

Preparation and Characterization of a Polymer Concrete and Estimation of Compressive Strength Using a Two-Phase Micromechanical Model

Mahmood Mehrdad Shokrieh*, Sina Rezvani, and Reza Mosalmani

Composites Research Laboratory, Center of Excellence in Experimental Solid Mechanics and Dynamics, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology,
P.O. Box: 16846-13114, Tehran, Iran

Received: 24 June 2014, accepted: 31 December 2014

ABSTRACT

In comparison with conventional concrete, the polymer concrete has considerably better mechanical properties. Meanwhile, polymer concrete is more expensive than traditional cement concretes. Considering the good mechanical properties of polymer concrete, its applications can be developed by reducing manufacturing costs. In this study, in order to improve the mechanical properties and reduce the manufacturing costs of polymer concrete, a new formulation is presented. In this formulation, the more common mixture of large and small aggregates was replaced by silica sand. In addition, in order to reduce the manufacturing costs, polyester resin was used instead of epoxy resin as the base material. The compressive and three-point bending tests showed that the polyester-based concrete had a higher compressive strength (20%) in comparison with the epoxy-based concrete, while their bending strength was approximately the same. As a result, the manufacturing cost for the polymer concrete prepared using this new formulation can be reduced without decrements in mechanical properties. Moreover, a two-phase micromechanical model was applied to estimate the compressive strength of the polymer concrete. Using the two-phase micromechanical model, the mechanical properties of the polymer concrete were predicted. The results obtained from the modeling and experiments were in good agreement with each other (6.8% error). The excellent mechanical properties of polyester-based concrete developed in the present research and its low cost in comparison with the epoxy-based concrete are key factors that can help its wider applications.

Keywords:

polymer concrete,
compressive strength,
flexural strength,
estimation of strength,
micromechanics

(*)To whom correspondence should be addressed.
E-mail: shokrieh@iust.ac.ir

ساخت و شناسایی یک بتن پلیمری و تخمین استحکام فشاری با استفاده از مدل میکرومکانیکی دوفازی

محمود مهرداد شکریه*، سینا رضوانی، رضا مسلمانی

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی مکانیک، قطب علمی مکانیک جامدات تجربی و دینامیک،
آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت، صندوق پستی ۱۳۱۱۴-۱۶۸۴۶

دریافت: ۹۳/۴/۳، پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۰

چکیده

بتن پلیمری در مقایسه با بتن‌های متداول دارای خواص مکانیکی شایان توجهی است، اگرچه قیمت آن به مراتب نسبت به بتن‌های سیمانی بیشتر است. با توجه به خواص خوب مکانیکی بتن پلیمری، با کاهش هزینه‌های ساخت، می‌توان استفاده از این نوع بتن را افزایش داد. در این مطالعه، ترکیب جدیدی برای بهبود خواص و کاهش هزینه ساخت بتن پلیمری ارائه شده است. بدین منظور به جای استفاده معمول از سنگ‌دانه‌های ریز و درشت تفکیک شده و اختلاط آنها با نسبت مناسب، فقط از ماسه سیلیسی استفاده شده است. همچنین، در ساخت این بتن رزین پلی‌استر به کار گرفته شده است که دارای هزینه کمتری نسبت به سایر رزین‌های استفاده شده (به عنوان مثال رزین اپوکسی) است. با انجام آزمون‌های مختلف فشاری و خمش سه نقطه‌ای مشخص شد، بتن پلیمری ساخته شده در پژوهش حاضر در مقایسه با نمونه‌های بتن پلیمری ساخته شده با رزین اپوکسی با ترکیب بهینه، دارای استحکام فشاری بیشتر (۲۰٪ بهبود در استحکام فشاری) و استحکام خمشی تقریباً برابرند. بنابراین با استفاده از ترکیب معرفی شده، می‌توان هزینه‌های ساخت بتن پلیمری را بدون تضعیف خواص مکانیکی آن، به مقدار شایان توجهی کاهش داد. همچنین، مدل میکرومکانیکی دوفازی برای تخمین استحکام فشاری بتن پلیمری استفاده شده است. با استفاده از مدل میکرومکانیکی دوفازی، خواص مکانیکی بتن پلیمری محاسبه شد. مقایسه نتایج پیش‌بینی شده با نتایج تجربی نشان می‌دهد، تطابق خوبی بین آنها برقرار است (۶/۸٪ خطا). خواص مکانیکی بسیار خوب بتن پلیمری ساخته شده از رزین پلی‌استر در این پژوهش و قیمت کمتر آن نسبت به بتن‌های پلیمری ساخته شده با رزین اپوکسی به قابلیت افزایش کاربرد این بتن می‌افزاید.

واژه‌های کلیدی

بتن پلیمری،
استحکام فشاری،
استحکام خمشی،
تخمین استحکام،
میکرومکانیک

مقدمه

بتن پلیمری، ماده‌ای کامپوزیتی است که از ترکیب سنگ‌دانه‌های معدنی مانند ماسه یا شن با یک پلیمر ساخته می‌شود. بتن پلیمری در مجموع دارای خواص مکانیکی بهتری نسبت به بتن سیمانی معمولی است. از جمله اینکه بتن پلیمری استحکام فشاری بسیار زیادی دارد که مقدار آن از استحکام بتن سیمانی معمولی بیشتر است [۱]. همچنین، به دلیل اتصال مناسب میان سنگ‌دانه‌ها و رزین، این بتن استحکام کششی و خمشی بهتری نسبت به بتن سیمانی معمولی دارد [۲]. نفوذپذیری زیاد، مقاومت سایشی کم، مقاومت کم در برابر یخبندان، زمان گیرش زیاد و پدیده‌هایی مانند حفره‌زایی و خوردگی ناشی از نفوذ کلر از جمله نقاط ضعف بتن سیمانی است. در مرجع ۳ نویسنده به ضعف بودن استحکام کششی بتن سیمانی اشاره کرده و برای بهبود آن، میل‌گردهای کامپوزیتی را پیشنهاد داده است. اما، در بتن پلیمری همه این ضعف‌ها به مقدار شایان توجهی کاهش یافته است [۴]. همچنین به دلیل چگالی کمتر، بتن پلیمری بارهای دینامیکی وارد شده را بهتر از بتن سیمانی معمولی تحمل می‌کند [۵]. از ویژگی‌های برجسته‌ای که این بتن نسبت به بتن سیمانی معمولی دارد، مقاومت بسیار زیاد آن در برابر محیط‌های خورنده و شیمیایی است [۶]. با داشتن این ویژگی‌ها، بتن پلیمری در بسیاری از کاربردها از جمله ساخت‌وساز و تعمیر سازه‌ها، کف‌سازی اتوبان‌ها، بدنه پل‌ها، لوله‌های فاضلاب و حتی در دیواره‌های سازه‌ای و تزئینی به‌طور روزافزون جایگزین بتن سیمانی می‌شود [۷، ۸]. به‌عنوان مثال کاربردی، صفحه‌های سامانه تصفیه آب آشامیدنی شهر تهران با استفاده از بتن پلیمری طراحی و جایگزین شد [۹]. افزایش هزینه ساخت و محدودیت استفاده در دماهای زیاد با توجه به رزین مصرفی، از معایب بتن پلیمری است. همچنین، به دلیل انحلال‌ناپذیری رزین‌های استفاده شده در تولید این نوع بتن در آب، ساخت آن به مراتب مشکل‌تر از بتن سیمانی است. تلاش برای افزایش استحکام بتن پلیمری، مدنظر بسیاری از پژوهشگران است که در ادامه به برخی از آنها اشاره می‌شود.

Vipulanandan [۱۰] عملکرد بتن پلیمری با رزین پلی‌استر و نیز بتن پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را بررسی کرد. وی، در این پژوهش خواص ایستا از جمله روابط تنش، کرنش، مدول کشسانی، ضریب پواسون، بیشینه تنش و بیشینه کرنش را مطالعه کرد. Abdelfattah و همکاران [۱۱] استحکام خمشی بتن پلیمری را با استفاده از مقادیر مختلف درصد رزین و نیز انواع رزین‌ها بررسی کردند. Reis و همکاران [۱۲] برای تقویت خواص مکانیکی شکست و خمشی بتن پلیمری از الیاف کربن و شیشه استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها

نشان داد، افزودن الیاف در مقادیر کم (تا ۲٪) باعث افزایش ۱۳٪ مقاومت بتن در برابر شکست می‌شود. آنها [۱۳] همچنین تقویت خواص خمشی بتن پلیمری را با استفاده از الیاف طبیعی بررسی کردند. در این مطالعه، بتن پلیمری دارای الیاف و بدون الیاف مقایسه شد. نتایج بیانگر این موضوع است که افزودن بعضی از الیاف طبیعی (مانند نارگیل) باعث افزایش استحکام خمشی در بتن می‌شود. حیدری رارانی و همکاران [۱۴] رفتار مکانیکی بتن پلیمری با ترکیب بهینه را در سه چرخه دمایی متفاوت بررسی کردند. آنها با تمرکز روی استحکام کششی و چقرمگی شکست بتن، گزارش دادند، این دو خاصیت مکانیکی با کاهش دمای متوسط چرخه دمایی، کاهش می‌یابد.

پژوهش‌های انجام شده در زمینه تخمین خواص کشسانی و استحکامی، بیشتر درباره بتن سیمانی است. اما می‌توان از این مدل‌ها با اندکی تغییر برای بتن پلیمری نیز استفاده کرد. Aitcin و Neville [۱۵] بیان کردند، استحکام بتن با مقاومت معمولی، به وسیله استحکام خمیر سیمان کنترل می‌شود. همچنین، Aitcin و Mehta [۱۶] نشان دادند، استحکام فشاری بتن با مقاومت زیاد به وسیله استحکام سنگ‌دانه‌ها محدود می‌شود. Ouaar [۱۷] در زمینه تعیین خواص مکانیکی کامپوزیت‌های چندفازی مستقل از سرعت بارگذاری مطالعه کرد. نتایجی که در رساله او به‌دست آمده، تطابق خوبی را بین نتایج میکرومکانیک، تجربی و اجزای محدود نشان می‌دهد. Pasa Dutra و همکاران [۱۸] نیز از معادلات میکرومکانیک در تخمین خواص کشسانی و گرانروکشسانی بتن تقویت شده با ریزالیاف استفاده کردند. در پژوهش حاضر، ابتدا ترکیب جدیدی برای ساخت بتن پلیمری ارائه شده است. در این بتن، به جای استفاده معمول از سنگ‌دانه‌های ریز و درشت تفکیک شده و اختلاط آنها با نسبت مناسب، فقط از ماسه سیلیسی به‌عنوان سنگ‌دانه استفاده شده است. سپس، استحکام فشاری و خمشی این بتن با انجام آزمون به‌دست آمده و با نمونه بتن پلیمری ساخته شده با رزین اپوکسی با ترکیب بهینه مقایسه شده است. همچنین، برای اولین بار استحکام فشاری بتن پلیمری با مدل میکرومکانیکی دوفازی تخمین زده شده است. برای ارزیابی مدل میکرومکانیکی ارائه داده شده، نتایج پیش‌بینی شده با نتایج تجربی مقایسه شدند.

ترکیب پیشنهادی بتن پلیمری

بتن پلیمری مطالعه شده در این پژوهش از ترکیب رزین پلی‌استر و ماسه سیلیسی حاصل شده است. رزین پلی‌استر استفاده شده از نوع Bushepol 751129 از تولیدات کارخانه صنایع شیمیایی بوشهر و نوع

جدول ۲- تجزیه شیمیایی ماسه سیلیسی استفاده شده [۵].

مقدار (%)	مواد تشکیل دهنده
۹۶-۹۸/۱۱	SiO ₂
۰/۲-۰/۷	Fe ₂ O ₃
۰/۵۱-۱/۶۵	Al ₂ O ₃
۰/۴-۰/۷	CaO
۰/۰۳-۰/۰۸	Na ₂ O
۰/۰۹-۰/۱۵	K ₂ O

نازک از جنس پلی اولفین پوشانده شد.

به طور کلی، درصد وزنی رزین استفاده شده در ساخت بتن پلیمری بین ۱۰٪ تا ۲۰٪ است. اما از آنجا که در پژوهش حاضر فقط از ماسه استفاده شده است، رزین نسبت به حالتی که سنگ دانه درشت استفاده می شود باید سطح بیشتری را پوشش دهد. به همین دلیل با ساخت چند نمونه و بررسی کیفی مقدار رزین پس زده شده و چسبندگی ماسه ها به یکدیگر، در این پژوهش رزین با مقدار ۲۵٪ وزنی استفاده شد. همان طور که در شکل ۱-الف مشاهده می شود، در نمونه ساخته شده با ۲۰٪ وزنی رزین، ماسه ها چسبندگی لازم را به یکدیگر ندارند و سطوح نیز زیر و ناهموارند. حال آنکه در نمونه ساخته شده با ۳۰٪ وزنی رزین (شکل ۱-ب)، مقدار زیادی رزین پس زده شده که نشان دهنده استفاده رزین بیش از حد نیاز است. اما در نمونه ساخته شده با ۲۵٪ وزنی رزین (شکل ۱-ج)، صافی سطوح و چسبندگی ماسه ها در حد مناسبی بوده و رزین پس زده شده بسیار اندک و قابل اغماض است.

آزمون های فشاری و خمشی

در پژوهش حاضر، برای بررسی خواص مکانیکی نمونه های بتن پلیمری، دو نوع آزمون فشاری و خمشی انجام شد. آزمون فشاری



شکل ۱- نمونه های بتن پلیمری ساخته شده با مقادیر وزنی مختلف رزین: (الف) ۲۰٪، (ب) ۲۵٪ و (ج) ۳۰٪.

ایزوفتالیک است. از ویژگی های مهم این رزین، مقاومت به خوردگی استثنایی در برابر آب دریاست. از کاربردهای اساسی آن نیز می توان به استفاده در قطعات ساختاری قایق ها، لوله ها، تجهیزات بهداشتی، استخرهای شنا و جکوزی ها اشاره کرد. مونومر این رزین، استیرین است و به ازای هر ۱۰۰ g رزین، باید ۱/۱ mL پراکسید و ۰/۰۹ mL کبالت، برای پخت در دمای ۲۵°C به آن اضافه شود. مشخصات مکانیکی و فیزیکی رزین استفاده شده در جدول ۱ آمده است.

سنگ دانه استفاده شده در بتن پلیمری به طور عمده ترکیبات سیلیسی است که علت آن هم سازگاری با رزین و چسبندگی خوب بین این نوع سنگ دانه و رزین های مرسوم به کار رفته در بتن پلیمری است. سنگ دانه استفاده شده در این پژوهش نیز ماسه سیلیسی است که محصول شرکت ماسه ریخته گری است. این نوع مصالح در بازار به عنوان مستحکم ترین نوع ماسه مطرح است. تجزیه شیمیایی این نوع ماسه در جدول ۲ آمده است. با توجه به یکی بودن ماسه استفاده شده در پژوهش حاضر و مرجع ۵، مقادیر مدول کشسانی، ضریب پواسون و استحکام نهایی این ماسه از این مرجع استخراج شده است. ماسه مصرفی دارای مدول کشسانی ۴/۵ GPa، ضریب پواسون ۰/۲ و استحکام نهایی ۶۹ MPa است [۵].

روش ها

ساخت نمونه ها

برای ساخت نمونه ها، ماسه ها شسته و خشک شدند. ابتدا، رزین با کبالت به طور کامل مخلوط شده و پس از آن پراکسید به مخلوط اضافه شد. سپس، ترکیب حاصل روی ماسه ها ریخته و با دقت همزده شد تا ماسه ها به طور یکنواخت در رزین پخش شوند. مخلوط ماسه و رزین درون قالب ها ریخته شده و به مدت هفت روز در دمای محیط پخت شد. قالب های استفاده شده، کامپوزیتی بوده و برای اینکه بتن به قالب نچسبد، پیش از ریختن بتن، دیواره ها و کف قالب با یک فیلم

جدول ۱- خواص مکانیکی و فیزیکی رزین پلی استر استفاده شده.

مقدار	خواص مکانیکی	مقدار	خواص فیزیکی
۱۰۵۰	استحکام کششی (MPa)	۷۵	چگالی (kg/m ³)
۶۰۰	استحکام خمشی (MPa)	۱۰۰	گرانروی در ۲۵°C (mPa.s)
۲۷	مدول کشسانی (GPa)	۳/۵	زمان ژل شدن (min)
۶	ضریب پواسون	۰/۴	عمر نگه داری (ماه)
۸۰			دمای تغییر شکل گرمایی (°C)

میانگین ناهمگنی و ماتریس با استفاده از روش ذرات خارجی معادل (equivalent inclusion) [۲۲] و مفهوم نظریه Mori-Tanaka [۲۳] ارائه می‌شود. در این مقاله، برای اولین بار این مدل برای بتن پلیمری استفاده شده است. بتن پلیمری را می‌توان به عنوان ماده کامپوزیتی در نظر گرفت. بنابراین، می‌توان استحکام فشاری را به عنوان تابعی از خواص مواد تشکیل‌دهنده آن و کسر حجمی سنگ‌دانه‌ها به دست آورد. در این مدل فرض می‌شود، استحکام فشاری بتن با ضعیف‌ترین جزء سازنده کنترل می‌شود. همچنین فرض می‌شود، پیوند میان سنگ‌دانه و زمینه بی‌نقص باشد و هندسه ناهمگنی برای تعیین تانسور Eshelby، کروی فرض شده است. اگر فرض شود، ناهمگنی‌های کروی $\Omega = \sum_{i=1}^N \Omega_i$ با تانسور سفتی \tilde{C}^* و کسر حجمی V_f به طور تصادفی درون یک ماتریس بی‌کران با تانسور سفتی \tilde{C} مطابق شکل ۵، قرار گرفته باشد، پراکندگی تنش ایجاد شده در اثر تنش فشاری اعمالی $\tilde{\sigma}_0$ ، به دلیل وجود ناهمگنی می‌تواند با تنش ویژه ایجاد شده به وسیله کرنش مجازی ناهمگن با محیط اطراف معادل سازی شود. در واقع، کرنش ویژه $\tilde{\epsilon}^*$ برای شبیه‌سازی اثر ناهمگنی معرفی می‌شود. با استفاده از روش ذرات خارجی معادل و نظریه Mori-Tanaka، تنش نهایی در ناهمگنی به شکل زیر است [۲۱]:

$$\tilde{\sigma}_0 + \langle \tilde{\sigma} \rangle_{\Omega} = \tilde{C} \{ \tilde{C}^{-1} (\tilde{\sigma}_0 + \langle \tilde{\sigma} \rangle_M) + \langle \tilde{\Delta\gamma} \rangle - \langle \tilde{\epsilon}^* \rangle \} \quad (1)$$

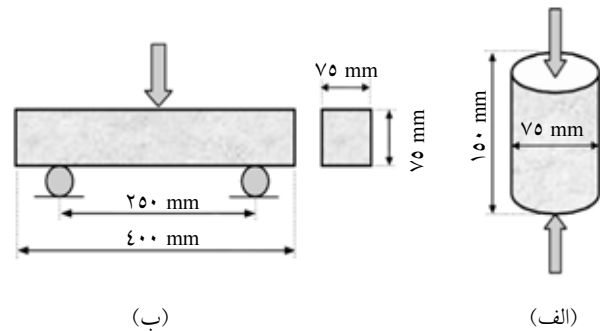
یا [۲۰]:

$$\tilde{\sigma}_0 + \langle \tilde{\sigma} \rangle_{\Omega} = \tilde{C}^* \{ \tilde{C}^{-1} (\tilde{\sigma}_0 + \langle \tilde{\sigma} \rangle_M) + \langle \tilde{\Delta\gamma} \rangle \} \quad (2)$$

در این معادله‌ها، $\tilde{\sigma}_0 + \langle \tilde{\sigma} \rangle_{\Omega}$ تنش میانگین در ناهمگنی، $(\tilde{\sigma}_0 + \langle \tilde{\sigma} \rangle_M)$ تنش میانگین در ماتریس و $\langle \tilde{\Delta\gamma} \rangle$ میانگین پراکندگی کرنش ایجاد شده به وسیله کرنش ویژه $\langle \tilde{\epsilon}^* \rangle$ در یک ناهمگنی است و با معادله (۳)



شکل ۴- دستگاه آزمون استحکام خمشی و نحوه قرارگیری نمونه.



شکل ۲- ابعاد نمونه و نحوه بارگذاری در: (الف) آزمون فشاری و (ب) آزمون خمشی.

مطابق با استاندارد ASTM C39-99 [۱۹] بود که در آن فک متحرک دستگاه با سرعت ۵ mm/min، استوانه‌ای با قطر ۷۵ mm و ارتفاع ۱۵۰ mm را زیر فشار قرار می‌دهد. برای به دست آوردن استحکام خمشی نیز از آزمون خمش سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM C293-554T [۲۰] استفاده شد که در آن قطعه‌های مکعب مستطیلی با ابعاد ۷۵×۷۵×۴۰۰ mm و طول مؤثر ۲۵۰ mm زیر خمش قرار می‌گیرند. سرعت فک متحرک دستگاه در این آزمون ۱۶ mm/min بود. شکل ۲ ابعاد نمونه‌ها و نحوه بارگذاری در آزمون فشاری و خمش سه نقطه‌ای اشاره شده را نشان می‌دهد. شکل‌های ۳ و ۴ نیز دستگاه و نحوه قرارگیری نمونه‌ها در دستگاه را به ترتیب در آزمون‌های فشاری و خمشی نشان می‌دهند.

مدل میکرومکانیکی دوفازی برای تخمین استحکام فشاری بتن

مدل دوفازی ارائه شده توسط Huang و Yang [۲۱] برای تخمین استحکام فشاری بتن سیمانی، مدلی میکرومکانیکی است که در آن میدان تنش



شکل ۳- دستگاه آزمون استحکام فشاری و نحوه قرارگیری نمونه.

ماتریس $\langle \tilde{\sigma} \rangle_M$ ، به شکل معادله (۶) محاسبه می‌شود:

$$\langle \tilde{\sigma} \rangle_M = -V_f \tilde{C} (\tilde{S}^{es} - \tilde{I}) \langle \tilde{\varepsilon}^* \rangle \quad (6)$$

با استفاده از معادله‌های (۵) و (۶)، میانگین پراکندگی تنش در ناهمگنی‌ها $\langle \tilde{\sigma} \rangle_\Omega$ ، به شکل معادله (۷) محاسبه می‌شود:

$$\langle \tilde{\sigma} \rangle_\Omega = (1 - V_f) \tilde{C} (\tilde{S}^{es} - \tilde{I}) \langle \tilde{\varepsilon}^* \rangle \quad (7)$$

با جاگذاری معادله‌های (۶) و (۷) در معادله (۲) و حل آن برای $\langle \tilde{\sigma}^* \rangle$ داریم:

$$\langle \tilde{\varepsilon}^* \rangle = \alpha^{-1} (\tilde{C} - \tilde{C}^*) \tilde{C}^{-1} \tilde{\sigma}_0 \quad (8)$$

که در معادله (۸):

$$\alpha = (1 - V_f) (\tilde{C}^* - \tilde{C}) \tilde{S}^{es} - V_f (\tilde{C} - \tilde{C}^*) + \tilde{C} \quad (9)$$

با جاگذاری معادله (۸) در معادله‌های (۶) و (۷)، میانگین کل تنش‌ها در ماتریس و ناهمگنی‌ها به شکل زیر حاصل می‌شود:

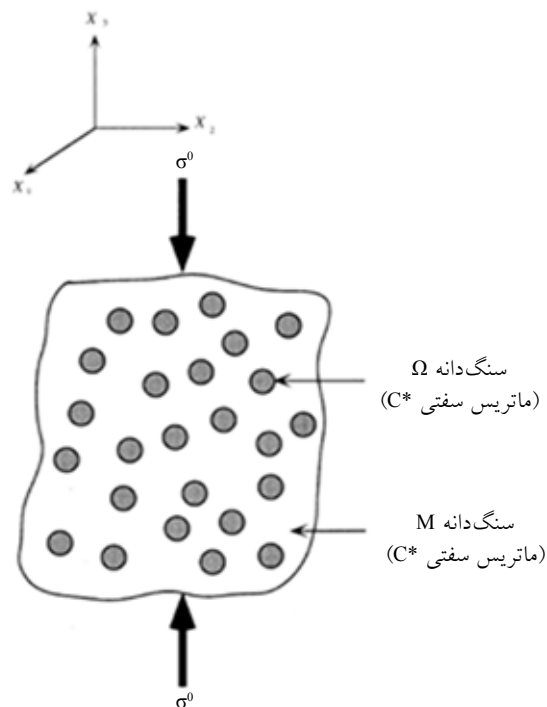
$$\tilde{\sigma}_0 + \langle \tilde{\sigma} \rangle_M = [I - V_f \tilde{C} (\tilde{S}^{es} - \tilde{I}) \alpha^{-1} (\tilde{C} - \tilde{C}^*) \tilde{C}^{-1}] \tilde{\sigma}_0 \quad (10)$$

$$\tilde{\sigma}_0 + \langle \tilde{\sigma} \rangle_\Omega = [I - V_f \tilde{C} (\tilde{S}^{es} - \tilde{I}) \alpha^{-1} (\tilde{C} - \tilde{C}^*) \tilde{C}^{-1} + \tilde{I}] \tilde{\sigma}_0 \quad (11)$$

تنش نهایی وارد شده به ماتریس و ناهمگنی ($\tilde{\sigma}_{0M}$ و $\tilde{\sigma}_{0\Omega}$) هنگامی که تنش میانگین به استحکام ماتریس و ناهمگنی‌ها برسد، حاصل می‌شوند. حال اگر تنش نهایی وارد شده به ماتریس کوچک‌تر از تنش نهایی وارد شده به ناهمگنی‌ها باشد ($\tilde{\sigma}_{0M} > \tilde{\sigma}_{0\Omega}$)، استحکام کامپوزیت \tilde{f}_c ، با استحکام ماتریس \tilde{f}_m کنترل می‌شود. اما، اگر تنش نهایی وارد شده به ماتریس بزرگ‌تر از تنش نهایی وارد شده به ناهمگنی‌ها باشد ($\tilde{\sigma}_{0M} < \tilde{\sigma}_{0\Omega}$)، استحکام کامپوزیت \tilde{f}_c ، به وسیله استحکام ناهمگنی‌ها \tilde{f}_a کنترل می‌شود. هنگامی که تنش میانگین ماتریس $\langle \tilde{\sigma} \rangle_M + \tilde{\sigma}_0$ به استحکام فشاری ماتریس \tilde{f}_m می‌رسد، تنش فشاری نهایی $\tilde{\sigma}_{0M}$ از معادله (۱۲) به دست می‌آید:

$$\tilde{\sigma}_{0M} = [I - V_f \tilde{C} (\tilde{S}^{es} - \tilde{I}) \alpha^{-1} (\tilde{C} - \tilde{C}^*) \tilde{C}^{-1}]^{-1} \tilde{f}_m \quad (12)$$

هنگامی که تنش میانگین ناهمگنی‌ها $\langle \tilde{\sigma} \rangle_\Omega + \tilde{\sigma}_0$ ، به استحکام فشاری ناهمگنی‌ها \tilde{f}_a می‌رسد، تنش فشاری نهایی $\tilde{\sigma}_{0\Omega}$ از معادله (۱۳)



شکل ۵ - ناهمگنی‌های کروی قرار گرفته درون یک ماتریس بی‌کران. به کرنش ویژه مرتبط می‌شود [۲۱]:

$$\langle \tilde{\Delta \gamma} \rangle = \tilde{S}^{es} \langle \tilde{\varepsilon}^* \rangle \quad (3)$$

در این معادله، \tilde{S}^{es} تانسور Eshelby برای یک ناهمگنی بوده که به تنهایی درون یک ماده همگن بی‌کران قرار گرفته است. تانسور Eshelby تابعی از هندسه ناهمگنی و ضریب پواسون ماتریس است. از آنجا که میانگین پراکندگی تنش $\tilde{\sigma}_0$ صفر است، در نتیجه [۲۱]:

$$V_f \langle \tilde{\sigma} \rangle_\Omega + (1 - V_f) \langle \tilde{\sigma} \rangle_M = 0 \quad (4)$$

میانگین پراکندگی تنش در ناهمگنی $\langle \tilde{\sigma} \rangle_\Omega$ با حل معادلات (۱) و (۳) حاصل می‌شود:

$$\langle \tilde{\sigma} \rangle_\Omega = \langle \tilde{\sigma} \rangle_M + \tilde{C} (\tilde{S}^{es} - \tilde{I}) \langle \tilde{\varepsilon}^* \rangle \quad (5)$$

که \tilde{I} ماتریس یکه است. عبارت دوم در معادله (۵)، $\tilde{C} (\tilde{S}^{es} - \tilde{I}) \langle \tilde{\varepsilon}^* \rangle$ ، میانگین میدان تنش در ذرات خارجی هنگامی است که تنها یک ذره خارجی در نظر گرفته شود. براساس فرض ابتدایی نظریه Mori-Tanaka، تنش میانگین در ذرات خارجی به شکل جمع میانگین تنش در ماتریس و تنش برای یک ذره خارجی حاصل می‌شود. با جایگزینی معادله (۵) در معادله (۴)، میانگین پراکندگی تنش در

جدول ۳- نتایج آزمون تعیین استحکام فشاری بتن پلیمری.

نمونه	نیروی اعمالی بیشینه (kN)	مساحت سطح (cm ²)	استحکام فشاری (MPa)	میانگین نتایج (MPa)	انحراف معیار نسبی، (%) RSD
۱	۳۲۵/۳	۴۴/۴۱	۷۳/۲۴	۷۶/۴۴	۴/۹۱
۲	۳۲۸/۷	۴۴/۵۳	۷۳/۸۱		
۳	۳۴۰/۸	۴۴/۰۶	۷۷/۳۵		
۴	۳۵۹/۵	۴۴/۱۸	۸۱/۳۷		

به دست می آید:

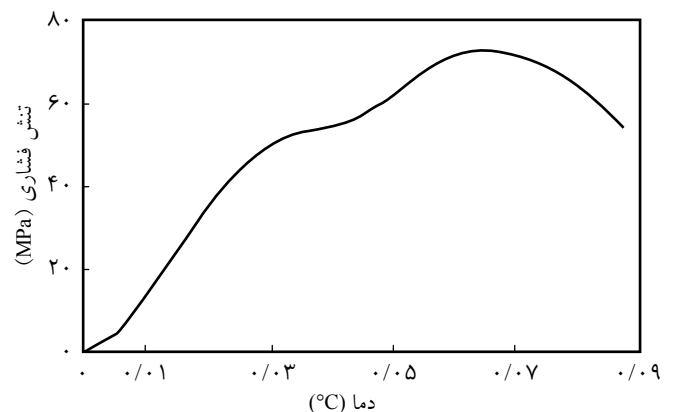
$$\tilde{\sigma}_{0\Omega} = [(1 - V_f)\tilde{C}(\tilde{S}^{es} - \tilde{I})\alpha^{-1}(\tilde{C} - \tilde{C}^*)\tilde{C}^{-1} + \tilde{I}]^{-1}\tilde{f}_a \quad (13)$$

بنابراین، استحکام فشاری کامپوزیت \tilde{f}_a برابر با کمینه دو مقدار $\tilde{\sigma}_{0m}$ و $\tilde{\sigma}_{0\Omega}$ خواهد بود.

نتایج و بحث

آزمون فشاری

برای به دست آوردن استحکام فشاری، چهار نمونه استوانه‌ای با ابعاد داده شده و برای به دست آوردن استحکام خمشی نیز، چهار نمونه مکعب‌مستطیلی با ابعاد اشاره شده مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج این آزمون روی چهار نمونه ساخته شده از بتن پلیمری با ترکیب ۲۵٪ وزنی رزین پلی‌استر و ۷۵٪ وزنی ماسه سیلیسی در جدول ۳ آمده است. یادآور می‌شود، خروجی دستگاه اعمال بار، نیروست که با تقسیم کردن آن بر مساحت متوسط اعمال بار می‌توان استحکام



شکل ۶- نمودار تنش-کرنش فشاری برای یک نمونه آزمون تعیین استحکام فشاری.

فشاری را به دست آورد. نمودار تنش-کرنش فشاری برای یک نمونه آزمون تعیین استحکام فشاری در شکل ۶ نشان داده شده است. شکل ۷ نشان‌دهنده سطح شکست در یک نمونه بتن پلیمری شکسته شده زیر بار فشاری است. این شکل نشان می‌دهد، قطعه به شکل مناسبی (در حداکثر بار برشی) شکسته شده است، زیرا پیش‌روی سطح شکست تقریباً با زاویه ۴۵° است.

آزمون خمشی

نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای روی چهار نمونه ساخته شده از بتن پلیمری با ترکیب ۲۵٪ وزنی رزین پلی‌استر و ۷۵٪ وزنی ماسه سیلیسی در جدول ۴ آمده است. نمودار تنش-کرنش خمشی برای یک نمونه آزمون تعیین استحکام خمشی در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۹ نیز سطح شکست در یک نمونه بتن پلیمری شکسته شده را زیر بار خمشی نشان می‌دهد.



شکل ۷- سطح شکست در نمونه قرار گرفته زیر بار فشاری.

جدول ۴- نتایج آزمون تعیین استحکام خمشی بتن پلیمری.

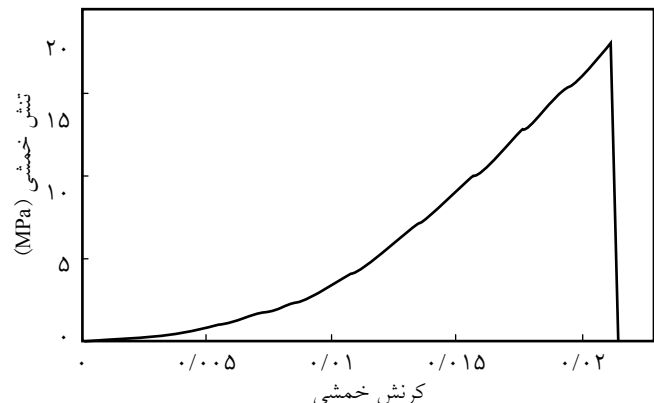
انحراف معیار نسبی، RSD (%)	میانگین نتایج (MPa)	استحکام خمشی (MPa)	ارتفاع (cm)	پهنا (cm)	نیروی اعمالی بیشینه (kN)	نمونه
۴/۲۱	۱۹/۶۹	۲۰/۳۹	۷/۵۵	۷/۴۲	۲۳	۱
		۱۸/۵۹	۷/۵۵	۷/۴۳	۲۱	۲
		۲۰/۲۶	۷/۵۸	۷/۴۱	۲۳	۳
		۱۹/۵۰	۷/۵۴	۷/۴۴	۲۲	۴

تخمین استحکام فشاری با مدل دوفازی

با محاسبه حجم سنگ دانه، حجم رزین و حجم کل نمونه، کسر حجمی ماسه برابر ۰/۵۵۴ و کسر حجمی رزین برابر ۰/۴۴۶ به دست آمد. با توجه به خواص مکانیکی رزین و سنگ دانه و استفاده از معادله‌های (۱۲) و (۱۳)، استحکام فشاری بتن پلیمری ساخته شده، با استفاده از مدل دوفازی $71/20$ MPa تخمین زده می‌شود که در مقایسه با استحکام میانگین به دست آمده از آزمون، تنها دارای ۶/۸٪ خطاست. این درصد خطای کم، بیانگر قابلیت این مدل در تخمین استحکام بتن پلیمری به هنگامی است که فقط از دو فاز سنگ دانه و پلیمر در ساخت آن استفاده شود. گفتنی است، در معادله‌های اشاره شده استحکام فشاری رزین پلی‌استر ۱/۶ برابر استحکام کششی آن در نظر گرفته شده است. این مقدار با استفاده از معادله (۱۴) به دست آمده است که استحکام فشاری پلیمر را با استفاده از استحکام کششی و ضریب پواسون تخمین می‌زند [۲۴]:

$$\log \frac{\sigma_{\max}(\text{compressive})}{\sigma_{\max}(\text{tensile})} = 2.2 - 5v \quad (14)$$

در این معادله، v ضریب پواسون پلیمر است. مطابق این مدل،



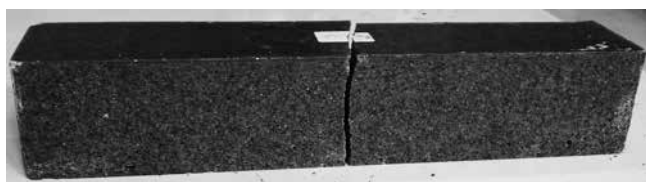
شکل ۸- نمودار تنش-کرنش خمشی برای یک نمونه آزمون تعیین استحکام خمشی.

استحکام فشاری بتن با سنگ دانه محدود شده است. زیرا، هنگامی که تنش میانگین ناهمگنی ها $\langle \tilde{\sigma}_0 \rangle + \langle \tilde{\sigma}_M \rangle$ به استحکام فشاری ناهمگنی ها f_a می‌رسد، تنش فشاری نهایی $71/20$ MPa تقریب زده می‌شود. اما هنگامی که تنش میانگین ماتریس $\langle \tilde{\sigma}_0 \rangle + \langle \tilde{\sigma}_M \rangle$ به استحکام فشاری ماتریس f_m می‌رسد، تنش فشاری نهایی $86/68$ MPa تقریب زده می‌شود که به مقدار قابل توجهی بزرگ‌تر از مقدار $71/20$ MPa است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، اگر از سنگ دانه‌هایی با خواص استحکامی بیشتر استفاده شود، رزین قابلیت باربرداری بیشتری را نیز دارد.

مقایسه نتایج

برای تعیین مقدار بهبود خواص‌های مکانیکی بتن ساخته شده در مقایسه با سایر بتن‌های پلیمری متداول، مقایسه‌ای میان خواص مکانیکی بتن پلیمری مطالعه شده و بتن پلیمری با ترکیب بهینه مرجع ۲۵ انجام شده که در جدول ۵ آمده است. ترکیب بتن مطالعه شده در مرجع ۲۵، شامل ۱۹٪ وزنی رزین اپوکسی، ۵٪ وزنی الیاف شیشه و ۸۰/۵٪ سنگ دانه شامل ۴۰٪ وزنی پرکننده‌های سیلیسی و ۶۰٪ وزنی مصالح دانه بندی شده با قطر ۲ mm تا ۴ mm است.

با مقایسه مقادیر جدول ۵ می‌توان نتیجه گرفت، اگرچه رزین اپوکسی دارای استحکام بیشتری نسبت به رزین پلی‌استر است، اما استفاده از سنگ دانه‌های کوچک‌تر، به دلیل کم کردن مقدار حفره‌ها (کم شدن چگالی) و در نتیجه تمرکز تنش، موجب شده است تا بتن پلیمری



شکل ۹- سطح شکست در نمونه قرار گرفته زیر بار خمشی.

جدول ۵- مقایسه خواص اندازه‌گیری شده بتن مطالعه شده و بتن با ترکیب بهینه مرجع ۲۵.

بتن پلیمری		خواص اندازه‌گیری شده
مرجع ۲۵	مطالعه شده	
۶۳/۳۲	۷۶/۴۴	استحکام فشاری (MPa)
۱۹/۵۱	۱۹/۶۹	استحکام خمشی (MPa)
۱/۴۰	۲/۹۶	جابه‌جایی در وسط نمونه آزمون خمشی تا لحظه شکست (mm)
۲۰۲۰	۱۸۳۴	چگالی (kg/m^3)

مکانیکی بهبود یافته است.

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر ترکیب جدیدی برای کاهش هزینه ساخت بتن پلیمری ارائه شد که در آن فقط از ماسه سیلیسی و رزین پلی‌استر استفاده شده است. این ترکیب برای ساخت بتن پلیمری برای اولین بار به کار گرفته شد. استحکام فشاری و خمشی بتن پیشنهادی با انجام آزمون به دست آمد. در مقایسه نتایج به دست آمده با نتایج مربوط به یک ترکیب متداول بتن پلیمری ساخته شده با رزین اپوکسی، ۲۰٪ بهبود در استحکام فشاری، ۹٪ کاهش در چگالی مشاهده می‌شود. همچنین بتن مطالعه شده رفتار نرم‌تری را نشان می‌دهد. ضمن اینکه استحکام‌های خمشی تقریباً برابرند. همچنین با استفاده از مدل دوفازی، استحکام فشاری بتن تخمین زده شد که برای بتن پلیمری مطالعه شده خطا در مدل استفاده شده، تنها ۶/۸٪ مشاهده شد. این مقدار خطا، نشان‌دهنده قابلیت این مدل در تخمین استحکام بتن پلیمری است، هنگامی که فقط از دو فاز سنگ‌دانه و پلیمر در ساخت آن استفاده شود.

مطالعه شده دارای استحکام فشاری بیشتر (۲۰٪) بهبود در استحکام فشاری) و استحکام خمشی تقریباً برابر با بتن پلیمری مرجع ۲۵ باشد. همچنین، این بتن دارای چگالی کمتر (۹٪ کاهش در چگالی) و کرنش شکست بیشتر (۱۱۱٪ افزایش در کرنش شکست) است که علت آن نیز افزایش درصد وزنی رزین در مقایسه با مرجع ۲۵ است. از نظر مقدار هزینه مورد نیاز، با توجه به اینکه رزین اپوکسی گران‌تر از رزین پلی‌استر است، بنابراین مشاهده می‌شود، برای ترکیب بتن پلیمری پیشنهادی با وجود کاهش هزینه، خواص

مراجع

- Jo B.W., Park S.K., and Park J.C., Mechanical Properties of Polymer Concrete Made with Recycled PET and Recycled Concrete Aggregates, *Construct. Build. Mater.*, **22**, 2281-2291, 2008.
- Blaga A. and Beaudoin J.J., Polymer Concrete, Division of Building Research, National Research Council Canada, Canadian Building Digest 241, Ottawa, 1985.
- 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, 21-30, 1997.
- Rezadost A.M., Esfandeh M., Sabet S.A., and Alavi S.M., Construction of Composite Rebars and Investigation of Their Bonding to Concrete, *Iran. J. Polym. Sci. Technol. (Persian)*, **1**, 79-86, 2007.
- 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.
- 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.
- Garas V.Y. and Vipulanandan C., *Review of Polyester Polymer Concrete Properties*, Center for Innovative Grouting Materials and Technology (CIGMAT), Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, Houston, 2005.
- Camille A. and Pauls D., Experimental Study of Epoxy Repairing of Cracks in Concrete, *Construct. Build. Mater.*, **21**, 157-163, 2007.
- Shokrieh M.M. and Heidari-Rarani M., Design and Manufacturing of Drinking Water Filtration Slabs Using Polymer Concrete, *Proceedings of 1th International Conference on Non-Osmosis Concrete and Water Storage Tanks*, Iran, May, 25-27, 2011.
- Vipulanandan C. and Mantrala S.K., Behavior of Fiber Rein-

- forced Polymer Concrete, *Proceeding of the 1996 4th Materials Engineering Conference*, 1160-1169, 1996.
11. Abdelfattah H. and El-Hawary M.M., Flexural Behavior of Polymer Concrete, *Construct. Build. Mater.*, **13**, 253-262, 1999.
 12. Reis J.M.L. and Ferreira A.J.M., Assessment of Fracture Properties of Epoxy Polymer Concrete Reinforced with Short Carbon and Glass Fibers, *Construct. Build. Mater.*, **18**, 523-528, 2004.
 13. Reis J.M.L., Fracture and Flexural Characterization of Natural Fiber-Reinforced Polymer Concrete, *Construct. Build. Mater.*, **20**, 673-678, 2006.
 14. Heidari-Rarani M., Aliha M.R.M., Shokrieh M.M., and Aya-tollahi M.R., Mechanical Durability of an Optimized Polymer Concrete under Various Thermal Cyclic Loadings - An Experimental Study, *Construct. Build. Mater.*, **64**, 308-315, 2014.
 15. Aïtcin P.C. and Neville A., High Performance Concrete Demystified, *Concrete Int.*, **15**, 21-26, 1993.
 16. Aïtcin P.C. and Mehta P.K., Effect of Coarse Aggregate Characteristics on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, *ACI Mater. J.*, **87**, 103-107, 1990.
 17. Ouaar A., *Micromechanics of Rate-Independent Multi-Phase Composites-Application to Steel Fiber-Reinforced Concrete*, PhD Thesis, Université Catholique de Louvain Faculté des Sciences Appliquées, 2006.
 18. Pasa Dutra V.F., Maghous S., Filho A.C., and Pacheco A.R., A Micromechanical Approach to Elastic and Viscoelastic Properties of Fiber Reinforced Concrete, *Cement Concrete Res.*, **40**, 460-472, 2010.
 19. Standard Test Method for Compressive Strength of Molded Concrete Cylinders, Annual Book of ASTM Standard, C 39-49, 2002.
 20. Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete Using Simple Beam with Center-Point Loading, Annual Book of ASTM Standard, C 293-54T, 2002.
 21. Yang C.C. and Huang R., A Two-Phase Model for Predicting the Compressive Strength of Concrete, *Cement Concrete Res.*, **26**, 1567-1577, 1996.
 22. Eshelby J.D., The Determination of the Elastic Field of an Ellipsoidal Inclusion, and Related Problems, *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical Physical and Engineering Sciences*, **241**, 376-396, 1957.
 23. Mori T. and Tanaka K., Average Stress in Matrix and Average Elastic Energy of Materials with Mis-Fitting Inclusions, *Acta Metallurgica*, **21**, 571-574, 1973.
 24. Van Krevelen D.W. and Te Nijenhuis K., *Properties of Polymers*, 4th ed., Elsevier, Amsterdam, 456-459, 2009.
 25. Shokrieh M.M., Heidari-Rarani M., Shakouri M., and Kashizadeh E., Effects of Thermal Cycles on Mechanical Properties of an Optimized Polymer Concrete, *Construct. Build. Mater.*, **25**, 3540-3549, 2011.