



بتن مقاومت بالا با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب

وحید رحیمی^۱، قاسم میقانی^۲، علی کیهانی^۳

^۱کارشناس مهندسی عمران، جهاد دانشگاهی استان سمنان؛

Vahidrahimi1363@yahoo.comE-mail:

^۲فوق لیسانس عمران - سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود؛

ghasemmeyghani@gmail.com

^۳استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود؛

a_keyhani@hotmail.com

Vahidrahimi1363@yahoo.com

چکیده

در این مقاله به بررسی ساخت بتن مقاومت بالا با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب پرداخته خواهد شد. این پلیمرها کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف مانند کشاورزی، پزشکی و محیط زیست دارند. این مواد می‌توانند صدها برابر وزن خود آب جذب کنند. صنعت بتن نیز می‌تواند از این مواد به عنوان مواد مضاف در عمل‌آوری داخلی بتن استفاده کند. در این تحقیق پلیمر سوپر جاذب از نوع آ-۲۰۰ برای عمل‌آوری داخلی بتن و بررسی تاثیر آن بر مقاومت فشاری بتن مقاومت بالا مورد استفاده قرار گرفت. در گام اول بتن مقاومت بالا بدون استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب ساخته شد. سپس این پلیمرها به بتن اضافه شده و تاثیرات آن مورد مطالعه قرار گرفت. پلیمرها در دو حالت خشک و اشباع به مخلوط اضافه شدند. برای ساخت نمونه‌ها از قالبهای مکعبی $10 \times 10 \times 10$ cm استفاده شد. نتایج نشان دادند که استفاده از این پلیمرها در شرایط خشک و مقدار مشخص موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها و تولید بتن با مقاومت بالا می‌شود.

کلمات کلیدی: بتن، عمل‌آوری داخلی، بتن مقاومت بالا، پلیمرهای سوپر جاذب (SAP)، مقاومت فشاری.

۱. مقدمه

تحقیق و توسعه در زمینه بتن مقاومت بالا (HSC) و کاربرد آن در پروژه‌های ساختمانی و صنعتی به صورت روزافزون در حال گسترش است [۱-۳]. با توجه به کاربرد زیاد این نوع بتن در نقاط مختلف دنیا تعاریف مختلفی از آن وجود دارد. براساس تعریف ACI 363 بتن با مقاومت بالا بتنی است که دارای مقاومت فشاری بالاتر از 420 kg/cm^2 برای بتن ساخته شده از سنگدانه‌های معمولی و 280 kg/cm^2 برای بتن ساخته شده از سنگدانه‌های سبک می‌باشد [۴]. در کارگاه‌های آمریکای شمالی معمولاً به بتن‌های با مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیش از 42 MPa بتن با مقاومت بالا گفته می‌شود. بکارگیری بتن مقاومت بالا در سازه‌های عمومی و سازه‌های بلند به عنوان معیاری برای سنجش میزان پیشرفت کشورها به حساب می‌آید [۵]. از سال ۱۹۷۲ تا ۱۹۹۲ تنها در شهر شیکاگو بیش از ۳۰ ساختمان بلند با ستون‌هایی از بتن با مقاومت 62 MPa ساخته شده است. موارد مشابه بسیار بیشتری را نیز می‌توان در آمریکا و کانادا نام برد [۳]. یکی از مهمترین تفاوت‌ها بین ترکیبات بتن معمولی و بتن مقاومت بالا استفاده از مواد مضاف شیمیایی و معدنی است. این مواد برای کاربردهایی نظیر کاهش نسبت آب به سیمان، کاستن از میزان مصرف سیمان، بهبود خواص رئولوژیکی بتن و بهبود شرایط عمل‌آوری بتن می‌باشند. برای بتن‌های معمولی، یکی از روش‌های بسیار موثر عمل‌آوری مرطوب در مجاورت آب است. علاوه بر این، عمل‌آوری از طریق منابع آب داخلی نیز می‌تواند انجام شود. این نوع از عمل‌آوری که به عمل‌آوری داخلی معروف است در دهه ۹۰ رشد چشمگیری داشته است [۶]. مؤسسه RILEM عمل‌آوری داخلی را به این صورت تعریف نمود: عمل‌آوری داخلی اشاره دارد به وارد کردن یک ترکیب به داخل بتن، بطوریکه بتواند به عنوان یک ماده عمل‌آورنده در داخل بتن قرار گیرد. این ماده می‌تواند یا یک سنگدانه باشد که در شرایط ویژه‌ای وارد بتن شده است (مثل حالت اشباع) و یا یک افزودنی ویژه باشد [۶]. تعریفی که مؤسسه بتن آمریکا (ACI Committee 88) در مورد عمل‌آوری داخلی دارد، با تعریف ارائه شده توسط مؤسسه RILEM کمی متفاوت است. طبق این تعریف عمل‌آوری داخلی به فرایندی گفته می‌شود که عمل‌هیدراسیون به علت در دسترس بودن آب داخلی اضافی پیشرفت می‌کند که این آب قسمتی از آب مخلوط نمی‌باشد. عمل‌آوری داخلی یکی از انواع روش‌های عمل‌آوری بتن محسوب می‌شود که نیازی به عمل‌آوری به صورت خارجی نیست [۷]. این روش که به روش شیمیایی خود عمل‌آورنده معروف است، شامل اضافه کردن یک ماده حل‌شونده در آب نظیر پلیمرهای گلیکول (پلی اتیلن گلیکول) در طول فرایند مخلوط کردن بتن می‌باشد، که تبخیر آب از بتن سخت شده را به تأخیر می‌اندازد و یا کاهش می‌دهد. همچنین از اتلاف و جذب آب توسط لایه‌های زیرین بتن جلوگیری می‌کند. این افزودنی‌ها که شامل مواد حل‌شونده در آب هستند دارای گروه‌های هیدروکسیل می‌باشند که حفاظت آبی را در بتن ارتقاء داده و باعث بالا رفتن درجه هیدراسیون بتن می‌شوند. پیوند هیدروژنی که بین گروه‌های عاملی هیدروکسیل ایجاد می‌شود باعث افت فشار بخار آب و در نتیجه کاهش تبخیر آب خواهند شد. این مواد افزودنی مورفولوژی $C-S-H$ را تغییر می‌دهند و موجب کاهش قابلیت جذب بتن خواهند شد. مزیت‌های استفاده از این مواد زمانی مشهود است که نگهداری آب برای چنین مخلوط‌هایی، با بتن‌های معمولی مقایسه می‌شود که تمام نتایج حاکی از بهتر شدن شرایط می‌باشد. بتن‌های خود عمل‌آورنده در مقایسه با بتن‌های معمولی کمتر در معرض فرایند خود خشک‌شدگی قرار دارند. از طرفی در بتن‌های خود عمل‌آورنده شرایط هیدراسیون بهتر خواهد شد. این مطلب را هم می‌توان از مقایسه میزان نفوذ پذیری بتن‌های خود عمل‌آورنده با بتن‌های معمولی نتیجه گرفت زیرا که در این نوع از بتن‌ها میزان کاهش نفوذ پذیری با زمان بیشتر از بتن‌های معمولی است [۸]. در این مقاله تأثیر استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب که باعث عمل‌آوری داخلی بتن می‌شوند را بر ساخت بتن با مقاومت بالا بررسی کرده و به مطالعه مقاومت فشاری ملات‌های آزمایشگاهی که با فرایند عمل‌آوری داخلی در دو حالت پلیمر خشک و پلیمر اشباع در مقایسه با نمونه‌های بدون پلیمرهای سوپر جاذب پرداخته می‌شود.

۲. مصالح و مواد مصرفی

۲.۱. پلیمرهای سوپر جاذب

در این تحقیق به منظور بررسی امکان نگهداری داخلی بتن از سوپر جاذب $A200$ استفاده شده است. این سوپر جاذب نسبت به پلیمرهای مشابه خارجی از خواص تورمی و استحکام جالب توجهی برخوردار بوده، بطوریکه کیفیت بسیار بالای این سوپر جاذب و



همچنین ارزان بودن آن نسبت به پلیمرهای سوپرجاذب خارجی باعث گردیده بسیاری از شرکتهای تولید محصولات کشاورزی از آن استفاده کنند. با استفاده از روش سعی و خطا مقادیر مختلفی از آن مورد استفاده قرار گرفت تا مقدار مناسب برای استفاده در بتن بدست آید. در این آزمایشها، اضافه کردن این مواد در دو حالت خشک و اشباع انجام شد. همچنین برای کنترل شرایط نمونه ها و مقایسه با شرایط نرمال نمونه هایی بدون استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب ساخته شدند. در حالت خشک سوپرجاذبها قبل از اضافه کردن آب به مخلوط اضافه می شدند. در این حالت مقدار آب اضافه شده به مخلوط بیش از میزان مورد نیاز در نظر گرفته شده است. مقدار آب اضافی با این فرض به مخلوط افزوده شد که متوسط جذب آب توسط سوپرجاذبها با متوسط ذرات $125\mu m$ در مخلوطهای بتنی برابر $65g/g$ است. در حالت اشباع نیز طرح اختلاط هایی ساخته شد که در تمامی آنها میزان آب لازم برای اشباع 190 برابر وزن آن برآورد شده است. در این آزمایشها از سوپرجاذب مانده بر روی الک 100 و 140 با میانگین اندازه ذرات $125\mu m$ استفاده شد. در حالت خشک مقداری آب اضافه 0.05 برای اشباع سوپرجاذبها به مخلوط اضافه شد. در این حالت سوپرجاذبها بعد از تمام شدن آب به مخلوط اضافه می شدند و زمان مخلوط کردن 5 دقیقه در نظر گرفته شد تا فرصت کافی به سوپرجاذبها برای جذب آب داده شود. در حالت اشباع نیز با توجه به اینکه میزان جذب این مواد ($190g/g$) اندازه گیری شده بود، ابتدا آنها را اشباع کرده و بعد از اضافه کردن آب به مخلوط اضافه می شدند.



شکل ۱- پلیمر سوپرجاذب قبل (چپ) و بعد از جذب آب (راست)

برای تعیین میزان جذب آب سوپرجاذبها از دو آزمون روش کیسه چای و روش الک استفاده شد. نتایج بدست آمده از این روشها در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اختلاف نتایج بدست آمده از دو روش، تصمیم گرفته شد که از نتایج روش الک استفاده شود. علت این امر نزدیک بودن نتیجه این روش به میزان جذب نهایی $190 g/g$ (اعلام شده توسط تولید کننده) است. نسبت وزنی سوپرجاذبهای استفاده شده به وزن سیمان برابر 0.05 درصد می باشد.

جدول ۱- ظرفیت جذب سوپر جاذب A200

ظرفیت جذب	وزن نمونه با آب جذب شده	وزن کیسه مرطوب بدون نمونه	وزن نمونه اولیه	روش کیسه چای
$175/26$	$27/5$	$1/21$	$0/15$	وزن نمونه ۱
$179/26$	$37/06$	$1/21$	$0/2$	وزن نمونه ۲
ظرفیت جذب	وزن الک با نمونه اشباع شده	وزن الک مرطوب	وزن سوپر جاذب خشک	روش الک
$193/64$	$603/94$	$41/03$	$gr1$	



۲.۲. مصالح سیمانی

سیمان مورد استفاده در طرح اختلاط ها، سیمان تیپ II با چگالی ویژه 3 gr/cm^3 و نرمی 2 gr/cm^2 ۳۲۰۰ می باشد. میکروسیلیس استفاده شده در این تحقیق، میکروسیلیس شرکت فروسیلیس ایران بوده و دارای ۹۳/۶ درصد سیلیس می باشد.

۲.۳. فوق روان کننده

در این تحقیق از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر (مطابق با استاندارد ASTM C494) استفاده شد. این فوق روان کننده دارای رنگ شفاف مایل به قهوه ای روشن بوده و وزن مخصوص آن $1/02 \text{ kg/lit}$ می باشد. روش اضافه کردن فوق روان کننده به بتن کارایی و مقاومت آنرا تحت تأثیر قرار می دهد. روش مشخصی برای تعیین مقدار فوق روان کننده وجود ندارد و به ناچار باید به روش آزمون و خطا مقدار آن را تعیین کرد. اصولاً اگر مقاومت معیار اصلی باشد باید نسبت آب به سیمان را به حداقل ممکن رساند و بنابراین مقدار فوق روان کننده لازم، به حداکثر مقدارش می رسد. در کلیه طرح اختلاط های ساخته شده که در آنها از فوق روان کننده استفاده شده است. قبل از اضافه کردن آب، فوق روان کننده با آب مخلوط شده، و سپس همراه با آب به بتن اضافه می شود.

۲.۴. سنگدانه های مصرفی

سنگدانه های مورد استفاده در این تحقیق از نوع سیلیسی شکسته شده می باشد. دانه بندی و نسبت ترکیبات به صورت نسبت وزنی و بر اساس تجربیات گذشته انتخاب شدند. دانه بندی نمونه ها در حدود اندازه الک ۸ الی ۶۰ بر اساس استاندارد الک های ASTM انتخاب شده است. دانه های سیلیسی پس از شکستن و دانه بندی به دلیل ناخالصی زیاد شسته شده و پس از خشک کردن در آون و توزین بر اساس طرح اختلاط های مربوطه در ساخت ملات بکار می رفتند.

۲.۵. برنامه آزمایشگاهی

برای ساخت نمونه ها ابتدا سنگدانه های سیلیسی دانه بندی شده و با وزن مشخص را همراه با میکروسیلیس در حالت خشک در جام مخلوط کن ریخته شدند تا پس از مخلوط شدن در جام، میکروسیلیس سطح خارجی سنگدانه ها را بپوشاند. سپس سیمان به داخل مخلوط کن اضافه می شد. پس از اضافه کردن سیمان، مخلوط آب و فوق روان کننده به آرامی به مخلوط اضافه می شود (در مدت ۳ دقیقه). در این مدت میکسر با سرعت کم در حال چرخیدن بود. دمای آزمایشگاه در زمان ساخت تقریباً $20 \pm 2^\circ \text{C}$ برای تمام نمونه ها اندازه گیری شده است. نمونه های ساخته شده با SAP به دو صورت خشک و اشباع به مخلوط اضافه می شدند، در حالت خشک مقداری آب اضافه $((w/b)_e = 0.05)$ برای اشباع سوپر جاذبها به مخلوط اضافه می شد. در این حالت سوپر جاذبها بعد از تمام شدن آب به مخلوط اضافه می شدند. در این حالت زمان مخلوط کردن را به ۵ دقیقه رسانده تا فرصت کافی به سوپر جاذب ها برای جذب آب داده شود. در حالت اشباع نیز با توجه به اینکه میزان جذب آب این مواد (190 g/g) اندازه گیری شده بود، ابتدا آنها را اشباع کرده که میزان این آب اضافه شده در جدول شماره ۲ به صورت حاصل جمع همراه با نسبت آب به سیمان ارائه شده است. لذا پس از اشباع سوپر جاذبها در این آب به همراه نسبت آب به سیمان مربوط به آن طرح به مخلوط اضافه شدند. بعد از ریختن تمام مصالح در جام، مخلوط حاصل به داخل قالبهای $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ ریخته و در ۳ لایه همراه با ویریه متراکم شدند. بعد از ۲۴ ساعت قالبها را باز و نمونه ها را پس از توزین در شرایط محیطی معمولی عمل آوری می شدند. مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه اندازه گیری شده است. از هر طرح اختلاط ۲ نمونه ساخته و میانگین مقاومت فشاری آنها را گزارش شد.



برای سنجش تأثیر استفاده از مواد سوپر جاذب بر مقاومت فشاری، تمام نمونه‌های ساخته شده اعم از نمونه‌های بدون SAP و نمونه‌های حاوی SAP (در دو حالت پلیمر خشک و پلیمر اشباع با آب اضافه شده) در مجاورت هوا عمل آوری شدند. به این وسیله چون شرایط نگهداری برای تمامی نمونه‌ها یکسان است می‌توان امکان عمل آوری داخلی و اثر آن را بر نمونه‌های ساخته شده را مورد سنجش قرار داد. روشهای عمل آوری که در سطح آزمایشگاه استفاده می‌شود با شرایط عمل آوری در کارگاه تا حد زیادی متفاوت می‌باشد. شرایط عمل آوری در کارگاه معمولاً به صورت قرار گیری نمونه‌های در شرایط باز و یا عمل آوری تناوبی می‌باشد. به منظور اینکه بتوان حادثترین شرایط موجود برای عمل آوری را ایجاد نمود در طرح اختلاطهای ساخته شده، کلیه نمونه‌ها اعم از نمونه مرجع و نمونه سوپر جاذب دار در محیط باز و هوای باز بلافاصله بعد از قالب برداری قرار داده شدند.

۳. نتایج و بحث

هدف اصلی این تحقیق بررسی امکان استفاده از سوپر جاذبهای پلیمری (SAP) در ساخت بتن با مقاومت بالا بدون نیاز به عمل آوریهای متداول می‌باشد. تمرکز تحقیق بر بتن‌های با مقاومت بالا بوده است که انتظار می‌رود امکان استفاده از سوپر جاذبها بتواند منشأ تأثیرات و تحولات قابل ملاحظه‌ای در ساخت بتن باشد. این امکان از طریق مقایسه نمونه‌های شاهد نگهداری شده در شرایط محیطی با مقاومت نمونه‌های ساخته شده به وسیله سوپر جاذبها بررسی شده است. مقایسه انجام شده عمدتاً به منظور بررسی کیفی امکان جایگزینی سوپر جاذبها (نگهداری داخلی) به جای روشهای عمل آوری متداول (عمل آوری خارجی) انجام پذیرفته است و از بررسی پارامتریک اثر سوپر جاذبها پرهیز شده است. این بررسی پارامتریک موضوع تحقیق جداگانه‌ای می‌باشد. با در نظر گرفتن اینکه سوپر جاذبها عمدتاً در مقاومت خمیر سیمان تأثیر گذاشته و اثری بر روی مقاومت سنگدانه‌ها ندارد لذا با توجه به هدفهای بیان شده و هزینه بر بودن تهیه پلیمرها، تصمیم گرفته شد که آزمایشها بر روی نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ cm با سنگدانه‌های ریز انجام شود. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌هایی با طرحهای اختلاط متفاوت انجام گردید. در تهیه این مخلوطها از سوپر جاذبها در دو حالت خشک و اشباع استفاده شده است. نتایج بدست آمده با توجه به جدول شماره ۲ به شرح زیر در قسمت نتیجه گیری می‌باشد.

۴. نتیجه گیری

- ۱- استفاده از سوپر جاذبها به عنوان نگهداری داخلی بتن قابلیت جایگزینی روشهای متداول نگهداری بتن (نگهداری خارجی) را دارا می‌باشد.
- ۲- به منظور حفظ کارایی بتن باید طرحهای اختلاط از لحاظ میزان آب مصرفی اصلاح گردد.
- ۳- پلیمرهای A200 که در این تحقیق از آنها استفاده شد در اکثر موارد توانستند مقاومت فشاری نمونه‌ها را نسبت به ملاتهای مشابه که از این مواد برای ساخت آنها استفاده نمی‌شد بهبود بخشند.
- ۴- استفاده از این پلیمرها برای بتن‌هایی که شرایط عمل آوری خارجی را در مجاورت رطوبت ندارند توصیه می‌شود.
- ۵- بهتر است میزان مصرف این مواد در داخل بتن با توجه به میزان سیمان مصرفی تعیین شود. در این خصوص لازم است مطالعات پارامتریک بیشتری صورت گیرد.
- ۶- اضافه کردن پلیمرهای سوپر جاذب به صورت خشک نتایج مطلوب تری نسبت به اضافه کردن به صورت اشباع در پی خواهد داشت.



۷- در نمونه های با SAP خشک بیشترین مقاومت در نمونه هایی بدست می آید که کمترین میزان SAP مصرفی را دارند.

۸- در نمونه های حاوی SAP با افزایش مقدار سیمان مشاهده شد که مقاومت فشاری در نمونه ها کاهش پیدا کرد.

۹- در نمونه های که از SAP خشک برای عمل آوری داخلی آنها استفاده شده توصیه می شود حداقل مقدار سیمان برای حفظ مقاومت مطلوب مقدار 250 kg/m^3 در نظر گرفته شود.

۱۰- افزودن سوپر جاذب ها به صورت اشباع موجب کاهش کارایی بتن و پایین آمدن کیفیت آن می شد. این کاهش کیفیت به شکل جداشدگی خمیر سیمان از سنگدانه ها و کاهش چسبندگی می باشد.

جدول ۲- جزئیات طرح های اختلاط و مقاومت های فشاری

نوع	C (kg/m^3)	SAP (kg/m^3)	W/b	SF/C (%)	SP/C (%)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)		نوع	C (kg/m^3)	SAP (kg/m^3)	W/b	SF/C (%)	SP/C (%)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	
						۷ روزه	۲۸ روزه							۷ روزه	۲۸ روزه
بدون SAP	250	-	0.35	15	4.8	352	493	بدون SAP	415	-	0.35	15	1.69	310	411
SAP خشک	250	0.125	0.35+0.05	15	4.8	340	471	SAP خشک	415	0.2	0.35+0.05	15	1.69	420	532
SAP اشباع	250	0.125	0.35+0.039	15	4.8	139	300	SAP اشباع	415	0.2	0.35+0.063	15	1.69	255	322
بدون SAP	315	-	0.35	15	3.8	273	390	بدون SAP	415	-	0.3	18	1.2	459	544
SAP خشک	315	0.15	0.35+0.05	15	3.8	432	504	SAP خشک	415	0.25	0.3+0.05	18	1.2	461	590
SAP اشباع	315	0.15	0.35+0.062	15	3.8	250	402	SAP اشباع	415	0.25	0.3+0.077	18	1.2	249	371
بدون SAP	350	-	0.35	15	3.4	170	314	بدون SAP	498	-	0.3	15	1	430	502
SAP خشک	350	0.175	0.35+0.05	15	3.4	220	363	SAP خشک	498	0.25	0.3+0.05	15	1	412	653
SAP اشباع	350	0.175	0.35+0.065	15	3.4	165	275	SAP اشباع	498	0.25	0.3+0.066	15	1	501	607
بدون SAP	370	-	0.35	13	2.7	240	317	بدون SAP	570	-	0.3	2	-	522	545
SAP خشک	370	0.185	0.35+0.05	14	2.7	223	334	SAP خشک	570	5	0.3+0.05	2	-	428	592
SAP اشباع	370	0.185	0.35+0.066	14	2.7	179	271	SAP اشباع	570	5	0.3+1.1	2	-	337	402
بدون SAP	400	-	0.35	15	3	183	300	بدون SAP	727.1	-	0.35	15	0.69	340	498
SAP خشک	400	0.2	0.35+0.05	13	3	225	342	SAP خشک	727.1	0.76	0.35+0.05	15	0.69	493	537
SAP اشباع	400	0.2	0.35+0.066	13	3	144	277	SAP اشباع	727.1	0.76	0.35+0.136	15	0.69	270	363
بدون SAP	400	-	0.35	14	3	215	375	بدون SAP	758	-	0.32	15	0.66	404	657
SAP خشک	400	0.02	0.35+0.05	13	3	239	391	SAP خشک	758	0.76	0.32+0.05	15	0.66	483	624
SAP اشباع	400	0.02	0.35+0.066	13	3	241	310	SAP اشباع	758	0.76	0.32+0.131	15	0.66	351	301



بتن مقاومت بالا با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب

وحید رحیمی^۱، قاسم میقانی^۲، علی کیهانی^۳

^۱کارشناس مهندسی عمران، جهاد دانشگاهی استان سمنان؛

Vahidrahimi1363@yahoo.comE-mail:

^۲فوق لیسانس عمران - سازه، دانشگاه صنعتی شاهرود؛

ghasemmeyghani@gmail.com

^۳استادیار دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود؛

a_keyhani@hotmail.com

Vahidrahimi1363@yahoo.com

چکیده

در این مقاله به بررسی ساخت بتن مقاومت بالا با استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب پرداخته خواهد شد. این پلیمرها کاربردهای بسیاری در صنایع مختلف مانند کشاورزی، پزشکی و محیط زیست دارند. این مواد می‌توانند صدها برابر وزن خود آب جذب کنند. صنعت بتن نیز می‌تواند از این مواد به عنوان مواد مضاف در عمل‌آوری داخلی بتن استفاده کند. در این تحقیق پلیمر سوپر جاذب از نوع آ- ۲۰۰ برای عمل‌آوری داخلی بتن و بررسی تاثیر آن بر مقاومت فشاری بتن مقاومت بالا مورد استفاده قرار گرفت. در گام اول بتن مقاومت بالا بدون استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب ساخته شد. سپس این پلیمرها به بتن اضافه شده و تاثیرات آن مورد مطالعه قرار گرفت. پلیمرها در دو حالت خشک و اشباع به مخلوط اضافه شدند. برای ساخت نمونه‌ها از قالبهای مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ cm استفاده شد. نتایج نشان دادند که استفاده از این پلیمرها در شرایط خشک و مقدار مشخص موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها و تولید بتن با مقاومت بالا می‌شود.

کلمات کلیدی: بتن، عمل‌آوری داخلی، بتن مقاومت بالا، پلیمرهای سوپر جاذب (SAP)، مقاومت فشاری.

۱. مقدمه

تحقیق و توسعه در زمینه بتن مقاومت بالا (HSC) و کاربرد آن در پروژه‌های ساختمانی و صنعتی به صورت روزافزون در حال گسترش است [۱-۳]. با توجه به کاربرد زیاد این نوع بتن در نقاط مختلف دنیا تعاریف مختلفی از آن وجود دارد. براساس تعریف ACI 363 بتن با مقاومت بالا بتنی است که دارای مقاومت فشاری بالاتر از 420 kg/cm^2 برای بتن ساخته شده از سنگدانه‌های معمولی و 280 kg/cm^2 برای بتن ساخته شده از سنگدانه‌های سبک می‌باشد [۴]. در کارگاه‌های آمریکای شمالی معمولاً به بتن‌های با مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیش از 42 MPa بتن با مقاومت بالا گفته می‌شود. بکارگیری بتن مقاومت بالا در سازه‌های عمومی و سازه‌های بلند به عنوان معیاری برای سنجش میزان پیشرفت کشورها به حساب می‌آید [۵]. از سال ۱۹۷۲ تا ۱۹۹۲ تنها در شهر شیکاگو بیش از ۳۰ ساختمان بلند با ستون‌هایی از بتن با مقاومت 62 MPa ساخته شده است. موارد مشابه بسیار بیشتری را نیز می‌توان در آمریکا و کانادا نام برد [۳]. یکی از مهمترین تفاوت‌ها بین ترکیبات بتن معمولی و بتن مقاومت بالا استفاده از مواد مضاف شیمیایی و معدنی است. این مواد برای کاربردهایی نظیر کاهش نسبت آب به سیمان، کاستن از میزان مصرف سیمان، بهبود خواص رئولوژیکی بتن و بهبود شرایط عمل‌آوری بتن می‌باشند. برای بتن‌های معمولی، یکی از روش‌های بسیار موثر عمل‌آوری مرطوب در مجاورت آب است. علاوه بر این، عمل‌آوری از طریق منابع آب داخلی نیز می‌تواند انجام شود. این نوع از عمل‌آوری که به عمل‌آوری داخلی معروف است در دهه ۹۰ رشد چشمگیری داشته است [۶]. مؤسسه RILEM عمل‌آوری داخلی را به این صورت تعریف نمود: عمل‌آوری داخلی اشاره دارد به وارد کردن یک ترکیب به داخل بتن، بطوریکه بتواند به عنوان یک ماده عمل‌آورنده در داخل بتن قرار گیرد. این ماده می‌تواند یا یک سنگدانه باشد که در شرایط ویژه‌ای وارد بتن شده است (مثل حالت اشباع) و یا یک افزودنی ویژه باشد [۶]. تعریفی که مؤسسه بتن آمریکا (ACI Committee 88) در مورد عمل‌آوری داخلی دارد، با تعریف ارائه شده توسط مؤسسه RILEM کمی متفاوت است. طبق این تعریف عمل‌آوری داخلی به فرایندی گفته می‌شود که عمل‌هیدراسیون به علت در دسترس بودن آب داخلی اضافی پیشرفت می‌کند که این آب قسمتی از آب مخلوط نمی‌باشد. عمل‌آوری داخلی یکی از انواع روش‌های عمل‌آوری بتن محسوب می‌شود که نیازی به عمل‌آوری به صورت خارجی نیست [۷]. این روش که به روش شیمیایی خود عمل‌آورنده معروف است، شامل اضافه کردن یک ماده حل‌شونده در آب نظیر پلیمرهای گلیکول (پلی اتیلن گلیکول) در طول فرایند مخلوط کردن بتن می‌باشد، که تبخیر آب از بتن سخت شده را به تأخیر می‌اندازد و یا کاهش می‌دهد. همچنین از اتلاف و جذب آب توسط لایه‌های زیرین بتن جلوگیری می‌کند. این افزودنی‌ها که شامل مواد حل‌شونده در آب هستند دارای گروه‌های هیدروکسیل می‌باشند که حفاظت آبی را در بتن ارتقاء داده و باعث بالا رفتن درجه هیدراسیون بتن می‌شوند. پیوند هیدروژنی که بین گروه‌های عاملی هیدروکسیل ایجاد می‌شود باعث افت فشار بخار آب و در نتیجه کاهش تبخیر آب خواهند شد. این مواد افزودنی مورفولوژی $C-S-H$ را تغییر می‌دهند و موجب کاهش قابلیت جذب بتن خواهند شد. مزیت‌های استفاده از این مواد زمانی مشهود است که نگهداری آب برای چنین مخلوط‌هایی، با بتن‌های معمولی مقایسه می‌شود که تمام نتایج حاکی از بهتر شدن شرایط می‌باشد. بتن‌های خود عمل‌آورنده در مقایسه با بتن‌های معمولی کمتر در معرض فرایند خود خشک‌شدگی قرار دارند. از طرفی در بتن‌های خود عمل‌آورنده شرایط هیدراسیون بهتر خواهد شد. این مطلب را هم می‌توان از مقایسه میزان نفوذ پذیری بتن‌های خود عمل‌آورنده با بتن‌های معمولی نتیجه گرفت زیرا که در این نوع از بتن‌ها میزان کاهش نفوذ پذیری با زمان بیشتر از بتن‌های معمولی است [۸]. در این مقاله تأثیر استفاده از پلیمرهای سوپر جاذب که باعث عمل‌آوری داخلی بتن می‌شوند را بر ساخت بتن با مقاومت بالا بررسی کرده و به مطالعه مقاومت فشاری ملات‌های آزمایشگاهی که با فرایند عمل‌آوری داخلی در دو حالت پلیمر خشک و پلیمر اشباع در مقایسه با نمونه‌های بدون پلیمرهای سوپر جاذب پرداخته می‌شود.

۲. مصالح و مواد مصرفی

۲.۱. پلیمرهای سوپر جاذب

در این تحقیق به منظور بررسی امکان نگهداری داخلی بتن از سوپر جاذب $A200$ استفاده شده است. این سوپر جاذب نسبت به پلیمرهای مشابه خارجی از خواص تورمی و استحکام جالب توجهی برخوردار بوده، بطوریکه کیفیت بسیار بالای این سوپر جاذب و



همچنین ارزان بودن آن نسبت به پلیمرهای سوپرجاذب خارجی باعث گردیده بسیاری از شرکتهای تولید محصولات کشاورزی از آن استفاده کنند. با استفاده از روش سعی و خطا مقادیر مختلفی از آن مورد استفاده قرار گرفت تا مقدار مناسب برای استفاده در بتن بدست آید. در این آزمایشها، اضافه کردن این مواد در دو حالت خشک و اشباع انجام شد. همچنین برای کنترل شرایط نمونه ها و مقایسه با شرایط نرمال نمونه هایی بدون استفاده از پلیمرهای سوپرجاذب ساخته شدند. در حالت خشک سوپرجاذبها قبل از اضافه کردن آب به مخلوط اضافه می شدند. در این حالت مقدار آب اضافه شده به مخلوط بیش از میزان مورد نیاز در نظر گرفته شده است. مقدار آب اضافی با این فرض به مخلوط افزوده شد که متوسط جذب آب توسط سوپرجاذبها با متوسط ذرات $125\mu m$ در مخلوطهای بتنی برابر $65g/g$ است. در حالت اشباع نیز طرح اختلاطی ساخته شد که در تمامی آنها میزان آب لازم برای اشباع 190 برابر وزن آن برآورد شده است. در این آزمایشها از سوپرجاذب مانده بر روی الک 100 و 140 با میانگین اندازه ذرات $125\mu m$ استفاده شد. در حالت خشک مقداری آب اضافه 0.05 برای اشباع سوپرجاذبها به مخلوط اضافه شد. در این حالت سوپرجاذبها بعد از تمام شدن آب به مخلوط اضافه می شدند و زمان مخلوط کردن 5 دقیقه در نظر گرفته شد تا فرصت کافی به سوپرجاذبها برای جذب آب داده شود. در حالت اشباع نیز با توجه به اینکه میزان جذب این مواد ($190g/g$) اندازه گیری شده بود، ابتدا آنها را اشباع کرده و بعد از اضافه کردن آب به مخلوط اضافه می شدند.



شکل ۱- پلیمر سوپرجاذب قبل (چپ) و بعد از جذب آب (راست)

برای تعیین میزان جذب آب سوپرجاذبها از دو آزمون روش کیسه چای و روش الک استفاده شد. نتایج بدست آمده از این روشها در جدول ۱ ارائه شده است. با توجه به اختلاف نتایج بدست آمده از دو روش، تصمیم گرفته شد که از نتایج روش الک استفاده شود. علت این امر نزدیک بودن نتیجه این روش به میزان جذب نهایی $190 g/g$ (اعلام شده توسط تولید کننده) است. نسبت وزنی سوپرجاذبهای استفاده شده به وزن سیمان برابر 0.05 درصد می باشد.

جدول ۱- ظرفیت جذب سوپر جاذب A200

ظرفیت جذب	وزن نمونه با آب جذب شده	وزن کیسه مرطوب بدون نمونه	وزن نمونه اولیه	روش کیسه چای
$175/26$	$27/5$	$1/21$	$0/15$	وزن نمونه ۱
$179/26$	$37/06$	$1/21$	$0/2$	وزن نمونه ۲
ظرفیت جذب	وزن الک با نمونه اشباع شده	وزن الک مرطوب	وزن سوپر جاذب خشک	روش الک
$193/64$	$603/94$	$41/03$	$g31$	



سیمان مورد استفاده در طرح اختلاط ها، سیمان تیپ II با چگالی ویژه 3 gr/cm^3 و نرمی 2 gr/cm^2 ۳۲۰۰ می باشد. میکروسیلیس استفاده شده در این تحقیق، میکروسیلیس شرکت فروسیلیس ایران بوده و دارای $93/6$ درصد سیلیس می باشد.

۲.۳. فوق روان کننده

در این تحقیق از فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلیک اتر (مطابق با استاندارد ASTM C494) استفاده شد. این فوق روان کننده دارای رنگ شفاف مایل به قهوه ای روشن بوده و وزن مخصوص آن $1/02 \text{ kg/lit}$ می باشد. روش اضافه کردن فوق روان کننده به بتن کارایی و مقاومت آنرا تحت تأثیر قرار می دهد. روش مشخصی برای تعیین مقدار فوق روان کننده وجود ندارد و به ناچار باید به روش آزمون و خطا مقدار آن را تعیین کرد. اصولاً اگر مقاومت معیار اصلی باشد باید نسبت آب به سیمان را به حداقل ممکن رساند و بنابراین مقدار فوق روان کننده لازم، به حداکثر مقدارش می رسد. در کلیه طرح اختلاط های ساخته شده که در آنها از فوق روان کننده استفاده شده است. قبل از اضافه کردن آب، فوق روان کننده با آب مخلوط شده، و سپس همراه با آب به بتن اضافه می شود.

۲.۴. سنگدانه های مصرفی

سنگدانه های مورد استفاده در این تحقیق از نوع سیلیسی شکسته شده می باشد. دانه بندی و نسبت ترکیبات به صورت نسبت وزنی و بر اساس تجربیات گذشته انتخاب شدند. دانه بندی نمونه ها در حدود اندازه الک ۸ الی ۶۰ بر اساس استاندارد الک های ASTM انتخاب شده است. دانه های سیلیسی پس از شکستن و دانه بندی به دلیل ناخالصی زیاد شسته شده و پس از خشک کردن در آون و توزین بر اساس طرح اختلاط های مربوطه در ساخت ملات بکار می رفتند.

۲.۵. برنامه آزمایشگاهی

برای ساخت نمونه ها ابتدا سنگدانه های سیلیسی دانه بندی شده و با وزن مشخص را همراه با میکروسیلیس در حالت خشک در جام مخلوط کن ریخته شدند تا پس از مخلوط شدن در جام، میکروسیلیس سطح خارجی سنگدانه ها را بپوشاند. سپس سیمان به داخل مخلوط کن اضافه می شد. پس از اضافه کردن سیمان، مخلوط آب و فوق روان کننده به آرامی به مخلوط اضافه می شود (در مدت ۳ دقیقه). در این مدت میکسر با سرعت کم در حال چرخیدن بود. دمای آزمایشگاه در زمان ساخت تقریباً $20 \pm 2^\circ \text{C}$ برای تمام نمونه ها اندازه گیری شده است. نمونه های ساخته شده با SAP به دو صورت خشک و اشباع به مخلوط اضافه می شدند، در حالت خشک مقداری آب اضافه $(w/b)_e = 0.05$ برای اشباع سوپر جاذبها به مخلوط اضافه می شد. در این حالت سوپر جاذبها بعد از تمام شدن آب به مخلوط اضافه می شدند. در این حالت زمان مخلوط کردن را به ۵ دقیقه رسانده تا فرصت کافی به سوپر جاذب ها برای جذب آب داده شود. در حالت اشباع نیز با توجه به اینکه میزان جذب آب این مواد (190 g/g) اندازه گیری شده بود، ابتدا آنها را اشباع کرده که میزان این آب اضافه شده در جدول شماره ۲ به صورت حاصل جمع همراه با نسبت آب به سیمان ارائه شده است. لذا پس از اشباع سوپر جاذبها در این آب به همراه نسبت آب به سیمان مربوط به آن طرح به مخلوط اضافه شدند. بعد از ریختن تمام مصالح در جام، مخلوط حاصل به داخل قالبهای $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ ریخته و در ۳ لایه همراه با وایبره متراکم شدند. بعد از ۲۴ ساعت قالبها را باز و نمونه ها را پس از توزین در شرایط محیطی معمولی عمل آوری می شدند. مقاومت فشاری نمونه ها در سنین ۷ و ۲۸ روزه اندازه گیری شده است. از هر طرح اختلاط ۲ نمونه ساخته و میانگین مقاومت فشاری آنها را گزارش شد.

برای سنجش تأثیر استفاده از مواد سوپر جاذب بر مقاومت فشاری، تمام نمونه های ساخته شده اعم از نمونه های بدون SAP و نمونه های حاوی SAP (در دو حالت پلیمر خشک و پلیمر اشباع با آب اضافه شده) در مجاورت هوا عمل آوری شدند. به این



وسیله چون شرایط نگهداری برای تمامی نمونه‌ها یکسان است می‌توان امکان عمل‌آوری داخلی و اثر آن را بر نمونه‌های ساخته شده را مورد سنجش قرار داد. روش‌های عمل‌آوری که در سطح آزمایشگاه استفاده می‌شود با شرایط عمل‌آوری در کارگاه تا حد زیادی متفاوت می‌باشد. شرایط عمل‌آوری در کارگاه معمولاً به صورت قرارگیری نمونه‌های در شرایط باز و یا عمل‌آوری تناوبی می‌باشد. به منظور اینکه بتوان حادث‌ترین شرایط موجود برای عمل‌آوری را ایجاد نمود در طرح اختلاط‌های ساخته شده، کلیه نمونه‌ها اعم از نمونه مرجع و نمونه سوپر جاذب دار در محیط باز و هوای باز بلافاصله بعد از قالب برداری قرار داده شدند.

۳. نتایج و بحث

هدف اصلی این تحقیق بررسی امکان استفاده از سوپر جاذب‌های پلیمری (SAP) در ساخت بتن با مقاومت بالا بدون نیاز به عمل‌آوری‌های متداول می‌باشد. تمرکز تحقیق بر بتن‌های با مقاومت بالا بوده است که انتظار می‌رود امکان استفاده از سوپر جاذب‌ها بتواند منشأ تأثیرات و تحولات قابل ملاحظه‌ای در ساخت بتن باشد. این امکان از طریق مقایسه نمونه‌های شاهد نگهداری شده در شرایط محیطی با مقاومت نمونه‌های ساخته شده به وسیله سوپر جاذب‌ها بررسی شده است. مقایسه انجام شده عمدتاً به منظور بررسی کیفی امکان جایگزینی سوپر جاذب‌ها (نگهداری داخلی) به جای روش‌های عمل‌آوری متداول (عمل‌آوری خارجی) انجام پذیرفته است و از بررسی پارامتریک اثر سوپر جاذب‌ها پرهیز شده است. این بررسی پارامتریک موضوع تحقیق جداگانه‌ای می‌باشد. با در نظر گرفتن اینکه سوپر جاذب‌ها عمدتاً در مقاومت خمیر سیمان تأثیر گذاشته و اثری بر روی مقاومت سنگدانه‌ها ندارد لذا با توجه به هدف‌های بیان شده و هزینه بر بودن تهیه پلیمرها، تصمیم گرفته شد که آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ و با سنگدانه‌های ریز انجام شود. آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌هایی با طرح‌های اختلاط متفاوت انجام گردید. در تهیه این مخلوط‌ها از سوپر جاذب‌ها در دو حالت خشک و اشباع استفاده شده است. نتایج بدست آمده با توجه به جدول شماره ۲ به شرح زیر در قسمت نتیجه‌گیری می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

- ۱۱- استفاده از سوپر جاذب‌ها به عنوان نگهداری داخلی بتن قابلیت جایگزینی روش‌های متداول نگهداری بتن (نگهداری خارجی) را دارا می‌باشد.
- ۱۲- به منظور حفظ کارایی بتن باید طرح‌های اختلاط از لحاظ میزان آب مصرفی اصلاح گردد.
- ۱۳- پلیمرهای A200 که در این تحقیق از آنها استفاده شد در اکثر موارد توانستند مقاومت فشاری نمونه‌ها را نسبت به ملات‌های مشابه که از این مواد برای ساخت آنها استفاده نمی‌شد بهبود بخشند.
- ۱۴- استفاده از این پلیمرها برای بتن‌هایی که شرایط عمل‌آوری خارجی را در مجاورت رطوبت ندارند توصیه می‌شود.
- ۱۵- بهتر است میزان مصرف این مواد در داخل بتن با توجه به میزان سیمان مصرفی تعیین شود. در این خصوص لازم است مطالعات پارامتریک بیشتری صورت گیرد.
- ۱۶- اضافه کردن پلیمرهای سوپر جاذب به صورت خشک نتایج مطلوب تری نسبت به اضافه کردن به صورت اشباع در پی خواهد داشت.
- ۱۷- در نمونه‌های با SAP خشک بیشترین مقاومت در نمونه‌هایی بدست می‌آید که کمترین میزان SAP مصرفی را دارند.



۱۸- در نمونه‌های حاوی SAP با افزایش مقدار سیمان مشاهده شد که مقاومت فشاری در نمونه‌ها کاهش پیدا کرد.

۱۹- در نمونه‌های که از SAP خشک برای عمل‌آوری داخلی آنها استفاده شده توصیه می‌شود حداقل مقدار سیمان برای حفظ مقاومت مطلوب مقدار 250 kg/m^3 در نظر گرفته شود.

۲۰- افزودن سوپر جاذب‌ها به صورت اشباع موجب کاهش کارایی بتن و پایین آمدن کیفیت آن می‌شد. این کاهش کیفیت به شکل جداشدگی خمیر سیمان از سنگدانه‌ها و کاهش چسبندگی می‌باشد.

جدول ۲- جزئیات طرح‌های اختلاط و مقاومت‌های فشاری

نوع	C (kg/m^3)	SAP (kg/m^3)	W/b	SF/C (%)	SP/C (%)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)		نوع	C (kg/m^3)	SAP (kg/m^3)	W/b	SF/C (%)	SP/C (%)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	
						۷ روزه	۲۸ روزه							۷ روزه	۲۸ روزه
بدون SAP	250	-	0.35	15	4.8	352	493	بدون SAP	415	-	0.35	15	1.69	310	411
SAP خشک	250	0.125	0.35+0.05	15	4.8	340	471	SAP خشک	415	0.2	0.35+0.05	15	1.69	420	532
SAP اشباع	250	0.125	0.35+0.039	15	4.8	139	300	SAP اشباع	415	0.2	0.35+0.063	15	1.69	255	322
بدون SAP	315	-	0.35	15	3.8	273	390	بدون SAP	415	-	0.3	18	1.2	459	544
SAP خشک	315	0.15	0.35+0.05	15	3.8	432	504	SAP خشک	415	0.25	0.3+0.05	18	1.2	461	590
SAP اشباع	315	0.15	0.35+0.062	15	3.8	250	402	SAP اشباع	415	0.25	0.3+0.077	18	1.2	249	371
بدون SAP	350	-	0.35	15	3.4	170	314	بدون SAP	498	-	0.3	15	1	430	502
SAP خشک	350	0.175	0.35+0.05	15	3.4	220	363	SAP خشک	498	0.25	0.3+0.05	15	1	412	653
SAP اشباع	350	0.175	0.35+0.065	15	3.4	165	275	SAP اشباع	498	0.25	0.3+0.066	15	1	501	607
بدون SAP	370	-	0.35	13	2.7	240	317	بدون SAP	570	-	0.3	2	-	522	545
SAP	370	0.185	0.35+0.05	14	2.7	223	334	SAP	570	5	0.3+0.05	2	-	428	592



خشک								خشک							
SAP	370	0.185	0.35+0.066	14	2.7	179	271	SAP	570	5	0.3+1.1	2	-	337	402
اشباع								اشباع							
بدون	400	-	0.35	15	3	183	300	بدون	727.1	-	0.35	15	0.69	340	498
SAP								SAP							
SAP	400	0.2	0.35+0.066	13	3	225	342	SAP	727.1	0.76	0.35+0.05	15	0.69	493	537
خشک								خشک							
SAP	400	-	0.35	14	3	215	375	SAP	758	-	0.32	15	0.66	404	657
اشباع								اشباع							
بدون	400	0.02	0.35+0.05	13	3	239	391	بدون	758	0.76	0.32+0.05	15	0.66	483	624
SAP								SAP							
SAP	400	0.02	0.35+0.066	13	3	241	310	SAP	758	0.76	0.32+0.131	15	0.66	351	301
اشباع								اشباع							

مراجع

Influence of the Packing Density of Fine Particles on Structure, "[1]. Teichman T., Schmidt M., , International Symposium on Ultra High Performance "Strength and Durability of UHPC Concrete, pp 313-323, Kassel, Germany, 2004

[۲]. احمد.اس، اچ. شاه، اس.پی، "بتن‌های توانمند و کاربردهای آن"، ترجمه موسی مظلوم، علی اکبر رمضانیانپور، انتشارات دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، چاپ اول، ۱۳۸۳.

[3]. Nawy.E.G. " Fundamentals of High Performance Concrete " , 2nd ed, John Willey&Sons, Inc, 2001.

[4]. ACI Committee 363R-92, " State of the Report on High Strength Concrete ", ACI manual of concrete practice, 2004. Atluri, S.N. and Shen, S., (2002), "The Meshless Local Petrov-Galerkin (MLPG) Method", Tech Science Press, USA.

[۵]. خالو، علیرضا، "روش و اهمیت نیل به بتن مقاومت بالا در سازه‌ها"، نشریه انجمن بتن ایران، سال دوم، شماره پنجم، ۱۳۸۰.

[6]. Konstantin Kovler and Ole. Jensen., " Novel Techniques for Concrete Curing " , Concrete International, September 2005.

[7]. Dhir, R.K., Hewlett, P.C., Lota, J.S., and Dyer, T.D., " An Investigation into the Feasibility of Formulating Self-Cure Concrete " , Material & Structures, V. 27, No. 174, 1994, pp. 606-615.

[8]. Neville AM and J.J Brooks, " Concrete Technology " , Co published in the United States with John Wiley & Sons, Inc (1987).