

علمی - تخصصی

بررسی تأثیر استایرن بوتادین رابر، اتیلن وینیل استات و اکریلیک لاتکس

بر خواص مکانیکی بتن سبک

محمدعلی قنبری^{۱*}، بنیامین مهری^۲

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، ۲- کارشناسی ارشد دانشگاه علم و صنعت

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۱)

چکیده

بتن‌های اصلاح‌شده پلیمری کامپوزیت‌های جدیدی هستند که به دلیل عملکرد نسبی بالا چندقابلیتی و پایداری در مقایسه با بتن سیمان معمولی به‌عنوان یکی از مواد محبوب در صنعت ساخت‌وساز مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این بتن‌ها با افزودن پلیمر می‌توان برخی از ضعف‌های بتن معمولی را اصلاح کرد. در این پژوهش با افزودن سه لاتکس مختلف شامل استایرن بوتادین رابر، اتیلن وینیل استات و اکریلیک لاتکس خواص مکانیکی و دوامی بتن سبک شده با سنگ‌دانه‌های لیکا اندازه‌گیری شد. در این راستا ۱۵ طرح اختلاط مختلف در دو برنامه آزمایشگاهی انجام شد بدین‌صورت که در مرحله اول تأثیر هر یک از لاتکس‌ها با درصدهای ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد با سیمان مورد بررسی قرار گرفت و در مرحله بعد تأثیر هم‌زمان لاتکس با میکروسیلیس بر خواص بتن سبک اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که افزودن لاتکس تأثیر چشم‌گیری بر مقاومت فشاری و خمشی بتن داشته است. در بین لاتکس‌های استفاده‌شده، اتیلن وینیل استات تأثیر بهتری را نشان داده است. **کلیدواژه‌ها:** بتن سبک، بتن اصلاح‌شده با پلیمر، استایرن بوتادین رابر، اتیلن وینیل استات، اکریلیک لاتکس.

۱. مقدمه

از حدود ۱۷۰ سال گذشته بتن به‌طور گسترده در صنعت ساخت‌وساز مورد استفاده قرار گرفته است اما امروزه نیاز به ساخت بتن سبک با توجه به مزایای مطلوب آن بیشتر از قبل احساس می‌شود [۱ و ۳]؛ اما این سبک‌سازی باعث تأثیر منفی در برخی خواص مانند مقاومت فشاری و خمشی می‌شود. همچنین استفاده از سنگ‌دانه‌های سبک در بتن می‌تواند تخلخل بتن را به مقداری زیادی افزایش داده که نتیجه آن کاهش بسیار زیاد در دوام و پایداری سازه در محیط‌های خورنده می‌شود [۴ و ۵]. از طرفی بتن سیمانی مورد استفاده در سراسر جهان دارای معایبی مانند تأخیر در سخت شدن، جمع شدن بالا، مقاومت کششی کم و مقاومت کم در برابر مواد شیمیایی است [۶]. برای غلبه بر این مشکلات بتن چه معمولی و چه سبک از افزودنی‌های مختلفی به‌منظور اصلاح طرح اختلاط مانند پوزولان‌ها و یا مواد پلیمری مانند رزین‌های اپوکسی، پلیمرهای طبیعی، سلولز و غیره انجام می‌شود که به اصلاح به بتن‌های اصلاح‌شده با پلیمر (PMC) شناخته می‌شوند [۷ و ۸].

بتن اصلاح‌شده با پلیمر که با انواع لاتکس‌های به شکل مایع،

رزین و یا پودر ساخته می‌شود به دلیل خواص بهبودیافته در مقایسه با بتن معمولی، یکی از مصالح ساختمانی محبوب است. معمولاً از لاتکس‌های پلیمری استایرن بوتادین رابر (SBR)، استایرن اکریلات (SA)، پلی اکریلیک استر (PAE)، استایرن اکریلیک استر (SAE)، اتیلن وینیل استات (EVA)، پلی کلروپرن رابر (CR) که همگی می‌توانند به‌صورت لاتکس دربیایند، در تهیه بتن اصلاح‌شده با پلیمر استفاده می‌شود [۹-۱۳]. بیشتر لاتکس‌های پلیمری تجاری برای اصلاح‌گرهای سیمانی محتوی عامل‌های ضد حباب هستند و معمولاً می‌توانند بدون افزودن عامل‌های ضد حباب در مدت اختلاط مصرف شوند [۱۴]. در پژوهش در سال ۲۰۱۹ از استایرن بوتیل اکریلات به‌عنوان اصلاح‌گر در طرح مخلوط بتن اصلاح‌شده با پلیمر استفاده شد. نتایج نشان داد که این افزودنی باعث کاهش مقاومت فشاری تا حدود ۱۰ درصد شده است اما مقاومت خمشی تا ۳۰ درصد افزایش داشته. همچنین عکس‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی و تحلیل و بررسی میکرو ساختاری نشان داد که با استفاده از این ماده تخلخل بتن به میزان قابل توجهی کاهش یافته و باعث افزایش دوام آن شده است [۱۵].

نتایج ادبیات گذشته نشان می‌دهد که استفاده از پلیمرها در بتن باعث بهبود مقاومت، کارایی، جمع‌شدگی و کاهش تخلخل

عمل‌آوری شدند. باقی سناریوها نیز ترکیبی از این دو روش انجام شد. نتایج نشان داد بهترین نتیجه زمانی حاصل شد که نمونه‌ها بین ۵ تا ۱۴ روز در آب عمل‌آوری شدند و سپس به اتاق رطوبت منتقل شده تا سن ۲۸ روزه [۲۹].

در این پژوهش به منظور بررسی آزمایشگاهی تأثیر سه پلیمر استایرن بوتادین رابر، اتیلن وینیل استات و اکریلیک لاتکس بر بتن سبک شده با سنگ‌دانه‌های لیکا دو برنامه آزمایشگاهی شامل ۱۵ طرح اختلاط طراحی شد. برنامه آزمایشگاهی شامل دو طرح شاهد که طرح اول بتن معمولی بدون افزودنی و طرح شاهد دوم بتن سبک شده با سنگ‌دانه لیکا می‌باشد. در مرحله اول هر لاتکس با سه درصد مختلف ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد جایگزین وزن سیمان شدند. در مرحله بعد اتیلن وینیل استات که بهترین نتایج را نسبت به دیگر لاتکس‌ها گرفته بود با میکروسیلیس به عنوان پرکننده ترکیب شد تا بررسی شود آیا خواص دوامی با ترکیب فیلر و مواد پلیمری بهبود بیشتری می‌یابد یا خیر. لازم به ذکر است که نمونه‌های مقاومت فشاری در روزهای ۱، ۷ و ۲۸ و همچنین مقاومت خمشی نمونه‌ها در سن ۲۸ نیز اندازه‌گیری شد.

۲. روش تحقیق

۲-۱. مصالح مصرفی

در این مطالعه از سیمان پرتلند تیپ ۱ با رده مقاومتی ۴۲/۵ مگاپاسکال ساخت کارخانه سیمان تهران استفاده شده است. نحوه ساخت و تولید سیمان‌ها بر اساس آیین‌نامه [۳۴] ASTM 150 می‌باشد. آب مورد استفاده در طرح اختلاط‌ها آب شرب تصفیه شده شهری است. سنگ‌دانه تهیه شده از معادن فیروزکوه برای برنامه آزمایشگاهی استفاده شده است. بیشترین بعد سنگ‌دانه ۹ میلی‌متر با چگالی و مدول نرمی به ترتیب برابر ۲۶۰۰ و ۳/۴۵ کیلوگرم بر مترمکعب است. سنگ‌دانه‌های ماسه‌ای از نوع طبیعی بر اساس استاندارد ASTM C778 دانه‌بندی شده است. سبک دانه سازه‌های مصرفی در این تحقیق از نوع لیکا با ۲ دانه‌بندی مختلف در محدوده ۰ تا ۴ میلی‌متر و ۴ تا ۹ میلی‌متر است. وزن مخصوص توده‌های تقریبی سنگ‌دانه‌های سبک لیکا حدود ۵۰۰ الی ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. مشخصات فنی این دانه‌ها توسط شرکت تولیدکننده به شرح ذیل است. وزن مخصوص دانه‌های لیکا بین ۹۱۱ تا ۱۱۷۱ کیلوگرم بر مترمکعب است. در ضمن جذب آب سبک دانه لیکا بر اساس استاندارد ASTM C 127 برای نیم، یک و ۲۴ ساعت حدود ۵/۵، ۵/۸ و ۹/۴ درصد توسط تولیدکننده اعلام شده است. میکروسیلیس مورد استفاده در این پژوهش با داشتن بیش از ۹۰ درصد سیلیس با حالت غیر کریستالی و به شکل ذرات ریز با قطر متوسط ۰/۱

که باعث افزایش دوام می‌شود که تاکنون توسط محققین مورد مطالعه قرار گرفته است [۱۹-۱۶]. باین حال، مطالعات کمی در مورد استفاده از پلیمر بر روی بتن سبک (LWC) وجود دارد [۲۰]. از طرف دیگر، انگیزه زیست‌محیطی، اقتصادی و فنی در سراسر جهان برای تشویق استفاده از بتن سبک وجود دارد [۲۳-۲۱]. بتن سبک سال‌هاست که برای اهداف سازه‌ای با موفقیت استفاده می‌شود. برای کاربردهای سازه‌ای بتن سبک، کارایی سازه مهم‌تر از در نظر گرفتن مقاومت است [۲۴]. به دلیل تشکیل شبکه پلیمری سه‌بعدی ماتریس‌های مبتنی بر سیمان بتن سخت، بتن پلیمری دارای استحکام کششی بالا، رفتار شکل‌پذیری بهتر و قابلیت مقاومت در برابر ضربه و همین‌طور محیط‌های خورنده بسیار بالا است. بدین منظور استفاده از مواد پلیمری به عنوان جایگزین وزن سیمان با درصد مناسب می‌تواند خواص بتن سبک را بهبود بخشد که هم بتوان از سبکی بتن و هم از خواص قابل قبول آن بهره برد [۲۵، ۲۶]. همان‌طور که ذکر شد تاکنون مقالات اندکی در زمینه تأثیر پلیمر بر خواص بتن سبک انجام شده است [۲۷-۲۹]. به عنوان مثال در سال ۲۰۲۰ خواص مکانیکی و نفوذپذیری بتن اصلاح شده با عامل هیدروفوبیک مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش سه پلیمر مختلف شامل استایرن بوتادین رابر، پلی اکریلیک استر و سیلیکون ارگانیک به منظور بررسی بر مقاومت و خواص نفوذپذیری یون کلر مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از این لاتکس‌ها تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری نداشته است اما باعث بهبود قابل ملاحظه در خواص نفوذپذیری بتن شده است [۱۳].

هنگامی از لاتکس که از جنس پلیمر می‌باشند در اصلاح طرح مخلوط بتن استفاده می‌شود یکی از نکاتی که باید به آن توجه کرد نوع عمل‌آوری این بتن است. سیمان برای انجام واکنش هیدراسیون و عمل‌آوری نیاز به رطوبت دارد، درحالی‌که مواد پلیمری اغلب برای ایجاد گیرش نیاز به محیطی خشک و مقداری دمای بالا دارند؛ بنابراین نحوه عمل‌آوری بتن اصلاح شده با پلیمر باید به گونه‌ای باشد که هم گیرش مواد پلیمری ایجاد شود و هم در واکنش هیدراتاسیون سیمان خللی وارد نشود. محققین تاکنون روش‌های مختلفی از جمله قرار دادن در فشار بخار، عمل‌آوری خشک و ترکیب عمل‌آوری مرطوب و خشک را برای به دست یافتن بهترین عملکرد مورد بررسی قرار داده‌اند که تاکنون به روش مشخصی دست نیافته‌اند [۳۳ و ۳۰]. به عنوان مثال یک پژوهش در سال ۲۰۱۵ محققین بتن اصلاح شده با پلیمر را با ۶ سناریوی مختلف عمل‌آوری کردند که سناریوی اول نمونه‌ها کامل ۲۸ روز در آب عمل‌آوری شدند و در سناریوی ششم نمونه‌ها ۲۸ روز در اتاق رطوبت با رطوبت ۵۰ درصد

ساخته شد. در مرحله بعد با ساخت ۵ طرح و استفاده از میکروسیلیس به عنوان پوزولان، تأثیر استفاده هم‌زمان از مواد پوزولانی و لاتکس مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که لاتکس‌های استفاده شده به عنوان جایگزین سیمان با درصدهای ۵، ۷/۵ و ۱۰ و همچنین سنگ‌دانه‌های سبک با ۵۰ درصد کل سنگ‌دانه مصرفی استفاده شده است. جزییات طرح اختلاط‌های تولید شده در جدول (۲) مشخص شده است.

جدول (۲). جزییات طرح اختلاط‌های تولید شده (کیلوگرم بر مترمکعب)

نام طرح	نوع لاتکس	سیمان	لاتکس	آب	سنگ‌دانه معمولی	سبک دانه لیکا	میکروسیلیس	فوق روان کننده
NC	-	۵۰۰	۰	۲۰۰	۱۵۷۰	۰	۰	۵
LWC	-	۵۰۰	۰	۲۰۰	۵۷۷	۵۱۵	۰	۴
S5	استایرن بوتادین رابر	۴۷۵	۲۵	۲۰۰	۵۷۷	۵۱۵	۰	۰
S7.5		۴۶۲	۳۷/۵	۲۰۰	۵۷۷	۵۱۵	۰	۰
S10		۴۵۰	۵۰	۲۰۰	۵۷۷	۵۱۵	۰	۰
E5	اتیلن وینیل استات	۴۷۵	۲۵	۲۰۰	۵۷۷	۵۱۵	۰	۰
E7.5		۴۶۲	۳۷/۵	۲۰۰	۵۷۷	۵۱۵	۰	۰
E10		۴۵۰	۵۰	۲۰۰	۵۷۷	۵۱۵	۰	۰

ادامه جدول (۲). جزییات طرح اختلاط‌های تولید شده (کیلوگرم بر مترمکعب)

میکرون شدیداً پوزولانی است و برای استفاده به عنوان یک ماده سیمانی در بتن بسیار مناسب است و با استاندارد ASTM C1240 مطابقت دارد. در این پژوهش از سه لاتکس مختلف با نام‌های استایرن بوتادین رابر، اکریلیک لاتکس و اتیلن وینیل استات استفاده شده است. این لاتکس‌ها که ظاهری مایع و شیری‌رنگ دارند ساخت شرکت شیمی سازه آرمانی بوده و مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها در جدول (۱) مشخص شده است.

جدول (۱). مشخصات لاتکس مصرفی

استایرن بوتادین رابر	اکریلیک لاتکس	اتیلن وینیل استات	ظاهر
مایع شیری سفیدرنگ	مایع شیری سفیدرنگ	مایع شیری سفیدرنگ	
۵-۵/۵	۶/۷-۵/۴	۴/۵-۵/۵	PH
۹۹۰-۹۷۰	۸۲۰-۶۷۰	۵۳۰-۴۳۰	چگالی (Kg/m ³)
.	کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد	کمتر از ۵ درجه سانتی‌گراد	دمای تشکیل فیلم

معمولاً زمانی از فوق روان کننده‌ها (HRWR) استفاده می‌شود که یا نسبت آب به سیمان نمونه کم باشد و یا از افزودنی‌هایی استفاده شده است که روانی ملات یا بتن را کاهش می‌دهد. استفاده از لاتکس در بتن به‌خودی‌خود به دلیل واکنش شیمیایی مقداری باعث روانی بتن می‌شود اما نمونه‌های فاقد لاتکس به دلیل اینکه روانی کاهش می‌یابد و میزان آب مناسب به تمام نمونه نمی‌رسد، واکنش هیدراتاسیون سیمان کامل انجام نشده و مصالح ساخته شده از کیفیت خوبی برخوردار نیست؛ بنابراین از فوق روان کننده استفاده شد تا به مخلوطی همگن‌تر با عملکرد بهتری دست پیدا کنند [۳۵]. نوع کاهنده آب مورد استفاده در این تحقیق فوق روان کننده بر پایه پلیمر کربوکسیلیک اتر می‌باشد.

۲-۲. جزییات طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

همان‌طور که اشاره شد برنامه آزمایشگاهی با ساخت ۱۵ طرح اختلاط انجام شده است. طرح اول بتن معمولی با سنگ‌دانه‌های رایج، طرح دوم بتن فاقد لاتکس اما ۵۰ درصد از سنگ‌دانه‌ها با سنگ‌دانه‌های لیکا جایگزین شده و ساخته شد. در ادامه ۹ طرح اختلاط به‌منظور بررسی تأثیر انواع لاتکس‌ها بر بتن سبک سازه‌ای و یافتن طرح اختلاط بهینه با در نظر گرفتن ارزش‌افزوده



شکل (۱). نمونه تحت آزمایش مقاومت فشاری

۲-۳-۲. مقاومت خمشی

پس از ساخت نمونه‌های خمشی در ابعاد $50 \times 50 \times 500$ مقاومت خمشی در سن ۲۸ روز با عمل‌آوری خشک و مرطوب با استفاده از فرمول زیر محاسبه گردید.

$$f_t = \frac{pl}{bd^2} \quad (1)$$

که در آن F_t مقاومت خمشی برحسب مگاپاسکال، p حداکثر نیرو وارد شده که توسط دستگاه نشان داده می‌شود برحسب نیوتن، L طول مؤثر تیر برحسب میلی‌متر، b عرض تیر برحسب میلی‌متر و d ارتفاع تیر برحسب میلی‌متر است. محاسبات مربوط به مقاومت خمشی منطبق بر آیین‌نامه INSO 490 است.



شکل (۲). نمونه تحت آزمایش مقاومت خمشی.

A5	A7.5	A10	M7-L5	M8.5-L5	M10-L5	M7-L7.5
اکریلیک لاتکس			اتیلن ویتیل استات			
۴۷۵	۴۶۲	۴۵۰	۴۴۰	۴۳۲	۴۲۵	۴۲۷
۲۵	۲۷/۵	۵۰	۲۵	۲۵	۲۵	۲۷/۵
۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰	۲۰۰
۵۷۷	۵۷۷	۵۷۷	۵۷۷	۵۷۷	۵۷۷	۵۷۷
۵۱۵	۵۱۵	۵۱۵	۵۱۵	۵۱۵	۵۱۵	۵۱۵
.	.	.	۲۵	۴۲/۵	۵۰	۲۵
.	.	.	.	.	.	.

۳-۲. آزمایش‌های انجام‌شده

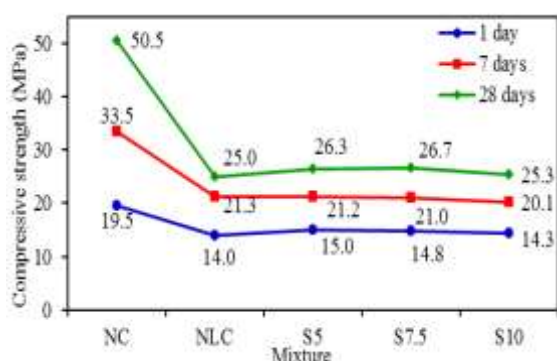
۱-۳-۲. مقاومت فشاری

پس از ساخت و عمل‌آوری نمونه‌ها برای محاسبه مقاومت فشاری در سنین مختلف ۱، ۷ و ۲۸ روزه، نمونه‌های فشاری با ابعاد $150 \times 150 \times 150$ میلی‌متر بر اساس استاندارد ASTM C 109 توسط دستگاه مقاومت فشاری ۲۰ تنی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. برای هر طرح اختلاط جهت بارگذاری نمونه‌ها در جهت ریختن مواد درون قالب است.

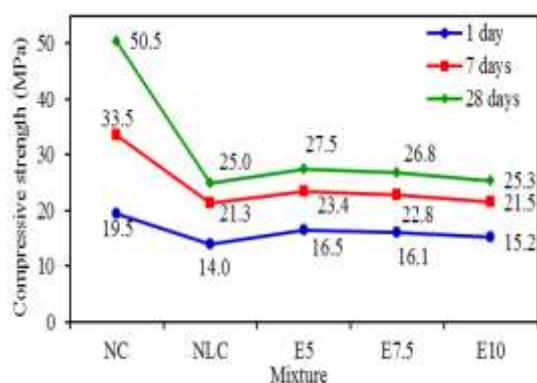
۳. نتایج و بحث

۳-۱. مقاومت فشاری

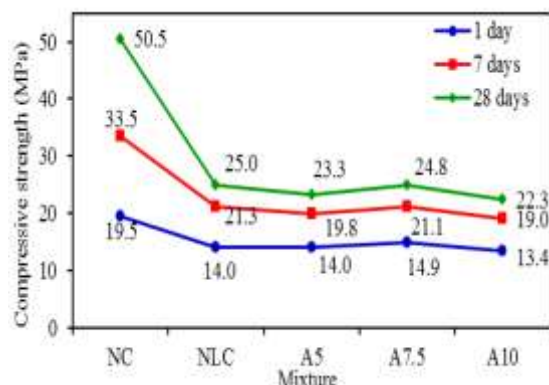
مقاومت فشاری که برابر ۳۷/۵ مگاپاسکال می باشد ثبت شده است که در حدود ۵۰ درصد افزایش مقاومت فشاری را به همراه داشته است. البته این نکته لازم به ذکر است که در سنین ۱ و ۷ روزه این ترکیب مقاومت فشاری کمتری نسبت به سایر ترکیبات نشان داده است که البته اختلاف آن ناچیز می باشد که می تواند به دلیل عمل آوری متفاوت مواد پلیمری و مواد پوزولانی باشد.



شکل (۳). مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با استایرن بوتادین رابر و عمل آوری مرطوب.



شکل (۴). مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با اتیلن وینیل استات و عمل آوری مرطوب.

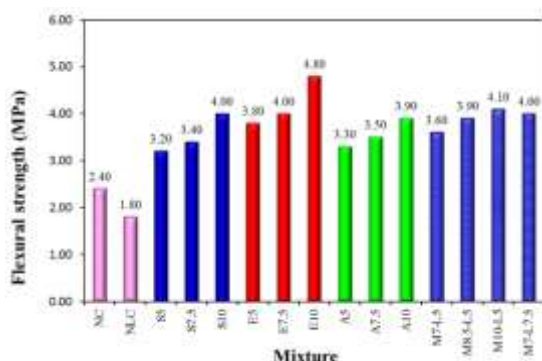


شکل (۵). مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با اکریلیک لاتکس و عمل آوری مرطوب.

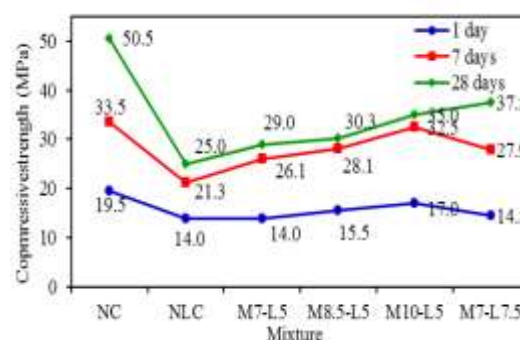
شکل های (۳-۶) مقاومت فشاری نمونه های عمل آوری شده اتاق رطوبت با دمای ۲۵ و رطوبت ۶۰ درصد در سنین ۱، ۷ و ۲۸ روزه را نشان می دهند. همان طور که به صورت کلی مشخص است بتن های سبک ساخته شده با سنگ دانه های لیکا و مواد پلیمری مقاومت فشاری کمتری نسبت به بتن عادی دارند. طبق استاندارد ملی بتن و استاندارد انجمن بتن آمریکا بتن های سبک سازه ای باید در سن ۲۸ روزه حداقل مقاومت فشاری بیشتر از ۱۸ مگاپاسکال رو تحمل کنند. با توجه به نتایج به دست آمده تقریباً تمامی طرح های حاوی مواد پلیمری و سنگ دانه های سبک این الزام آیین نامه را برآورده می کنند. به عنوان مثال شکل (۱۰) مقاومت فشاری نمونه های ساخته شده با استایرن بوتادین رابر را نشان می دهد. مقاومت ۲۸ روزه بتن معمولی ۵۰ مگاپاسکال و بتن سبک بدون مواد پلیمری ۲۵ مگاپاسکال شده است. بهترین مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه با افزودن ۷/۵ درصد وزن سیمان استایرن بوتادین رابر ۲۶/۷ مگاپاسکال ثبت شده است که با توجه به سبک بودن این بتن مقاومت فشاری قابل قبولی است.

همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود بهترین مقاومت فشاری بتن سبک حاوی مواد پلیمری عمل آوری شده در اتاق رطوبت با افزودن ۵ درصد اتیلن وینیل استات می باشد که برابر با ۲۷/۵ مگاپاسکال است که نسبت به نمونه سبک فاقد پلیمر ۱۰ درصد افزایش مقاومت فشاری داشته است. از طرفی با توجه به داده های شکل (۴) استفاده از اکریلیک لاتکس در بتن سبک باعث کاهش خیلی کمی در مقاومت فشاری شده است. هرچند این کاهش مقاومت در کمترین حالت برابر با ۲۵/۳ مگاپاسکال است که باز هم الزامات بتن سبک سازه ای رو رعایت می کند.

با توجه به ماهیت مواد پلیمری و تأثیر کمی که در مقاومت فشاری دارند اگر این مواد با مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس مخلوط شوند می توانند باعث بهبود خیلی بهتر مقاومت فشاری شوند. با توجه به اینکه اتیلن وینیل استات بهترین نتایج را نسبت به دو ماده پلیمری داده است در این پژوهش این ماده پلیمری را با درصدهای مختلف میکروسیلیس ترکیب کرده و نتایج در شکل ۶ نشان داده شده است. همان طور که مشخص است مقاومت فشاری با افزودن میکروسیلیس به بتن حاوی ۵ درصد لاتکس افزایش چشمگیری داشته است. به این ترتیب که مقاومت فشاری با افزودن ۷، ۸.۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس از ۲۵ مگاپاسکال به ترتیب به ۲۹، ۳۰/۳ و ۳۵ مگاپاسکال رسیده است. از طرفی با ترکیب ۷/۵ درصد لاتکس و ۷ درصد میکروسیلیس بهترین



شکل (۷). مقاومت خمشی نمونه‌های ساخته شده با اتیلن وینیل استات و میکروسیلیس.



شکل (۶). مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده با ترکیب میکروسیلیس و لاتکس و عمل‌آوری مرطوب.

۳-۲. مقاومت خمشی

مقاومت خمشی بعد از مقاومت فشاری یکی از مهم‌ترین خصوصیات سازه‌های بتنی است. این خصوصیت به‌ویژه در سازه‌هایی مانند سقف‌ها و تیرها بسیار مهم می‌باشد. نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۸ روزه با استفاده از تیرهای خمشی در شکل (۷) مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از مواد پلیمری (لاتکس) در طرح اختلاط بتن باعث بهبود چشمگیری در مقاومت خمشی می‌شود. نمونه بتن عادی و بتن سبک فاقد مواد افزودنی به ترتیب مقاومت خمشی معادل ۲/۴ و ۱/۸ مگاپاسکال را نشان داده‌اند. درحالی‌که استفاده از لاتکس باعث بهبود حداقل ۳۰ درصد نسبت به بتن عادی و ۷۰ درصد نسبت به بتن سبک شده است. همان‌طور که استفاده از اتیلن وینیل استات در مقاومت فشاری بهترین نتیجه حاصل شد در مقاومت خمشی نیز استفاده از این افزودنی بیشترین تأثیر را بر مقاومت خمشی داشته است به‌طوری‌که استفاده از ۵، ۷/۵ و ۱۰ درصد به ترتیب مقاومت خمشی ۳/۸، ۴ و ۴/۸ را حاصل کرده است که با توجه به سبک بودن بتن و وزن مخصوص حدود ۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب این مقاومت‌ها عالی و مناسب برای سازه‌های پیش‌ساخته است.

نتایج شکل (۷) نشان می‌دهد که استفاده از ترکیبی از میکروسیلیس و لاتکس باعث بهبود مقاومت خمشی شده است اما نسبت به نمونه‌های حاوی فقط لاتکس مقداری مقاومت خمشی کاهش یافته که دلیل این امر وجود میکروسیلیس باعث بهبود واکنش هیدراتاسیون سیمان می‌شود که نتیجه آن را در مقاومت خمشی مشاهده کردیم اما حضور میکروسیلیس در کنار لاتکس باعث عدم واکنش کامل لاتکس و فرآیند گیرش آن است که مقداری تأثیر منفی در مقاومت خمشی داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر سه لاتکس پلیمری مختلف شامل استایرن بوتادین رابر، اتیلن وینیل استات و اکریلیک لاتکس بر خواص مکانیکی بتن سبک سازه موردبررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش به‌صورت زیر خلاصه می‌شود:

- استفاده از لاتکس‌های پلیمری باعث بهبود چشمگیری در مقاومت فشاری و خمشی بتن سبک سازه‌ای شد.
- در بین سه لاتکس استفاده شده، اتیلن وینیل استات بیش‌ترین تأثیر مثبت در بهبود مقاومت فشاری و خمشی داشته به‌صورتی که با جایگزین کردن ۵ درصد از این لاتکس به ترتیب باعث افزایش ۵۶ و ۱۱۱ درصدی در مقاومت فشاری و خمشی شده است.
- افزودن میکروسیلیس به بتن اصلاح شده با لاتکس باعث بهبود بیشتر مقاومت فشاری و خمشی شده است تا جایی که به ترتیب باعث افزایش ۷۱ و ۱۲۷ درصدی شده است.
- نکته اصلی که در استفاده از لاتکس‌های پلیمری باید توجه شود افزایش قیمت تمام شده آن‌ها در بتن می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این پژوهش نشان می‌دهد باوجود افزایش دو برابری برای تولید بتن سبک اصلاح شده با پلیمر این افزایش باعث کاهش هزینه‌هایی مانند حمل‌ونقل، هزینه تعمیر و نگهداری و همچنین ساخت مجدد سازه شود که در بلندمدت چرخه عمر سازه ارزش افزوده قابل توجهی به همراه دارد.

latex to improve the properties of polymer modified concrete." Construction and Building Materials. 205: p. 175-185, 2019.

[16] P.Chindasiriphan, , H. Yokota, and P. Pimpakan, "Effect of fly ash and superabsorbent polymer on concrete self-healing ability." Construction and Building Materials. 233: p. 116975, 2020.

[17] L.Sui, , M. Luo, K. Yu, F. Xing, P. Li, Y. Zhou, and C. Chen, "Effect of engineered cementitious composite on the bond behavior between fiber-reinforced polymer and concrete." Composite Structures. 184: p. 775-788, 2018.

[18] F.Moodi, , A. Kashi, A.A. Ramezani pour, and M. Pourebrahimi, "Investigation on mechanical and durability properties of polymer and latex-modified concretes." Construction and Building Materials. 191: p. 145-154, 2018.

[19] H.Tanyildizi, , "Long-term microstructure and mechanical properties of polymer-phosphazene concrete exposed to freeze-thaw." Construction and Building Materials. 187: p. 1121-1129, 2018.

[20] J.A Rossignolo. and M.V. Agnesini, "Durability of polymer-modified lightweight aggregate concrete." Cement and Concrete Composites. 26(4): p. 375-380, 2004.

[21] Y.Ohama, , "Principle of latex modification and some typical properties of latex-modified mortars and concretes adhesion; binders (materials); bond (paste to aggregate); carbonation; chlorides; curing; diffusion." Materials Journal. 84(6): p. 511-518, 1987.

[22] J.Alduaij, , K. Alshaleh, M.N. Haque, and K. Ellaithy, "Lightweight concrete in hot coastal areas." Cement and Concrete Composites. 21(5-6): p. 453-458, 1999.

[23] N, Haque., and H. Al-Khaiat, "Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions." Materials and Structures. 32(7): p. 533-538, 1999.

[24] M.H. Zhang, and O.E. Gjvovr, "Mechanical properties of high-strength lightweight concrete." Materials Journal. 88(3): p. 240-247, 1991.

[25] S.Ahn, , S. Kwon, Y.-T. Hwang, H.-I. Koh, H.-S. Kim, and J. Park, "Complex structured polymer concrete sleeper for rolling noise reduction of high-speed train system." Composite Structures. 223: p. 110944, 2019.

[26] M.Bignozzi, , A. Sacconi, and F. Sandrolini, "New polymer mortars containing polymeric wastes. Part 2. Dynamic mechanical and dielectric behaviour." Composites Part A: applied science and manufacturing. 33(2): p. 205-211, 2002.

[27] J, Assaad., and Y. Daou, "Behavior of structural polymer-modified concrete containing recycled aggregates." Journal of adhesion science and Technology. 31(8): p. 874-896, 2017.

[28] Y. Tian, , X. Yan, T. Yang, J. Zhang, and Z. Wang, "Effect of the characteristics of lightweight aggregates presaturated polymer emulsion on the mechanical and damping properties of concrete." Construction and Building Materials. 253: p. 119154, 2020.

[29] H.M, Thiyab.,, "Mechanical Properties of Light Weight Polymer Modified Concrete Made with Chopped Rubber Tires." Journal of University of Babylon. 25(4), 2017.

[30] C, Shi.,, X. Zou, L. Yang, P. Wang, and M. Niu, "Influence of humidity on the mechanical properties of polymer-modified cement-based repair materials." Construction and Building Materials. 261: p. 119928, 2020.

۵. مراجع

[1] T.M Pham.,, M. Elchalakani, H. Hao, J. Lai, S. Ameduri, and T.M. Tran, "Durability characteristics of lightweight rubberized concrete." Construction and Building Materials. 224: p. 584-599, 2019.

[2] , F.K Alqahtani., G. Ghataora, M.I. Khan, and S. Dirar, "Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate." Construction and Building Materials. 148: p. 386-397, 2017.

[3] R Madandoust.,, M. Kazemi, P.K. Talebi, and J. de Brito, "Effect of the curing type on the mechanical properties of lightweight concrete with polypropylene and steel fibres." Construction and Building Materials. 223: p. 1038-1052, 2019.

[4] N, Atmaca.,, M.L. Abbas, and A. Atmaca, "Effects of nano-silica on the gas permeability, durability and mechanical properties of high-strength lightweight concrete." Construction and Building Materials. 147: p. 17-26, 2017.

[5] S, Patel.,, R. Majhi, H. Satpathy, and A. Nayak, "Durability and mic rostructural properties of lightweight concrete manufactured with fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate." Construction and Building Materials. 226: p. 579-590, 2019.

[6] P, Lau.,, D. Teo, and M. Mannan, "Mechanical, durability and microstructure properties of lightweight concrete using aggregate made from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash." Construction and Building Materials. 176: p. 24-34, 2018.

[7] M, Kadela.,, A. Kukielka, and M. Małek, "Characteristics of lightweight concrete based on a synthetic polymer foaming agent." Materials. 13(21): p. 4979, 2020.

[8] F, Heidamezhad.,, K. Jafari, and T. Ozbakkaloglu, "Effect of polymer content and temperature on mechanical properties of lightweight polymer concrete." Construction and Building Materials. 260: p. 119853, 2020.

[9] J.P, Gominski.,, D.C. Dal Molin, and C.S. Kazmierczak, "Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete." Cement and concrete research. 34(11): p. 2091-2095, 2004.

[10] M.,Ribeiro, , C. Tavares, and A. Ferreira, "Chemical resistance of epoxy and polyester polymer concrete to acids and salts." Journal of polymer engineering. 22(1): p. 27-44, 2002.

[11] A.C, Bhogayata., and N.K. Arora, "Workability, strength, and durability of concrete containing recycled plastic fibers and styrene-butadiene rubber latex." Construction and Building Materials. 180: p. 382-395, 2018.

[12] V.Gregorova, , M. Ledererova, and Z. Stefunkova, "Investigation of influence of recycled plastics from cable, ethylene vinyl acetate and polystyrene waste on lightweight concrete properties." Procedia engineering. 195: p. 127-133, 2017.

[13] B.Liu, , J. Shi, M. Sun, Z. He, H. Xu, and J. Tan, "Mechanical and permeability properties of polymer-modified concrete using hydrophobic agent." Journal of Building Engineering. 31: p. 101337, 2020.

[14] Y.Ohama, , Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology. Series "Handbook of polymer-modified concrete and mortars: properties and process technology": William Andrew. 1995.

[15] B Z.ahranifard, , F.F. Tabrizi, and A.R. Vosoughi, "An investigation on the effect of styrene-butyl acrylate copolymer

- [31] S.Hong, , "Influence of curing conditions on the strength properties of polysulfide polymer concrete." *Applied Sciences*. 7(8): p. 833, 2017.
- [32] S.-H, Hyun., and J.H. Yeon, "Strength development characteristics of UP-MMA based polymer concrete with different curing temperature." *Construction and Building Materials*. 37: p. 387-397, 2012.
- [33] V. Rybalko, , A. Nikityuk, E. Pisarenko, P. D'yachenko, A. Korchmarek, and V. Kireev, "High-strength fast-curing polymeric composite material." *Russian Journal of Applied Chemistry*. 87(9): p. 1350-1354, 2014.
- [34] ASTM, ASTM C150-07: Standard Specification for Portland Cement, ASTM International West Conshohocken, PA, USA. 2007.
- [35] L.Zapata, , G. Portela, O. Suárez, and O. Carrasquillo, "Rheological performance and compressive strength of superplasticized cementitious mixtures with micro/nano-SiO₂ additions." *Construction and Building Materials*. 41: p. 708-716, 2013.
- [36] T.Matusinović, , J. Šipušić, and N. Vrbos, "Porosity–strength relation in calcium aluminate cement pastes." *Cement and concrete research*. 33(11): p. 1801-1806, 2003.