر اجزای سازنده بر خواص مکانیکی ترکیب نهایی، رفتار مکانیکی بتن پلیمری ارائه شده در فشار و خمش، مطالعه و با رفتار مکانیکی رزین پلی استر خالص مقایسه شد. نتایج آزمایشگاهی نشانگر افزایش پیوسته‌ی خواص استحکامی رزین پلی استر (افزایش ۴۱ درصدی استحکام کششی) و بتن پلیمری (افزایش ۲۷ درصدی استحکام فشاری)، با افزایش نرخ بارگذاری از ۰/۸ تا ۹۰ میلی‌متر بر ثانیه است. با توجه به رفتار وابسته به نرخ کرنش رزین پلی استر به عنوان یکی از اجزای اصلی سازنده‌ی بتن پلیمری، حساسیت به نرخ کرنش بتن قابل توجهی است. اگرچه میزان وابستگی به نرخ کرنش بتن پلیمری کم‌تر است.

shokrieh@iust.ac.ir
 sina_rezvani@iust.ac.ir
 mosalmani@scu.ac.ir

واژگان کلیدی: بتن پلیمری، رزین پلی استر، رفتار دینامیکی، نرخ کرنش.

۱. مقدمه

برابر محیط‌های خورنده و شیمیایی است.^[۱] با داشتن این ویژگی‌ها، بتن پلیمری در بسیاری از کاربردها از جمله ساخت‌وساز و کاربردهای ساختاری مهندسی مانند کف‌سازی اتوبان‌ها، بدنه‌ی پل‌ها، لوله‌های فاضلاب، پنل‌های ساختاری و تزئینی و پوشش ترک ساختارهای بتنی به‌طور روز افزون جایگزین بتن سیمانی می‌شود.^[۲] به‌عنوان مثال، اخیراً بخشی از صفحه‌های زیرین سیستم تصفیه‌ی آب تهران، با طراحی و ساخت صفحه‌های بتن پلیمری جایگزین شد.^[۳] افزایش هزینه‌ی ساخت و محدودیت استفاده در ماه‌های بالا با توجه به رزین مورد استفاده، از محدودیت‌های بتن پلیمری است. همچنین چون رزین‌های مورد استفاده در تولید این نوع بتن در آب قابل حل نیستند، ساخت آن به‌مراتب مشکل‌تر از بتن سیمانی است.

ترکیب‌ها، ویژگی‌ها و کاربردهای مختلف بتن پلیمری بسیار گسترده است.^[۴-۹] کاربرد و عملکرد بتن پلیمری علاوه بر نوع رزین مورد استفاده، به نوع و اندازه‌ی سنگدانه بستگی دارد.^[۱۰] توزیع سنگدانه‌ها باید به‌گونه‌ی باشد که پس از پخت بتن، حباب‌ها و فضاهای خالی کمینه باشد.^[۱۱] مطالعه درمورد مقاومت مکانیکی بتن پلیمری ساخته شده با رزین اپوکسی و پودر سیلیکا به‌عنوان پرکننده^[۱۲] نشان داد که استحکام فشاری بتن پلیمری با ترکیب پیشنهادی در بهترین حالت، ۴ برابر استحکام فشاری بتن‌های سیمانی با استحکام معمولی است. همچنین بررسی پایداری مکانیکی بتن پلیمری بهینه ساخته شده با رزین اپوکسی و با تمرکز بر استحکام کششی و چقرمگی شکست تحت سه چرخه‌ی دمایی مختلف^[۱۳] نشان داد که چقرمگی

در سال ۱۹۷۱ میلادی برای اولین بار از پلیمر در ساخت بتن استفاده شد. به‌دلیل بهبود چشمگیر خواص مکانیکی بتن‌های ساخته شده از پلیمر نسبت به بتن‌های سیمانی معمول، کاربرد این بتن‌ها به‌سرعت گسترش یافت. با توجه به چگونگی کاربرد پلیمر در ساخت بتن، می‌توان این بتن‌ها را به چهار دسته تقسیم کرد: بتن پلیمر - سیمان، بتن آغشته شده با پلیمر، بتن پلیمر - گوگرد، و بتن پلیمری.^[۱] بتن پلیمری ماده‌ی کامپوزیتی است که از ترکیب سنگدانه‌های معدنی مانند ماسه یا شن با یک مونومر ساخته می‌شود. بتن پلیمری در مجموع دارای خواص مکانیکی بهتری نسبت به بتن سیمانی معمولی است. از جمله این خواص می‌توان به مقاومت فشاری بسیار بالای بتن پلیمری^[۲] - بالاتر از مقاومت بتن سیمانی معمولی - و نیز مقاومت کششی و خمشی بهتر این بتن نسبت به بتن سیمانی معمولی^[۳] اشاره کرد. نفوذپذیری بالا، مقاومت سایشی کم، مقاومت کم در برابر یخ‌زدان، زمان گیرش زیاد و پدیده‌هایی مانند حفره‌بندی (کاویتاسیون) و خوردگی ناشی از نفوذ کلر از جمله نقاط ضعف بتن سیمانی است؛ اما در بتن پلیمری همه‌ی این ضعف‌ها به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.^[۴] همچنین به‌دلیل چگالی کم‌تر، بتن پلیمری بارهای دینامیکی وارده را بهتر از بتن سیمانی معمولی تحمل می‌کند.^[۵] یکی از ویژگی‌های برجسته‌ی بتن پلیمری نسبت به بتن سیمانی معمولی، مقاومت بسیار بالای آن در

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۶/۲۲، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۱/۱۱، پذیرش: ۱۳۹۳/۱۱/۲۸

جدول ۱. مشخصات فیزیکی رزین پلی‌استر استفاده شده.

مشخصات فیزیکی	
چگالی (kg/m ³)	۱۰۵۰
گرانروی در دمای ۲۵°C (mPa.s)	۶۰۰
زمان ژل شدن (دقیقه)	۲۷
عمر نگهداری (ماه)	۶
دمای اعوجاج حرارتی (°C)	۸۰



شکل ۱. نمونه‌های کششی کوچک رزین پلی‌استر مطابق با استاندارد Type V ASTM D۶۳۸.

رفتار کششی و فشاری پلیمرها شدیداً وابسته به نرخ بارگذاری است. [۲۰-۲۲] با توجه به مشکلات موجود در آزمایش فشاری نمونه‌های پلیمری از قبیل پدیده‌ی بشک‌یابی شدن (در نتیجه نیاز به اندازه‌گیری پیوسته‌ی قطر نمونه در طول آزمایش برای به دست آوردن تنش و کرنش واقعی)، مطالعه‌ی رفتار فشاری رزین‌های پلیمری در نرخ‌های کرنش استاتیکی و دینامیکی بسیار دشوار است. البته نشان داده شده که با استفاده از خواص مکانیکی پلیمرها در کشش، می‌توان خواص فشاری آن‌ها را تخمین زد. [۲۳] با دانستن استحکام کششی و ضریب پواسون رزین ν ، با استفاده از رابطه‌ی ۱ می‌توان استحکام فشاری رزین را برآورد کرد: [۲۳]

$$\log \frac{\sigma_{\max}(\text{compressive})}{\sigma_{\max}(\text{tensile})} = 2.72 - 5\nu \quad (1)$$

بنابراین در این تحقیق، رفتار کششی رزین در نرخ کرنش‌های دینامیکی بررسی شد و با استفاده از نتایج آزمایش‌های کششی و رابطه‌ی ۱، تخمینی از استحکام فشاری رزین در نرخ‌های بارگذاری مختلف به دست آمد، و از آن به منظور مقایسه‌ی رفتار دینامیکی رزین خالص و بتن پلیمری و همچنین توجیه رفتار وابسته به نرخ کرنش بتن پلیمری استفاده شده است.

به منظور بررسی رفتار مکانیکی رزین پلی‌استر در نرخ کرنش‌های دینامیکی، از نمونه‌های کششی استاندارد با طول مؤثر ۱۰ میلی‌متر استفاده شد (شکل ۱). این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های کششی متداول، طول مؤثر کم‌تری دارند. اثر کوچک شدن نمونه، با مقایسه‌ی رفتار مکانیکی نمونه‌های کوچک با نمونه‌های بزرگتر (شکل ۲) با طول مؤثر ۵۰ میلی‌متر که طبق استاندارد ASTM D۶۳۸ ساخته شده، [۲۳] در نرخ کرنش شبه‌استاتیکی بررسی شد. نتایج به دست آمده از آزمایش دو نمونه، نشان‌گر بی‌اثر بودن کوچک شدن نمونه بر رفتار مکانیکی است. به منظور بررسی رفتار خمشی رزین پلی‌استر نیز نمونه‌های مکعب‌مسطبی

شکست و استحکام کششی بتن پلیمری مورد آزمایش با افزایش دمای میانگین چرخه‌ی دما کاهش می‌یابد. در بررسی تأثیرات از هم پاشیدگی شیمیایی بر استحکام خمشی و فشاری بتن پلیمری ساخته شده با رزین اپوکسی، [۱۸] کاهش استحکام خمشی و فشاری بتن پلیمری هنگامی که با عوامل خوردگی در تماس باشد گزارش شد. اگرچه حتی مقادیر کاهش یافته نیز بسیار بیشتر از استحکام خمشی و فشاری بتن‌های سیمانی معمول بود.

رفتار مکانیکی بتن پلیمری در نرخ بارگذاری‌های دینامیکی به صورت محدود مورد مطالعه قرار گرفته است. [۱۹] محققین مطالعه‌ی رفتار دینامیکی بتن دارای زمینه‌های ارگانیک (وینیل‌استر و اپوکسی) را گزارش کردند. در ساخت این بتن‌ها از دانه‌های سیلیسی و خاک چینی استفاده شده است. نمونه‌ها به صورت فشار تک‌محوری با استفاده از یک جرم استوانه‌ی ۳۰۸ کیلوگرمی که با سرعت‌های بین ۵ تا ۵ متر بر ثانیه از یک تفنگ با هوای فشرده پرتاب می‌شد مورد آزمایش قرار گرفت. نرخ کرنش در این آزمایش‌ها بین ۰/۵ تا ۱۰ بر ثانیه و نرخ تنش بین ۲۵ تا ۴۵۰ گیگاپاسکال بر ثانیه گزارش شد. در انتها این نتیجه حاصل شد که در نرخ کرنش‌های مورد بررسی، افزایش نرخ کرنش به افزایش استحکام فشاری می‌انجامد. برای شناخت رفتار یک کامپوزیت، مطالعه‌ی رفتار اجزای سازنده آن ضروری است تا از این طریق امکان مدل‌سازی، شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار مکانیکی آن از دید مایکرومکانیکی فراهم شود. همچنین مطالعه‌ی اجزای سازنده به طراحی و تولید ماده‌ی کامپوزیتی مناسب و بهینه، متناسب با شرایط مورد نظر کمک می‌کند. بتن پلیمری نیز به عنوان ماده‌ی مرکب شامل رزین به عنوان ماده‌ی زمینه است. بنابراین برای بررسی رفتار بتن پلیمری تحت بارگذاری دینامیکی، مطالعه‌ی رفتار دینامیکی رزین حائز اهمیت فراوان است.

در این نوشتار برای کاهش هزینه‌های ساخت، ترکیب جدیدی برای ساخت بتن پلیمری ارائه شده که در آن به جای استفاده از مخلوط سنگدانه‌های درشت و پرکننده، فقط از ماسه استفاده شده است؛ براساس مطالعات نگارندگان، تاکنون این ترکیب بررسی نشده است. هدف اصلی این مقاله بررسی رفتار دینامیکی رزین پلی‌استر و بتن پلیمری در نرخ کرنش‌های متفاوت و مقایسه‌ی نسبی آن‌هاست. همچنین رفتار خمشی رزین پلی‌استر و بتن پلیمری در نرخ کرنش شبه‌استاتیکی مورد مطالعه قرار گرفته است. در انتها نیز به منظور ارزیابی ترکیب پیشنهادی، مقایسه‌ی میان رفتار مکانیکی بتن پلیمری مورد مطالعه با یک نمونه بتن پلیمری اپوکسی و همچنین بتن‌های سیمانی معمول انجام شده است.

۲. ساخت نمونه‌ها

۲.۱. نمونه‌های رزین پلی‌استر

رزین پلی‌استر مورد استفاده از نوع ایزوفتالیک ۷۵۱۱۲۹ Bushepol و از تولیدات کارخانه صنایع شیمیایی بوشهر است. از ویژگی‌های مهم این رزین، مقاومت استثنایی در برابر خوردگی در مقابل آب دریاست. این رزین در ساخت قطعات ساختمان قابقی‌ها، لوله‌ها، تجهیزات بهداشتی، استخرهای شنا، جکوزی و غیره کاربرد گسترده‌ی دارد. مونومر این رزین «استایرن» است و به‌ازای هر ۱۰۰ گرم رزین، باید ۱/۷ میلی‌لیتر پراکسید و ۰/۹ میلی‌لیتر کبالت برای ترکیب در دمای ۲۵ درجه سلسیوس به آن اضافه شود. ضریب پواسون رزین استفاده شده ۰/۴ است. دیگر مشخصات فیزیکی این رزین از طریق شرکت سازنده در اختیار ما قرار داده شده و در جدول ۱ آمده است.



شکل ۴. نمونه‌های بزرگ و کوچک آزمایش فشاری بتن پلیمری.



شکل ۵. نمونه‌ی خمش سه نقطه‌ی بتن پلیمری.

نمونه‌های استوانه‌یی کوچک با قطر ۲ و طول ۳ سانتی‌متر مطابق شکل ۴ استفاده شد. اثر کوچک شدن نمونه، با مقایسه‌ی رفتار مکانیکی نمونه‌های کوچک با نمونه‌های بزرگتر (شکل ۴) با قطر ۷/۵ و طول ۱۵ سانتی‌متر که طبق استاندارد ASTM C۳۹-۴۹ ساخته شده‌اند،^[۲۶] در نرخ کرنش شبه‌استاتیکی بررسی شد. همانند نمونه‌های رزین پلی‌استر، نتایج مشابه به دست آمده از دو نمونه‌ی کوچک و بزرگ بتن پلیمری، نشان‌گر عدم تأثیر کوچک شدن نمونه بر رفتار مکانیکی است. به منظور بررسی رفتار خمشی بتن پلیمری نیز از آزمایش خمش سه نقطه مطابق با استاندارد ASTM C۲۹۳-۵۵۴T استفاده شد^[۲۷] که در آن قطعات مکعب مستطیلی به ابعاد $۷۵ \times ۷۵ \times ۴۰۰$ میلی‌متر (شکل ۵) تحت خمش قرار می‌گیرند.

۳. آزمایش‌ها

۳.۱. آزمایش‌های کششی و خمشی رزین پلی‌استر

تمامی آزمایش‌های کششی و خمشی رزین و بتن پلیمری توسط دستگاه آزمایش یونیورسال سنتام STM-۱۵۰ با ظرفیت ۱۵ تن انجام گرفته است. رفتار رزین در چهار نرخ کرنش ۰/۳۳، ۰/۲، ۰/۱، ۰/۱۵ و برائیه تحت آزمایش کششی مورد بررسی قرار گرفت (برای هر نرخ کرنش چهار نمونه مورد آزمایش قرار گرفت). در شکل ۶ یک نمونه کشش کوچک در حال انجام آزمایش نشان داده شده است. در شکل ۷ تصویر تعدادی از نمونه‌های پلیمر خالص بعد از انجام آزمایش کشش و نمونه‌ی سالمی از آن آورده شده است. بررسی سطح شکست نمونه‌های رزین نشان می‌دهد که رفتار این رزین ترد است.



شکل ۲. نمونه‌ی کششی بزرگ رزین پلی‌استر مطابق با استاندارد Type I ASTM D۶۳۸.



شکل ۳. نمونه‌های خمش سه نقطه‌ی رزین پلی‌استر.

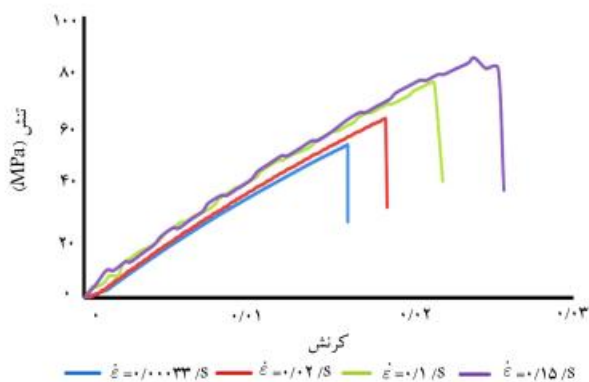
جدول ۲. تجزیه‌ی شیمیایی ماسه‌ی سیلیسی مورد استفاده در این تحقیق.^[۲۸]

مواد تشکیل دهنده	درصد
SiO _۲	۹۸٫۱۱ – ۹۶
Fe _۲ O _۳	۰٫۷ – ۰٫۲
Al _۲ O _۳	۱٫۶۵ – ۰٫۵۱
CaO	۰٫۷ – ۰٫۴
Na _۲ O	۰٫۰۸ – ۰٫۰۳
K _۲ O	۰٫۱۵ – ۰٫۰۹

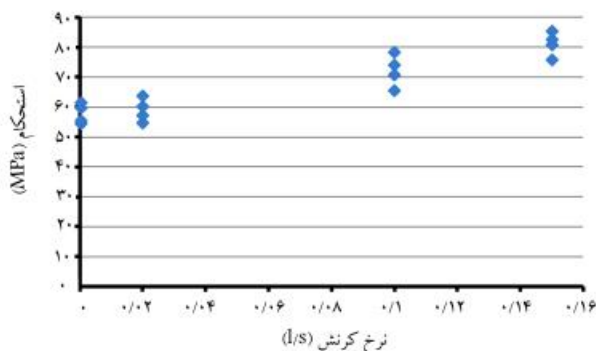
خمش سه نقطه با طول مؤثر ۶۰ میلی‌متر مطابق استاندارد ASTM D۷۹۰ ساخته شد (شکل ۳).^[۲۵]

۲.۲. نمونه‌های بتن پلیمری

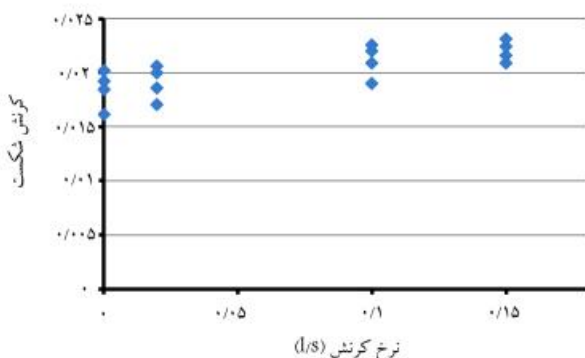
برای ساخت نمونه‌های بتن پلیمری، ابتدا ماسه را شسته و خشک می‌کنند. رزین را با کبالت به‌طور کامل مخلوط و سپس به آن پراکسید اضافه می‌کنند. سپس ترکیب حاصل را روی ماسه‌ها ریخته و با دقت هم می‌زنند تا ماسه‌ها به‌طور یکنواخت در رزین پخش شود. سپس مخلوط ماسه و رزین را درون قالب‌ها ریخته و به مدت ۷ روز در دمای اتاق می‌پزند. قالب‌های مورد استفاده کامپوزیتی است و به منظور نجسیدن بتن به قالب، دیواره‌ها و کف قالب را پیش از ریختن بتن با یک فیلم نازک از جنس پلی‌الفین می‌پوشانند. در این تحقیق به منظور ساخت بتن از ترکیب ۲۵ درصد وزنی رزین و ۷۵ درصد وزنی ماسه‌ی سیلیسی استفاده شده است. بتن پلیمری مورد مطالعه در این تحقیق از ترکیب رزین پلی‌استر اشاره شده و ماسه‌ی سیلیسی حاصل شده است. نوع سنگدانه‌یی که عمدتاً در ساخت بتن پلیمری کاربرد دارد، ترکیبات سیلیسی است که علت آن سازگاری با رزین و چسبندگی خوب بین این نوع سنگدانه و رزین‌های مرسوم مورد استفاده در بتن پلیمری است. سنگدانه‌ی مورد استفاده در این تحقیق نیز ماسه‌ی سیلیسی و محصول شرکت ماسه‌ی ریخته‌گری دماوند است. این نوع مصالح در بازار به‌عنوان مستحکم‌ترین نوع ماسه شناخته می‌شود. تجزیه‌ی شیمیایی این نوع ماسه در جدول ۲ آمده است. برای بررسی رفتار مکانیکی بتن پلیمری در نرخ کرنش‌های دینامیکی از



شکل ۸. نمودار تنش - کرنش نمونه‌های رزین پلی استر در نرخ کرنش‌های مختلف تحت کشش.



شکل ۹. نمودار تغییرات استحکام رزین پلی استر برحسب نرخ کرنش.



شکل ۱۰. نمودار تغییرات کرنش شکست رزین پلی استر بر حسب نرخ کرنش.

چهار نمونه خمش سه نقطه‌ای رزین پلی استر با سرعت ۱۶ میلی‌متر بر دقیقه تحت آزمایش قرار گرفت؛ شکل ۱۱ یک نمونه خمشی به هنگام انجام آزمایش و شکل ۱۲ نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی در مرکز یک نمونه خمشی رزین پلی استر را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از آزمایش روی چهار نمونه در جدول ۳ آمده است. استحکام خمشی با استفاده از رابطه‌ی ۲ به دست آمده است؛ [۲۵]

$$\sigma_{m,flexural} = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (2)$$

که در آن $\sigma_{m,flexural}$ استحکام خمشی، P نیروی اعمالی بیشینه، L طول مؤثر نمونه، b پهنای نمونه و d ارتفاع نمونه است. در شکل ۱۳ تصویر یک نمونه خمش بعد از انجام آزمایش نشان داده شده است که حاکی از شکست ترد در نمونه است.



شکل ۶. نحوه‌ی قرارگیری نمونه‌ی کششی کوچک رزین پلی استر در دستگاه آزمایش.



شکل ۷. تصویر چند نمونه‌ی کششی کوچک رزین پلی استر بعد از انجام آزمایش و یک نمونه‌ی سالم.

در شکل ۸ نمودارهای نمونه‌ی تنش - کرنش رزین مورد مطالعه تحت نرخ‌های بارگذاری کششی مختلف نشان داده شده است. مطابق نمودارهای نشان داده شده، افزایش نرخ کرنش به افزایش چشمگیر استحکام می‌انجامد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که تغییرات مدول کشسانی ناچیز و قابل صرف نظر کردن است. مدول کشسانی به دست آمده ۳/۵ گیگاپاسکال است.

تغییر استحکام و کرنش شکست رزین پلی استر برحسب نرخ کرنش به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. مطابق نتایج به دست آمده، استحکام و کرنش شکست پلی استر با افزایش نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد.

جدول ۳. نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای رزین پلی استر.

نمونه	نیروی اعمالی بیشینه (N)	پهنا (mm)	ارتفاع (mm)	استحکام خمشی (MPa)	میانگین نتایج (MPa)
۱	۱۴۰۹	۲۰٫۰۴	۸٫۴۲	۸۹٫۳	۹۷٫۳
۲	۱۴۹۶	۲۰٫۳۱	۸٫۴۲	۹۳٫۵	
۳	۱۲۰۰	۲۰٫۲۳	۷٫۲۱	۱۰۲٫۶	
۴	۱۶۲۶	۲۰٫۰۵	۸٫۳۹	۱۰۳٫۷	

۲.۳. آزمایش‌های فشاری و خمشی بتن پلیمری

رفتار بتن پلیمری نیز در چهار نرخ کرنش ۰٫۰۰۰۳۳، ۰٫۰۰۰۲، ۰٫۰۰۱، ۰٫۰۰۱۵ و ۰٫۰۰۱ بر ثانیه تحت بارگذاری فشاری (برای هر نرخ کرنش چهار نمونه) مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۱۴ تصویر یک نمونه کوچک بتن پلیمری را در حال انجام آزمایش نشان می‌دهد.

در شکل ۱۵ تصویر تعدادی از نمونه‌های بتن بعد از انجام آزمایش فشاری نشان داده شده است.

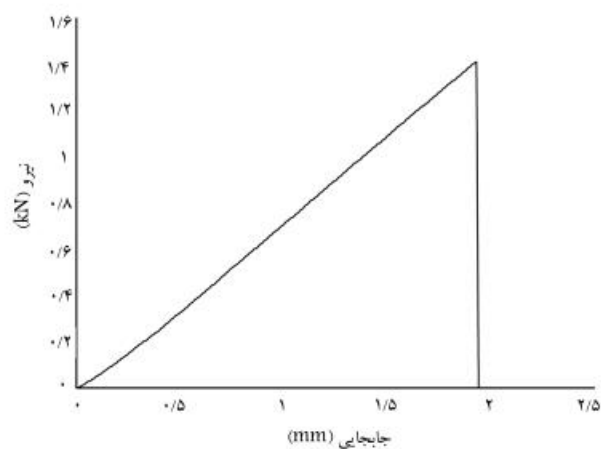
در شکل ۱۶ نمودارهای تنش-کرنش بتن پلیمری مورد مطالعه در نرخ کرنش‌های مختلف تحت فشار نشان داده شده است.

در شکل ۱۷ تغییرات استحکام بتن پلیمری برحسب نرخ کرنش نشان داده شده است. مشابه نتایج به دست آمده برای بتن پلیمری، افزایش نرخ بارگذاری فشاری به افزایش چشمگیر استحکام فشاری بتن می‌انجامد.

نتایج آزمایش خمش سه نقطه روی چهار نمونه‌ی ساخته شده از بتن پلیمری در جدول ۴ ارائه شده است. استحکام خمشی با استفاده از رابطه‌ی ارائه شده در استاندارد آزمایش (رابطه‌ی ۲) به دست آمده است. [۲۷] در شکل ۱۸ یک نمونه بتن



شکل ۱۱. نمونه‌ی خمش سه نقطه‌ای رزین پلی استر به هنگام آزمایش.



شکل ۱۲. نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی در مرکز نمونه آزمایش خمش سه نقطه‌ای رزین پلی استر.



شکل ۱۴. نحوه قرارگیری نمونه فشاری کوچک بتن پلیمری در دستگاه آزمایش.



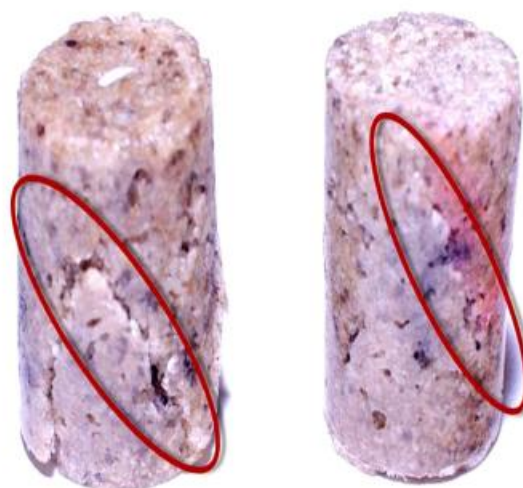
شکل ۱۳. یک نمونه خمش سه نقطه‌ای رزین پلی استر بعد از انجام آزمایش.

جدول ۴. نتایج آزمایش خمش سه نقطه‌ای بتن پلیمری.

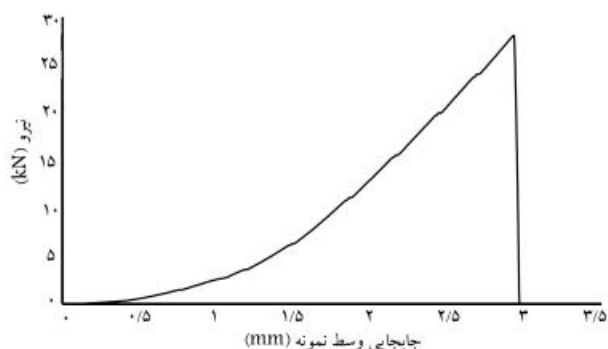
نمونه	نیروی اعمالی بیشینه (N)	پهنا (mm)	ارتفاع (mm)	استحکام خمشی (MPa)	میانگین نتایج (MPa)
۱	۲۳	۷,۴۲	۷,۵۵	۲۰,۳۹	۱۹,۶۹
۲	۲۱	۷,۴۳	۷,۵۵	۱۸,۵۹	
۳	۲۳	۷,۴۱	۷,۵۸	۲۰,۲۶	
۴	۲۲	۷,۴۴	۷,۵۴	۱۹,۵۰	



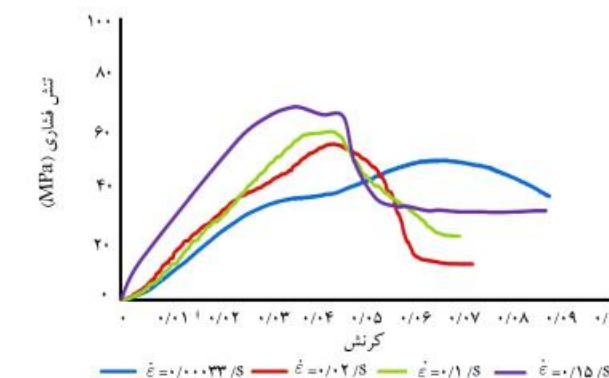
شکل ۱۸. نمونه‌ی خمش سه نقطه‌ای بتن پلیمری به هنگام آزمایش.



شکل ۱۵. سطح شکست در نمونه‌های فشاری کوچک بتن پلیمری.



شکل ۱۹. نمودار نیروی فشاری برحسب جابه‌جایی عمودی وسط نمونه‌ی آزمایش خمش سه نقطه‌ای بتن پلیمری.



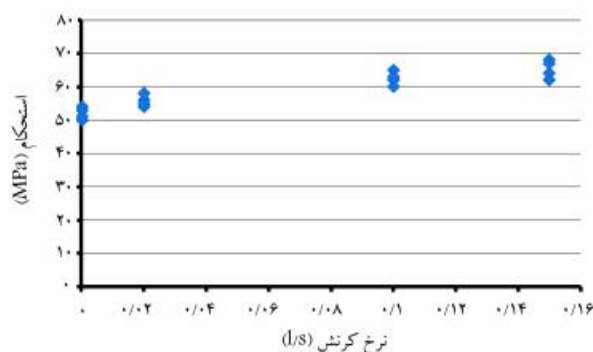
شکل ۱۶. نمودار تنش - کرنش نمونه‌های بتن پلیمری در نرخ کرنش‌های مختلف تحت فشار.

پلیمری به هنگام آزمایش خمش سه نقطه نشان داده شده است. نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی در مرکز یک نمونه‌ی خمشی بتن پلیمری در شکل ۱۹ نشان داده شده است. در شکل ۲۰ سطح شکست در یک نمونه بتن پلیمری شکسته شده تحت بار خمشی نشان داده شده است.

۴. بررسی رفتار مکانیکی بتن پلیمری

۱.۴. مقایسه‌ی رفتار مکانیکی بتن پلیمری با رزین پلی استر

مقایسه‌ی نمودارهای تنش - کرنش پلیمر (شکل ۸) و بتن پلیمری (شکل ۱۶)، نشان می‌دهد که علی‌رغم تردی رفتار رزین پلی استر (رفتار خطی)، بتن پلیمری رفتاری نرم‌تر از خود نشان می‌دهد (رفتار غیرخطی). این موضوع را می‌توان با مقایسه‌ی



شکل ۱۷. نمودار تغییرات استحکام بتن پلیمری برحسب نرخ کرنش.

جدول ۵. مقادیر میانگین استحکام فشاری رزین پلی استر و بتن پلیمری در نرخ کرنش‌های مختلف.

نرخ کرنش (۱/s)	۰/۰۰۰۳۳	۰/۰۲	۰/۱	۰/۱۵
استحکام فشاری بتن پلیمری (MPa)	۵۱/۸۲	۵۵/۳۶	۶۳/۱۱	۶۵/۶۳
استحکام فشاری رزین پلی استر (MPa)	۹۰/۲۹	۹۳/۲۹	۱۱۱/۶۱	۱۲۷/۷۲

گرفته است که به دلیل محدودیت تحقیقات انجام شده در زمینه رفتار دینامیکی بتن پلیمری، این مقایسه محدود به شرایط استاتیکی است. ترکیب بتن مطالعه شده [۲۸] شامل ۱۹ درصد وزنی رزین اپوکسی، ۵ درصد وزنی الیاف شیشه و ۸۰/۵ درصد سنگدانه (شامل ۴۰ درصد وزنی پرکننده‌های سیلیسی و ۶۰ درصد وزنی مصالح دانه بندی شده با قطر ۲ تا ۴ میلی متر) است. استحکام فشاری بتن پلیمری اپوکسی با ترکیب بهینه‌ی داده شده، [۲۸] ۶۳/۳۲ مگاپاسکال و نسبت استحکام فشاری بتن به استحکام فشاری تخمینی رزین اپوکسی مورد استفاده (با استفاده از رابطه‌ی ۱) برابر ۵/۵۲ است. حال آن که استحکام فشاری بتن پلیمری مورد مطالعه در این تحقیق در نرخ کرنش استاتیکی ۵۱/۸۲ مگاپاسکال و نسبت استحکام فشاری بتن به استحکام فشاری تخمینی رزین پلی استر مورد استفاده (با استفاده از رابطه‌ی ۱)، ۵/۷ است. از مقایسه‌ی نسبت استحکام بتن به رزین، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ماسه به جای ترکیب سنگدانه‌های ریز و درشت، سبب افزایش بارپذیری بتن پلیمری می‌شود. ضمن آن که با استفاده از رزین پلی استر به جای رزین اپوکسی، علی‌رغم کاهش ۱۱/۵۰ مگاپاسکالی (۱۸/۱۶ درصدی) استحکام، هزینه‌ی تولید بتن پلیمری کاهش چشمگیری می‌یابد. چرا که به‌طور میانگین، قیمت رزین پلی استر حدود یک چهارم قیمت رزین اپوکسی است.

مطابق تعریف انجمن بتن آمریکا^۱ بتن‌های با استحکام فشاری بالاتر از ۴۰ مگاپاسکال در دسته بتن‌های با استحکام بالا جای می‌گیرند. [۲۹] از آنجا که استحکام فشاری بتن‌های سیمانی معمولاً به مراتب پایین‌تر از ۴۰ مگاپاسکال است، برای تولید بتن سیمانی با استحکام بالا، یا در ترکیب آن‌ها از الیاف فولادی، پلی پروپیلن و غیره استفاده می‌شود و یا آن‌ها را با آرماتورهای فولادی یا کامپوزیتی تقویت می‌کنند. اما بر پایه‌ی نتایج به دست آمده، بتن پلیمری مورد مطالعه در این تحقیق علاوه بر داشتن قیمتی رقابتی با بتن سیمانی، بدون نیاز به هیچ‌گونه عامل تقویت کننده، بتن با استحکام بالا محسوب می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری

در این مطالعه ابتدا ترکیب جدیدی مبتنی بر رزین پلی استر و ماسه‌ی سیلیسی برای بتن پلیمری ارائه شد. سپس بتن پلیمری به‌عنوان یک ماده‌ی مرکب تحت بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی (غیر استاتیکی) مورد بررسی قرار گرفت. برای تعیین خواص مکانیکی بتن و کیفیت مکانیکی آن، ابتدا رفتار رزین پلی استر به‌عنوان ماده‌ی زمینه تحت بارگذاری دینامیکی مطالعه شده و نتایج به دست آمده برای توضیح و تفسیر رفتار بتن پلیمری مورد استفاده قرار گرفت. مطابق نتایج حاصله، با توجه به این که رزین مورد استفاده به شدت به نرخ کرنش حساس است، می‌توان رفتار وابسته به نرخ کرنش بتن پلیمری را توجیه کرد. با بررسی آزمایش‌های صورت گرفته، نتایج استخراج شده عبارت است از:

۱. با توجه به نتایج به دست آمده، در محدوده‌ی نرخ بارگذاری مورد بررسی، با افزایش نرخ کرنش مدول کشسانی رزین پلی استر تقریباً در مقدار ۳/۵ گیگاپاسکال ثابت باقی مانده است. حال آن که استحکام و کرنش شکست با افزایش نرخ کرنش،



شکل ۲۰. سطح شکست در نمونه‌ی بتن پلیمری که تحت بار خمشی قرار گرفته است.



شکل ۲۱. مقایسه‌ی استحکام خمشی و فشاری رزین پلی استر و بتن پلیمری در نرخ کرنش شبه استاتیکی.

نمودارهای خمشی رزین پلی استر و بتن پلیمری (شکل‌های ۱۲ و ۱۹) نیز استنباط کرد. می‌توان نتیجه گرفت با اضافه شدن سنگدانه و در نتیجه افزایش نسبی چگالی مک‌ها، رزین رفتار خمشی خود را از دست می‌دهد. به نظر می‌رسد هنگامی که بتن پلیمری تحت بار فشاری قرار می‌گیرد، حفره‌های کوچک موجود در بتن در لحظه‌ی کوتاه متراکم می‌شوند که این منشأ رفتار غیرخطی بتن است. با افزایش نرخ کرنش، تراکم حفره‌ها سریع‌تر رخ می‌دهد و رفتار غیرخطی کاهش می‌یابد.

با استفاده از رابطه‌ی ۱، استحکام فشاری رزین پلی استر در نرخ کرنش شبه استاتیکی، ۹۰/۲۹ مگاپاسکال تخمین زده می‌شود که ۱/۵۸ برابر استحکام کششی آن (۵۶/۹۷ مگاپاسکال) است. بنابراین چنان که در شکل ۲۱ نشان داده شده است، استحکام فشاری بتن پلیمری ۵/۷ استحکام فشاری رزین پلی استر است. همچنین با مقایسه‌ی جدول‌های ۳ و ۴، استحکام خمشی بتن پلیمری ۱۹/۷ مگاپاسکال محاسبه می‌شود که ۲/۵ استحکام خمشی رزین پلی استر (۹۷/۳ مگاپاسکال) است. مقادیر میانگین استحکام فشاری رزین پلی استر (با استفاده از رابطه‌ی ۱) و بتن پلیمری در نرخ کرنش‌های مختلف، در جدول ۵ با هم مقایسه شده است.

۲.۴. مقایسه‌ی رفتار مکانیکی بتن پلیمری مورد مطالعه با بتن‌های

پلیمری و سیمانی متداول

به‌منظور تعیین مقدار بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن ساخته شده در مقایسه با دیگر بتن‌های پلیمری متداول (با دانه بندی معمول)، مقایسه‌ی میان خواص مکانیکی بتن پلیمری مورد مطالعه و بتن پلیمری اپوکسی با ترکیب بهینه‌ی داده شده [۲۸] صورت

قرار گرفت. در این آزمایش‌ها نیز رزین رفتار بسیار تردی از خود نشان داد و نیز مشاهده شد که استحکام خمشی بتن پلیمری ۲۰ درصد استحکام خمشی رزین پلی‌استر است.

۵. به منظور بررسی عملکرد بتن پلیمری با ترکیب جدید پیشنهادی، مقایسه‌ای میان این بتن و بتن پلیمری با ترکیب پهنه‌ی داده شده^[۱۸] صورت گرفت و مشاهده شد که علی‌رغم کاهش ۱۱/۵۰ درصدی استحکام فشاری، نسبت استحکام بتن به استحکام رزین در بتن پلیمری مورد مطالعه بیشتر است. اگرچه هزینه‌ی ساخت این بتن نیز کم‌تر است. همچنین مشاهده شد استحکام فشاری بتن پلیمری مورد مطالعه بالاتر از بتن‌های سیمانی معمول بوده و در دسته بتن‌های با استحکام بالا جای می‌گیرد.

افزایش می‌یابد و با افزایش نرخ کرنش از مقدار ۰/۰۰۰۳۳ تا ۰/۱۵ بر ثانیه، استحکام کششی رزین ۴۱ درصد افزایش می‌یابد.

۲. مشاهده شد که با افزایش نرخ کرنش از مقدار ۰/۰۰۰۳۳ تا ۰/۱۵ بر ثانیه استحکام فشاری بتن پلیمری ۲۷ درصد افزایش می‌یابد.

۳. با مقایسه‌ی رفتار مکانیکی رزین پلی‌استر با بتن پلیمری مورد مطالعه، ملاحظه شد که رفتار رزین پلی‌استر تا لحظه‌ی شکست خطی و ترد است، حال آن که رفتار بتن پلیمری غیرخطی و نرم است. همچنین مشاهده شد استحکام فشاری بتن پلیمری ۵۷ درصد استحکام فشاری رزین پلی‌استر است.

۴. رفتار بتن پلیمری و رزین پلی‌استر با انجام آزمایش خمشی نیز مورد بررسی

پانوشت‌ها

1. Polymer concrete
2. American concrete institute committee

منابع (References)

1. American Concrete Institute Committee 548, "Guide for the use of polymers in concrete", ACI 548.1R-09, pp. 97-126 (2009).
2. Jo, B.W., Park, S.K. and Park, J.C. "Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates", *Construction and Building Materials*, **22**, pp. 2281-2291 (2008).
3. Blaga, A. and Beaudoin, J.J. "Polymer concrete", Division of Building Research, National Research Council Canada, Canadian Building Digest 241, Ottawa (1985).
4. Ohama, Y. "Recent progress in polymer mortar and concrete in Japan", *Proceedings of the Second East Asia Symposium on Polymers in Concrete (II - EASPIC)*, London, pp. 21-30 (1997).
5. Elahi, M. "Estimation of elastic behavior of polymer concrete using micromechanical methods", MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran (2011). (In Persian)
6. Kashizadeh, E. "Effect of heating and cooling cycles on mechanical properties of polymer concrete", MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran (2008). (In Persian)
7. Camille, A. and Pauls, D. "Experimental study of epoxy repairing of cracks in concrete", *Construction and Building Materials*, **21**, pp. 157-63 (2007).
8. Shokrieh, M.M. and Heidari-Rarani, M. "Design and manufacturing of drinking water filtration slabs using polymer concrete", *Proceedings of 11th International Conference on Non-Osmosis Concrete & Water Storage Tanks*, Iran, pp. 25-27 (May 2011).
9. American Concrete Institute Committee 548, "Guide for polymer concrete overlays", ACI 548.5R-94, pp. 1-26 (1998).
10. American Concrete Institute Committee 548, "Polymer concrete-structural applications state-of-the-art-report", ACI 548.6R-96, pp. 1-23 (1996).
11. Fowler, D.W. "Polymers in concrete, a vision for the 21st century", *Cement and Concrete Composites*, **21**, pp. 449-452 (1999).
12. Muszynski, L.C. "Polymer concrete", *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*, New York, Wiley, **12**, pp. 462-470 (1988).
13. Ohama, Y. "Recent progress in concrete polymer composites", *Cement and Concrete Composites*, **5**, pp. 31-40 (1997).
14. Rao, V.V.L.K. and Krishnamoorthy, S. "Influence of resin and microfiller proportions on strength, density and setting shrinkage of polyester polymer concrete", *Acı Structural Journal*, **95**, pp. 153-162 (1998).
15. Abdel-Jawad, Y.A. and Abdullah, W.S. "Design of maximum density aggregate grading", *Construction and Building Materials*, **16**, pp. 495-508 (2002).
16. Golestaneh, M., Amini, G., Najafpour, G.D. and Beygi, M.A. "Evaluation of mechanical strength of epoxy polymer concrete with silica powder as filler", *World Applied Sciences Journal*, **9**, pp. 216-220 (2010).
17. Heidari-Rarani, M. Aliha, M.R.M. Shokrieh, M.M. Ayatollahi, M.R. "Mechanical durability of an optimized polymer concrete under various thermal cyclic loadings—an experimental study", *Construction and Building Materials*, **64**, pp. 308-315 (2014).
18. Reis, J.M.L. "A comparative assessment of polymer concrete strength after degradation cycles", *Mechanics of Solids in Brazil*, Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, pp. 437-444 (2009).
19. Vila, D.M. and Hamelin, P. "Polymer concrete under impact loading", *Progress and Trends in Rheology*, **2**, pp. 228-231 (1988).

20. Chen, W. Lu, F. Cheng, M. "Tension and compression tests of two polymers under quasi-static and dynamic loading", *Polymer Testing*, **21**, pp. 113-121 (2002).
21. Sarva, S.S., Deschanel, S., Boyce, M.C. and Chen, W. "Stress-strain behavior of a polyurea and a polyurethane from low to high strain rates", *Polymer*, **48**, pp. 2208-2213 (2007).
22. Siviour, C.R., Walley, S.M., Proud, W.G. and Field, J.E. "The high strain rate compressive behaviour of polycarbonate and polyvinylidene difluoride", *Polymer*, **46**, pp. 12546-12555 (2005).
23. Van Krevelen, D.W. and Te Nijenhuis, K., *Properties of Polymers*, Fourth Edition, Amsterdam, Elsevier, pp. 456-459 (2009).
24. ASTM D 638, Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics (2000).
25. ASTM D790-10, Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials (2007).
26. ASTM C 39-49, Compressive Strength of Molded Concrete Cylinders (2002).
27. ASTM C 293-54T, Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Center-Point Loading (2002).
28. Shokrieh, M.M., Heidari-Rarani, M., Shakouri, M. and Kashizadeh, E. "Effects of thermal cycles on mechanical properties of an optimized polymer concrete", *Construction and Building Materials*, **25**, pp. 3540-3549 (2011).
29. American Concrete Institute Committee 363, *State-of-the-Art-Report on High-Strength Concrete*, ACI 363R-92, pp. 55 (1992).