مروری بر بتن آغشته به پلیمر

Polymer Impregnated Concrete: A Review

محمد رضوی‌نوری
پژوهشگاه پلیمر ایران
دریافت: ۷۴/۱۱/۱۷، پذیرش: ۷۶/۹/۲۶

چکیده

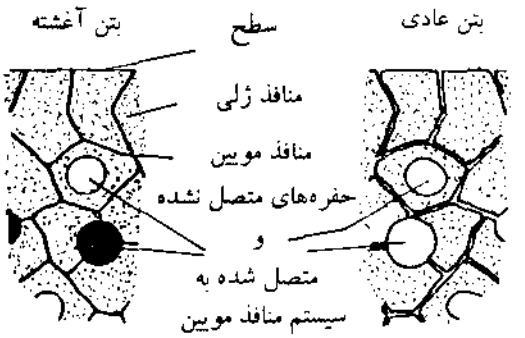
امروزه، استفاده از پلیمرهای متفاوت برای رفع نقاط ضعف بتن گسترش یافته است. خواص مکانیکی مناسب، پایداری در برابر عوامل خورنده و دیگر خواص مفید این کامپوزیتهای بتنی توجه پژوهشگران را به تحقیق، طراحی فرمولبندیهای جدید و تولید آنها جلب کرده است. در این مقاله، یکی از کاربردهای پلیمرها در بتن که تهیه کامپوزیتهای بتنی آغشته به پلیمر است بررسی شده و مراحل و فنون ساختن، چگونگی آغشته‌سازی به مونومر، عوامل موثر بر آغشته‌سازی و سایر پارامترهای موثر بر خواص نهایی بتن ارائه می‌گردد. معلوم می‌شود که با استفاده از این روش می‌توان استحکام فشاری، کششی و خمشی بتن عادی را تا ۴ برابر افزایش داد و به مقدار مدول کشسانی آن افزود. با این روش مقاومت شیمیایی بتن در برابر موادی چون سولفاتها، بازها، اسیدها و آب نمک بیشتر می‌شود و نیز دوام بتن در برابر دوره‌های یخ‌زدن و ذوب‌شدن به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد. همچنین، مقاومت بتن آغشته به پلیمر در برابر خزش، سایش، نفوذپذیری و ضربه بیش از بتن عادی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: بتن آغشته به پلیمر، زمان آغشته‌سازی، شکست بتن، نفوذپذیری، یخ‌زدن و ذوب‌شدن
Key Words: polymer impregnated concrete, impregnation time, concrete fracture, permeability, freezing and thawing

مقدمه

با افزایش نیاز جوامع جهانی به مسکن، حمل‌ونقل و صنایع مختلف، مصرف محصولات سیمانی و بتنی نیز بطور مسلم رو به افزایش خواهد گذاشت. اگرچه بتن ساخته شده از سیمان پرتلند از عمده‌ترین مواد مصرفی است، ولی به دلیل نقاط ضعف موجود، بهبود استحکام، چقرمگی، دوام و خاصیت چکش‌خواری آن مدنظر قرار دارد. یکی از راههای دستیابی به خواص برتر، بهبود ساختار بتن و راه دیگر ادغام فنون برای رسیدن به کامپوزیتهایی جدید است [۱،۲]. استفاده از پلیمر در بتن بسیاری از نقاط ضعف آن را برطرف می‌سازد و به بتن خواص منحصر به فردی می‌بخشد. مهمترین کاربردهای پلیمر در بتن که امروزه موضوع مورد توجه برای تحقیق و بررسی است عبارتند از: بتن آغشته به پلیمر، بتن سیمان-پلیمر، بتن پلیمری، بتن تقویت شده با الیاف، بتن پلیمری تقویت شده با الیاف و سیمان عاری از نقایص بزرگ.

در این مقاله، به دلیل اهمیت ویژه بتن آغشته به پلیمر نسبت به سایر کامپوزیتهای پیش‌گفته، به شرح این موضوع پرداخته می‌شود. اولین نمونه از بتن آغشته به پلیمر در آزمایشگاه ملی بروکاون در سال ۱۹۶۵ تولید شد و اولین اندازه‌گیری خواص فیزیکی و دوام آن در سال ۱۹۶۶ در ایالات متحده صورت گرفت. رسیدن به استحکام فشاری برابر $1410\ kg/cm^2$ و بهبود چشمگیر مقاومت بتن در برابر یخ زدن و ذوب شدن جهش بزرگی را در این عرصه پدید آورد. بنا به دلایل تاریخی، از ۲۰۰۰ سال قبل از میلاد تا اواخر دهه ۶۰ میزان استحکام فشاری بتن، از ۵۶ تا $353\ kg/cm^2$ و میزان دوام آن تنها در حد چند



شکل ۱ - نمایی از منافذ موجود در خمیر سیمان سخت شده [۱].

صد دوره یخ زدن و ذوب شدن ترقی داشته است. از سال ۱۹۶۵ به بعد اطلاعات زیادی در مورد فرایند و مواد مورد استفاده بدست آمده و کاربرد بتن آغشته به پلیمر در زمینه‌های گوناگون مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است [۳].

بحث

بتن آغشته به پلیمر

بتن عادی از سنگدانه‌هایی با ذرات ریز و درشت تشکیل می‌شود که در ماتریسی سخت توزیع شده‌اند. چون شن و ماسه از تخلخل کمی برخوردارند، بیشتر تخلخل بتن ناشی از فاز سیمانی آن است و به نسبت آب به سیمانی بستگی دارد که برای آبدهی و روان کردن بتن بکار می‌رود. منافذی که از این آب اضافی ناشی می‌شوند را منافذ مویین گویند. مقدار منافذ مویین در هر زمان بستگی به نسبت آب به سیمان اولیه و بلوغ یا میزان گیرش سیمان دارد. برای خمیری بالغ با مقدار آب به سیمان برابر ۰/۵، حجم منافذ مویین حدود ۰/۲۵ cm^3/g از خمیر خشک است. تخلخل دیگری نیز در سیمان بوجود می‌آید که بین محصولات آبدهی سیمان تشکیل می‌شود. این منافذ را منافذ ژلی نامند. منافذ ژلی ظریفتر از منافذ مویین بوده و در خمیر بالغ مقدار آنها به ۰/۱ cm^3/g می‌رسد. از این رو، میزان کل تخلخل موجود در فاز سیمان برابر ۰/۳۵ cm^3/g است. برای بتنی که حاوی ۳۵-۳۰ درصد سیمان است، حجم منافذ ۱۵ تا ۱۷ درصد کل بتن است. اگر فرض شود که کل منافذ بتن با پلیمر اشغال گردد، ۶ تا ۷ درصد از وزن بتن را پلیمر تشکیل خواهد داد. اغلب بتنها، به دلیل تغییر در ترکیب درصد اجزاء در حدود ۵ تا ۸ درصد پلیمر را در خود جای می‌دهند [۱،۳،۴]. در شکل ۱ نمایی از حفره‌های موجود در بتن پر نشده و بتن آغشته به پلیمر آمده است.

همان‌طور که از این شکل مشخص است، تمام حفره‌ها نمی‌توانند به وسیله مونومر پر شوند. عدم پرشدن تمام منافذ به دو دلیل عمده است: اول آنکه برخی از حفره‌ها مجزا بوده و به منافذ دیگر ارتباطی ندارند و دوم آنکه گاهی اندازه حفره به گونه‌ای نیست که مونومر بتواند درون آن نفوذ کند.

کاربردهای بتن آغشته به پلیمر

استفاده در واحدهای نمک‌زدا و کارخانه‌های تولید مواد شیمیایی

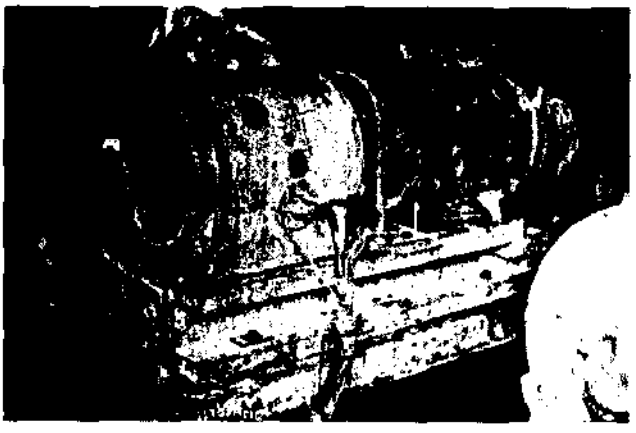
مقاومت بتن آغشته به پلیمر در برابر مواد شیمیایی، استفاده از آن را در چنین واحدهایی مجاز کرده است. شکل ۲ پایه پمپ یک کارخانه تولید کننده سولفوریک اسید را نشان می‌دهد که از بتن آغشته به پلیمر ساخته شده است [۵].

ساخت تیرهای تقویت شده معمولی یا تیرهای پیش‌ساخته

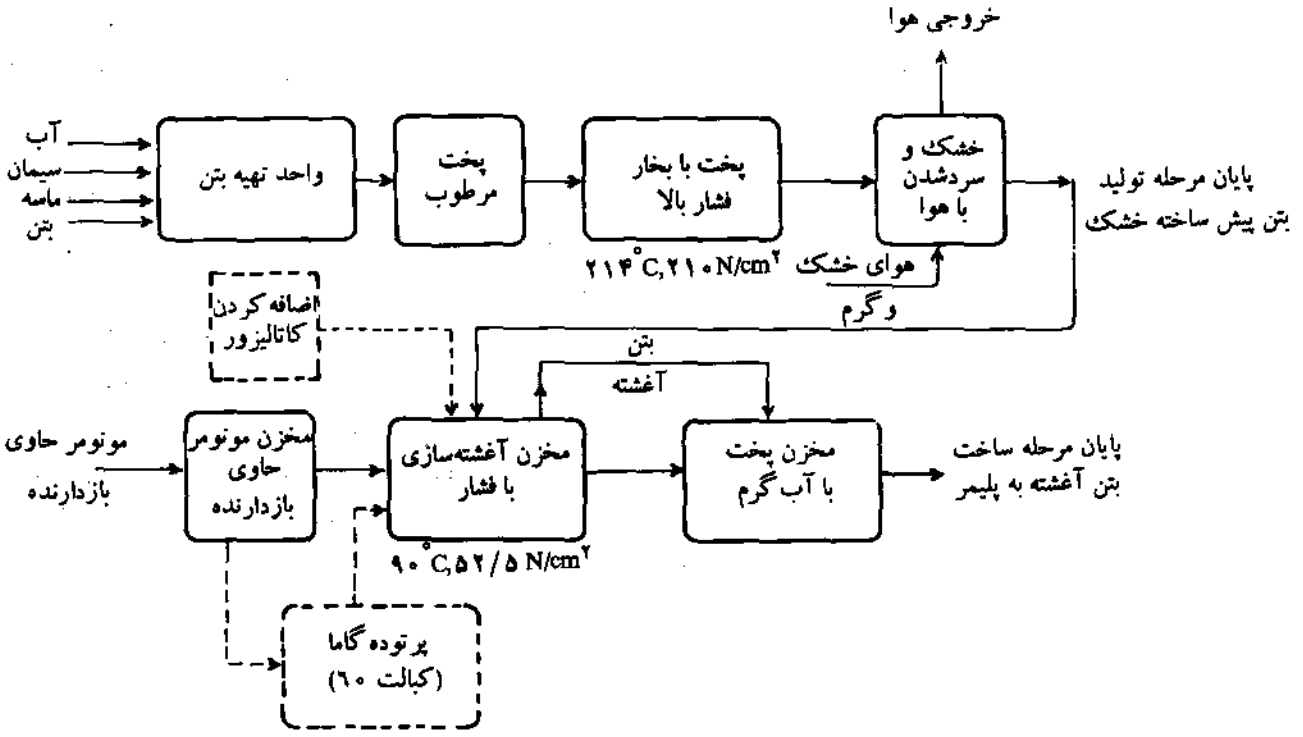
افزایش ۳۰۰ درصدی استحکام فشاری و کششی و بالا رفتن ۱۰۰ درصد سفتی بیانگر آن است که این ماده از توان بالقوه مناسبی جهت استفاده در تیرها، ستونها، اتصالات کف و سقف برخوردار است، بویژه اگر شرایط محیطی سخت بهره‌برداری از بتنهای معمولی را دچار اشکال کند.

استفاده در خروجی سدها، مخازن نفتی و سازه‌های درون آب و آسترتونلها

مخازن ساخته شده از بتن آغشته به پلیمر نسبت به بتن عادی از مقاومت فشاری و هیدروستاتیک بسیار بالاتری برخوردارند و از این رو، می‌توان از آنها در اعماق ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متری درون آب استفاده کرد. مخازن فوق قابلیت آن را دارند که در زیر دریا برای نگهداری زباله‌های راکتورهای اتمی یا به منزله سازه‌های نظامی به کار روند. بتن



شکل ۲ - پایه پمپ یک کارخانه تولید کننده سولفوریک اسید که از بتن آغشته به پلیمر ساخته شده است [۵].



شکل ۳ - طرحی از مراحل تولید بتن آغشته به پلیمر [۱].

عادی را در چنین اعماقی نمی‌توان بکار برد، زیرا نفوذپذیری آب به درون آن بیشتر از بتن آغشته به پلیمر بوده و از دوام کمتری نیز برخوردار است [۱،۶].

مواد شیمیایی بکار رفته

آغشته‌سازی بتن با مونومری مایع و به وسیله مکانیسم جریان گرانرو صورت می‌گیرد. از این رو، گرانروی مونومر عاملی محدود کننده است. در مقیاس وسیع و برای مقاطع ضخیم نیاز به مونومرهایی است که از گرانروی کمتری برخوردارند. از آنجا که این مونومرها فراریت بیشتری دارند و بتن در هنگام پلیمرشدن مونومر گرما می‌بیند و واکنش پلیمرشدن نیز گرماده است، مقداری از مونومر موجود در لایه‌های خارجی تلف می‌شود. بو، سمیت و اشتعال‌پذیری بسیاری از مونومرها نیز باعث عدم استفاده از آنها در ساخت قطعات کامپوزیتی یادشده می‌گردد. با این توضیحات مشخص است که مونومرهای زیادی وجود ندارند که واجد تمام شرایط پیش‌گفته باشند. عمدتا مونومرهایی که در ساخت بتنهای آغشته به پلیمر بکار می‌روند عبارتند از: متیل‌متاکریلات، استیرن، بوتیل آکریلات، آکریلونیتریل، متیل آکریلات و تری‌متیل پروپان تری متیل آکریلات.

از این مونومرها می‌توان به تنهایی یا مخلوط با یکدیگر استفاده کرد. در ضمن، سیستم پلی‌استرسیرنشده-استیرن برای ساخت این قطعات بسیار رایج است. اگرچه خواص بتنهای حاوی پلیمرهای اپوکسی نسبت به سایر مونومرها بهتر است، ولی به دلیل گرانی کمتر از آن استفاده می‌شود [۱]. برای سازه‌های بتنی که در معرض دماهای بالا، مثلا ۱۵۰°C، قرار می‌گیرند پلیمرهای شبکه‌ای شده (دارای پیوندهای عرضی) بر پلیمرهای غیر شبکه‌ای ترجیح دارند. از این رو، در این گونه موارد به یک عامل شبکه‌ای کننده نیز احتیاج است. تری‌متیل‌پروپان تری متیل آکریلات به عنوان عامل شبکه‌ای کننده عمل می‌کند و باعث کاهش زمان پلیمرشدن نیز می‌گردد [۱،۲].

آغازگرهایی که اغلب برای پلیمرشدن مونومر در بتن آغشته به پلیمر بکار می‌روند عبارتند از: ۲،۲ آزوبیس ایزوبوتیرونیتریل، بنزوئیل پروکسید، لوریل پروکسید و متیل‌اتیل‌کتون‌پروکسید. موادی نیز در کنار این آغازگرها برای بالابردن سرعت تجزیه آنها بکار می‌رود.

روش تولید بتن آغشته به پلیمر

روش تولید بتن آغشته به پلیمر بطور کلی از مراحل زیر تشکیل می‌شود: تهیه بتن پیش‌ساخته، خشک کردن بتن، آغشته‌سازی به مونومر و پلیمرشدن درجا. شکل ۳ نمایی از مراحل تولید این نوع بتن را نشان می‌دهد.

انواع بتن آغشته به پلیمر

با توجه به آنکه دوام بتن یا استحکام مکانیکی زیاد کدام یک مدنظر

باشد، عمق آغشته‌سازی را می‌توان کنترل و سیستمهای مونومری ویژه‌ای را فرمولبندی کرد. در این بخش انواع بتن آغشته به پلیمر موجود بطور مختصر بررسی می‌شوند.

بتن آغشته به پلیمر برای کاربرد در دماهای عادی

در این حالت، بتن از سیمان پرتلند نوع دوم، سنگدانه طبیعی با حداکثر اندازه ۱/۹ cm، نسبت آب به سیمان ۰/۵۱، اسلامپ (Slump) ۷/۶ cm و ۶ درصد هوای محبوس تشکیل می‌شود. سیستمهای مونومری نیز عبارتند از: متیل متاکریلات، استیرن، آکریلونیتریل، کلرواستیرن و سیستم متیل‌متاکریلات-تری‌متیل‌پروپان‌تری‌متیل آکریلات و پلی‌استر- استیرن. پلیمرشدن نیز به کمک پرتودهی یا با استفاده از کاتالیزور و گرمادهی صورت می‌گیرد.

بتن آغشته به پلیمر برای کاربرد در سیستمهای نمک‌زدا

این ماده برای استفاده در سیستمهای تقطیر آب دارای نمک طراحی شده و لازم است تا دمای ۱۴۳°C در تماس با آب مقطر و آب نمک مقاوم باشد. در این حالت نیز می‌توان از بتن پیش‌گفته استفاده کرد، ولی ماکسیمم اندازه سنگدانه باید به ۳/۸ cm تغییر یابد، استفاده از بتن با استحکام زیاد همراه با سنگدانه‌های مرغوب، سیمان پرتلند نوع پنجم و پوزولان (Pozzolan) نیز توصیه می‌شود. دو سیستم مونومری استیرن-تری‌متیل پروپان تری متیل‌آکریلات با مقادیر ۶۰-۴۰ و ۷۰-۳۰ وزنی نیز برای این کاربرد پیشنهاد می‌شود. پلیمرشدن سیستمهای مونومری نیز با استفاده از کاتالیزور و گرمادهی انجام می‌شود.

بتن نیمه آغشته

این گونه بتن زمانی طراحی می‌شود که دوام بیش از استحکام مدنظر باشد. سیستم آغشته‌سازی همانند سیستم آغشته‌سازی کامل است، با این تفاوت که سیستم مونومری به گونه‌ای فرمولبندی می‌شود که بتوان عمق نفوذ آن را کنترل کرد. مونومر باید توان آن را داشته باشد تا بطور موثر سطح بتن را آب‌بندی و به اندازه‌ای نفوذ کند که از جداشدن لایه‌های آغشته و در نتیجه ضعف ناخواسته جلوگیری به عمل آورد. برای دستیابی به این خواص از سیستمهایی با گرانروی بیشتر استفاده می‌کنند، تا بتوان عمق نفوذ را راحت‌تر در اختیار داشت. سیستمهای مونومری توصیه شده معمولا عبارتند از: پلی‌استر-استیرن، اپوکسی-استیرن و محلول پیش پلیمر متاکریلات [۷].

بتن سطح آغشته

این نوع بتن نیز شبیه بتن نیمه آغشته است با این تفاوت که تنها سطح بتن اصلاح می‌شود.

عملیات صحرایی برای تولید بتن آغشته به پلیمر

اگر عملیات ساخت بخواهد در محل کاربرد صورت گرفته و تجهیزات چندانی نیز در دسترس نباشد، می‌توان مراحل تولید بتن آغشته به پلیمر را به قرار زیر تنظیم کرد:

- پوشاندن نمونه بتنی با ورقی از پلی‌اتیلن تا بدین‌ترتیب، نمونه از برف و باران محافظت شده و سطح آن خیس نشود.
- خشک کردن سطح نمونه به مدت چند روز به کمک المانهای الکتریکی.
- برداشتن المانهای الکتریکی و پوشاندن نمونه با ماسه‌های ریز و سبک‌وزنی که قبلا در آون خشک شده‌اند در مرحله بعد صورت گرفته و ضخامت این پوشش حدود ۰/۶۴ cm درنظر گرفته می‌شود. این پوشش ماسه‌ای میزان تبخیر مونومر را به حداقل می‌رساند.
- پاشیدن اولیه ۲ تا ۳ L از سیستم مونومری روی تخته‌های بتنی به سطح تقریبی ۱ m^2.
- پوشاندن سطح بتن با ورقی از پلی‌اتیلن جهت ممانعت بیشتر از عمل تبخیر.
- ایجاد سایه بر سطح نمونه‌ها تا از بالارفتن دما جلوگیری به عمل آمده و پلیمرشدن ناخواسته در زمانی که هنوز نفوذ مونومر بطور کامل انجام نشده است، صورت نگیرد.
- پاشیدن مونومر اضافی به صورت دوره‌ای بر سطح ماسه‌ها تا این سطح، خیس و مرطوب باقی بماند. حداقل زمان لازم برای خیساندن، مدت ۸ ساعت است.
- گرمادهی برای شروع عمل پلیمرشدن.

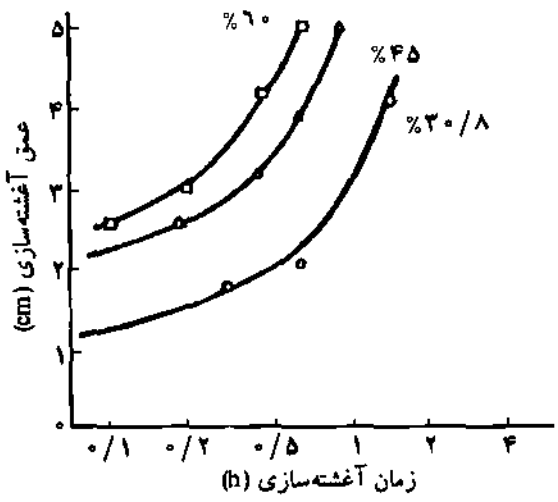
اثر پارامترهای مختلف بر خواص نهایی بتن آغشته به پلیمر

اثر مرغوبیت بتن

هرقدر نسبت آب به سیمان بالاتر باشد، زمان آغشته‌سازی کمتر شده و عمق نفوذ بیشتر خواهد شد. این مسئله را می‌توان به اثر نسبت آب به سیمان در تغییر شعاع متوسط منافذ ریز موجود در بتن نسبت داد [۵]. شکل ۴ نشان می‌دهد که هرقدر نسبت آب به سیمان بیشترگردد، زمان لازم‌برای نفوذ مونومر به درون بتن کاهش می‌یابد و عمق آغشته‌سازی افزون می‌شود. مطالعات‌نشان می‌دهد که عمق آغشته‌سازی از معادله زیر بدست می‌آید:

$$I = (\frac{r}{2}\sqrt{2})(t/\eta)^{0.5}[(4\gamma\cos\theta/r)+P]^{0.5} \qquad (1)$$

که در آن I عمق آغشته‌سازی، r شعاع منافذ، t زمان آغشته‌سازی، η



شکل ۴ - اثر نسبت آب به سیمان بر سرعت آغشته‌سازی [۵].

گرانروی مونومر، θ زاویه تماس، γ کشش سطحی و P فشار اعمال شده است.

با توجه به شکل ۴ و معادله ۱ اندازه متوسط منافذ برای نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، ۱/۶ برابر و برای نسبت آب به سیمان ۰/۶ حدود ۲ برابر حالتی است که نسبت آب به سیمان ۰/۳۰۸ باشد. ولی، مقدار مطلق اندازه منافذ را نمی‌توان جز با داشتن مقدار دقیق ضریب پیچاپیچی (tortuasity factor) منافذ بدست آورد. حداقل شعاع لازم برای آغشته‌سازی نیز از معادله زیر بدست می‌آید:

$$r = -2\gamma\cos\theta/P \qquad (2)$$

مثلا، جایگذاری مقدار کشش سطحی متیل‌متاکریلات در معادله بالا، حداقل قطر منافذ ریز موجود را در حد دهها میکرون و یا چندهزار آنگستروم بدست می‌دهد [۵].

درضمن، استحکام فشاری بتن آغشته به پلیمر چندان بستگی به نوع بتن اولیه نداشته و حداکثر اندازه سنگدانه نیز اثر مهمی بر استحکام فشاری آن نخواهد داشت. آزمایشهای انجام گرفته روی نمونه‌های ساخته شده از ملات نیز همین مسئله را نشان می‌دهد. مقدار جذب آب، مقاومت در برابر یخ زدن و ذوب شدن و حمله اسیدها یا سولفاتها تحت تاثیر مرغوبیت بتن اولیه نیست و هزینه آماده‌سازی بتن بر خواص نهایی موثر است. سرعت خشک شدن و جذب مونومر نیز با کاهش مرغوبیت بتن بیشتر می‌گردد. این مسئله بدین معنی است که بتن با مقاومت فشاری کمتر از سرعت خشک شدن و جذب مونومر بیشتری برخوردار است. در نتیجه، بتن نامرغوب پلیمر بیشتری درخود خواهد داشت. با توجه به آنکه تهیه بتن نامرغوب ارزان بوده و سرعت تهیه بتن آغشته به پلیمر آن نیز بیشتر است و از طرفی جذب مونومر آن بیشتر از بتن مرغوب است، باید موازنه اقتصادی بین این عوامل صورت گیرد [۶].

اثر پخت یا گیرش

سرعت خشک شدن و جذب مونومر با کاهش زمان پخت بتن افزایش می‌یابد. زیرا با افزایش میزان آبگیری از حجم منافذ مویین موجود در بتن که بزرگتر از منافذ ژلی، سنگدانه‌ای و حبابهای هواست، کاسته شده و بر حجم منافذ ژلی افزوده می‌شود. همین مسئله باعث می‌شود بتنی که بطور کامل پخت نشده است سریعتر خشک شده و سرعت و میزان جذب مونومر آن بیشتر باشد، زیرا در ابتدای گیرش بتن، میزان منافذ مویین پیوسته در آن بیشتراست. اما، این اثر در مدت زمانهای گیرش کم قابل ملاحظه‌تر بوده و پس از یک پخت هفت روزه از میزان اختلافهای موجود کاسته می‌شود [۸].

اثر خشک کردن

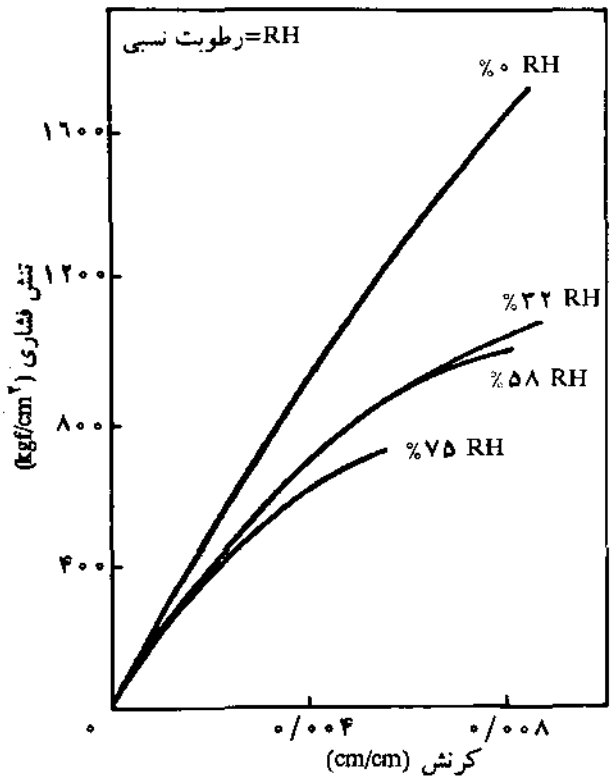
ماکسیمم استحکام، مدول و کرنش کشسانی وقتی بدست می‌آید که بتن اولیه کاملا خشک گردد، زیرا افزایش رطوبت اثر تخریبی بر خواص مکانیکی آن خواهد داشت. نظر بر این است که حتی مقدار کمی رطوبت بر میزان برهم‌کنش پلیمر و خمیر سیمانی اثر منفی می‌گذارد و از میزان چسبندگی می‌کاهد [۵،۸،۹].

بارگیری بیشتر مونومر نیز به هنگام خشک کردن در دماهای بالاتر قابل دستیابی است و بویژه این مسئله هنگامی که بتن در مدت زمان کمتری پخت شود چشمگیرتر است. خشک کردن شدید بتن با استفاده از گرمای زیاد، حتی اگر منجر به ایجاد ترکهایی در نمونه گردد، تنشهای متمرکز درون بتن را آسوده می‌کند، که در نهایت، این ترکها به وسیله پلیمر پر می‌شود و از این رو اثر منفی از خود برجای نخواهد گذاشت. شکل ۵ گواهی بر اثر تخریبی رطوبت بر خواص مکانیکی بتن آغشته به پلیمر است.

اثر لفاف‌پیچی

استفاده از ورقهای پلی‌اتیلن و آلومینیم: مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از ورق دو لایه پلی‌اتیلن نتایج خوبی را در زمینه جلوگیری از عمل تبخیر و اتلاف مونومر بوجود نمی‌آورد [۸]. ورق دولایه آلومینیم بسیار بهتر عمل می‌کند، ولی در هنگام پیچاندن بتن درون آن باید دقت لازم به عمل آید تا کوچکترین سوراخی ایجاد نشود. زیرا، وجود همان سوراخ کوچک سبب تبخیر مونومر شده و در نهایت نیز شرایط سطح نمونه را از حالت یکنواخت خارج می‌کند. با این وصف، میزان ۷ تا ۱۰ درصد از مونومر بارگیری شده تبخیر خواهد شد.

استفاده از ظروف فولادی: پلیمرشدن درون بخار مونومر سیرشده



شکل ۵ - اثر خشک کردن بر منحنیهای تنش-کرنش ملات آغشته به متیل‌متاکریلات [۹].

موجود در ظرف فولادی نیز بین ۵ تا ۱۰ درصد از مونومر اولیه را تلف‌می‌کند. درضمن، باید بین نمونه و ظرف فولادی فاصله انداخت تا در هنگام پلیمرشدن مونومر، نمونه به ظرف نچسبد. این روش کارایی بیشتری نسبت به روش اول دارد.

استفاده از حمام آب داغ: در این روش نیز حدود ۵ تا ۱۰ درصد از مونومر تلف می‌شود و نسبت به روش قبل از این لحاظ برتری چندانی ندارد، ولی نیاز به نیروی کارگری کمتری است. در این سیستم، لایه‌ای نازک به ضخامت کمتر از یک میلیمتر از سطح خارجی نمونه‌ها عاری از پلیمر خواهد شد. ظاهرا مقداری از مونومر قبل از عمل پلیمرشدن از سطح نمونه تبخیر شده و یا درون آب حل می‌شود. سطح نمونه‌های پلیمر شده در این حالت کمی تیره‌تر از سطح نمونه‌های بتن عادی است [۸،۱۰].

اثر روش آغشته‌سازی

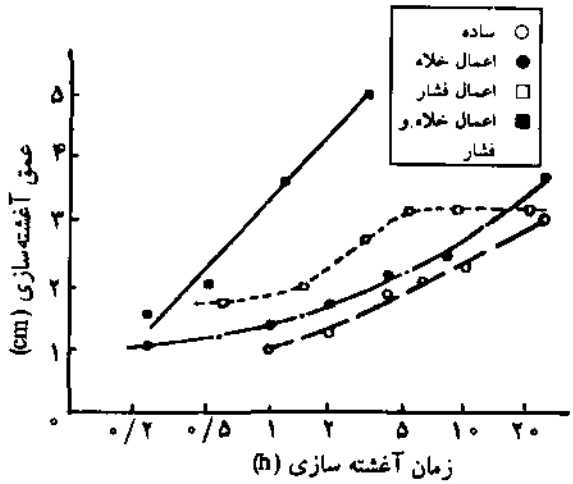
از میان چهار روش خیساندن ساده نمونه بتنی، آغشته‌سازی تحت فشار، آغشته‌سازی با استفاده از خلاء و اعمال خلاء و سپس آغشته‌سازی بتن تحت فشار بهترین نتیجه از روش آخر حاصل می‌شود [۵،۱۰]. شکل ۶ کارایی بیشتر روش چهارم را نسبت به سایر روشها نشان می‌دهد. اثر اعمال فشار بر سرعت نفوذ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و اگر فشار از حدی بحرانی پایینتر نگه داشته شود، زمان آغشته‌سازی بسیار طولانی خواهد شد. اما، یکی از مضرات آغشته‌سازی تحت فشار بدون عمل تخلیه آن است که هوا درون بتن محبوس گشته و با کاهش فشار به شرایط اتمسفری، از مقدار مونومر بارگیری شده کاسته می‌شود، زیرا هوایی که به دلیل اعمال فشار درون منافذ فشرده شده است، با کاهش فشار منبسط می‌گردد [۱۰]. اعمال خلاء قبل از بارگیری مونومر درون بتن تحت فشار، بهترین نتایج را به بار آورده و میزان بارگیری مونومر را تا ۳۰ درصد افزایش می‌دهد [۲].

اثر زمان آغشته‌سازی

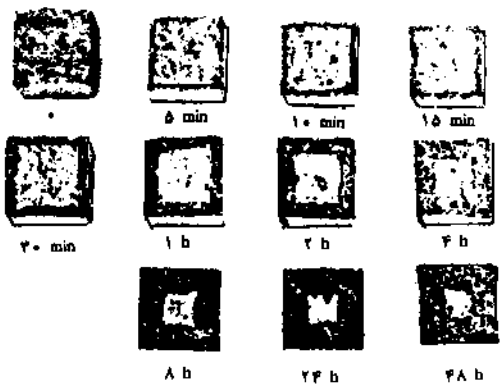
سوپلر و همکاران اثر زمان آغشته‌سازی را بر میزان نفوذ مونومر درون بتن مطالعه کرده‌اند. نمونه‌های بتنی مورد استفاده آنها مکعبهایی به ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰cm بوده که به مدت ۷ روز درون آب، گیرش حاصل کرده و سپس در دمای ۱۵۰°C به مدت ۹۶ ساعت خشک شده است. نمونه‌ها پس از آغشته‌سازی در زمانهای مختلف، در آب داغ با دمای ۷۰°C به مدت ۱۸ ساعت پلیمر شده‌اند. در شکل ۷ اثر زمان بر میزان نفوذ مونومر آورده شده است. ملاحظه می‌گردد که جذب اولیه مونومر در نمونه خیلی سریع است، ولی بتدریج سرعت نفوذ کاهش می‌یابد، بطوری که تقریبا ۳۸ درصد از میزان مونومر جذب شده در ۴۸ ساعت، در ۵ دقیقه اول جذب می‌شود و پس از ۸ ساعت به ۹۵ درصد از کل میزان جذب می‌رسد [۸].

روشهای گرمادهی برای عمل پلیمرشدن

انرژی خورشیدی: این روش از نقطه‌نظر اقتصادی قابل تعمق است، ولی



شکل ۶ - اثر روش بکار رفته بر سرعت آغشته‌سازی بتن (خلاء اعمال شده ۲۰ mm Hg و فشار ۴ kg/cm² بوده است) [۵].



شکل ۷ - اثر زمان آغشته‌سازی بر میزان نفوذ مونومر متیل‌متاکریلات به درون مکعبهایی با ابعاد cm ۱۰×۱۰×۱۰ [۸].

متغیرهای آن را نمی‌توان کنترل کرد. مقدار رطوبت موجود در هوا، وجود ابر در آسمان و دمای متغیر هوا بر زمان و چگونگی پخت کاملاموثر است و با غروب آفتاب یا پوشانده شدن خورشید به وسیله ابر دمای بتن بشدت پایین می‌آید. درضمن، ماههای خاصی از سال می‌توان به دمای موردنظر برای پلیمرشدن مونومر دست یافت[۱۱].

استفاده از سیستمهای مونومری فعال: استفاده از پوششی که فعالتر بوده و بتواند تامین کننده گرمای لازم برای پلیمرشدن باشد، نیز معمول است. مثلا، سیستمی فعال از مونومر متیل متاکریلات، ۴ درصد لوریل پروکسید و ۴ درصد N، N دی‌متیل پاراتولوئیدین تهیه شد و بر سطح نمونه‌ای که قبلا توسط مخلوط متیل‌متاکریلات، بنزوئیل پروکسید و تری‌متیل پروپان تری متیل آکریلات سیر شده بود، اعمال گردید. این عمل مدت زمان پلیمرشدن را به ۲ ساعت کاهش داد. گاهی، علاوه بر اعمال این پوشش بر سطح بتن آغشته شده از منابع تولید گرما نیز بهره می‌برند.

استفاده از پتوهای گرم‌کننده: از این وسیله که دیر زمانی است در شرایط آب و هوایی سرد برای گیرش بتن استفاده می‌شود نیز بهره می‌جویند. اما زمان رسیدن به دمای لازم جهت پلیمرشدن (حدود ۶۰°C) زیاد است و این مسئله باعث می‌شود تا مقدار زیادی مونومر برای خیس نگه‌داشتن سطح بتن به مصرف برسد. با این اوصاف پلیمرشدن صورت می‌گیرد و می‌توان این روش را یکی از راههای پلیمرشدن مونومر درون بتن دانست.

استفاده از بخار: در این روش روی نمونه‌های مکعب مستطیلی شکل بتن پس از آغشته‌شدن به مونومر بخار افشانده شده و انرژی لازم برای شروع پلیمرشدن به کمک گرمادهی با بخار تامین می‌شود. از معایب این روش تبخیر مقادیر زیادی از مونومر است. حتی استفاده از پوششهای ماسه‌ای، ورقهای فلزی و پلی‌اتیلنی نیز جهت جلوگیری از تبخیر مونومر موفقیت‌آمیز نبوده است [۱۱].

استفاده از امواج پرانرژی: مزیت اصلی پلیمرشدن به کمک پرتودهی آن است که فرایند در دمای معمولی صورت می‌گیرد و اتلاف مونومر از راه تبخیر آن حداقل خواهد بود. در این حالت، نیازی به استفاده از کاتالیزور در سیستم مونومری نبوده و بازیابی مونومر راحت‌تر صورت می‌گیرد، ولی تهیه منبع ایجاد پرتو، ایمن‌سازی و جلوگیری از صدمات ناشی از آن پرهزینه خواهد بود [۲،۱۱].

استفاده از آب داغ: موفق‌ترین روش پلیمرشدن استفاده از آب داغ با دمای تقریبی ۹۰°C است [۱،۱۱]. در این روش، پس از گذشت مدت زمان لازم جهت خیساندن نمونه‌ها، ورقی از پلی‌اتیلن روی نمونه کشیده شده و به وسیله قابی که به‌دور تخته بتنی گذاشته می‌شود محکم می‌گردد. سپس نمونه‌ها درون آب گذاشته می‌شود که عمق آب روی آن به چند سانتیمتر می‌رسد. در این حالت نیز دمای سطح تخته همیشه بسیار پایینتر از دمای آب داغ است.

خواص پلیمر درون بتن

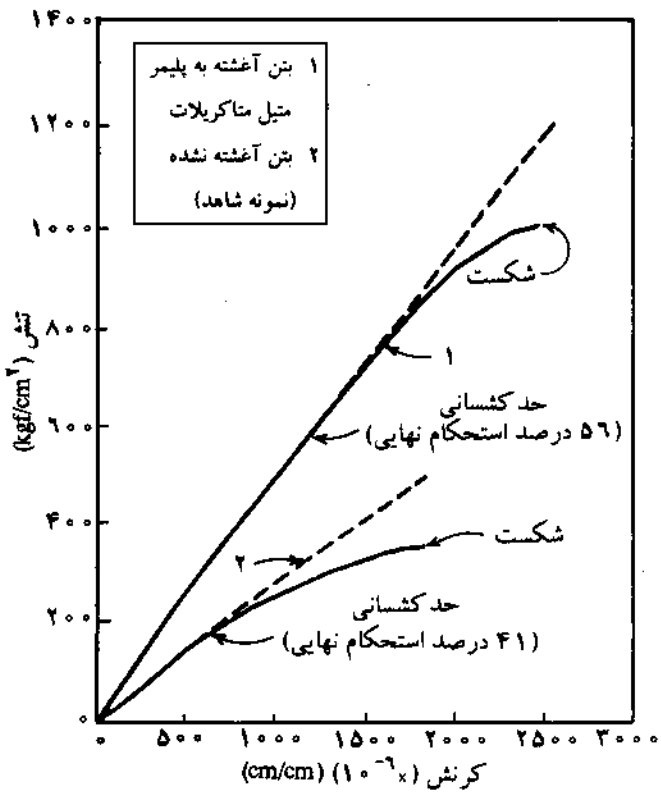
صورت‌بندی

تازاوا و کوبایاشی [۵] با استفاده از حلال متیل‌اتیل کتون، پلی‌متیل متاکریلات تشکیل شده در بتن آغشته به پلیمر را در سوکسله استخراج کرده و مقدار پلیمر استخراج شده را در متانول ریخته‌اند تا رسوب کند. پس از گذراندن پلیمر از صافی و شستشو با متانول و خشک کردن آن به مدت ۲ ساعت در دمای ۶۰°C ملاحظه کردند که مقدار پلیمر استخراج شده برابر ۶۰ درصد بوده و این مقدار نمی‌تواند از ۷۰ درصد تجاوز کند. این امر بیانگر پیوند شیمیایی یا مکانیکی قوی بین ماتریس سیمانی و پلیمر است. با مطالعات NMR مشخص شده است که پلی‌متیل متاکریلات، همان‌گونه که در پلیمرشدن توده در مجاورت آغازگر رادیکالی پلیمری با ساختار بی‌نظم تولید می‌کند، در این حالت نیز چنین ساختاری ایجاد خواهد کرد.

اثر دمای پلیمرشدن بر وزن مولکولی پلیمر

پلیمرشدن متیل متاکریلات درون بتن در دماهای مختلف ۶۰، ۷۰، ۸۰ و ۱۰۰°C صورت می‌گیرد و وزن مولکولی پلیمر تشکیل شده با روشهای اسمومتری و گرانروی‌سنجی ذاتی در ۲۰°C اندازه‌گیری می‌گردد. با توجه به آنکه رابطه بین وزن مولکولی متوسط عددی ($\bar{M}_n$) و گرانروی ذاتی $[\eta]$ برای پلی‌متیل متاکریلات از معادله زیر بدست می‌آید:

$$\bar{M}_n = ۲/۲۲ \times ۱۰^۵ [\eta]^{۱/۲۱۵} \qquad (۳)$$



شکل ۸- منحنی تنش-کرنش فشاری برای بتن آغشته به پلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات در مقایسه با بتن عادی (پلیمرشدن با پرتودهی و در دمای ۲۱ °C صورت گرفته است) [۷].

ملاحظه می‌شود که افزایش دمای پلیمرشدن باعث کاهش وزن مولکولی پلیمر می‌شود، به طوری که وزن مولکولی متوسط عددی در دمای ۶۰ °C حدود ۶/۵ برابر این وزن در دمای ۱۰۰ °C است. اندازه‌گیری وزن مولکولی متوسط عددی پلیمر استخراج شده از مرکز و سطح جانبی بتن اختلاف چندانی را در مقدار کاهش وزن مولکولی نشان نمی‌دهد [۵].

خواص بتن آغشته به پلیمر

استحکامهای فشاری، کششی و خمشی

استحکامهای فشاری، کششی و خمشی نمونه‌های بتن آغشته به پلیمر، ۴ برابر و مدول کشسانی آن تا ۲ برابر نمونه‌های بتنی عادی افزایش می‌یابد. علت تقویت خواص مکانیکی بتن آغشته به پلیمر کاملا واضح نیست، ولی با توجه به خواص پلیمر به تنهایی درباره اثر آن در بهبود خواص مکانیکی بتن می‌توان چنین نتیجه گرفت که پلیمر پیوند میان سنگدانه و سیمان را بهبود می‌بخشد و از راه جوش دادن شکستهای بسیار ریز از فرایند رشد ترک جلوگیری می‌کند. همچنین، سبب توزیع یکنواخت‌تر تنش و کرنش درون بتن می‌گردد. درضمن، پلیمر موجود در بتن انرژی را در خلال تغییر شکل جذب کرده و به شکل فازی پیوسته و تقویت کننده که به صورت اتفاقی آرایش یافته است عمل می‌کند [۱]. منحنی تنش-کرنش فشاری برای بتن آغشته به پلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات در شکل ۸ با بتن عادی مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که میزان خطی بودن و حد کشسانی بتن آغشته به پلیمر از بتن عادی بیشتر است و به ۵۶ درصد استحکام نهایی می‌رسد. در حالی که این مقدار برای بتن عادی ۴۱ درصد استحکام نهایی است. چقرمگی و مدول بیشتر نیز برای نمونه بتنی آغشته به پلیمر در این شکل پیداست [۷،۱۲].

مقاومت در برابر مواد شیمیایی

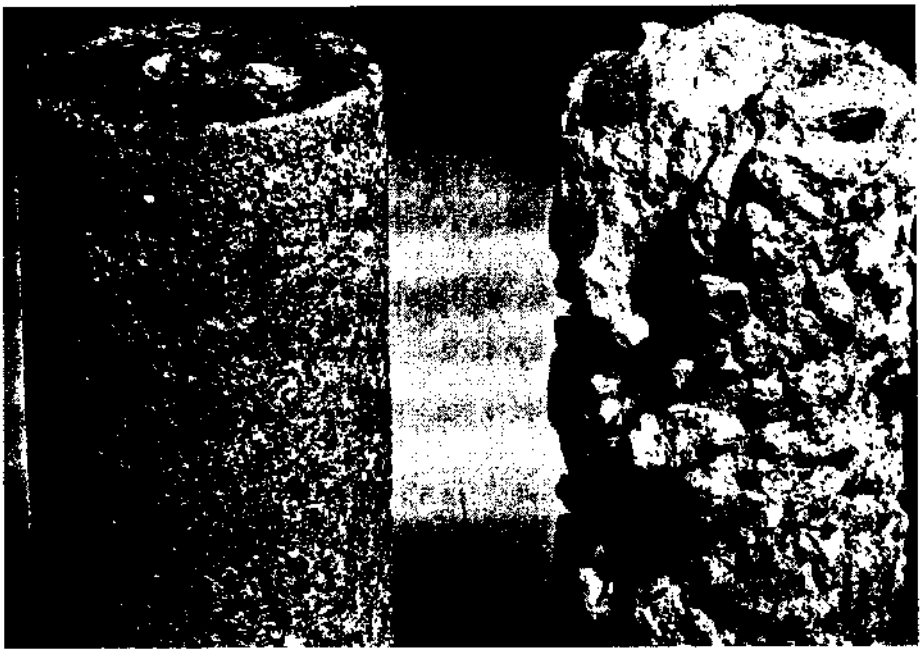
به دلیل کاهش نفوذپذیری بتن، مقاومت در برابر اسیدها به شدت زیاد می‌شود. نتایج آزمایشها نشان می‌دهد که استحکام فشاری بتن آغشته به پلیمری که در محلول کلریدریک‌اسید ۱۵ درصد قرار گرفته است بعد از گذشت ۴۰ دوره خشک و ترشدن ۱۲ درصد کاهش می‌یابد، در حالی که بتن عادی ۸۳ درصد از استحکام خود را از دست می‌دهد. در محلول ۱۵ درصد سولفوریک اسید، کاهش استحکام فشاری بتن آغشته به پلیمر حدود ۵۵ درصد است و بتن عادی ۸۰ درصد کاهش استحکام نشان می‌دهد [۱،۷]. در ضمن، مقاومت این بتنها در برابر سایر مواد شیمیایی چون سولفاتها، بازها، آب نمک، بورداغ و آب بدون سختی نیز بیش از بتن معمولی است [۱۳].

مقاومت در برابر دوره‌های یخ زدن و ذوب شدن

به دلیل کاهش میزان نفوذپذیری و عدم وجود منافذ کافی مقدار آبی که به درون بتن نفوذ کرده و یخ می‌زند بسیار کمتر شده، در نتیجه فروپاشی بتن به دوره‌های بسیار طولانیتری منتقل می‌شود [۷،۱۴،۱۵]. شکل ۹ نمایی از سطح بتن حاوی ۶ درصد وزنی پلی‌متیل‌متاکریلات و بتن عادی را نشان می‌دهد. پس از گذشت ۳۶۵۰ دوره یخ زدن و ذوب شدن تنها ۰/۵ درصد از وزن اولیه بتن آغشته به پلیمر کاسته شده، در حالی که پس از سپری شدن ۶۹۰ دوره، بتن عادی حدود ۲۶/۵ درصد از وزن اولیه خود را از دست داده و فروپاشی بتن آشکار شده است [۱۲].

سایر مزایای بتن آغشته به پلیمر نسبت به بتن عادی را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- تغییر شکل ناشی از خزش در بتن آغشته به پلیمر، ۱۰ برابر کمتر از بتن عادی است.
- مقاومت سایشی بتن آغشته به پلیمر از بتن معمولی بیشتر بوده و گاهی میزان سایش نصف بتن عادی است.
- نفوذپذیری بسیار ناچیز شده و تا ۹۹ درصد مقدار آن کاهش پیدا می‌کند.



شکل ۹ - آزمایش یخ زدن و ذوب شدن روی بتن حاوی ٦ درصد وزنی پلی‌متیل‌متاکریلات (چپ) و بتن عادی (راست) به ترتیب پس از سپری شدن ۳٦۵۰ و ٦۹۰ دوره [۱۲].

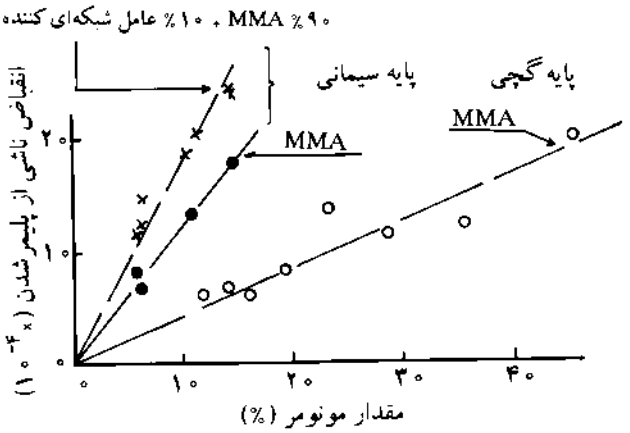
- ضریب انبساط گرمایی ۳۰ درصد و نفوذ گرمایی تا ۱۳ درصد بیشتر می‌شود.
- مقاومت در برابر ضربه آن بیشتر است.
- آب‌بندی منافذ، تغییردرخواصی چون ثابت واتلاف دی‌الکتریک راکه بسیار به مقدار رطوبت حساس‌اند به حداقل می‌رساند.
- گرمای ویژه تا ۱۷ درصد کم می‌شود [۱،۱۳].

اثر نرم‌کننده بر خواص بتن

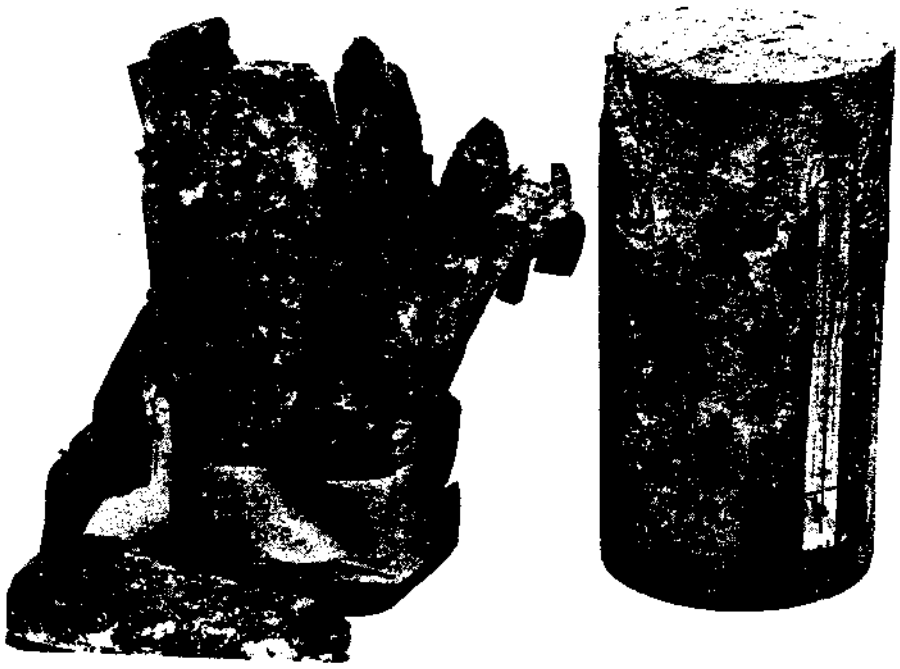
استفاده از درصدهای مختلفی از نرم کننده دی اکتیل فتالات به جای مونومر متیل‌متاکریلات نشان می‌دهد که استحکام خمشی و کششی نمونه‌های بتنی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. مقدار بهینه با بکارگیری ۵ درصد وزنی از دی اکتیل فتالات به جای متیل متاکریلات حاصل می‌شود. با این وصف برای موارد عملی و کاربردی، هیچ گاه این جایگزینی توصیه نمی‌شود، بویژه وقتی که دوام محصول مدنظر باشد. استحکام خمشی نمونه‌های حاوی دی‌اکتیل فتالات در مقایسه با نمونه‌های فاقد این ماده در تماس با محیطهای خارجی بشدت تحت تاثیر قرار می‌گیرد و پس از قریب ۲ سال تا حد $\frac{۱}{۳}$ مقدار اولیه افت می‌کند [۱،۵].

انقباض بتن

نمونه‌های بتنی آغشته به پلیمر در دو مرحله منقبض می‌شوند. انقباض، در ابتدا ناشی از خشک شدن و سپس به دلیل پلیمرشدن مونومر درون منافذ بتن است. انقباض ناشی از پلیمرشدن چند برابر مقدار حاصل از خشک شدن است و بستگی به مقدار مونومر درون منافذ و نوع آن دارد. استفاده از عوامل شبکه‌ای کننده بر میزان انقباض می‌افزاید. شکل ۱۰ مقدار انقباض حاصل از پلیمرشدن را بر حسب مقدار مونومر بارگیری شده برای سه حالت نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - انقباض ناشی از پلیمر شدن برای مخلوط ۹۰ درصد متیل متاکریلات و ۱۰ درصد عامل شبکه‌ای کننده در ماتریس سیمانی، متیل متاکریلات در ماتریس سیمانی و متیل متاکریلات در پایه گچی [۵].

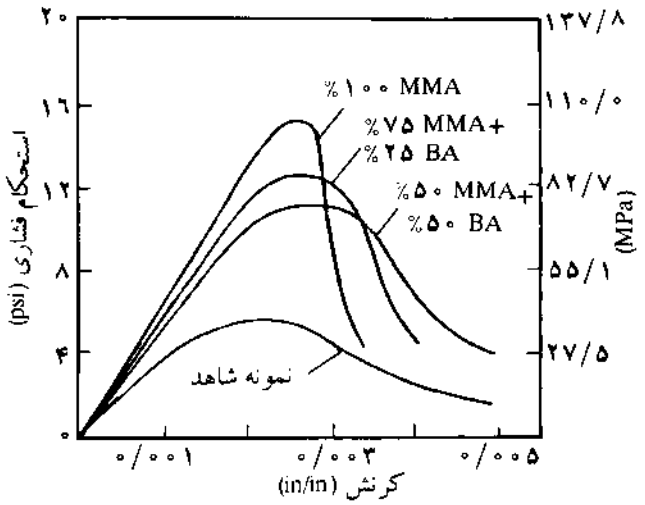


شکل ۱۱ - بتن آغشته به پلیمر (چپ) و بتن عادی (راست) پس از شکست (ابعاد استوانه cm ۱۵×۷/۵) [۳].

چگونگی شکست در بتن

رفتار شکست در بتن آغشته به پلیمر کاملا متفاوت با بتن عادی است. در این حالت ترکهای ریز در ۷۰ تا ۸۰ درصد از استحکام نهایی ظاهر می‌شوند، در حالی که در بتن عادی این ترکها در ۳۰ تا ۵۰ درصد از استحکام نهایی رخ می‌دهند. برای بتن آغشته به پلیمر، در این درصد از بار نهایی از شروع ترک خوردگی خبری نیست. حتی در بارهای خیلی زیاد نیز هیچ گونه ترکی در فصل مشترک خمیر-سنگدانه ملاحظه نمی‌شود. این مسئله حاکی از بهبود قابل ملاحظه‌ای است که در فصل مشترک مواد یادشده رخ داده است. آغاز ترک‌خوردگی در بتن آغشته به پلیمر از ملات شروع می‌شود و بسرعت پیش می‌رود. هنگام رسیدن ترک به سنگدانه اغلب شکاف با عبور از میان سنگدانه‌ها و به دو نیم کردن آنها پیش می‌رود، در حالی که در بتن عادی ترک از فصل مشترک سنگدانه و خمیر سیمانی می‌گذرد. از این رو، بتن آغشته به پلیمر رفتار شکننده‌ای دارد و به یکباره دچار شکست می‌شود [۹،۱۶]. شکل ۱۱ رفتار شکست نمونه بتن آغشته به پلیمر و بتن عادی را پس از انجام آزمایش نشان می‌دهد.

ماهیت شکننده بتن آغشته به پلیمر محدودیت شدید در طراحی را خاطر نشان می‌کند و مطلوب است که این رفتار اصلاح شود تا ماده‌ای بوجود آید که استحکام و مدول زیادی را همراه با خاصیت چکش‌خواری داشته باشد. یکی از راههای برطرف کردن این مشکل، تنظیم پیوند بین ماتریس و سنگدانه است، به گونه‌ای که شکست بتن آغشته به پلیمر همچون بتن عادی در این ناحیه رخ دهد. یک راه حل، استفاده از سنگدانه‌های چقرمه و مستحکم است. مثالی از این نوع سنگدانه، گلوله‌های فولادی است [۳]. استفاده از کوپلیمرشدن نیز راهی دیگر است. در این حالت از استحکام فشاری کاسته شده، ولی شکنندگی بتن نیز همگام با آن کم شده و کرنش شکست زیاد می‌شود.



شکل ۱۲ - منحنی تنش -کرنش برای بتن آغشته به پلیمر متیل متاکریلات و درصدهای مختلفی از متیل متاکریلات و بوتیل آکریلات [۱].

در شکل ۱۲ منحنی تنش-کرنش شکست بتن عادی در مقایسه با بتن حاوی پلیمر پلی‌متیل‌متاکریلات و درصدهایی از کوپلیمر متیل متاکریلات و بوتیل آکریلات آورده شده است. ملاحظه می‌شود که با افزایش مقدار بوتیل آکریلات در کوپلیمر از استحکام فشاری بتن آغشته به پلیمر و مقدار شکنندگی آن کاسته می‌شود و کرنش شکست زیاد می‌شود.

روش دیگر برای کاهش شکنندگی بتن آغشته به پلیمر استفاده از الیاف درون بتن است. الیاف معمولا بر مدول کامپوزیت اثر زیادی ندارند، زیرا درصدشان کم است، ولی چقرمگی را افزایش می‌دهند و پس از یک درصد کرنش، کامپوزیت هنوز بخش زیادی از استحکام خود را حفظ می‌کند. الیاف، آشکارا از رشد ترک در بتن آغشته به پلیمر به‌وسیله مکانیسم جذب انرژی جلوگیری می‌کنند [۳،۹،۱۶].

نتیجه‌گیری

وجود پلیمر درون بتن با اینکه کمی بر هزینه ساخت قطعات بتنی می‌افزاید، ولی مزایایی دارد که از این قرارند: افزایش استحکام فشاری، کششی و خمشی، مدول کشسانی و چقرمگی، کاهش نفوذپذیری و میزان خزش، افزایش مقاومت سایشی و مقاومت در برابر مواد شیمیایی بویژه بازها، اسیدها، آب نمک و سولفاتها. در ضمن، مقاومت زیاد بتن آغشته به پلیمر در برابر دوره‌های یخ زدن و ذوب شدن باعث افزایش دوام و کاهش هزینه تعمیرات و نگهداری بتن می‌شود و از این رو، افزایش هزینه را جبران می‌کند.از این کامپوزیت می‌توان در مکانهایی استفاده کرد که بتن عادی خوب عمل نمی‌کند. در ضمن، می‌توان این کامپوزیت را به عنوان ماده‌ای پیچیده، ولی با خصوصیات ویژه مدنظر قرار داد. این محصول از نظر کیفیت نیز بین بتن سنتی و سایر مواد مهندسی چون فلزات و انواع سرامیک قرار دارد.

مراجع

1 Feldman D.; *Polymeric Building Materials*; Elsevier Applied Science, USA, 1989.

2 Birchall J. D.; *Encyclopedia of Polymer Science and Engineering*; John Wiley & Sons, 3, 1985.

3 Steinberg M.; *Concrete Polymer Materials and its Worldwide Development*; American Concrete Institute, Detroit, 1973.

4 Neville A. M. and Brooks J. J.; *Concrete Technology*; Longman Scientific & Technical, UK, 1990.

5 Tazawa E. and Kobayashi S.; *Properties and Applications of Polymer Impregnated Cementitious Materials*; American Concrete Institutes, Detroit, 1973.

6 Albertson N. D. and Haynes H. H.; *Polymer Impregnated Concrete Spherical Hulls for Seafloor Structures;* American Concrete Institutes, Detroit, 1973.

7 Depuy G. U. and Dikeou J. T.; *Development of Polymer Impregnated Concrete as a Construction Material for Engineering Projects*; American Concrete Institute, Detroit, 1973.

8 Sopler B. Fiorato A. E. and Lenschow R.; *A Study of Partially Impregnated Polymerized Concrete Specimens*; American Concrete Institutes, Detroit, 1973.

9 Manning D. G. and Hope B. B.; *The Influence of Porosity and Partial Drying on Properties of Polymer Impregnated Mortar*; American Concrete Institutes, Detroit, 1973.

10 Kukacka L. E. and Romano A. J.; *Process Techniques for Producing Polymer Impregnated Concrete;* American Concrete Institutes, Detroit, 1973.

11 Fowler D. W., Houston J. T. and Paul D. R; *Polymer Impregnated Concrete Surface Treatments for Highway Bridge Decks*; American Concrete Institutes, Detroit, 1973.

12 Steinberg M.; *Concrete-Polymer Materials and its Worldwide Developments*; American Concrete Institutes, Detroit, 1973.

13 Dikeou, J. T.; *Review of Worldwide Developments and Use of Polymers in Concrete;* Proceedings of the First International Congress on Polymer Concretes, The Construction Press Ltd., Uk, 1976.

14 Dehghanian C.; *Islamic Republic of Iran J. Eng.*; **2**, 78, 1989.

15 Chaomin W., Defen X. and Yunbin H.; *New Field Impregnation Technology and its Effect on the Durability of PIC;* International Symposium in Cement and Concrete, China Building Industry Press, China, 1985.

16 Bharagava J. K.; *Radiographic Studies of the Structure of Polymer Impregnated Concrete;* American Concrete Institutes, Detroit, 1973.