

مقایسه مشخصات مکانیکی ملات ترمیمی حاوی استایرن بوتادین رابر با ملات ترمیمی حاوی پلی‌وینیل استات و بررسی شرایط عمل‌آوری روی آنها

مجید نعمتی چاری^۱، مهدی نعمتی چاری^۲، محمد شکرچی زاده^۳، محمدرضا رئیس محمدیان^۴

۱. کارشناس ارشد انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

۲. عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات راه و مسکن و شهرسازی*

۳. استاد دانشکده مهندسی عمران دانشگاه تهران

۴. مدیرعامل شرکت آرینا پلیمر

* m.nemati@bhrc.ac.ir

چکیده

مصرف ملات ترمیمی پایه سیمانی در کشور با توجه به شرایط ساخت و نگهداری سازه‌های بتنی در حال افزایش است. معمولاً مشخصات این ملات‌ها با لاتکس‌های مختلف از جمله استایرن بوتادین رابر (SBR) و پلی‌وینیل استات (PVA) اصلاح می‌شوند. این لاتکس‌ها ممکن است مشخصات ملات تازه و سخت‌شده را در درصد‌های مصرف مختلف و شرایط عمل‌آوری مختلف به گونه‌ای متفاوت تغییر دهند. از اینرو در این مقاله سعی شده است تا ملات ترمیمی با درصد‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن مواد سیمانی ساخته شود و مشخصات ملات تازه مانند روانی و چگالی و مشخصات ملات سخت‌شده مانند مقاومت فشاری، خمشی و کششی در شرایط عمل‌آوری متفاوت اندازه‌گیری شود. نتایج نشان از حباب‌زایی در هر دو ملات ترمیمی اصلاح‌شده داشته است لکن استفاده از لاتکس SBR باعث افزایش کارایی و لاتکس PVA، باعث کاهش کارایی ملات شده است. از طرفی استفاده از هر دو لاتکس باعث کاهش مقاومت فشاری و افزایش مقاومت‌های خمشی و کششی شده است. البته مشخصات مکانیکی ملات اصلاح‌شده در شرایط عمل‌آوری ترکیبی به دلیل هیدراته‌شدن سیمان در سنین اولیه و سپس تشکیل فیلم پلیمری، نسبت به شرایط عمل‌آوری در آب، نتایج بهتری را در همه سنین، به دست داده است. ضمناً افزایش مقاومت خمشی برای ملات حاوی SBR، بیشتر و افزایش مقاومت کششی برای ملات حاوی PVA بیشتر اندازه‌گیری شده است.

کلمات کلیدی: ملات ترمیمی، لاتکس، استایرن بوتادین رابر، پلی‌وینیل استات، عمل‌آوری

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با توجه به خرابی سازه‌های بتنی، عملیات ترمیم بیش از گذشته مورد توجه قرار گرفته است؛ که در اکثر سازه‌های ترمیم‌شده، عملیات ترمیم رضایت‌بخش نبوده است. لذا برای ترمیم کارا و موثر نیازمند شناخت بهتر و بیشتر با مصالح ترمیمی هستیم. از میان مصالح ترمیمی، ملات‌های ترمیمی حاوی لاتکس، سازگاری مناسبی با بتن اصلی سازه دارند به عبارتی ضریب انبساط حرارتی آنها به بتن نزدیک است. با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه، لاتکس‌ها تاثیر مثبتی در مقاومت فشاری ملات‌های ترمیمی ندارند. در حالی که مقاومت خمشی و کششی را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند. چسبندگی و پیوستگی ملات‌های حاوی لاتکس نسبت به ملات معمولی نیز بالاتر است. همچنین لاتکس‌ها می‌توانند دوام ملات‌های ترمیمی نیز افزایش دهند [۱]. کارپذیری اکثر ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس نسبت به ملات معمولی بیشتر است. از جمله دلایل افزایش روانی را می‌توان به عملکرد ذرات پلیمری و حباب هوای ایجاد شده و همچنین اثر پراکندگی مواد فعال در سطح در لاتکس‌ها نسبت داد. در اکثر ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس در مقایسه با ملات معمولی، مقدار زیادی از حباب هوا به دلیل دارا بودن حرکت مواد فعال در سطح به وجود می‌آیند؛ که همین امر سبب کاهش چگالی ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس می‌گردد [۲]. به طور معمول مقدار حباب هوا در ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس، در محدوده ۵ تا

۲۰ درصد می‌باشد [۳]. از دیگر دلایل وجود حباب هوا در ملات اصلاح شده با لاتکس که می‌تواند چگالی آن را کاهش دهد افزایش زمان اختلاط، می‌باشد [۴]. یانگ جی^۱ و شوئی یائو^۲ [۵]، با افزودن لاتکس SBR به میزان ۱۵ درصد وزن سیمان، مشاهده کردند که مقاومت فشاری ملات اصلاح شده در مقایسه با ملات سیمانی معمولی در حدود ۵۲/۷ درصد کاهش یافت در حالی که مقاومت خمشی را به میزان ۶۶ درصد افزایش داده است. مهدی^۳ و نادا^۴ [۶]، با انجام آزمایش روی ملات اصلاح شده با لاتکس SBR در نسبت‌های ۰، ۱۰، ۲۵ و ۳۵ درصد وزن سیمان در سنین ۷، ۲۸ و ۶۰ روز، تأثیر منفی روی مقاومت فشاری مشاهده کردند؛ یعنی با افزایش نسبت پلیمر به سیمان، مقاومت فشاری کاهش یافته است. البته این امر می‌تواند ناشی از افزایش جزئی نسبت آب کل به سیمان باشد. رادهاکریشنن^۵ و همکارانش [۷]، با انجام آزمایش‌هایی به منظور بررسی تأثیر لاتکس SBR (با مصرف به میزان ۲۰ درصد وزن سیمان) به عنوان مواد تعمیراتی بتن در وضعیت آب و هوای گرم، به این نتیجه دست یافتند که مقاومت فشاری ملات اصلاح شده با لاتکس SBR کمتر از ملات سیمانی معمولی است. طبق تحقیقات وانگ^۶ و همکارانش [۸]، نیز مقاومت خمشی ملات اصلاح شده ۷ و ۲۸ روزه با افزایش نسبت پلیمر به سیمان تا ۱۰ درصد کاهش و از ۱۰ تا ۲۰ درصد با افزایش جزئی مواجه شدند. مقاومت کششی نیز همانند مقاومت خمشی ملات‌های اصلاح شده با لاتکس دارای افزایش قابل ملاحظه‌ای نسبت به ملات‌های معمولی است. افزایش مقاومت کششی ملات اصلاح شده را به بهبود لایه مرزی بین سیمان و سنگدانه نسبت داده‌اند. جیست^۷ و همکارانش [۹] و براکارد^۸ [۱۰]، توسعه حداکثر مقاومت را در اندازه ذرات لاتکس بین ۱ تا ۵ میکرون یا ۲ تا ۵ میکرون یافتند. همچنین واگنر^۹ و گرنلی^{۱۰} [۱۱]، در تحقیقاتشان پی بردند که مقاومت کششی ملات‌های اصلاح شده با لاتکس با کاهش اندازه ذرات لاتکس افزایش می‌یابد. ریبریو^{۱۱} و همکارانش [۴]، با انجام آزمایش تعیین مقاومت کششی روی نمونه‌های ملات اصلاح شده با لاتکس به این نتیجه رسیدند که مقاومت کششی به صورت خطی با افزایش نسبت پلیمر به سیمان با افزایش رو به رو شده است. در این پژوهش سعی گردید تا با توجه به عملکرد لاتکس SBR و PVA در ملات‌های پایه سیمانی، اثر لاتکس با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰، روی ملات ترمیمی در دو شرایط عمل‌آوری (عمل‌آوری ترکیبی و عمل‌آوری در آب) بررسی و با ملات شاهد مقایسه گردد.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان: سیمان مصرفی از نوع ۲ کارخانه سیمان آبیگ بوده که با استاندارد [۱۲] ASTM C150 تطابق داشته است. وزن مخصوص سیمان برابر با ۳/۱۱ بدست آمد و همچنین مشخصات شیمیایی آن در جدول شماره ۱، ارائه شده است.

¹Yong Ge

²Shuyi Yao

³ Mahdi

⁴ Nada

⁵ R.Radhakrishnan

⁶ Wang

⁷ Geist

⁸ Brocard

⁹ Wagner

¹⁰ Grenley

¹¹ Ribeiro

جدول ۱- آنالیز شیمیایی سیمان (درصد وزنی)

ترکیبات	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	LOI
سیمان نوع ۲ آبیک	۶۲/۱	۲۰/۸	۴/۷	۳/۸	۲/۴	۱/۹	۰/۰۸	۰/۰۳	۵۰	۲۳	۶	۱۲	۱/۲۰

۲-۱-۲- دوده سیلیس: دوده سیلیس مصرفی با الزامات استاندارد [۱۳] ASTM C1240 تطابق داشته است. وزن مخصوص دوده سیلیس برابر با ۲/۱۸ بدست آمد و همچنین مشخصات شیمیایی آن در جدول شماره ۲، ارائه شده است.

جدول ۲- آنالیز شیمیایی دوده سیلیس (درصد وزنی)

ترکیبات	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	LOI
دوده سیلیس	۳/۳	۸۸/۱	۱/۵	۰/۲	۰/۳	۰/۶	-	-	۱/۷۳

۳-۱-۲- سنگدانه‌های مصرفی

الف- ماسه: ماسه مصرفی از نوع سیلیسی بوده که دارای ۵/۲ درصد در محدوده ۰ تا ۱۲۰ میکرون و ۵۲/۱ درصد در محدوده ۱۲۰ تا ۵۰۰ میکرون و ۴۲/۷ درصد در محدوده ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ میکرون می‌باشد. ضمناً درصد ذرات رد شده از الک ۲۰۰، وزن مخصوص و جذب آب مصالح سنگی مورد استفاده در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- وزن مخصوص، جذب آب و درصد ذرات ریزتر از الک شماره ۲۰۰ در مصالح سنگی

مصالح	وزن مخصوص در حالت SSD	جذب آب (درصد)	درصد ذرات زیر الک شماره ۲۰۰
ماسه (۰ تا ۱۲۰ میکرون)	۲/۶۲	۲/۵	۴۵
ماسه (۱۲۰ تا ۵۰۰ میکرون)	۲/۶۱	۱/۴	۰
ماسه (۵۰۰ تا ۲۵۰۰ میکرون)	۲/۶۱	۱/۴	۰

۴-۱-۲- آب: آب مصرفی مطابق با الزامات استاندارد [۱۴] ASTM C1602 بوده است.

۵-۱-۲- ماده افزودنی: ماده افزودنی از ترکیب پودرهای آلومینیوم، جهت ایجاد انبساط اولیه، آهک هیدراته، جهت انبساط ثانویه، هیپو سولفیت سدیم، جهت تثبیت انبساط ایجاد شده و جلوگیری از جمع شدگی، ضد کف پودری، جهت خارج کردن حباب‌های درشت ناشی از اختلاط و نفتالین سولفونات جهت کاهش آب اختلاط، جهت ساخت ملات‌های ترمیمی استفاده شده است. وزن مخصوص پودر برابر با ۱/۱ می‌باشد.

۶-۱-۲- ماده پلیمری: مواد پلیمری مورد استفاده در این پژوهش، لاتکس با پایه شیمیایی استایرن بوتادین رابر (SBR) و لاتکس با پایه شیمیایی پلی وینیل استات (PVA) بوده است.

۲-۲- طرح مخلوط ملات

۲-۲-۱- ملات: در این پژوهش ۵ طرح مخلوط در نظر گرفته شده است؛ که چهار طرح مخلوط مربوط به لاتکس با درصدهای ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزنی سیمان می‌باشد و نتایج آن با ملات شاهد مورد مقایسه قرار گرفته شده است. نسبت آب به مواد سیمانی، برابر با ۰/۳۵ انتخاب شد. جزئیات

طرح‌های مخلوط ملات در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است در تمامی طرح‌ها مقدار مواد سیمانی، ماسه و افزودنی پودری، ثابت در نظر گرفته شد. در حالی که مقدار آب کل، ثابت است. برای ثابت نگه داشتن مقدار نسبت آب به سیمان و تنظیم آب، مقدار آب موجود در لاتکس محاسبه و مقدار آب اولیه، اصلاح شد تا مقدار آب کل ثابت بماند. در جدول شماره ۵، اجزای تشکیل دهنده مصالح خشک برای ۱۰۰ کیلوگرم ارائه شده است.

جدول ۴- وزن اجزا در طرح مخلوط ملات ترمیمی به ازای ۱۱۵/۶ کیلوگرم (kg)

نسبت آب به سیمان ^(۱)	وزن آب موجود در لاتکس	مقدار لاتکس	درصد لاتکس	وزن آب	مصالح خشک	کد طرح مخلوط
۰/۳۵	۱۵/۶	۰	۰	۱۵/۶	۱۰۰	SA0
۰/۳۵	۱۵/۶	۲/۱	۵	۱۴/۶	۱۰۰	SBR5
۰/۳۵	۱۵/۶	۴/۲	۱۰	۱۳/۵	۱۰۰	SBR10
۰/۳۵	۱۵/۶	۶/۳	۱۵	۱۲/۵	۱۰۰	SBR15
۰/۳۵	۱۵/۶	۸/۴	۲۰	۱۱/۴	۱۰۰	SBR20
۰/۳۵	۱۵/۶	۲/۱	۵	۱۴/۶	۱۰۰	PVA5
۰/۳۵	۱۵/۶	۴/۲	۱۰	۱۳/۵	۱۰۰	PVA10
۰/۳۵	۱۵/۶	۶/۳	۱۵	۱۲/۵	۱۰۰	PVA15
۰/۳۵	۱۵/۶	۸/۴	۲۰	۱۱/۴	۱۰۰	PVA20

^(۱) برای محاسبه نسبت آب به سیمان، مقدار آب لازم برای اشباع سنگدانه‌های خشک، از آب کل کم شده است.

جدول ۵- اجزاء تشکیل دهنده برای ۱۰۰ کیلوگرم مصالح خشک (kg)

افزودنی پودری	دوده سیلیس	ماسه II	سیمان
۰/۳۵۰	۳	۵۷/۵۵	۳۹/۲

۳-۲- شرایط عمل آوری نمونه‌ها

از آنجاییکه عمل آوری ملات‌های پایه سیمانی اصلاح شده با لاتکس در مقایسه با ملات‌های معمولی به دلیل تشکیل فیلم پلیمری نازک در ملات‌های حاوی لاتکس متفاوت می‌باشد، دو نوع شرایط عمل آوری در نظر گرفته شده است:

ب- عمل آوری در آب: به مدت ۲۴ ساعت در قالب، سپس تا زمان آزمایش در آب با دمای $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

الف- عمل آوری ترکیبی: به مدت ۲۴ ساعت در قالب، ۲۴ ساعت در آب با دمای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ و سپس تا سن آزمایش در محیط مشخص، با دمای $23 \pm 2^\circ\text{C}$ و رطوبت نسبی $10 \pm 5\%$ درصد.

۳- برنامه آزمایش‌ها

۱-۳- آزمایش‌های مشخصات لاتکس

۱-۱-۳- تعیین درصد ماده جامد

این روش آزمون مطابق با استاندارد [۱۵] ISO124 انجام شده است.

۲-۱-۳- وزن مخصوص

این روش آزمون، مطابق با استاندارد [۱۶] ASTM D1217 انجام شده است.

۳-۲- آزمایش‌های ملات تازه

۳-۲-۱- چگالی ملات

این روش آزمون مطابق با استاندارد [۱۷] ASTM C138 انجام شده است.

۳-۲-۲- تعیین روانی ملات سیمانی

این روش آزمون مطابق با استاندارد [۱۸] ASTM C230 انجام شده است.

۳-۳- آزمایش‌های ملات سخت شده

۳-۳-۱- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری روی ۱۸ آزمون مکعبی با ابعاد ۵۰ میلی‌متر، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت شرایط دو نوع عمل‌آوری، مطابق با روش استاندارد [۱۹] ASTM C109 انجام شد. برای انجام آزمایش هر طرح، در همه سنین از سه آزمون استفاده شده است. نتایج مقاومت فشاری بر اساس متوسط نتایج سه آزمون تعیین شد.

۳-۳-۲- مقاومت خمشی

آزمایش مقاومت خمشی روی ۱۸ آزمون منشوری با ابعاد ۴۰ × ۴۰ × ۱۶۰ میلی‌متر، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت شرایط دو نوع عمل‌آوری، مطابق با استاندارد [۲۰] ASTM C348 انجام گرفت. برای انجام آزمایش هر طرح، در همه سنین از سه آزمون استفاده شده است. نتایج مقاومت خمشی بر اساس متوسط نتایج سه آزمون مشخص گردید.

۳-۳-۳- مقاومت کششی

این آزمایش روی ۱۸ آزمون بریکت، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه تحت شرایط دو نوع عمل‌آوری، مطابق با استاندارد [۲۱] ASTM C307 انجام گرفته است. برای انجام آزمایش هر طرح، در همه سنین از سه آزمون استفاده شد. در نهایت نتایج مقاومت کششی بر اساس متوسط نتایج سه آزمون تعیین گردید.

۴- نتایج و بحث

۴-۱- تعیین درصد جامد ماده پلیمری

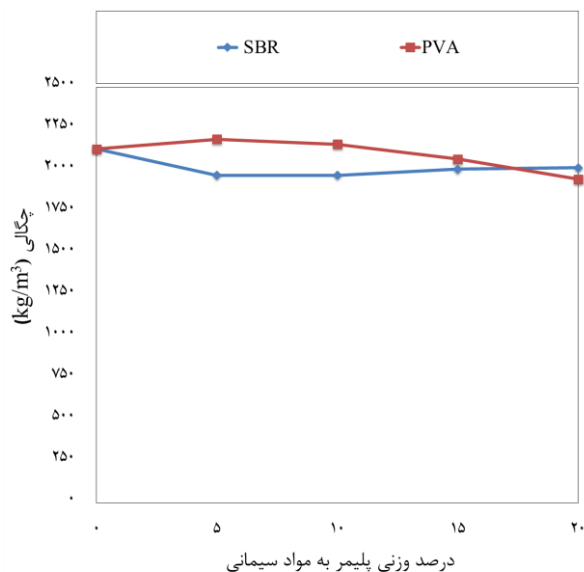
بر اساس آزمایش انجام شده، درصد جامد لاتکس SBR و PAV به ترتیب برابر با ۵۰/۴۴ و ۵۲/۱۷ بدست آمد.

۴-۲- چگالی ماده پلیمری

بر اساس آزمایش انجام شده، چگالی لاتکس SBR و PAV به ترتیب برابر با $1/014 \text{ g/cm}^3$ و $1/049 \text{ g/cm}^3$ بدست آمد.

۴-۳- چگالی ملات

همانطور که در شکل شماره ۱ مشاهده می‌گردد با افزایش درصد لاتکس PVA، چگالی ملات تازه کاهش می‌یابد که علت اصلی آن حباب‌زایی این لاتکس می‌باشد. در حالی که با افزایش نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۲۰ درصد، (لاتکس SBR) وزن مخصوص ملات بصورت جزئی افزایش می‌یابد. بالا بودن چگالی ملات اصلاح شده با لاتکس PVA، تا نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۱۵ درصد، می‌تواند نشان‌دهنده تراکم‌پذیری بهتر این نوع ملات باشد که باعث می‌شود تا مصالح را در کنار هم قرار دهد و مصالح سنگی بیشتری در ظرف قالب جایگزین آب شود؛ این در حالی است که در نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۱۵ و ۲۰ درصد، تولید حباب هوا توسط لاتکس PVA، به اندازه‌ای است که توانسته چگالی ملات ساخته شده توسط این لاتکس را نسبت به ملات معمولی، کاهش دهد.



شکل ۱- چگالی ملات اصلاح شده با لاتکس با نسبت های مختلف پلیمر به مواد سیمانی

۴-۴- تعیین روانی ملات سیمانی

با توجه به نتایج بدست آمده از جدول شماره ۶، با افزایش درصد لاتکس PVA، میزان روانی کاهش می یابد؛ این نتیجه مشابه با نتایج بدست آمده از تحقیقات انجام شده توسط مت خیر سالین^{۱۲} [۲۲] می باشد که ممکن است کارایی ملات ترمیمی اصلاح شده با لاتکس، در نسبت آب به سیمان ثابت، کاهش پیدا کند. این در حالی است که لاتکس SBR، به دلیل افزایش قابل توجهی که در روانی به ملات ترمیمی پایه سیمانی می دهد، از نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۱۰ درصد به بالا، میزان روانی قابل اندازه گیری نمی باشد؛ زیرا حداکثر قطر میز روانی برابر با ۲۵ سانتی متر است. از جمله دلایل افزایش روانی را می توان به کروی بودن مولکول های لاتکس نسبت داد [۲۲]. افزایش روانی با استفاده از لاتکس SBR، نیز توسط محققان به ثبت رسیده است [۲۳ و ۲۴].

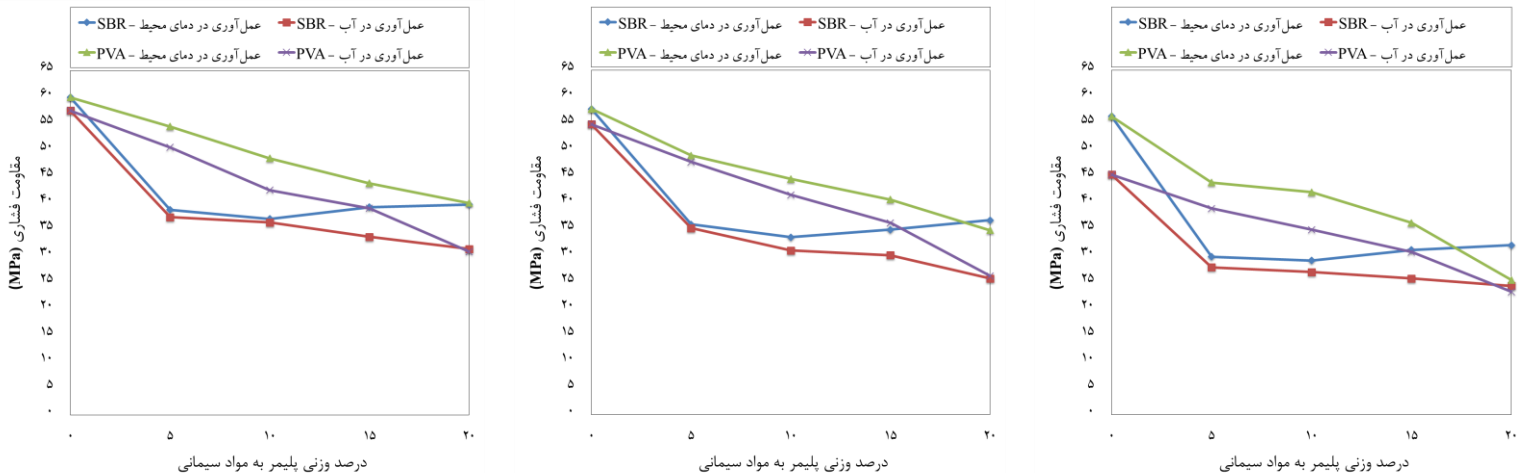
جدول ۶- تعیین روانی ملات معمولی و ملات اصلاح شده با لاتکس

نوع ملات	درصد لاتکس	قطر پخش شدگی (cm)
ملات معمولی	۰	۱۹/۰ × ۱۹/۰
ملات اصلاح شده با SBR	۵	۲۰/۵ × ۲۱/۰
	۱۰	بیشتر از ۲۵
	۱۵	بیشتر از ۲۵
	۲۰	بیشتر از ۲۵
ملات اصلاح شده با PVA	۵	۱۶/۰ × ۱۶/۵
	۱۰	۱۵/۸ × ۱۶/۰
	۱۵	۱۵/۳ × ۱۵/۵
	۲۰	۱۵/۰ × ۱۵/۲

¹² Mat KhairSalbin

۴-۵- مقاومت فشاری

نتایج مربوط به مقاومت فشاری ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس با نسبت‌های مختلف پلیمر به مواد سیمانی، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در دو شرایط عمل‌آوری (عمل‌آوری ترکیبی و عمل‌آوری در آب) دو نوع عمل‌آوری در شکل ۲ ارائه شده است.



ج- مقاومت فشاری ۲۸ روزه

ب- مقاومت فشاری ۱۴ روزه

الف- مقاومت فشاری ۷ روزه

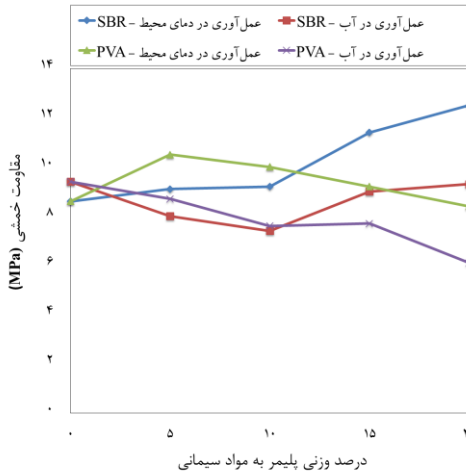
شکل ۲- مقاوت فشاری ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس با نسبت‌های مختلف پلیمر به مواد سیمانی

همانطور که در نتایج ارائه در شکل شماره ۲ مشاهده می‌گردد ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس، هم در عمل‌آوری ترکیبی و هم در عمل‌آوری در آب در همه سنین، مقاومتی کمتر از ملات معمولی داشته‌اند. در بین ملات‌های اصلاح‌شده، به طور متوسط، بیشترین مقدار مقاومت فشاری، مربوط به ملات اصلاح‌شده با لاتکس PVA تحت عمل‌آوری ترکیبی، با مقاومت ۲۸ روزه، $54/4 \text{ MPa}$ در نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۵ درصد می‌باشد. این در حالی است که مقاومت فشاری ملات معمولی در سن ۲۸ روز برابر $59/9 \text{ MPa}$ بدست آمد. بر اساس نتایج بدست آمده، مقاومت فشاری ملات اصلاح‌شده با لاتکس تحت عمل‌آوری ترکیبی بیشتر از مقاومت فشاری ملات اصلاح‌شده با لاتکس تحت عمل‌آوری در آب بوده است. بطوریکه مقاومت فشاری ملات اصلاح‌شده با لاتکس PVA در نسبت‌های پلیمر به مواد سیمانی ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد، در شرایط عمل‌آوری ترکیبی در سن ۲۸ روز به ترتیب $54/4 \text{ MPa}$ ، $48/4 \text{ MPa}$ ، $43/7 \text{ MPa}$ و $40/0 \text{ MPa}$ در شرایط عمل‌آوری در آب در سن ۲۸ روز به ترتیب $50/5 \text{ MPa}$ ، $42/4 \text{ MPa}$ ، $39/0 \text{ MPa}$ و $30/8 \text{ MPa}$ بدست آمد. تحقیقات وانگ و همکارانش [۲۵]، نیز نشان داد که مقاومت فشاری در عمل‌آوری ترکیبی (چند روز در آب و سپس در محیط خارج از آب، با دما و رطوبت مشخص) نسبت به عمل‌آوری در آب، بیشتر می‌باشد؛ که این افزایش ناشی از هیدراته شدن سیمان در آب در سنین اولیه، سپس تشکیل فیلم‌های پلیمری در محیط خارج از آب در طولانی مدت می‌باشد.

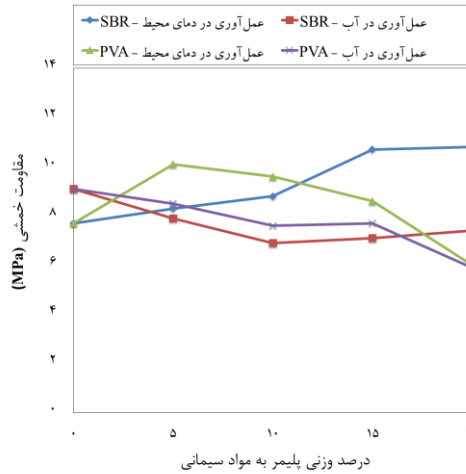
بدیهی است مقاومت ملات اصلاح‌شده، در سنین اولیه، تحت شرایط عمل‌آوری مرطوب با انجام عمل‌هیدراتاسیون به حد معقول رسیده و به دنبال آن برای گسترش تشکیل فیلم پلیمری، با توجه به ادغام ذرات پلیمر در شیرهای لاتکس، عمل‌آوری خشک برای نمونه‌های در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر این نوع شرایط عمل‌آوری برای نگهداری نمونه‌های ملات اصلاح‌شده با لاتکس مناسب می‌باشد [۳]. مقاومت فشاری ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس SBR، تحت عمل‌آوری در آب، در همه سنین، با افزایش نسبت پلیمر به مواد سیمانی، کاهش یافته، ولی تحت عمل‌آوری خشک، در همه سنین، با افزایش نسبت پلیمر به مواد سیمانی از ۰ تا ۱۰ درصد، کاهش و بعد از آن تا ۲۰ درصد با افزایش جزئی رو به رو شد. نتایج بدست آمده تحت عمل‌آوری خشک، مشابه با نتایج بدست آمده از تحقیقات وانگ و همکارانش [۲۵] و همچنین کاودر و همکارانش [۲۶]، می‌باشد. نتایج بدست آمده از مقاومت فشاری ملات اصلاح‌شده با لاتکس SBR، مطابق با نتایجی است که اهاما [۳]، بدست آورد.

۴-۶- مقاومت خمشی

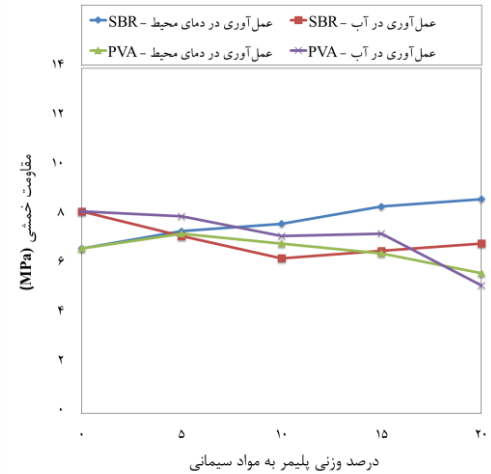
نتایج مربوط به مقاومت خمشی ملات‌های اصلاح‌شده با لاتکس با نسبت‌های مختلف پلیمر به مواد سیمانی، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در دو شرایط عمل‌آوری (عمل‌آوری ترکیبی و عمل‌آوری در آب) دو نوع عمل‌آوری در شکل ۳ ارائه شده است.



ج- مقاومت خمشی ۲۸ روزه



ب- مقاومت خمشی ۱۴ روزه



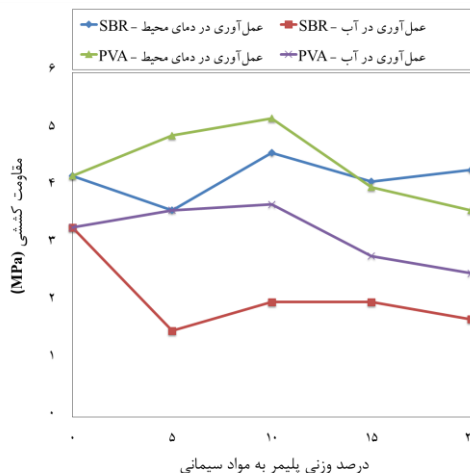
الف- مقاومت خمشی ۷ روزه

شکل ۳- مقاوت خمشی ملات اصلاح شده با لاتکس با نسبت‌های مختلف پلیمر به مواد سیمانی

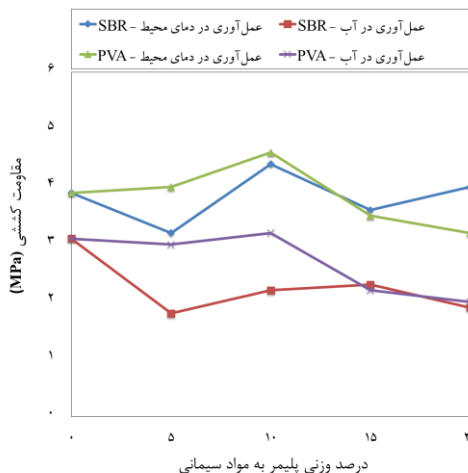
بر اساس نتایج ارائه شده در شکل شماره ۳، بیشترین مقدار مقاومت خمشی ملات اصلاح شده در شرایط عمل آوری ترکیبی مربوط به لاتکس SBR، با افزایش ۴۵ درصدی در سن ۲۸ روز، در نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۲۰ درصد می‌باشد. این در حالی است که در همین شرایط عمل آوری افزایش مقاومت خمشی در ملات اصلاح شده با لاتکس PVA، در سن ۲۸ روز، در نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۵ درصد رخ داده که ۲۲ درصد بوده است؛ همچنین با افزایش نسبت پلیمر به مواد سیمانی (لاتکس PVA) مقاومت خمشی کاهش می‌یابد، بطوریکه در نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۲۰ درصد در سن ۲۸ روز، تحت عمل آوری ترکیبی ۲/۳ درصد مقاومت خمشی کاهش یافته است. کاهش مقاومت خمشی از نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۵ تا ۲۰ درصد می‌تواند به دلیل وجود حباب هوا که لاتکس PVA، در ملات ایجاد کرده است رخ داده باشد. نمونه‌های ملات اصلاح شده با لاتکس PVA، موجود تحت عمل آوری ترکیبی، با دارا بودن چسبندگی بالا و شروع شدن تشکیل فیلم پلیمری، باید مقاومت بهتری بدست دهد؛ اما از ۵ درصد به بالا، به دلیل وجود حباب هوای زیاد که لاتکس PVA، در ملات ایجاد کرده است موجب کاهش مقاومت خمشی می‌شود. مقاومت خمشی ملات اصلاح شده با لاتکس SBR، تحت شرایط عمل آوری مرطوب و برای همه سنین، از ۰ تا ۱۰ کاهش و بعد از آن تا ۲۰ درصد با افزایش روبرو شد. که این مقدار افزایش از نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۱۰ درصد تا ۲۰ درصد، ۱۴ درصد بوده است. وانگ و همکارانش [۸]، نیز نشان دادند که با عمل آوری نمونه‌ها در آب، حداقل مقاومت خمشی در ۱۰ درصد رخ می‌دهد. در مجموع عمل آوری ترکیبی (در سنین اولیه در آب و سپس در محیط اتاق)، باعث می‌گردد تا یک لایه نازک پلیمر یکپارچه و چسبنده تشکیل شود که روی محصولات ناشی از هیدراتاسیون سیمان، قطعات سنگ و حتی منافذ موئینه را می‌پوشاند [۲۷].

۴-۷- مقاومت کششی

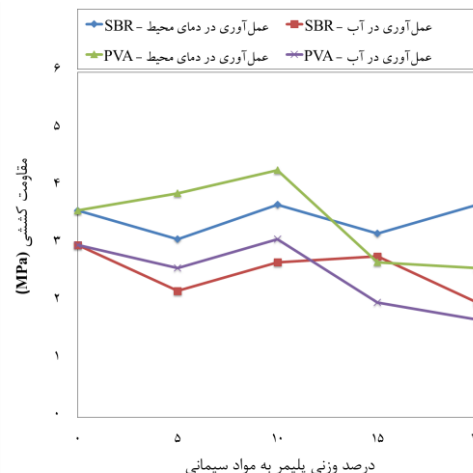
نتایج مربوط به مقاومت کششی ملات‌های اصلاح شده با لاتکس با نسبت‌های مختلف پلیمر به مواد سیمانی، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه در دو شرایط عمل آوری (عمل آوری ترکیبی و عمل آوری در آب) دو نوع عمل آوری در شکل ۴ ارائه شده است.



ج- مقاومت کششی ۲۸ روزه



ب- مقاومت کششی ۱۴ روزه



الف- مقاومت کششی ۷ روزه

شکل ۴- مقاوت کششی ملات اصلاح شده با لاتکس با نسبت‌های مختلف پلیمر به مواد سیمانی

نتایج ارائه شده در شکل شماره ۴ نشان می‌دهد که مقاومت کششی ملات‌های اصلاح شده با لاتکس تحت عمل آوری ترکیبی بیشتر از مقاومت کششی تحت عمل آوری در آب می‌باشد. مقاومت کششی ملات اصلاح شده با لاتکس PVA، تحت عمل آوری ترکیبی در سن ۲۸ روز، در نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۱۰ درصد، ۲۳/۸ درصد افزایش داشته است در حالی که تحت عمل آوری در آب با ۱۲/۱ درصد افزایش رو به رو شد. مقاومت کششی ملات اصلاح شده با لاتکس PVA، در همه سنین، تحت عمل آوری ترکیبی، از ۰ تا ۱۰ درصد افزایش، سپس تا ۲۰ درصد با کاهش مواجه شده است؛ که این نشان می‌دهد با اضافه کردن لاتکس PVA، بیش از ۱۰ درصد وزن مواد سیمانی، حباب هوای بیش از حد در ملات ایجاد می‌شود که حتی چسبندگی خیلی زیاد نمی‌تواند باعث افزایش مقاومت کششی شود. به عبارت دیگر مقاومت کششی در نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۲۰ درصد، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۲۷/۸، ۱۷/۹ و ۱۴/۲ درصد نسبت به ملات معمولی کاهش می‌یابد. این روند کاهش نشان می‌دهد که به مرور زمان و بیشتر خشک شدن نمونه، اختلاف مقاومت کششی نیز به دلیل کامل تر شدن فیلم نازک پلیمری، کمتر خواهد شد [۲۸]. نمودار مقاومت کششی ملات اصلاح شده با لاتکس SBR، در همه سنین، تحت عمل آوری ترکیبی، دارای نوسان بوده که مقاومت کششی، با تشکیل فیلم پلیمری و عمل هیدراتاسیون سیمان، در نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۱۰ درصد، بر اساس شکل شماره ۳ در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۲/۷، ۱۱/۲ و ۹/۵ درصد با افزایش رو به رو شده است. کمترین مقاومت کششی در نسبت پلیمر به مواد سیمانی ۵ درصد، در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز به ترتیب ۰/۸۶، ۰/۸۲ و ۰/۸۵ مقاومت کششی ملات معمولی حاصل شد. این نکته توجه داشت که حباب هوای بیش از حد و اضافه کردن پلیمر، موجب ناپیوستگی ساختار شبکه یکپارچه شکل گرفته شده می‌شود که این امر باعث کاهش مقاومت کششی می‌گردد [۲۹].

۵- نتیجه‌گیری

باتوجه به تنوع نتایج به دست آمده از آزمایش‌های انجام شده و عدم رابطه منظم و منطقی ریاضی بین نتایج حاصل از مصرف لاتکس‌های گوناگون، همچنین دشواری در دستیابی به نسخه‌ای کلی و عمومی برای استفاده از لاتکس در ملات‌های ترمیمی و تعمیری، نمی‌توان اقدام به نتیجه‌گیری کلیمود. به عبارتی نتایج به دست آمده بایستی به صورت جداگانه و بر اساس نیاز هر پروژه مورد استفاده قرار گیرد. از طرفی در تحقیق حاضر و با توجه به آزمایش‌های انجام گرفته، نتایج زیر اخذ شده است:

- چگالی ملات‌های اصلاح شده با لاتکس به جزء در ۵ و ۱۰ درصد لاتکس PVA، کمتر از ملات معمولی بدست آمد، که نشان از حباب‌زایی در ملات به دلیل استفاده از لاتکس می‌باشد، بطوریکه با افزایش نسبت پلیمر به مواد سیمانی، میزان حباب‌زایی، افزایش یافته است. این تمایل به افزایش حباب هوا به دلیل وجود عناصر فعال کننده سطحی در خود لاتکس است.
- استفاده از لاتکس SBR باعث افزایش کارایی و لاتکس PVA، باعث کاهش کارایی ملات شده است.

- مشخصات مکانیکی ملات اصلاح شده در شرایط عمل آوری ترکیبی به دلیل هیدراته شدن سیمان در سنین اولیه و سپس تشکیل فیلم پلیمری، نسبت به شرایط عمل آوری در آب، نتایج بهتری را در همه سنین، به دست داده است.
- در هر صورت استفاده از لاتکس در ملات ترمیمی موجب کاهش مقاومت فشاری شده است. بطور متوسط مقاومت فشاری ملات اصلاح شده با لاتکس PVA، نسبت به لاتکس SBR بیشتر بوده است. بطوریکه استفاده از لاتکس PVA، به مقدار ۵ درصد وزن مواد سیمانی، ۹ درصد، مقاومت فشاری را کاهش داده است.
- استفاده از لاتکس در ملات موجب بهبود مقاومت خمشی شده است. بطوریکه با مصرف لاتکس SBR، به مقدار ۲۰ درصد وزن مواد سیمانی، ۴۵ درصد، با مصرف لاتکس PAV، به مقدار ۵ درصد وزن مواد سیمانی، ۲۲ درصد، مقاومت خمشی را افزایش می دهند.
- مقاومت کششی ملات با مصرف لاتکس تا میزان ۱۰ درصد وزن مواد سیمانی، افزایش یافته است. این افزایش در لاتکس های PVA و SBR به ترتیب ۲۳/۸ و ۹/۵ درصد بود.

۶- قدردانی

فعالیت آزمایشگاهی ارائه شده در این مقاله در انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران انجام شده است که بدینوسیله از پرسنل آن مجموعه، قدردانی می گردد. همچنین از مدیریت شرکت همگرایان تولید (کپکو)، شرکت آرینا پلیمر و شرکت دماوند سفید نیز تشکر دارم که با حمایت های خود، موجبات پیشبرد آزمایش های مقاله حاضر را فراهم نمودند.

مراجع

- [۱] انجمن بتن ایران. (۱۳۹۳). "کاربرد افزودنی های شیمیایی در بتن". یزد، تهران.
- [2] Z. Su, J.M.J.M. Bijen and J.A.Larbi. (1991) "Influence of Polymer Modification on the Hydration of Portland Cement". Cement and Concrete Research, Vol. 21, pp. 242-250.
- [3] Ohama, Y., "Polymer Modified Concrete Mortars- Properties and Process Technology", Noyes, United States of America, 1995.
- [4] Maria S. S. R., Arlindo F. G., Fernando A. B. B., "Styrene-butadiene polymer action on compressive and tensile strengths of cement mortars", Materials and Structures 41, Pages 1263-1273, 2008.
- [5] Shuyi Y., Yong G., "Effect of Styrene Butadiene Rubber Latex on Mortar and Concrete Properties", Advanced Engineering Forum, Volume 5, Pages 283-288, 2012.
- [6] Mahdi S. E., Nada F. H., "Effect of Adding Styrene Butadiene Rubber Admixture (SBR) on Concrete Properties and Bond Between Old and New Concrete", Journal of Kerbala University, Volume 6, No 2, ISSN 1813- 7822, Pages 63-74, 2008.
- [7] R.Radhakrishnan¹, Syam Prakash.V², C.K.PrasadVarmaThampan, "Performance of Styrene Butadiene Rubber as a Concrete Repair Material in tropical climate", Advancements in Research And Technology, Volume 1, Issue 6, ISSN 2278- 7763, 2012.
- [8] R. Wang, R. Lackner, P.-M. Wang, "Effect of Styrene-Butadiene Rubber Latex on Mechanical Properties of Cementitious Materials Highlighted by Means of Nanoindentation", Pages 117-126, 2011.
- [9] Geist, J. M., Amagna, S. V., and Mellor, B. B., Industrial and Engineering Chemistry, 45(4):759-767 (Apr. 1953)
- [10] Brocard, M. J., "Étude de L'Incorporation D' Emulsion de Résines Synthétiques dans les Mortiers et Bétons", Annales de L'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 13(156):1357-1371 (Dec. 1960)
- [11] Wagner, H. B, and Grenley, D. G., J. Applied Polymer Science, 22(3):813-822 (Mar. 1978)

- [12] ASTM C150 (2012). Standard Specification for Portland Cement.
- [13] ASTM C1240 (2010). Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures.
- [14] ASTM C1602 (2006). Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete.
- [15] ISO 124 (2008), Latex, rubber - Determination of total solids content.
- [16] ASTM D1217 (2003). Standard Test Method for Density and Relative Density (Specific Gravity) of Liquids by Bingham Pycnometer.
- [17] ASTM C138 (2012). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.
- [18] ASTM C230 (2003). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.
- [19] ASTM C109 (2008). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).
- [20] ASTM C348 (2002). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars.
- [21] ASTM C307 (2003). Standard Test Method for Tensile Strength of Chemical-Resistant Mortar, Grouts, and Monolithic Surfacing.
- [22] Mat KhairSalbin, "Properties and Performance of Polymer Modified". May 1996.
- [23] Tateyashiki, H., Inoue, T., and Yokoe, S., The 47th Annual Meeting of, JCA, Extended Abstracts, pp. 224-229, Japan Cement Association, Tokyo (Apr. 1993)
- [24] Subham, Parveen S., "Enhancement of Properties of Polymer Modified Ferrocement", Volume 4, Issue 8, ISSN 2347 – 6435, 2015.
- [25] Wang R., Pei-Ming W., Xin-Gui L., "Physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber emulsion modified cement mortars", Cement And Concrete Research, Pages 900-906, 2005.
- [26] A. Çavdar, S. Sevin, Y. Kaya, Ş. Bingöl, "The Effects of Cure Conditions on Mechanical Properties of Polymer Modified Cement Mortars", Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering, Volume 2, No 2, Pages 79-85, 2014.
- ۲۷- مهتا، مونته ئیرو، "ریز ساختار، خواص و اجزای بتن"، ترجمه علی اکبر رضانیانپور، پرویز قدوسی، اسماعیل گنجیان، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۳.
- ۲۸- میندس و همکاران، "بتن"، ترجمه محمد شکرچی زاده، پرویز قدوسی، علی اکبر رضانیانپور، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۹۲.
- [29] Afridi, M.U.K., Ohama, Y., Zafar Iqbal, M., Demura, K. (1995). "Water Retention and Adhesion of Powdered and Aqueous Polymer-Modified Mortars". Cement And Concrete Composites, Vol. 17, pp. 113-118.