

بررسی عملکرد مکانیکی و دوام بتن پلیمری تهیه شده از رزین پلی استر

مسعود جمشیدی

عضو هیأت علمی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن
Masoud52@yahoo.com

چکیده

بتن پلیمری به دسته‌ای از مواد بتنی اطلاق می‌شود که در آن ماده چسباننده سیمان پرتلند با رزین پلیمری جایگزین شده باشد. کاربرد بتن‌های پلیمری از اواسط قرن بیستم میلادی آغاز شد. کاربرد این مواد با توجه به تنوع و کیفیت محصولات توسعه یافت. امروزه کاربرد بتن‌های پلیمری با توجه به قیمت زیادتر نسبت به بتن معمولی، به موارد خاص محدود شده است. در مقاله حاضر، خصوصیات مکانیکی (مقاومت‌های فشاری، خمشی و سایشی) و عمق نفوذ آب تحت فشار یک نوع بتن پلیمری تهیه شده از رزین پلی استر غیر اشباع ارتوفتالیک تولید داخل بررسی شده و نتایج با عملکرد بتن معمولی با نسبت آب به سیمان 0.4 مقایسه شد. همچنین دوام این بتن‌ها در محیط اسید سولفوریک بسیار غلیظ طی ۱۰ ماه بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که مقاومت مکانیکی بتن پلیمری در زمان‌های اولیه عمل‌آوری بیش از سه برابر و در دراز مدت بیش از دو برابر مقاومت مکانیکی بتن معمولی است. همچنین نتایج نشان داد که نمونه‌های بتن معمولی کمتر از سه ماه در محیط اسید سولفوریک غلیظ دوام داشته و دچار تخریب شدید شدند، در حالی که نمونه‌های بتن پلیمری پس از ۳ و ۱۰ ماه قرارگیری در معرض اسید خورنده به ترتیب کمتر از ۱۰ و ۲۰ درصد افت مقاومت فشاری نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: بتن، بتن پلیمری، رزین، پلی استر، مقاومت مکانیکی، دوام.

۱. مقدمه

عالی، در بسیاری از پروژه‌های بزرگ دنیا جایگزین بتن‌های معمولی شده‌اند. کاربرد بتن‌های اصلاح شده با پلیمرها عموماً در روکش‌ها و مواد تعمیراتی بتن‌های در معرض تنش‌های شیمیایی و مکانیکی است.

بتن‌های پلیمری (PC) محصولاتی هستند که در آنها ماده چسباننده بتن (مواد سیمانی) با رزین جایگزین شده است. رزین، ماده پلیمری مایع است که هنوز عمل‌آوری نشده باشد. تغییر ماده چسباننده بتن، باعث تغییرات عمده‌ای در رئولوژی، نوع و زمان عمل‌آوری و خصوصیات فیزیکی/مکانیکی آن می‌شود. از آن جمله می‌توان به این موارد اشاره کرد که بتن پلیمری نیازی به آب در طرح مخلوط خود نداشته و در زمان کمتر از ۲۴ ساعت به حداکثر مقاومت خود می‌رسد. ویژگی اصلی بتن‌های پلیمری را می‌توان مقاومت‌های بسیار بیشتر (حداقل دو برابر) نسبت به بتن معمولی دانست [۱-۲].

تنوع رزین‌های قابل استفاده در بتن‌های پلیمری موجب حصول انواع خصوصیات فیزیکی/مکانیکی شده است که تاکنون مورد تحقیق محققان مختلف قرار گرفته است [۴-۹]. مصرف زیاد مواد پلیمری در بتن‌های پلیمری (بین ۱۰ تا ۲۵ درصد کل)، باعث افزایش بسیار زیاد قیمت در این نوع محصول شده است. از این رو در دنیا بتن‌های پلیمری بر پایه رزین پلی‌استر غیر اشباع (با توجه به قیمت نسبتاً ارزان‌تر) مرسوم‌تر هستند.

اگرچه مصرف بتن‌های پلیمری در کاربری‌های عمومی کم است اما در تولید قطعات پیش‌ساخته که نیاز به مقاومت و دوام زیاد دارند و در مواد تعمیراتی بتن‌های در معرض خوردگی شدید، بسیار مرسوم است. یکی از مهم‌ترین کاربردهای بتن‌های پلیمری ساخت لوله‌ها، کانال‌ها، آدم‌روها و دیگر اجزاء و قطعات مورد مصرف در صنعت فاضلاب و تصفیه فاضلاب است. مهم‌ترین مزایای بتن‌های پلیمری در این شرایط را می‌توان شامل مقاومت عالی در برابر مواد شیمیایی فاضلابی، مقاومت عالی (بدون نیاز به مواد تقویت کننده)، ضریب اصطکاک بسیار کم با مواد فاضلابی و جریان‌یابی راحت‌تر مواد در آن، مقاومت سایشی عالی و تولید قطعات بسیار صاف بدون عیب ظاهری همچون پلاستیک‌ها دانست.

کاربرد بتن‌های حاوی مواد پلیمری از حدود سال ۱۹۵۰ میلادی در دنیا به شکل صنعتی مورد توجه قرار گرفت [۱]. این مواد با توجه به تنوع و خصوصیات منحصر به فرد جایگاه ویژه‌ای در صنعت بتن یافتند، اما بزودی به دلیل قیمت زیاد کاربردهای آنها محدود شد. در دهه اخیر، کاربرد این نوع بتن عموماً در مواردی است که در آن بتن معمولی محدودیت استفاده داشته و یا مقاومت و دوام کافی نداشته باشد.

به‌طور کلی بتن‌های حاوی مواد پلیمری را به دسته‌های زیر تقسیم‌بندی می‌کنند:

۱- بتن‌های تزریق شده با پلیمرها

(Polymer Impregnated Concretes)

۲- بتن‌های اصلاح شده با پلیمرها

(Polymer Modified Concretes)

۳- بتن‌های پلیمری (Polymer Concretes) [۲-۳]

در مواردی که بتن دارای نفوذپذیری زیادتر از معمول باشد، در صورتی که پلیمرها به منظور مسدود نمودن منافذ سطحی به بتن تزریق شوند، محصول نهائی بتن تزریق شده با پلیمر نامیده می‌شود. به منظور تسهیل فرایند نفوذ، از پلیمرهای با جرم مولکولی کم استفاده می‌شود. پلیمرها تحت فشار به بتن نفوذ کرده و به منظور افزایش جرم مولکولی و بهبود خصوصیات تحت یک فرایند حرارتی تأخیری عمل‌آوری می‌شوند. بتن‌های اشباع شده با پلیمرها در مواردی که کمترین نفوذپذیری برای بتن مورد نظر باشد بسیار کارا هستند اما به دلیل سختی فرایند تزریق و عمل‌آوری جزء گران‌قیمت‌ترین بتن‌ها محسوب می‌شوند.

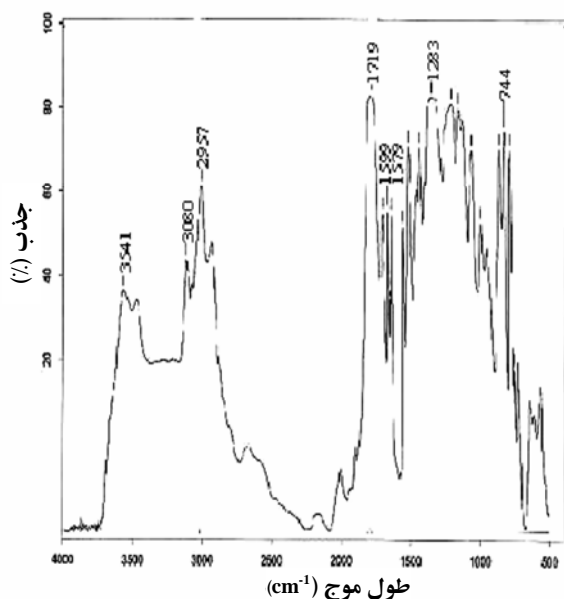
بتن اصلاح شده با پلیمر (PMC) به نوعی از بتن اطلاق می‌شود که چسباننده آن سیمانی است اما به منظور بهبود برخی از خواص، از مواد پلیمری به عنوان اصلاح کننده بهره می‌گیرند. این نوع بتن از نظر قیمت ارزان‌تر از انواع دیگر بتن‌های حاوی مواد پلیمری بوده ولی از نظر خصوصیات فیزیکی/مکانیکی ضعیف‌ترند. این خصوصیات و شباهت بسیار زیاد آنها در فرایند ساخت، اعمال و عمل‌آوری به بتن‌های معمولی، آنها را از دیگر بتن‌های حاوی مواد پلیمری مجزا و از نظر صنعت گران‌محبوب‌تر ساخته است. امروزه این مواد بدلیل مقاومت‌های خمشی/کششی بهتر و نفوذپذیری و مقاومت شیمیایی بسیار بهتر و چسبندگی

جدول ۲- دانه‌بندی سنگ‌دانه مصرفی

درصد عبوری از الک			نوع الک
شن	ماسه	ماسه بادی	
۱۰۰	-	-	۱۲/۵ میلیمتر
۸۵	-	-	۹/۵ میلیمتر
۰/۵	۱۰۰	-	۴/۷۵ میلیمتر
-	۹۰	-	۲/۳۶ میلیمتر
-	۱۴	۱۰۰	۱/۱۸ میلیمتر
-	۱/۵	۱۰۰	۶۰۰ میکرون
-	۰/۳	۷۳	۳۰۰ میکرون
-	۰/۲	۱۱/۶۸	۱۵۰ میکرون

جدول ۳- مشخصات فیزیکی-مکانیکی رزین

مقدار	ابعاد	خصوصیت
۱/۱۴	gr/cm ³	دانسیته
۱۱۰	N/mm ²	مقاومت خمشی
۶۰	N/mm ²	مقاومت کششی
۲	%	کرنش در نقطه شکست
۳۵۰۰	N/mm ²	مدول الاستیسیته
۶۰	%	درصد جامد
۸۰	°C	Tg



شکل ۱- طیف سنجی مادون قرمز-تبدیل فوریه

در تحقیق حاضر، خصوصیات فیزیکی/مکانیکی یک نوع بتن پلیمری تهیه شده از مواد اولیه داخلی بر پایه رزین پلی استر غیر اشباع ارتوفتالیک مورد ارزیابی قرار گرفته و با بتن معمولی مقایسه شده است. همچنین دوام دراز مدت این ماده در محیط اسیدی بررسی شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد اولیه

- سنگ‌دانه

سنگ‌دانه‌های مورد مصرف در تحقیق شن، ماسه و ماسه بادی بودند. جداول ۱ و ۲ خصوصیات فیزیکی و دانه‌بندی سنگ‌دانه را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکی سنگ‌دانه‌ها

نوع سنگ‌دانه	وزن مخصوص (SSD) (کیلوگرم بر متر مکعب)	جذب آب (%)	مدول نرمی
ماسه بادی	۲/۵۴	۳	-
ماسه	۲/۵۳	۲/۶	۲/۷
شن	۲/۵۶	۲/۴۶	۶/۵

- رزین

رزین پلی استر غیراشباع نوع ارتوفتالیک تولید شده داخلی در تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. خصوصیات رزین در جدول ۳ ارائه شده است. شکل ۱، آنالیز طیف سنجی مادون قرمز-تبدیل فوریه (FTIR) رزین را نمایش می‌دهد.

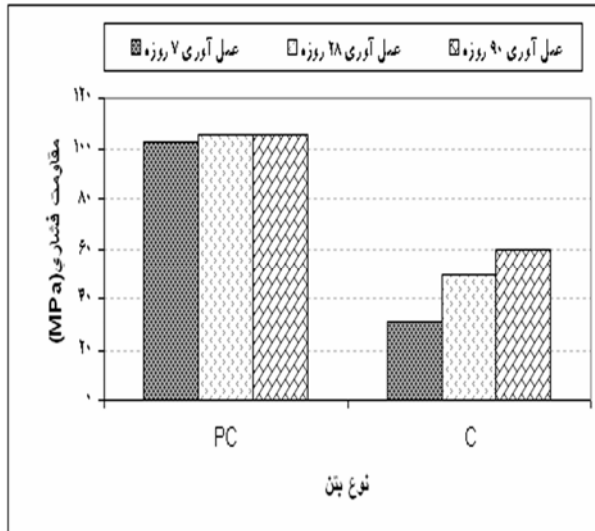
۲-۲- روش تولید

در این تحقیق، بتن پلیمری به کمک یک مخلوط کن اتوماتیک که امکان مصرف مقادیر کمتری از رزین را می‌داد، تهیه شد. طرح اختلاط بتن پلیمری و بتنی معمولی در جدول ۴ ارائه شده است. نمونه‌ها پس از یک ساعت از زمان قالب‌گیری از قالب خارج شده و به مدت یک روز در محیط آزمایشگاه تثبیت شرایط شدند. کلیه نمونه‌ها، پس از تثبیت شرایط تا زمان مورد نیاز در شرایط خشک عمل‌آوری شدند. به منظور مقایسه، نمونه‌ای از بتن معمولی به عنوان نمونه‌های شاهد ساخته شد.

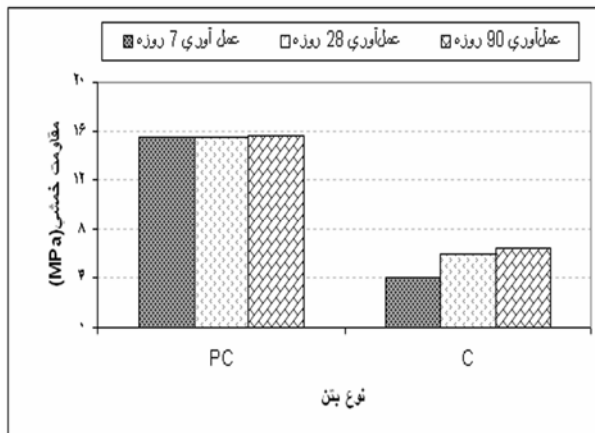
جدول ۴- طرح مخلوط بتن

نوع مخلوط	نسبت آب به سیمان	سیمان (%)	رزین (%)	سنگ دانه (%)	فیلر (%)
PC	-	-	۱۰	۷۷/۵	۱۲/۵
C	۰/۴	۱۵	-	۸۵	-

عمل کردند. میزان مقاومت خمشی نمونه‌های بتن پلیمری، همانند مقاومت فشاری، مستقل از زمان عمل‌آوری بوده و حداکثر مقاومت در زمان‌های اولیه عمل‌آوری حاصل می‌شود. این میزان در هر حال بیش از دو برابر مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی است.



شکل ۲- نمودار مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی و بتن پلیمری در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



شکل ۳- نمودار ستونی مقاومت خمشی نمونه‌های بتنی و بتن پلیمری

۳-۳- مقاومت سایشی

مقاومت سایشی نمونه‌ها براساس استاندارد اروپایی (EN) به شماره ۱۳۳۸ ارزیابی شد. نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج حاکی از مقاومت سایشی، سختی و صلبیت بسیار بیشتر نمونه‌های بتن پلیمری در مقایسه با نمونه‌های بتن شاهد است. کاهش میزان سایش نمونه‌ها با افزایش زمان عمل‌آوری، در نمونه‌های شاهد قابل توجه و در نمونه‌های بتن پلیمری قابل صرف‌نظر کردن است.

۳-۲- نمونه‌ها

نمونه‌های بتن پلیمری از نظر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت سایشی، مقاومت در برابر نفوذ آب تحت فشار و مقاومت در برابر محیط اسیدی با pH کمتر از ۱ با نمونه‌های بتن معمولی مقایسه شدند.

۳- نتایج به‌دست آمده و بحث در نتایج

۱-۳- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری نمونه‌ها براساس استاندارد اروپایی (EN) به شماره ۱۲۳۹۰ - قسمت سوم تعیین شد. نتایج در شکل ۲ ارائه شده است. همانگونه که در شکل دیده می‌شود، میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتن پلیمری در سنین اولیه عمل‌آوری بیش از سه برابر و در سن ۹۰ روز عمل‌آوری بیش از دو برابر مقاومت فشاری بتن شاهد است.

مهم‌ترین نکته قابل مشاهده در شکل ۲، روند صعودی مقاومت فشاری بتن شاهد و روند ثابت آن در مورد بتن پلیمری با افزایش زمان عمل‌آوری است. در عمل، نمونه‌های بتن پلیمری در کمتر از یک روز به مقاومت اصلی خود می‌رسند و در طی زمان افزایش قابل توجهی در مقاومت‌های آنها مشاهده نمی‌شود.

افزایش قابل توجه مقاومت فشاری در نمونه‌های بتن پلیمری را باید ناشی از کاربرد رزین صلب پلی‌استر دانست، اگرچه اغلب مواد بتن پلیمری دارای مقاومت فشاری بسیار زیادی هستند.

۲-۳- مقاومت خمشی

مقاومت فشاری نمونه‌ها براساس استاندارد ملی کشور آلمان (DIN) به شماره ۱۰۴۸ - قسمت پنجم ارزیابی شد. نتایج در شکل ۳ ارائه شده است. همانند آزمون مقاومت فشاری، نمونه‌های بتن پلیمری در آزمون مقاومت خمشی نیز بسیار بهتر

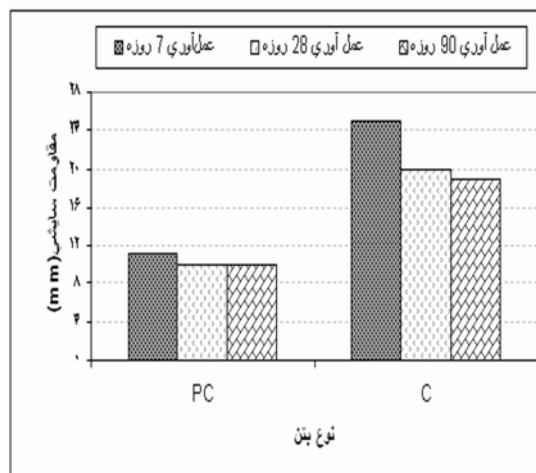
۳-۵- دوام دراز مدت در برابر اسید سولفوریک

به منظور بررسی دوام نمونه‌ها در محیط‌های مهاجم سولفاتی و اسیدی، یک آزمون تسریع شده مقاومت در برابر اسید سولفوریک طراحی و اجرا شد. برای این منظور نمونه‌های بتن پلیمری و بتنی ۲۸ روزه تهیه شده و در محلول اسید سولفوریک یک نرمال (pH کمتر از ۱) غوطه‌ور شدند. برای هر آزمون، سه آزمون از محیط خارج شده و تحت آزمون فشاری قرار گرفتند. به منظور کنترل pH، تجهیزات آزمون به سیستم الکترونیکی مجهز شد تا از نظر غلظت محلول و سطح محلول کنترل شود. میانگین نتایج به عنوان مقاومت فشاری نمونه گزارش شد. نتایج در شکل ۶ نمایش داده شده است.

نتایج نشان می‌دهد که نمونه‌های بتن پلیمری پس از ۳۰۰ روز غوطه‌وری در محیط اسیدی دچار افت ۲۰ درصدی در مقاومت فشاری می‌شوند، در حالی که نمونه‌های بتنی دچار افت ۸۵ درصدی می‌شوند. مشاهده بصری نمونه‌ها نیز حاکی از عدم تغییرات قابل توجه در ظاهر نمونه‌های بتن پلیمری پس از ۳۰۰ روز غوطه‌وری است. در نمونه‌های بتنی پس از ۳۰ روز غوطه‌وری در اسید نشانه‌های تخریب سطحی آشکار شده، در ۶۰ روز این تخریب‌ها بارز شده و پس از ۱۲۰ روز، تخریب بسیار شدید بتن به صورت تشکیل لایه ضخیم سست و سفیدرنگ ظاهر شد.

همانگونه که در شکل دیده می‌شود، نمونه‌های بتن پلیمری پس از افت ۲۰ درصدی مقاومت فشاری پس از ۱۲۰ روز غوطه‌وری در اسید به یک مقاومت ثابت رسیده و با افزایش زمان غوطه‌وری دچار افت قابل توجهی نشده‌اند. این روند در نمونه‌های بتنی معکوس بوده و عملاً تا ۶۰ روز افت قابل قبولی مشاهده می‌شود اما پس از آن آهنگ افت بسیار شدید شده و عملاً پس از ۶ ماه از زمان غوطه‌وری نمونه‌ها تخریب کامل می‌شوند. یکی از مهم‌ترین نکاتی که می‌توان به آن اشاره نمود میزان مقاومت فشاری نمونه بتن پلیمری پس از ۳۰۰ روز غوطه‌وری در اسید است که حدود ۸۵ مگاپاسکال است. این مقدار مقاومت حاکی از دوام مناسب مواد بتن پلیمری در محیط‌های اسیدی غلیظ است.

یکی از مهم‌ترین خصوصیات رزین‌های پلاستیک (همچون پلی‌استر غیر اشباع)، سختی و صلبیت قابل توجه آنها است که در محصول بتن پلیمری این خصوصیت را پس از عمل‌آوری به محصول نیز انتقال می‌دهند.



شکل ۴- نمودار مقاومت سایشی نمونه‌های بتنی و بتن پلیمری

۳-۴- عمق نفوذ آب تحت فشار

عملکرد نمونه‌ها در برابر نفوذ آب تحت فشار، برحسب میلی‌متر عمق نفوذ، براساس استاندارد استاندارد اروپایی (EN) به شماره ۱۲۳۹۰- قسمت هشتم ارزیابی شد. نتایج در شکل ۵ ارائه شده است. همانند دیگر رفتار فیزیکی/مکانیکی، عمق نفوذ آب به بتن پلیمری با افزایش زمان عمل‌آوری تفاوت قابل توجهی نداشته و مقدار آن می‌تواند در حد صفر در نظر گرفته شود. این میزان برای یک بتن با مقاومت‌های مکانیکی خوب (بتن شاهد) بعد از ۹۰ روز عمل‌آوری حدود ۶ میلی‌متر است.

اصولاً، مقاومت پلیمرها در مقایسه با دیگر مصالح، در برابر نفوذ آب و بخار آب بسیار بیشتر است. این رفتار خصوصاً در پلیمرهای غیرقطبی مثل پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن بارز است. اگرچه مقاومت نفوذ در برابر آب در پلیمرهای قطبی ضعیف‌تر از انواع غیرقطبی است اما در مقایسه با دیگر مصالح همچنان بسیار بهتر است. این رفتار پلیمرها می‌تواند به فرآورده به کار برنده پلیمر نیز منتقل شود. دلیل نفوذ کم آب به پلیمرها را باید ناشی از بسته بودن ساختار مولکولی پلیمرها، تشکیل فیلم‌ها یا ماتریس‌های پیوسته و بدون تخلخل و عدم امکان عبور مولکول‌های آب از ساختار ریز مولکولی پلیمر دانست.

(۷ روز) بیش از سه برابر و در زمان‌های طولانی عمل‌آوری (۹۰ روز) بیش از دو برابر مقاومت مکانیکی بتن معمولی بود.

• با توجه به نتایج حاصل، مهم‌ترین برتری بتن‌های پلیمری بر بتن‌های معمولی را باید کوتاه بودن زمان عمل‌آوری و ثبات مقاومت‌ها در طی زمان عمل‌آوری دراز مدت دانست. یکی از محدودیت‌های کاربرد بتن معمولی، طولانی بودن زمان عمل‌آوری و دستیابی به مقاومت نهایی است در حالی که بتن‌های پلیمری می‌توانند در زمان کمتر از چند ساعت مقاومت‌های چند برابر بتن معمولی را ارائه کنند. این ویژگی در برخی کاربردهای استراتژیک و در تعمیرات سریع سازه‌ها بسیار کارآمد است.

• رفتار سایشی بهتر بتن‌های پلیمری نسبت به بتن معمولی، آنها را برای کاربرد در کفپوش‌ها و قطعات پیش‌ساخته در معرض سایش نسبت به بتن‌های معمولی ارجح می‌کند.

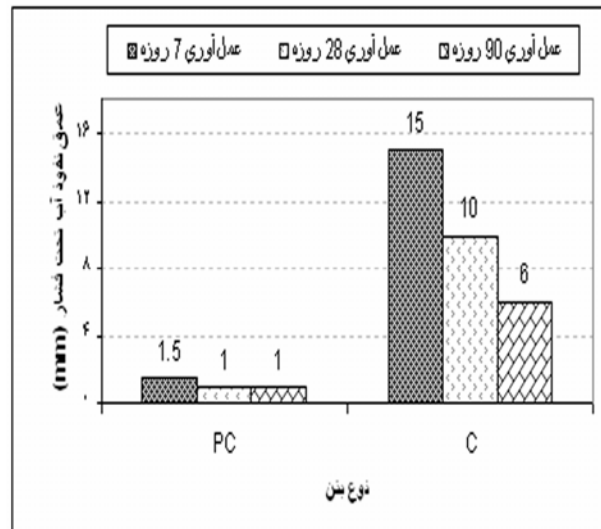
• نتایج برتر نمونه بتن پلیمری در آزمون‌های مقاومت در برابر اسید در درازمدت و عمق نفوذ آب تحت فشار نسبت به بتن‌های سیمان پرتلندی، نشان‌دهنده دوام زیاد محصول در شرایط شیمیایی سخت است. از این رو کاربرد این محصول در مواردی که دوام زیاد مورد درخواست باشد، پیشنهاد می‌شود. برای مثال کاربرد این محصول در ساخت سازه‌های در معرض خاک‌های مهاجم سولفاتی، خاک‌های باتلاقی، آب دریا و محیط‌های فاضلابی توصیه می‌شود.

• بررسی قیمت محصول بتن پلیمری مشخص می‌کند که قیمت این ماده در بهترین حالت بیش از دو برابر بتن معمولی است. این رشد هزینه‌ها در پروژه‌های صنعتی فقط زمانی توجیه دارد که سازه مورد نظر استراتژیک بوده و مباحث قیمت در آن بی‌تاثیر باشد و یا مواردی که بتن معمولی کارائی لازم و یا دوام مورد نظر را نداشته باشد.

• مزیت اصلی بتن‌های پلیمری بر بتن معمولی را باید دوام بسیار زیاد آنها خصوصاً در محیط‌های شیمیایی دانست، چون امروزه مقاومت‌های مکانیکی بالا توسط بتن‌های توانمند قابل دستیابی هستند.

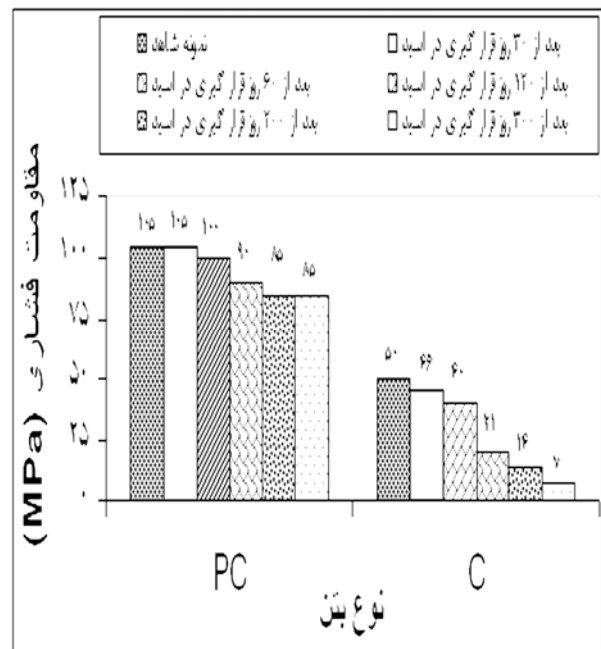
۵ - مراجع

- [1]. ACI 548, "Guide For The Use of Polymers In Concrete," 1997.
[2]. Miller M., "Polymers In Cementitious Materials," RAPRA Technology, 2005.



شکل ۵- نمودار عمق نفوذ آب تحت فشار در نمونه‌های بتنی و

بتن پلیمری



شکل ۶- نمودار دوام دراز مدت نمونه‌های بتن پلیمری و بتنی در

محیط اسید سولفوریک

۴ - نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک نوع بتن پلیمری بر پایه رزین پلی‌استر غیر اشباع ارتوفتالیک تولید داخل، تهیه شده و به منظور بررسی خصوصیات، با بتن شاهد مقایسه شد. از نتایج آزمون‌های انجام شده نتیجه‌گیری‌های زیر به دست آمد:

• مقاومت‌های مکانیکی بتن پلیمری تهیه شده از رزین پلی‌استر (به عنوان یک محصول اقتصادی) در زمان‌های اولیه عمل‌آوری

- [7]. EL-Hawary, M. M. and Abdel-Fattah, H., "Temperature Effect On The Mechanical Behavior of Resin Concrete," Construction and Building Materials, 14, 317-323, 2000.
- [8]. Reis, J.M.L. and Ferreira, A.J.M., "Assessment of Fracture Properties of Epoxy Polymer Concrete Reinforced With Short Carbon and Glass Fibers," Construction and Building Materials, 18, 523-528, 2004.
- [9]. Liu, J., and Vipulanandan, C., "Evaluating A Polymer Concrete Coating For Protecting Non-Metallic Underground Facilities From Sulfuric Acid Attack," Tunneling and Underground Space Technology, 16, 311-321, 2001.
- [3]. Fowler, D.W., "Polymers in Concrete : A Vision For The 21st Century," Cement & Concrete Composites, 21, 449-452, 1999.
- [4]. Abdel-Fattah, H. and EL-Hawary, M. M., "Flexural Behavior of Polymer Concrete," Construction and Building Materials, 13, 253-262, 1999.
- [5]. Aicin, P.C., "The Durability Characteristics of High Performance Concrete: A Review", Cement & Concrete Composites, 25, 409-420, 2003.
- [6]. Asthana, K.K. and Lakhani, R., "Development of Polymer Modified Cementitious (Polycem) Tiles For Flooring," 18, 639-643, 2004.