

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

اثر عمل آوری داخلی بر مقاومت و کار آیی بتن

دانشجو :

قاسم میقانی

استاد راهنما:

دکتر علی کیهانی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده عمران و معماری

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای قاسم عیقانی

تحت عنوان:

اثر عمل آوری داخلی بر مقاومت و کارایی بتن

در تاریخ ۱۳۸۷/۱۱/۱۳ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه عالی مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی:		نام و نام خانوادگی: دکتر علی کیهانی

امضاء	اساتید داور	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی: دکتر احمد احمدی		نام و نام خانوادگی: دکتر رامین امینی
	اساتید تحصیلات تکمیلی		
	نام و نام خانوادگی: مهندس عباس محمدی		

تقدیم به

پدر و مادرم

که در راه تکامل من از هیچ کوششی دریغ نکردند

با تشکر و قدردانی از استاد محترم

دکتر علی کیهانی

و تمامی کسانی که مرا در انجام این تحقیق یاری رساندند

تعهد نامه

خانم معین دانشجوی دوره کارشناسی رشته مهندسی صنایع شماره
میران مهدی دانشگاه صنعتی شاهرود، پوسه یان
تحت راهنمایی دکتر علی کجالی مسجد می نوم

تصنایف در این پایان نامه بر مبنای توسط ایزدین ایجاد شده است و در صحت و امانت برآوردن است
در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است
مطلب استخراج در پایان نامه ارائه انگیزه توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مشارک یا استیاری در هیچ جایگاه
نداشته است.

گفته چنین مصوبی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات استخراج یا نام دانشگاه صنعتی شاهرود
و یا Shahrood University of Technology به نامی نتواند رسد.

حقوق مصوبی تمام افرادی که بر به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه ارساله تأثیر گذار بوده اند در مقالات استخراج
پایان نامه رساله رعایت می گردد.

در کلیه مراحل مجامع بین پایان نامه ارساله در صورتی که از موجودیت رنده (یا یافته های آنها) استفاده شده است، شرایط و اصول
اخلاقی رعایت شده است.

تاریخ: ۱۳۹۴/۰۳/۰۳
امضای دانشجو

مالکیت قباچ و حق نشر

- کلیه حقوق مصوبی این اثر و محصولات آن (مقالات استخراج، کتاب، برنامه های رایانه ای، دوره آموزشی ها و
تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نام محققان او
توسعات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از استنادات و نتایج موجود در پایان نامه ارساله بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

• داشتن این نسخه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده یا بلان نامه ارساله وجود داشته باشد.

چکیده

هر سازه ای که با بتن ساخته می شود جهت بهینه کردن انرژی و هزینه های تولید آن جنبه های مختلفی را در ساخت آن سازه باید لحاظ نمود. که عمل آوری آن جهت ارتقاء خواص مکانیکی و پایداری آن از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. عمل آوری بتن جهت طولانی تر شدن عمر بتن و کاهش هزینه های ناشی از تعمیرات سازه، جزو مهمترین مراحل ساخت سازه های بتنی می باشد. به طور کلی عمل آوری عبارتست از : روشهایی به منظور گسترش هیدراسیون سیمان که معمولاً با کنترل درجه حرارت و تبادل رطوبت بین بتن و محیط خارج آن همراه می باشد.

در پایان نامه حاضر، عملکرد عمل آوری داخلی بر روی خواص مکانیکی بتن مورد بررسی قرار گرفته است. از آنجایی که بتن های کارگاهی، قبل از اینکه فرایند هیدراسیون در مورد آنها کامل صورت گیرد، عمل آوری مؤثر در مورد آنها متوقف می شود، لذا تمرکز اصلی این تحقیق در مورد بررسی اثر این پلیمرها (سوپرجاذبها) بر روی بتن های کارگاهی می باشد. دستیابی به طرح اختلاطهای بهینه با توجه به مصالح ساختمانی و پلیمرهای موجود در کشور، و تعیین درصد مناسبی از پلیمرهای افزوده شده به بتن از دیگر اهداف این تحقیق می باشد. هر چند که نتایج بدست آمده در سطح آزمایشگاهی بوده است، ولی با توجه به تمهیدات در نظر گرفته شده می توان از کلیه نتایج در ساخت بتن های کارگاهی استفاده کرد.

در تحقیق حاضر، نخست مطالعات گسترده و کاملی بر روی مواد پلیمری (سوپرجاذبها) افزوده به بتن، انجام شد. آنچه که در مجموع اضافه نمودن این مواد بر روی بسیاری از خواص بتن (انقباض، مقاومت، دوام، نفوذپذیری و...) اثر می گذارد. در این تحقیق فقط به بررسی اثر این پلیمرها بر روی مقاومت و کارایی بتن و پرداخته شده است. نتایج بدست آمده، حاکی از بهتر شده روند کسب مقاومت بتن های کارگاهی ساخته شده در اکثر طرح اختلاطها در شرایط یکسان عمل آوری محیط خشک می باشد.

واژگان کلیدی : عمل آوری داخلی بتن، پلیمرهای سوپرجاذب، مقاومت و کارایی بتن

فهرست مطالب

فصل اول : مقدمه

- ۱-۱ مقدمه ۲
- ۲-۱ هدف ۳
- ۳-۱ تعاریف ۳
- ۱-۳-۱ عمل آوری داخلی ۳
- ۲-۳-۱ رطوبت نسبی داخلی ۴
- ۳-۳-۱ خود خشک شدگی ۴
- ۴-۳-۱ انقباض خودبخودی ۵
- ۴-۱ دامنه این تحقیق ۵

فصل دوم : تئوریهای موجود برای عمل آوری داخلی و تشریح مدل پاورز

- ۲-۱ مقدمه ۸
- ۲-۲ مدل پاورز برای توزیع حالت خمیر سیمان ۹
- ۱-۲-۲ طبقه بندی آبهای موجود در خمیر سیمان ۱۰
- ۲-۲-۲ روابط حجمی در فرایند هیدراسیون براساس محاسبات پاورز ۱۲
- ۳-۲-۲ مدل حجمی پاورز برای خمیر سیمان ۱۳
- ۴-۲-۲ مدل حجمی پاورز برای خمیر سیمان همراه با میکروسیلیس ۱۴
- ۳-۲ پیشرفت همدمای جذب سطحی و توزیع حالت خمیر سیمان ۱۴
- ۴-۲ کاربرد مدل پاورز برای خمیر سیمان آبدار ۱۸
- ۵-۲ مدلی برای محاسبه آب داخلی ۲۰
- ۶-۲ آب داخلی مورد نیاز در خمیر سیمان همراه با میکروسیلیس ۲۲
- ۷-۲ مثالی برای محاسبه مقدار تئوری آب لازم برای عمل آوری داخلی ۲۴
- ۸-۲ نتیجه گیری ۲۵

فصل سوم : روشها و موادی برای عمل آوری داخلی

- ۳-۱ مقدمه ۲۸
- ۳-۶ عمل آوری بتن ۲۹
- ۳-۲ طبقه بندی شرایط عمل آوری مختلف ۳۰
- ۳-۳ عمل آوری داخلی با ایجاد یک محیط ایزوله ۳۲
- ۳-۴ ماده خود عمل آورنده ۳۳
- ۳-۵ الزامات کلی برای عمل آوری داخلی بتن ۳۳
- ۳-۶ آب موجود در مصالح سنگی معمولی و اثر آن بر روی عمل آوری داخلی ۳۵
- ۳-۷ موادی برای عمل آوری داخلی ۳۶
- ۳-۷-۱ موادی با آب مرزی شیمیایی ۳۶
- ۳-۷-۲ موادی که به صورت فیزیکی آب را نگه می دارند ۳۷
- ۳-۷-۲-۱ آب مورد نیاز برای عمل آوری داخلی ۳۸
- ۳-۷-۲-۲ پس دهی آب مصالح سنگی سبک (□□□) ۳۹
- ۳-۷-۲-۳ پومیس ۳-۲-۷-۳ ۴۰
- ۳-۷-۲-۴ پرلیت ۴-۲-۷-۳ ۴۲
- ۳-۷-۲-۵ لیکا و لیپور ۵-۲-۷-۳ ۴۳
- ۳-۷-۲-۶ استالیت ۶-۲-۷-۳ ۴۵
- ۳-۷-۲-۷ خاک با جدار سیلیسی ۷-۲-۷-۳ ۴۵
- ۳-۸-۲-۸ خاک رس بنتونیت ۸-۲-۸-۳ ۴۷
- ۳-۷-۲-۹ پلیمرهای سوپر جاذب ۹-۲-۷-۳ ۴۷
- ۳-۷-۳ موادی با آب غیر مرزی ۳-۷-۳ ۴۹
- ۳-۷-۳-۱ میکروکپسولها ۱-۳-۷-۳ ۴۹
- ۳-۷-۳-۲ آب امولسی شده ۲-۳-۷-۳ ۵۱
- ۳-۸ مقایسه تکنیکهای موجود برای عمل آوری داخلی بتن ۵۱

۹-۳ نتیجه گیری ۵۲

فصل چهارم : مشاهدات آزمایشگاهی عمل آوری داخلی بتن با استفاده از آب

۱-۴ مقدمه ۵۵

۲-۴ مشاهدات مستقیم عمل آوری داخلی با استفاده از آب ۵۶

۱-۲-۴ رطوبت نسبی داخلی ۵۶

۱-۱-۲-۴ اندازه گیری رطوبت نسبی داخلی ۵۷

۲-۱-۲-۴ مدلسازی رطوبت نسبی داخلی ۵۹

۲-۲-۴ تغییر شکل خودبخودی خمیر سیمان ۶۱

۳-۲-۴ درجه اشباع ۶۰

۴-۲-۴ تئوری تراش ۶۲

۵-۲-۴ آزمایش گرماسنجی دمای پایین (□□□) ۶۴

۶-۲-۴ همدمایی جذب سطح ۶۶

۳-۴ نتایج اولیه عمل آوری داخلی : ۶۷

۱-۳-۴ درجه هیدراسیون ۶۷

۲-۳-۴ اندازه گیری درجه هیدراسیون ۶۹

۳-۳-۴ انتقال آب داخلی ۷۰

۱-۳-۳-۴ آزمایش تابش اشعه ایکس □ ۷۲

۲-۳-۳-۴ آب تا کجا می تواند منتقل شود؟ ۷۴

۴-۳-۴ کرنش خودبخودی ۷۷

۵-۳-۴ اندازه گیری کرنش خودبخودی ۷۸

۴-۴ نتایج ثانویه عمل آوری داخلی ۷۹

۱-۴-۴ خواص مکانیکی ۷۹

۲-۴-۴ تخلخل و توزیع اندازه حفرات ۸۰

۳-۴-۴ ناحیه انتقال بینابینی ۸۱

- ۴-۴-۴ تنشهای القایی و ترک خوردگی ۸۳
- ۴-۴-۵ دوام ۸۴
- ۴-۴-۶ دوام در بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی ۸۵
- ۴-۴-۷ نفوذپذیری بتن ۸۶
- ۴-۴-۸ نفوذپذیری در بتن های عمل آوری شده داخلی ۸۷

فصل پنجم : سوپر جاذبها

- ۵-۱ مقدمه ۹۰
- ۵-۲ تاریخچه سوپر جاذبها و مقایسه آن با مواد نمگیر و جاذبهای معمولی ۹۱
- ۵-۳ انواع و ساختار سوپر جاذبها ۹۳
- ۵-۴ خواص و رفتار تورمی سوپر جاذبها ۹۵
- ۵-۵ اثر عوامل محیطی بر خواص سوپر جاذبها ۹۶
- ۵-۶ فرآیندهای تولید ۹۷
- ۵-۷ اندازه گیری خواص سوپر جاذبها ۹۸
- ۵-۷-۱ اندازه گیری ظرفیت جذب ۹۸
- ۵-۷-۱-۱ روش کیسه چای ۹۸
- ۵-۷-۱-۲ روش الک ۹۹
- ۵-۷-۱-۳ اندازه گیری جذب تحت بار ۹۹
- ۵-۷-۲ اندازه گیری سرعت جذب و روش گرداب ۱۰۱
- ۵-۸ زمینه های مصرف سوپر جاذبها ۱۰۲

فصل ششم : تشریح برنامه آزمایشگاهی

- ۶-۱ مقدمه ۱۰۶
- ۶-۲ مصالح مصرفی ۱۰۷
- ۶-۲-۱ سوپر جاذبها ۱۰۷

- ۱۰۷..... ۱-۲-۶ دانه بندی مورد استفاده در سوپر جاذبها
- ۱۰۸..... ۲-۱-۲-۶ میزان جذب سوپر جاذبها و نتایج آن
- ۱۰۹..... ۳-۱-۲-۶ اثر سوپر جاذبها بر بتن تازه
- ۱۱۰..... ۴-۱-۲-۶ میزان جذب سوپر جاذبها در بتن و نتایج آن
- ۱۱۳..... ۵-۱-۲-۶ سرعت جذب سوپر جاذبها در بتن و نتایج آن
- ۱۱۵..... ۶-۱-۲-۶ اثر میزان مصرف سوپر جاذبها بر بتن
- ۱۱۵..... ۷-۱-۲-۶ پس دهی آب سوپر جاذبها در بتن
- ۱۱۵..... ۸-۱-۲-۶ تهیه سوپر جاذبها
- ۱۱۶..... ۲-۲-۶ سیمان
- ۱۱۷..... ۳-۲-۶ میکروسیلیس
- ۱۱۸..... ۴-۲-۶ سنگدانه های مصرفی
- ۱۲۲..... ۵-۲-۶ فوق روان کننده
- ۱۲۳..... ۳-۶ آزمایشات انجام گرفته بروی بتن تازه و سخت شده
- ۱۲۳..... ۱-۳-۶ آزمایش اسلامپ
- ۱۲۴..... ۲-۳-۶ مقاومت فشاری
- ۱۲۵..... ۴-۶ نحوه اختلاط با استفاده از بتونیر و میکسر
- ۱۲۸..... ۵-۶ نتایج آزمایشات مقاومت فشاری و اسلامپ
- ۱۲۸..... ۱-۵-۶ بررسی مدل پاورز و نتایج مربوط به آن
- ۱۳۴..... ۲-۵-۶ نتایج عمل آوری در محیط باز و عمل آوری داخلی بر روی مقاومت بتن و مقایسه آنها
- ۱۴۴..... ۳-۵-۶ نتایج عمل آوری مرطوب و عمل آوری داخلی بر روی مقاومت و مقایسه آنها برای نمونه های ساخته شده با میکروسیلیس
- ۱۴۹..... ۴-۵-۶ نتایج عمل آوری تناوبی و عمل آوری داخلی بر روی مقاومت و مقایسه آنها
- ۱۵۳..... ۵-۵-۶ نتایج مربوط به دانه بندی سوپر جاذبها بروی مقاومت و کارایی
- ۱۵۶..... ۶-۵-۶ نتایج مربوط به میزان مصرف سوپر جاذبها بر مقاومت و کارایی

فصل هفتم : نتیجه گیری و پیشنهادات

۱-۷ نتیجه گیری ۱۶۰

۲-۷ پیشنهادات ۱۶۲

مراجع ۱۶۴

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲: خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان $w/c = 0.3$ در حالت اشباع (چپ) در محیط بسته (راست) نقاط سیاه نشانه وجود حفرات در خمیر سیمان می باشند ۸
- شکل ۲-۲: ضخامت لایه های جذب به صورت تابعی از رطوبت نسبی ۱۱
- شکل ۳-۲: توزیع حجمی خمیر سیمان به صورت تابعی از درجه هیدراسیون α ، در $w/c = 0.6$ ۱۵
- شکل ۴-۲: پیشرفت همدمایی جذب سطحی در طی هیدراسیون در شرایط بسته در نسبت آب به سیمان $w/c = 0.6$ با توجه به مدل پاورز برای چهار نقطه همدمما (A-D) با درجه هیدراسیون مختلف که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. مقدار آب قابل تبخیر، u ، به صورت نسبت آب در هر کیلوگرم جسم جامد (سیمان و ژل جامد). علامتها: مقدار آب قابل تبخیر در شرایط اشباع؛ ● مقدار آب قابل تبخیر بعد از هیدراسیون در شرایط بسته؛ ○ مقدار آب ژلی در رطوبت نسبی ۱۰۰٪ ۱۰
- شکل ۵-۲: توزیع حجمی خمیر سیمان به صورت تابعی از درجه هیدراسیون α ، در $w/c = 0.3$ ۱۷
- شکل ۶-۲: پیشرفت همدمایی جذب سطحی در طی هیدراسیون در شرایط بسته در نسبت آب به سیمان $w/c = 0.3$ با توجه به مدل پاورز برای چهار نقطه همدمما (A-D) با درجه هیدراسیون مختلف که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است. مقدار آب قابل تبخیر، u ، به صورت نسبت آب در هر کیلوگرم جسم جامد (سیمان و ژل جامد). علامتها: ○ مقدار آب قابل تبخیر در شرایط اشباع؛ ● مقدار آب قابل تبخیر بعد از هیدراسیون در شرایط بسته؛ ⊙ مقدار آب ژلی در رطوبت نسبی ۱۰۰٪ ۱۷
- شکل ۷-۲: توزیع حجمی خمیر سیمان به صورت تابعی از درجه هیدراسیون α ، در $w/c = 0.3$. نمودار برای هیدراسیون توسط یک منبع آب خارجی یعنی یک سیستم باز و یا یک منبع آب داخلی نشان داده شده است. به علت پایین بودن نسبت آب به سیمان، هیدراسیون کامل خمیر سیمان بدست نخواهد آمد ۱۸
- شکل ۸-۲: پیشرفت همدمایی جذب سطحی در طی هیدراسیون در نسبت آب به سیمان $w/c = 0.3$ زمانی که آب داخلی و یا خارجی برای خمیر سیمان فراهم شود. مربوط به چهار نقطه همدمما (A-D) با درجه هیدراسیون مختلف که در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. به علت وجود یک منبع آب داخلی و یا خارجی، رطوبت نسبی حتی با وجود مصرف شدن آب مویینه در تعادل ۱۰۰٪ باقی خواهد ماند ۱۹
- شکل ۹-۲: مقدار مینیمم آب مورد نیاز داخلی برای رسیدن به هیدراسیون کامل α_{max} و بوسیله آن، جلوگیری از خود خشک شدگی در طی فرایند هیدراسیون با توجه به معادلات (۹-۲) و (۱۰-۲) ۲۱

- شکل ۲-۱۰ : نسبت آب داخلی مورد نیاز برای جلوگیری از خودخشک شدگی به صورت تابعی از (w/c) برای نسبتهای مختلفی از (s/c) ۲۳
- شکل ۳-۱ : طبقه بندی روشهایی عمل آوری براساس مؤسسه RILEM ۳۰
- شکل ۳-۲ : تصاویر الکترونیکی اسکن شده دانه های پومیس : (چپ) تصویر ساختمان داخلی یک ذره پومیس بعد از نفوذ یک فلز با نقطه ذوب پایین (در اینجا حفرات پر شده با رنگ روشن مشخص هستند). راست) تصویر بزرگنمایی شده از سطح پومیس ۴۱
- شکل ۳-۳ : تصویر الکترونیکی اسکن شده از سطح لیپور شکسته شده ۴۴
- شکل ۳-۴ : تصویر الکترونیکی اسکن شده دیاتومها در یک ماتریس خمیر سیمان ۴۶
- شکل ۳-۵ : پلیمر سوپرچاذب متورم شده که چندین برابر وزن خود آب جذب کرده. این پلیمر حتی تحت فشار متوسط آب خود را از دست نخواهد داد ۴۸
- شکل ۳-۶ : تصویر الکترونیکی اسکن شده از یک جوهر میکروکپسول شده در یک کاغذ کپی ۵۰
- شکل ۴-۱ : دستگاه اندازه گیری رطوبت نسبی ۵۷
- شکل ۴-۲ : اندازه گیری رطوبت نسبی ۵۸
- شکل ۳-۴ : تراوش ناحیه انتقال بینابینی با استفاده از مدل هسته سخت- پوسته نازک ۶۳
- شکل ۴-۴ : اسکن LTC برای خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۳ برای شرایط اشباع در دمای ۲۵°C به مدت ۲ روز ۶۵
- شکل ۴-۵ : درجه نهایی هیدراسیون با توجه به مدل پاورز برای خمیر سیمان عمل آوری شده در شرایط اشباع و محیط بسته ۶۸
- شکل ۴-۶ : گسترش هاله رنگی اطراف یک (LWA) اشباع شده با محلول جوهر ضعیف در یک خمیر سیمان با سیمان سفید ۷۱
- شکل ۴-۷ : تصویر از بالا نمونه های استفاده شده برای آزمایش اشعه ایکس ۷۳
- شکل ۴-۸ : حفرات در خمیر سیمان ۷۵
- شکل ۴-۹ : دستگاه اندازه گیری تغییر شکلهای خودبخودی (چپ) و قالب پلی اتیلن ویژه برای اندازه گیری تغییر شکل خود بخودی (راست) ۸۲
- شکل ۴-۱۰ : عمل آوری داخلی در ناحیه انتقال بینابینی ۴

شکل ۵-۱: طرحی کلی از شبکه هیدروژل معمولی (راست) در مقایسه با یک شبکه سوپرجاذب (چپ).

زنجیرهای پلیمری آبدوست به وسیله پیوندهای عرضی (خطوط توپر) به هم متصل شده اند ۹۳

شکل ۵-۲: گروههای عاملی آبدوست (OH , COONa , SO_3H , COOH , NH_2) در سوپرجاذبها ۹۴

شکل ۵-۳: ابزار متداول برای اندازه گیری جذب تحت بار (AUL) در سوپرجاذبها ۱۰۰

شکل ۶-۱: اسلامپ صحیح، برشی و ریزشی ۱۲۴

شکل ۶-۲: دستگاه تست مقاومت فشاری ۱۲۵

شکل ۶-۳: بتونیر و میکسر مورد استفاده برای مخلوط کردن بتن ۱۲۶

فهرست نمودارها

نمودار ۵-۱: تفاوت سوپرجاذب آکریلی و سیلیکال ژل در جذب رطوبت ۹۳

نمودار ۶-۱: اندازه گیری جریان افت اسلامپ با زمان (تست شماره ۱) ۱۱۴

نمودار ۶-۲: اندازه گیری جریان افت اسلامپ با زمان (تست شماره ۲) ۱۱۴

نمودار ۶-۳: اندازه گیری جریان افت اسلامپ با زمان (تست شماره ۳) ۱۱۴

نمودار ۶-۴: منحنی دانه بندی مصالح سنگی (۱) ماکزیمم اندازه $12/5\text{mm}$ (۲) ماکزیمم اندازه 19mm ۱۲۳

نمودار ۶-۵: مقایسه مقاومت فشاری Mix-1 ۱۳۲

نمودار ۶-۶: مقایسه مقاومت فشاری Mix-2 ۱۳۲

نمودار ۶-۷: مقایسه مقاومت فشاری Mix-3 ۱۳۲

نمودار ۶-۸: مقایسه مقاومت فشاری Mix-4 ۱۳۳

نمودار ۶-۹: مقایسه مقاومت فشاری Mix-5 ۱۳۳

نمودار ۶-۱۰: مقایسه مقاومت فشاری Mix-6 ۱۳۳

نمودار ۶-۱۱: مقایسه مقاومت فشاری Mix-7 ۱۳۹

نمودار ۶-۱۲: مقایسه مقاومت فشاری Mix-8 ۱۳۹

نمودار ۶-۱۳: مقایسه مقاومت فشاری Mix-9 ۱۳۹

نمودار ۶-۱۴: مقایسه مقاومت فشاری Mix-10 ۱۴۰

۱۴۰	.....	Mix-11	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۱۵ :
۱۴۰	.....	Mix-12	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۱۶ :
۱۴۱	.....	Mix-13	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۱۷ :
۱۴۱	.....	Mix-14	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۱۸ :
۱۴۲	.....	Mix-15	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۱۹ :
۱۴۲	.....	Mix-16	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۰ :
۱۴۲	.....	Mix-17	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۱ :
۱۴۳	.....	Mix-18	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۲ :
۱۴۳	.....	Mix-19	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۳ :
۱۴۳	.....	Mix-20	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۴ :
۱۴۶	.....	Mix-21	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۵ :
۱۴۶	.....	Mix-22	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۶ :
۱۴۶	.....	Mix-23	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۷ :
۱۴۷	.....	Mix-24	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۸ :
۱۴۷	.....	Mix-25	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۲۹ :
۱۴۷	.....	Mix-26	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۳۰ :
۱۴۸	.....	Mix-27	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۳۱ :
۱۴۸	.....	Mix-28	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۳۲ :
۱۵۱	.....	Mix-29	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۳۳ :
۱۵۱	.....	Mix-30	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۳۴ :
۱۵۱	.....	Mix-31	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۳۵ :
۱۵۵	.....	Mix-32	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۳۶ :
۱۵۵	.....	Mix-33	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۳۷ :
۱۵۵	.....	Mix-34	مقایسه مقاومت فشاری	نمودار ۶-۳۸ :

۱۵۵	نمودار ۶-۳۹ : مقایسه مقاومت فشاری با دانه بندی مختلف Mix-7-1
۱۵۵	نمودار ۶-۴۰ : مقایسه مقاومت فشاری با دانه بندی مختلف Mix-9-1
۱۵۵	نمودار ۶-۴۱ : مقایسه مقاومت فشاری با دانه بندی مختلف Mix-11-1
۱۵۶	نمودار ۶-۴۲ : مقایسه مقاومت فشاری با دانه بندی مختلف Mix-13-1
۱۵۸	نمودار ۶-۴۳ : مقایسه مقاومت فشاری با درصد SAP مختلف Mix-7-2

فهرست جداول

۴۱	جدول ۳-۱ : چگالی و میزان جذب پومیس با دانه بندی متغیر
۴۴	جدول ۳-۲ : تخلخل و چگالی لیپور ۸
۵۲	جدول ۳-۳ : جدول قیمت و میزان جذب مصالح مختلف برای عمل آوری داخلی
۸۸	جدول ۳-۴ : کاهش در نفوذپذیری خمیر سیمان (نسبت آب به سیمان ۰/۷) با پیشرفت هیدراسیون
۹۷	جدول ۵-۱ : تأثیر عوامل محبیطی بر خواص تورمی سوپر جاذبها آکریلی متداول (آنیونی)
۱۰۹	جدول ۶-۱ : نتایج مربوط به روش کیسه چای
۱۰۹	جدول ۶-۲ : نتایج مربوط به روش الک
	جدول ۶-۳ : مقادیر اسلامپ مخلوطهای مختلف برای اندازه گیری میزان جذب SAP
۱۱۲	با میانگین دانه های $125\mu m$
	جدول ۶-۴ : مقادیر اسلامپ مخلوطهای مختلف برای اندازه گیری میزان جذب SAP
۱۱۲	با میانگین دانه های $450\mu m$
۱۱۷	جدول ۶-۵ : ویژگیهای فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ ۲ شاهرود
۱۱۸	جدول ۶-۶ : مشخصات فنی ماسه
۱۱۹	جدول ۶-۷ : مشخصات فنی مصالح سنگی درشت دانه
۱۲۰	جدول ۶-۸ : دانه بندی شن و ماسه با ماکزیمم اندازه $12/5mm$
۱۲۰	جدول ۶-۹ : دانه بندی شن و ماسه با ماکزیمم اندازه $19mm$

جدول ۶-۱۰-الف : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ با توجه به مدل پاورز(نمونه ها غیر از نمونه بدون SAP در محیط باز نگهداری شده است $\frac{kg}{cm^3}$) ۱۳۰

جدول ۶-۱۰-ب : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای نمونه های ساخته شده با میکروسیلیس(SF) با توجه به مدل پاورز(نمونه ها غیر از نمونه بدون SAP در محیط باز نگهداری شده است $\frac{kg}{cm^3}$) ۱۳۰

جدول ۶-۱۱-الف : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای نمونه هایی با ماکزیمم اندازه ۱۹mm کلیه نمونه ها در محیط باز نگهداری شده است $\frac{kg}{cm^3}$ ۱۳۶

جدول ۶-۱۱-ب : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای نمونه هایی با ماکزیمم اندازه ۱۹mm کلیه نمونه ها در محیط باز نگهداری شده است $\frac{kg}{cm^3}$ ۱۳۷

جدول ۶-۱۲ : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای نمونه هایی با ماکزیمم اندازه ۱۲/۵mm کلیه نمونه ها در محیط باز نگهداری شده است $\frac{kg}{cm^3}$ ۱۳۸

جدول ۶-۱۳ : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای نمونه هایی با ماکزیمم اندازه ۱۹mm همراه با میکروسیلیس(SF)(نمونه ها به غیر از نمونه بدون SAP در محیط باز نگهداری شده است $\frac{kg}{cm^3}$) ۱۴۵

جدول ۶-۱۴ : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای نمونه هایی با ماکزیمم اندازه ۱۲/۵mm (نمونه های بدون SAP هفته ای سه بار و در هر روز دوبار آب داده شده است. سایر نمونه ها در محیط باز نگهداری شده است $\frac{kg}{cm^3}$) ۱۵۰

جدول ۶-۱۵ : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ با ماکزیمم اندازه ۱۹ mm برای طرح اختلاطهای Mix-9 , Mix-11 , Mix-13 , Mix-15 که تنها از SAP درشت با میانگین اندازه ۴۵۰ μm استفاده شده است.

(کلیه نمونه های در محیط باز نگهداری می شود) $\frac{kg}{cm^3}$ ۱۵۱

جدول ۶-۱۶ : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای نمونه هایی با ماکزیمم اندازه ۱۹mm برای Mix-9 با درصد SAP بیشتر(کلیه نمونه ها در محیط باز نگهداری شده است $\frac{kg}{cm^3}$) ۱۵۴

فصل اول

مقدمه

۱- مقدمه

بتن یک ماده با دوام و قوی می باشد که استفاده از آن از زمانهای بسیار دور رایج یافته است و امروزه علم تکنولوژی بتن و شناخت خواص آن یکی از شاخه های اصلی در مهندسی عمران را تشکیل می دهد. با بررسی بسیاری از سازه های ساخته شده با بتن، این مطلب به خوبی روشن شده که بسیاری از این سازه ها در همان سنین اولیه دچار خرابی خواهند شد. شاید تصور این قضیه کمی مشکل باشد که سازه های بتنی نابهنگام قبل از اینکه اهداف اولیه شان که تحمل بارهای سرویس می باشد را برآورده سازند، خراب شوند. لذا باید با شناخت و دانش کافی از خواص مواد بتنی که در دسترس می باشند و مراقبتهای لازم از آنها این مشکل را برطرف کرد. فاکتورها و عوامل بسیار زیادی در این نقص موجود در سازه های بتنی دخیل می باشند، که تعدادی از آنها ناشی از شرایط محیطی و بعضی از آنها به علت اشتباهات انسانی و عدم وجود دانش کافی خواهد بود. البته عوامل انسانی باید تا حد امکان کاهش یابد تا بتوان بتنی با عملکرد بسیار خوب در طول عمر مفید آن ساخت.

خواص اولیه بتن از جمله عوامل بسیار حیاتی می باشند که بر روی عملکرد دراز مدت بتن اثر می گذارند. بسیاری از پیمانکاران و مالکان فقط به مقاومت ۲۸ و یا ۹۰ روزه بتن توجه داشته، بطوریکه از اهمیت خواص بتن در روزهای اولیه بتن ریزی چشم پوشی می کنند. هرچند که تأثیر این عوامل بر مقاومت بتن نیز قابل ملاحظه می باشد. اما این مطلب برای بتن هایی که دارای نسبت آب به سیمان پایین هستند از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. بر طبق مدل پاورز هیدراسیون کامل سیمان زمانی انجام خواهد پذیرفت که نسبت آب به سیمان ۰/۴۲ و یا بیشتر از آن باشد. بنابراین برای بتن هایی با نسبت آب به سیمان کمتر از ۰/۴۲، خمیر سیمان دچار فرایند خودخشک شدگی شده و منجر به فرایند انقباض خودبخودی خواهد شد. انقباض خودبخودی با افزایش مصرف سیمان و همچنین استفاده از مواد مکمل بتن از جمله میکروسیلیس معمولاً افزایش پیدا می کند که این فرایند در بتن های با مقاومت بالا و یا عملکرد بالا بیشتر به چشم می خورد. که با توجه به روشهای عمل آوری متوسطی که در محل ساختمان سازی صورت می گیرد، خطر و احتمال وقوع ترک (ماکرو یا میکرو) در داخل بتن به مقدار بسیار زیادی افزایش خواهد یافت. بتن هایی که در سنین اولیه دچار شکست می شوند به شدت بر روی مقاومت و نفوذپذیری آنها در طول مدت بهره برداری از آنها اثر خواهد گذاشت.

برای مقابله کردن با ترک خوردگی بتن در سنین اولیه و فراهم آوردن آب کافی برای فرایند هیدراسیون برای کسب مقاومت کافی (۲۸روزه) به خصوص در محل ساختمان سازی، پیمانکاران فرمهای مختلفی از عمل آوری بتن برای بالا نگهداشتن رطوبت نسبی داخلی بتن، را اتخاذ کرده اند. بالا نگهداشتن رطوبت نسبی از بالا رفتن نیروهای کششی در حفرات در طول مدتی که بتن در حال سخت شدن است، جلوگیری می کند. که این عمل یکی از جمله فرایندهای کاهش انقباض خشک و خودبخودی خواهد بود. این طرح وقتی که حجم بتن ریزی کم، نسبت آب به سیمان بالا و عدم استفاده از میکروسیلیس در بتن، با موفقیت اثبات شده است. اما زمانیکه حجم بتن ریزی افزایش می یابد، لذا نفوذپذیری آب و رطوبت به کل حجم بتن برای عمل آوری آن مشکل خواهد بود که با استفاده از عمل آوری داخلی این مشکل تا حدود زیادی برآورده خواهد شد.

۱-۲ هدف :

هدف از این تحقیق بررسی توانایی روشهای عمل آوری داخلی با استفاده از سوپرچادها بر روی خواص بتن (مقاومت و کارایی) و جلوگیری از بوجود آمدن فرایند خودخشک شدگی می باشد. با توجه به اینکه استفاده از افزودنی هایی مانند سوپرچادها (SAP) در داخل بتن به طور کلی خواص بتن و ملات از قبیل نفوذپذیری، دوام و را تا حدود زیادی تغییر می دهد و بررسی این خواص نیاز به دستگاههای بسیار پیشرفته جهت مطالعه زیر ساختار داخلی بتن می باشد، و بدلیل عدم دسترسی به این تجهیزات فقط به بیان تأثیر این مواد بر روی ساختار کلی بتن پرداخته شده است. برای روشنتر شدن بحث در ابتدا به تعریف چند واژه می پردازیم :

۱-۳ تعاریف:

۱-۳-۱ عمل آوری داخلی :

در فصل ۳ تعاریفی که توسط مؤسسه RILEM و بتن آمریکا ارائه شده است، بیان می شود. اما باید گفت که منطق اصلی استفاده از عمل آوری داخلی در بتن را می توان اینگونه بیان کرد : ایجاد و یا فراهم کردن منابع آب داخلی به اندازه ای که خمیر سیمان آب کافی را در طول مدت هیدراسیون برای انجام این فرایند داشته باشد. که این عمل دستیابی به رطوبت کافی، حتی اگر ذرات خمیر سیمان در بتن ریزی حجیم در نقاط عمیق وجود داشته باشند (دور از سطح) را به همراه خواهد

داشت [۱۹]. موادی که برای عمل آوری داخلی به کار گرفته می شوند نباید اثر منفی بر روی خواص بتن مانند مقاومت و دوام بگذارند، از طرفی پیچیدگی اساسی و یا هزینه های مالی زیادی را برای پروژه های ساختمانی نداشته باشند.

۱-۳-۲ رطوبت نسبی داخلی:

رطوبت نسبی در داخل بتن نقش بسیار مهمی در تأثیر گذاری بر روی خواص بتن از قبیل مقاومت، خزش، و دوام دارد. رطوبت نسبی در واقع به مقدار آب فعال (بالمقوه شیمیایی) در خمیر سیمان گفته می شود. تغییرات رطوبت نسبی بتن در مجموع ناشی از دو عامل خودخشک شدگی و انتشار رطوبت^۱ می باشد. نتایج نشان می دهد برای نسبت آب به سیمان بالا (بالتر از ۰/۴۵) رطوبت نسبی اساساً تحت تأثیر انتشار رطوبت می باشد. در حالیکه برای نسبت آب به سیمان پایین، کاهش رطوبت نسبی داخلی خمیر سیمان بوسیله هر دو عامل خودخشک شدگی و انتشار رطوبت، قابل کنترل می باشد.

۱-۳-۳ خود خشک شدگی^۲:

تعریفی که توسط مؤسسه رایلم [RILEM TC 196-ICC]^۳ ارائه شده است به صورت زیر می باشد:

" کاهش در رطوبت نسبی داخلی یک سیستم بسته زمانی که حفرات خالی در این سیستم تولید می شوند. و این زمانی خواهد بود که انقباض شیمیایی اتفاق می افتد و این انقباض در مرحله ای است که خمیر سیمان به شکل یک اسکلت سخت شده در خواهد آمد، و انقباض شیمیایی بیشتر از انقباض خودبخودی است." در حالیکه خودخشک شدگی در هر بتن عمل آوری شده تحت شرایط بسته رخ خواهد داد، اثر آن کاملاً مربوط به اندازه حفرات خالی بوجود آمده می باشد. البته اندازه این حفرات نیز وابسته به نسبت آب به سیمان اولیه، توزیع ذرات تشکیل دهنده خمیر و درجه هیدراسیون کسب شده، خواهد بود [۲۰].

تعریف ارائه شده توسط پروفیسور نوپل: « از آنجا که در طی فرایند هیدراسیون نسبت وزنی هیدراتهای سیلیکات کلسیم به هیدروکسید کلسیم بیشتر می باشد (۷ به ۲) لذا مساحت سطح قسمتهای جامد به مقدار زیادی افزایش یافته که در این صورت بخش عمده ای از آب توسط این سطح جذب خواهد شد. اگر امکان هر گونه حرکت آب از بیرون به داخل خمیر سیمان و بالعکس قطع

۱-moisture diffusion

۲-self-dessication

۳-Technical Committee, Internal Curing of Concrete(TC-196ICC)

گردد، واکنش های هیدراسیون تقریباً همه آب آزاد را مصرف می نمایند تا آنجا که آب کافی برای اشباع کردن سطوح جامد باقی نمی ماند و در نتیجه رطوبت نسبی نیز در خمیر سیمان کاهش می یابد. این پدیده را خود خشک شدگی می گویند» [۲۱]

۱-۳-۴ انقباض خودبخودی^۱:

این نوع انقباض (افت یا جمع شدگی) یک نوع خاصی از انقباض است که در آن جابجایی آب به داخل یا خارج بتن اتفاق نمی افتد؛ بلکه با از دست رفتن آب در فرایند هیدراسیون سیمان رخ می دهد. این انقباض به سهولت از انقباض در بتن سخت شده تمیز داده نمی شود و مقدار آن وابسته به نوع بتن بوده که با کاهش نسبت آب به سیمان و افزایش مصرف سیمان، بیشتر می شود [۲۴]. فرایندهای عمل آوری سنتی که برای جلوگیری از انقباض خشک استفاده می شود (فرو بردن نمونه ها در آب)، در مورد انقباض خودبخودی غیر مؤثر می باشد. شاید برای سطح مقطعهای کوچک بتوان انقباض خودبخودی را از بین برد، ولی هنگامیکه نفوذپذیری آب از سطوح خارجی به داخل محدود می شود، بخصوص برای سطح مقاطع گسترده، پدیده انقباض خودبخودی نمود بیشتری نسبت به انقباض خشک خواهد داشت.

۱-۴ دامنه این تحقیق:

به طور کلی محدوده این تحقیق را می توان به صورت زیر تقسیم بندی کرد:

فصل اول شامل مقدمه می باشد.

در فصل دوم تئوری های موجود برای عمل آوری داخلی بیان می شود. مطمئناً هر طرح آزمایشگاهی بوسیله یک تئوری قوی که در یک حالت کلی بیان خواهد شد، آغاز می شود. این تئوریهای در پاره ای از مواقع جوابگو بوده و در مواقعی دیگر نتایج موردنظر را به همراه نخواهند داشت. بنابراین با انجام آزمایشاتی در این زمینه باید صحت و اثر تئوری مطرح شده را، مورد بررسی قرار داد. به طور کلی تئوری موجود در عمل آوری داخلی بوسیله پروفیسور پاورز در سال ۱۹۴۸ مطرح شد. بسیاری از محققین فعالیتهای آزمایشگاهی برای عمل آوری داخلی را با استفاده از این مدل آغاز نموده اند. که نتایجی گاهاً متناقض، ارائه داده اند. لذا در این فصل به بیان کوتاهی از این تئوری می پردازیم.

۱-autogenous shrinkage

مواد متنوع و مختلفی به صورت طبیعی و یا مصنوعی در طبیعت وجود دارد که، می توان از آنها به عنوان مصالحی برای عمل آوری داخلی استفاده نمود. هر یک از این مصالح با توجه به نوع، ساختار و اجزاء تشکیل دهنده آنها اثرات متفاوتی بر روی بتن خواهند گذاشت. در فصل ۳ به مهمترین مصالحی که تاکنون برای عمل آوری داخلی بتن استفاده شده است، اشاره می شود. خواص کلی این مصالح و تحقیقات صورت گرفته در این زمینه با استفاده از مصالح مختلف بیان خواهد شد.

همانطور که می دانیم، وجود یک ماده افزودنی به بتن بر روی بسیاری از خواص داخلی و مهم بتن اثر می گذارد. آزمایشات بسیار پیشرفته ای که تنها در چند کشور انجام شده، برای بررسی این اثرات به ثبت رسیده است. در واقع با استفاده از این آزمایشات می توان تفاوت موجود بین بتن های عمل آوری شده داخلی و بتن های معمولی را بیان کرد. در فصل ۴ خواص بتن های عمل آوری شده داخلی اثرات و آزمایشاتی که می توان از آنها برای بررسی بهتر ساختار بتن استفاده کرد، مطرح خواهد شد.

مواد بکاربرده شده در این تحقیق سوپرجاذبها^۱ (SAP) می باشند. این مواد ظرفیت جذب بالایی دارند. در فصل ۵ به بیان کوتاهی از خواص این مواد می پردازیم. در مجموع در این فصل خلاصه ای از انواع، ساختار، خواص، روشهای اندازه گیری، مصارف، کاربردها و تحقیقات صورت گرفته بر روی این پلیمرها ارائه خواهد شد. به طور قطع بیان کلیه خواص سوپرجاذبها در این قسمت امکان پذیر نخواهد بود. لذا برای شناخت بهتر و بیشتر این مواد پیشنهاد می شود که به [۲۶،۲۷] مراجعه شود.

آزمایشات انجام گرفته بوسیله سوپرجاذبها در فصل ششم تشریح خواهد شد. به طور کلی فعالیتهای آزمایشگاهی صورت گرفته را می توان به مراحل زیر تقسیم بندی نمود: ۱- محاسبه طرح اختلاط به گونه ای که کارایی مورد نظر را برآورده سازند. ۲- برآورد میزان SAP مؤثر برای نمونه ها با ساخت نمونه هایی با درصدهای مختلف از SAP ۳- بررسی میزان جذب و سرعت جذب سوپرجاذبها ۴- برآورد میزان جذب و سرعت جذب سوپرجاذبها در داخل مخلوطهای بتنی. ۵- برداشت نتایج مربوط به مقاومت و اسلامپ برای هر طرح اختلاط. فصل ۷ شامل نتایج و پیشنهادات می شود.

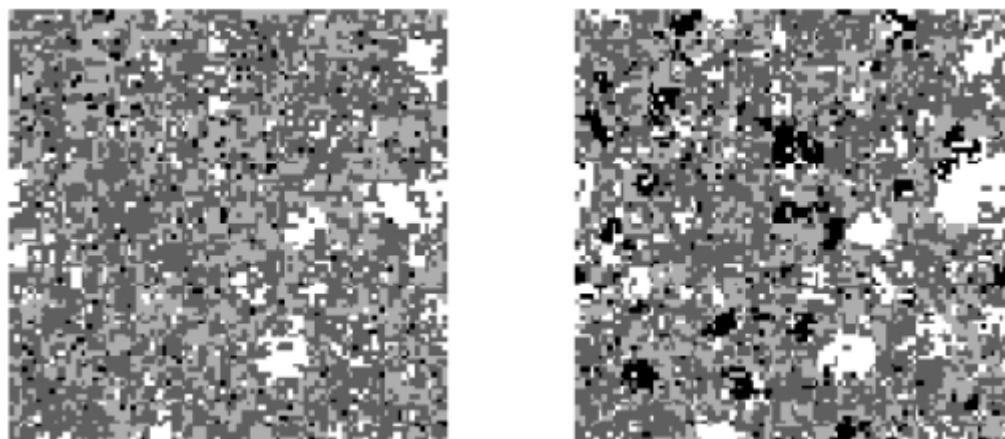
^۱ -superabsorbent polymer

فصل دوم

تئوریه‌های موجود برای عمل آوری داخلی و تشریح مدل پاورز

۲-۱ مقدمه

در طول چند دهه اخیر، این مطلب کاملاً به اثبات رسیده است که رساندن آب کافی برای فرایند هیدراسیون ضرورتی بسیار مهم در ساخت بتن می باشد. یک نسبت پایین آب به سیمان و نبودن آب کافی که در اثر تبخیر شدن آب از سطح بتن صورت می گیرد و از طرفی استفاده از میکروسیلیس در داخل بتن، تغییرات شیمیایی در فرایند هیدراسیون و ساختار حفرات داخلی بتن را به همراه خواهد داشت. این فرایند از آنجا ناشی می شود که رطوبت نسبی در بتن در طول فرایند سخت شدگی کاهش پیدا می کند؛ و لذا عمل خودخشک شدگی در صورت عدم وجود منابع آب خارجی کافی اتفاق خواهد افتاد. به دلیل فرایند خودخشک شدگی می باشد که، بتن دچار انقباض حجمی خواهد شد و در نتیجه ترک خوردگی آنرا به همراه خواهد داشت. از طرفی باعث تشکیل یک سری حفرات خالی (بزرگ) در میکروساختار خمیر سیمان می شود. در شکل ۱-۲ تفاوت موجود در میکرو ساختار بتن عمل آوری شده در محیط اشباع و بتن در محیط بسته به وضوح دیده می شود.



شکل ۱-۲ : خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان $w/c = 0.3$ در حالت اشباع (چپ) در محیط بسته (راست) نقاط سیاه نشانه وجود حفرات در خمیر سیمان می باشند [۱۰]

چندین راه مختلف برای جلوگیری از کاهش رطوبت نسبی، تغییر شکل و ترک خوردگی ناشی از فرایند خودخشک شدگی شناخته شده است. برای مثال یک راه حل اضافه کردن ذرات مصالح سنگی سبک^۱ (LWA) به بتن می باشد [۱۹،۳۱]. مصالح سنگی سبک (LWA) در حالت اشباع می توانند از

۱-lightweight aggregate

فرایند خود خشک شدگی جلوگیری کنند. مشکل مهم این تکنیک، کنترل سازگاری بین این مصالح و دیگر اجزای بتن و همچنین کاهش در مدول الاستیسیته و مقاومت خواهد بود.

یکی دیگر از تکنیکها و ابزار جدید برای جلوگیری از فرایند خودخشک شدگی و فراهم آوردن آب کافی برای فرایند هیدراسیون؛ وارد کردن موادی به نام سوپرجاذب^۱ (SAP) به داخل مواد پایه سیمانی می باشد. در طول مدت مخلوط کردن بتن، سوپرجاذبها آب را جذب می کنند و به صورت احجام ماکروسکوپی در داخل بتن ذخیره می شوند. که می توان آنها را به شکل آب آزاد در داخل بتن فرض کرد. نتیجتاً این فرایند شباهت بسیار زیادی به ایجاد بتن های هوادار شده، برای مقاومت در مقابل سیکلهای مختلف یخ زدگی خواهد داشت، به همین دلیل، یکی دیگر از نامهایی که برای این تکنیک استفاده شده است، بتن های آبدار^۲ می باشد [۷].

سوپرجاذبها می توانند، به عنوان مواد افزودنی خشک به بتن اضافه شوند. در مقابل استفاده از مصالح سنگی سبک، مصرف سوپرجاذبها به ما این امکان را خواهد داد که طراحی آزاد و ساده ای را برای تشکیل حفرات و توزیع و شکل آنها در داخل بتن سخت شده فراهم آوریم. بنابراین با استفاده از سوپرجاذبها و توزیع یکنواخت آنها در داخل بتن می توان تا حدود زیادی بتنی با حفرات یکپارچه و مناسب ایجاد نمود، و از اثرات نامطلوبی که بعضی از مواد افزودنی برای بتن های هوادار استفاده می شود، جلوگیری کنیم.

۲-۲ مدل پاورز برای توزیع حالت خمیر سیمان :

برای اینکه بتوان یک توزیع کلی و مناسبی از شکل و حالت یک خمیر سیمان سخت شده ارائه کرد لازم است که خواص شیمیایی و فیزیکی مواد تشکیل دهنده خمیر سیمان را کاملاً بشناسیم. توزیع و بررسی ساختار خمیر سیمان برای اهداف مختلفی از قبیل، نفوذپذیری، مقاومت و مقاومت در برابر یخبندان، مهم می باشد. براساس تحقیقات بسیار گسترده ای که در طی ۱۲ سال توسط پاورز و برون یارد^۳ انجام شد. یک مدل تجربی برای ساختار و توزیع حالت یک خمیر سیمان سخت شده در سال ۱۹۴۸ ارائه شد. این مدل، الگو و معیاری است در زمینه تحقیقات بر روی خمیر سیمان، که قادر

۱-superabsorbent polymer

۲-water entrainment

۳-Powers and Brownyard

خواهیم بود محاسبات کمی ترکیبات حجمی موجود در مواد پایه سیمانی را انجام دهیم. در سالهای بعد از آن این مدل توسط پاورز اصلاح شد لذا امروزه این مدل به نام مدل پاورز شناخته شده است. شاید بتوان که فرایند خودخشک شدگی و حجم آبی ایجاد شده در داخل بتن را به استفاده از این مدل به راحتی بیان کرد [۲۲].

مدل پاورز به طور کلی براساس یک مطالعه جامع بر روی همدمایی جذب بخار آب^۱ و آب مرزی شیمیایی^۲ در خمیر سیمان سخت شده می باشد. براساس این مطالعات یک طبقه بندی کلی و شاید تا حدودی منطقی در مورد انواع آبهای موجود در خمیر سیمان ارائه شده است که در زیر به آن اشاره خواهد شد.

۲-۱-۲ طبقه بندی آبهای موجود در خمیر سیمان :

آبی که در خمیر سیمان سخت شده وجود دارد را می توان به سه شکل تقسیم بندی کرد [۷]: (۱) آب موینگی (آب آزاد)^۳ (۲) آب ژلی (آب مرزی فیزیکی)^۴ (۳) آب مرزی شیمیایی (آب غیر قابل تبخیر)^۵

البته در بسیاری از مراجع دیگر این نوع تقسیم بندی به چشم می خورد [۲۱] اختلاف بین انواع آبها کاملاً مشخص نیست زیرا که سطح انرژی آنها اندکی باهم، هم پوشانی دارند [۱]. اندازه گیریهای پاورز نشان داد، به صورت شیمیایی، تقریباً ۰/۲۳ گرم آب با هر گرم سیمان که در طی فرایند هیدراسیون واکنش می دهد می چسبد (مقید می شود). این آب، آب مرزی شیمیایی یا آب غیر قابل تبخیر نامیده می شود، که در واقع یک بخشی از فضای داخلی ژل بوجود آمده را به خود اختصاص خواهد داد، که فقط در دمای بالاتر از ۱۰۵°C خارج خواهد شد. بر روی سطح جامد ژل، مقداری آب جذب می شود که تقریباً با ۰/۱۹ گرم آب که با هر گرم سیمان واکنش می دهد، برابر است. این آب، آب مرزی فیزیکی یا آب ژلی می باشد. مقدار آبی که به صورت فیزیکی جذب و یا مقید می شود بستگی

۱-water vapour sorption isotherms

۲-chemically bound water

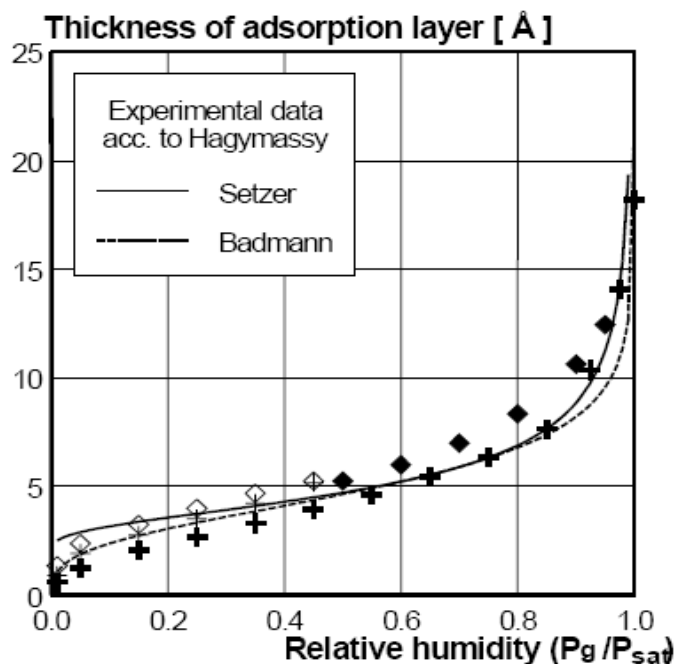
۳-capillary water(free water)

۴-gel water(physically bound water)

۵-chemically bound water(nonevaporable water)

۶-bound

به رطوبت نسبی^۱ RH سیستم حفرات دارد. همانطور که در شکل ۲-۲ مشاهده می شود ضخامت لایه های جذب با افزایش رطوبت نسبی، بیشتر می شود. ضخامت لایه جذب بیش از ۱ مونومولکول لایه آب در رطوبت نسبی ۲۰٪ (در حدود ۲/۷۶A°) و در حدود ۶ لایه مونومولکول در رطوبت نسبی ۱۰۰٪ خواهد بود [۱،۲۲].



شکل ۲-۲: ضخامت لایه های جذب به صورت تابعی از رطوبت نسبی [۱]

آب محدود نشده در خمیر سیمان آب آزاد یا آب مویینه نامیده می شود. این آب در حفرات بزرگ مویینه خمیر سیمان یافت می شود. تنها آب مویینه است که به صورت آزاد برای فرایند هیدراسیون در دسترس خواهد بود. در هر مرحله از هیدراسیون، منافذ مویینه معرف آن قسمت از حجم ناخالص می باشند که با محصولات هیدراسیون پر نشده اند. در نسبت آب به سیمان زیادتر از حدود ۰/۳۸، حجم ژل برای پر کردن کلیه فضای در دسترس آن، کافی نخواهد بود. بنابراین، قسمتی از حجم مویینه، حتی پس از کامل شدن فرایند هیدراسیون، خالی باقی می ماند. منافذ مویینه را نمی توان به طور مستقیم مشاهده نمود، اما اندازه متوسط آنها با استفاده از روش اندازه گیری فشار بخار آب، حدود $1/3 \mu\text{m}$ تخمین زده شده است [۲۱].

^۱ relative humidity

زمانی که محصولات هیدراسیون سیمان حجم کمتری نسبت به سیمان و آبی که وارد واکنش می شوند، را داشته باشند، کاهش حجم در بتن مشاهده می شود که به آن انقباض شیمیایی گفته می شود که مقدار آن بر طبق محاسبات پاورز تقریباً $6/4 \text{ ml}$ در هر گرم سیمان واکنش دهنده می باشد [۷].

۲-۲-۲ روابط حجمی در فرایند هیدراسیون براساس محاسبات پاورز :

همانطور که در بالا اشاره شد سه عامل کلیدی یعنی آب مرزی شیمیایی، آب ژله ای و انقباض شیمیایی، وابسته به ترکیبات موجود در خمیر سیمان می باشند. براساس این عوامل کلیدی در ادامه رابطه حجمی تقریبی موجود در فرایند هیدراسیون خمیر سیمان را می توان به صورت زیر بیان کرد :

$$V_{cs} = \rho_c 6.4 \times 10^{-5} (1-p)\alpha = 0.20(1-p)\alpha \quad (1-2) \quad (\text{Chemical shrinkage})$$

$$V_{cw} = p - \left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right)(0.19 + 0.23)(1-p)\alpha = p - 1.32(1-p)\alpha \quad (2-2) \quad (\text{capillary water})$$

$$V_{gw} = \left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right)0.19(1-p)\alpha = 0.60(1-p)\alpha \quad (3-2) \quad (\text{gel water})$$

$$V_{gs} = (1 - \rho_c 6.4 \times 10^{-5} + \left(\frac{\rho_c}{\rho_w}\right)0.23)(1-p)\alpha = 1.52(1-p)\alpha \quad (4-2) \quad (\text{gel solid})$$

$$V_{uc} = (1-p)(1-\alpha) \quad (5-2) \quad (\text{unhydrated cement})$$

جایی که V_i بخشی از حجم نسبی (m^3/m^3 خمیر سیمان)، α درجه هیدراسیون (نسبت سیمان

واکنش داده به سیمان اولیه)، ρ_c چگالی سیمان $\rho_c = 3150 \frac{kg}{m^3}$ ، ρ_w چگالی آب $\rho_w = 1000 \frac{kg}{m^3}$ ،

$$p = V_{cw,0} = \frac{w/c}{(w/c + \rho_w/\rho_c)}$$

تخلخل اولیه، که مقدار آن برابر است با: w/c نسبت آب به سیمان

آبی که آزادانه برای فرایند هیدراسیون سیمان در دسترس می باشد، آب موینگی خواهد بود. فرایند هیدراسیون زمانی که آب موینگی مصرف می شود با سرعت کمتری پیش خواهد رفت. در

هیدراسیون کامل، ۱ گرم سیمان تقریباً با ۰/۲۳ گرم آب شیمیایی و ۰/۱۹ گرم آب ژله ای مقید می شود (می چسبد)^۱. بنابراین هیدراسیون کامل فقط در نسبت آب به سیمان بالاتر از $0/42 = (0/19 + 0/23)$ امکان پذیر خواهد بود. اگر یک نمونه خمیر سیمان در حضور آب هیدراته شود کاهش حجم به علت انقباض شیمیایی با جذب آب از محیط اطراف جبران خواهد شد. این آب، بعد از این، آزادانه برای فرایند هیدراسیون در دسترس خواهد بود. در یک نسبت آب به سیمان پایینتر از ۰/۴۲، دسترسی آزاد به آب، ماکزیمم درجه هیدراسیون را افزایش می دهد [۷].

۲-۳ مدل حجمی پاورز برای خمیرسیمان :

ممکن است که در مقالات و تحقیقات دیگر، مشاهدات و یا نتایجی مخالف با مدل پاورز دیده شود، همچنین تعریفها و تعبیر بکار رفته برای آب ژله ای و آب موینه، ممکن است متفاوت باشد. به طور کلی طبقه بندی اشکال آب موجود در خمیر سیمان بوسیله مدل پاورز امری اختیاری بوده است، که در بیشتر مراجع طبقه بندی شبیه به این مدل دیده می شود. امادر بعضی از مراجع دیگر تعاریفات و تعبیرات متفاوتی در مورد اشکال آب موجود در خمیر سیمان وجود دارد. بنابراین، این طبقه بندی بسیار ساده می تواند در توصیف کمی آبهای مربوطه در خمیر سیمان مفید باشد، زیرا که بوسیله آن قادر خواهیم بود که بسیاری از خواص سیمان را بررسی کنیم.

حالتهای ترکیبی خمیر سیمان سخت شده را براساس مدل پاورز می توان به صورت زیر بیان

کرد [۱]:

$$\text{Chemical shrinkage : } V_{cs} = 0.2(1 - p). \alpha$$

$$\text{Capillary water: } V_{cw} = p - 1.32(1 - p). \alpha$$

$$\text{Gel water : } V_{gw} = 0.6(1 - p). \alpha$$

$$\text{Gel solid : } V_{gs} = 1.52(1 - p). \alpha$$

$$\text{unhydrated Cement: } V_{uc} = (1 - p). (1 - \alpha)$$

$$\text{where } \sum_i V_i = 1 \text{ and } p = \frac{w/c}{(w/c) + (\rho_w / \rho_c)}$$

$$\rho_c \cong 3150 \text{ kg/m}^3 \quad \rho_w \cong 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ : W و C وزن آب و سیمان می باشند}$$

۱-bind

مقادیر ثابت در مدل حجمی پاورز از داده های زیر بدست خواهد آمد :

Non-evaporable water : $W_n = 0.23 \text{ g/g reacted cement}$

Gel water : $W_{gw} = 0.19 \text{ g/g reacted cement}$

Chemical shrinkage : $V = 6.4 \text{ ml / 100g reacted cement}$

۴-۲-۲ مدل حجمی پاورز برای خمیر سیمان همراه با میکروسیلیس :

شاید یکی از برتریهایی که مدل پاورز نسبت به سایر الگوها دارد، میزان انعطاف پذیری این مدل برای توزیع و بسط خمیر های سیمان با ترکیباتی اضافی (مواد افزودنی مثل میکروسیلیس) خواهد بود. در این حالت فرض بر این است که میکروسیلیس به تناسب با سیمان واکنش می دهد. به عنوان مثال، اندازه گیری ها نشان می دهد که واکنش پوزولانی میکروسیلیس بوسیله حالت های تقریبی زیر توصیف می شود [۱]:

Non-evaporable water : $W_n = 0 \text{ g/g reacted silica fume}$

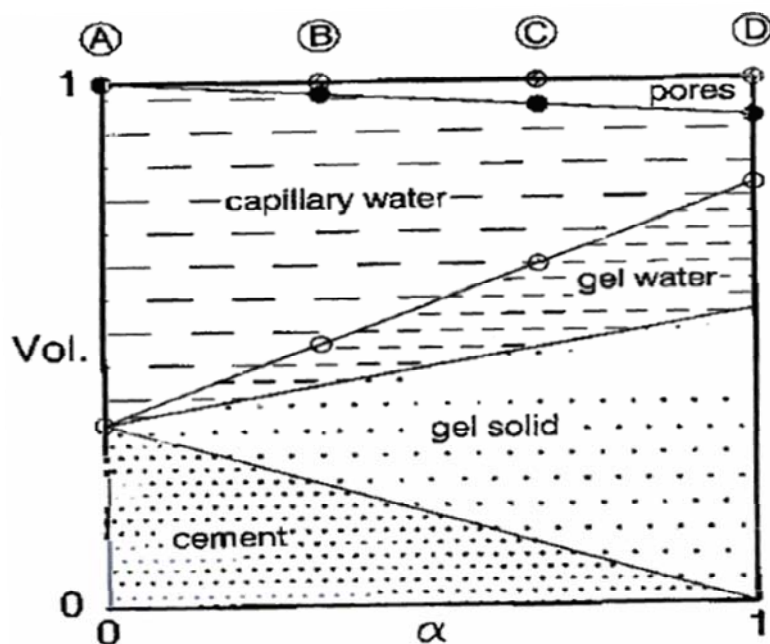
Gel water : $W_{gw} = 0.5 \text{ g/g reacted silica fume}$

Chemical shrinkage : $V = 22 \text{ ml/100g reacted silica fume}$

لذا معادلاتی که ذکر شد رامی توان برای توزیع ساختار درحالتی که از میکروسیلیس استفاده می کنیم بکار برد.

۳-۲ پیشرفت همدمایی جذب سطحی و توزیع حالت خمیر سیمان :

در شکل ۳-۲ روابط حجمی محاسبه شده بوسیله مدل پاورز برای یک خمیر سیمان هیدراته شده با نسبت آب به سیمان بالا نشان داده شده است.



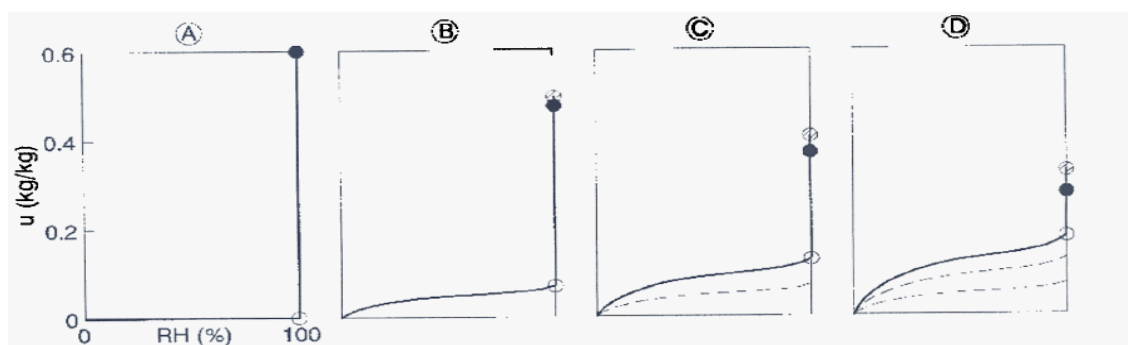
شکل ۲-۳: توزیع حجمی خمیر سیمان به صورت تابعی از درجه هیدراسیون، α ، در $w/c=0.16$

دیاگرام برای یک سیستم بسته یعنی سیستمی که با محیط اطراف هیچ گونه تبادل یا انتقال رطوبت ندارد، نشان داده شده است. همانطور که در شکل دیده می شود در ابتدای کار فقط آب و سیمان در سیستم وجود دارد، آب موجود در این حالت، آب مویینه نامیده شده است، که برای عمل هیدراسیون در دسترس می باشد. همزمان با پیشرفت هیدراسیون واکنش سیمان با آب بیشتر و بیشتر شده و باعث تشکیل جسم جامد ژل و آب ژلی می شود. همانطور که در شکل دیده می شود حفراتی نیز بوجود می آید. که نشان از وجود انقباض شیمیایی می باشد، و از این واقعیت منتج می شود که محصولات هیدراسیون حجم کمتری نسبت به واکنش دهنده ها دارند.

به علت نسبت آب به سیمان بالا (بیشتر از ۰/۴۲) خمیر سیمان به صورت کامل هیدارته شده (البته به صورت تئوری) و یک مقدار آب اضافی غیرمرزی (مقید نشده) در حفرات مویینه بزرگ باقی خواهد ماند. بنابراین در این حالت براساس تئوری موجود سیمان به صورت کامل هیدارته شده است. همانطور که گفته شد، در فرایند هیدراسیون، سیمان با آب واکنش می دهد و ژل جامد را تولید می کند. روی سطح ژل، یک مقدار مشخصی آب در اثر نیروهای جاذب وجود دارد که به آن آب ژلی گفته می شود. با توجه به شکل، از آنجا که محصولات حاصل از فرایند هیدراسیون (ژل جامد) فضای کمتری نسبت به سیمان و آب ترکیبی اشغال می کنند، در این حالت یک فضای خالی در داخل حجم ناخالص خمیر سیمان باقی خواهد ماند [۷]. برای سیمانی که به صورت کامل هیدارته شده است، بدون هیچ گونه آب

اضافی که برای فرایند هیدراسیون نیاز باشد، این فضای باقیمانده در حدود ۱۸/۵ درصد حجم اولیه سیمان خشک می باشد. فضای باقیمانده تشکیل شده است از سوراخها و یا حفرات مویینه، که می توانند خالی و یا پر از آب باشند، که وابسته به کمیت و کیفیت آب مخلوط اصلی و همچنین اینکه آیا آب اضافی در طی فرایند هیدراسیون می تواند وارد شود یا خیر، خواهد بود [۲۱]. حفرات مویینه نسبت به حفرات ژلی بسیار بزرگتر می باشند (قطر آنها در حدود $1 \mu\text{m}$ خواهد بود) [۹،۱۶].

شکل ۲-۴ به طور خلاصه نشان می دهد که همدمایی جذب سطحی در طول فرایند هیدراسیون در یک نسبت آب به سیمان بالا چگونه پیشرفت خواهد کرد.

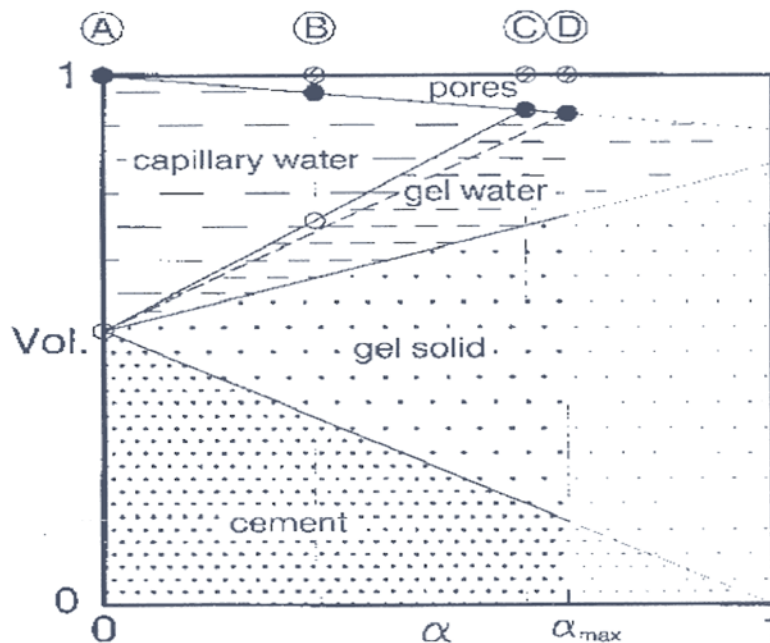


شکل ۲-۴: پیشرفت همدمایی جذب سطحی در طی هیدراسیون در شرایط بسته در نسبت آب به سیمان $w/c=0.6$ با توجه به مدل پاورز برای چهار نقطه همدمما (A-D) با درجه هیدراسیون مختلف که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. مقدار آب قابل تبخیر، u ، به صورت نسبت آب در هر کیلوگرم جسم جامد (سیمان و ژل جامد)، علامتها: \bullet مقدار آب قابل تبخیر در شرایط اشباع؛ \circ مقدار آب قابل تبخیر بعد از هیدراسیون در شرایط بسته؛ \circ مقدار آب ژلی در رطوبت نسبی ۱۰۰٪ [۷].

همانطور که در شکل دیده می شود با افزایش درجه هیدراسیون مقدار آب مویینه بیشتری مصرف می شود. و به دنبال آن مقدار آب ژلی نیز افزایش پیدا خواهد کرد. از آنجا که با افزایش نسبت آب به سیمان شاهد بالا بودن آب و رطوبت نسبی داخلی بتن خواهیم بود، در این حالت مقدار آب مویینه همواره در تعادل با رطوبت نسبی ۱۰۰٪ می باشد.

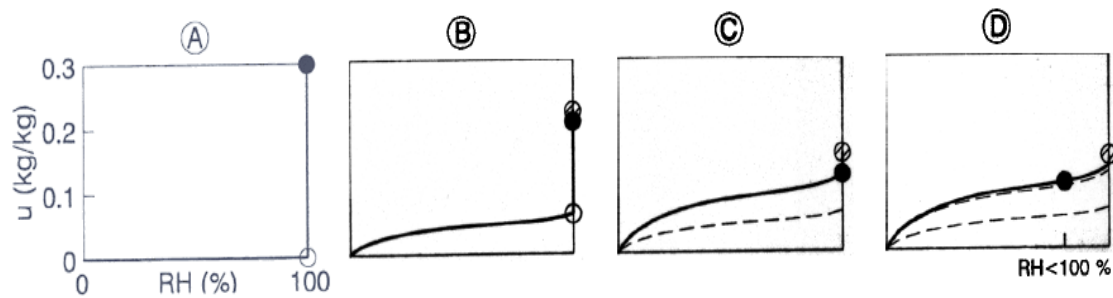
در یک نسبت آب به سیمان پایینتر از ۰/۴۲، آب کافی مویینگی برای هیدراسیون یک خمیر سیمان با شرایط عمل آوری بسته وجود ندارد. این مطلب در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. طبق اندازه گیری های مدل پاورز [۷،۲۲]، هیدراسیون سیمان وقتی که خلل و فرج موجود در ژل سیمان (آب ژلی و جسم جامد ژل) به یک مقدار معینی برسد، نمی تواند بعد از آن ادامه پیدا کند. پاورز تشخیص داد که تخلخل مینیمم یک ژل را به عنوان یک نتیجه منطقی از محدود شدن رشد

ذرات ژلی و عدم توانایی ذرات جدید برای تشکیل دادن آب جذب شده سطحی، می توان در نظر گرفت. تخلخل مینیمم ژل، در حدود ۲۶ تا ۲۸٪ می باشد که در این مثال در حالت D مشخص شده است.



شکل ۲-۵: توزیع حجمی خمیر سیمان به صورت تابعی از درجه هیدراسیون، α ، در $w/c=0.3$

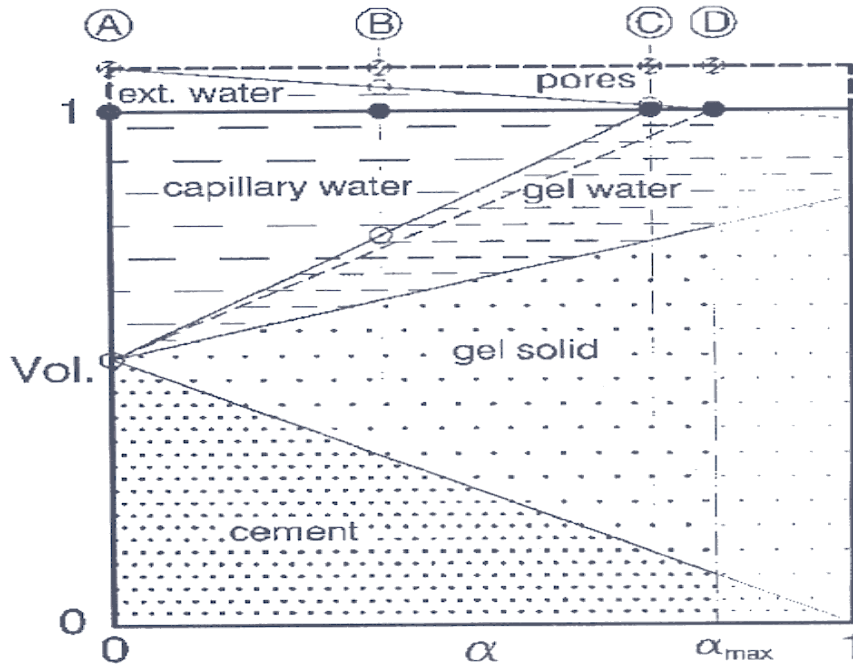
شکل (۲-۶) به صورت شماتیک نحوه پیشرفت جذب سطحی در طول فرایند هیدراسیون را برای یک نسبت آب به سیمان پایین نشان می دهد. همانطور که در شکل دیده می شود، آب موینگی در حالت C کاملاً مصرف شده، و در نتیجه آن هیدراسیون با روندی بسیار کندی پیش خواهد رفت و تلاش سیمان برای واکنش دادن با آب ژلی کاملاً محدود می شود. در این حالت، رطوبت نسبی کاهش پیدا می کند و خمیر سیمان هیدراته شده، دچار خودخشک شدگی می شود (حالت‌های C و D).



شکل ۲-۶: پیشرفت همدمای جذب سطحی در طی هیدراسیون در شرایط بسته در نسبت آب به سیمان $w/c=0.3$ با توجه به مدل پاورز برای چهار نقطه همدمما (A-D) با درجه هیدراسیون مختلف که در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. مقدار آب قابل تبخیر، u ، به صورت نسبت آب در هر کیلوگرم جسم جامد (سیمان و ژل جامد). علامتها: \odot مقدار آب قابل تبخیر در شرایط اشباع؛ \bullet مقدار آب قابل تبخیر بعد از هیدراسیون در شرایط بسته؛ \circ مقدار آب زلی در رطوبت نسبی ۱۰۰٪ [۷].

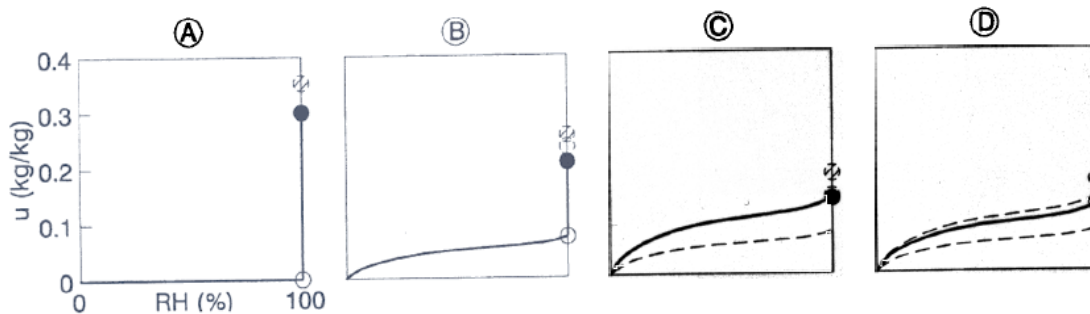
۲-۴ کاربرد مدل پاورز برای خمیر سیمان آبدار :

یک خمیر سیمان آبدار، در واقع خمیر سیمانی است که حجمهای آبی در آن در زمان مخلوط کردن و قبل از سخت شدگی در آن ایجاد شده باشد. این آب داخلی می تواند جهت جلوگیری از خودخشک شدگی در طول فرایند هیدراسیون، مؤثر باشد. شکل ۲-۷ توزیع شماتیکی از یک خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان پایین که آب لازم برای فرایند هیدراسیون به صورت آزادانه فراهم می شود، را نشان می دهد. این آب به سیمان اجازه می دهد که به درجه بالایی از هیدراسیون برسد. بعلاوه، هیچ گونه حفره پر از هوا در داخل خمیر سیمان نیز تشکیل نخواهد شد. آب خارجی که در شکل (۲-۷) نشان داده شده است، ممکن است که در داخل خمیر سیمان قرار داده شود، که این کار توسط وسایل مختلف و از قبل طراحی شده و به صورت حالت‌های غیر پیوسته با حفرات پر از آب انجام خواهد شد. در طی فرایند هیدراسیون، این احجام آبی شکل خالی شده و در انتها حفرات خالی پر از هوا از خود باقی خواهند گذاشت که برخی از آنها بوسیله محصولات هیدراسیون پر خواهند شد.



شکل ۷-۲: توزیع حجمی خمیر سیمان به صورت تابعی از درجه هیدراسیون، α ، در $W/C = 0.3$. نمودار برای هیدراسیون توسط یک منبع آب خارجی یعنی یک سیستم باز و یا یک منبع آب داخلی نشان داده شده است. به علت پایین بودن نسبت آب به سیمان، هیدراسیون کامل خمیر سیمان بدست نخواهد آمد [۷].

در شکل ۸-۲ همدمایی جذب سطحی نشان می دهد که، در این حالت از عمل خودخشک شدگی جلوگیری شده است. وقتی که فرایند هیدراسیون سیمان، به علت الزامات تخلخل مینیممی که برای ژل سیمان پیش بینی می شود، به پایان می رسد، حالت D، رطوبت نسبی هنوز ۱۰۰٪ می باشد. در واقع در این حالت از خودخشک شدگی جلوگیری به عمل آمده است.



شکل ۸-۲: پیشرفت همدمایی جذب سطحی در طی هیدراسیون در نسبت آب به سیمان $W/C = 0.3$ زمانی که آب داخلی و یا خارجی برای خمیر سیمان فراهم شود. مربوط به چهار نقطه همدمایی (A-D) با درجه هیدراسیون مختلف که در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. به علت وجود یک منبع آب داخلی و یا خارجی، رطوبت نسبی حتی با وجود مصرف شدن آب مویینه در تعادل ۱۰۰٪ باقی خواهد ماند [۷].

با توجه به اینکه حفرات در مجموع اثر منفی برای روی خواص خمیر سیمان دارند، فقط مقدار آبی که برای جلوگیری از خودخشک شدگی لازم است، باید استفاده شود. براساس مدل پاورز معادلات (۱-۲)-(۵-۲) ممکن است که بتوان تخمین زد چه مقدار آب داخلی^۱ برای جلوگیری از فرایند خودخشک شدگی نیاز است.

۵-۲ مدلی برای محاسبه آب داخلی :

مقدار آب داخلی برای جلوگیری از خودخشک شدگی برابر با انقباض شیمیایی یک خمیر سیمان در شرایط بسته می باشد [۱]. در توضیحات بالا، مدل کلی پاورز با اندکی اصلاح و به منظور توصیف خودخشک شدگی همراه با مفهوم بسیار ساده ای از آب ژلی و مویینه، بیان شد. از یک نقطه نظر محاسباتی، پاورز آب ژلی را به عنوان آب غیرقابل دسترس برای هیدراسیون سیمان تعریف کرد. بنابراین، اگر بر طبق مدل پاورز فرض کنیم که هیدراسیون در یک نسبت آب به سیمان پایین زمانی متوقف می شود که همه فضاهاى دسترسى توسط آب ژلی، جسم جامد ژل و سیمان هیدراته نشده اشغال شود از معادلات ۲-۳ و ۴-۲ و ۵-۲ داریم :

$$\alpha = \alpha_{max} \quad \text{for} \quad V_{gw} + V_{gs} + V_{uc} = 1 \quad \rightarrow$$

$$0.6(1-p)\alpha_{max} + 1.52(1-p)\alpha_{max} + (1-p)(1-\alpha_{max}) = 1$$

بنابراین در یک سیستم بسته با نسبت آب به سیمان پایین :

$$\alpha_{max} = \frac{p}{1.12(1-p)} \quad (۶-۲)$$

حجم نسبی آبدار اولیه^۲ $V_{ew,0}$ باید برابر انقباض شیمیایی در ماکزیمم درجه هیدراسیون داده شده بوسیله معادله (۶-۲) باشد. لذا داریم $p = V_{cw,0}$ با وارد کردن معادله (۶-۲) در معادله (۱-۲) داریم :

$$V_{ew,0} = 0.2(1-p)\alpha_{max} = 0.18p = 0.18V_{cw,0} \quad (۷-۲)$$

برای یک نسبت w/c (کیلوگرم سیمان/کیلوگرم آب)، آب وارد شده و آب مویینه اولیه را می توان از روابط زیر بیان کرد :

۱-entrained water

۲-initially entrained water

$$(w/c)_e = \frac{V_{ew} \rho_w}{V_{ce} \rho_c}; \quad (w/c) = \frac{V_{cw} \rho_w}{V_{cw} \rho_c} \quad (8-2)$$

بنابراین از معادله ۷-۲ و ۸-۲، آب لازم برای بدست آوردن $\alpha_{max} = \frac{p}{1.12(1-p)}$ برابر خواهد بود با:

$$(w/c)_e = 0.18(w/c) \quad \text{for } w/c \leq 0.36 \quad (9-2)$$

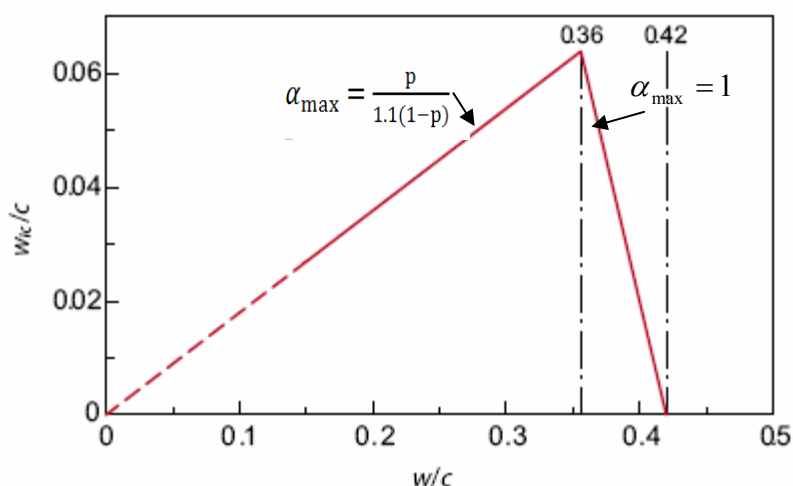
معادله ۹-۲ برای نسبت‌های آب به سیمان $(w/c) < 0.36$ می باشد، برای مقادیر بالاتری از نسبت آب به سیمان هیدراسیون کامل سیمان با مقادیر کمتری از آب داخلی می تواند بوجود بیاید. بنابراین، با توجه به مدل پاورز هیدراسیون کامل $\alpha_{max} = 1$ ، ممکن است در فاصله نسبت آب به سیمان بین ۰/۳۶ تا ۰/۴۲ اتفاق بیفتد و این در صورتی است که داشته باشیم:

$$(w/c) + (w/c)_e = 0.42 \quad (10-2)$$

بنابراین شرایط لازم برای بدست آوردن $\alpha_{max} = 1$ در این فاصله از نسبت آب به سیمان به صورت زیر است:

$$(w/c)_e = 0.42 - (w/c) \quad \text{for } 0.36 \leq w/c \leq 0.42 \quad (11-2)$$

به عنوان یک مثال، معادله ۹-۲ برای یک نسبت آب به سیمان $(w/c) = 0.3$ مقدار $0.18 \times 0.30 = 0.054 \text{ g}$ آب داخلی نیاز دارد. شکل ۹-۲ مقدار مینیمم آب ورودی مورد نیاز برای بدست آوردن α_{max} را با توجه به معادلات ۹-۲ و ۱۱-۲ نشان می دهد [۷].



شکل ۹-۲: مقدار مینیمم آب مورد نیاز داخلی برای رسیدن به هیدراسیون کامل α_{max} و بوسیله آن، جلوگیری از خود خشک شدگی در طی فرایند هیدراسیون با توجه به معادلات (۹-۲) و (۱۰-۲) [۲۲].

۶-۲ آب داخلی مورد نیاز در خمیر سیمان همراه با میکروسیلیس :

معادله $\alpha = \alpha_{max}$ for $V_{gh} + V_{gs} + V_{uc} = 1$ باتوجه به مدل پاورز برای خمیر سیمان همراه با میکروسیلیس دوباره نوشته می شود [۱] :

$$\alpha = \alpha_{max} \quad \text{for} \quad V_{gw} + V_{gs} + V_{uc} + V_s = 1 \quad \rightarrow$$

$$\kappa \cdot (0.6 + 1.57(S/c)) \cdot (1-p) \cdot \alpha_{max} + \kappa \cdot (1.52 + 0.74(S/c)) \cdot (1-p) \cdot \alpha_{max} + \kappa \cdot (1-p) \cdot (1-\alpha_{max}) + \kappa \cdot (1.43(S/c)) \cdot (1-p) \cdot (1-\alpha_{max}) = 1$$

□

$$\alpha_{max} = \frac{1 - \kappa \cdot (1 + 1.43(S/c)) \cdot (1-p)}{\kappa \cdot (1.12 + 0.88(S/c)) \cdot (1-p)} = \frac{p}{\kappa \cdot (1.12 + 0.88(S/c)) \cdot (1-p)} \quad (12-2)$$

با مقایسه با معادله (۶-۲)، کاملاً مشخص است که ماکزیمم درجه هیدراسیون قابل دسترس در شرایط اشباع برای یک نسبت آب به سیمان معلوم با اضافه کردن میکروسیلیس کاهش پیدا می کند. همانطور که قبلاً اشاره شده، حجم نسبی آبدار اولیه، $V_{ew,0}$ ، برابر با انقباض شیمیایی در ماکزیمم درجه هیدراسیون خواهد بود، با دوباره نوشتن معادله خواهیم داشت :

$$V_{ew,0} = \kappa \cdot (0.2 + 0.69(S/c)) \cdot (1-p) \cdot \alpha_{max}$$

$$V_{ew,0} = \kappa \cdot (0.2 + 0.69(S/c)) \cdot (1-p) \cdot \frac{p}{\kappa \cdot (1.12 + 0.88(S/c)) \cdot (1-p)}$$

$$V_{ew,0} = \frac{(0.2 + 0.69(S/c)) \cdot p}{(1.12 + 0.88(S/c))} \quad (12-2)$$

همچنین در این حالت، $p = V_{ew,0}$ با استفاده مجدد از معادله (۹-۲) می توان مقدار آب داخلی برای خمیر سیمان اصلاح شده بوسیله میکروسیلیس با نسبت آب به سیمان پایین را دوباره نوشت:

$$(W/c)_e = \frac{0.2 + 0.69(S/c)}{1.12 + 0.88(S/c)} \cdot (W/c) \quad \text{for} \quad (W/c) \leq (0.36 + 0.28(S/c)) \quad (13-2)$$

معادله (۲-۱۳) را فقط می توان برای خمیر های سیمانی بکار برد که نسبت آب به سیمان در آنها پایینتر از یک مقدار کافی برای رسیدن به ماکزیمم هیدراسیون ممکن در شرایط اشباع می باشد. برای یک خمیر سیمان اصلاح شده با میکروسیلیس که در شرایط محیط بسته قرار می گیرد، نسبت W/C مورد نیاز برای هیدراسیون کامل در شرایطی بدست خواهد آمد که همه آبهای مویینه در یک درجه هیدراسیون $\alpha = 1$ کاملاً مصرف شوند. مینیمم مقدار W/C مورد نیاز در شرایط محیط بسته، برابر خواهد بود با:

$$(W/C)_{min,sea} = (0.42 + 0.73(S/C)) \quad (2-14)$$

مطمئناً هیدراسیون کامل، برای یک نسبت آب به سیمان بالاتر از این مقدار با مقادیر کمتری از آب داخلی، انجام خواهد پذیرفت. با توجه به مدل پاورز، هیدراسیون کامل در یک سیستم بسته در فاصله

$$(0.36 + 0.28(S/C)) \leq (W/C) \leq (0.42 + 0.73(S/C)) \quad \text{اگر}$$

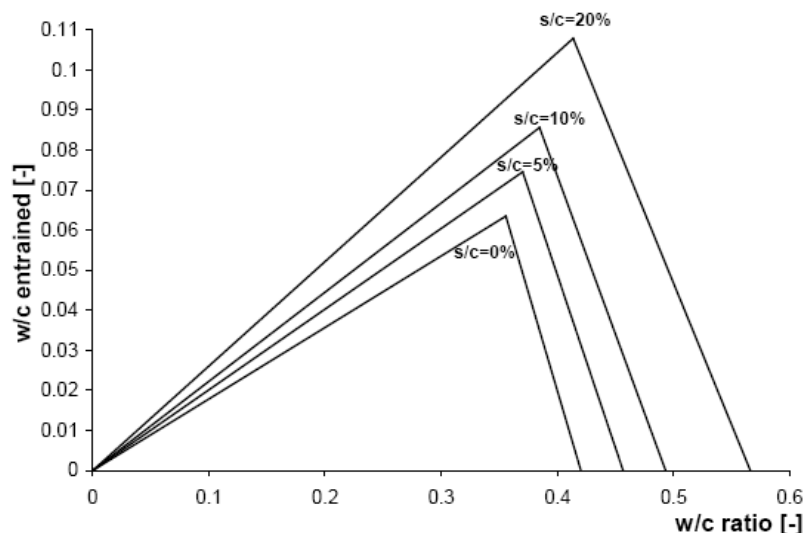
$$(W/C) + (W/C)_e = (0.42 + 0.73(W/C)) \quad (2-15)$$

باشد، امکان پذیر خواهد بود.

بنابراین، شرایط لازم برای رسیدن به $\alpha_{max} = 1$ در این فاصله برابر خواهد بود با:

$$(W/C)_e = (0.42 + 0.73(S/C)) - (W/C) \quad (2-16)$$

شکل (۲-۱۰) نسبت W/C لازم را برای جلوگیری از خودخشک شدگی به صورت تابعی از نسبت آب به سیمان (W/C) در خمیر سیمان با مقادیر مختلفی از نسبت میکروسیلیس به سیمان (S/C) نشان می دهد. این نمودار را می توان برای طراحی آب مورد نیاز برای مخلوطهایی که از آب داخلی برای جلوگیری از فرایند خودخشک شدگی استفاده می کنند، بکار برد.



شکل ۲-۱۰: نسبت آب داخلی مورد نیاز برای جلوگیری از خودخشک شدگی به صورت تابعی از (w/c) برای نسبت‌های مختلفی از (s/c) [۱].

همانطور که دیده می‌شود، با توجه به مدل، ماکزیمم درجه هیدراسیون ممکن با افزایش میکروسیلیس در هر نسبت آب به سیمان کاهش پیدا می‌کند، که این فرایند نیز به دلیل جذب یک بخشی از آبهای مویینه بر روی سطح ژل پوزولانی CSH خواهد بود. این آب جذب شده برای ادامه هیدراسیون غیر قابل دسترس خواهد بود. به هر حال، از آنجا که واکنشهای پوزولانی انقباض شیمیایی بیشتری (در حدود ۳ برابر انقباض شیمیایی سیمان پرتلند) تولید می‌کنند، مقدار آب داخلی^۱ با بیشتر شدن میزان مصرف میکروسیلیس به طور قطع افزایش خواهد یافت [۱].

۲-۷ مثالی برای محاسبه مقدار تئوری آب لازم برای عمل آوری داخلی:

همانطور که قبلاً اشاره شده، با استفاده از مدل پاورز می‌توان مقدار آب لازم برای جلوگیری عمل آوری داخلی را به راحتی محاسبه کرد. با توجه به این مدل، مقدار ماکزیمم در نسبت آب به سیمان $0.36/0.065$ (بدست خواهد آمد. که مطابق با $0.065/0.36$ کیلوگرم آب در هر کیلوگرم خمیر سیمان خواهد بود. محاسباتی که در زیر ارائه خواهد شد مقدار آب لازم را برای هر متر مکعب بتن محاسبه خواهد کرد [۷].

حجم نسبی ترکیبات موجود در بتن با هوای آزاد را می‌توان به صورت زیر جمع کرد:

$$V_{agg} + V_{paste} = 1 \quad \rightarrow \quad V_{agg} + V_w + V_c = 1 \quad (1-3)$$

۱-water entrained

که V_1 در اینجا حجم نسبی ترکیبات موجود در بتن خواهد بود (agg=aggregate حجم مصالح سنگی)، (w=water حجم نسبی آب) و (c=cement حجم نسبی سیمان).

همانطور که می دانیم مقدار مصالح سنگی در مخلوطها با عملکرد بالا به طور طبیعی از یک بتن معمولی کمتر خواهد بود. با فرض اینکه ۵۰٪ از این حجم را مصالح سنگی اشغال کرده باشند و با تبدیل معادله فوق به جرم هر یک از ترکیبات معادله (۳-۱) به صورت زیر تغییر خواهد یافت :

$$0.5 = M_c \cdot \frac{w/c}{p_w} + \frac{M_c}{p_c} = M_c \cdot \left(\frac{0.36}{1000} + \frac{1}{3150} \right) \quad (2-3)$$

با حل معادله فوق یک محدوده بالایی برای خمیرهای سیمانی با عملکرد بالا بدست خواهد آمد :

$$M_c = 740 \text{ kg/m}^3$$

بنابراین مقدار آب ماکزیمی که به صورت تئوری برای عمل آوری داخلی بتن بدست خواهد آمد برابر خواهد بود با :

$$M_{w,ic,mix} = 740 \times 0.065 \cong 50 \text{ kg/m}^3$$

با توجه به مطالبی که ارائه شد می توان نتیجه گیری کرد که برای بتن هایی با مقدار مصالح سنگی بیشتر و با نسبت آب به سیمان غیر از ۰/۳۶، نیاز به آب کمتری جهت عمل آوری داخلی بتن خواهیم داشت. برای مثال اگر مقدار مصالح سنگی به ۷۵٪ افزایش یابد و با نسبت آب به

$$M_{w,ic,mix} = 25 \text{ kg/m}^3 \quad \text{سیمان } 0/36 (w/c) \text{ مقدار آب لازم برابر خواهد بود با :}$$

۲-۷ نتیجه گیری:

آب ورودی در حالت خالص خود- حجمهای ایجاد شده بوسیله سوپر جاذبها- برای جلوگیری از فرایند خودخشک شدگی بسیار مؤثر می باشند. بنابراین، این مواد همچنین بر روی خواص دیگر خمیر سیمان، چه در حالت تازه و چه در حالت سخت شده اثر خواهد گذاشت. مقاومت و دوام دو فاکتور بسیار مهم در رابطه با بتن می باشند، بنابراین بررسی این دو عامل، از مهمترین اهداف در ارزیابی بتن ها با عمل آوری داخلی می باشد. اما به طور خلاصه می توان گفت که آب ورودی همانند احجام کروی بر روی مقاومت و نفوذپذیری/انتشار بتن ممکن است که اثر مثبت بگذارند.

با توجه به تئوریهای ارائه شده احتمال اینکه یک خمیر سیمان آبدار (با آب داخلی) در $w/c = 0.3 + 0.05$ با یک خمیر سیمان با $w/c = 0.3$ و بدون آب داخلی از نقطه نظر ماکزیمم درجه هیدراسیون و یا تخلخل کلی معادل باشد، وجود دارد. هر چند که، توزیع حفرات داخلی هر دو خمیر سیمان سخت شده اساساً نسبت به هم متفاوت خواهند بود. خمیر سیمان آبدار به طور هندسی شامل حفرات و حجمهای از پیش طراحی شده و بسیار ریز و گسترده خواهد بود که به صورت نامنظم و جزئی حفرات مویینه را با هم مرتبط می سازند. خمیر سیمانی که در این حالت بین حجمهای حفرات ایجاد شده وجود دارد، یک خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان $w/c = 0.3$ با شرایط عمل آوری بهینه خواهد بود، زیرا که به طور محلی با دستیابی آزاد به آب، هیدراته می شود.

این تغییرات در ساختار حفرات احتمالاً برای هر دو عامل اساسی یعنی مقاومت و دوام بتن مؤثر خواهد بود. چه به صورت آزمایشگاهی و چه به صورت تئوری می توان به این نتیجه رسید که این حفرات کروی، مقاومت بتن را نسبت به حفرات با اشکال کنترل نشده در داخل بتن کمتر کاهش خواهند داد. بنابراین یک خمیر سیمان آبدار $w/c = 0.3 + 0.05$ باید نسبت به یک خمیر سیمان با $w/c = 0.35$ و بدون آب دارای مقاومت بیشتری باشد.

برای تخمین اثر آب داخلی بر روی مقاومت، بهتر است که یک خمیر سیمان آبدار با نسبت آب به سیمان $w/c = 0.3 + 0.05$ را با یک خمیر سیمان و بدون آب و با نسبت $w/c = 0.3$ مقایسه کنیم. برای شروع و بیان این نقطه نظر، می توان به این صورت بیان کرد که آب داخلی ۲ اثر متفاوت بر روی مقاومت خواهد داشت؛ خمیر سیمان با ایجاد یکسری حفرات کروی مقاومت بتن را کاهش خواهد داد اما از سویی شرایط مناسب عمل آوری، باعث افزایش مقاومت بتن خواهد شد. این اثر باعث می شود که بتوان به صورت جداگانه این اثرات را بررسی کرد. براساس محاسبات انجام شده کاهش مقاومت به علت حفرات کروی براساس مدل پاورز و یا فرض اینکه مصالح سنگی ۶۰ درصد از حجم بتن را تشکیل دهند کاهش ۱۶ درصدی در مقاومت بتن خواهیم داشت، اما از طرفی درجه هیدراسیون از ۰/۷۲ به ۰/۸۵ افزایش پیدا می کند که این منجر به افزایش مقاومت بتن به میزان ۱۸ درصد خواهد شد البته این در صورتی است که مقاومت بتن از جهت اطمینان با افزایش نسبت درجه هیدراسیون متناسب باشد [۷].

فصل سوم

روشها و موادی برای عمل آوری داخلی

در این بخش تکنیکهای مختلف عمل آوری از جمله عمل آوری داخلی مورد بررسی قرار می گیرد. همانطور که گفته شد عمل آوری داخلی می تواند برای کاهش اثرات منفی اتلافات آب با محیط اطراف بوسیله اطمینان حاصل کردن از دسترسی کامل به آب برای واکنشهای سیمانی، استفاده شود. به هر حال، اتلافات آب نسبت به محیط اطراف را می توان بوسیله ابزارها و وسایل دیگر نیز کاهش داد، از جمله عمل آوری غشایی^۱ که در بعضی از فعالیتهای آزمایشگاهی از آن استفاده شده است. اما آنچه که در اینجا بیشتر مورد مطالعه قرار می گیرد استفاده از عمل آوری داخلی برای از بین بردن عمل خشک شدگی و به دنبال آن جلوگیری از پدیده انقباض خشک در طول فرایند هیدراسیون، می باشد. اهداف دیگری از قبیل افزایش درجه هیدراسیون، بهتر شدن خواص داخلی، کم اثر کردن آب خارجی برای عمل آوری بتن و . . . نیز مورد توجه قرار خواهد گرفت. از میان روشهای مطرح شده در این قسمت، بسیاری از آنها برای چندین سال می باشد که مورد استفاده قرار گرفته است، کاربرد این روشها از زمانی که مصرف بتن های با مقاومت و عملکرد بالا در صنعت ساختمان سازی و پل سازی مورد توجه قرار گرفت، افزایش چشمگیری داشته است. از میان روشهای ارائه شده، بعضی از آنها غیر عملی بوده و هنوز در زمینه مطالعات اولیه قرار دارد، از اینرو تعدادی از این روشها ممکن است که در آینده نزدیک مورد استفاده قرار گیرد. البته بیشتر بر روی روشهایی تأکید می شود که در عین سادگی کاربرد، به راحتی نیز در دسترس باشند. از میان این روشها استفاده از مصالح سنگی سبک^۲ اشباع شده (LWA) و همچنین سوپر جاذبها^۳ (SAP) تأکید بیشتری خواهد شد.

۱-membrance curing

۲-lightweight aggregate

۳-superabsorbent polymer

۳-۶ عمل آوری بتن:

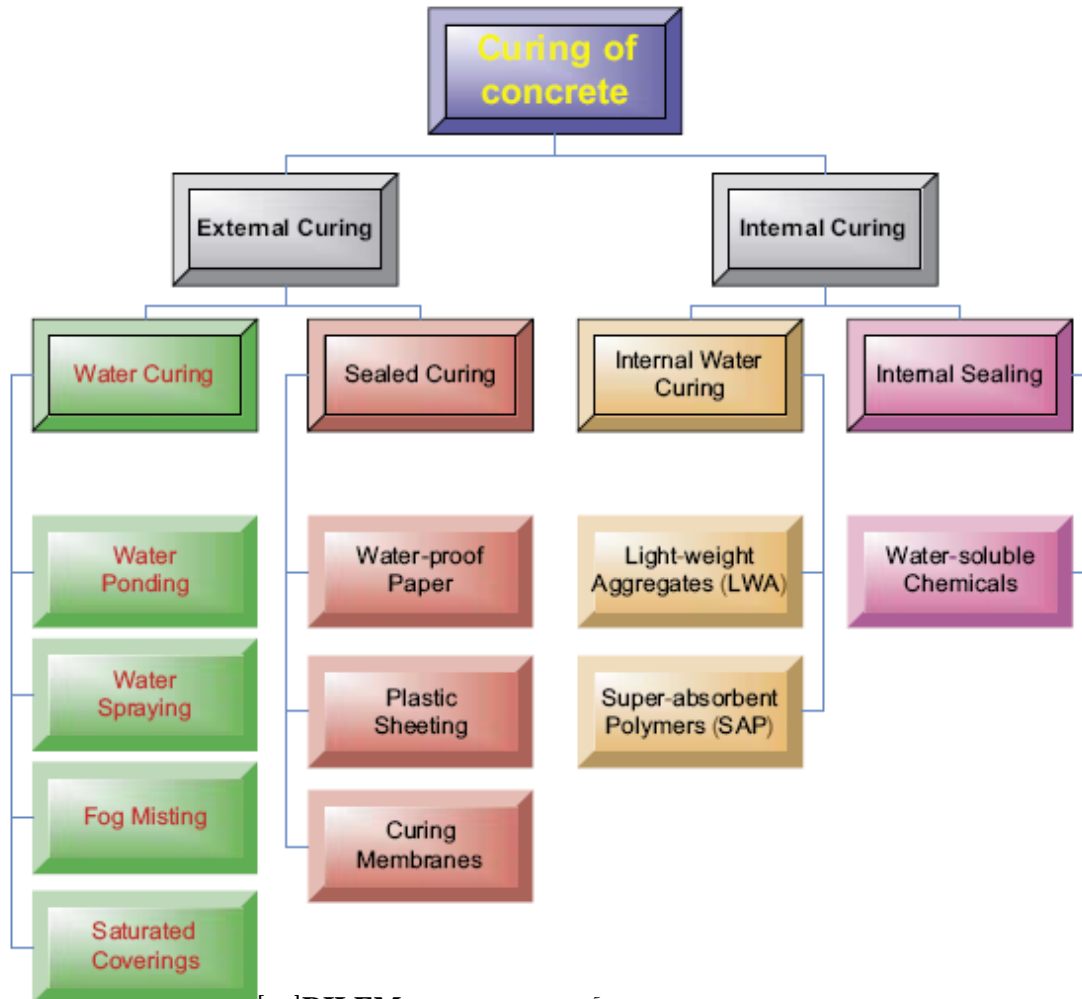
عمل آوری اصطلاحی است که به روشهای بکار برده شده جهت گسترش هیدراسیون سیمان اطلاق می گردد و تشکیل شده از کنترل درجه حرارت و تبادل رطوبتی بین بتن در محیط خارج آن. اگر دقیقتر بخواهیم، هدف عمل آوری نگهداری بتن به صورت اشباع شده با آب، و یا تا حد امکان اشباع شده می باشد، تا فضاهایی که در خمیر سیمان تازه در ابتدا با آب پر شده بودن تا حد مطلوبی با محصولات هیدراسیون پر شوند. در مورد بتن کارگاهی تقریباً همیشه قبل از اینکه حداکثر هیدراسیون ممکن رخ دهد عمل آوری مؤثر آن متوقف می شود.

الزام اصلی در عمل آوری بتن از این حقیقت ناشی می شود که هیدراسیون سیمان فقط در منافذ موئینه با آب پر شده، امکان پذیر است. بدین دلیل است که باید از تغییر آب موجود در منافذ موئینه جلوگیری نمود. بعلاوه باید خشک شدن داخلی ناشی از جذب آب توسط سیمان را بوسیله آب خارجی جبران نمود، یعنی باید نفوذ آب به داخل بتن امکان پذیر باشد. قبلاً این گونه تصور می شد که در صورتیکه آب مخلوط بتن بیش از مقداری که برای واکنش شیمیایی با سیمان لازم است باشد، افت کمی در مقدار آب - درجریان سخت شدن - اثر نامطلوبی بر عمل سخت شدن و کسب مقاومت نخواهد گذاشت. اما باید اذعان کرد که فقط نیمی از آب موجود در خمیر سیمان می تواند جهت ترکیب شیمیایی مورد مصرف قرار گیرد و هیدراسیون فقط می تواند زمانی رخ دهد که فشار بخار در لوله های موئینه به اندازه کافی بالا باشد (در حدود $0/8$ فشار اشباع). فقط تحت شرایط اشباع است که هیدراسیون کامل می تواند با حداکثر روند خود پیشروی کند [۲۱].

باید تأکید نمود که برای رضایت بخش بودن توسعه مقاومت لازم نیست که تمام سیمان هیدراته شود و در حقیقت این حالت در عمل به ندرت حاصل می شود؛ اما باید اشاره کرد که کیفیت بتن بستگی به نسبت ژل به فضای خمیر دارد. چنانچه حجم فضای پر شده از آب با آب پر شده در بتن تازه به گونه ای باشد که بتوان آنرا با محصولات هیدراسیون پر نمود، در این صورت هیدراسیون بیشتر منتهی به مقاومت زیادتر و نفوذپذیری کمتر خواهد شد.

۲-۳ طبقه بندی شرایط عمل آوری مختلف :

طبقه بندی روشهای مختلف عمل آوری، براساس پیشنهاد کمیته فنی RILEM با نام مخفف – TC 196 ICC^۱ به طور خلاصه در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱-۳ طبقه بندی روشهایی عمل آوری براساس مؤسسه RILEM [۲۹]

روشهای سنتی و معمول عمل آوری، براساس عمل آوری بکارگرفته شده به صورت خارجی، از دیر باز رایج بوده است. از این روشها برای عمل آوری بتن های معمولی، بتن ها با عملکرد و مقاومت بالا استفاده می شده است. این روشها همانطور که در شکل دیده می شود، شامل عمل آوری در حوض آب^۲، آب پاشی بر روی سطح بتن^۱ روکش کننده های اشباع^۲ و یا ترکیبی از این روشها می باشد.

۱-Technical Committee, Internal Curing of Concrete(TC-196ICC)

۲-water ponding

علاوه براین، تکنیک های عمل آوری شتاب دهنده مثل عمل آوری در بخار آب و یا عمل آوری در آب گرم نیز می تواند بکار برده شود. که هر کدام از این روشها، اثرات مختلفی بر روی بتن خواهند گذاشت. روشهای عمل آوری خارجی به دو دسته تقسیم بندی شده است :

۱- عمل آوری بوسیله آب : در این حالت رطوبت و آب اضافی برای بتن به گونه ای فراهم می شود که بوسیله آن بتوان از اتلاف رطوبت داخلی و سطحی بتن جلوگیری شود.

۲- عمل آوری در محیط بسته : که در این حالت فقط از خارج شدن رطوبت موجود در بتن و تبادل آن با محیط اطراف جلوگیری به عمل می آید.

برای بتن های معمولی، یکی از روشهای بسیار مؤثر عمل آوری در حوض آب یا به عبارتی فرو بردن نمونه در داخل آب می باشد. علاوه براین، عمل آوری از طریق منابع آب داخلی نیز می تواند انجام شود. این نوع از عمل آوری که به عمل آوری داخلی معروف است در دهه ۹۰ رشد چشمگیری داشته است [۲۹]. در اینجا ابتدا به تعریف بسیار ساده ای از این روش عمل آوری می پردازیم. براساس پیشنهاد مؤسسه RILEM عمل آوری داخلی را می توان به این صورت تعریف نمود: «عمل آوری داخلی اشاره دارد به وارد کردن یک ترکیبی به داخل بتن، بطوریکه بتواند به عنوان یک ماده عمل آورنده در داخل بتن قرار گیرد. این ماده می تواند یا یک سنگدانه باشد که در شرایط ویژه ای وارد بتن شده است (مثل حالت اشباع) و یا یک افزودنی ویژه باشد.»

تعریفی که مؤسسه بتن آمریکا (ACI Committee 318) در مورد عمل آوری داخلی دارد، با تعریف ارائه شده توسط مؤسسه RILEM کمی متفاوت است. طبق این تعریف «عمل آوری داخلی به فرایندی گفته می شود که عمل هیدراسیون به علت در دسترس بودن آب داخلی اضافی پیشرفت می کند که این آب قسمتی از آب مخلوط نمی باشد.» در این تعاریف به نظر می رسد که جنبه های مهم عمل آوری داخلی بتن مثل مینیمم کردن انقباض نادیده گرفته شده است. البته این تعریف ارائه شده توسط مؤسسه بتن آمریکا نسبت به تعریف مؤسسه RILEM جامعتر می باشد.

۱-water spraying

۲-saturated covering

عمل آوری داخلی مثل عمل آوری خارجی به دو دسته طبقه بندی می شود :

۱- عمل آوری داخلی با ایجاد یک محیط ایزوله داخلی : که در این حالت ماده عمل آورنده با این

هدف وارد بتن می شود که زمان از دست دادن آب بتن سخت شده را به تأخیر بیندازد و یا

از فرایند خارج شدن آب جلوگیری به عمل آورد [۱۰].

۲- عمل آوری داخلی بوسیله آب که در بسیاری از مقالات با عنوان بتن آبدار^۱ بکار برده شده

است. در واقع این زمانی است که ماده عمل آورنده به عنوان یک منبع آب عمل می کند. و به

مرور زمان آب خود را از دست می دهد.

۳-۳ عمل آوری داخلی با ایجاد یک محیط ایزوله^۲

عمل آوری داخلی بسته یکی از انواع روشهای عمل آوری بتن محسوب می شود که نیازی به عمل

آوری اعمال شده به صورت خارجی نیست. اما در این حال براین اساس که بتوان آبی به بتن اضافه

کرد نیز نخواهد بود [۳۰].

این روش که به روش شیمیایی خود عمل آورنده^۳ معروف است، شامل اضافه کردن یک ماده حل

شونده در آب در طول فرایند مخلوط کردن بتن می باشد، که تبخیر آب از بتن سخت شده را به

تأخیر می اندازد و یا کاهش می دهد. همچنین از اتلافات آب و جذب آب توسط لایه های زیرین بتن

جلوگیری می کند. این افزودنی ها که شامل مواد حل شونده در آب هستند دارای گروههای

هیدروکسیل می باشند، که حفاظت آبی را در بتن ارتقاء داده، و به دنبال آن باعث بالا رفتن درجه

هیدراسیون بتن می شوند. پیوند هیدروژنی که بین گروههای عاملی هیدروکسیل ایجاد می شود،

باعث افت فشار بخار آب و در نتیجه کاهش تبخیر آب خواهند شد. این مواد افزودنی مروفولوژی^۴ ژل

C-S-H را تغییر می دهند، و موجب کاهش قابلیت جذب بتن خواهند شد.

۱-water-entrained

۲-Internal Sealing

۳-Self-cure Chemical

۴-morphology

۳-۴ ماده خود عمل آورنده :

علت استفاده از ماده خود عمل آورنده را می توان کاهش تبخیر آب از بتن، و به دنبال آن افزایش محافظت از ظرفیت آب موجود در بتن در مقایسه با بتن های معمولی بیان کرد. در واقع بعضی از پلیمرهای محلول در آب می توانند به عنوان ماده خودعمل آورنده در بتن مورد استفاده قرار گیرند. به عنوان مثال پلیمرهای گلیکول (پلی اتیلن گلیکول) را می توان برای این هدف استفاده کرد. استفاده از افزودنی های خود عمل آورنده از این نقطه نظر که تهیه منابع آب در هر روز برای بتن بسیار ارزشمند است، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. (یعنی، هر ۱ مترمکعب بتن در حدود ۳ متر مکعب آب برای ساخت نیاز دارد که بیشتر آن برای عمل آوری است). مزیت های افزودنی های خودعمل آورنده در محیط های بیابانی و خشک جایی که دسترسی به آب آسان نیست، بیشتر به چشم می خورد. این نوع از عمل آوری نقش بسیار مهم و بزرگی در پیشرفت و شکل گیری میکروساختار بتن و ساختمان حفرات خواهد داشت، و بنابراین عملکرد و دوام آنرا بهبود خواهد بخشید. کاهش وزن بتن و همچنین اندازه گیری رطوبت نسبی داخلی با گذشت زمان را می توان برای ارزیابی توانایی محافظت از آب بکار برد. آب غیر قابل تبخیر در سنین مختلف را می توان به عنوان معیاریز برای ارزیابی هیدراسیون بتن های خود عمل آورنده، در نظر گرفت.

مزیت های استفاده از این مواد زمانی مشهود است که نگهداری آب برای چنین مخلوط هایی، با بتن های معمولی مقایسه می شود که تمام نتایج حاکی از بهتر شدن شرایط می باشد. این مطلب را می توان از مقایسه اتلافات آب موجود در مخلوط نتیجه گرفت. بتن های خود عمل آورنده در مقایسه با بتن های معمولی کمتر در معرض فرایند خود خشک شدگی قرار دارند. از طرفی در بتن های خود عمل آورنده شرایط هیدراسیون بهتر خواهد شد. این مطلب را هم می توان از مقایسه میزان نفوذپذیری بتن های خود عمل آورنده با بتن های معمولی نتیجه گرفت زیرا که در این نوع از بتن ها میزان کاهش نفوذپذیری با زمان بیشتر از بتن های معمولی است [۲۱].

۳-۵ الزامات کلی برای عمل آوری داخلی بتن :

بدلیل اهمیتی که به صورت تئوری برای میزان آب لازم برای عمل آوری داخلی نیاز است، در این قسمت با شکل ساده تری به بیان الزامات لازم برای عمل آوری داخلی می پردازیم.

عمل آوری داخلی بتن زمانی محقق خواهد شد که منابع آب، بتوانند آب کافی برای خمیر سیمان را در طول واکنشهای سیمانی فراهم آورند. مصالح سنگی سبک و سوپر جاذبها نمونه هایی از مخازن آبی می باشند که به طور طبیعی شناخته شده اند. یک سنگدانه سبک می تواند شرایط فراهم آوری آب به صورت مرزی را ایجاد کند، در حالیکه یک شبکه از پلیمرها آب را در فضاهای بین مولکولی نگه می دارد. چنین مخازن آبی اجازه می دهند که آب به صورت یک مایع مستقل در آنها ذخیره شود. در رابطه با بتن منابع آب ممکن است که قبل یا بعد از شروع مخلوط کردن تشکیل شوند. اگر این آب به صورت کپسولهای حاوی آب به بتن اضافه شوند، در واقع به عنوان ذراتی که در بردارنده آب می باشند به بتن اضافه می شوند. این ذرات باید قدرت کافی برای دوام و پایداری در فرایند مخلوط شدن را داشته باشند. اگر شکل گیری این منابع آب بعد از مخلوط کردن صورت گیرد، این فرایند باید قبل از گیرش به پایان برسد. چراکه بعد از گیرش آب ذخیره شده باید به صورت آزادانه برای فرایند هیدراسیون سیمان در دسترس باشد. به این معنی که این آب به صورت ترمودینامیکی و جنبشی (سینماتیکی)^۱ برای واکنشهای سیمانی موجود باشد [۹].

دسترسی ترمودینامیکی زمانی محقق می یابد که آب موجود در سیستم یک فعالیتی نزدیک به ۱ را داشته باشد و یا به عبارتی دیگر، تعادل رطوبت نسبی نزدیک به ۱۰۰٪ باشد. حتی یک کاهش بسیار ناچیز رطوبت نسبی تأثیر قابل توجهی بر روی فرایند هیدراسیون سیمان خواهد گذاشت. آب خالصی که در یک ماده متخلخل وجود دارد تازمانیکه قطر هاله آب ۱۰۰nm باشد رطوبت نسبی تعادلی نزدیک به ۹۹٪ خواهد داشت. اگر بخواهیم سخت قضاوت کنیم، می توان گفت که فقط آب ذخیره شده در حفرات مویینه بزرگ ذرات متخلخل هستند که برای عمل آوری داخلی مفید خواهند بود [۲۹].

دسترسی سینماتیک به انتقال آب از ذخایر یا منابع آب به تمام بخشهایی از خمیر سیمان که خشک شده و رطوبت نسبی در آنجا کاهش یافته، نسبت داده می شود. برای این امر قبل از هر چیز شرایط عدم محدود شدن آب اضافه شده به بتن و دسترسی آسان و آزاد به آن برای محیطی از خمیر سیمان که دچار افت رطوبت نسبی شده، باید فراهم شود. دوم اینکه آبی که برای عمل آوری داخلی بکار می رود باید به طور مناسب در تمام محیط خمیر سیمان پخش شده باشد، بطوریکه بتوان خمیر

۱-thermodynamically and kinetically available

سیمانی با توزیع فضایی مناسبی ساخت. بر طبق شبیه سازی انجام شده، انتقال مؤثر آب در ماتریس خمیر سیمان ممکن است که به فاصله $200\ \mu\text{m}$ محدود شود. البته این پیشنهاد در مورد بتن های پیشرفته و با عملکرد بالا داده شده است، که شاید ممکن است این فاصله بسیار کوتاه را به عدم نفوذپذیری ساختار حفرات موئینه در خمیر سیمان نسبت داد. البته این مقدار برای بتن های معمولی که دارای نسبت آب به سیمان بالایی بوده و حفرات موئینه در این نوع از بتن ها بزرگتر می باشند، مطمئناً مقداری بیش از این خواهد بود. در هر صورت باید اشاره کرد که زمانی می توان به یک توزیع مناسب فضایی رسید تا حد امکان اندازه منابع آب را کاهش داد و در کنار آن تعداد این منابع را افزایش داد تا در نهایت فرایند عمل آوری با کیفیت بسیار بالایی صورت گیرد.

با وجود این ممکن است بسیاری از مطالبی که در اینجا ارائه شده است به صورت جزئی تمام الزامات لازم برای تکنیکهای مختلف موجود برای عمل آوری داخلی را دربر نداشته و یا در مواقعی با بعضی از آنها مغایرت داشته باشد.

۳-۶ آب موجود در مصالح سنگی معمولی و اثر آن بر روی عمل آوری داخلی :

ممکن است مصالحی که در یک بتن معمولی استفاده می شود دارای مقداری آب باشند که می تواند به عنوان آب داخلی برای عمل آوری استفاده شود. این آب به صورت فیزیکی در خلل و فرج های طبیعی که در این مصالح وجود دارد، نگهداشته می شود. به عنوان مثال سنگهای آهکی ممکن است دارای خلل و فرجی نزدیک به ۲۵٪ باشند. اگر این خلل و فرج با آب پر شود و اگر ۷۵٪ از حجم مصالح مصرفی را این سنگها تشکیل دهند، چنین مصالحی بیش از ۱۹۰ لیتر آب عمل آوری داخلی در هر متر مکعب بتن دارا خواهند بود. همانطور که در بخش ۲-۷ مشاهده شد این مقدار بسیار بیشتر از مقداری است که برای بتن موردنیاز می باشد. به همین دلیل است که آب موجود در مصالح معمولی مطمئناً یک عاملی خواهد بود که باید به عنوان یک منبع آب داخلی که حالت بالقوه دارد، بررسی شود.

اما باید خاطر نشان کرد، این احتمال وجود دارد که فقط بخشی از خلل و فرج مصالح سنگی معمولی، با آب پر شوند. از طرفی توزیع فضایی مطلوب و مناسبی برای آب موجود در این حفرات وجود نداشته باشد؛ فقط ممکن است قسمتی از مصالح سنگی ریز دانه قادر باشند، عمل آوری داخلی

را به علت عدم نفوذپذیری (depercolation) بخشی از خمیر سیمان تأمین کنند. بنابراین نحوه توزیع اندازه حفرات در ذرات مصالح سنگی یک عامل اصلی و مهم خواهد بود. در مجموع باید بیان کرد که آب در حالت طبیعی تمایل حرکت به سمت یک سطح انرژی پایینتر را خواهد داشت به عبارتی دیگر حرکت از ساختاری با حفرات درشت تر به سمت ساختاری با حفرات ریزتر. براساس مطالبی که در بالا به آن اشاره شد، حفراتی با اندازه 100nm را می توان یک محدوده ای مفید برای عمل آوری داخلی مصالح سنگی در نظر گرفت [۱۵].

در واقع عامل اصلی و حیاتی در اینجا خلل و فرج کل می باشد. در بتن هایی که خودخشک شدگی اتفاق می افتد عمل آوری داخلی امر بسیار مهمی محسوب می شود. زیرا که در این بتن ها استفاده از مصالحی با چگالی بیشتر - با توجه به اینکه این مصالح دارای مقاومت بیشتری هستند- بسیار رایجتر می باشد. از طرفی چنین مصالحی مثل (کوارتز، گرانیت، بوکسیت و ...) که تقریباً می توان گفت که هیچ گونه خلل و فرجی در آنها وجود ندارند، نیاز به عمل آوری داخلی را در این نوع از بتن ها دوچندان می کند.

۳-۷ موادی برای عمل آوری داخلی :

۳-۷-۱ موادی با آب مرزی شیمیایی :

یک دسته بزرگی از مواد شیمیایی دارای آب مرزی شیمیایی هستند. این آب بوسیله پیوندهای شیمیایی (chemical bonds) در داخل ساختار مولکولی این مواد نگهداری می شود. برای اینکه بتوان این مواد را به عنوان یک عامل بالقوه و مؤثر برای عمل آوری داخلی در نظر گرفت، نیاز است که مقدار آب موجود در این مواد تا اندازه ای بالا باشد و از طرفی آب باید به آسانی با افت رطوبت نسبی محیط اطراف، از این مواد خارج گردد. علاوه براین، مواد شیمیایی باید با محیط خمیر سیمان سازگاری کافی داشته باشند.

بعضی از موادی که معمولاً در خمیر سیمان وجود دارند بویژه آلومینات کلسیم تا اندازه ای چنین خاصیتی را از خود نشان می دهند. مواردی از قبیل C_4AH_{19} و $C_3A(CS)_2H_{32}$ و اترینجیت ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$) از این دسته محسوب می شوند. این مواد در صورتیکه رطوبت نسبی خمیر سیمان کاهش پیدا کند می توانند آب خود را آزاد کنند. به هر حال فقط

بخشی از آب در رطوبت نسبی بالا آزاد می شود و در ادامه منجر به بوجود آمدن واکنشهای مخربی در خمیر سیمان خواهند شد. به طور کلی از مطالعه مقالات مختلف می توان نتیجه گیری کرد که تاکنون تلاشی برای استفاده از این مواد در خمیر سیمان انجام نشده است [۷].

۳-۷-۲ موادی که به صورت فیزیکی آب را نگه می دارند :

بسیاری از پدیده های طبیعی یا غیر طبیعی (مصنوعی) مواد و مصالحی را تولید می کنند که بطور بالقوه به عنوان یک منبع عمل آوری داخلی مفید می باشند و این امر به علت خلل و فرج بازی است که در این مواد می توان به صورت گسترده یافت. البته این خلل و فرج هم در سطح و هم در بخش داخلی این مواد وجود دارد. همانطور که در ادامه توضیح داده خواهد شد، این مواد در بسیاری از موارد دارای ترکیبات مختلف و ساختمان حفراتی متفاوت می باشند، اما با این وجود دارای شکل ساده و معمولی بوده که در اینجا به تعداد محدودی از آنها اشاره خواهد شد. مقدار زیادی از این مواد با عنوان LWA (مصالح سنگی سبک) در بتن استفاده می شوند. بامطالعه تحقیقات گسترده ای که در این زمینه وجود دارد و در طی چند سال اخیر انجام شده است می توان به این نتیجه رسید که هدف اصلی این تحقیقات استفاده از آنها به عنوان منابعی برای عمل آوری داخلی بوده است که گاهی به عنوان پرکننده^۱ مورد استفاده قرار گرفته است [۳۱].

برای اینکه بتوان از این مواد به عنوان یک منبع آب داخلی استفاده کرد ابتدا باید مواد خشک، اشباع شوند. با قراردادن این مصالح در زیر آب، ذراتی که دارای خلل و فرج می باشند آب لازم را جذب خواهند کرد، به هر حال اشباع کامل ممکن است چند ساعت و یا چند روز به طول بیانجامد؛ زیرا هوای موجود در بین خلل و فرج این ذرات به کندی از آنها خارج می شود. البته سرعت جذب را می توان با تبخیر، جوشاندن و یا تحت فشار قرار دادن مصالح سرعت بیشتری بخشید. اگر مواد به صورت خشک به بتن اضافه شوند فقط بخش کوچکی از آنها به حالت اشباع خواهد رسید. علاوه براین، بخش کمی از مواد سیمانی ممکن است به داخل ساختمان حفرات همراه با آب کشیده شوند. البته این امر به پیوستگی و یکپارچگی خمیر سیمان را در محیط اطراف آنها کمک می کند اما از طرفی تا

۱-filler

اندازه ای اثر عمل آوری داخلی راکاهش می دهد. که این امر نیز به علت طولانی تر شدن مسیر انتقال آب و کاهش حجم لازم و قابل دسترس برای منابع آب داخلی، خواهد بود.

در فرایند استفاده از این مواد دو نکته از اهمیت بالایی برخوردار است اول اینکه استفاده از مصالحی با ریزی بیشتری در دانه بندی باعث خواهد شد که فاصله بین ذرات کاهش یابد بطوریکه آب موجود مجبور نباشد یک فاصله طولانی را برای از بین بردن خود خشک شدگی در بتن پوشش دهد. دوم اینکه مقدار آب در LWA باید به گونه ای باشد که میزان استفاده از این مواد را به حداقل برساند. مکانیسم اولیه ای که برای نگهداری آب در این مواد قابل پیش بینی است، نیروهای موئینه است. وهمانگونه که اشاره شد فقط حفراتی که اندازه تقریبی آنها بیش از $100nm$ است برای عمل آوری داخلی مفید می باشند. در حفرات با اندازه های کوچکتر آب به گونه ای نگهداری می شود که آب لازم برای واکنش های سیمانی به راحتی قابل دسترس نخواهد بود [۴].

۳-۷-۲-۱ آب مورد نیاز برای عمل آوری داخلی :

چه مقدار مصالح سنگی سبک وزن (LWA) برای فراهم آوردن آب لازم برای عمل آوری داخلی مورد نیاز است؟

بنز و اشنایدر [۱۶] رابطه ای را برای محاسبه این مقدار ارائه داده اند:

$$M_{LWA} = \frac{C_f \times CS \times \alpha_{max}}{S \times \phi_{LQWA}}$$

M_{LWA} : جرم مورد نیاز LWA در حالت خشک در واحد حجم بتن (kg/m^3 یا lb/yd^3)

C_f : حجم سیمان مصرفی برای مخلوط بتن (kg/m^3 یا lb/yd^3)

CS : انقباض شیمیایی سیمان ($g \text{ of water}/g \text{ of cement or } lb/lb$)

α_{max} : ماکزیمم درجه مورد انتظار هیدراسیون سیمان

S : درجه اشباع مصالح

ϕ_{LQWA} : جذب مصالح سنگی سبک LWA. ($kg \text{ water}/kg \text{ dry LWA or } lb/l$)

برای نسبت آب به سیمان پایین ماکزیمم درجه هیدراسیون مورد انتظار برای شرایط اشباع را می توان به صورت $(\frac{w}{c})/0.36$ تخمین زد، و برای آب به سیمان بالاتر از 0.36 ماکزیمم درجه هیدراسیون برابر

۱ فرض شود. با توجه به اینکه چگالی LWA با مصالح سنگی معمولی متفاوت است، لذا جانمایی نهایی در مخلوط بتن باید براساس حجم انجام شود. برای بتن هایی با $w/c > 0.45$ درجه اشباع (S) کمتر از ۱ باید گرفته شود، زیرا که در این حالت وجود رطوبت بالا در مخلوط، باعث آب انداختگی و جداسازی در بتن خواهد شد. لذا در این نوع از بتن ها توصیه می شود که آب لازم برای عمل آوری داخلی تا حد ممکن کاهش داده شود. حتی اگر هم از عمل آوری داخلی استفاده شود با قرار گیری نمونه ها در محیط باز احتمال اینکه اتلافات آب در سطح بتن وجود داشته باشد زیاد است، لذا باید این اتلافات را به حداقل رساند تا اجازه داده شود که پوشش بتن از چگالی خوبی برخوردار باشد.

همانطور که دیده شد دو مطلب اساسی در اینجا باید مدنظر باشد: (۱) اختلاف در CS که با توجه به نوع ترکیبات سیمان و دمای عمل آوری باید تعیین شود. (۲) مقدار نسبی جذب (یا پس دهی نسبی) مصالح سنگی سبک (LWA). بنابراین اختلافی که در این دو مورد وجود دارد نتایج را گاهی اوقات کمتر از آنچه که انتظار است تخمین می زند، لذا بعد از محاسبه باید با توجه به اطلاعات موجود مقداری را برای توزین مصالح سنگی سبک و مصالح سنگی معمولی پیشنهاد داد.

۳-۲-۲-۷-۲ پس دهی آب مصالح سنگی سبک (LWA):

این بحث را با این سؤال شروع می کنیم که: چه مقدار از آب موجود در مصالح LWA به آسانی در دسترس خمیر سیمان هیدراته شده -جهت انتقال- در طی فرایند عمل آوری خواهد بود؟ مطمئناً فرض اینکه تمام آب موجود در مصالح برای عمل آوری داخلی در دسترس خواهند بود، نادرست می باشد. یک رویکرد منطقی در اینجا اشباع اولیه مصالح - به طوریکه شرایط اشباع شبیه به مصالح مورد استفاده در آزمایش باشد- و سپس اندازه گیری اینکه چه مقدار آب در رطوبت نسبی کاهش یافته از مصالح آزاد می شود، باشد. هنگامیکه که یک خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان پایین تحت شرایط محیط بسته داریم رطوبت نسبی داخلی می تواند بین ۸۵ تا ۹۰ درصد کاهش پیدا کند. هنگامیکه آب محیط اطراف یک ذره LWA به طرف ذرات سیمان هیدراته شده نزدیک، منتقل می شود، آب جذب شده توسط LWA جایگزین این آب می شود، تا شرایط اشباع در داخل خمیر سیمان حفظ شود، که این باعث کاهش رطوبت موجود در LWA یا دور شدن از شرایط اشباع در آنها

خواهد شد. آبی که در LWA وجود دارد باید به طور مؤثر در فرایند هیدراسیون شرکت کند، و قبل از اینکه رطوبت نسبی داخلی به ۸۵ تا ۹۰ درصد برسد، از آزاد شدن آن کاملاً مطمئن باشیم [۱۶].

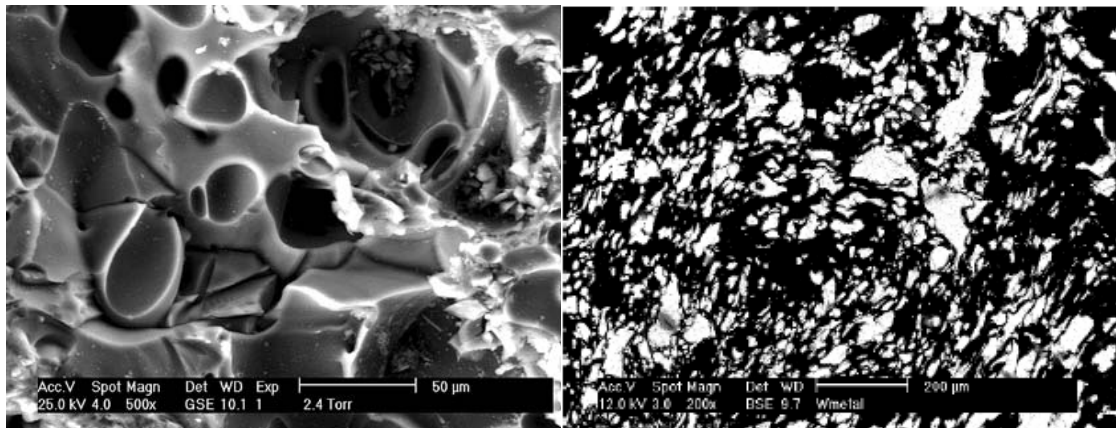
برای مشخص کردن جذب مصالح ϕ_{LWA} در شرایط اشباع کامل ($S=1$)، LWA های اشباع شده براحتی تحت شرایط محیطی یی قرار گیرند که تعادل رطوبت نسبی آن از طریق محلولهای نمک اشباع^۱ انجام می شود. آبی که تحت این شرایط از LWA ها پس داده می شود مقداری را برای ϕ_{LWA} (مشخص می کند که باید در معادله اخیر استفاده شود. گذاشتن مصالح در معرض محلول نمکهای اشباع سولفات پتاسیم و نیترات پتاسیم رطوبت نسبی تعادلی در حدود ۹۷ و ۹۳ درصد را فراهم خواهد آورد. با بررسی نتایج بدست آمده از این آزمایشات می توان نتیجه گرفت که LWA ها بیش از ۹۵ درصد آب جذب شده خود را در رطوبتهای نسبی بالا (۹۳٪) از دست می دهند، و این یک مشخصه بسیار خوب این مصالح می باشد که استفاده از آنها را در بتن برای عمل آوری داخلی افزایش داده است. البته باید توجه کرد که تمام LWA ها این خاصیت را ندارند، تعدادی از آنها فقط ۵۰ تا ۸۰ درصد آب جذب شده خود را در رطوبت نسبی کمتر از ۸۴٪ از دست می دهند. مطالب ارائه شده در بالا در بسیاری از تحقیقات آزمایشگاهی، بررسی شده است، بطوریکه استفاده از مصالح سنگی سبک (LWA) را برای فرایند عمل آوری داخلی راحت ساخته است [۳،۴]. شاید بتوان با رویکردی مشابه برای سوپر جاذبها (SAP)، تحقیقات آزمایشگاهی را به جهتی سوق داد که استفاده از این مواد نیز را در داخل بتن جهت عمل آوری هر چه بیشتر افزایش داد

۳-۷-۲-۳ پومیس^۲:

پومیس سنگی با تخلخل بسیار بالا می باشد که آنرا شبیه به یک اسفنج کرده است در شکل ۳-۲، نمونه ای یک سنگ پومیس دیده می شود. تخلخل بالای این سنگها زمانی بوجود می آید که گازهای حل نشده گدازه های آتشفشانی در تماس با هوا بسیار سریع و به صورت غیر قابل پیش بینی شده سرد می شوند و لذا دارای ترکیب و ساختمانی کاملاً نامنظم خواهند بود. اکثر ماگماها تولیدکننده پومیس می باشند. ارتباط و نحوه قرارگیری ساختار حفرات در این سنگها ممکن است به گونه ای باشد که حفرات از حالت کاملاً بسته به حالت کاملاً باز تغییر کنند.

۱-saturated salt solutions

۲-pumice



شکل ۳-۲: تصاویر الکترونیکی اسکن شده دانه های پومیس : چپ) تصویر ساختمان داخلی یک ذره پومیس بعد از نفوذ یک فلز با نقطه ذوب پایین (در اینجا حفرات پر شده با رنگ روشن مشخص هستند). راست) تصویر بزرگنمایی شده از سطح پومیس [۴].

با شکستن ذرات پومیس می توان به دانه بندی های مختلفی رسید، اما آنچه که در بیشتر مراجع دیده می شود و در تحقیقات آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته دانه بندی به صورت $0.6 - 1.18mm, 1.18 - 2.36mm, 2.36 - 4.75mm, and > 4.75mm$ می باشد. چگالی این مصالح متغیر بوده و هرچه دانه بندی ریزتر شود چگالی بالاتر می رود ($1200 to 1330 kg/m^3$). در جدول زیر اطلاعاتی مربوط به چگالی و میزان جذب برای پومیس با دانه بندی مختلف نشان داده شده است.

جدول ۳-۱: چگالی و میزان جذب ذرات پومیس با دانه بندی متغیر [۴]

جذب آب (% وزن خشک)		اندازه ذرات (mm)	چگالی ذرات (kg/m^3)	دانه بندی
اشباع در خلأ	آب جوش			
۱۳/۳	۱۳/۰	۰/۶-۱/۱۸	۱۳۳۰	<i>Pumice 0</i>
۲۵/۲	۱۹/۰	۱/۱۸-۲/۳۶	۱۳۱۰	<i>Pumice 1</i>
۳۴/۳	۲۶/۷	۲/۳۶-۴/۷۵	۱۲۱۰	<i>Pumice 2</i>
۳۷/۵	-	>۴/۷۵	~۱۲۰۰	<i>Pumice 3</i>

همانطور که در جدول دیده می شود اختلاف در جذب آب ناشی از تفاوت در اندازه ذرات می باشد، ذرات درشتتر مقدار جذبی نزدیک به ۳۸٪ و ذرات کوچکتر مقدار جذبی نزدیک به ۱۳٪ را خواهند

داشت. و این از آنجا ناشی می شود که حفرات بزرگتر تخلخل داخلی بالاتری دارند. چگالی پایین ذرات درشتتر نیز این مطلب را تایید می کند.

برای بررسی ساختار حفرات داخلی پومیس، از تصاویر گرفته شده توسط میکروسکوپیهای الکترونیکی قوی استفاده می شود (SEM) ^۱ اندازه حفرات معمولاً در حد چند میکرون هستند. تجزیه و تحلیل تصاویر نشان می دهد که تخلخل واقعی در این سنگها بین ۴۰-۵۰٪ خواهد بود. حفرات دارای شکلهای نامنظم و پیوستگی (اتصال) خوبی می باشند. با بزرگنمایی بیشتر عکس (شکل سمت راست) مشاهده می شود که حفرات ریزتر معمولاً دارای شکل یکسانی هستند. مطالعات دیگری در مورد نحوه پس دهی و جذب آب و همچنین توزیع حفرات پومیس در بسیاری از مراجع دیگر نیز به چشم می خورد [۴].

مقدار جذب آب پومیس را به طور متوسط برابر 0.27 kg/kg محاسبه شده است. قیمت هر تن پومیس تقریباً ۶۰ دلار خواهد بود.

۳-۷-۲-۴ پرلیت^۲:

پرلیت سنگی شیشه ای، سیلیسی می باشد که معمولاً به صورت طبیعی بوجود می آید بطوریکه در ساختمان آن ۲-۶٪ آب ترکیب شده وجود دارد. زمانی که با سرعت زیاد و دمای بالاتر از 900°C گرما داده می شود، سنگهای خام ۴ تا ۲۰ برابر حجم اولیه شان، منبسط شده که در این حالت آب ترکیب شده موجود در این سنگها تبخیر می شود و باعث تولید تعداد زیادی حبابهای ریز می شود. در نتیجه این کار چگالی حجمی آن بین $300-400 \text{ kg/m}^3$ تغییر خواهد کرد. و باعث افزایش ظرفیت جذب آب این مواد خواهد شد. از پرلیت معمولاً استفاده های زیادی می شود از جمله در تصفیه سازی و همچنین در تکنیکهای تولیدی گیاهان در آزمایشگاه برای فراهم آوردن هوا و رطوبت لازم و نگهداری آن برای گیاهان و به هر حال، از پرلیت در ابتدا به عنوان یک ماده ساختمانی برای مثال به عنوان مصالح سنگی بتن و همچنین عایق بندی سوراخها استفاده می شده است. از تجزیه ذرات پرلیت مشاهده شده است که در طی فرایند مخلوط کردن به علت حجم بالای خلل و فرج موجود در

۱-scanning electron microscope

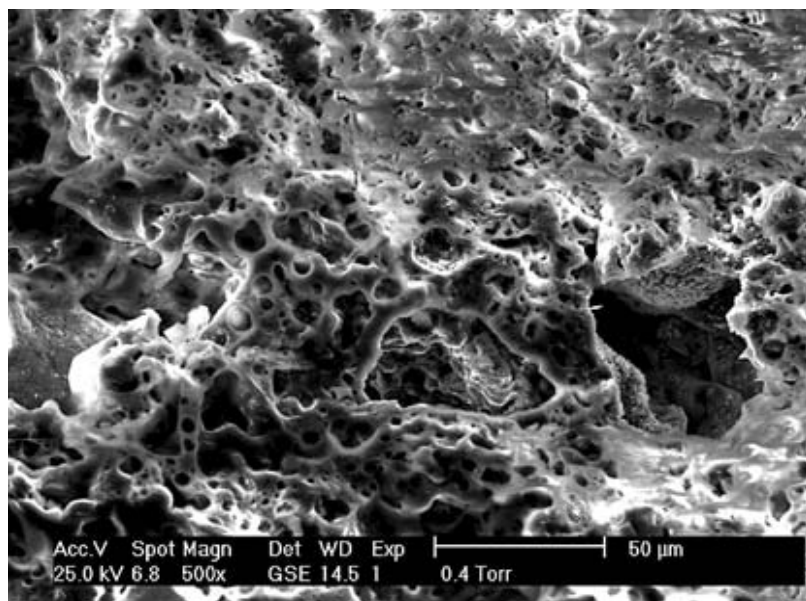
۲-perlite

آنها باعث کاهش مقاومت خواهد شد. بنابراین می توان گفت که اثر معکوسی بر روی خواص بتن خواهد گذاشت. اگر بتوانیم پرلیت را به صورت کامل اشباع کنیم، مقدار جذب آب آن نزدیک به $4/5 \text{ kg/kg}$ می باشد. قیمت خرید هر تن پرلیت تقریباً ۳۰۰ دلار خواهد بود [۹].

۳-۷-۲-۵ لیکا و لیپور^۱:

اصطلاح لیکا و لیپور برای رس منبسط شده ای که در یک کوره دوار با گرمای تقریبی 1200°C حرارت داده شده، بکار می رود. این مواد از انبساط انواع ویژه ای خاک رس که در طول فرایند گرما، بعلت رشد و پیشرفت گازها از مواد آلی در رس که حالت متخلخل به خود می گیرند، تولید می شوند. این محصول در ذرات سرامیک با یک پوسته متراکم که اطراف یک هسته متخلخل قرار دارند، دیده می شود (شکل ۳-۳). همانطور که در شکل دیده می شود حفرات بسیار زیادی در سطح لیپور وجود دارد که اندازه آنها از چند میکرومتر تا چندصد میکرومتر متغیر است. تخلخل کلی اندازه گیری شده آنها ۴۵٪ می باشد درحالیکه خلل و فرج باز شوی آنها ۴۰٪ خواهد بود. کل خلل و فرج لیکا نیز ممکن است بیش از ۸۰٪ باشد، به هر حال یک بخش بزرگی از این ساختار متخلخل بدلیل بوجود آمدن پوسته بر روی آنها بسته شده و به همین دلیل است که برای جذب آب غیر قابل دسترس می باشند. براساس آزمایشات انجام شده که توسط نفوذپذیری جیوه صورت گرفته است اندازه حفرات خلل و فرج باز این مصالح بین ۷۰ تا $350 \mu\text{m}$ متغیر است ماکزیمم مقداری که برای آنها در نظر گرفته می شود تقریباً $400 \mu\text{m}$ می باشد، اما باید گفت که حفراتی با اندازه $100 \mu\text{m}$ بیشترین حجم حفرات را در آنها تشکیل می دهند. به همین دلیل است که تمام آبی که توسط کلینیکر خاک رس منبسط شده جذب می شود آزادانه برای عمل آوری داخلی در دسترس خواهد بود.

^۱-liapor,leca



شکل ۳-۳: تصویر الکترونیکی اسکن شده از سطح لیپور شکسته شده [۳]

شکل حفرات معمولاً نامنظم بوده، تعدادی از آنها کروی که ارتباطی با دیگر حفرات ندارند و تعدادی از آنها کشیده شده می باشند که در این حالت با حفرات دیگر در ارتباط هستند. در جدول زیر مشخصات لیپور ۸^۱ که در بیشتر فعالیتهای آزمایشگاهی از آن استفاده می شود داده شده است.

جدول ۳-۲: تخلخل و چگالی لیپور ۸ [۳]

اندازه دانه ها	۴-۸ mm	۸-۱۶ mm
خلل و فرج باز	۴۰/۳	۳۴/۸
خلل و فرج بسته	۵/۳	۴/۱
کل خلل و فرج	۴۵/۶	۳۸/۹
چگالی ذرات	۱۳۷۰	۱۵۴۰

میزان جذب آب برای حفرات بزرگ در حدود ۱۷٪ وزنشان در ساعات اولیه است و این مقدار بعد از آن ثابت باقی می ماند؛ اما در حفرات ریزتر فقط بخش کمی از آب در ساعات اولیه جذب می شود اما با ادامه روند جذب آب تا ۲ هفته، مقدار جذب به ۲۵٪ وزنی آنها خواهد رسید. جذب بعد از ۶ روز در حدود ۸۰٪ روز اولیه می باشد. حفرات ریز میزان جذب بیشتری نسبت به حفرات درشت تر دارند،

۱-liapor 8

زیراکه این حفرات از چگالی کمتر و خلل و فرج بیشتری بر خوردار هستند. هرچندکه استفاده از حفرات ریزتر میزان آب جذب شده را افزایش می دهد، ولی این کار تا حدودی غیر عملی است، زیرا که باید برای مدت طولانی قبل از بتن ریزی سنگها در داخل آب قرار گیرند. هزینه هر کیلوگرم لیکا ۰/۰۶ دلار و هر کیلوگرم لیپور ۰/۱ دلار در حالت خشک می باشد. [۳].

۳-۷-۲-۶ استالیت^۱:

استالیت از شکستن زغال سنگ سخت شده (stale) در کوره های دوار در دمایی بالاتر از 1150°C تولید می شود. در طی فرایند گرمادادن، سنگ حالت پلاستیک پیدا کرده و گازهای متساعد شده به صورت حبابهایی ریز که اکثراً به صورت ناپیوسته هستند در داخل سنگ به دام انداخته می شوند. در مقایسه با دیگر مصالح سنگی سبک وزن (LWA)، استالیت، حفراتی با پیوستگی کمتر و ریز بیشتر دارد بنابراین تعدادی از حفراتی که در این سنگ وجود دارند به رطوبت نسبی حداقل ۷۰٪ محدود می شود. نتیجتاً فقط یک بخشی از آب جذب شده در استالیت برای عمل آوری داخلی مفید خواهد بود. قیمت هر کیلوگرم استالیت تقریباً ۰/۰۴ دلار می باشد و مقدار آب موجود در حالت اشباع با سطح خشک برابر با 0.06 kg/kg است [۹].

۳-۷-۲-۷ خاک با جدار سیلیسی^۲:

این خاک از اسکلت ماقبل تاریخ جلبکهای مدفون شده، و دیاتومها^۳ (آغازیان) که پوسته آنها در قسمت بیرونی با سیلیس آغشته شده است، بدست می آید. وقتی دیاتومها می میرند پوسته های آنها در کف دریا و اقیانوسها ته نشین شده و به صورت فسیل در می آیند. مقدار سیلیس موجود در آنها که معمولاً شکل نامنظمی دارند تقریباً بین ۲۵ تا ۱۰۰ درصد می باشد. دیاتومها که به صورت ذره هایی با اندازه متوسط $5 \mu\text{m}$ تا $20 \mu\text{m}$ می باشند، به طور کلی هیچ گونه تقارن شعاعی و یا خطی در شکل و ترکیبشان از خود نشان نمی دهند. خلل و فرج و یا به عبارتی تخلخل آنها بستگی به این دارد که از چه نوعی باشند، اما این مقدار ممکن است که بین ۵۰ تا ۷۰ درصد اندازه گیری شود لذا میزان

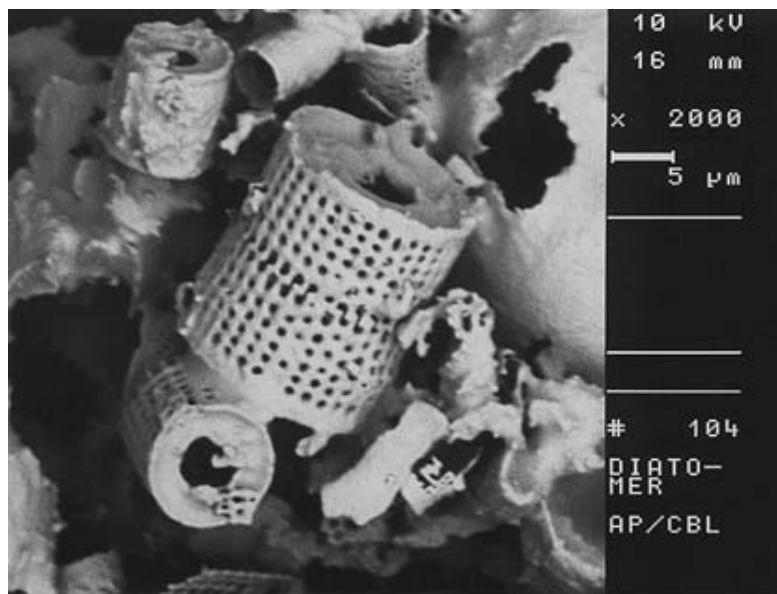
۱-stalite

۲-Diatomaceous earth

۳-diatoms

جذب در آنها احتمال دارد به 1 kg/kg برسد. نمونه ای از این خاک در شکل ۳-۴ دیده می شود. با توجه به مطالعات انجام شده بر روی تصاویر گرفته شده از این خاک خلل و فرج باز آنها تقریباً 68% اندازه گیری شده است.

از خاک با جدار سیلیسی در موارد بسیار زیادی از جمله تصفیه سازی (به عنوان فیلتر)، غلیظ کننده گلهای حفاری، کروماتوگرافی^۱ (جدا کردن عناصر رنگی از هم) و حشره کشی و . . . استفاده شده است. از این خاک همچنین در تکنولوژی بتن نیز استفاده شده و با انجام تستهایی اثرات آنها مورد بررسی قرار گرفته است. این مواد همانطور که گفته شد به دلیل داشتن مقادیر بسیار زیادی سیلیس غیر بلوری و سطح ویژه بسیار بالا، تمایل زیادی جهت واکنش با آهک دارند. به هر حال استفاده از فسیل دیاتومها بواسطه شکل ذراتشان که اثر نامطلوبی بر روی پایداری و سازگاری خمیر سیمان دارد، متوقف شده است، از طرفی استفاده از آنها در بتن، سبب افزایش آب مصرفی در داخل بتن می و شود



شکل ۳-۴: تصویر الکترونیکی اسکن شده دیاتومها در یک ماتریس خمیر سیمان [۹]

قیمت خاک با جدار سیلیسی کلاً وابسته به نوع و درجه خلوص آنهاست. ارزانترین آنها قیمتی نزدیک به ۱ دلار در هر کیلوگرم دارد (1 €/kg) [۹].

^۱-chromatography

۳-۷-۲-۸ خاک رس بنتونیت :

بعضی از خاکهای رس مانند بنتونیت دارای سطح ویژه بالایی هستند، که این مقدار اغلب بیش از $100 \text{ m}^2/\text{g}$ می باشد. و این امر آنها را قادر به جذب چندین لایه آب در بین ساختمان صفحه ای شکلشان خواهد ساخت؛ این آب بوسیله پیوند شیمیایی ثانویه نگهداشته می شود و منجر به بزرگتر شدن حجم بنتونیت تا ۱۴ برابر حجم اولیه اش در اثر آب گرفتگی خواهد شد. اگر رطوبت نسبی در محیط اطراف کاهش پیدا کند این آب به طور معکوس آزاد می شود. در مجموع بنتونیت و یا دیگر خاکهای معدنی لایه لایه شده ممکن است که به صورت منابع آب داخلی در بتن استفاده شوند. به هر حال استفاده از این مواد باعث ایجاد یک مشکل بسیار مهم در بتن خواهد شد که باید راه حلی برای آن ارائه داد و آن هم این است که در محیط یونی متوسط مثل مواد سیمانی این خاکها جمع شده و یک ساختار بهم فشرده ای را تشکیل می دهند. شاید در حالت کلی بتوان نتیجه گرفت که خاکهای رسی قادر نخواهند بود آب لازم را نگهداری کنند و به عنوان یک ماده عمل آورنده داخلی در بتن فعالیت داشته باشند [۹].

۳-۷-۲-۹ پلیمرهای سوپر جاذب :

یک پلیمر سوپر جاذب، ماده ای است که توانایی جذب مقادیر زیادی آب از محیط اطراف همراه با نگهداری آن در ساختمان داخلی خود بدون حل شدن را دارد. شکل ۳-۱ یک نمونه پلیمر سوپر جاذب را نشان می دهد. SAP ها اصولاً برای جذب آب و محلولهای مایع استفاده می شود. با وجود انواع پلیمرهای سوپر جاذب بیشترین میزان جذب برای یک سوپر جاذب تقریباً ۵۰۰۰ برابر وزنش اندازه گیری شده است. به هر حال، سوپر جاذبهایی که به صورت تجاری تولید می شوند در حدود ۵۰ برابر وزن خود در محلولهای نمکی رقیق آب جذب می کنند. اندازه گیرهایی که برای محلولهایی با خاصیت یونی بالا مانند خمیر سیمان انجام شده است حاکی از کاهش میزان جذب آب در این محلولها می باشد. که این مقدار ممکن است 20 g/g برابر وزن سوپر جاذب باشد. جذب آب در سوپر جاذبها براساس پیوند شیمیایی ثانویه می باشد.



شکل ۳-۵: پلیمر سوپرجاذب متورم شده که چندین برابر وزن خود آب جذب کرده. این پلیمر حتی تحت فشار متوسط آب خود را از دست نخواهد داد [۲۹]

آب جذب شده پلیمرهای را بگونه ای سست می کند که می توان آنها را به صورت آب حجمی^۱ بررسی کرد.

بیشتر سوپرجاذبها همانطور که اشاره خواهد شد پلی الکترولیت‌های زنجیر شده می باشند، به علت خاصیت یونی و ساختار بهم پیوسته شان، این پلیمرها مقادیر زیادی آب و دیگر محلولهای مایع را بدون اینکه حل شوند را جذب می کنند. از سوپرجاذبها به عنوان ماده ای با تکنولوژی ساخت بسیار پیشرفته امروزه استفاده های زیادی می شود [۲۶].

سوپرجاذبها در مقایسه با مصالح سنگی سبک LWA خواص ویژه ای دارند. از جمله اینکه سوپرجاذبها (SAP) را می توان به صورت خشک به مخلوط اضافه کرد تا اینکه بتواند آب کافی را در طی فرایند مخلوط کردن جذب کند. در ضمن استفاده از این مواد این اجازه را به ما می دهد که بتوانیم در طراحی اشکال و اندازه حبابهای تشکیل شده در داخل بتن کاملاً آزاد باشیم. SAP ها به صورت تجاری از اسید اکریلامید و اسید اکریلیک تولید می شوند. که هزینه تولید آنها نیز برابر با ۳/۵ دلار در هر یک کیلوگرم می باشد [۲۶، ۲۷].

البته برآورد اینکه هزینه مصرفی این مواد در داخل بتن تا چه اندازه می باشد وابسته به میزان جذب آنها در مخلوطهای سیمانی است. برای مثال اگر فرض کنیم که مقدار آبی که این مواد جذب

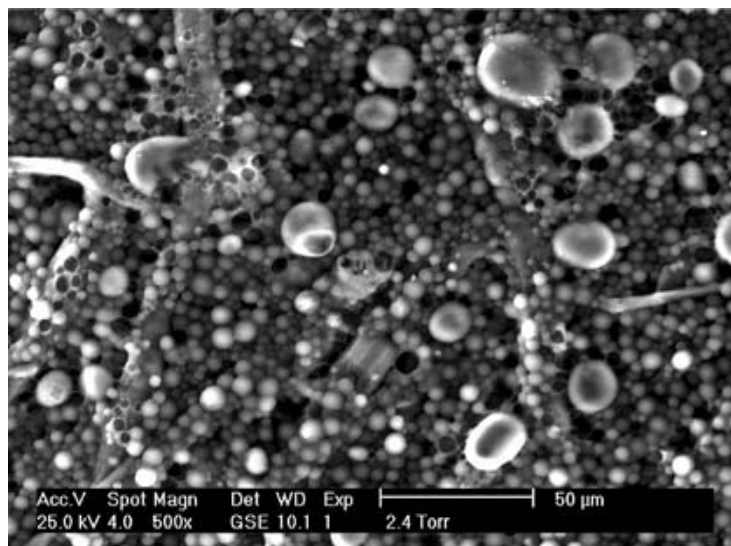
^۱-bulk water

می کنند برابر با ۱۵ kg/kg برابر وزن خودشان باشد. این مقدار برابر با هزینه ای نزدیک به ۰/۴ دلار در هر کیلوگرم آب لازم برای عمل آوری داخلی می باشد.

۳-۷-۳ موادی با آب غیر مرزی :

۱-۳-۷-۳ میکروکپسولها^۱ :

میکروکپسولها، تکنیکی است که بوسیله آن یک گاز، مایع یا جامد به صورت بسته^۲ در داخل یک پوسته نازک به طور محیطی که معمولاً جنس آن از یک نوع ماده دیگر است، جدا داده می شود. این کپسولها بسیار ریز می باشند و اندازه آنها حتی از ۱ میکرون نیز کمتر است. این فرایند ممکن است شامل پخش قطرات ریزی از یک ماده فعال در یک مایع باشد. سپس قطرات بوسیله یک پلیمر ویژه به صورت کپسول در می آیند. نمونه ای از آن در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. موادی که در قسمت داخلی این کپسولها قرار گرفته اند به دلیل اینکه دیواره این کپسولها دارای خاصیت از هم گسیختگی می باشد، آزاد می شوند؛ که این کار معمولاً بوسیله ذوب کردن دیواره کپسولها و یا بوسیله انتشار از طریق دیواره صورت می گیرد.



۳-۶ : تصویر الکترونیکی اسکن شده از یک جوهر میکروکپسول شده در یک کاغذ کپی [۹]

۱-Microencapsulation

۲-package

امروزه از تکنیک ایجاد میکروکپسولها در محصولات بسیار زیادی استفاده می شود: از جمله در جوهرها برای کربن آزاد به منظور کپی برداری از کاغذها، در شیمی برای چسب هایی با ترکیبات مختلف یا چسب های چند ترکیبی، همچنین در پوششهای دارویی که معمولاً کاربرد خوراکی دارند و ضد عفونی کننده ها. در رابطه با مصالح سیمانی میکروکپسولهایی از آب اخیراً استفاده شده و آزمایشاتی نیز در این زمینه صورت گرفته است. با استفاده از این تکنیک امکان آماده کردن یک مخلوط خشک از کپسولهای پر از آب و گروت سیمانی زودگیر فراهم خواهد شد. با شکستن این کپسولها مخلوط سخت می شود. این کپسولها که معمولاً ۳۳٪ آنها را یک پوسته نازک تشکیل می دهد اندازه ای در حدود $1-2\text{mm}$ دارند.

از آنجا که هزینه تولید میکروکپسولهای آبی بسیار بالا بوده و گران تمام می شود این تکنیک تقریباً منسوخ شده و کمتر مورد استفاده قرار گرفته است. از طرفی این تکنیک و فرایند تولید کپسولها بسیار ظریف بوده و ممکن است که در مقابل عوامل زیادی حساس باشد. از طرفی دیواره کپسولها چه از لحاظ فیزیکی و چه از لحاظ شیمیایی باید دارای قدرت کافی باشند تا بتوانند تا زمان گیرش نهایی دوام داشته باشند. بعد از آن هم باید آبی که در داخل خود ذخیره کرده اند را به راحتی آزاد کنند.

۳-۷-۳ آب امولسی شده^۱:

یک کلوئید در واقع پراکندگی ذرات کوچک از یک ماده در ماده دیگر می باشد. اگر هر دو ماده مایع باشند در این حالت به کلوئید یک امولسیون گفته می شود. نمونه های زیادی از امولسیون هم به صورت طبیعی و هم به صورت غیر طبیعی (مصنوعی) می توان یافت مانند شیر که ترکیبی از مواد مختلف در داخل آب می باشد. یک امولسیون برای اینکه حالت پایدار داشته باشد نیاز به یک عامل امولسیون کننده دارد تا یک پوسته محافظت کننده اطراف اجزاء پخش شده، تشکیل گردد. در مورد شیر این عامل امولسیون کننده یک پروتئین به نام کازئین^۲ می باشد.

در داخل بتن همانطور که می دانیم تکنیکی با همین شباهت برای بهبود مقاومت بتن در مقابل یخ زدگی استفاده می شود. که این کار با وارد کردن حفرات کروی هوا با اندازه تقریبی $10-250\ \mu\text{m}$ به

۱-Emulsified water

۲-casein

داخل بتن تازه امکان پذیر خواهد بود، که این عمل نیز بوسیله یک عامل هواساز صورت خواهد گرفت. ماده هواساز با کاهش کشش سطحی مایع و تشکیل یک پوسته پایدار در سطح مشترک هوا و مایع باعث شکل گیری حبابهای هوا می شود. در اینجا تمرکز اصلی بر روی این واقعیت است که شاید بتوان با چنین تکنیکی و یک راه مشابه، حجمهایی از آب یعنی یک امولسیون آب در آب را تولید کرد. ماده امولسیون کننده در این صورت باید ترکیب ویژه ای داشته باشد، چونکه یک سطح مشترک طبیعی بین دو فاز مختلف در این حالت نمی تواند وجود داشته باشد. به طور کلی تشخیص یک تکنیک شبیه به این که خصوصیات آن در بالا اشاره شد تقریباً غیر ممکن است [۹].

۸-۳ مقایسه تکنیکهای موجود برای عمل آوری داخلی بتن :

تاکنون در بیشتر فعالیتهای آزمایشگاهی و روشهای عملی که برای عمل آوری داخلی بتن بکار برده شده، استفاده از سوپرجاذبها و موادی با آب فیزیکی یعنی مصالح سنگی سبک رایج بوده است. برای مقایسه این روشها با توجه به مطالعات صورت گرفته در این زمینه و براساس یافته های بدست آمده، جدول ۳-۳ ارائه شده است. در اینجا تأکید براین نکته ضروری است که این داده ها فقط یک طرح کلی برای عمل آوری داخلی بوده و ممکن است اساساً به نوع مواد ویژه و استفاده شده بستگی داشته باشند. به عنوان مثال حجم آب لیکا و لیپور ممکن است که بین $0.107 kg/kg$ و $0.42 \frac{€}{m^3}$ متغیر باشد

که این مقدار هم به اینکه چطور آب جذب کند بستگی دارد [۳].

جدول ۳-۳ : جدول قیمت و میزان جذب مصالح مختلف برای عمل آوری داخلی

مصالح	مقدار جذب آب (kg/kg)	قیمت مصالح ($€/kg$)	قیمت آب ($€/m^3$)
سوپرجاذبها	۴۵	۶	۶/۶۶
پومیس	۰/۲۷	۰/۰۶	۱۱/۱۱
پرلیت	۴/۵	۰/۳	۳/۳۳
لیکا	۰/۱۵	۰/۰۶	۲۰
لیپور	۰/۱۷	۰/۱	۲۹/۴
استالیت	۰/۰۶	۰/۰۴	۳۳/۳۳
خاک سیلیس دار	۱	۱	۵۰

۳-۹ نتیجه گیری :

همانطور که نشان داده شد در این قسمت چندین راه موجود برای عمل آوری داخلی بتن مطرح شد. چنین تکنیکهایی می توانند عمل خشک شدگی و انقباض ناشی از آن را در بتن های با عملکرد بالا را کاهش دهند. منابع آب می توانند براساس اصول فیزیکی و شیمیایی در دسترس باشند، که هر کدام از این روشها توانایی و اثرات متفاوتی را به دنبال خواهند داشت. تعدادی از تکنیکها که توصیف شد هنوز در مرحله مطالعاتی بوده و بر روی بتن تست نشده است. یک عامل بسیار مهم و بحرانی که می تواند برای تکنیکهای مختلف بکار رود تا بتوانیم میزان عملکرد آنها را با هم مقایسه کنیم دسترسی ترمودینامیکی و سینماتیکی به آب برای واکنشهای سیمانی می باشد.

بر طبق محاسبات ارائه شده در بخش ۲-۷ بتن نیاز به بیش از 50 kg/m^3 آب داخلی برای عمل آوری برای کاهش و یا از بین بردن خشک شدگی و انقباض ناشی از آن دارد. لذا هزینه های عمل آوری داخلی تقریباً بین $3-50 \text{ €/m}^3$ می باشد. همچنین در اینجا به خوبی به این نکته اشاره شد که آب موجود در مصالح سنگی معمولی تا چه اندازه می تواند بر روی عمل آوری داخلی اثر بگذارد. به عبارت دیگر آب موجود در مصالح سنگی بخش بزرگی از آب عمل آوری داخلی را تأمین خواهد نمود، به طوریکه با افزایش مقدار مصرف آنها در بتن معمولی افزایش آب داخلی را به دنبال خواهد داشت لذا به تنهایی قادر خواهد بود که شرایط عمل آوری داخلی را برای بتن فراهم نماید. بنابراین برای محاسبه مقدار آب لازم برای عمل آوری داخلی باید به طریق صحیحی آب موجود در مصالح سنگی وارد محاسبات شود چه بسا که با اشباع کامل این مصالح نیازی به آب عمل آوری داخلی نباشد.

فصل چهارم

مشاهدات آزمایشگاهی عمل آوری داخلی با استفاده از آب

عمل آوری داخلی اثرات مهمی بر روی بتن خواهد گذاشت، که باید آنها را بررسی کرد. علاوه بر اثرگذاری بر روی هیدراسیون و توزیع رطوبت، تغییراتی بر روی خواص مهم بتن، از قبیل مقاومت، انقباض، ترک خوردگی و دوام خواهد گذاشت. آنچه که در این قسمت مشاهده می شود یک بررسی کلی از روشهای آزمایشگاهی برای مطالعه اثرات عمل آوری داخلی بوسیله آب بر روی بتن و نتایج و پیامدهای آن خواهد بود. با توجه به اثرات مختلفی که این فرایند بر روی خواص بتن دارد، بسیاری از تکنیکهای ویژه ای که برای مطالعه عمل آوری داخلی مورد نیاز می باشد، از ویژگیهای خاصی برخوردار بوده که با توجه به نوظهور بودن آنها تنها در چندین کشور مورد بررسی قرار گرفته است.

مطمئناً یکی از نکات قابل توجه که در سالهای اخیر در مورد اثر عمل آوری داخلی بر روی بتن تمرکز یافته است کاهش خطر ترک خوردگی در سنین اولیه بتن می باشد. برای اینکه بتوان یک مقدمه کلی و جامعی برای اثرات عمل آوری داخلی آبی^۱ بیان کرد، در ابتدا به بعضی از تکنیکها و روشهای مختلفی که در این زمینه می توان استفاده کرد، اشاره شد، چرا که مطالعه این اثرات منوط به شناخت نوع مصالح، مواد کاربردی و درک کاملی از آنها و اثراتشان بر روی خواص بتن می باشد. لذا در فصل ۳ در مورد روشهای موجود در این زمینه بررسی جامعی شده است. در این فصل نتایج و اثرات فرایند عمل آوری داخلی آبی نشان داده شده است، طبقه بندی و تنظیم آنها از اثرات مستقیم تا اثرات جزئی خواهد بود. شاید بسیاری از تکنیکهای اندازه گیری که در این قسمت مورد بررسی قرار گرفته اند، حالت های ویژه ای از اثرات عمل آوری داخلی آبی می باشد که تاکنون استفاده نشده اند و یا در دست مطالعه هستند.

مواد عمل آورنده داخلی آبی، یعنی مصالح سنگی سبک (LWA) و پلیمرهای سوپر جاذب (SAP)، ممکن است اثراتی بر روی خواص بتن بگذارند که تاکنون بررسی نشده است، اگر مقادیر زیادی از ماده عمل آورنده داخلی وارد بتن شود مثل مصالح سنگی سبک (LWA)، ممکن است تفکیک نتایج عمل آوری داخلی آبی از نتایج ترکیب ماده عمل آورنده داخلی در مخلوط بتن را پیچیده سازد. برای مثال عمل آوری داخلی به علت استفاده از سوپر جاذبها (SAP) و مصالح سنگی سبک (LWA)، انقباض

۱-internal water curing

خودبخودی را کاهش می دهد، اما نتایج بررسی نشان داده است که استفاده از LWAها در داخل بتن مدول الاستیسیته را کاهش داده، و به طور بالقوه باعث افزایش انقباض خواهد شد [۶]. آنچه که در بیشتر مقالات و مطالعات آزمایشگاهی به چشم می خورد، تمرکز بر روی کاربرد عمل آوری داخلی برای جلوگیری از فرایند خودخشک شدگی و نتایج بعدی آن می باشد. به هر حال، در دهه اخیر اثرات عمل آوری داخلی مشاهده شده، بیشتر بر روی LWAها بوده است، جایی که استفاده از این مواد فقط یک اثر جانبی مفید بر روی بتن داشته است. لذا آنچه مطرح می شود بیشتر در مورد مشاهدات و اندازه گیری مطرح شده بر روی مصالح سنگی سبک (LWA) خواهد بود. البته با استدلالی مشابه و بررسیهای بیشتر می توان مطالب ارائه شده را توسعه داده و راه را برای استفاده از آنها در مورد بتن های ساخته شده بوسیله سوپر جاذبها (SAP)، هموار کرد.

۴-۲ مشاهدات مستقیم عمل آوری داخلی با استفاده از آب :

۴-۲-۱ رطوبت نسبی داخلی:

رطوبت نسبی داخلی در واقع به مقدار آب فعال (بالموه شیمیایی) در خمیر سیمان گفته می شود. بعد از جداسازی اثر نمکهای حل نشده در محلول حفرات، شعاع کلون را می توان از رطوبت نسبی داخلی محاسبه کرد [۱۰، ۱۱]. خمیری که به صورت داخلی عمل آوری شده است، در شرایط بوجود آمده به صورت ایده آل هیدارته می شود، زیرا که دستیابی به حجمهای آبی جدا شده که بخش مهمی از منابع آب داخلی بتن را شامل می شود، به راحتی صورت می پذیرد. که این حالت منتج به این خواهد شد که فرایند خودخشک شدگی نداشته و رطوبت نسبی داخلی آنها در سرتاسر فرایند هیدراسیون نزدیک به ۱۰۰٪ خواهد بود.

اندازه گیری رطوبت نسبی در بعضی از مقالات و تست های آزمایشگاهی بوسیله ایستگاه هیدروسکوپ روترونیک^۱ (شکل ۴-۱) انجام شده است. تمام اندازه گیریهای انجام شده بر روی مخلوطهایی که به صورت داخلی عمل آوری شده اند (بوسیله سوپر جاذبها و مصالح سنگی سبک) [۳۴] حاکی از وجود رطوبت نسبی بالا در سراسر دوره هیدراسیون در مقایسه با مخلوطهای بدون عمل آوری داخلی می باشد.

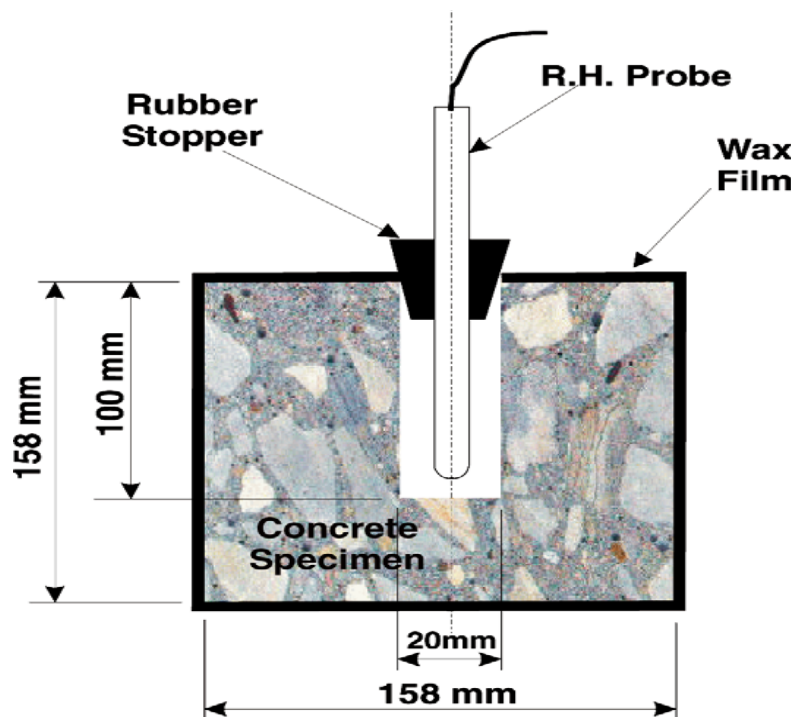
۱-Rotronic Hygroscopic station



شکل ۴-۱ : دستگاه اندازه گیری رطوبت نسبی [۱]

۴-۲-۱-۱ اندازه گیری رطوبت نسبی داخلی :

تکنیک دیگری برای اندازه گیری رطوبت نسبی داخلی بتن وجود دارد که توسط سنسورهای حساسی که در داخل بتن قرار داده می شود، انجام می پذیرد (شکل ۴-۲). معمولاً اندازه گیری توسط این روشها هزینه ها و وقت کمتری را به همراه خواهد داشت. از طرفی امکان استفاده و قرار دادن آنها در ساختمانهای بتنی و مونیتور کردن تغییرات رطوبت نسبی با دقت قابل قبول ($\pm 2RH$) برای ماهها و مدت زمان طولانی، فراهم می سازد. به هر حال، تغییرات درجه حرارت، مطمئناً بر روی اندازه گیریها اثر خواهد گذاشت که این تغییرات باید به گونه وارد محاسبات شود که بتواند دقت اندازه گیری را بالا ببرد [۴۰].



شکل ۴-۲: اندازه گیری رطوبت نسبی [۴۰]

برای اندازه گیری رطوبت نسبی داخلی ابتدا نمونه هایی با ابعاد $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$ بتن ریزی می شود. بعد از قالب برداری، یک حفره با قطر 20 mm و عمق 100 mm در داخل نمونه مکعبی از وجه بالای آن ایجاد می شود. حفره باید بوسیله جت هوا تمیز شود تا ذرات سست شده از آن جدا شوند. حفرات با استفاده از یک درپوش لاستیکی بسته می شوند برای اینکه نمونه ها در محیط بسته قرار گیرند یک پوسته واکس اطراف آن کشیده می شود. از یک میله رطوبت نسبی دیجیتال برای اندازه گیری رطوبت نسبی داخلی نمونه ها در زمانهای مختلف استفاده می شود. میله در داخل حفره برای مدت 20 تا 30 ساعت قبل از اندازه گیری قرار داده می شود، اندازه گیری رطوبت نسبی را در مدت 20 تا 30 ثانیه انجام می شود، بعد از اندازه گیری حفرات با استفاده از درپوش لاستیکی به صورت بسته در خواهند آمد.

۲-۱-۲-۴ مدل‌سازی رطوبت نسبی داخلی :

برای مدل کردن پیشرفت میکروساختار خمیر سیمان تحت شرایط عمل آوری مختلف در طی فرایند هیدراسیون، استفاده از مدلی برای پیشرفت و تغییرات رطوبت نسبی در خمیر سیمان توصیه شده است، به طوریکه این پارامتر نشانه ای از شدت تنش های در سیاله حفرات^۱، پیشرفت هیدراسیون و شعاع حفرات در مواد پایه سیمانی جامد خواهد بود. همانطور که انتظار می رود با پیشرفت هیدراسیون رطوبت نسبی داخلی در داخل بتن کاهش می یابد و به دنبال آن شکل و حجم آب حفرات مویینه دچار تغییر خواهد شد. براساس مطالعات کلوین^۲ این تغییرات را می توان با استفاده از رابطه زیر، بیان کرد :

$$RH = \exp\left(-\frac{2\gamma \cdot V_m}{r \cdot RT}\right) \quad (۱-۴)$$

در این رابطه γ کشش سطحی سیاله حفرات، (که مقدار آن 0.073 N/m برای آب خالص)، V_m حجم مولار آب ($18.02 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$)، r شعاع هاله و یا حفره، R ثابت گازهای ایده آل ($8.314 \frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$) و $(K)T$ دمای مطلق می باشد.

با توجه به معادله فوق شعاع بزرگترین حفرة مویین که بوسیله آب پر شده است برابر با :

$$r = \frac{2\gamma \cdot V_m}{\ln RH \cdot RT} \quad (۲-۴)$$

خواهد بود.

نکته ای که در اینجا باید مدنظر قرار داد اثر نمکهای نامحلول می باشد. وجود این نمکها ممکن است که به طور غیر مستقیم برروی رطوبت نسبی RH اثر بگذارد، و باعث افت آن شود. زیرا که نمکهای نامحلول کشش سطحی را کاهش می دهند. معمولاً برای بیان اثر نمکهای نامحلول از قانون رولت^۳ استفاده می کنند. براساس این قانون با استفاده یک ضریبی که در معادله^{۴-۱} ضرب می شود میزان رطوبت نسبی را در داخل بتن کاهش می دهند [۱۰].

۱-pore fluid

۲-Kelvin

۳-Raoult's law

۲-۲-۴ تغییر شکل خودبخودی خمیر سیمان^۱:

تغییر شکل خودبخودی خمیر سیمان با توجه به معادله زیر قابل محاسبه می باشد:

$$\epsilon_{LIN} = \frac{s \cdot \sigma_{cap}}{3} \left(\frac{1}{K_p} - \frac{1}{K_s} \right) \quad (3-4)$$

در این رابطه ϵ_{LIN} : کرنش خطی یا انقباض^۲، s : درصد اشباع (بین ۰ تا ۱) یا بخشی از خلل و فرجی است که با آب پر شده است، σ_{cap} : تنش در سیاله حفرات (MPA)، K_p : مدول حجمی (بالک) ماده متخلخل با حفرات خالی در اینجا خمیر سیمان (خشک)، K_s : مدول حجمی (بالک) مصالح تشکیل دهنده اسکلت جامد (سخت شده) ماده متخلخل.

مقدار σ_{cap} تنش موئینه (کششی) در سیاله حفرات می باشد که می توان با مشخص بودن شعاع کلویین (معادله ۲-۴) با استفاده از قانون لاپلاس محاسبه کرد. با فرض استوانه ای بودن حفرات و مرطوب بودن کامل آنها مقدار تنش برابر خواهد بود با:

$$\sigma_{cap} = -\frac{2\gamma}{r} \quad (4-4)$$

مقدار s را هم می توان به صورت نسبت بین حجم آب قابل تبخیر در خمیر سخت شده V_{ew} ($m^3 \text{ water} / m^3 \text{ paste}$)، به حجم کل حفرات خمیر سیمان V_p ($m^3 \text{ pore} / m^3 \text{ paste}$)، که هر دو تابعی از نسبت آب به سیمان و درجه هیدراسیون می باشند به صورت زیر بیان کرد:

$$s = \frac{V_{ew}(\alpha)}{V_p(\alpha)} \quad (5-4)$$

براساس معادلات (۳-۴) و (۴-۴)، ساختاری با حفرات بزرگتر منجر به کاهش تنشهای موئینه و افت انقباض خواهد شد. نتایجی که از آزمایشات مختلف بر روی مخلوطهای بتنی همراه با میکروسیلیس و فلای اش و سرباره انجام شده است، حاکی از این واقعیت است که در مخلوطهای حاوی فلای اش و سرباره، انقباض و تغییر شکل کمتری به دلیل بزرگتر بودن ساختار حفرات قابل مشاهده می باشد. به طوریکه در مخلوطهای عمل آوری شده به صورت داخلی و حاوی فلای اش و سرباره تغییر شکل خمیر سیمان به صورت کلی حذف شده است [۱، ۱۱].

۱-Autogenous deformation

۲-shrinkage

۴-۲-۳ درجه اشباع :

در یک خمیر سیمان که در طی فرایند هیدراسیون دسترسی آزاد به آب خارجی دارد، مجموعه حفرات در سرتاسر عمل هیدراسیون، اشباع باقی می ماند. لذا، مقدار آب موجود در موینه های بزرگ یک خمیر سیمان، ممکن است که اثر عمل آوری داخلی آبی را نشان دهد. زیرا که آب در مواد عمل آورنده داخلی (LWA و SAP) به صورت آزاد و با حالتی سست نگهداری می شود، بنابراین باید توجه و تمهیدات ویژه ای در اندازه گیری برای جداسازی آنها از ترکیب آبهای موینه در خمیر سیمان، صورت گیرد.

برای سیمان پرتلند : همانطور که اشاره شد از مدل پاورز می توان برای محاسبه توزیع آب بین حالت های مختلف استفاده کرد. مقدار آب موینه را می توان با اندازه گیری حجم آب قابل تبخیر و آب غیر قابل تبخیر در طی فرایند هیدراسیون با خشک کردن نمونه ها محاسبه کرد؛ شاید در این حالت بتوان آب موجود در مواد عمل آورنده را از سیاله حفرات در خمیر سیمان تفکیک نمود. مقدار آب و توزیع آن در حفرات با اندازه های مختلف را می توان بوسیله تعدادی از تکنیکها از قبیل گرماسنجی دمای پایین^۱ (LTC) [۱۴]، انواع تکنیکهای پخش ذرات نوترون و یا تکنیکهایی براساس رزونانس (تشدید) مغناطیسی هسته ای (رلکسومتری^۲ و کاری پورومتری^۳)، اندازه گیری کرد.

اندازه گیریهای تشدید مغناطیسی قادر به برآورد مقدار آب در حفرات با توزیع اندازه متفاوت خواهد بود. که این کار ما را در تشخیص و تفکیک بین آب در خمیر سیمان هیدراته و آب در مواد عمل آورنده داخلی، راحت می کند. یکی از اولویت هایی که روش تشدید مغناطیسی هسته ای نسبت به سایر روشها دارد استفاده از نمونه های مستقل و تک در طی فرایند هیدراسیون می باشد، در حالیکه تکنیکهای دیگر اغلب مخرب بوده و نیاز به نمونه های زیادی می باشد [۳۲].

۱-Low temperature calorimetry

۲- relaxometry

۳-cryoporometry

۴-۲-۴ تئوری تراوش^۱:

شاید بتوان با استفاده از تئوری تراوش اتصال یا پیوستگی اجزاء تشکیل دهنده یک سیستم را بررسی کرد. این تئوری در ابتدا در سال ۱۹۵۰ توسط همرسلی^۲ ارائه گردید سپس در سالهای بعد از آن، تعاریف جامع و کاربردی از این تئوری انجام شد. میکرو ساختار خمیر سیمان را می توان به عنوان یکی از نمونه های بسیار زیادی که پدیده تراوش در آن دیده می شود را نام برد. به نظر می رسد که مهمترین مسئله در تئوری تراوش تغییر فاز به خصوص در خمیر سیمان می باشد. با پیشرفت هیدراسیون، پاورز نشان داد که در خمیر سیمان افت زیادی در نفوذپذیری اتفاق خواهد افتاد، در واقع در این حالت خلل و فرج مویینه در خمیر سیمان یک انتقال یا تغییر فاز در ساختار خود خواهند داشت بطوریکه از حالت پیوسته بودن به حالت گسسته (عدم پیوستگی) در بخشی از حجم خود مواجه خواهند بود. البته میزان این تغییر فاز تا اندازه ای به توزیع اندازه ذرات سیمان وابسته می باشد، اما در بعضی از تحقیقات دیگر با بزرگتر شدن ذرات سیمان این پدیده را به طور نسبی مستقل از نسبت آب به سیمان می دانند [۱۳].

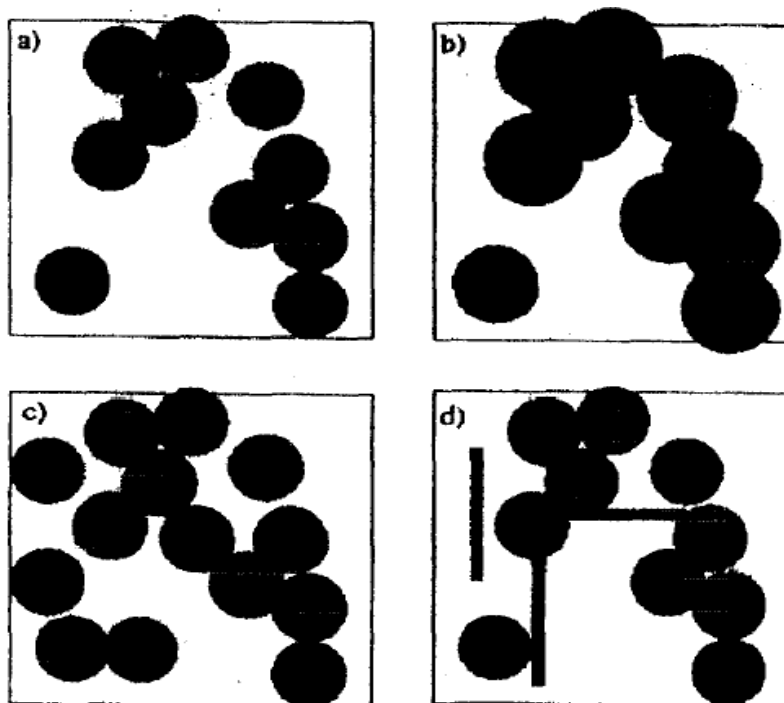
به محض اینکه خلل و فرج مویینه حالت عدم تراوش^۳ به خود می گیرند نفوذپذیری سیستم به میزان قابل توجهی کاهش می یابد. بسیاری از محققین از عدم تراوش حفرات در یک نسبت آب به سیمان، به عنوان یک نتیجه برای تخمین ماکزیمم فاصله ممکن برای انتقال آب در خمیر سیمان استفاده می کنند [۱]. در خمیر سیمان سخت شده ($W/C < 0.5$) در مدت ۲۸ روز نفوذپذیری بقدر کافی کاهش پیدا می کند به طوریکه فرار آب از داخل سیستم بعد از این مدت به سختی صورت خواهد گرفت. به هر حال در ملات و بتن پدیده تراوشی که نقش اساسی بازی می کند؛ تراوش از ناحیه انتقال بینابینی می باشد زیرا که این ناحیه اساساً نسبت به قسمت های دیگر خمیر دارای آب به سیمان (W/C) بیشتری است و نوعاً دارای خلل و فرج مویینه بیشتری می باشند. بنابراین در این ناحیه خلل و فرج مویینه گاهاً به صورت مستقل عمل می کنند و اگر این نواحی حالت تراوش در خود بگیرند فرار آب از طریق مجاری بوجود آمده در این حال به راحتی صورت خواهد گرفت. برای بررسی خواص و

۱-percolation theory

۲-Hammersley

۳-depercolation

ویژگیهای تراوش ناحیه انتقال بینابینی از مدل تراوش هسته سخت - پوسته نازک^۱ (HCSS) استفاده می شود. در این مدل هر ذره مصالح سنگی به عنوان یک هسته سخت و غیر قابل نفوذ و محیط اطراف (ITZ)^۲ به عنوان پوسته نازک هم مرکز در نظر گرفته می شود. که در این حالت امکان هم پوشانی هر کدام از پوسته ها توسط پوسته کناری وجود دارد. برای روشن تر شدن بحث و چگونگی استفاده از مدل HCSS شکل ۳-۴ را در حالت دو بعدی بررسی می کنیم. در حالت a هر کدام از ذرات مصالح هسته سخت توسط یک ناحیه انتقال بینابینی ITZ محاط شده است اما نواحی ITZ در سرتاسر سیستم حالت تراوش یافته ندارند. در حالت b ضخامت ناحیه ITZ افزایش یافته به طوریکه حالت تراوش از بالا تا پایین بدست آمده است. در حالت c به طور معکوس، حالت تراوش با استفاده از اضافه کردن ذرات پوسته نازک/هسته سخت بدست آمده است. نکته دیگری که در اینجا باید اشاره کرد تراوش در مورد بتن های الیافی می باشد، در این بتن ها با قرار گرفتن یک الیاف در مدل کامپیوتری ذرات پوسته نازک/هسته سخت به طور کلی معادلات حالت تراوش در داخل بتن را تغییر خواهد داد. این مطلب در شکل ۳-۴-d نشان داده شده است. بطوریکه سیستم بدلیل اضافه شده یک فایبر به حالت تراوش رسیده است [۱۲].



شکل ۳-۴ : تراوش ناحیه انتقال بینابینی با استفاده از مدل تراوش هسته سخت - پوسته نازک [۱۲]

۱-hard-core/soft-shell

۲-interface transition zone

۴-۲-۵ آزمایش گرماسنجی دمای پایین (LTC) :

در چندین سال پیش (۱۹۵۵) پاورز برای اولین بار بیان کرد که در طی هیدراسیون سیمان پرتلند، حالت غیر پیوستگی یا گسسته در خلل و فرج مویینه بوجود خواهد آمد. این عدم تراوش اثرات زیادی بر روی خواص و دوام مصالح پایه سیمانی خواهد گذاشت. برای مثال، نفوذپذیری یک خمیر سیمان با ساختار حفرات تراوش نشده می توان بیش از ۱۰۰۰ برابر کمتر از یک خمیری باشد که ساختار حفرات آن حالت تراوش شده دارند. در حقیقت پایداری و دوام ساختار حفرات تراوش نشده چه در زمان ریختن بتن و چه بعد از گیرش آن در تعیین خواص آن نقش بسیار عمده ای دارند. پاورز نشان داد که خشک شدگی خیلی ساده و بسیار کند یک خمیر سیمان با یک رطوبت نسبی ۷۹٪ میزان نفوذپذیری را با یک ضریبی در حدود ۷۰ افزایش می دهد. با پیشرفت تکنولوژی و افزایش دانش مهندسی با کشف تکنیکهای جدید، تراوش و یا عدم تراوش حفرات مویینه به صورت غیر مستقیم با اندازه گیری انقباض شیمیایی و یا تکنیک LTC تعیین می شود [۱۴].

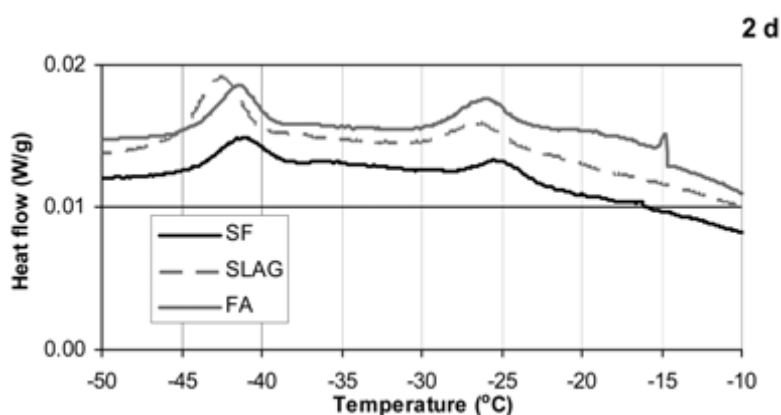
از این آزمایش می توان به راحتی برای بررسی و ارزیابی تراوش شبکه حفرات (بخصوص حفرات مویینه) در سنین مختلف با اندازه های مختلف در خمیر سیمان هیدراته شده - به عنوان نشانه ای از پیشرفت هیدراسیون - استفاده کرد. معمولاً وجود و یا عدم وجود یک پیک^۲ در دمای تقریبی 15°C - به ترتیب حاکی از یک شبکه حفرات مویینه تراوش یافته و یا تراوش نیافته خواهد بود [۱۱].

نحوه انجام آزمایش به این صورت است که قطعات بسیار ریزی از خمیر سیمان با وزن 30mg تا 90mg از خمیر سیمان هیدراته شده را انتخاب می کنند. برای انجام هر آزمایش یک قطعه خمیر سیمان مناسب که سطح آن خشک شده در داخل یک پن قرار می دهند سپس مجموعه را در داخل یک سلول گرماسنج گذاشته تا یک اسکن بین دماهای 5°C تا 55°C - انجام شود. در طی یک اسکن هنگامیکه دما به شدت کاهش پیدا می کند ابتدا آب در حفرات بزرگ یخ می زند به طوریکه فرایند یخ زدگی با یخ زدن آب موجود در حفرات ریز و کوچک ادامه پیدا می کند. برای خمیر سیمان هیدراته شده همانطور که در شکل ۴-۴ دیده می شود و در گزارشات مختلف ارائه شده است [۱، ۱۱، ۱۴]، سه نقطه ممکن است که در فرایند اسکن که با یخزدگی حفرات همراه است دیده شود،

۱-Low temperature calorimetry

۲-peak

که این سه نقطه به ترتیب مطابق با شبکه تراوش شده حفرات موئینه^۱ (دمای یخزدگی -15°C)، حفرات ژلی باز^۲ (با دمای یخزدگی -25°C)، و حفرات ژلی متراکم^۳ (با دمای یخزدگی -42°C) هستند. به محض اینکه حفرات موئینه حالت تراوش نیافته بخود می گیرند، (عدم تراوش^۴) فراهم آوردن آب کافی برای عمل آوری از یک منبع آب خارجی به سختی صورت می گیرد، لذا این حالت نیاز به انواع روشهای عمل آوری داخلی را تقویت می کند. بنابراین، در این حالت، ارتفاع پیک آزمایش LTC در دمای -15°C یک نشانه خوبی از حجم حفرات موئینه تراوش یافته در نمونه های آزمایشگاهی می باشد. کوچکتر شدن ارتفاع پیک نشان از کمتر شدن حفرات موئینه تراوش یافته یا به طور معادل پیشرفت بیشتر هیدراسیون خواهد بود [۱۱].



شکل ۴-۴: اسکن LTC برای خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۳ برای شرایط اشباع در دمای 25°C به مدت ۲ روز [۱۱]

این تکنیک آزمایشگاهی به صورت گسترده در چندین طرح مطالعاتی در سالهای اخیر استفاده شده است [۱، ۱۱، ۱۴]، فراهم آوردن اطلاعات بارزشی در مورد اثر شرایط عمل آوری و همچنین شرایط تراوش و عدم تراوش حفرات موئینه در خمیر سیمان هیدراته شده از نتایج این تکنیک می باشد. در اینجا باید به این نکته نیز اشاره کرد که نوع ترکیبات موجود در خمیر سیمان (از جمله استفاده از میکروسیلیس، فلاش و...) در ثبت نتایج آزمایش بسیار مؤثر است. همانطور که در شکل ۴-۴

۱-percolated networks of capillary pores

۲-open gel pores

۳-dense gel pores

۴-depercolate

دیده می شود در مورد نمونه هایی که شامل میکروسلیس می باشند میزان واکنش پذیری در سنین اولیه بسیار زیاد بوده به طوریکه بعد از ۲ روز عمل آوری تقریباً هیچ گونه ناحیه تراوش یافته در نمونه دیده نمی شود (نمونه های ساخته شده با سرباره و فلای اش به ترتیب در مراحل بعدی میزان واکنش پذیری قرار دارند) [۱۱].

۴-۲-۶ همدمایی جذب سطحی^۱:

یکی از تستهایی که می توان اختلاف بین بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی با بتن های معمولی را بیان کرد استفاده از همدمایی جذب سطحی می باشد. از همدمایی جذب سطحی، اطلاعاتی در مورد توزیع اندازه حفرات، توزیع سیاله حفرات در حفرات، میزان آبی که در حفرات نگهداری می شود و همچنین کمیت و کیفیت خواص رطوبت تعادلی مواد سخت شده (خمیر سیمان)، استخراج کرد.

مهمترین خطایی که ممکن است در تفسیر و بررسی نتایج حاصل از همدمایی جذب سطحی با آن مواجه شویم؛ بیشتر مربوط به اختلاط و قاتی شدن آب موجود در مواد عمل آورنده داخلی با آب موجود در سیستم حفرات خمیر سیمان، می باشد. بویژه، زمانی که بخش بزرگی از ظرفیت رطوبتی موجود در رطوبتهای نسبی بالا، ممکن است به علت وجود منابع آبی باشد. یکی از مشکلات و شرایط نامساعد اندازه گیری همدمایی جذب سطحی، استفاده از نمونه های بسیار زیادی است که برای دنبال کردن تغییرات ساختار بتن در طول فرایند هیدراسیون می باشد. برای اندازه گیری فقط استفاده از نمونه های قدیمی، عملی می باشد، زیرا که اندازه گیری در مجموع برای ماههای زیادی بطول خواهد انجامید [۳۳].

همدمایی جذب سطحی از دو فرایند همدمایی جذب و همدمایی پس دهی^۲ تشکیل شده است. معمولاً برای انجام آزمایشات نمونه ها را برای تست مرحله به مرحله فرایند جذب و پس دهی آماده می کنند. یکی از شرایط تست ها، ایجاد حالت پایدار در نمونه ها می باشد، بطوریکه واکنشهای شیمیایی در طول زمان انجام تستهای هیچ گونه تأثیری را بر روی نمونه ها نگذارد. لذا برای اینکه بتوان یک حالت پایدار را ایجاد کرد به گونه ای که میکروساختار در طی انجام تستها تغییر نکند، نیاز

۱-Sorption isotherm

۲-water desorption and adsorption isotherms

به صرف وقت زیاد خواهیم بود، یکی دیگر از مشکلات این روش طولانی ترشدن مدت انجام تست هاست.

همدمایی جذب سطحی بر روی نمونه های ساخته شده با LWA اشباع که تحت شرایط محیط بسته نگهداری می شوند [۶] حاکی از بالابودن مقدار رطوبت نسبی در مقایسه با نمونه های ساخته شده با LWA خشک می باشد. این گونه اختلاف بین بتن هایی که دارای LWA با ساختار حفرات باز و بزرگتر و بتن هایی با LWA با ساختار حفرات بسته و ریزتر هستند، نیز قابل مشاهده می باشد، در حالیکه مقدار رطوبت اولیه در شرایط اشباع شبیه به هم می باشد.

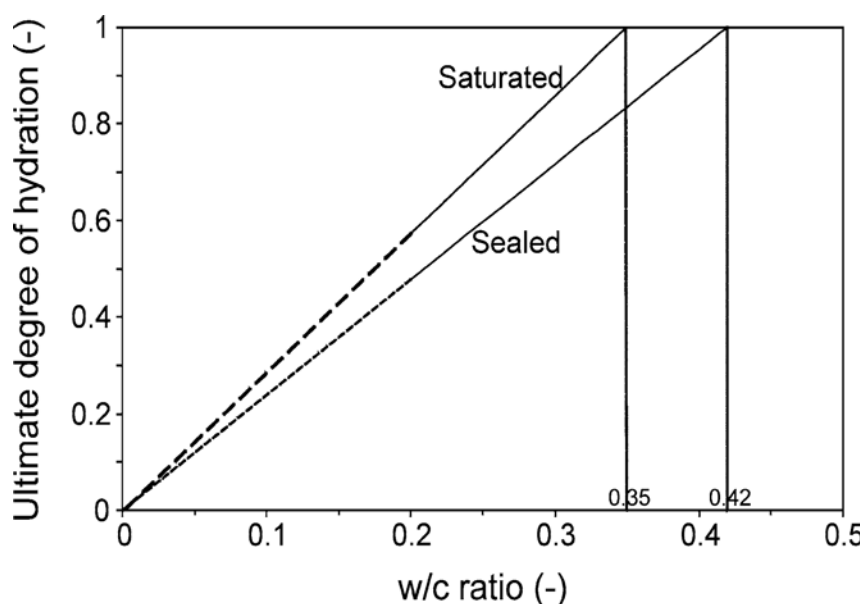
یکی دیگر از نتایج بسیار مهمی که از این تست می توان گرفت این است که توزیع اندازه ریزه سوراخ ها در محدوده بسیار ریز، با افزایش نسبت آب به سیمان از ۰/۳۵ به ۰/۵۵ به مقدار کمی تغییر می نماید و این در حالی است که حفرات مویین به نسبت افزایش، رشد قابل ملاحظه ای خواهند داشت [۲۵].

۳-۴ نتایج اولیه عمل آوری داخلی :

۱-۳-۴ درجه هیدراسیون :

دسترسی به آب اضافی برای هیدراسیون و فعالیت آب در خمیر سیمان منجر به افزایش هیدراسیون سیمان در حالتهایی خواهد شد که خمیر سیمان با وجود پایین بودن نسبت آب به سیمان به صورت داخلی عمل آوری شده باشد. با توجه به مدل پاورز، هیدراسیون سیمان پرتلند در خمیرها با دسترسی آزاد به آب زمانی متوقف می شود که همه حفرات مویینه بوسیله محصولات هیدراسیون پر شده باشد و یا زمانی اتفاق می افتد که همه سیمان واکنش داده باشد. برطبق این عقیده، همانطور که قبلاً اشاره شد و در شکل ۴-۵ نشان داده شده است درجه نهایی هیدراسیون، در یک نسبت آب به سیمان پایین، تقریباً ۲۰٪ اختلاف دارد. شاید براساس نتایج بدست آمده بتوان این گونه قضاوت کرد که ماکزیمم درجه هیدراسیون در شرایط اشباع، به صورت تئوری دست یافتنی باشد. البته این مطلب زمانی صدق می کند که عمل آوری داخلی با آب در بتن کاملاً مؤثر بوده باشد و اثر خود را بر روی میکروساختار بتن گذاشته باشد [۲۳]. باید به این نکته نیز اشاره کرد که در این زمینه نظرات مختلفی وجود دارد.

برای مثال پروفیسور ولفگان چرنین^۱ مقدار آب به سیمانی را که بدون استفاده از عمل آوری داخلی برای هیدراسیون کامل خمیر سیمان در نظر می گیرد برابر با $0.35 < w/c < 0.4$ می باشد [۲۵]



شکل ۴-۵: درجه نهایی هیدراسیون با توجه به مدل پاورز برای خمیر سیمان عمل آوری شده در شرایط اشباع ومحیط بسته [۱]

بوسیله اندازه گیری درجه هیدراسیون بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی و مقایسه آن با نتایج مدل پاورز، و یا به صورت جایگزین، با نمونه های مرجع که در زیر آب نگهداری می شوند، می توان یک تخمینی از بازده و کارآمدی عمل آوری داخلی با آب بدست آورد. اما باید تأکید شود که طبق تحقیقات صورت گرفته توسط پاورز و برون یارد^۲ شاید به صورت عملی نتوان زمانی را برای توقف واکنشهای هیدراسیون در بتن مطرح ساخت. شاید به صورت تئوری بتوان بیان کرد که: رسیدن به یک تخلخل مینیمم را مبنا و اساس اتمام فرایند هیدراسیون و واکنشهای آن می توان در نظر گرفت [۲۲]. هنوز محاسبه دقیقی از تخلخل مینیمم در خمیر سیمان ارائه نشده است. ولی برای تحقیقات بیشتر می توان به مرجع شماره [۲۲] مراجعه کرد.

اندازه گیری و تجزیه و تحلیل در مخلوطهای بتنی با نسبت آب به سیمان پایین همراه با مصالح سنگی سبک (LWA) که شکسته و دانه بندی شده است، نشان می دهد که درجه هیدراسیون از ۰/۶۷ به ۰/۸۲ از ۱۸۰ روز به ۳۶۰ روز بعد از ریختن بتن افزایش پیدا می کند. تجزیه و تحلیل صورت

۱-Dr.h.c . wolfgany czerin

۲-Powers TC, Brownyard TL

گرفته بر روی مخلوطهای همسان، بوسیله پراش اشعه ایکس^۱ نیز نشان می دهد که هیدرات سیلیکات کلسیم، هیدروکسید کلسیم و اترینجیت ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 32H_2O$) برای نمونه های عمل آوری شده داخلی در مقایسه با نمونه های مرجع در سنین بین ۱۸۰ تا ۳۶۰ روز بیشتر می باشد [۹]. در [۴]، اندازه گیریها نشان می دهد که مقدار آب غیر قابل تبخیر برای بتن هایی که در آنها از پومیس استفاده شده است بیش از بتن های مرجع می باشد. از دیگر تکنیکهای موجود برای تخمین درجه هیدراسیون بتن هایی عمل آوری شده داخلی استفاده از عکس های گرفته شده توسط میکروسکوپهای الکترونیکی، تشدید مغناطیسی هسته ای حالت جامد، دمای هیدراسیون، و انقباض شیمیایی می باشد. تکنیکی که پاورز در سال ۱۹۴۹ پیشنهاد داد [۱] براساس اندازه گیری حجم آب غیر قابل تبخیر خمیر سیمان در طی فرایند هیدراسیون می باشد.

۴-۳-۲ اندازه گیری درجه هیدراسیون :

همانطور که در قسمت قبلی اشاره شد، درجه هیدراسیون را می توان براساس مقدار آب غیر قابل تبخیر در داخل ملات اندازه گیری کرد. برای اندازه گیری این مقدار آب، در سنین مختلف (۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه) نمونه هایی از حالت های مختلف عمل آوری برداشته می شود. قسمت هایی از ملات برای مدت ۴۸ ساعت در زیر الکل ایزوپروپیل نگهداری می شود، بعد از ۴۸ ساعت، هر جزء ملات برای خشک شدن از الکل در زیر هود بخار تقریباً یک ساعت نگهداری می شود؛ سپس نمونه های برداشته شده را در $C 110^{\circ}$ برای حداقل یک روز در داخل اون قرار می دهند.

قبل از قرار دادن نمونه ها در داخل کوره $1050^{\circ}C$ ، آنها را به داخل یک خشک کننده منتقل می کنند تا اینکه به اندازه دمای اتاق سرد شوند. در این حالت، جرم هر نمونه و ظرف اندازه گیری می شود. بعد از این مرحله نمونه ها را همراه با ظرفش در داخل کوره به مدت ۳ ساعت قرار می دهند، و بعد از آن اجازه داده می شود که در داخل کوره به مدت ۱/۵ ساعت دیگر نیز سرد شوند، به محض اینکه نمونه ها از داخل کوره بیرون آورده می شود، به داخل خشک کننده برده تا در حد دمای اتاق سرد شوند. معمولاً برای جلوگیری از خطا برای هر مخلوط ۳ نمونه انتخاب می شود و سپس میانگین آنها را حساب می کنیم.

۱-X-ray diffraction

محاسبه آب غیر قابل تبخیر و درجه هیدراسیون براساس معادلات زیر که توسط پاورز [۱۹۴۹] پیشنهاد شده است انجام می شود :

$$W_n = \left[\frac{W_1}{W_2} (1 - L) - 1 \right] \times C \quad (۴-۶)$$

W_n : آب غیر قابل تبخیر بر حسب گرم

W_1 : وزن نمونه خشک بر حسب گرم

W_2 : وزن نمونه سوخته شده بر حسب گرم

L : اتلافات سیمان اولیه برای هر گرم از این سیمان

C : سیمان بر حسب گرم

$$\alpha = \frac{W_n}{W_n^*} \times 100 \quad (۴-۷)$$

α : درجه هیدراسیون (%)

W_n^* : مقدار آب غیر قابل تبخیر برای سیمانی که بطور کامل هیدراته شده باشد.

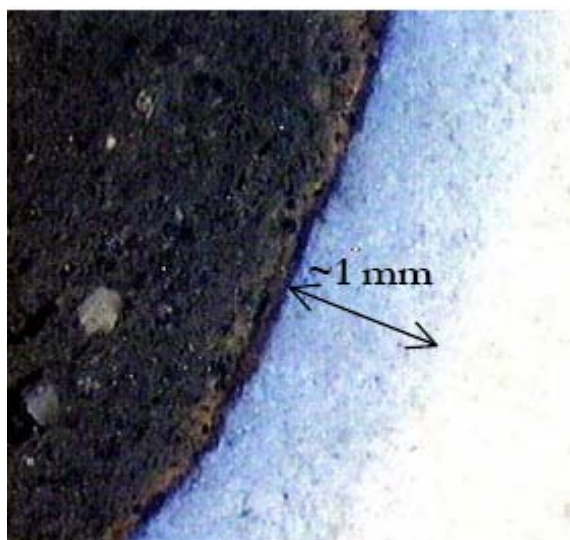
مقادیر W_n^* و L وابسته به نوع سیمان و افزودنی های دیگر به بتن می باشد، به طور مثال این مقادیر برای سیمان و همچنین سیمان همراه با ۱۰٪ میکروسیلیس در جدول زیر نشان داده شده است [۱۹].

جدول ۴-۱ : مقادیر W_n^* و L [۱۹]

نوع سیمان	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Alkalis (Na ₂ O)	L	W_n^*
Type 10	۶۴/۶۶	۲۰/۴	۴/۹۷	۲/۴۶	۲/۶۴	۲/۹۳	۰/۴۲	۲/۰۷	۰/۲۵۵
Type 10+SF	۵۸/۷	۲۶/۷	۴/۴	۲/۶	۲/۵	۲/۸	۰/۴	۱/۱۲	۰/۲۴۴

۴-۳-۳ انتقال آب داخلی :

زمانی که خمیر سیمان به علت هیدراسیون، خودبخود خشک می شود، یک افت در فعالیت آب در داخل بتن بوجود می آید و آب از منابع آبی به داخل خمیر سیمان حرکت می کند. انتقال آب و اثرات آن بر خواص بتن را می توان عاملی برای تعیین عملکرد عمل آوری داخلی و پیشرفت آن با زمان در بتن به حساب آورد. در یک آزمایش ساده که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است. ذرات اشباع شده با یک محلول جوهر ضعیف در یک خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان پایین ریخته شده است.



شکل ۴-۶: گسترش هاله رنگی اطراف یک (LWA) اشباع شده با محلول جوهر ضعیف در یک خمیر سیمان با سیمان سفید [۱]

نمونه های شکسته شده در فواصل معین نشان از این واقعیت دارند که یک حلقه رنگی اطراف ذرات LWA اشباع شده با ضخامت تقریبی ۱mm رشد پیدا کرده است. به هر حال، این آزمایش نمی تواند به اندازه کافی فرایند انتقال آب در داخل خمیر سیمان را به علت انتشار^۱ ذرات جوهر در سیاله حفرات نشان دهد. در طول فرایند هیدراسیون - بوسیله اندازه گیری انجام شده توسط پخش کننده رزونانس مغناطیسی هسته ای - ضریب خودپخشی آب در خمیر سیمان با کاهش قابل توجهی همراه خواهد بود. در مطالعات دیگر در همین راستا، از صفحات آغشته به فنلفتالین برای بررسی انتقال آب در خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان ۰/۲۵ همراه با مونیتور کردن تغییر رنگ در خمیر سیمان بوسیله ردیابهای شیمیایی انجام شده است. با ترکیب کردن آزمایشات و نتایج حاصل از آنها، بسیاری از محققین براین باورند که فنلفتالین تا فواصل ۲mm در خمیر سیمان در سنین اولیه انتشار پیدا می کند البته این فاصله در سنین بالاتر افت قابل توجهی دارد [۱].

اندازه گیریهایی که توسط تابش اشعه ایکس و گاما انجام می شود را می توان برای تجزیه و تحلیل خصوصیات رطوبت داخلی بتن و نحوه انتقال آن استفاده کرد؛ به هر حال، این تکنیک ها نتایج را براساس اختلاف چگالی بیان می کنند و حساسیت کمتری نسبت به تغییرات آب که چگالی کمتری

^۱-diffusion

دارد، از خود نشان می دهند. از طرفی می توان بوسیله فرایند مقایسه نتایج بهتری از این تکنیک بدست آورد. با توجه به اینکه مقدار آب عمل آوری متحرک که از منابع آب به خمیر سیمان منتقل می شود بسیار کم می باشد این تکنیکها را برای پراکندگی بزرگ بکار می برند. جذب اشعه ایکس X برای مطالعه خصوصیات رطوبتی در خمیرهای ساخته شده با LWA بکار برده شده است؛ در این تحقیقات فاصله نفوذ آب از LWA حداقل 4mm اندازه گیری شده [۲] البته این مقدار برای SAP کمی بیشتر محاسبه شده است. اما نمی توان قضاوت درستی در این زمینه کرد. در سالهای اخیر از پرتو نگاری ریز سه بعدی اشعه ایکس برای بررسی جزئیات بیشتر انتقال آب در طول مدت عمل آوری استفاده شده است. آزمایشات مختلف دیگری برای بررسی میکروساختار بتن در زمینه انتقال آب انجام شده است. از جمله تصویربرداری رزونانس مغناطیسی^۱ (MRI). باید در اینجا به این نکته اشاره کرد که در تمامی این تستها امکان تشخیص و اندازه گیری هر دو نوع آب آزاد و آب مقید شده^۲ (چسبیده) وجود دارد. به خاطر همین است که این تکنیکها دارای دقت قابل ملاحظه ای می باشند.

روش غیر مستقیم دیگری نیز برای برآورد فاصله نفوذ بوسیله اندازه گیری کاهش انقباض خودبخودی برروی مخلوطهایی با مواد عمل آورنده داخلی که توزیع فضایی مختلفی دارند، وجود دارد. با توجه به مطالب ارائه شده در [۳۵]، در روزهای اولیه سخت شدگی آب داخلی نفوذ یافته از LWA به داخل خمیر سیمان دارای عمقی بیش از چندین میلیمتر می باشد، که با اندازه گیریهای انجام شده توسط تکنیکهای دیگر، سازگاری دارد. به هر حال، در خمیر سیمان با نسبت آب به سیمان پایین با افزایش میکروسیلیس میزان نفوذپذیری در خمیر سیمان کاهش یافته که در نتیجه کاهش عمق نفوذ را به همراه خواهد داشت. هر چند که در صورت بروز انبساط موضعی در خمیر سیمان با عمل آوری داخلی، پیچیدگی محاسبات عمق نفوذپذیری را دوچندان خواهد ساخت. زیرا در این حالت عامل دیگری که کاهش انقباض کلی بتن می باشد، وارد مسئله خواهد شد.

۴-۳-۱ آزمایش تابش اشعه ایکس X:

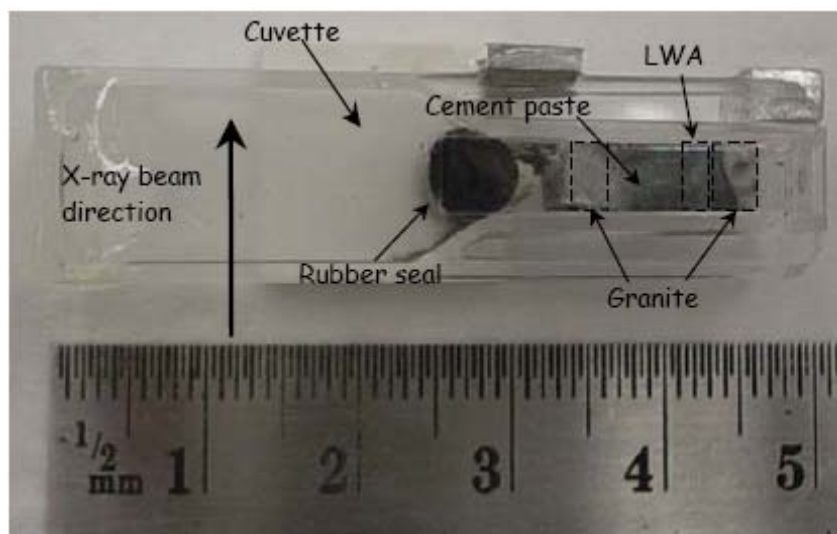
در آزمایشات مختلف از نمونه های ساندویچی شکل که معمولاً ترکیبی از مصالح لازم برای عمل آوری داخلی (LWA) و خمیر سیمان تازه می باشد برای اندازه گیری زمان هیدراسیون استفاده می شود.

۱-Magnetic resonance imaging

۲-bond water

تغییر در شمارش اشعه ایکس که بوسیله یک موج یاب یا ردیاب^۱ اندازه گیری می شود به تغییر در چگالی متوسط ماده که اشعه ایکس از آن عبور می کند نسبت داده می شود، شمارش بالایی از این اشعه نشان از وجود ماده ای با چگالی پایین می باشد. در این حالت انتقال رطوبت از ماده عمل آورنده داخلی به خمیر سیمان سخت شده باعث افزایش در شمارش مربوط به ماده عمل آورنده در اثر از دست دادن آب، و کاهش در شمارش مربوط به خمیر سیمان را به همراه خواهد داشت [۱،۲،۱۷].

برای انجام این آزمایش که بیشتر بر روی LWAها انجام شده است سطح ذرات کاملاً تمیز و صاف شود، مصالح با یک اندازه مشخص که معمولاً دارای ابعاد $10\text{mm} \times 4\text{mm} \times 2\text{mm}$ می باشند در ابتدا به حالت کاملاً اشباع در می آیند و بعد در یک محفظه که از جنس پلی متیل متاکریلات با ضخامت دیواره ای در حدود 1mm قرار می گیرند (شکل ۴-۷). سپس یک سنگ گرانیت که کاملاً تمیز شده است ($10\text{mm} \times 4\text{mm} \times 3\text{mm}$) را به ابتدا این محفظه می چسبانند. برای اینکه از چسبندگی بین LWA و گرانیت اطمینان حاصل شود گاهی اوقات از یک چسب اپوکسی استفاده می شود.



شکل ۴-۷: تصویر از بالا نمونه های استفاده شده برای آزمایش اشعه ایکس [۱]

در ادامه خمیر سیمان که بوسیله دست در بوتله پلاستیکی مخلوط شده است به داخل محفظه ریخته می شود در مدت زمانی ریختن، محفظه به صورت افقی نگه داشته می شود. معمولاً به اندازه 180mm^3 خمیر بر روی (LWA) ریخته می شود تا ضخامتی به اندازه 4.5mm به خود بگیرد.

^۱-detector

محاسبات نشان می دهد که آب جذب شده توسط LWA به اندازه ای است که برای پر کردن حفرات تولید شده بوسیله انقباض شیمیایی کافی خواهد بود. بعد از ریختن خمیر سیمان یک تکه سنگ گرانیت در قسمت بالای خمیر قرار داده می شود و سپس یک سیلندر پلاستیکی به داخل محفظه هول داده می شود تا کل مجموعه در یک محیط بسته قرار گیرند. نمایی از کل نمونه را در شکل ۴-۷ مشاهده می کنید. در انتها محفظه به داخل اتاقک اشعه ایکس قرار داده می شود. اولین مرحله ثبت نتایج بلافاصله بعد از ریختن می باشد که شامل اسکن کردن نمونه ها در فواصل $0.2mm$ است البته این فواصل می تواند افزایش یا کاهش داده شود. شمارش اشعه ایکس در خمیر سیمان در ساعتهای اولیه (۴ ساعت اولیه) افزایش می یابد اما به مرور زمان (بعد از ۷ ساعت) کاهش پیدا می کند. افزایش اولیه ممکن است که به دلیل ته نشینی و عدم یکپارچگی در خمیر سیمان باشد که در ساعات اولیه اتفاق می افتد بسیاری از محققین این حالت را مطابق با مرحله تأخیری^۱ فرایند هیدراسیون نسبت می دهند، بعد از آن بدلیل افزایش چگالی با کاهش در شمارش مواجه خواهیم شد. که احتمالاً بدلیل جذب آب از (LWA) می باشد. شمارش اشعه (LWA) در ابتدا و در قسمتی که با خمیر سیمان ارتباط دارد (سمت چپ) نسبت به قسمتی که دور از خمیر سیمان است (سمت راست) کمتر است اما به مرور زمان و انتقال آب از تمام قسمتهای (LWA) به خمیر سیمان حالت پایدار (تقریباً بعد از ۳ روز) به خود می گیرد. تاکنون تحقیق جامعی مبنی بر اینکه SAP ها در این آزمایش چگونه رفتار از خود نشان می دهند بطوریکه بتوان از نتایج آن استفاده کرد، صورت نگرفته است [۱، ۳۵].

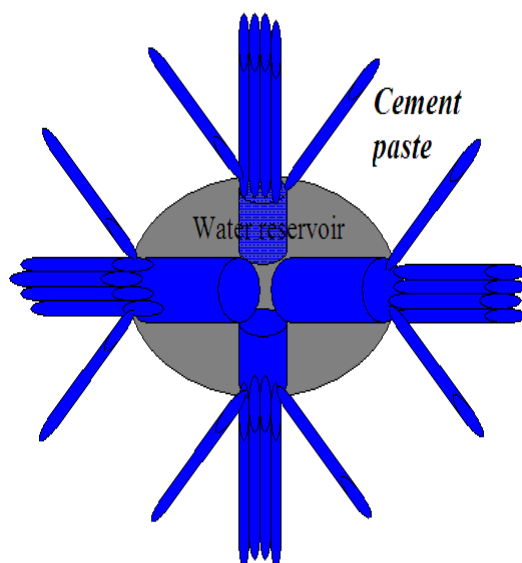
۴-۳-۲ آب تا کجا می تواند منتقل شود؟

وبر و رین هارت^۲ (۱۹۹۷) [۳۶] تجزیه و تحلیل‌های مفصلی در انتقال آب از LWA به خمیر سیمان انجام داده اند. تحلیل‌های نشان داده شده در زیر در واقع الهام گرفته از روش آنها می باشد، جایی که سرعت جریان آب با مقدار آب مورد نیاز برای اشباع نگه داشتن خمیر سیمان هیدراته شده، هم ارز در نظر گرفته می شود. در اینجا فرض بر این است که خمیر سیمان و منابع آب هر دو ترکیبی از حفرات استوانه ای هم اندازه باشند، همانطور که در شکل ۴-۸ دیده می شود. در مورد منابع آب،

۱-dormant period

۲-Weber and Reinhardt

اندازه حفرات فرض می شود ثابت باشند در حالیکه در مورد خمیر سیمان، اندازه حفرات با ادامه یافتن فرایند هیدراسیون کوچک می شوند.



شکل ۴-۸: حفرات در خمیر سیمان [۳۶]

محاسبات را با جریان آب از طریق حفرات استوانه ای (با شعاع R_{paste} و طول L ، هر دو بر حسب متر) در خمیر سیمان هیدراته شده در واحد حجم بتن آغاز می کنیم. حجم جریان عبوری در واحد $Q, m^3/s$ ، با معادله زیر تعیین می شود:

$$Q = \frac{-\pi R_{paste}^2 \Delta p}{8\mu L} = \frac{-\pi R_{paste}^4 k \Delta p}{\mu L} \quad \text{with } k = \frac{R_{paste}^2}{8} \quad (۸-۴)$$

در اینجا ΔP : افت فشار (Pa)، k : نفوذپذیری (m^2)، μ : ویسکوزیته سیال ($0.001002 Pa.s$ برای آب در دمای $20^\circ C$). اگر آبی که از یک حفره با شعاع R_{res} در منبع آب (که هاله ای را در داخل حفرات منبع بوجود می آورند) به داخل یک حفره با شعاع R_{paste} در خمیر سیمان هیدراته شده جریان پیدا کند، افت فشار را می توان از رابطه زیر تخمین زد:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R_{res}} - \frac{2\gamma}{R_{paste}} \quad (۹-۴)$$

جاییکه γ کشش سطحی آب ($0.07275 \text{ Pa}\cdot\text{m}$ دردمای 20°C) و زوایه تماس 0 درجه فرض می شود. Rpaste باید اندازه بزرگترین حفره در خمیر سیمان باشد. (در این نوع از خمیر سیمان حفرات تمایل به پر بودن در اثر تماس با حفرات منبع آب دارند). هرچقدر از زمان بتن ریزی دورتر می شویم، اختلاف فشار بیشتر خواهد شد. به علت انقباض شیمیایی در حال پیشرفت، جریان آب بکلی با میزان تقاضای آب از طرف بتن به حال توزان در خواهد آمد. قبل از هر چیزی باید به این نکته اشاره کرد که با افزایش سرعت هیدراسیون و محصولات حاصل از آن، مقدار فاصله انتقال آب مطمئناً تغییر خواهد کرد لذا در اینجا یک ضریب پرکننده را تعریف می کنیم، $\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t}$ ، بطوریکه میزان تقاضای آب در واحد حجم حفرات بتن (s^{-1}) برای اشباع نگهداشتن را بیان خواهد کرد-هر چقدر این ضریب افزایش یابد میزان این تقاضا نیز کاهش خواهد یافت - :

$$\frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} = \frac{CS \left(\frac{\partial \alpha}{\partial t} \right) C_f}{\rho_w \Phi_{\text{concrete}}} \quad (10-4)$$

جاییکه $\partial \alpha / \partial t$ نرخ سرعت جریان هیدراسیون برای یک دوره زمانی و ρ_w چگالی آب ($998/23 \text{ kg/m}^3$ برای آب در دمای 20°C): C_f : میزان سیمان مصرفی در واحد حجم بتن (کیلوگرم سیمان در هر مترمکعب بتن) CS : انقباض شیمیایی مورد انتظار واحد جرم سیمان در هیدراسیون 0.100 (CS) هر کیلوگرم آب در هر کیلوگرم سیمان) می باشد. Φ_{concrete} : خلل و فرج مویینه در بتن. سپس، معادله فوق از یک سیستم تخلخل کلی به یک سیستم حفرات مستقل محلی بسط داده می شود، برای این کار نیاز داریم که سرعت جریان حجمی در داخل حفرات خمیر سیمان Q، را داشته باشیم :

$$Q = \pi R_{\text{paste}}^2 L \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t} \quad (11-4)$$

در نهایت با برابر قرار دادن معادله ۸-۴ و ۱۱-۴ مقدار L بدست می آید.

$$L = \sqrt{\frac{k |\Delta P|}{\mu \frac{\partial \varepsilon_1}{\partial t}}} \quad (12-4)$$

با تخمین میزان نفوذپذیری خمیر سیمان و اندازه حفرات خمیر و منابع آب، می توان ابتدا فشار و سپس طول حفره یا فاصله جریان آب را محاسبه کرد.

از محاسبات مختلف، می توان نتیجه گرفت که احتمالاً اختلاف موجود در فاصله جریان از چند میلی متر در سنین اولیه به ۱۰۰ میکرومتر در سنین متوسط و در نهایت به چند میکرومتر در سنین بالاتر است. نکته ای که در اینجا باید مدنظر قرار داد این است که محاسبات صورت گرفته کاملاً تقریبی بوده و در حالت طبیعی ممکن است که اختلاف زیادی را در مقدار دقیق مورد استفاده برای نفوذپذیری خمیر و یا شعاع حفرات مشاهده کرد. از طرفی شرایط مختلف عمل آوری در مقدار عددی فرضیات انجام شده در این قسمت بسیار مؤثر خواهد بود.

۴-۳-۴ کرنش خودبخودی :

خالی شدن حفرات مویینه در خمیر سیمان عمل آوری شده داخلی، با استفاده از منابعی که در آن قرار دارد جبران می شود، تنشهای کششی و انقباض ناشی از خودخشک شدگی نتیجتاً کاهش پیدا خواهد کرد. حتی در مورد بتن هایی که به صورت داخلی عمل آوری شده اند در سنین اولیه بعد از بتن ریزی گاهی اوقات انبساط نیز به چشم می خورد [۱۹]. کاهش انقباض خودبخودی نه تنها یک شاهدهی بر مؤثر بودن عمل آوری داخلی با آب می باشد، در عین حال نتایج مفید عملی زیادی را به همراه خواهد داشت. مهمترین این نتایج کاهش تنشهای بوجود آمده در طی سخت شدگی محدوده شده و همچنین کاهش ترک خوردگی ساختمانهای ساخته شده با نسبت آب به سیمان پایین خواهد بود.

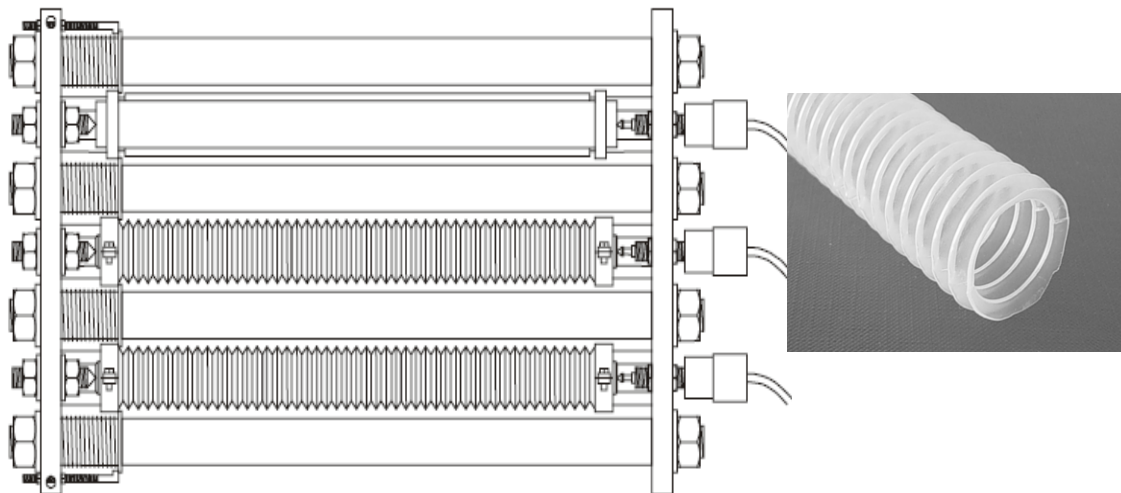
به هر حال، مواد عمل آورنده داخلی خود ممکن است که بر روی تغییر شکل پذیری مؤثر باشند. برای مثال، در بتن های ساخته شده با LWA، که مقادیر زیادی از LWA با دانه بندی درشت استفاده می شود، مدول الاستیسیته بتن کاهش می یابد. این فرایند ممکن است بطور بالقوه انقباض بتن را افزایش دهد. بنابراین احتمال دارد مقداری انقباض در خمیر سیمان حتی با وجود عمل آوری داخلی آبی اتفاق بیفتد. کاهش انقباض خودبخودی یا وقوع انبساط در نمونه های آزمایشگاهی توسط چندین محقق بر روی بتن و ملات که شامل LWA و SAP می باشد، اندازه گیری شده است. همه

این اندازه گیریهای تغییر شکل خودبخودی خطی بوده و از همان زمان گیرش یا بعد از ۱ روز شروع می شود، که اینهم وابسته به تکنیک اندازه گیری می باشد [۱۲، ۱۹].

۴-۳-۵ اندازه گیری کرنش خودبخودی :

اندازه گیری کرنش خودبخودی خمیر سیمان که معمولاً به صورت خطی انجام می پذیرد، توسط تکنیکهای بسیار پیشرفته و ویژه ای صورت می گیرد؛ در این حالت خمیر سیمان در یک محفظه با ضخامت بسیار نازک ریخته می شود. قالبها از جنس پلی اتیلن و به صورت چین دار بوده (شکل ۴-۹) که نسبت طول به قطر آنها تقریباً ۳۰۰ به ۳۰ میلیمتر می باشد. این تکنیک به گونه ای طراحی شده است که محدودیت بسیار ناچیزی برای خمیر سیمان سخت شده به دنبال خواهد داشت. بطوریکه ماکزیمم نیروی محدود شده به نمونه ها در حدود $0.5N$ می باشد که مطابق با تنشی نزدیک به $0.01 MPa$ خواهد بود. خمیر سیمان تحت ویبره به داخل قالبها ریخته می شود؛ سپس نمونه ها را در یک دستگاه اندازه گیری انبساط حرارتی که بوسیله یک ترانسفورماتور با جابجایی خطی الکترونیکی، مجهز شده، قرار داده می شود. (شکل ۴-۹) دستگاه اندازه گیری همراه با نمونه ها به داخل یک حمام الکتریکی الکلی کنترل کننده دما (با دمای $33^{\circ}C \pm 0.1^{\circ}C$) وارد می شود. اندازه گیریها بوسیله این دستگاه دارای دقت ($\pm 5 \mu m/m$) با قابلیت تکرار پذیری بسیار خوب قابل انجام می باشد. اندازه گیری کرنش خودبخودی ۳۰ دقیقه بعد از اضافه کردن آب و به طور اتوماتیک در هر ۱۵ دقیقه انجام می شود.

نمایی از این دستگاه در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. به طور کلی دستگاه اندازه گیری تشکیل شده است از ۲ صفحه فلزی که بوسیله چهار میله از جنس نیکل سخت به هم متصل شده اند (با قطر $20mm$). هر نمونه به صورت طولی بوسیله دومیله موازی که به صفحات فلزی متصل شده اند، نگهداری می شود. نمونه ها به سختی بوسیله فنرهای پیچشی در یک انتها نگهداری می شود [۱].



شکل ۴-۹: دستگاه اندازه گیری تغییر شکل‌های خودبخودی (چپ) و قالب پلی اتیلن ویژه برای اندازه گیری تغییر شکل خود بخودی (راست) [۱]

۴-۴ نتایج ثانویه عمل آوری داخلی :

۴-۴-۱ خواص مکانیکی :

افزایش درجه هیدراسیون با عمل آوری داخلی، بهبود خواص مکانیکی آنرا به همراه خواهد داشت. البته این اثر در سنین بالاتر بیشتر قابل مشاهده می باشد. یکی از اثرات سودمند بر روی خواص مکانیکی با جلوگیری کردن از وقوع میکروتَرَک‌های داخلی که معمولاً در بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان پایین به علت انقباض خودبخودی اتفاق می افتد، همراه خواهد بود. ارزیابی اثر عمل آوری داخلی بر روی خواص مکانیکی با توجه به این حقیقت که ماده عمل آورنده که وارد سیستم می شود، به طور کلی بر روی عملکرد آنها اثر می گذارد، بسیار پیچیده می باشد. به عنوان یک نتیجه افزایش مقدار ماده عمل آورنده کاهش مقاومت را در پی خواهد داشت، متقابلاً اثرات مفیدی بر روی پیشرفت هیدراسیون خواهد گذاشت [۱۹]. علاوه بر این، مقاومت به مقدار و کیفیت رطوبت نسبی بتن حساس می باشد. بتن‌های مرطوب، مقاومت کمتری نسبت به بتن‌های خشک از خود نشان می دهند. همچنین در بتن‌های حاوی مصالح سنگی سبک وزن (LWA) مقاومت نهایی به مقاومت اولیه LWA ها نیز وابسته است. از طرفی تنش‌ها یکسان بوجود آمده در بتن‌هایی که حاوی LWA می باشند، وقوع میکروتَرَک‌های داخلی را در مقایسه با بتن‌های معمولی به علت شباهت مدول الاستیسیته مصالح سنگی و خمیر سیمان کاهش می دهند. درمورد اثر عمل آوری داخلی بر روی

مقاومت فشاری و خمشی نظرات متفاوتی وجود دارد. برخی از محققین براین باورند که در این حالت افزایش و برخی دیگر کاهش مقاومت فشاری را گزارش داده اند. حتی در بعضی از تحقیقات افزایش مقاومت را مستقل از شرایط عمل آوری تشخیص داده اند [۳۴]. از طرفی در بعضی از تحقیقات دیگر مشاهده شده است که مصالح سنگی سبک که قبل از مخلوط کردن اشباع شده اند بدلیل افزایش نسبت آب به سیمان روند کاهش مقاومت را در مقایسه با مصالح سنگی خشک اضافه شده، در پی خواهد داشت [۳۷]. در این تحقیقات، این مطلب کاملاً به اثبات رسیده است که مدول الاستیسیته بتن های ساخته شده با LWA نسبت به میزان آب موجود در آنها بی اثر می باشد.

۴-۲-۴ تخلخل و توزیع اندازه حفرات :

افزایش درجه هیدراسیون بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی منجر به کاهش تخلخل خواهد شد. به صورت تئوری، در یک خمیر سیمان با آب عمل آوری داخلی کافی تا زمانی فرایند هیدراته شدن ادامه پیدا کند که کل حفرات مویینه بوسیله محصولات هیدراسیون پر شوند. این فرایند تخلخل کل خمیر سیمان را کاهش می دهد و باعث تصحیح توزیع حفرات در آن می شود؛ به صورت ایده آل می توان گفت که فقط حفرات ژلی در خمیر سیمان در این حالت باقی می ماند. زیرا که توزیع اندازه ریز حفرات نمونه های متنوعی از خمیر سخت شده سیمان در فاصله بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ انگسترم می باشد. این مقادیر از آزمایشاتی که در آنها جیوه تحت فشار فزاینده به داخل خمیر خشک شده سیمان فشار داده شده، بدست آمده اند. هر مرحله از فشار مربوط به قطر معینی از ریزه سوراخ است که هنوز پذیرای جیوه می باشد. با مطالعه و بررسی میکروساختار خمیر سیمان می توان نشان داد که در رابطه با نسبت آب به سیمان و میزان سخت شدگی، بزرگترین اندازه ریزه سوراخها بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ انگسترم است. پایین تر از این رقم، توزیع نسبتاً یکنواختی از اندازه ریزه سوراخها به سمت ارقام پایین تا کوچکترین ارقام اندازه گیری شده حدود ۱۰۰ انگسترم، وجود دارد. با استفاده از نفوذ جیوه، نمی توان ریزه سوراخهای ریزتر را به صورت قابل اعتمادی اندازه گیری کرد و به همین دلیل است که بسیاری از محققین این روش را روشی ناکارآمد می دانند [۲۵].

ممکن است در اینجا سؤال شود که توزیع اندازه کوچکترین اندازه های ریزه سوراخ ها، مانند ریزه سوراخهای واقع در محدوده ۱۰ تا ۱۰۰ انگسترم، احتمالاً چگونه است؟ سنجش ها مبتنی بر جذب

سطحی می تواند جوابگو باشد. ویتمن^۱ با استفاده از این روش وجود حداکثر تراکم توزیع در محدوده ۲۰ انگسترم را به اثبات رسانید. این نتیجه کاملاً موافق با نظری است که بوسیله پاورز [۲۲] پیشرفت داده شده بود. بدین معنی که ژل توپرموریت دارای تخلخل نسبتاً یکنواختی در حدود رقم ۲۰ انگسترم می باشد، این در حالی است که ریزه سوراخهای مویین دارای منحنی توزیع پیوسته ای هستند که وابسته به نسبت آب به سیمان می باشد.

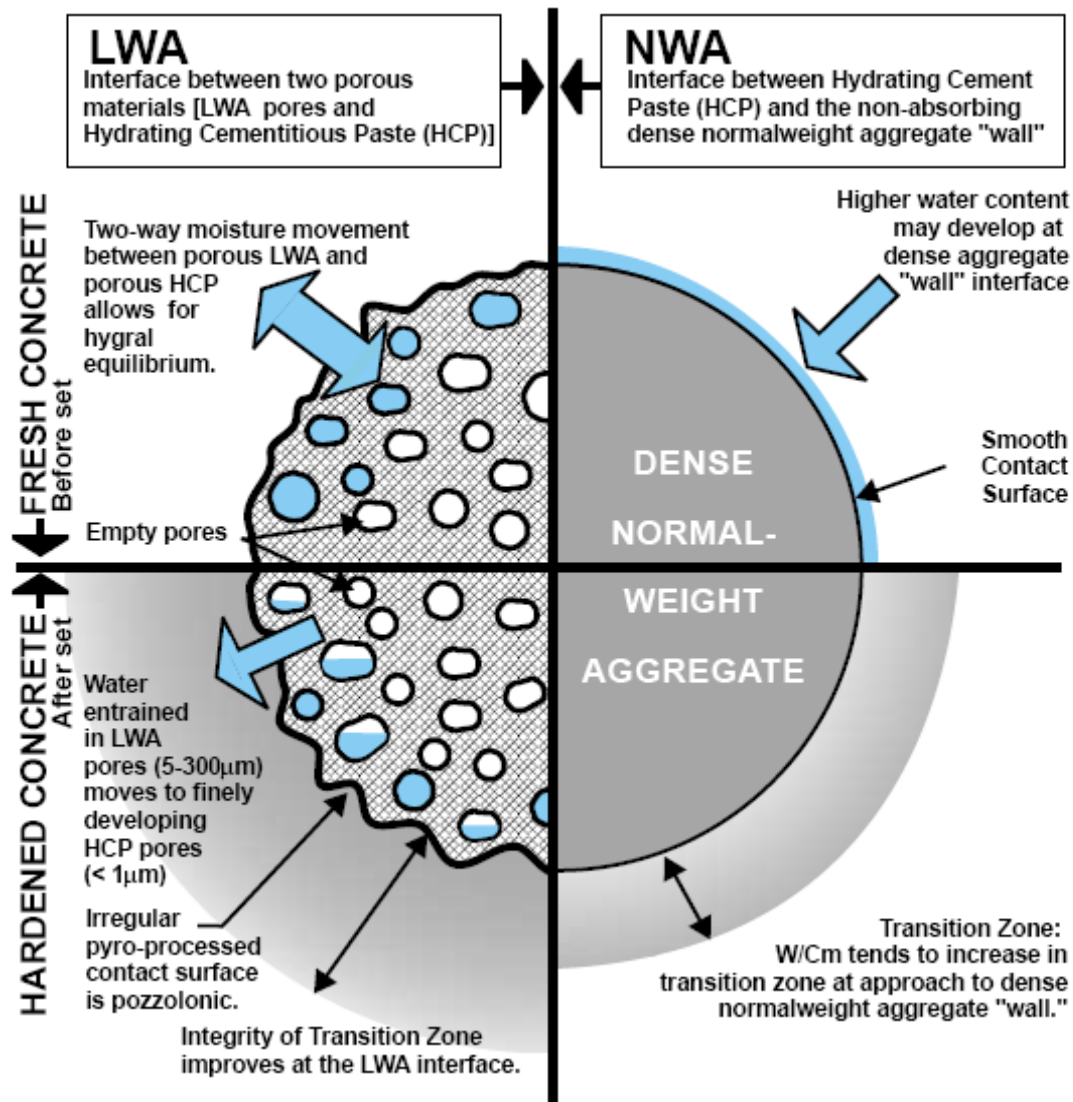
۴-۳ ناحیه انتقال بینابینی^۲:

ناحیه انتقال بینابینی به علت وجود حفرات بزرگتر و همچنین ترکیبات کریستالی اصلی $(Ca(OH)_2)$ در این ناحیه یکی از بخشهای بسیار ضعیف در بتن محسوب می شود [۱۲]. به طور مشخص دو پدیده متفاوت را می توان برای بررسی و مطالعه این ناحیه مدنظر قرار داد که شامل: (۱) چسبندگی مکانیکی ماتریس سیمان به سطح مصالح و (۲) تغییرات مشخصات فیزیکی و شیمیایی لایه انتقال ماتریس سیمان نزدیک به ذرات مصالح، می شود. فروپاشی یکپارچگی (پیوستگی) ساختار بتن ممکن است یا به علت گسیختگی مصالح و ماتریس سیمان، و یا شکست بوجود آمده در ناحیه انتقال بینابینی همراه با جدا شدگی باشد. مکانیسم هایی زیادی وجود دارد که باعث حفظ یکپارچگی، یا موجب جدا شدگی می شوند که بسیاری از آنها نادیده گرفته می شود؛ به عنوان مثال توجهات یکسانی در مورد بتن های هوازایی شده و هوازایی نشده وجود دارد.

از تحقیقات و مطالعات صورت گرفته می توان نتیجه گرفت که چگالی ناحیه انتقال بینابینی (ITZ) به دلیل عملکرد مصالح سنگی سبک (LWA) به عنوان یک ماده عمل آورنده داخلی افزایش پیدا می کند (شکل ۴-۱۰). آبی که از این مواد منتقل می شود هیدراسیون محلی ناحیه انتقال بینابینی را توسعه می دهد، که در مجموع باعث متراکم شدن آن در مقایسه با بتن های معمولی می شود. البته باید به این نکته اشاره کرد که موادی مثل سوپرجاذب نیز می تواند با قرار گیری در این ناحیه موجب بهبود این ناحیه شود.

۱-A. Wittmann

۲-Interfacial transition zone



ش

شکل ۴-۱۰: عمل آوری داخلی در ناحیه انتقال بینابینی [۴۱]

همانطور که در شکل دیده می شود، یک ناحیه انتقال بینابینی هموزن و متراکم برای LWAها با دیواره بیرونی متخلخل قابل مشاهده می باشد، عمل آوری داخلی بتن این اطمینان را حاصل می کند که اشباع بودن بتن، واکنشهای پوزولانی در سطح مشترک بین مصالح سنگی سبک (LWA) و خمیر را توسعه می دهد، که ممکن است به مقاوم کردن و چسبندگی آن افزوده شود. با استفاده از تصویر برداری میکروسکوپیهای فلورسنت، می توان به این نتیجه رسید که با کاهش تخلخل میزان سخت شدگی در ناحیه ای به اندازه $100\mu\text{m}$ اطراف مصالح سنگی سبک اشباع شده، افزایش پیدا می کند.

در بتن های حاوی LWA این حقیقت آشکار شده است که ترکها به جای اینکه در امتداد دیواره شان منتشر شوند از میان مصالح سنگی عبور می کند. بهبود ناحیه انتقال بینابینی زمانی که از مصالح سنگی سبک استفاده می شود مورد توافق بسیاری از محققین می باشد. در کنار این بهبود، همچنین مشاهده شده است که ضعف ناحیه انتقال بینابینی (ITZ) رامی توان به فرار هوا از LWA ها در حالت خشک و یا عدم کفایت آب کافی LWA ها نسبت داد [۴۱].

۴-۴-۴ تنشهای القایی و ترک خوردگی^۱:

اگر انقباض خودبخودی یک خمیر سیمان کاهش داده شود، تنشهای القایی تولید شده بوسیله تغییر شکلهای محدود شده نیز کاهش پیدا می کند. در مجموع هم تنشهای کلی عمل کرده بروی ساختمان بتن و هم تنشهای محلی در سطح مشترک خمیر سیمان - مصالح سنگی تحت تأثیر واقع خواهند شد. یک نتیجه مستقیم در این حالت احتمال کاهش ترکهای ماکروسکوپی بتن خواهد بود؛ علاوه براین، احتمال دارد که میکروتترکهای داخلی نیز کاهش پیدا می کند [۶].

گذشته از این، در بتن های حاوی LWA مدول الاستیسیته بتن به علت وجود LWA به طور کلی کاهش پیدا می کند و این نیز با کاهش تنشهای القایی کلی همراه خواهد بود. به هر حال، مدول کم LWA ها به کاهش تنشهای محلی در سطح مشترک مصالح سنگی - خمیر سیمان و همچنین احتمال وقوع ترک خوردگی داخلی، کمک می کند. تعداد زیادی از محققین تنشهای القایی مخلوطهای بتنی حاوی LWA ها را، اساساً با استفاده از ابزارهای اندازه گیری تنشهای خطی محاسبه کرده اند. در همه این موارد، تنشهای کششی القایی نسبت به بتن های مرجع بدون عمل آوری داخلی و احتمال وقوع ترک در سنین اولیه کاهش پیدا کرد [۲]. در بعضی موارد، تنشهای فشاری اندازه گیری شده در سنین اولیه نیز کاهش پیدا کرد. ینسن و هنسن^۲ نیز کاهش ترکهای القایی در ملاتها با SAP را بوسیله اندازه گیری فشار هیدرواستاتیک معادل در یک گیج انقباض حلقوی، مشاهده کردند (تست رینگ). ملاتهای حاوی SAP ترک نخورده در حالیکه مخلوطهای مرجع در این حالت دچار ترک خوردگی شده بودند [۸].

۱-Self-induced stress and cracking

۲-Jensen and Hansen

اندازه گیری مستقیم تنش القایی در سطح مشترک خمیر - مصالح سنگی را می توان بوسیله یک سنسور اندازه گیری کرد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته [۳۸] وجود رطوبت نسبی داخلی بالا در بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی، ضریب انبساط حرارتی کاهش پیدا خواهد کرد، در نتیجه کاهش پیشرفت تنش در ساختار بتن در شرایط واقعی را در پی خواهد داشت. به هر حال، ارزیابی این کاهش تنش بوسیله جمع آثار قوای تغییر شکل های وابسته به گرما و تغییر شکل های خودبخودی، بسیار مشکل خواهد بود، و می توان گفت که استفاده از آن به عنوان یک نشانه ای از اثر عمل آوری داخلی بر روی بتن کاری بسیار مشکل و طاقت فرسا خواهد بود.

۴-۴-۵ دوام :

بتن باید قادر باشد که شرایط محیطی که در طرح آن در نظر گرفته شده است را در طول سالیان استفاده از آن تحمل نماید و خراب نشود. در بسیاری از مراجع به این خاصیت بتن، دوام اطلاق می شود.

برای بررسی دوام بتن معمولاً دو نوع اثر را بررسی می کنند : ۱- عوامل محیطی که بتن در معرض آن قرار می گیرد و ۲- اثر عوامل داخلی که در خود بتن وجود دارد. عوامل خارجی می توانند به صورت فیزیکی، شیمیایی و یا مکانیکی باشد. این عوامل ممکن است در اثر هوازدگی، درجه حرارت های شدید، حملات مایعات و گاز های طبیعی و یا صنعتی و . . . باشد. با داشتن یک بتن با کیفیت بالا می توان اثر این عوامل را کاهش داد. عوامل داخلی عبارتند از واکنش های قلیایی سنگدانه ها، تغییرات حجمی در اثر اختلاف بین خواص حرارتی سنگدانه ها و خمیر سیمان، و بیش از همه نفوذ پذیری بتن [۲۱].

کم دوامی و گسیخته شدن بتن به ندرت فقط در اثر یک عامل است. از آنجا که وارد کردن یک عامل به داخل بتن بر روی بسیاری از خواص آن از جمله نفوذ پذیری که عامل تعیین کننده در دوام بتن است، اثر می گذارد، این ضرورت را ایجاد می کند که به بررسی دقیق و اثرات ماده افزوده به بتن پرداخت.

۴-۴-۶ دوام در بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی :

دوام بتن یکی از خواص بسیار پیچیده بتن می باشد زیرا که یک اختلال در فرایندهای فیزیکی و شیمیایی ممکن است که در فرایند خرابی اثر بگذارد. بعلاوه فرایند نفوذپذیری و یا انتشار بتن بسیار با اهمیت است. به طور کلی می توان گفت که سرعت خرابی به سادگی به سرعت انتقال مواد حمله کننده به بتن وابسته است. با توجه به این مطلب اثر عمل آوری داخلی را می توان علاوه بر روی مقاومت، بر روی نفوذپذیری و انتشار بررسی کرد. از جنبه ریاضی، می توان اینگونه بررسی کرد که حجمهای آبی ایجاد شده به صورت غیر پیوسته بوده که در این صورت بر روی خواص داخلی ماده از جمله خواص پخش شدگی (ضریب پخش) مؤثر است. بنابراین، با توجه به این دیدگاه می توان گفت که به طور کلی دوام بتن در این حالت افزایش پیدا می کند، زیرا که همراه با جایگزین کردن حفرات ریز و غیر منظم، میزان پیوستگی مجاری موئینه کاهش یافته و باعث تفکیک شدن این حفرات خواهد شد. و از آنجا که پیوستگی ساختار حفرات در مسئله دوام بتن از اهمیت ویژه و بالایی برخوردار می باشد، لذا دوام بتن در این حالت بهبود خواهد یافت [۷].

از آنجا که بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی، تکنیک های جدیدی در فن عمل آوری می باشند، هنوز مشاهدات طولانی مدت برای بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی با SAP و LWA در دسترس نمی باشد. اما از جمع بندی مطالبی که در قسمتهای قبلی به آن اشاره شد، شاید بتوان گفت که دوام بتن در این مورد بهبود خواهد یافت؛ بویژه اینکه درجه بالایی از هیدراسیون، تخلخل کمتر، کاهش تنشهای داخلی، کاهش ترک خوردگی، و متراکم شدن ناحیه انتقال بینابینی (ITZ) در مورد این نوع از بتن ها مشهود می باشد.

کاهش در نفوذپذیری و انتشار در مورد بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی قابل منتظره می باشد، بویژه در سنین بالاتر، به علت عدم تراوش^۱ حفرات موئینه در خمیر سیمان این احتمال را بیشتر می کند. به هر حال، این نکته نیز باید مدنظر قرار داد که در این حالت یک سیستم حفرات اضافی به داخل بتن افزوده می شود (LWA و SAP) و اینکه این عوامل جزء اثرات مثبت و یا منفی بر روی دوام بتن می باشند یک سؤال است؟ که نیاز به بررسی و مطالعات بیشتر و گسترده در این زمینه دارد. به صورت ریاضی، اثبات اینکه ورود و یا بوجود آمدن یک حالت غیر پیوسته اثر ناچیزی

۱-depercolation

برروی خواص انتشار یک ماده دارد، امکانپذیر می باشد. به عنوان یک توضیح کلی، نفوذپذیری و انتشار بتن های حاوی LWA بیشتر بوسیله کیفیت ماتریس نسبت به LWAها قابل کنترل می باشد، اما اثر عمل آوری داخلی روی نفوذپذیری و انتشار کاملاً به اثبات نرسیده است [۱۸].

یکی از مزیت های بتن های دارای LWA و SAP که همراه با تشکیل سیستم مناسبی از حفرات در داخل بتن می باشد، - به عنوان بتن های هوادار- افزایش مقاومت این نوع بتن ها در مقابل سیکل های مختلف یخ زدگی می باشد. در برنامه های آزمایشگاهی مختلف تست های ذوب و یخ زدگی حاکی از عملکرد خوب این نوع بتن ها در مقایسه با بتن های معمولی می باشد [۳۹]. شاید عملکرد SAP در این زمینه بهتر باشد؛ براساس تحقیقاتی که توسط محققین مختلف، بر روی بتن انجام شده است [۵]، مقاومت در برابر یخ زدگی که از جزء موارد ویژه در مسئله دوام می باشد، در مورد خمیر سیمان آبدار وضعیت بهبود یافته ای را خواهیم داشت. که این امر نیز بدلیل حفرات پر از هوا است که در نتیجه تخلیه حبابهای پر از آب در طول فرایند هیدراسیون خواهد بود. این حفرات شبیه به حفرات ایجاد شده در بتن های هوادار عمل می کنند براساس شبیه سازی کامپیوتری، که توسط بنز و اشنایدر^۱ صورت گرفت، ماکزیمم فاصله مورد نیاز از یک حجم پر از آب برای هر نقطه از خمیر سیمان سخت شده، برای اطمینان حاصل کردن از اثر مثبت عمل آوری داخلی بر روی بتن محاسبه شد. مقدار تقریبی $200\mu m$ برای حجم خمیر محافظت شده برای بتن های هوادار شبیه سازی شده است. این حالت مطابق با یک اندازه حجم آبدار در حدود $100\mu m$ می باشد. این مقدار ممکن است که نزدیک به اندازه بهینه باشد، زیرا که دیگر عوامل مثل رشد محصولات حاصل از واکنش با احجام آبی ممکن است اندازه مینیمم را محدود کنند [۷].

۴-۴-۷ نفوذپذیری بتن :

کیفیت یک بتن خوب بخصوص در مسئله دوام ارتباط ویژه ای به نفوذپذیری آن دارد. منافذی که در سنگدانه ها و خمیر سیمان وجود دارد و به طور کلی در حجم بتن، اثر قابل ملاحظه ای بر میزان دوام و به عبارتی نفوذپذیری آن خواهد داشت. همانطور که اشاره شد منافذ خمیر سیمان را به طور کلی به دو دسته منافذ ژلی سیمان و منافذ موئین طبقه بندی می کنند. درصد وجود منافذ موئین

1-Bentz and Snyder

وابسته به نسبت آب به سیمان و درجه هیدراسیون می باشد. بطوریکه نفوذپذیری خمیر سیمان با پیشرفت درجه هیدراسیون آن تغییر می کند. در یک خمیر تازه، جریان آب بوسیله اندازه، شکل و غلظت ذرات اولیه سیمان کنترل می شود. با پیشرفت هیدراسیون نفوذپذیری به سرعت کاهش می یابد، زیرا که حجم خالص ژل (شامل منافذ در ژل) تقریباً ۲/۱ برابر حجم خمیر هیدراته نشده است. در جدول ۴-۲ روند کاهش نفوذپذیری خمیر سیمان با پیشرفت هیدراسیون مشاهده می شود. همانطور که در جدول مشاهده می کنیم با افزایش عمر بتن میزان نفوذپذیری بتن کاهش قابل ملاحظه ای پیدا می کند. در مورد بتن های عمل آوری شده داخلی نفوذپذیری از دودیدگاه قابل بررسی است: اول اینکه خود عامل عمل آورنده سیستمی از حفرات را که اندازه آنها بزرگتر و یا در حدود حفرات مویینه می باشند را در خمیر سیمان ایجاد می کند و از طرفی بدلیل دسترسی به آب کافی پیشرفت فرایند هیدراسیون بهتر بوده و باعث کاهش نفوذپذیری می شود. لذا بدست آوردن یک ضریب برای نفوذپذیری مستلزم وارد کردن هر دو اثر بر روی خواص خمیر سیمان می باشد.

جدول ۴-۲: کاهش در نفوذپذیری خمیر سیمان (نسبت آب به سیمان ۰/۷) با پیشرفت هیدراسیون [۲۱]

عمر (روز)	ضریب نفوذپذیری، m/s.K
تازه	2×10^{-6}
۵	4×10^{-10}
۶	1×10^{-10}
۸	4×10^{-11}
۲۴	1×10^{-12}
نهایی	6×10^{-13}

۴-۴-۸ نفوذپذیری در بتن های عمل آوری شده داخلی :

در مورد بتن ها حاوی LWA باید گفت که نفوذپذیری خمیر سیمان و بتنی که حاوی خمیری با همان نسبت آب به سیمان باشد بدلیل وجود این مصالح و اثر آنها بر روی نفوذپذیری باعث تغییر عملکرد بتن خواهد شد. اثر مقدار مصالح سنگی سبک با سنگدانه ها در مخلوط زمانی تأثیر کمی بر روی نفوذپذیری دارد که کل محیط سنگدانه بوسیله خمیر سیمان احاطه شده باشد. در صورتیکه

این مصالح بوسیله خمیر سیمان کاملاً احاطه نشده باشند بدلیل وجود منافذ مویینه بزرگتر در مقایسه با خمیر سیمان احتمالاً باعث افزایش میزان نفوذپذیری در مقایسه ببتن های معمولی خواهد شد. زیرا که در این حالت ما با افزایش سطح مؤثری که آب در آن جریان پیدا می کند، مواجه خواهیم بود. از طرفی در بتن های معمولی که ذرات سنگدانه آنها دارای نفوذپذیری کمتری از خمیر سیمان می باشند(که در عمل هم این چنین می باشد) مسیری که آب در بتن باید طی کند به میزان قابل ملاحظه ای طولانی تر خواهد شد بطوریکه اثر سنگدانه ها در کاهش دادن نفوذپذیری بتن، ممکن است چشمگیر باشد. در مورد بتن های ساخته شده با SAP نیز باید گفت که وجود این مواد در صورتی باعث کاهش نفوذپذیری می شود که حجم اشغال شده توسط SAP اشباع بوسیله محصولات هیدراسیون پر شود، تاکنون آزمایش که نتایج آن کاملاً بازگو کننده میزان نفوذپذیری این بتن ها باشد، صورت نگرفته است.

فصل پنجم

معرفی سوپر جاڈیہا

۵-۱ مقدمه :

از نظر علمی، ژل^۱ به طور معمول به ماده ای اطلاق می شود که وقتی در حلال خود قرار می گیرد، ضمن جذب حلال و ایجاد تورم، حل نشود و بنابراین، ژلهای واقعی با موادی مانند ژله^۲ سر میز غذا که در آب گرم حل و محلول آن در سرما سفت و منعقد می شود، به طور کامل تفاوت دارند(به همین دلیل، کاربرد واژه ژل در چنین موادی، نادرست است هر چند کاربرد آن متداول است). از نظر شیمیایی، ساختار یک ژل می تواند پلیمری (درشت مولکولی) باشد یا نباشد؛ به هر حال این ماده ساختاری شبکه ای یا سه بعدی دارد که نمی تواند در حلال خود حل شود. ژل، بر خلاف اسفنج، حلال جذب کرده خود را حتی تحت فشار نیز از دست نمی دهد [۲۶، ۲۷].

چنانچه ژل، آبدوست باشد، آن را هیدروژل^۳ می نامند. هیدروژل سوپرجاذب یا ابر جاذب^۴، پلیمری آبدوست با شبکه سه بعدی است، که قابلیت جذب و نگهداری مقادیر زیادی آب و محلولهای آبی را دارد، حتی اگر تحت فشار باشد.

به طور کلی، پلیمر سوپر جاذب (SAP) به ماده پلیمری خشک و به طور معمول شکر مانند با توانایی جذب محلول آبی به میزان چندین برابر وزن خود (به عنوان مثال ۱۰۰۰-۱۰ برابر) و با قابلیت نگهداری آن در خود اطلاق می شود. ذرات ماده متورم شده، تغییر شکل کلی نمی دهند؛ بنابراین هر ذره سوپرجاذب خشک به هر شکلی باشد (دانه، لیف، فیلم و ...) در حالت جذب آب و متورم شده و نیز قاعدتا باید همان شکل هندسی اولیه را داشته باشد. هیدروژل بدست آمده از تورم سوپرجاذب خشک(هیدروژل متورم) نباید خیلی نرم و شل باشد، بلکه باید به قدر کافی سفت و محکم باشد تا هنگام قرارگیری در آب از نظر مکانیکی قوام خود را حفظ و در برابر جاری شدن و حل شدن مقاومت کند. ویژگیهای یاد شده سبب می شود این خانواده از پلیمرها کاربردهای زیادی پیدا کند؛ عمده ترین کاربردهای آنها در بخش بهداشتی و کشاورزی است [۲۶].

۱ - gel

۲- jelly

۳- hydrogel

۴- superabsorbent polymer

۵-۲ تاریخچه سوپر جاذبها و مقایسه آن با مواد نمگیر و جاذبهای معمولی

نخستین گزارش از ماده ای با قابلیت جذب آب به سال ۱۹۳۸ بر می گردد. از نظر تاریخی، اولین سوپر جاذبی که تجاری شد (دهه ۱۹۷۰)، با نام مخفف H-SPAN بود. این سوپر جاذب پایه طبیعی که به وسیله متخصصان وزارت کشاورزی آمریکا ابداع شد و توسعه یافت، قادر بود تا 5000 g/g آب را جذب کند. در دهه ۱۹۷۰، سوپر جاذبی پایه طبیعی H-SPAN به عنوان نخستین سوپر جاذب تجاری وارد بازار شد، اما به دلیل گرانی و ضعف کارایی، بویژه استحکام ژل پایین نسبت به انواع تمام سنتزی (آکریلی)، این ترکیبات موقعیت خود را از دست دادند و جای خود را به انواع آکریلی سپردند. اکنون شرکتهای زیادی در اروپا، آسیا (بویژه ژاپن) و آمریکا محصولات متنوع این مواد را (به طور عمده برای کاربردهای بهداشت و کشاورزی) تولید می کنند. تولید سالانه این رزینها در سال ۲۰۰۵ بالغ $1/294$ تن بوده است [۲۶].

آغاز کار پژوهشی بر سوپر جاذبها در ایران به حدود سال ۱۳۷۰ بر می گردد؛ زمانی که یک نمونه رزین سوپر جاذب خارجی (مناسب برای گیاهان آپارتمانی) به عنوان یک سوغات علمی به پژوهشگاه پلیمر ایران رسید. جذابیت خواص این رزین به گونه ای بود که در مدت کوتاهی، پروژه ای تحقیقاتی تنظیم، تصویب و آغاز شده است. بدین ترتیب شالوده پژوهش بر سوپر جاذبها در ایران، در پژوهشگاه پلیمر ایران پی ریزی شد. بعدها مؤسسات دیگری (از جمله دانشگاه امیرکبیر، صنعتی شریف، تربیت مدرس، و پژوهشگاه صنعت نفت) نیز ضمن آشنایی با این زمینه، دست به انجام پروژه هایی زدند. اما دانش فنی بنیانگذاری شده و توسعه یافته در ارتباط با این رزین ها در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی، همچنان در غرب آسیا بی مانند است.

تحقیقات آزمایشگاهی و نیمه صنعتی در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران ادامه پیدا کرد تا آنکه دوتن از اعضای هیات علمی پژوهشگاه که همواره مسئولیت طراحی و اجرای پروژه های سوپر جاذب را عهده دار بودند، در پاییز ۱۳۸۲، شرکت رهاب رزین را به عنوان یک هسته تحقیقاتی در مرکز رشد فناوری پلیمر ایران، بنیان گذاشتند. هم اکنون، تنها سوپر جاذب پایه کشاورزی ایرانی (با نام سوپر جاذب آ-۲۰۰) و همچنین مواد و فرآورده های جاذب دیگر، به وسیله این شرکت در هر حجم مورد تقاضا، تولید و عرضه می شود [۲۸].

چنانچه پیشتر اشاره شد، سوپرجاذبها یکی از زیر گروههای خانواده هیدروژلهایند؛ بنابراین رزینهای یاد شده را می توان به درستی هیدروژلهای سوپرجاذب نامید تا پیشوند «هیدرو» نشان دهد که آنچه را این رزینها جذب می کنند، آب یا محلول آبی است. اما، چون هیچ ماده جاذبی ظرفیت جذبی به زیادی سوپرجاذبها را ندارد(که این خصلت منحصر به فرد را به طور اساسی حلالی منحصر به فرد یعنی آب به آنها داده است)، کلمه سوپرجاذب به تنهایی تداعی کننده تمام واقعیت آن است، یعنی ماده جاذب آب و محلولهای آبی، با ظرفیت جذب فوق العاده زیاد. شایان ذکر اینکه در مراجع، اسامی زیادی به این گونه مواد داده شده است [۲۷].

مواد مرسوم نمگیر یا جاذب الرطوبه را می توان، براساس ساز و کار اصلی جذب آب در آنها در دو دسته اصلی، که هر دو از مواد معدنی اند، قرار داد ؛

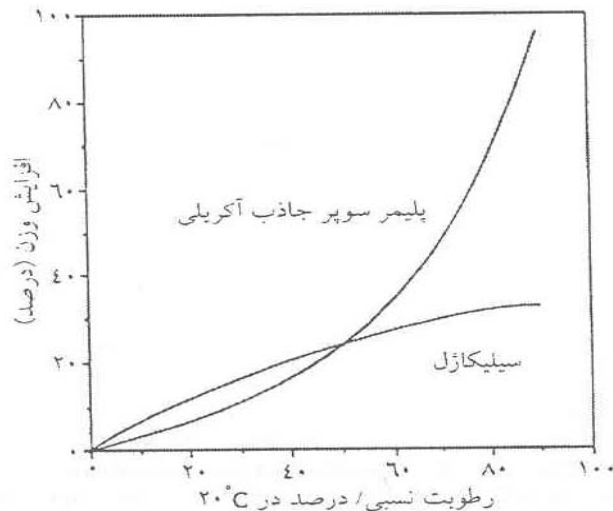
الف - جاذبهای شیمیایی (مانند فسفر پنتوکسید و هیدریدهای فلزی)، که در آنها جذب آب با واکنش شیمیایی همراه و بازیابی آنها پس از جذب به طور معمول غیر ممکن است.

ب - جاذبهای فیزیکی، که جذب آب در آنها با ماهیت شیمیایی ماده جاذب همراه نیست؛ بنابراین بازیابی و استفاده مجدد از آنها امکان پذیر است. نکمهای بی آب (انیدر) مانند کلسیم کربنات بی آب، سدیم سولفات بی آب، و سیلیکاژل، از جمله جاذبهای فیزیکی هستند.

سوپر جاذبها از گروه جاذبهای فیزیکی، اما موادی آلی، با ظرفیت جذب خارق العاده اند. جذب آب در آنها با واکنش شیمیایی همراه نیست و ساز و کار تورم در آنها در آب، بسیار شبیه به انحلال پلی الکترولیتهاست(پلیمرهای یونی انحلالپذیر در آب). در ارتباط با جذب رطوبت(نه آب به صورت مایع)، یک ماده سوپر جاذب با ماده نمگیر مانند سیلیکاژل تفاوت دارد. همانطور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، در رطوبتهای زیر ۵۰٪، سیلیکاژل نسبت به سوپر جاذب جذب بیشتری دارد(حساستر است)، اما در رطوبتهای بیشتر، در حالی سیلیکاژل بزودی اشباع می شود، توان جذب رطوبت به وسیله سوپر جاذب با شیب بسیار تندی، به طور نمایی افزایش می یابد. بنابراین به علت تفاوت فاحش

۱-absorbent polymer, absorbent resin, gel, gellant, hydrocollorid, hydrocollorid gel, polyelectrolyte gel, superswelling polymer, super-sorber, super-sorbent, superabsorber, superabsorbent polymer(SAP),superabsorbent resin, water absorbent polymer, super water-absorbent, xerogel, xerogellant,

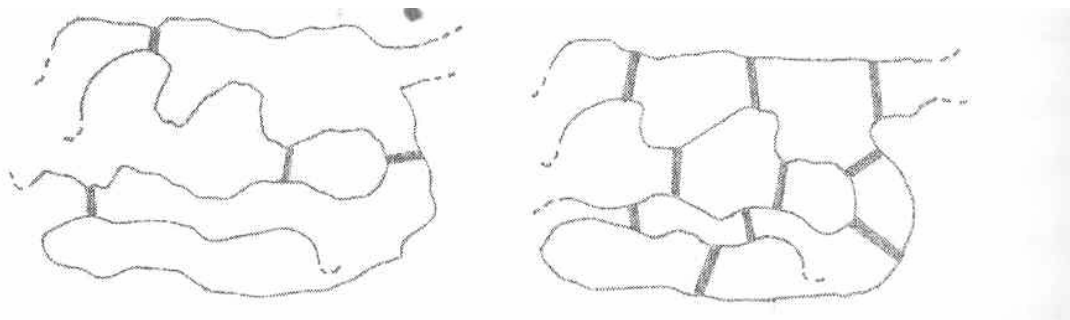
در ظرفیت و حساسیت جذبی آنها، هر کدام از این جاذبها کارکرد خاص خود را دارند و به طور اصلی نمی توان از آنها به جای هم استفاده کرد [۲۸].



نمودار ۱-۵ تفاوت سوپر جاذب آکریلی و سیلیکاژل در جذب رطوبت [۲۸]

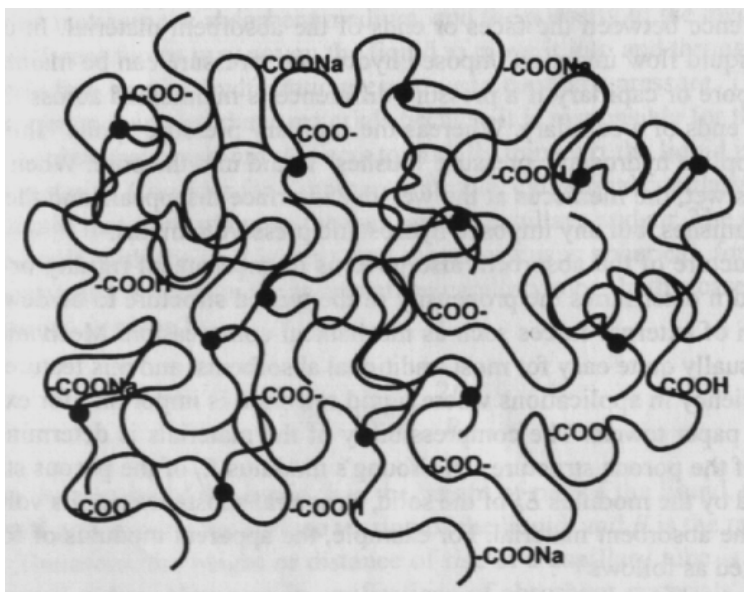
۳-۵ انواع و ساختار سوپر جاذبها :

سوپر جاذب، شبکه پلیمری به شدت آبدوستی است که در آب به شدت متورم می شود، اما به دلیل وجود تعداد اندکی پیوندهای عرضی، حل نمی شوند. بنابراین، سوپر جاذب، پلیمری با اتصالات عرضی است (ژل) که گروههای عاملی آبدوست (مانند، OH , COONa , SO_3H , COOH , NH_2 و...) نیز دارد؛ به این ترتیب بر خلاف هیدروژل‌های معمولی، مقادیر فوق العاده زیادی آب را جذب می کند. شکل ۵-۱ و ۲-۵ طرحی کلی از شبکه هیدروژل معمولی را در مقایسه با یک شبکه سوپر جاذب نشان می دهد.



شکل ۵-۱: طرحی کلی از شبکه هیدروژل معمولی (راست) در مقایسه با یک شبکه سوپر جاذب (چپ).

زنجیره‌های پلیمری آبدوست به وسیله پیوندهای عرضی (خطوط توپر) به هم متصل شده اند. [۲۸]



شکل ۵-۲: گروه‌های عاملی آبدوست ($\text{OH}, \text{COONa}, \text{SO}_3\text{H}, \text{COOH}, \text{NH}_2$) در سوپرجاذبها

سوپرجاذبها را مانند سایر هیدروژلها، براساس بار الکتریکی مستقر بر زنجیرهای شبکه بندی شده آنها می توان به چهار گروه زیر دسته بندی کرد [۲۶]:

الف - پلیمرهای غیر یونی؛

ب- پلیمرهای یونی (شامل آنیونی و کاتیونی)؛

ج- پلیمرهای آمفوتری الکترولیتی (آمفولیتی)؛

د- پلیمرهای جفت یونی (پلی بتائین ها)؛

در این دسته بندی، سوپرجاذبهای تجاری عمدتاً در دسته آنیونی واقع می شوند (بیشتر آنها در بردارنده آنیونهای کربوسیلانتند).

از سوی دیگر، سوپر جاذبها را اغلب براساس منشأ یا ساختار به دو گروه اصلی طبیعی و سنتزی نیز تقسیم می کنند. انواع پایه طبیعی، نیز ممکن است اصلاح شده و نشده باشند. سوپرجاذبها پایه طبیعی را به دو گروه کلی زیر نیز می توان تقسیم کرد [۲۶]:

- سوپرجاذبها براساس پلی ساکاریدها (بیوپلیمرهای کربوهیدراتی)

- سوپرجاذبها براساس پروتئین ها (بیوپلیمرهای پپتیدی)

۱-polyampholytes

۲-polybetaines

از این دو گروه، سوپر جاذبه‌های پلی ساکاریدی بسیار گسترده تر بوده و کارهای به مراتب بیشتری روی آنها انجام شده است. شاید علت اصلی آن، فراوانی، گستردگی، تنوع، ارزانی، و خواص رئولوژیکی بسیار جالب توجه پلی ساکاریدها در محیطهای آبی باشد.

۴-۵ خواص و رفتار تورمی سوپر جاذبهها :

در قسمتهای قبل به مشخصات عمومی یک ماده سوپر جاذب اشاره شد، از جمله اینکه مقادیر بسیار زیاد آب و محلولهای آبی را جذب و حفظ کند؛ هر ذره آن پس از جذب آب، باید قوام مکانیکی داشته باشد و شکل هندسی کلی اولیه خود را از دست ندهد. اما از یک سوپر جاذب خوب، خواص دیگری هم انتظار می رود.

به طور کلی، مهمترین مشخصات یا خواص یک سوپر جاذب خوب را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:

- الف - ظرفیت جذب (تورم تعادلی) آن در محلول نمکی هر چه بیشتر باشد؛
- ب - سرعت جذب و اندازه آن برای کاربرد مورد نظر، مطلوب باشد؛
- ج - تحت فشار، ظرفیت جذب آن هر چه بیشتر باشد (استحکام ژل متورم آن هر چه بیشتر باشد)؛
- د - اجزای انحلال پذیر و مونومر باقیمانده آن، هر چه کمتر (زیر حد مجاز) باشد؛
- ه - ارزان باشد؛
- و - دوام خواص و پایداری آن در مرحله انبارداری و بویژه در شرایط مصرف، هر چه بیشتر باشد؛
- ز - در مقابل عوامل شیمیایی و زیستی به قدر کافی پایدار باشد؛
- ح - زیست تخریب پذیر باشد و پس از تخریب در محیط، اجزای سمی ایجاد نکند؛
- ط - خنثی باشد (بر اثر تورم در مقدار اضافی آب مقطر، pH آب تغییر نکند)
- ی - بی رنگ، بی بو و کاملاً غیر سمی باشد؛
- ک - حتی الامکان در مقابل نفوذ پایدار باشد؛
- ل - بسته به مورد مصرف، محلول جذب کرده را به هیچ وجه پس ندهد (به عنوان مثال در پوشک و نوار بهداشتی)، یا برعکس، محلول جذب کرده خود را به محیط به آرامی پس دهد (به عنوان مثال در کشاورزی) [۲۸]؛

واضح است که در عمل، نمی توان سوپرجاذبی داشت که تمام این مشخصات را همزمان داشته باشد. در واقع ماهیت ساختار، عوامل شیمیایی و همچنین عوامل مؤثر در فرایند سنتز و تولید چنان است که بهبود برخی از خواص، به قیمت افت برخی از خواص دیگر تمام می شود (به عنوان مثال با مجموعه ای از مواد اولیه معین و ثابت، هر ترکیب بندی که باعث افزایش جذب شود، کاهش استحکام ژل متورم را در پی خواهد داشت). بنابراین باید فرمولبندی و شرایط فرایند را چنان طراحی و بهینه سازی کرد که بسته به زمینه کاربرد سوپرجاذب تولید شده، توازن مطلوبی بین خواص محصول مورد نظر به دست آید. به همین علت، بخش عمده تحقیق و توسعه علوم و فناوری هیدورژل‌های سوپرجاذب در دنیا به تهیه سوپرجاذبهایی که بسته به موارد مصرف مورد نظر، مشخصات بهینه و خاص مربوط به آن در بر داشته باشند، اختصاص یافته است.

۵-۵ اثر عوامل محیطی بر خواص سوپرجاذبها :

شکل فیزیکی ذرات سوپرجاذب (از جمله اندازه ذرات و تخلخل آنها) و محیط تورم، عوامل بیرونی و غیر ساختاری اند که بر رفتار ماده سوپرجاذب تأثیر بسزایی دارند. به طور معمول سوپرجاذبهای غیر یونی بسیار کمتر از انواع یونی تحت تأثیر سوء محیط یونی واقع می شوند. انواع کاتیونی نیز نسبت به انواع آنیونی به طور معمول از حساسیت یونی کمتری برخوردارند. برای انواع جفت یونی، ظرفیت جذب در محیط یونی بیش از محیط آب مقطر است.

از آنجا که بیشتر سوپرجاذبهای تجاری، آنیونی اند، اثر عوامل مختلف محیطی بر خواص تورمی سوپرجاذبهای آنیونی بیش از سایر سوپرجاذبها بررسی شده است [۲۸،۲۶]. تأثیر این عوامل در جدول ۵-۱ خلاصه شده است؛ به عنوان مثال طبق ردیف دوم جدول، سختی و شوری آب (وجود کاتیونها بویژه کاتیونهای چند ظرفیتی)، باعث افت ظرفیت و سرعت جذب سوپرجاذبهای آنیونی می شود؛ اما تأثیر آن بر سفتی ژل متورم همیشه یکسان نیست و به عوامل ساختار و محیطی دیگری نیز بستگی دارد.

جدول ۵-۱ تأثیر عوامل اصلی محیطی بر خواص تورمی سوپر جادبه‌های آکریلی متداول (آنیونی)، علامت + نشانه ارتقا؛ علامت - نشانه افت؛ * نشانه بی تأثیر بودن بر هریک از خواص است؛ علامت - + نشانه نامعلوم بودن اثر آن عامل یا وابسته بودن به اثر سایر عوامل است.

میزان خواص				تغییر در
جزء انحلال پذیر	استحکام ژل متورم ج	سرعت جذب	خواص جذب ب	عامل محیطی الف
*	+	-	*	افزایش اندازه ذرات (کاهش سطح تماس با محیط)
*	+ -	-	-	افزایش قدرت یونی یا شوری
*	*	+	*	افزایش دما
*	+	-	-	افزایش فشار
+	-	+	+	تخریب شیمیایی، نوری یا زیستی
*	+ -	+	+	محیط اسیدی ($pH < 5$)
*	+ -	-	-	محیط بازی ($pH > 9$)

الف - تغییر هر عامل ضمن ثابت نگهداشتن سایر عوامل؛ ب- جذب آزاد در آب مقطر؛ ج - مدول کشسانی ژل متورم که با جذب تحت بار، نسبت مستقیم دارد.

۵-۶ فرآیندهای تولید :

روش پلیمرشدن محلولی، رایج ترین روش تولید سوپر جاذبه‌هاست. در روش معمول فرایند پلیمرشدن محلولی، مونومر آکرلیک اسید (به طور معمول تازه تقطیر شده) را با محلول بازی (سود یا پتاس) به طور کامل یا جزئی خنثی می کنند؛ در صورت نیاز، با محلول کومونومر مانند آکرلامید مخلوط می کنند تا کل محلول مونومر به دست آید. شبکه ساز و آغازگر را جداگانه در آب حل می کنند و به محلول مونومر می افزایند. آنگاه محلول همگن و شفاف حاصل را ضمن همزدن تا دمای تجزیه آغازگر (که به عنوان مثال برای پرسولفاتها $70^{\circ}C - 60^{\circ}C$) گرما می دهند. مخلوط به آرامی سفت و ژلی می شود. زمان واکنش، بسته به نوع و غلظت مونومر، آغازگر و شبکه ساز، از چند دقیقه تا چند ساعت متفاوت است.

پس از اتمام واکنش، مخلوط به شکل توده ژلی در می آید. آن را قطعه قطعه و در دمای حدود $^{\circ}C$ ۶۰-۷۰ خشک، آسیاب و در صورت لزوم غربال می کنند. در نهایت پودر شکرمانند حاصل را بسته بندی و در جای خشک، و دور از نور نگهداری می کنند. شکل هندسی ذرات پلیمر حاصل از این روش، به طور کامل اتفاقی و نامشخص است و بیشتر ذرات گوشه های تیز دارند. مزیت این فرایند،

سادگی سامانه واکنش و عدم نیاز آن به حلال آلی است و بجز آب مقطر، مونومر، آغازگر و شبکه ساز به مواد دیگری نیاز نیست [۲۶].

۵-۷ اندازه گیری خواص سوپرجاذبها :

در قسمت ۵-۶ فهرستی از خواص کلی یک ماده سوپرجاذب خوب، ارائه شد. به هر میزان که بتوان شمار بیشتری از این خواص را به طور کمی، با «صحت» و «دقت» کافی اندازه گیری کرد، شناخت بیشتری از نمونه به دست می آید. در این قسمت، رایج ترین روشهای اندازه گیری مهمترین خواص سوپرجاذبها که هم برای ارزیابی و هم برای طراحی کاربرد آنها به کار می آیند، ارائه می شود. روشهای آزمون استاندارد نیز در وبگاه اتحادیه اروپایی مواد یکبار مصرف و منسوجات نبافته، EDANA ارائه شده است [۲۸].

۵-۷-۱ اندازه گیری ظرفیت جذب :

ظرفیت جذب یک سوپرجاذب، به عنوان نخستین ویژگی تورمی آن همیشه در صدر فهرست خواص آن قرار دارد. از آنجا که این کمیت در حالت متورم شدن آزادانه نمونه و تحت فشار نبودن آن (موسوم به جذب آزاد و تورم آزاد^۱) اندازه گیری می شود، فقط کمیتی تقریبی از کیفیت واقعی نمونه است، بویژه اگر جذب آب مقطر اندازه گیری شود. با وجود این در مراجع، جذب آزاد مقطر و همچنین جذب آزاد سالین یا سرم فیزیولوژیک (محلول ۰/۹ درصد سدیم کلرید) را همواره به عنوان اولین ویژگی مواد سوپرجاذب گزارش می کنند.

۵-۷-۱-۱ روش کیسه چای :

روش کیسه چای^۲ ساده ترین و رایج ترین روش اندازه گیری جذب و تورم، بویژه برای وقتی است که با کمبود نمونه روبرویم.

در این روش، مقدار معینی نمونه (W1) را در یک کیسه چای (یا تورمی با بافت بسیار ریز) قرار می دهند و آنرا در مقدار اضافی آب یا محلول مورد نظر می گذارند. به طور معمول زمان نیم ساعت

۱-free-swelling

۲-tea-bag method

برای رسیدن به بیشینه تورم (تورم تعادلی) کافی است؛ سپس کیسه را از مایع بیرون آورده و مایع اضافی را با آویختن کیسه تا زمان ثابت و معینی که دیگر مایعی از آن فرو نچکد، یا با چند لایه دستمال کاغذی، خارج می کنند و کیسه را وزن می کنند (W_2). همچنین مراحل را برای کیسه فاقد نمونه انجام می دهند و آن را وزن می کنند (W_0). ظرفیت جذب یا تورم تعادلی (بر حسب g/g) از رابطه زیر بدست می آید:

$$\text{ظرفیت جذب} = (W_2 - W_0) / W_1 \quad (1-5)$$

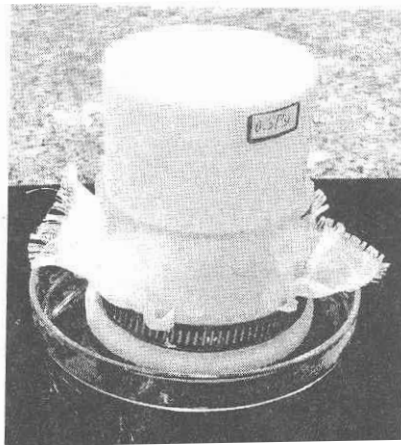
۵-۷-۱-۲ روش الک :

استفاده از روش الک برای وقتی که مقدار نمونه، محدود نیست، بسیار مناسب است. در این روش، مقدار مشخصی نمونه خشک (به عنوان مثال ۱۰۰g) را توزین و در مقدار اضافی آب مقطر یا محلول مورد نظر می ریزند تا در زمان کافی (به عنوان مثال یک شب) به بیشینه تورم خود برسد. آنگاه یک الک آزمایشگاهی ریز (مش ۱۰۰) و خالی را با آب یا همان محلول، با روشی که در ذیل گفته می شود، خیس و وزن می کنند. نمونه متورم را روی الک می ریزند تا از مایع جذب نشده جدا شود. یک تکه ابر یا اسفنج نرم پلی یورتان را از زیر به الک می مالند تا آب اضافی را خارج کنند. آب جذب شده به اسفنج را با فشردن بیرون می ریزند و این کار را آنقدر تکرار می کنند تا وقتی الک، به صورت عمودی قرار می گیرد، ذرات ژل متورم، تقریباً روی یکدیگر لیز نخورند و شُرّه نکنند. این امر نشانه آن است که تقریباً تمام آب جذب نشده واقع در بین ذرات ژل، خارج شده است؛ سپس الک حاوی ژل را دوباره وزن می کنند و با داشتن وزن الک خالی خیس، ظرفیت جذب را بر حسب g/g محاسبه می کنند [۲۸]. خطای این روش ۳-۴ ± درصد است.

۵-۷-۱-۳ اندازه گیری جذب تحت بار

واقعی ترین معیار اندازه گیری یک سوپر جاذب، میزان تورم آب در نمک، در حالت قرار داشتن تحت فشار است. این معیار را به طور معمول با کمیتی موسوم به جذب تحت بار (AUL) در محلول ۰/۹٪ سدیم کلرید اندازه گیری می کنند. فشارهای اعمال شده به طور معمول ۰/۳، ۰/۶، و ۰/۹ psi (به ترتیب معادل ۲/۰۵، ۴/۱۱، و ۶/۱۶ kPa) است. AUL، معیاری از استحکام و مدول ژل متورم نیز

محسوب می شود و با آن نسبت مستقیم دارد. سامانه های مختلفی برای سنجش AUL گزارش شده است که رایج ترین آنها در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵: ابزار متداول برای اندازه گیری جذب تحت بار (AUL) در سوپر جاذبها [۲۸]

صافی شیشه ای (با تخلخل درشت، قطر ۸۰ و ارتفاع ۷ mm) را درون ظرف پتری قرار می دهند؛ سپس یک صافی یا توری پارچه ای را بوسیله بست فلزی به انتهای استوانه شیشه ای (به قطر داخلی ۶۳، قطر خارجی ۶۷ و ارتفاع ۵۰ mm) می بندند، و آنرا روی صافی شیشه ای قرار می دهند؛ آنگاه ۰/۹g نمونه با اندازه ذرات مشخص را به طور یکنواخت درون سیلندر، روی توری پارچه ای (واقع بر روی صافی شیشه ای) توزیع کرده و پیستون تفلونی، به قطر ۶۳ mm را روی ذرات سوپر جاذب قرار می دهند تا فشار ۰/۳ psi اعمال کند (برای تأمین بار اضافی و اعمال فشارهای ۰/۶ psi و ۰/۹ psi وزنه های سربی با وزن مناسب را بر روی پیستون تفلونی قرار می دهند). در انتها، محلول NaCl ۰/۹٪ را داخل ظرف پتری می ریزند به طوری که صافی شیشه ای، فقط تا سطح تماس با صافی پارچه ای در محلول غوطه ور شود. برای جلوگیری از تبخیر سطحی محلول نمکی و تغییر غلظت آن، کل دستگاه را در محفظه دربسته ای قرار می دهند. پس از رسیدن به تورم تعادلی (که بسته به اندازه ذرات، متفاوت است، به عنوان مثال برای ذرات با مش ۶۰، یک ساعت کافی است)، نمونه متورم شده تحت فشار را وزن می کنند، و مقدار عددی AUL را از معادله زیر بدست می آورند:

$$AUL(g/g) = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \quad (۲-۵)$$

W1 و W2 بترتیب وزن نمونه پس از تورم تحت بار (g)، و پیش از آن (وزن خشک اولیه، g ۰/۹)

است. برای هر نمونه، آزمون سه بار تکرار و میانگین آنها ثبت می شود.

در سامانه دیگر، از یک بورت به طور درجا برای سنجش جذب آب استفاده می شود. مؤسسه استاندارد ایران نیز همین روش را در حالی که وزنه ای بر روی نمونه قرار داده می شود، برای سنجش AUL پیشنهاد کرده است. مقادیر AUL برای هر نمونه، همواره از مقادیر جذب آن هنگامیکه تحت بار نباشد (جذب آب)، کمتر است.

۵-۷-۲ اندازه گیری سرعت جذب و روش گرداب:

سرعت جذب، با اندازه ذرات سوپرجاذب نسبت عکس دارد، و با دمای محیط تورم نسبت مستقیم دارد. واحد این کمیت قاعدتا باید $g \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$ باشد اما در بعضی گزارشها، s^{-1} و در بعضی دیگر (مانند روش زمان گرداب)، آن را برحسب ثانیه گزارش می کنند [۲۶].

روش زمان گرداب، ساده ترین و سریع ترین روش سنجش سرعت جذب است که بیشتر در آزمایشگاههای صنعتی استفاده می شود. این روش به مقدار کافی نمونه نیاز دارد. در یک بشر ۱۰۰ ml ، ۵۰ ml محلول NaCl ۰/۹٪ ریخته و دمای آنرا روی $30^{\circ}C$ تنظیم می کنند؛ سپس آنرا به وسیله یک همزن مغناطیسی (میله آهنربا به طول ۴۰ mm) با سرعت ۶۰۰ rpm به هم می زنند تا گرداب ایجاد شود. ۲/۰ g نمونه سوپرجاذب با اندازه ذرات مورد نظر (به طور معمول مش ۶۰-۵۰) بسرعت، درست روی گرداب به محلول اضافه و همزمان، زمان سنج روشن می شود. به این ترتیب زمان از بین رفتن گرداب را برحسب ثانیه، به عنوان معیار سرعت جذب (t_v) ثبت می کنند. می توان سرعت جذب را برحسب واحد واقعی آن ($g \cdot g^{-1} \cdot s^{-1}$) از t_v به دست آورد:

$$\text{سرعت جذب} = (50/2) / t_v \quad (4-4)$$

۵-۸ زمینه های مصرف سوپرجاذبها:

از آنجا که پلیمرهای سوپرجاذب، زیر گروه خانواده هیدروژلها، فرآوردهای حاوی این مواد، بسیار متنوع اند. اما بیشترین حجم مصرف این پلیمرها به مصارف بهداشتی (پوشک بچه و نوار بهداشتی) و کشاورزی اختصاص دارد. همانطور که در قسمت ۵-۲ اشاره شد، اکنون تولید سالیانه سوپرجاذبها در دنیا بیش از یک میلیون تن در سال است.

به طور کلی، بسته به زمینیه کاربرد سوپرجاذبها، وظایف و خواص مورد انتظار و ساختار آنها متفاوت خواهد بود؛ به عنوان مثال سوپرجاذب بهداشتی باید علاوه بر ظرفیت جذب بالا، سرعت جذب زیاد داشته باشد. اما سوپر جاذب پایه کشاورزی، سرعت جذب چندان مهم نیست، در عوض باید حساسیت یونی آن کمتر، و استحکام ژل آن بیشتر باشد و بتواند چندین سال در خاک دوام آورد و عمل جذب و حفظ آب و واگذاری آن به ریشه را تکرار کند.

سوپرجاذبها، فراورده های بهداشتی را که نقش اصلی آن جذب و نگهداری آب، ادرار و سیالات فیزیولوژیک است، متحول کرده اند. پیش از آن، فلاف^۱ (گُرک) پنبه با قدرت جذب بسیار پایین، نقش اصلی جذب این سیالات را در فراورده هایی مانند پوشک و نوار بهداشتی ایفا می کرد. اکنون، با افزودن پودر سوپرجاذب پایه بهداشتی به این فراورده ها (به صورت مستقیم و یا به صورت نوارها یا صفحات نازک کاغذی الیاف نفاخته حاوی سوپرجاذب^۲)، هم سرعت جذب و هم ظرفیت جذب و نگهداری سیال به مراتب افزایش یافته است.

بسیاری از بزرگسالان، بویژه در کهنسالی، دچار خود ادراری غیر ارادی می شوند. پوشکهای طراحی شده حاوی سوپرجاذب، موجبات حل مشکل این گروه از مردم را نیز فراهم آورده است. سوپرجاذبهای پایه بهداشتی، یک بار مصرف و غیرقابل بازیابی اند و نمی توان از آنها دوباره استفاده کرد. قیمت جهانی آنها حدود یک چهارم قیمت انواع پایه کشاورزی است و ساختار شیمیایی آنها به طور عمده شبکه پلی آکرلیک اسیدی است که حدود ۸۰٪ آن با سدیم هیدروکسید خنثی شده است [۲۸].

سوپر جاذبهای پایه کشاورزی، با آنکه به علت ساختار و فناوری، از همتهای پایه بهداشتی خود گرانتر هستند، اما به علت امکان صرفه جوییهای عمده، در سطح کلان و ارتقای عملکرد گیاهان، مورد استقبال واقع شده اند. ترکیب سوپرجاذب پایه کشاورزی و فناوری تولید آن، متفاوت از انواع بهداشتی است. یعنی به گونه ای است که بتواند در شرایط یونی، فشار و میکروآرگانیسمهای خاک، چندین سال مانند یک آب انبار مینیاتوری، آب و مواد محلول را جذب، نگهداری و بر حسب تقاضای ریشه (بر اثر

۱-fluff

۲-air laid

اختلاف فشار اسمزی) تخلیه کند. برخی از مزایای کلی استفاده از سوپرجاذبها در زمینه کشاورزی را می توان به صورت زیر خلاصه کرد [۲۸].

الف - استفاده بهینه از آب (صرفه جویی عمده در مصرف آب و کاهش هدرروی آن از طریق نفوذ به عمق؛ تبخیر سطحی و...)

ب - استفاده بهینه از کودهای شیمیایی و سموم کشاورزی در خاک حاوی سوپرجاذب، سموم و کودهای محلول در آب که گاه بی رویه استفاده می شوند، حفظ می شوند و به اعماق نفوذ نمی کنند. در نتیجه، ضمن کاهش قابل توجه مصرف کودهای شیمیایی، عملکرد گیاه نیز بهبود می یابد؛ و در ضمن از آلودگی محیط زیست و آبهای زیرزمینی از این طریق نیز پیشگیری می شود؛

ج - جلوگیری از تنشهای ناشی از نوسانات رطوبتی (از طریق افزایش ظرفیت نگهداری آب و رطوبت در خاک)؛

د - با استفاده از سوپرجاذبها می توان از طریق جذب سریع آب ناشی از بارندگی های پراکنده، و کاهش فرار آب بویژه از طریق تبخیر سطحی امکان کشت در مناطق بیابانی را فراهم ساخت؛

ه - امکان کشت و حفظ پوشش گیاهی در سطوح شیبدار؛

و - کاهش شدید تلفات در پرورش انتقال قلمه و نهال؛

ز - کشت بدون خاک (مانند کشت قارچ) و هیدوپورنیک؛

ح - افزایش تولید محصول؛

ط - افزایش سطح زیر کشت زمین های کشاورزی و جلوگیری از هدرروی آب آبیاری؛

ی - ایجاد خلل و فرج در خاک به دلیل عمل تناوبی جذب و دفع که به بهبود تهویه خاک می انجامد؛

ک - تکرار عمل جذب و دفع آب به مدت حدود ۵ سال؛

ل - عدم ایجاد آلودگی های زیست محیطی؛

برای کشاورزی و باغبانی علمی، بهتر است که ذرات بزرگتر از ۱-۳ میلی متر و استحکام بالاتری داشته باشند. علت این است که ذرات کوچک یا ژل های نرم فضاهای خالی در خاک را پر می کنند و از تنفس و جذب آب ریشه جلوگیری می نمایند.

سوپرجاذبها به جزء مصارف کشاورزی و بهداشتی، در حجم بسیار کمتر در، کاربردهای متنوعی

مصرف می شوند که برخی از آنها هنوز در مرحله پژوهشی اند. این کاربردها عبارتند از [۲۸، ۲۶]:

برف مصنوعی، کیسه های جاذب آب برای جداسازی آب از سوخته های هیدروکربنی، افزودنی سیالات حفاری چاه های نفت، کاهش انقباض و افزایش استحکام بتن، لاستیکها و درزگیرهای منبسط شوند در آب، استفاده در برخی از کابل های مخابراتی و برق برای جلوگیری از نفوذ آب، جامدسازی فاضلابها و پساب های صنعتی و شهری، جامدسازی ادرار دام و استفاده بهتر به عنوان کود، حفظ تازگی و نگهداری سبزی و میوه، جذب خونابه در بسته بندی گوشت، حوله ها و لایه های جاذب آب، خوشبوکننده های هوا (بوگیرها)، تخریب آرام سنگ معدن، خشکاننده در سامانه های سرمایشی، ژل های آتش نشانی، الیاف و پارچه های جاذب آب، افزایش جذب آب اسفنج های پلی یورتان، ژل های هوشمند دارای قابلیت پاسخدهی به محرک های محیطی (مانند تغییرات دما، pH، میدان الکتریکی، ترکیب حلالی و...)، زیست حسگرهای تعیین آنالیت های زیست شیمیایی، سامانه های داروسازی کنترل شده و

فصل ششم

تشریح برنامه آزمایشگاهی

۶-۱- مقدمه :

در فصلهای گذشته در مورد تئوری عمل آوری داخلی و روشهای موجود و همچنین نتایج و مشاهدات آزمایشگاهی مربوط به آن بحث شد. میزان آب مصرفی مورد نیاز داخلی برای رسیدن به ماکزیمم درجه هیدراسیون با توجه به مدل پاورز محاسبه شد. این مقدار آب شاید با توجه به تئوریهای ارائه شده مقدار مناسبی باشد، ولی برای کارهای اجرایی و بتن های ساخته شده در کارگاه باید تستهایی صورت گیرد تا بتوان اثرات آنها را بررسی کرد. لذا در کارهای آزمایشگاهی ابتدا این تئوری ارائه شد و مقدار آب مصرفی داخلی برای نسبت های پایین آب به سیمان با توجه به این مدل محاسبه شد که نتایج آن ارائه خواهد شد. در ادامه کار آزمایشگاهی با توجه به محدودیتهای بوجود آمده در کارگاه برای نسبت آب به سیمان پایین، اثر عمل آوری داخلی بر روی بتن ها با نسبت آب به سیمان بالا بررسی شد. لذا در این حالت استفاده از تئوری پاورز کار بهبود یافته بود. بنابراین، با توجه به نتایجی که بدست آمد طرح اختلاطهایی در این زمینه ارائه شد. و روند کار آزمایشگاهی به گونه ای طرح ریزی شد تا بتوان از حداقل آزمایشات، بیشترین نتیجه را در این زمینه گرفت. در کلیه فعالیتها صورت گرفته تمام نمونه های ساخته شده با SAP با یک نمونه مرجع کنترل شده است (مقاومت و کارایی). شرایط عمل آوری اتخاذ شده هم به صورت خشک هم به صورت عمل آوری در آب (تناوبی - دائم) می باشد.

به طور کلی مراحل فعالیت آزمایشگاهی را می توان به صورت زیر خلاصه کرد :

- ۱- محاسبه طرح اختلاط به گونه ای که کارایی مورد نظر را برآورده سازند. برای طرح اختلاطها ابتدا با توجه به مدل پاورز طرح اختلاطهایی با نسبت آب به سیمان کم ساخته شد. سپس طرح اختلاطهایی که دارای نسبت آب به سیمان بالا می باشند مورد آزمایش قرار گرفت.
- ۲- برآورد میزان SAP مؤثر برای نمونه ها با ساخت نمونه هایی با درصدهای مختلف از SAP
- ۳- بررسی میزان جذب و سرعت جذب سوپر جاذبها.
- ۴- برآورد میزان جذب و سرعت جذب سوپر جاذبها در داخل مخلوطهای بتنی.
- ۵- انجام تستهای مقاومت و اسلامپ برای کلیه نمونه های ساخته شده.

۶-۲ مصالح مصرفی :

۶-۲-۱ سوپر جاذبها :

در فصل ۵ مطالب جامع و کاملی در مورد این ماده و خواص مصرفی آنها ارائه شده است. هیچ روشی برای تخمین میزان مصرف این مواد در بتن وجود ندارد، بنابراین با استفاده از روش سعی و خطا مقادیر مختلفی از آن مورد استفاده قرار گرفت. تا بتوان مقدار بهینه و مناسب برای استفاده در بتن رسید. لذا آزمایشاتی در مورد مقادیر مختلف این ماده و اثر آن بر روی مقاومت و کارایی انجام شد تا اینکه به مقادیر کمتر از ۰/۰۵ درصد وزن سیمان رسیدیم. در مصرف زیاد این ماده در بتن کلیه خصوصیات بتن تازه اعم از روانی، کارایی، چسبندگی و عدم جداسازی و را برهم می زند. همانطور که اشاره شد در این تحقیق از سوپر جاذب A۲۰۰ که محصول شرکت پلیمر ایران می باشد استفاده شده است نحوه اضافه کردن این مواد نیز در دو حالت خشک و اشباع انجام شد. در حالت خشک سوپر جاذبها قبل از اضافه کردن آب به مخلوط اضافه می شدند. در طرح اختلاطهایی که SAP به صورت خشک اضافه می شد در بعضی از آنها مقداری آب اضافی به مخلوط اضافه شده است این مقدار آب با این فرض به مخلوط افزوده شد که متوسط جذب آب این مواد در مخلوطهای بتنی برای سوپر جاذبها با متوسط ذرات $125\mu\text{m}$ ، ۶۵ و برای سوپر جاذبها با متوسط $53,450\mu\text{m}$ برابر وزنشان در نظر گرفته شده است. در حالت اشباع نیز طرح اختلاطهایی ساخته شد که در تمامی آنها میزان آب لازم برای اشباع SAPها ۱۹۰ برابر وزن آن برآورد شده است.

۶-۲-۱-۱ دانه بندی مورد استفاده در سوپر جاذبها :

برای رسیدن به یک دانه بندی بهینه بطوریکه بر تمام خواص بتن تازه و بتن سخت شده کمترین اثر منفی را بگذارد نیاز به آزمایشاتی است که به بررسی این اثرات پرداخته شود. لذا بدلیل عدم دستیابی به این آزمایشات تنها از دونوع دانه بندی برای آزمایشات استفاده شد.

۱- سوپر جاذبها مانده بر روی الک ۱۰۰ و ۱۴۰ با این فرض که میانگین اندازه ذرات $125\mu\text{m}$ باشد.

۲- سوپر جاذبها مانده روی الک ۳۰ و ۵۰ با متوسط اندازه ذرات $450\mu\text{m}$

در کلیه آزمایشات انجام گرفته از دانه بندی سوپر جاذبها با میانگین ذرات $125\mu\text{m}$ استفاده شده است. تنها در بخش ۶-۵-۵ به منظور بررسی اثر دانه های درشت بر روی مقاومت و اسلامپ از دانه بندی

درشت‌تر با میانگین ذرات $450\ \mu\text{m}$ استفاده شده است. در مجموع اندازه ذرات در بتن باید به گونه ای باشد که بر روی عملکرد آنها در داخل بتن اثر بگذارد این عملکرد می‌تواند شامل پایداری آنها در طول مخلوط کردن و اثرشان بر روی رهلوژی^۱ بتن تازه شود. در رابطه با اثر این مواد بر روی مقاومت و انقباض، اندازه ذرات آنها از اهمیت ویژه ای برخوردار می‌باشد. یکسری از آزمایشات که بر روی تغییر شکل ناشی از انقباض صورت گرفته حاکی از وجود یک مقدار بهینه برای ذرات سوپرجاذب می‌باشد؛ ذراتی که از این مقدار کوچکتر یا بزرگتر می‌باشند، اثر بسیار ناچیزی بر روی کاهش انقباض خواهند گذاشت. البته اثر اندازه آنها بر روی مقاومت نیز از چند دیدگاه قابل بررسی است.

اگر حجمهای تولید شده از سوپرجاذبها به اندازه ای درشت باشند که امکان پخش یکنواخت و کامل آنها در سرتاسر حجم خمیر سیمان وجود نداشته باشد، فرایند هیدراسیون به طور قطع دچار مشکل خواهد شد. شبیه سازیهای کامپیوتری نشان می‌دهد که انتشار آب در یک خمیر سیمان به طور مؤثر به فواصل $100-200\ \mu\text{m}$ محدود می‌شود و این زمانی است که حفرات مویینه حالت عدم تراش^۲ به خود می‌گیرند [۳۶]. اگر حجمهای تولید شده کوچک باشد، اثر کاهش انقباض و مقاومت ممکن است به صورت جزئی بوسیله پرکردن محصولات هیدراسیون و یا کاهش منطقه سطح فعال ذرات SAP در مقایسه با حجمشان، جبران شود. بنابراین، با بررسی هر کدام از اثرات مقدار بهینه ای را برای عمل آوری می‌توان انتخاب کرد.

۶-۲-۱-۲ میزان جذب سوپرجاذبها و نتایج آن :

برای تعیین میزان جذب آب سوپرجاذبها از دو آزمون روش کیسه چای (بخش ۵-۷-۱-۱) و روش الک (بخش ۵-۷-۱-۲) استفاده شد. مشکل بوجود آمده در این حالت اختلاف نتایج بدست آمده از دو روش می‌باشد. با توجه به اینکه روش الک درصد خطای کمتری نسبت به روش کیسه چای دارد لذا تصمیم گرفته شد که از نتایج این روش استفاده شود. برای اطمینان حاصل کردن از این نتایج با مشورت آقای کوروش کبیریان که یکی از طراحان این سوپرجاذبها می‌باشد میزان جذب نهایی به 190 برابر وزن سوپرجاذبها تخمین زده شد. همانطور که اشاره شد دانه بندی سوپرجاذبها بر روی سرعت جذب اثر می‌گذارد ولی میزان جذب آنها تقریباً یکسان می‌باشد هرچند که به نظر می‌رسد

۱-rheology

۲-depercolated

میزان جذب دانه ها درشت بیشتر خواهد. میزان جذب سوپرجاذبها وابسته به نوع آب موجود در منطقه و دمای آن می باشد. در هر دو روش دمای آب 23°C اندازه گیری شده است. روشهای بکاربرده شده، همان است که در بخش ۵-۷-۱-۱ و ۵-۷-۱-۲ توضیح داده شده است. نتایج بدست آمده از این روشهای در جدول زیر ارائه شده است.

نتایج آزمایش روش کیسه چای و روش الک :

جدول ۶-۱ : نتایج مربوط به روش کیسه چای

دانه بندی	وزن نمونه اولیه (W_1)	وزن کیسه مرطوب بدون نمونه (W_0)	وزن نمونه با آب جذب شده (W_2)	ظرفیت جذب ($\frac{W_2 - W_0}{W_1}$)
میانگین ذرات $125\mu\text{m}$	0.15	1.21	27.5	175.26
میانگین ذرات $125\mu\text{m}$	0.2	1.21	37.06	179.26
میانگین ذرات $450\mu\text{m}$	0.15	1.21	28.43	181.46
میانگین ذرات $450\mu\text{m}$	0.2	1.21	37.71	182.5
			میانگین ظرفیت جذب	179.62

جدول ۶-۲ : نتایج مربوط به روش الک

دانه بندی	وزن سوپر جاذب خشک	وزن الک مرطوب	وزن الک با نمونه اشباع شده	ظرفیت جذب
میانگین ذرات $125\mu\text{m}$	۱gr	41.03	603.94	193.64
میانگین ذرات $450\mu\text{m}$	۱gr	41.03	604.55	194.25
			میانگین ظرفیت جذب	193.94

۶-۲-۱-۳ اثر سوپر جاذبها بر بتن تازه :

اثر پلیمرها بر روی بتن را می توان از دو جنبه مختلف مورد بررسی قرار داد، که هر یک از آنها مربوط به نحوه اضافه کردن و پس دهی آب پلیمرها به مخلوط می باشد. اولاً، هنگامیکه این مواد به صورت خشک وارد می شوند، آب اضافی مخلوط تازه را جذب می کنند و با این کار باعث افزایش چگالی ماتریس می شود. باوجود این، این مواد می توانند در زمان مخلوط کردن بتن مقادیر بسیار زیادی آب

را جذب کرده و قطر آنها افزایش یابد. ثانیاً آب جذب شده را تحت شرایط مختلف برای فرایند هیدراسیون در اختیار بتن قرار می دهند.

یکی از مهمترین اثراتی که SAPها بر روی بتن تازه دارد، تغییر زمان گیرش و پیشرفت هیدراسیون سیمان می باشد. شاید بتوان با کنترل دمای بتن در این حالت بر روی نمونه هایی از خمیر سیمان این اثرات را کنترل نمود. با اندازه گیری مقادیر احتمال اینکه سوپرجاذبها هر دو اثر یعنی افزایش و کاهش زمان گیرش را به همراه داشته باشد، وجود دارد. اما آنچه که مشخص است نوع و مقدار SAP استفاده شده برای مطالعه و شناخت آن بسیار مؤثر خواهد بود. به نظر می رسد با توجه به آزمایشات انجام گرفته در این زمینه شاهد تغییرات زمان گیرش در مخلوطهای مختلف خواهیم بود. در آزمایشات صورت گرفته در آزمایشگاه به نظر می رسد که زمان گیرش در این حالت افزایش پیدا می کند. البته این زمان نیز بسته به مقدار و اندازه دانه ها متفاوت خواهد بود. از مشاهدات می توان به این نتیجه رسید که دانه های درشت تر زمان گیرش را کمتر افزایش می دهند. شاید یک دلیل این امر کاهش سرعت جذب آب در آنها، و ادامه یافتن فرایند هیدراسیون سیمان با آب باقیمانده در بتن باشد.

۶-۲-۱-۴ میزان جذب سوپرجاذبها در بتن و نتایج آن :

همانطور که اشاره شد برای بررسی میزان جذب و یا به عبارتی ظرفیت جذب واقعی این مواد روشهایی مختلفی وجود دارد. اما تحقیقات گسترده و جامعی در مورد میزان ظرفیت جذب این مواد در مخلوطهای بتنی هنوز صورت نگرفته است، با این وجود نمی توان یک مقدار دقیقی از میزان جذب آب پلیمرها در مخلوط تخمین زد. از طرفی محققین مختلف نیز که از این مواد درملات استفاده کرده اند، اطلاعات دقیق و کافی از میزان جذب دقیق آنها ندارند. با این حال با توجه تست اسلامپ، از مقایسه اسلامپها برای تعیین میزان جذب استفاده شد. به طور قطع این روش بکار برده شده تست استاندارد نبوده و دارای خطا می باشد، اما بدلیل محدودیت وسایل آزمایشگاهی از این ایده استفاده شد.

روش آزمایش به این صورت است که : در ابتدا مخلوطی با نسبتهای مشخص (آب و سیمان) ساخته شد تا اسلامپ مورد نظر را ایجاد کند. برای این کار با توجه به اینکه درصد جذب تحت تأثیر عوامل دیگری (سیمان، آب مصرفی، حالت سنگدانه ها...) می باشد از ۳ مخلوط با مقدار سیمان و

نسبت آب به سیمان متفاوت استفاده شد. سپس مخلوطهایی با همان خصوصیات اما با مقدار آب مختلف و همراه با سوپرچاذب ساخته شد، تا اسلامپی شبیه به اسلامپ نمونه مرجع را ایجاد نماید. تمامی اسلامپها بعد از ۵ دقیقه مخلوط شدن گرفته شده است تا زمان کافی برای جذب سوپرچاذبها وجود داشته باشد. مطمئناً دانه بندی های مختلف، میزان جذب متفاوت دارد لذا برای این کار از دونوع دانه بندی استفاده شده است. در نهایت از رابطه زیر میزان جذب برآورد شد:

$$\chi = \frac{w_2 - w_1}{w_0} \quad (1-6)$$

w_1 : آب اضافه شده به مخلوط بدون سوپرچاذب ، w_2 : آب اضافه شده به مخلوط سوپرچاذبدار
 w_0 : وزن پلیمر اضافه شده

جداول زیر مقادیر اسلامپ گرفته شده را بعد از ۵ دقیقه مخلوط کردن نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود اسلامپهای یکسان مخلوطهای ساخته شده با دانه بندی ریز با مقدار آب بیشتری نسبت به دانه بندی درشت بدست آمده است. بنابراین، میانگین میزان جذب با دانه بندی ریز برابر با ۶۵ برآورد می شود. در مورد سوپرچاذبها با دانه بندی درشت این مقدار به ۵۳ برابر وزن آن کاهش پیدا می کند.

نتایج آزمایش میزان جذب سوپر جاذبها در بتن:

جدول ۳-۶: مقادیر اسلامپ مخلوطهای مختلف برای اندازه گیری میزان جذب SAP با میانگین دانه های ۱۲۵ μm

شماره تست	نوع	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	W/C	SAP (kg/m ³)	Slump (cm)	$X = \frac{W_1 - W_2}{W_0}$
							میزان جذب
1	SAP بدون	420	239.4	0.57	-	4	$\frac{267 - 207}{0.133} = 60.15$
	SAP خشک	420	247.4	0.589	0.133	4	
2	SAP بدون	384	238.1	0.62	-	4	$\frac{249.8 - 218.1}{0.133} = 60.15$
	SAP خشک	384	246.9	0.643	0.133	4	
3	SAP بدون	344	230.5	0.67	-	3	$\frac{237.8 - 230.5}{0.133} = 69.73$
	SAP خشک	344	239.8	0.697	0.133	3	
میانگین جذب							65.41

جدول ۴-۶: مقادیر اسلامپ مخلوطهای مختلف برای اندازه گیری میزان جذب SAP با میانگین دانه های ۴۵۰ μm

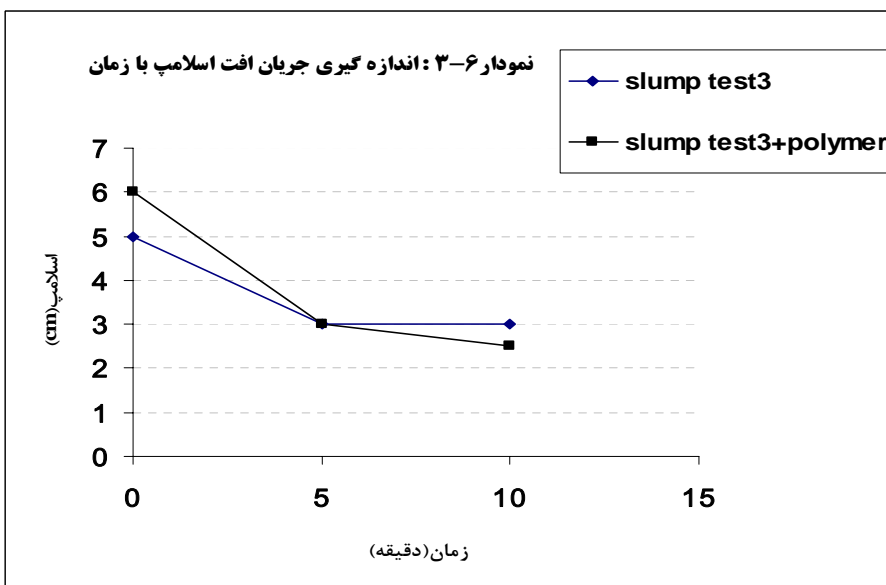
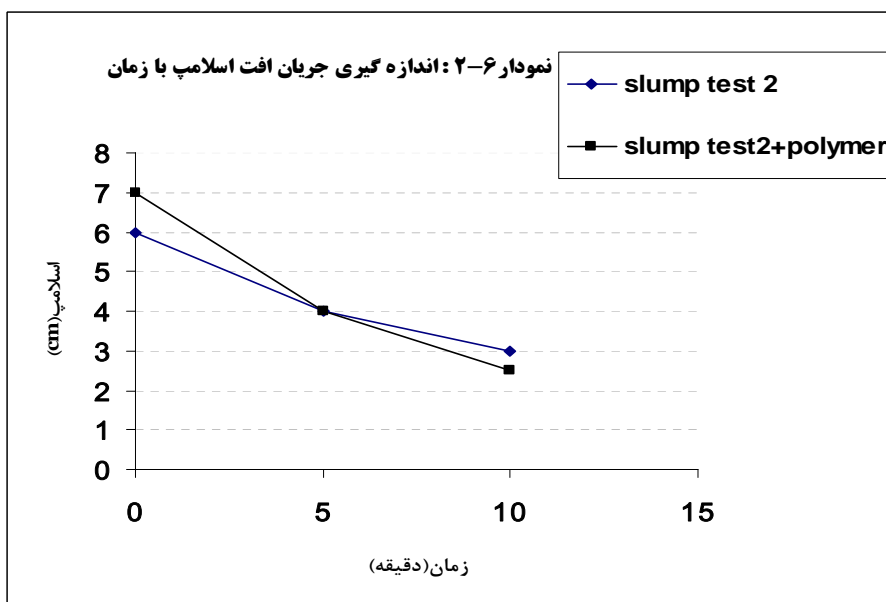
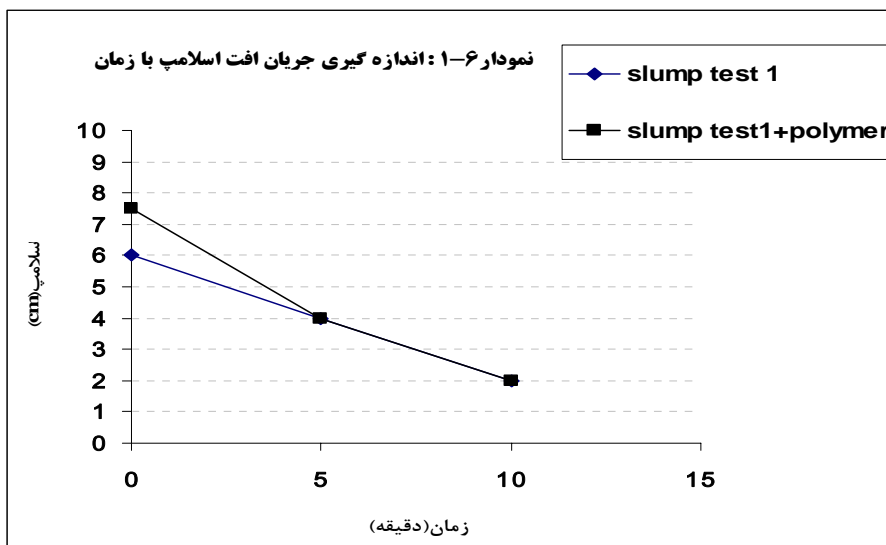
شماره تست	نوع	سیمان (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	W/C	SAP (kg/m ³)	Slump (cm)	$X = \frac{W_1 - W_2}{W_0}$
							میزان جذب
1	SAP بدون	420	239.4	0.57	-	4	$\frac{246.1 - 239.4}{0.133} = 60.4$
	SAP خشک	420	246.1	0.586	0.133	4	
2	SAP بدون	384	238.1	0.62	-	4	$\frac{245 - 238.1}{0.133} = 62.6$
	SAP خشک	384	245	0.638	0.133	4	
3	SAP بدون	344	230.5	0.67	-	3	$\frac{237.8 - 230.5}{0.133} = 66.4$
	SAP خشک	344	237.5	0.69	0.133	3	
میانگین جذب							53.1

در اینجا باید اشاره کرد عوامل بسیار زیادی از قبیل سیمان مصرفی، آب، سوپرجاذب، زمان مخلوط کردن، دمای هوا و... بر روی میزان جذب و تست اسلامپ اثر می گذارد. لذا با توجه به زمان بر بودن این آزمایش تنها نتایج برای یک مقدار سوپرجاذب انجام شد.

۶-۲-۱-۵ سرعت جذب سوپرجاذبها در بتن و نتایج آن:

برای تعیین سرعت جذب سوپر جاذبها در بتن عاملی که بیشترین تأثیر را دارد اندازه ذرات سوپرجاذب می باشد. البته میزان آب و سیمان مصرفی -همانطور که در قسمت قبل اشاره شد- در بتن نیز، بر روی سرعت جذب اثر خواهد گذاشت. میزان افت اسلامپ نیز در طول زمان تحت تأثیر دو عامل یعنی میزان آب و سیمان مصرف شده قرار دارد، لذا برای انجام آزمایش، اسلامپ مخلوطهای ساخته شده در قسمت قبل را در زمانهای ۵ و ۱۰ دقیقه محاسبه شد. همانطور که از نتایج پیداست بیشترین افت اسلامپ در نمونه های ساخته شده با SAP در ۵ دقیقه نخست اتفاق خواهد افتاد. زمان صفر زمانی بود که بلافاصله بعد از اتمام فرایند اضافه کردن آب به مخلوط، آزمایش اسلامپ انجام می شد. این آزمایش تنها برای سوپرجاذبها با متوسط ذرات $125\mu m$ اندازه گیری شد.

همانطور که در نمودارهای ۶-۱ و ۶-۲ و ۶-۳ دیده می شود با افزایش زمان اختلاط در بتن شاهد کاهش اسلامپ خواهیم بود. که می تواند به دلیل تبخیر آب و گیرش بتن باشد. اختلاف اسلامپ با افزایش زمان اختلاط کمتر می شود بطوریکه می توان گفت در ۵ دقیقه نخست سوپرجاذبها بیش از ۹۵٪ آب مورد نیاز خود را جذب کرده اند.



۶-۲-۱-۶ اثر میزان مصرف سوپرجاذبها بر بتن :

هنوز قاعده کلی که بتوان از آن استفاده نموده و یک مقدار بهینه ای برای مصرف سوپرجاذبها در بتن تعیین کرد، وجود ندارد. لذا طراح باید با توجه به نوع آن و شرایط مختلف مصالح مصرفی در بتن مقداری را به صورت سعی و خطا مشخص نماید. از آزمایشات می توان نتیجه گرفت که با افزایش مصرف سوپرجاذب A200 در بتن این مواد به شدت بر روی مقاومت و کارایی اثر می گذارند و موجب کاهش مقاومت و کارایی خواهند شد. لذا نتایج مربوط به میزان مصرف این مواد در جدول ۶-۱۶ ارائه شده است. برای بررسی این اثر نتایج مربوط به طرح اختلاط MIX-7 آورده شده است. مطمئناً مخلوطهای دیگر نیز اثر مشابه ای از خود نشان می دهند.

۶-۲-۱-۷ پس دهی آب سوپرجاذبها در بتن :

پدیده پس دهی آب توسط سوپرجاذبها امری بسیار پیچیده می باشد، که جهت اندازه گیری نیاز به تجهیزات بسیار پیشرفته می باشد. رفتار پس دهی پلیمرها اساساً بوسیله انتشار قابل توجیه می باشد. انتظار می رود زمانی که بتن کاملاً خشک است سرعت تحویل آب ثبات باشد و که این مقدار نیز به رطوبت نسبی و دما وابسته خواهد بود، به طور مثال در یک رطوبت نسبی ۴۰٪ سرعت اندازه گیری شده $\frac{ml}{min}$ ۰/۱ و برای رطوبت نسبی ۸۰٪ این میزان به $\frac{ml}{min}$ ۰/۳۲ افت پیدا خواهد کرد.

۶-۲-۱-۸ تهیه سوپرجاذبها :

تکنولوژی تولید سوپرجاذبها بسیار پیشرفته بوده که در بسیاری از کشورهای دنیا در حال رشد و پیشرفت می باشد. همانطور که قبلاً اشاره شد در کشور نیز با ورود اولین سوپرجاذب تحقیقات آزمایشگاهی گسترده ای بر روی آنها انجام شد، این تحقیقات به صورت صنعتی و برنامه ریزی شده توسط پژوهشگاه پلیمر ایران ادامه یافت تا اینکه در حال حاضر تنها شرکت تولیدکننده سوپرجاذب در داخل کشور می باشد. در واقع این شرکت اولین تولیدکننده سوپرجاذب پایه کشاورزی در خاور میانه است. سوپرجاذبهای تولید شده در این شرکت شامل A200، A300، A500 می باشد. به دلیل استقبال بسیار گسترده استفاده کنندگان این سوپرجاذبها از نوع A200 هم اکنون تنها سوپرجاذبی که توسط این شرکت به بازار عرضه می شود و برای مصارف کشاورزی مورد استفاده قرار می گیرد،

سوپرجاذب A_{200} می باشد. این سوپرجاذب نسبت به پلیمرهای مشابه خارجی خود از خواص تورمی و استحکام جالب توجهی برخوردار بوده، بطوریکه کیفیت بسیار بالای این سوپرجاذب، آنرا همدریف با پلیمرهای هم نوع خارجی خود قرار داده است. بسیاری از شرکتهای تولید محصولات کشاورزی به دلیل در دسترس و همچنین ارزان بودن آن نسبت به پلیمرهای سوپرجاذب خارجی ترجیح می دهند که از آن برای مصارف کشاورزی خود استفاده کنند. قیمت هر کیلوگرم این سوپرجاذب ۶۰۰۰ تومان می باشد، که شرکتهای زیادی، متصدی فروش محصولات پژوهشگاه پلیمر ایران می باشند. پلیمرهای سوپرجاذب A_{200} که در این تحقیق از آنها استفاده شده است از شرکت رهاب رزین خریداری شده است. پلیمرهای خارجی دیگری نیز در حال حاضر در کشور وجود دارد که به دلیل در دسترس بودن پلیمر A_{200} و همچنین راحتی کسب اطلاعات در مورد خواص آنها توسط مشاورین محترم، ترجیح داده شد که در این تحقیق تنها از این نوع سوپرجاذب استفاده شود.

۶-۲-۲ سیمان :

سیمان پرتلند نوعی سیمان هیدرولیکی است که با آب واکنش می دهد و بعد از مدتی به حالت پایدار رسیده و در مقابل آب مقاوم می شود. وزن مخصوص سیمان پرتلند بین $3/16-3/12$ و ابعاد ذرات آن بین $15-10\mu m$ می باشد. هر سیمان باید ویژگیهای زیر را دارا باشد :

۱- مقاومت لازم را ایجا نماید.

۲- از نظر روانی رفتار مناسبی از خود نشان دهد.

مواد اولیه سیمان عمدتاً از خاک رس و آهک تشکیل شده اند. در این میان آهک (CaO) حدود ۶۳ درصد، سیلیس (SiO_2) حدود ۲۰ درصد، آلومین (Al_2O_3) حدود ۶ درصد، اکسید آهن (Fe_2O_3) حدود ۳ درصد و اکسید منیزیم (MgO) حدود $1/5$ درصد از مواد اولیه سیمان را تولید می کنند. چهار جزء اصلی سیمان عبارتند از : تری کلسیم سیلیکات (C_3S)، دی کلسیم سیلیکات (C_2S) تری کلسیم آلومینات (C_3A) و تترا کلسیم آلومینوفریت (C_4AF). پر مصرف ترین نوع سیمان در حال حاضر سیمانهای تیپ ۱ و ۲ هستند که سیمانهای معمولی با خصوصیات متوسط می باشند. این سیمانها معمولاً برای مصارف ساختمانی و برای مصرف در محیطهایی که حمله ضعیفی از سولفاتها وجود دارد، مناسب است [۲۴].

سیمان مورد استفاده در این تحقیق سیمان تیپ ۲ شاهرود می باشد. که به نظر می رسد از نظر مرغوبیت یکی از بهترین سیمانهای تولید شده در شمال کشور می باشد. مشخصات فنی این سیمان در جدول ۶-۵ داده شده است :

جدول ۶-۵: ویژگیهای فیزیکی و مکانیکی سیمان تیپ ۲ شاهرود

مقدار	واحد	ویژگی	
3200	cm^2/gr	ریزی سیمان	
112	Min	اولیه	زمان گیرش
170		نهایی	
225	kg/cm^2	۳روزه	مقاومت
308		۷روزه	فشاری
385		۲۸روزه	استاندارد

۶-۲-۳ میکروسیلیس :

میکروسیلیس یکی از محصولات فرعی کارخانه های تولید سیلیسیم و آلیاژهای آن می باشد و دارای تعریف دقیقی نیست. بنابراین هر منبع جدید میکروسیلیس را توسط سطح مخصوص آن به روش جذب نیتروژن و تعیین میزان سیلیس و کربن و قلیائی های آن، باید مشخص نمود. بعلاوه، به حداقل رساندن مواد کریستالی آن، مناسب می باشد. این ماده دارای سیلیس فراوان به میزان ۹۸-۸۵٪ است که میزان آن بستگی به نوع محصول و کوره کارخانه سیلیس دارد. میکروسیلیس ریزی به مراتب بیشتری نسبت به سیمان دارد؛ بطوریکه سطح ظاهری سیمان نوع ۱ حدود $220 m^2/kg$ ، و سطح ظاهری میکروسیلیس در $20000 m^2/kg$ می باشد. وزن مخصوص میکروسیلیس در حالت فله $(320 kg/m^3)$ -۱۶۰ می باشد [۲۳].

در ایران میکروسیلیس در چند مرکز و با کیفیت بسیار خوب و خلوص سیلیس بیش از ۹۸٪ تولید می گردد. لازم به ذکر است که استفاده از کلیه مواد پوزولانی (خاکستر بادی) و به خصوص استفاده از ۱۰ تا ۱۵ درصد میکروسیلیس جانشین سیمان، علاوه بر کاهش نفوذپذیری و افزایش دوام بتن در طول زمان، به صورت قابل ملاحظه ای مقاومت بتن را نیز بهبود می بخشد.

با افزایش میکروسیلیس میزان آب مصرفی به شدت افزایش پیدا می کند که با استفاده از فوق روان کننده می توان مقدار آب مورد نیاز را کاهش داد. سرعت کسب مقاومت بتن های حاوی میکروسیلیس تا سن ۳ تا ۷ روزه بسیار شدید است و با افزایش سن نمونه تا ۲۸ روز سرعت کسب مقاومت حتی از بتن های معمولی هم کمتر است. افزودن میکروسیلیس به بتن، باعث افزایش مقاومت و در نتیجه مدول الاستیسیته می شود.

میکروسیلیس مورد استفاده در این تحقیق از شرکت فروسیلیس ایران خریداری شد، که رنگی روشن خاکستری دارد. وزن مخصوص میکروسیلیس در مخلوط بتن 2.35 gr/cm^3 در نظر گرفته می شود.

۴-۲-۶ سنگدانه های مصرفی :

سنگدانه های ریز باید شامل ذراتی صیقلی باشند تا بتوانند میزان آب مورد نیاز را کاهش دهند. این سنگدانه معمولاً به منظور کارایی بهتر، کاهش انقباض بتن تازه، افزایش مقاومت بتن و یا به دلایل اقتصادی بودن بیشتر آن، بکار می رود. اما این امر نیز به میزان چشمگیری سبب افزایش چگالی بتن خواهد گردید. یکی از مشکلاتی که ممکن است در اثر ساخت بتن بوجود آید عدم یکپارچگی بین مصالح سنگی درشت و ماسه می باشد که باعث بوجود آمدن مخلوطی ناهمگن در این حالت خواهد شد. برای جلوگیری از این کار بهتر است که با انتخاب نسبت آب به سیمان مناسب و درصد سیمان مصرفی خوب، این مشکل را مرتفع نمود.

ماسه مورد استفاده در این تحقیق در محدوده (۰-۴/۷۵mm) و از معدن جعفر خان در ۲۰ کیلومتری شاهرود تهیه شده است. این ماسه به گونه ای است که از سنگدانه هایی که دارای بافت نامنظم می باشند تشکیل شده و مشخصات این سنگدانه در جدول زیر مشخص می باشد.

جدول ۶-۶: مشخصات فنی ماسه

ارزش ماسه ای	جذب آب	چگالی حالت SSD	چگالی حالت خشک
64	1.62	2.541	2.5

مشخصه های مهم سنگدانه های درشت عبارتند از : شکل، بافت، و حداکثر اندازه دانه ها. استفاده از سنگدانه های با حداکثر اندازه بزرگتر به طرق مختلف مقاومت را تحت تأثیر قرار می دهد. از آنجا که سنگدانه های بزرگتر مساحت پیرامونی ویژه کمتری دارند، مقاومت چسبندگی بین سنگدانه ها و خمیر کمتر می شود و بنابراین مقاومت فشاری کاهش می یابد. استفاده از سنگدانه های بزرگتر باعث می شود که حجم خمیر کاهش یابد و در نتیجه تغییرات حجم آن نیز کمتر شود.

در این تحقیق مصالح درشت دانه از دو قسمت (شن با دانه بندی ۴/۷۵-۱۲/۵mm و ۱۹mm-۱۲/۵) تشکیل شده است. مصالح سنگی موجود در آزمایشگاه دارای خاک بسیار زیادی بودند لذا همواره بر روی آنها مقداری آب باز می شد تا مصالح شسته شوند. مشخصات مکانیکی این سنگدانه ها در جدول زیر ارائه شده است :

جدول ۶-۷: مشخصات فنی مصالح سنگی درشت دانه (شن)

نوع شن	چگالی حالت خشک	چگالی حالت SSD	جذب آب
۴/۷۵-۱۲/۵mm	2.51	2.54	0.88
۱۲/۵-۱۹mm	2.57	2.59	0.62

همانطور در قسمت ۳-۷ اشاره شد آب موجود در سنگدانه ها اثر قابل ملاحظه ای بر روی فرایند عمل آوری داخلی بتن می گذارد و از آنجا که تمایز اثر مقدار آب موجود در این مصالح از آب وارد شده در بتن برای عمل آوری داخلی بسیار مشکل می باشد لذا در کلیه فعالیتهای صورت گرفته برای جلوگیری از این اثر و بررسی بهتر اثر سوپرجاذبها کلیه مصالح سنگی به صورت خشک به بتن اضافه می شدند.

دانه بندی سنگدانه ها:

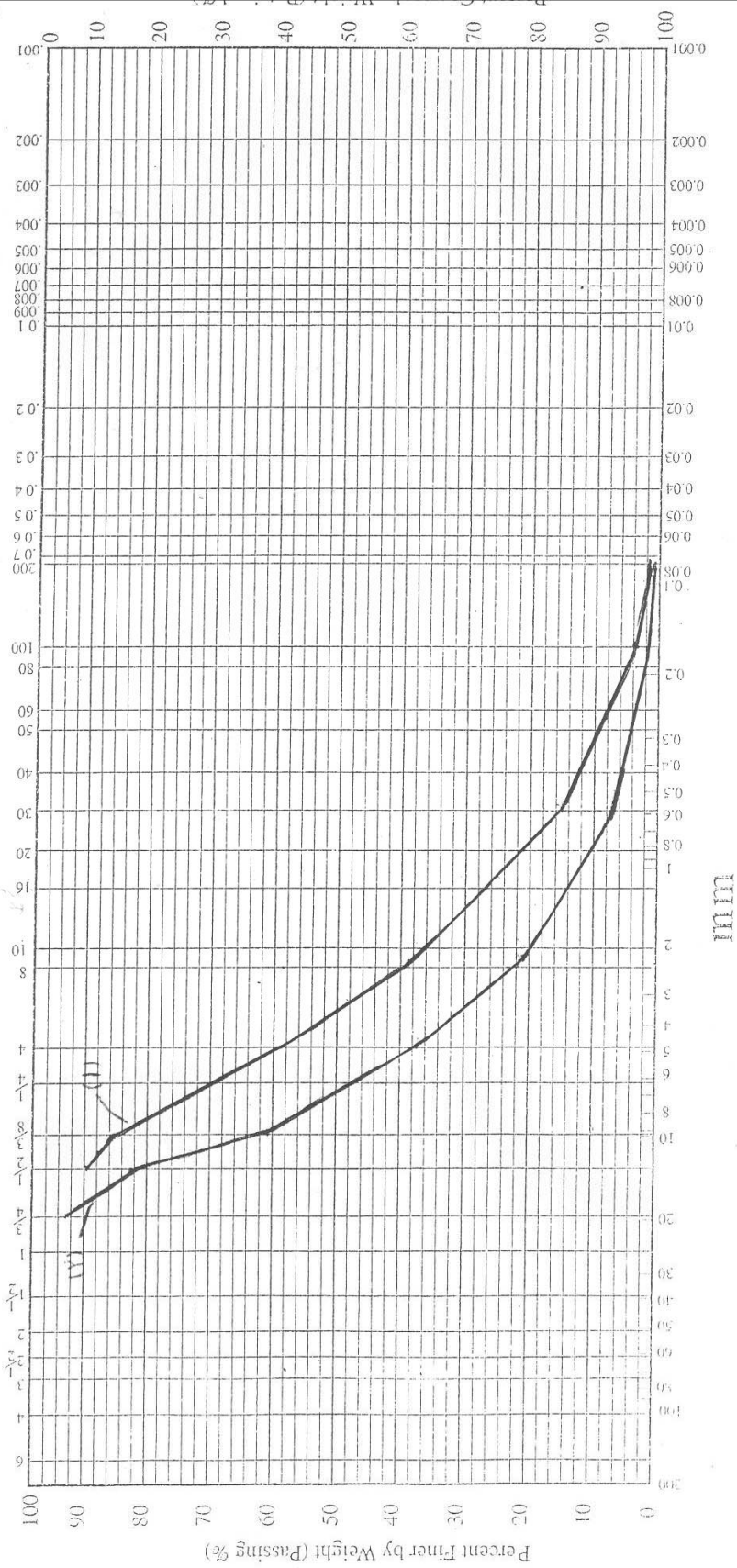
در مجموع برای ساخت نمونه ها از دونوع دانه بندی استفاده شده است. یک دانه بندی با ماکزیمم اندازه دانه های ۱۲/۵mm، که از سنگدانه هایی با ریزی بیشتر تشکیل شده است و دانه بندی دیگر با ماکزیمم اندازه دانه ۱۹ mm با دانه های درشت تر. نتایج دانه بندی در جدول زیر ارائه شده است.

جدول ۶-۸: دانه بندی شن و ماسه با ماکزیمم اندازه ۱۲/۵mm

شماره و اندازه الک	جرم مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی مصالح عبور کرده
12.5mm(1/2in)	202	10.12	10.12	98.88
9.5mm(3/8in)	99.55	4.98	15.1	84.9
4.75mm(No. 4)	535	26.78	41.88	58.12
2.36mm(No. 8)	367	18.37	60.25	39.75
1.18mm(No. 16)	257.6	12.9	73.15	26.85
600µm(No. 30)	239.6	12	85.15	14.85
300µm(No. 50)	100.6	5.04	90.19	9.81
150µm(No.100)	121.4	6.08	96.27	3.73
75µm(No. 200)	43.23	2.16	98.43	1.57
Pan	31.43	1.57	100	0
total	1997.41	100		

جدول ۶-۹: دانه بندی شن و ماسه با ماکزیمم اندازه ۱۹mm

شماره و اندازه الک	جرم مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد تجمعی مانده روی الک	درصد تجمعی مصالح عبور کرده
19mm(3/4in)	344	6.88	6.88	93.12
12.5mm(1/2in)	540	10.8	17.68	82.32
9.5mm(3/8in)	1027	20.55	38.23	61.77
4.75mm(No. 4)	1213	24.27	62.5	37.5
2.36mm(No. 8)	771.4	15.44	77.94	22.06
1.18mm(No. 16)	421	8.42	86.36	13.64
600µm(No. 30)	332.5	6.65	93.01	6.99
300µm(No. 50)	123.9	2.48	95.49	4.51
150µm(No.100)	134.8	2.71	98.2	1.8
75µm(No. 200)	46.6	0.93	99.13	0.87
Pan	43.4	0.87	100	0
total	4997.6	100		



نمودار ۴-۶ : دانه بندی مصالح سنگی (۱) مکازیمم اندازه ذرات ۱۲/۵ mm (۲) ماکزیمم اندازه ذرات ۱۹mm

۶-۲-۵ فوق روان کننده :

مواد فوق روان کننده عمدتاً از سولفوناتهای آلی ساخته شده و این امکان را فراهم می کنند که بتوان همزمان با کاهش میزان آب بتن اسلامپ آنرا افزایش داد. این مواد روی دانه های سیمان جذب شده و به آنها بار منفی می دهد که سبب دفع شدن (دورشدن) این ذرات از هم و تثبیت حالت پخش شدگی آنها می شود. بعلاوه بار منفی سبب بوجود آمدن پوسته ای منظم از مولکولهای آب در هر ذره شده و در نتیجه موجب جداسدگی ذرات از هم می شود. از فوق روان کننده ها گاهی برای کم کردن میزان سیمان مصرفی با ثابت نگهداشتن نسبت آب به سیمان و کم کردن میزان آب در یک اسلامپ ثابت استفاده می شود؛ اگرچه غالباً از آن برای ساخت یک بتن با کارآیی مناسب با کاهش نسبت آب به سیمان و ثابت نگاه داشتن میزان سیمان مصرفی استفاده می شود که این وضعیت منجر به تولید بتن هایی با مقاومت بالاتر خواهد گردید [۲۳].

روش اضافه کردن فوق روان کننده به بتن کارآیی 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. اما اگر خواص روانی خیلی مهم باشد، باید با توجه به مقاومت لازم، بیشترین نسبت آب به سیمان ممکن را انتخاب نمود، تا به همراه فوق روان کننده، کارآیی مطلوب حاصل گردد.

به طور کلی فوق روان کننده های متنوعی در صنعت وجود دارد که بسته به نوع آن با سیمانهای مختلف رفتارهای متفاوت از خود نشان می دهند. در این تحقیق از فوق روان کننده seko dense که محصول کلینیک ساختمانی ایران می باشد، استفاده شد. این فوق روان کننده دارای رنگ شفاف مایل به قهوه ای روشن بوده و وزن مخصوص آن 1.02 kg/m^3 می باشد. در کلیه طرح اختلاطهای 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.

۳-۶ آزمایشات انجام گرفته بروی بتن تازه و سخت شده :

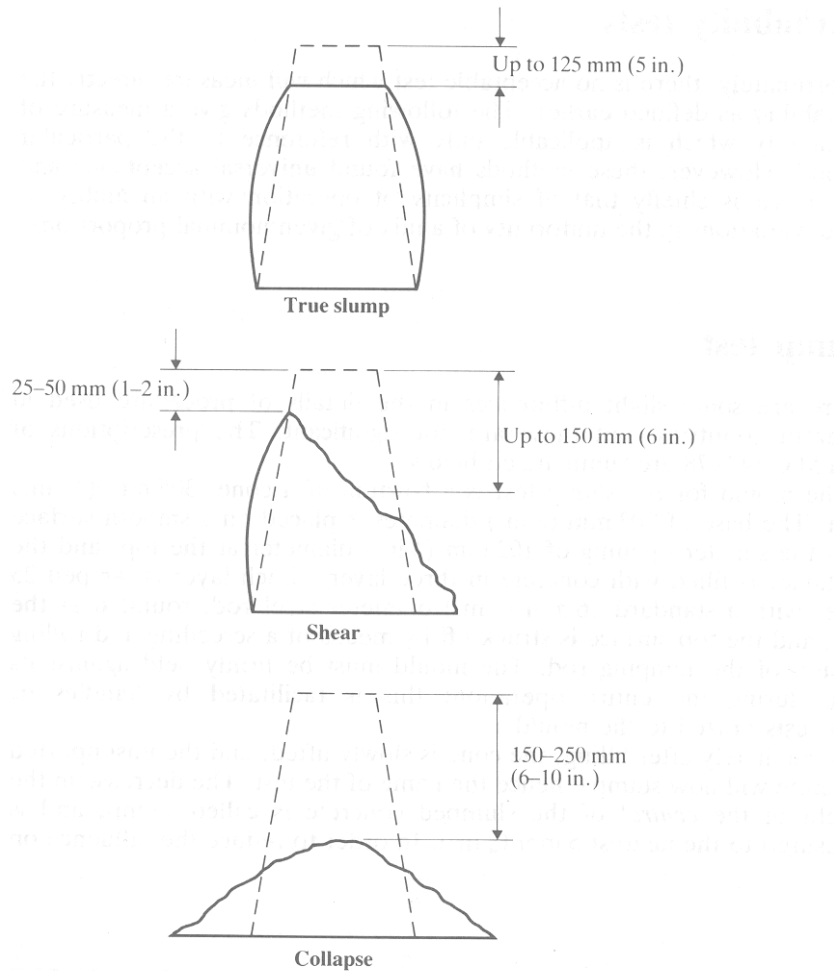
۳-۶-۱ آزمایش اسلامپ :

تاکنون هیچ گونه آزمایشی که بتواند مستقیماً کارآیی را اندازه گیری نماید وجود ندارد. روشهایی که در این زمینه وجود دارد، بیشتر برای مقاصد عملی و روشهای کاربردی در این زمینه، قابل اجرا می باشد. به هر حال، روشهایی که وجود دارد یک اجماع کلی و جهانی برای کاربرد آنها وجود دارد که بیشتر به علت سادگی و کاربرد عملی شان مورد قبول می باشند. این روشها این قابلیت و کارآیی را دارند که برای مخلوط یا متغیرهای مختلف بتوان کارآیی مشخصی را تعریف نمود. در واقع این روشها بیشتر به بررسی خواص فیزیکی مخلوطهای بتنی پرداخته و از این طریق می توان اطلاعات مفیدی درباره دامنه ای از تغییرات کارآیی، بدست آورد.

در مورد آزمایش اسلامپ اختلاف و تغییرات بسیار ناچیزی در مورد جزئیات فرایندهای استفاده شده در کشورهای مختلف وجود دارد. این آزمایش کارآیی بتن را نمی سنجد اما جهت پی بردن به تغییرات در یکنواختی مخلوط بتن با نسبت های اسمی معین بسیار مفید واقع می گردد.

این آزمایش به گونه ای است که کاهش ارتفاع بالاترین قسمت بتن نشست نموده را اسلامپ (افت) می گویند. انجام آزمایش باید به گونه ای باشد که بتن از همه طرف به طور یکنواخت نشست نماید. اگر اسلامپ به گونه ای باشد که نیمی از مخروط بتنی در امتداد یک سطح مایل فرو ریزد در این صورت می گویند اسلامپ برشی رخ داده است و باید آزمایش تکرار گردد. اگر چنانچه دوباره اسلامپ برشی تکرار شود؛ (ممکن است در حالت مخلوطهای خشن چنین باشد) این نماینگر فقدان چسبندگی مخلوط می باشد. (شکل ۶-۱)

معمولاً اسلامپ مخلوطهایی با روانی کم صفر است. مخلوطهای پرسیمان عملکرد رضایت بخشی دارند و اسلامپ آنها به تغییرات و کارآیی حساس است اما با مخلوط کم سیمان که گرایش به خشن بودن دارد اسلامپ واقعی می تواند به آسانی به اسلامپ برشی و یا حتی ریزشی تغییر کند، و مقادیر متفاوتی برای اسلامپ نمونه های مختلف از یک مخلوط بدست آید. حدود مقادیر اسلامپ برای کارآیی مختلف در مراجع مختلف می توان مشاهده کرد [۲۰]، ولیکن باید خاطر نشان کرد که با سنگدانه های مختلف امکان دارد که اسلامپ ثابتی را برای کارآیی های متفاوت ثبت نمود زیرا در حقیقت اسلامپ هیچ رابطه واحدی با کارآیی که قبلاً تعریف گردید ندارد.



شکل ۶-۱: اسلامپ صحیح، برشی و ریزشی

باوجود همه این محدودیتها آزمایش اسلامپ در کارگاههای ساختمانی برای کنترل روزبه روز و یا ساعت به ساعت مصالحی که به داخل مخلوط کن ریخته می شوند بسیار مفید است. برای مثال، یک افزایش در اسلامپ ممکن است بدین معنی باشد که رطوبت نسبی سنگدانه ها بطور غیر منتظره افزایش یافته است؛ ممکن است دلیل دیگر تغییر در دانه بندی مصالح، مانند کمبود ماسه، باشد. اسلامپ زیاد و کم در واقع به صورت یک اعلام خطر فوری بوده، لذا برای جلوگیری از این امر باید به کنترل دقیق مخلوطها پرداخت.

۶-۳-۲ مقاومت فشاری :

مقاومت فشاری نه تنها به عنوان مهمترین خصوصیات مکانیکی بتن، بلکه به عنوان یکی از مهمترین خواص رفتاری بتن شناخته می شود. مقاومت فشاری ممکن است براساس نمونه استوانه ای و یا نمونه

مکعبی سنجیده شود. نمونه استوانه ای به صورت استاندارد، قطر ۱۵۰mm و ارتفاع ۳۰۰mm دارد؛ همچنین بعد نمونه مکعبی به صورت استاندارد و برابر ۱۵۰ mm و یا ۲۰۰ mm است. در این تحقیق به منظور تعیین مقاومت فشاری، از نمونه های مکعبی ۱۵*۱۵*۱۵cm استفاده شده است. در کلیه نمونه های ساخته شده هر نمونه در سه لایه و با ۲۵ بار میله زدن با قطر ۱۶mm برای تراکم هر لایه، ریخته شده است. سرعت بارگذاری نیز باید در حد قابل قبولی باشد براساس استاندارد ASTM C39 این مقدار اندازه گیری بهتر است بین (۰/۱۵-۰/۳۴ MPa/sec) باشد و تا نقطه شکست بارگذاری شوند. مقاومت فشاری در سنین ۷، ۱۴، ۲۸، ۹۰ روزه و تحت شرایط مختلف عمل آوری اندازه گیری شده است. در تعدادی از نتایج ارائه شده در این قسمت مقاومت فشاری میانگین دو نمونه می باشد.



شکل ۶-۲: دستگاه تست مقاومت فشاری

۴-۶ نحوه اختلاط با استفاده از بتونیر و میکسر:

نحوه ساخت مخلوطهای بتنی با توجه به نوع بتن متفاوت است. برای مثال ساخت بتن های با مقاومت بالا با بتن های معمولی متفاوت می باشد.

برای ساخت بتن در کارگاه عموماً از بتونیر استفاده می شود. این دستگاه با تعداد دور مشخص با غلتانیدن مصالح برروی یکدیگر باعث مخلوط شدن آنها می شود. برای ساخت بتن های معمولی روند

کار بگونه ای است که ابتدا شن و ماسه (مصالح سنگی) به داخل میکسر و یا بتونیر ریخته شده و به مدت یک دقیقه با هم مخلوط می شوند. بعد از آن مصالح سیمانی یعنی سیمان و میکروسیلیس به مخلوط اضافه می شود. در مورد بتن های ساخته شده با میکروسیلیس ابتدا میکروسیلیس به مصالح سنگی اضافه می شود تا به مدت یک دقیقه با سنگدانه هم خورده بطوریکه سطح سنگدانه ها کاملاً بوسیله میکروسیلیس پوشانده شود. هنگامیکه میکروسیلیس به بتونیر اضافه می شد، به دلیل خشک بودن مصالح گردو خاک زیادی تولید می شد که بوسیله پارچه ای دهانه بتونیر پوشیده می شد. نحوه اضافه کردن آب به بتونیر بسیار مهم است این آب نباید به یکبار به داخل بتونیر ریخته شود. بنابراین، آب با آرامی به مخلوط اضافه شد. مشکل اصلی در این حالت ریختن آب فقط به یک نقطه به داخل بتونیر بود که در مخلوطهای پر سیمان و میکروسیلیس دار سبب گلوله شده مصالح می شد. اما با افزایش زمان اضافه کردن و مخلوط شدن مصالح این مشکل برطرف می شد. مشکل دیگر در مورد بتونیر این بود که به دلیل درشت بودن مصالح سنگی در بسیاری از مواقع خمیر سیمان در قسمت پایینی بتونیر جمع می شد بطوریکه در این حالت مصالح درشت دانه در سطح بتن قرار می گرفتند. لذا برای حل این مشکل و عدم جداشدگی بین خمیر و مصالح سنگی، بعد از تمام شدن زمان اختلاط در همانجا در داخل بتونیر چندین بار مخلوط زیوررو می شد تا با برطرف شدن این نقص، بتنی یکپارچه و همگن برای ریختن در قالب آماده شود. در مجموع تمام نمونه های آزمایش شده با ماکزیمم اندازه ذرات ۱۹mm توسط بتونیر ساخته شده اند.

برای نمونه هایی که در آنها سوپر جاذب به صورت خشک به بتن اضافه می شد، این مواد را قبل از اضافه کردن آب با سیمان مخلوط کرده و بعد همراه با سیمان وارد بتونیر می شدند. با توجه به اینکه ماکزیمم زمان لازم برای جذب آب توسط سوپر جاذبها ۵ دقیقه برآورد شده بود کلیه نمونه های ساخته شده بعد از ۵ دقیقه مخلوط کردن در قالب ریخته می شد. در حالتیکه پلیمرها به صورت کاملاً اشباع وارد بتن می شوند بعد از ریختن آب بروی مصالح سنگی و سیمان، سوپر جاذب اشباع شده به بتن اضافه می شد. تا بعد از مخلوط شدن و قرار گیری در نقاط مختلف مخلوط ساخته شده، وارد قالب گردد.

در این تحقیق برای ساخت برخی از نمونه ها از میکسر استفاده شد (طرح اختلاطهای ارائه شده در جدول ۶-۱۰-الف، ۶-۱۲ و ۶-۱۴). میکسر مورد استفاده در این تحقیق بگونه ای بود که جام میکسر

متحرک بوده، و در داخل آن دو پره ثابت و یک پره متحرک قرار گرفته است. مخلوطهای ساخته شده با میکسر به نظر می رسد که نسبت به مخلوطهای ساخته شده با بتونیر از میزان یکپارچگی بیشتری برخوردار باشند. روند ریختن مصالح و نحوه طرح اختلاط مشابه با مخلوطهای ساخته شده با بتونیر می باشد.

مشکلی که در ساخت بتن های ساخته شد با میکسرنیز با آن مواجه بودیم قرارگیری خمیر سیمان در قسمت پایین جام میکسر و بالا آمدن مصالح سنگی درشت به سطح بتن بود. البته این مطلب در مورد نمونه هایی که دانه بندی آنها ریزتر بود و تمامی آنها با میکسر ساخته شد، کمتر به چشم می خورد. لذا همواره بعد از اتمام اختلاط چندین بار مخلوط زیرورو می شد تا حالت یکپارچه به خود گیرد. در مورد نمونه های ساخته شده با سنگدانه های درشت از آنجا که مجبور بودیم پره متحرک را تا ارتفاع ۳cm بالاتر از کف جام بالا بیاوریم، لذا مخلوط به علت هم نخوردن خوب، از همگن خوبی برخوردار نبود. لذا در ابتدا چندین طرح اختلاط آزمایشی با استفاده از میکسر ساخته شد ولی در ادامه کار بدلیل خرابی میکسر برای ساخت این نمونه ها از بتونیر استفاده شد.



شکل ۶-۳: بتونیر و میکسر مورد استفاده برای مخلوط کردن بتن

۵-۶ نتایج آزمایشات مقاومت فشاری و اسلامپ:

۵-۶-۱ بررسی مدل پاورز و نتایج مربوط به آن :

بسیاری از تئوری‌هایی که در سطوح مختلف تحقیقات آزمایشگاهی مطرح می‌شوند گاهی اوقات جنبه ای کاملاً تئوری به خود می‌گیرد و احتمال اینکه نتایج آزمایشات با تئوری موجود مغایرت داشته باشد نیز وجود دارد. برای کامل شدن هیدراسیون در بتن و خمیر سیمان تئوری پاورز ارائه شد، که جهت بررسی این تئوری آزمایشاتی بر روی بتن‌ها با نسبت آب به سیمان مختلف انجام شد. که نتایج آن در جدول ۶-۱۰-الف و ۶-۱۰-ب ارائه شده است. بدلیل نبود وسایل آزمایشگاهی لازم برای اندازه‌گیری درجه هیدراسیون سیمان تنها به بررسی اثر این مدل بر روی مقاومت می‌پردازیم. در این قسمت فرض شد که برای بتن‌های بدون میکروسیلیس نسبت آب به سیمان لازم برای رسیدن به ماکزیمم درجه هیدراسیون $0/42$ باشد (بخش ۲-۵). در واقع نمونه‌های مرجع همگی دارای نسبت آب به سیمان $0/42$ هستند و شرایط عمل‌آوری آنها کاملاً در محیط اشباع و در زیر آب بوده است. برای نمونه‌هایی که با عمل‌آوری داخلی ساخته شده‌اند دو حالت جهت تأمین آب لازم برای عمل‌آوری داخلی استفاده شده است. یک حالت مقدار آب داخلی مورد نیاز $(w/c)_e = 0/07$ و در حالت دیگر مقدار آب عمل‌آوری داخلی $(w/c)_e = 0/02$ فرض گردیده است. در حالتیکه مقدار آب لازم برای عمل‌آوری داخلی زیاد می‌باشد قاعداً مقدار سوپرجاذب بیشتری باید برای عمل‌آوری بکار برده شود، لذا همانطور که نتایج نشان می‌دهند مقداری افت مقاومت در این حالت وجود دارد. البته این مقدار کاهش قابل توجه نمی‌باشد. در حالتیکه مقدار آب لازم برای عمل‌آوری داخلی برابر $0/02$ می‌باشد، با کاهش مصرف سوپرجاذبها با افزایش مقاومت مواجه خواهیم بود. نمونه‌های ساخته شده در این حالت از کارآیی بهتری برخوردار بودند.

همانطور که از نتایج مشخص است نمونه‌های ساخته شده با ماکزیمم اندازه 119 mm از کارآیی خوبی برخوردار نیستند در واقع باید به این نکته اشاره کرد که ساخت بتن‌های با نسبت آب به سیمان پایین و عیار سیمان کم (با دانه بندی درشت) در آزمایشگاه بسیار مشکل است. این بتن‌ها بدلیل عیار پایین سیمان از کارآیی خوبی برخوردار نیستند. که با افزایش سیمان این مشکل برطرف می‌شود. برای ساخت این بتن‌ها با کاهش نسبت آب به سیمان باید از فوق روان‌کننده بیشتری استفاده نمود تا کارآیی موردنظر را فراهم نمایند.

برای بررسی بهتر مدل پاورز و اینکه بتن های ساخته شده با میکروسیلیس در این حالت چگونه عمل می کنند طرح اختلاطهایی با میکروسیلیس ساخته شد (جدول ۶-۱۰-ب). نمونه های ساخته شده در این قسمت از کارآیی مناسبی برخوردار می باشند، بطوریکه در این قسمت با بهبود شرایط کارآیی بتن تا حد قابل قبولی مواجه هستیم. حتی با مقدار کمتری از فوق روان کننده می توان کارآیی بسیار خوبی را ایجاد کرد. در این قسمت نیز براساس مدل پاورز نسبت آب به سیمان $0/53$ به عنوان شرایط لازم برای رسیدن به ماکزیمم درجه هیدراسیون در نظر گرفته شد (بخش ۲-۶). مثل حالت قبل از دو حالت برای تأمین مقدار آب لازم برای عمل آوری داخلی استفاده شد. در حالت اول مقدار آب عمل آوری داخلی $(w/c)_e = 0/07$ فرض شد. که در این حالت نیز بدلیل افزایش مصرف سوپرجاذب با افت اندکی در مقاومت مواجه هستیم. در حالت دوم مقدار آب لازم برای عمل آوری داخلی برابر با $(w/c)_e = 0/03$ فرض شد. که شرایط بهتر شدن مقاومت و کارآیی را در این حالت خواهیم داشت. در این حالت نیز نمونه های مرجع (بدون عمل آوری داخلی) در داخل آب نگهداری شده است.

جدول ۱-۶-۱: طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و تسلیم با نسبت آب به سیمان پایین با توجه به مدل پاور (نمونه ها به غیر از نمونه بدون SAP در

محیط باز نگهداری شده است) $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

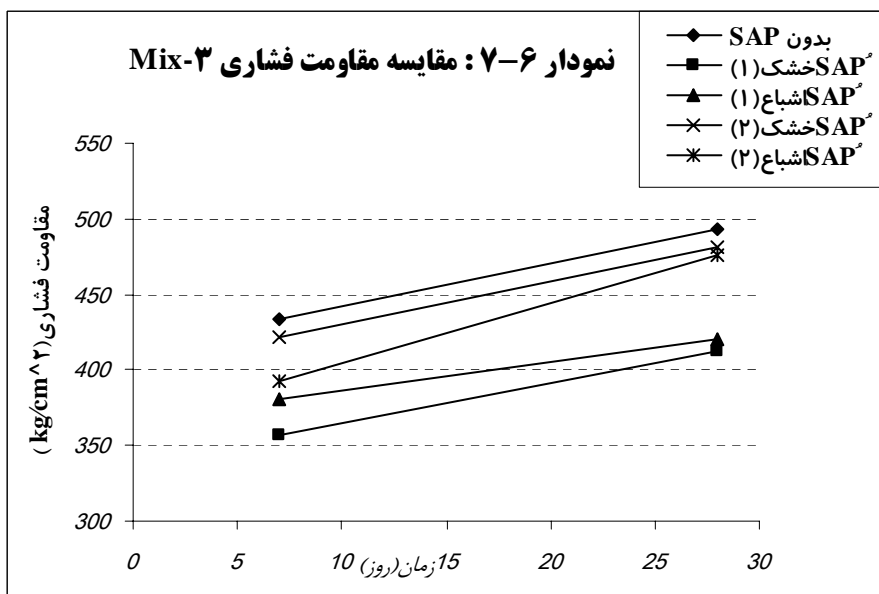
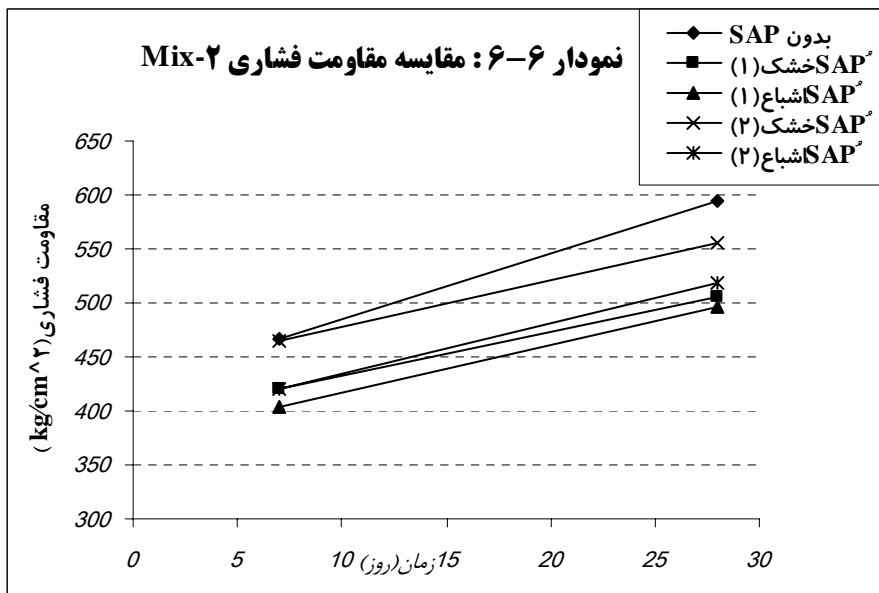
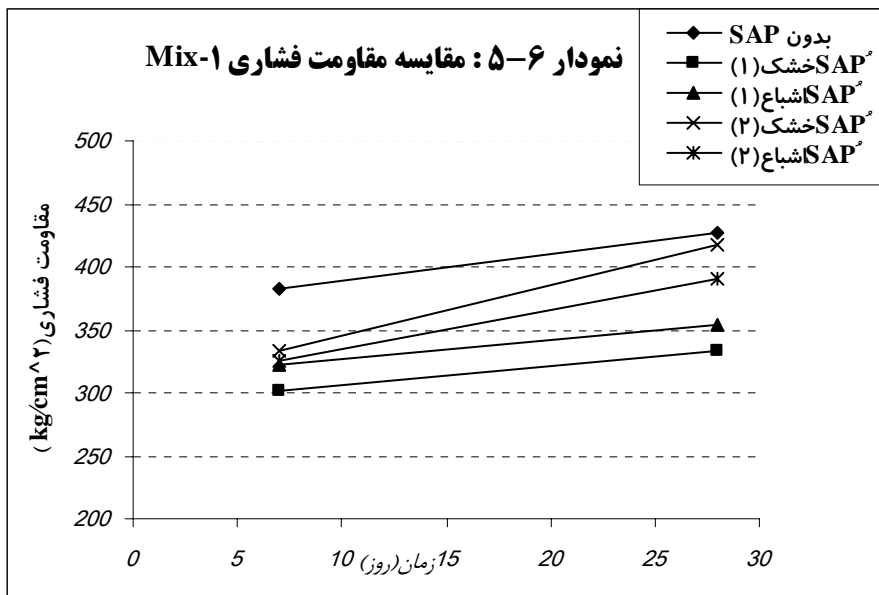
نام مخلوط	نوع	cement	سنگدانه				W	SAP	SF	SP	W/C	SAP/C	spc	Slump (cm)	متوسط مقاومت فشاری (kg/cm^2)	
			0-4.75 mm	4.75-12.5 mm	12.5-19 mm	بزرگتر از ۱۹									۷ روزه	۲۸ روزه
Mix-1	SAP بدون	360	737	552	552	151	-	-	5	0.42	-	1.4%	12.5	382	427	
	SAP خنک (۱)	360	737	552	552	151	0.394	-	5	0.35±0.07	0.107%	1.4%	10	301	333	
	SAP خنک (۲)	360	737	552	552	126	0.135	-	5	0.35±0.07	0.0368%	1.4%	10	322	354	
	SAP خنک (۳)	360	737	552	552	151	0.11	-	5	0.4±0.02	0.03%	1.4%	13	334	417	
	SAP خنک (۴)	360	737	552	552	144	0.038	-	5	0.4±0.02	0.0105%	1.4%	14	325	391	
Mix-2	SAP بدون	403	1050	700	-	169.3	-	-	4.8	0.42	-	1.2%	5	467	595	
	SAP خنک (۱)	403	1050	700	-	169.3	0.434	-	4.8	0.35±0.07	0.107%	1.2%	3	421	505	
	SAP خنک (۲)	403	1050	700	-	141	0.148	-	4.8	0.35±0.07	0.0368%	1.2%	7	403	497	
	SAP خنک (۳)	403	1050	700	-	169.3	0.124	-	4.8	0.4±0.02	0.03%	1.2%	5	465	555	
	SAP خنک (۴)	403	1050	700	-	161.2	0.0424	-	4.8	0.4±0.02	0.0105%	1.2%	6	453	538	
Mix-3	SAP بدون	366	1090	727	-	153.7	-	-	4.4	0.42	-	1.2%	6	433	493	
	SAP خنک (۱)	366	1090	727	-	153.7	0.394	-	4.4	0.35±0.07	0.107%	1.2%	3	357	413	
	SAP خنک (۲)	366	1090	727	-	128	0.135	-	4.4	0.35±0.07	0.0368%	1.2%	5	361	421	
	SAP خنک (۳)	366	1090	727	-	153.7	0.112	-	4.4	0.4±0.02	0.03%	1.2%	5	422	481	
	SAP خنک (۴)	366	1090	727	-	146.4	0.038	-	4.4	0.4±0.02	0.0105%	1.2%	4	393	476	

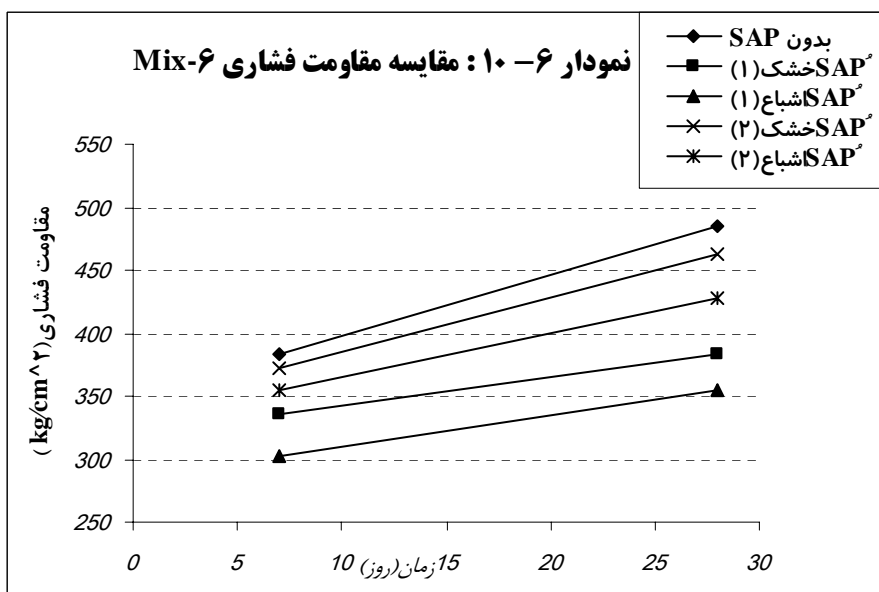
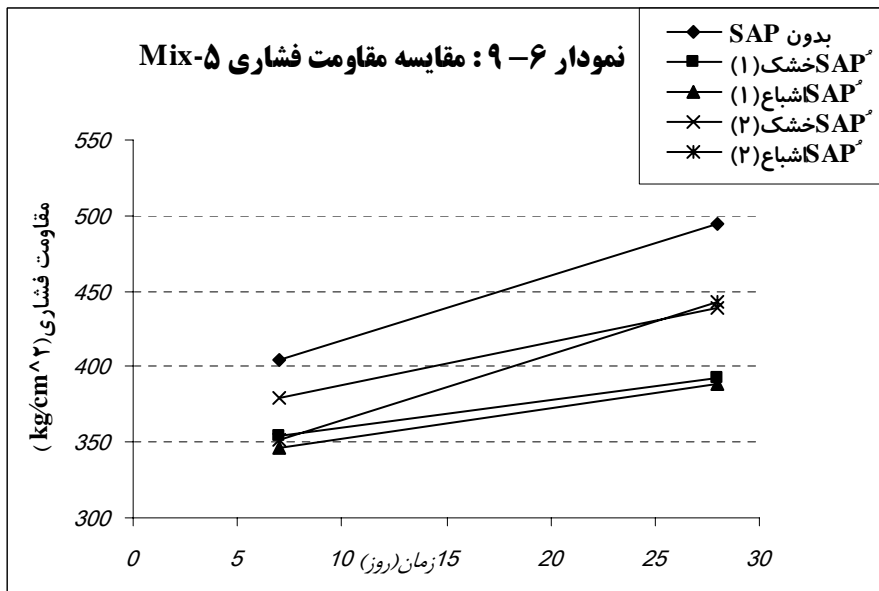
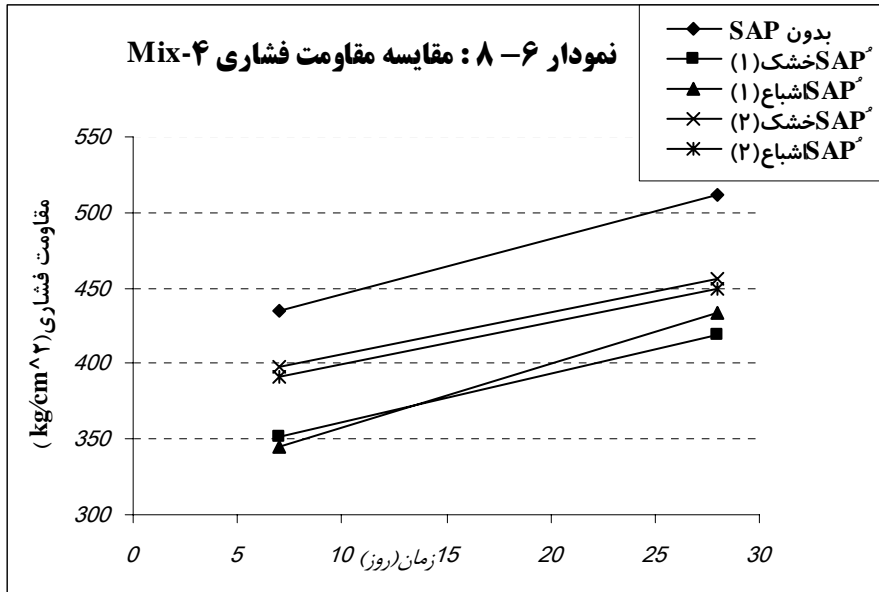
SP: فوق راون کند (Superplasticizer) C: سیمان (Cement) SF: میکروسیلیس (Silica Fume) W: سوزجانب (Supersorbent Polymer) SAP: (Water) T: W

جدول ۶-۱۰-۶: طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای نمونه های ساخته شده همراه با میکروسیس (SF) با توجه به مدل پاورز (نمونه ها به غیر از نمونه

بدون SAP در محیط باز نگهداری شده است) $(\frac{kg}{m^3})$

نم مختلط	نوع	cement	سنگدانه			W	SAP	SF	SP	W/C	W/C+SF	sfp/c-sf	SFC	SPC+SF	Slump (cm)	متوسط مقاومت فشاری (kg/cm^2)	
			0-4.75 mm	4.75-12.5 mm	12.5-19 mm											۳۸ روزه	۱ روزه
Mix-4	SAP	355	681	510	510	188.2	-	53.3	2.04	0.53	0.461	-	0.15	0.5%	6	435	511
	SAP	355	681	510	510	188.2	0.382	53.3	2.04	0.46+0.07	0.461	0.093%	0.15	0.5%	3	352	419
	SAP	355	681	510	510	163.3	0.131	53.3	2.04	0.46+0.07	0.4	0.032%	0.15	0.5%	4	345	433
	SAP	355	681	510	510	188.2	0.164	53.3	2.04	0.5+0.03	0.461	0.04%	0.15	0.5%	6	398	456
	SAP	355	681	510	510	177.5	0.056	53.3	2.04	0.5+0.03	0.434	0.014%	0.15	0.5%	5	391	450
Mix-5	SAP	370	668	501	501	196.1	-	55.5	1.28	0.53	0.461	-	0.15	0.3%	7	405	495
	SAP	370	668	501	501	196.1	0.398	55.5	1.28	0.46+0.07	0.461	0.093%	0.15	0.3%	3.5	354	393
	SAP	370	668	501	501	170.2	0.136	55.5	1.28	0.46+0.07	0.4	0.034%	0.15	0.3%	6	346	389
	SAP	370	668	501	501	196.1	0.17	55.5	1.28	0.5+0.03	0.461	0.04%	0.15	0.3%	6	379	439
	SAP	370	668	501	501	185	0.058	55.5	1.28	0.5+0.03	0.434	0.014%	0.15	0.3%	7	351	443
Mix-6	SAP	386	654	490	490	204.6	-	58	0.89	0.53	0.461	-	0.15	0.2%	8	384	485
	SAP	386	654	490	490	204.6	0.415	58	0.89	0.46+0.07	0.461	0.093%	0.15	0.2%	5	335	384
	SAP	386	654	490	490	177.6	0.142	58	0.89	0.46+0.07	0.4	0.034%	0.15	0.2%	6	303	355
	SAP	386	654	490	490	204.6	0.178	58	0.89	0.5+0.03	0.461	0.04%	0.15	0.2%	7	372	462
	SAP	386	654	490	490	193	0.061	58	0.89	0.5+0.03	0.434	0.014%	0.15	0.2%	8	355	427





۶-۵-۲ نتایج عمل آوری در محیط باز و عمل آوری داخلی بر روی مقاومت بتن و مقایسه آنها:

روشهای عمل آوری که در سطح آزمایشگاه استفاده می شود با شرایط عمل آوری در کارگاه تاحد زیادی متفاوت می باشد. در سطح کارگاه عمل آوری در شرایط مرطوب را می توان با قرار دادن بتن در تماس با منبع آب بدست آورد. این کار را می توان بوسیله آب پاشی^۱ و یا بوسیله پوشاندن با ماسه مرطوب، خاک اره و یا گونی حاصل نمود. طبیعتاً یک منبع آب دائمی راندمان بیشتری از یک منبع آب متناوب دارد. با توجه به اینکه شرایط عمل آوری در کارگاه معمولاً به صورت قرار گیری نمونه های در شرایط باز و یا عمل آوری تناوبی می باشد، برای شبیه سازی شرایط کارگاه در این قسمت از عمل آوری در محیط باز و یا عمل آوری تناوبی استفاده شده است. به منظور اینکه بتوان حادثترین شرایط موجود برای عمل آوری را ایجاد نمود در طرح اختلاطهای ساخته شده، کلیه نمونه ها اعم از نمونه مرجع و نمونه سوپر جاذب در محیط باز و هوای گرم تابستان بلافاصله بعد از قالب برداری قرار داده شده اند. در این حالت نمونه هایی که با سوپر جاذب ساخته شده مقاومت بهتری را نشان می دهند. برای ساخت نمونه ها با سوپر جاذب در حالت خشک به دو روش استفاده شد: در حالت اول با توجه به اینکه نسبت آب به سیمان ها در اکثر طرح اختلاطها بالا بود، لذا تصمیم بر این شد که آب لازم برای اشباع کردن سوپر جاذبهای خشک در داخل بتن از آب مخلوط تأمین شود. در این حالت با اضافه شدن سوپر جاذب و جذب آب بوسیله آن با افت اسلامپ مواجه بودیم. که این مشکل را می توان با اضافه کردن فوق راون کننده و یا آب اضافی برطرف ساخت.

همانطور که اشاره شد برای تعیین میزان آب اضافی در بتن برای اشباع کردن سوپر جاذبها هیچ گونه آزمایشی که بتوان مقدار دقیق آنرا بدست آورد وجود ندارد. زیرا که عوامل بسیار زیادی در هر مخلوط وجود دارد که بر روی آن اثر می گذارد. بعد از اینکه میزان جذب این مواد بوسیله مقایسه تست اسلامپ مشخص شد، نمونه های با سوپر جاذب خشک اما با آب اضافی (برای اشباع کردن سوپر جاذبها) ساخته شد. در طرح اختلاطهای ساخته شده، هیچ گونه افت مقاومتی در این حالت مشاهده نشد. نوع کارایی نیز در بسیاری از طرح اختلاطها شبیه به نمونه مرجع بود. در واقع می توان نتیجه گرفت که با استفاده از آب اضافی و ایجاد دو مخلوط با کارایی یکسان، افتی در مقدار مقاومت فشاری قابل مشاهده نمی باشد. البته بسته به نسبت آب به سیمان این اثرات متفاوت است بطور مثال

۱-water spraying

در نسبت آب به سیمان پایین حتی با افزایش مقاومت مواجه خواهیم بود. نتایج مربوط به این قسمت در جدول ۱۱-۶-الف و ۱۱-۶-ب و ۱۲-۶ ارائه شده است.

جدول ۶-۱۱-الف: طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامب برای نمونه‌هایی با ماکزیمم اندازه ۱۹mm (کلیه نمونه‌ها در محیط بار نگهداری شده است) ($\frac{kg}{m^3}$)

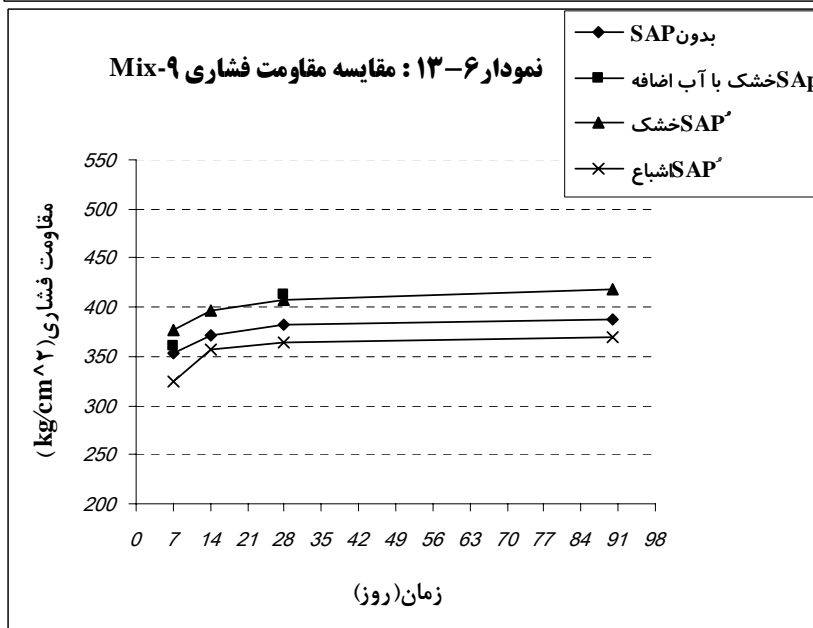
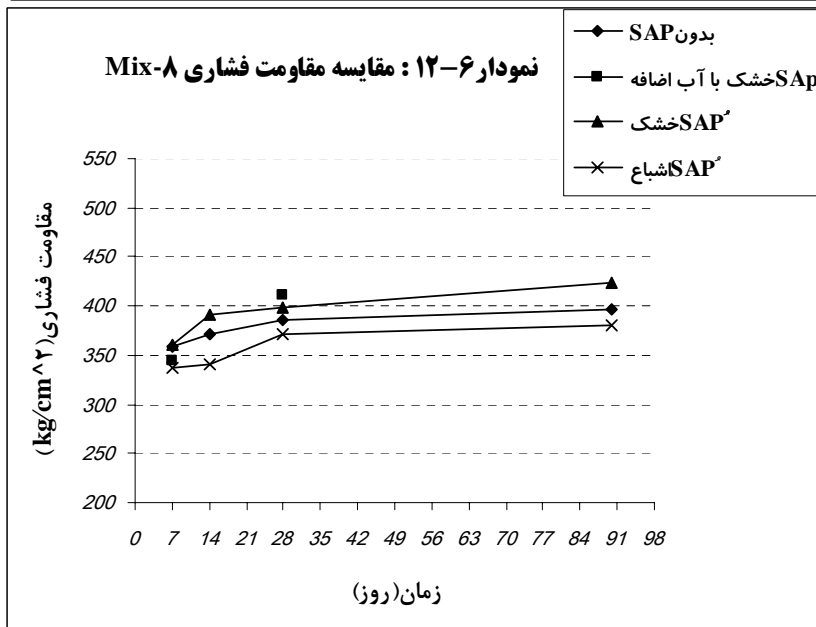
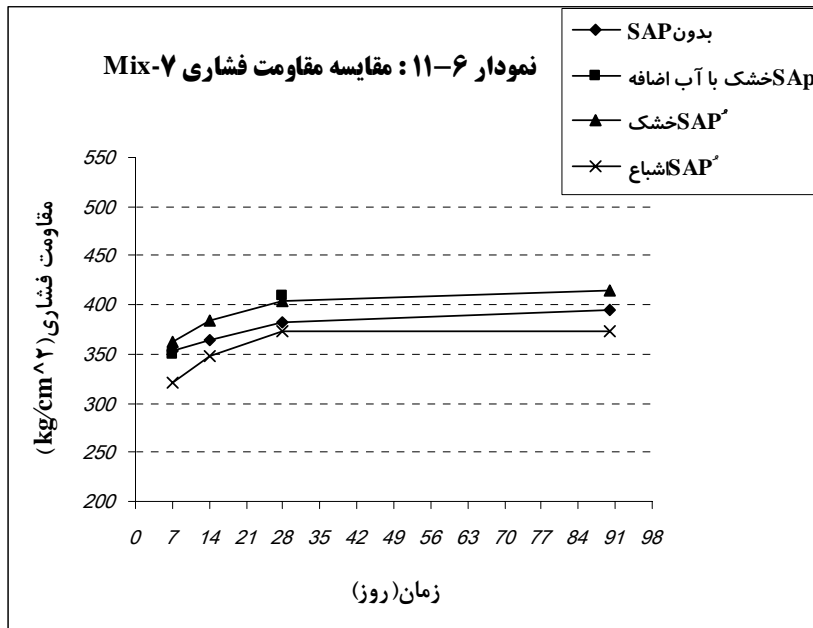
نام مخلوط	نوع	cement	سنگدانه			W	SAP	SP	W/C	SAP/C	SF/C	SP/C	slump (cm)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)			
			0-4.75mm	4.75-12.5mm	12.5-19mm									۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
Mix-7	SAP بدون سنگ	353	717	537	537	176	-	1.76	0.5	-	-	0.3%	5	354	365	383	394
	SAP سنگ	353	710	532	532	183.2	0.1059	1.76	0.5+0.019	0.03%	-	0.3%	3.5	349	-	409	-
	SAP سنگ	353	717	537	537	176	0.1059	1.76	0.5	0.03%	-	0.3%	3	363	384	403	415
	شیاع SAP	353	697	522	522	176	0.1059	1.76	0.5	0.03%	-	0.3%	4	320	348	373	373
Mix-8	SAP بدون سنگ	375	699	524	524	187	-	1.125	0.5	-	-	0.3%	5	358	372	386	396
	SAP سنگ	375	693	519	519	193.5	0.0937	1.125	0.5+0.016	0.025%	-	0.3%	4.5	345	-	411	-
	SAP سنگ	375	699	524	524	187	0.0937	1.125	0.5	0.025%	-	0.3%	1	360	392	398	423
	شیاع SAP	375	681	511	511	187	0.0937	1.125	0.5	0.025%	-	0.3%	2.5	338	340	372	381
Mix-9	SAP بدون سنگ	347	738	533	533	156	-	2.77	0.45	-	-	0.8%	6.5	355	371	383	387
	SAP سنگ	347	731	549	549	163	0.104	2.77	0.45+0.019	0.03%	-	0.8%	6	361	-	413	-
	SAP سنگ	347	738	533	533	156	0.104	2.77	0.45	0.03%	-	0.8%	6	377	396	408	418
	شیاع SAP	347	722	741	741	156	0.086	2.77	0.45	0.025%	-	0.8%	5	324	357	365	370
Mix-10	SAP بدون سنگ	373	718	538	538	168	-	2.98	0.45	-	-	0.8%	7.5	397	413	431	442
	SAP سنگ	373	711	533	533	174	0.0932	2.98	0.45+0.016	0.025%	-	0.8%	7	387	-	458	-
	SAP سنگ	373	718	538	538	168	0.0932	2.98	0.45	0.025%	-	0.8%	5	394	423	452	463
	شیاع SAP	373	710	532	532	168	0.0932	2.98	0.45	0.025%	-	0.8%	3.5	400	409	431	443

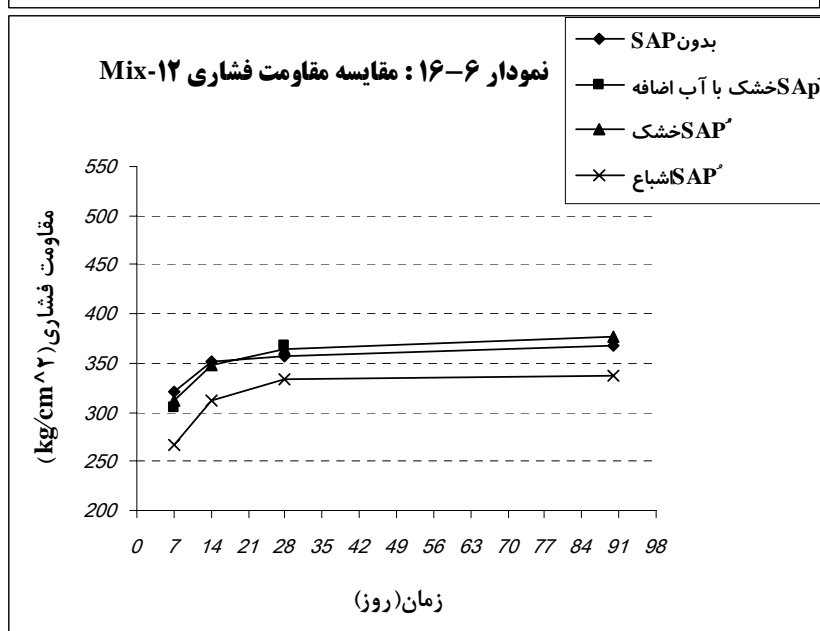
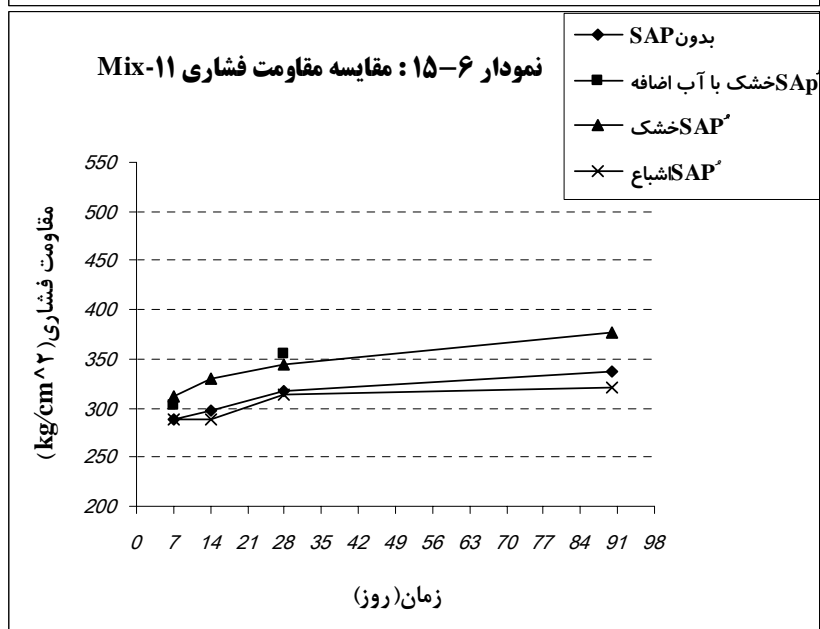
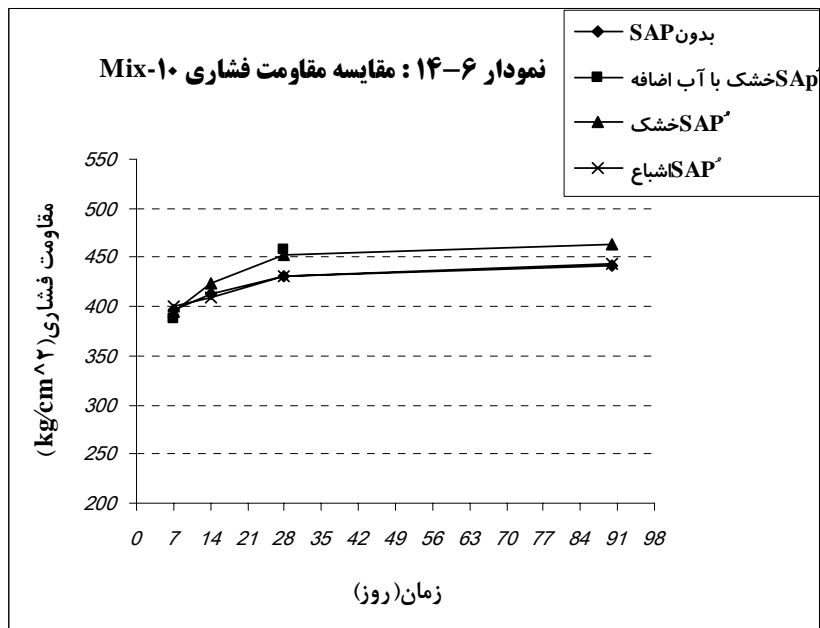
جدول ۶-۱۱-ب : طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای نمونه هایی با ماکزیمم اندازه ۱۹mm (کلیه نمونه ها در محیط بار نگهداری شده است) $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

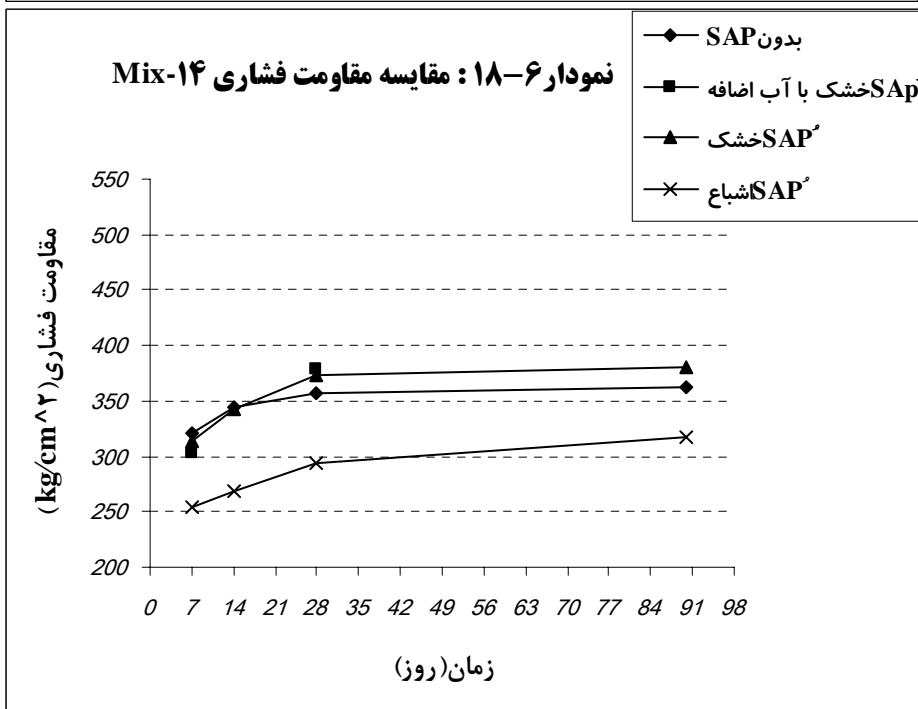
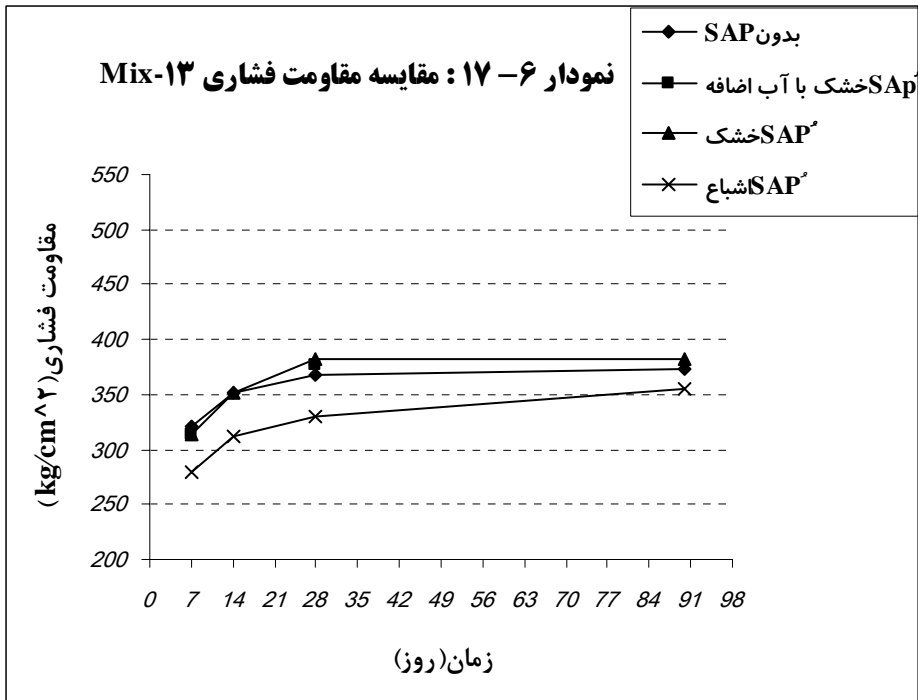
نام مخلوط	نوع	cement	سنگدانه			W	SAP	SP	W/C	SAP/C	SF/C	SP/C	shmp (cm)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)		
			0-4.75mm	4.75-12.5mm	12.5-39mm									۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه
Mix-11	SAP بدون	341	710	532	532	187	-	1.023	0.55	-	-	3.5	289	298	317	337
	SAP خشک	341	703	727	727	195	0.1023	1.023	0.55+0.019	0.03%	-	4	303	-	356	-
	SAP اشباع	341	710	532	532	187	0.1023	1.023	0.55	0.03%	-	3	311	329	344	377
Mix-12	SAP بدون	367	687	515	515	202	-	0.367	0.55	-	-	3	320	351	357	368
	SAP خشک	367	677	508	508	209	0.11	0.367	0.55+0.019	0.03%	-	4	305	-	367	-
	SAP اشباع	367	687	515	515	202	0.11	0.367	0.55	0.03%	-	2.5	311	348	365	376
Mix-13	SAP بدون	336	698	524	524	202	-	0.336	0.6	-	-	4.5	321	351	368	374
	SAP خشک	336	690	518	518	208	0.1	0.336	0.6+0.019	0.03%	-	3	313	-	377	-
	SAP اشباع	336	698	524	524	202	0.1	0.336	0.6	0.03%	-	2	313	351	382	383
Mix-14	SAP بدون	360	676	507	507	216	-	-	0.6	-	-	2	320	345	357	363
	SAP خشک	360	670	502	502	22	0.097	-	0.6+0.018	0.027%	-	1	303	-	378	-
	SAP اشباع	360	676	507	507	216	0.097	-	0.6	0.027%	-	0	313	342	373	380
	SAP اشباع	360	659	494	494	216	0.09	-	0.6	0.025%	-	3.5	255	268	294	317

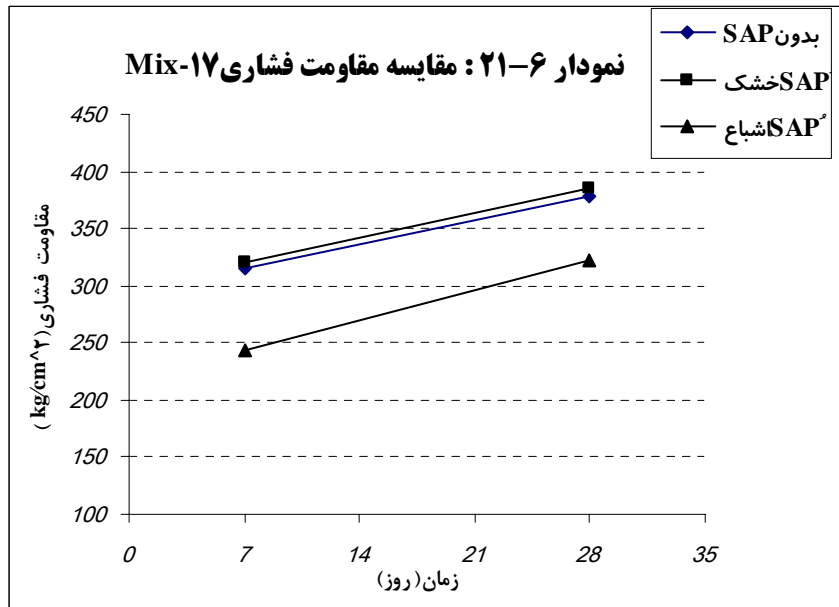
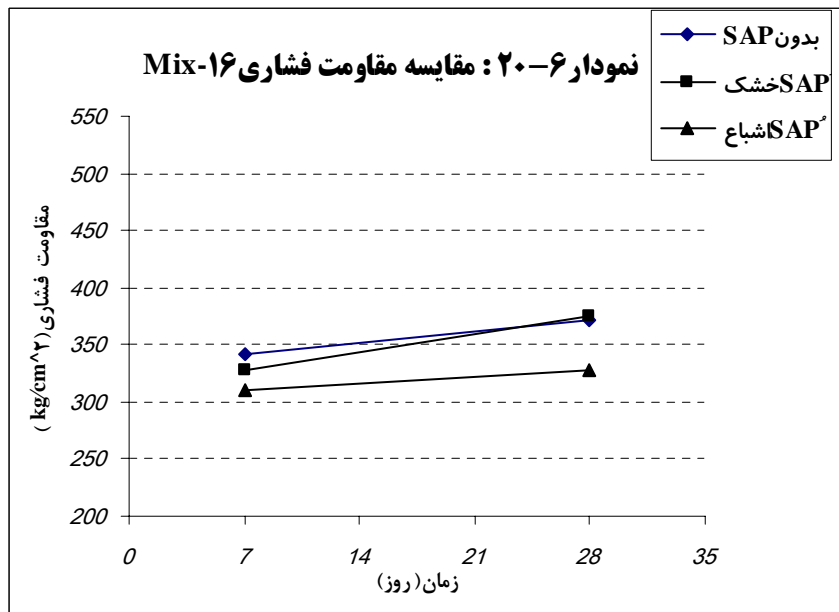
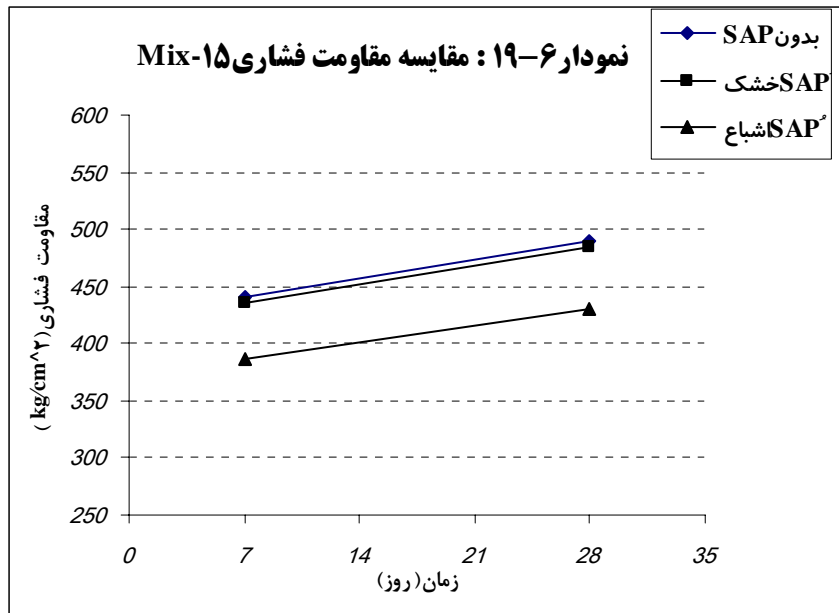
جدول ۶-۱۲: طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای ماکزیمم اندازه ۱۲/۵mm (کلیه نمونه ها در محیط بار نگهداری شده اند) $\frac{kg}{m^3}$

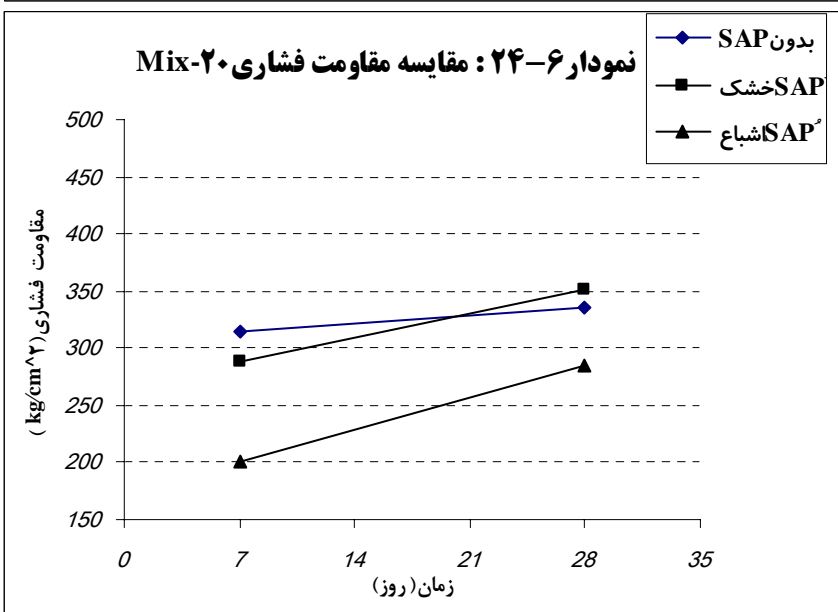
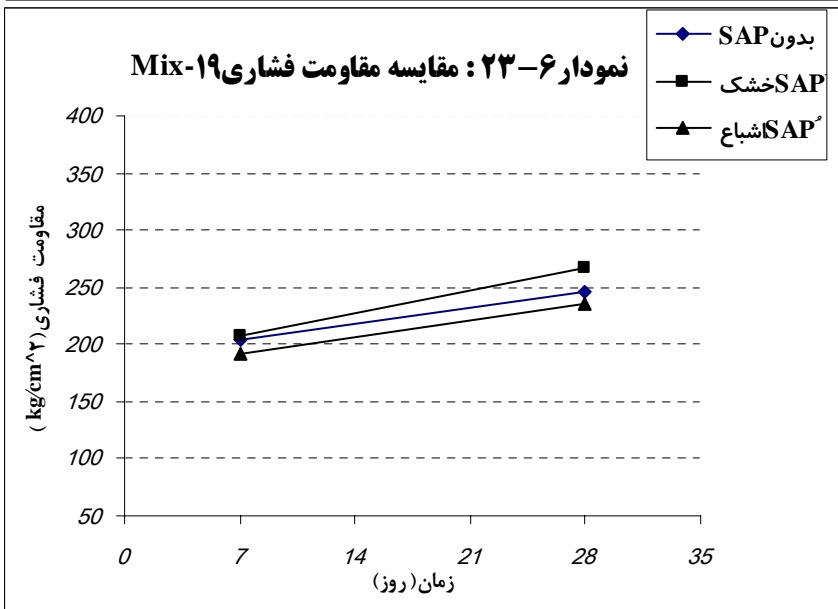
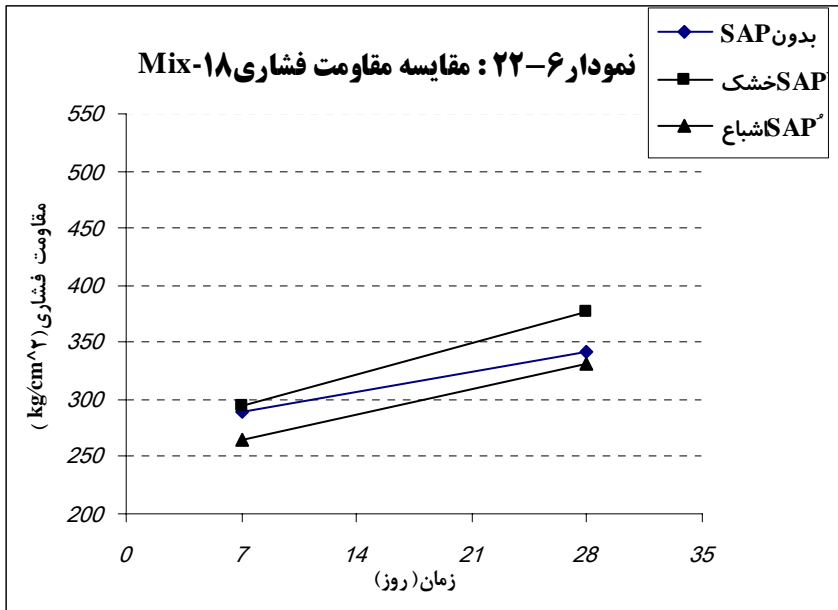
نام مخلوط	نوع	cement	سنگدانه		W	SAP	SP	W/C	SAP/C	SP/C	Slump (cm)	مقاومت	
			0-4.75mm	4.75-12.5mm								(kg/cm^2) فشاری	۲۸ روزه
Mix-15	SAP بدون	335	1111	741	150.7	-	3.68	0.45	-	1.1%	3	440	490
	SAP سنگ	335	1096	730	160.8	0.1675	3.68	0.45+0.03	0.05%	1.1%	4.5	436	484
	SAP نیسج	335	1063	709	150.7	0.1675	3.68	0.45	0.05%	1.1%	3	387	431
Mix-16	SAP بدون	318	1109	739	159	-	2.54	0.5	-	0.8%	3	341	371
	SAP سنگ	318	1093	728	159	0.159	2.54	0.5+0.032	0.05%	0.8%	1	328	375
	SAP نیسج	318	1063	708	159	0.159	2.54	0.5	0.05%	0.8%	5	301	327
Mix-17	SAP بدون	313	1092	728	172.2	-	1.56	0.55	-	0.5%	2	315	378
	SAP سنگ	313	1077	718	172.2	0.1565	1.56	0.55+0.032	0.05%	0.5%	0	320	385
	SAP نیسج	313	1047	698	172.2	0.1565	1.56	0.55	0.05%	0.5%	1	244	323
Mix-18	SAP بدون	350	1043	696	192.5	-	1.75	0.55	-	0.5%	2	289	342
	SAP سنگ	350	1034	689	192.5	0.105	1.75	0.55+0.019	0.03%	0.5%	1	295	376
	SAP نیسج	350	1013	676	192.5	0.105	1.75	0.55	0.03%	0.5%	4	265	331
Mix-19	SAP بدون	312	1071	714	187.2	-	0.94	0.6	-	0.3%	2	204	246
	SAP سنگ	312	1059	705	187.2	0.1248	0.94	0.6+0.026	0.04%	0.3%	0	208	267
	SAP نیسج	312	1048	699	187.2	0.078	0.94	0.6	0.025%	0.3%	5	191	235
Mix-20	SAP بدون	356	1010	674	213.6	-	1.07	0.6	-	0.3%	5.5	315	335
	SAP سنگ	356	996	664	213.6	0.1424	1.07	0.6+0.026	0.04%	0.3%	3	289	351
	SAP نیسج	356	969	645	213.6	0.1424	1.07	0.6	0.04%	0.3%	6	200	284











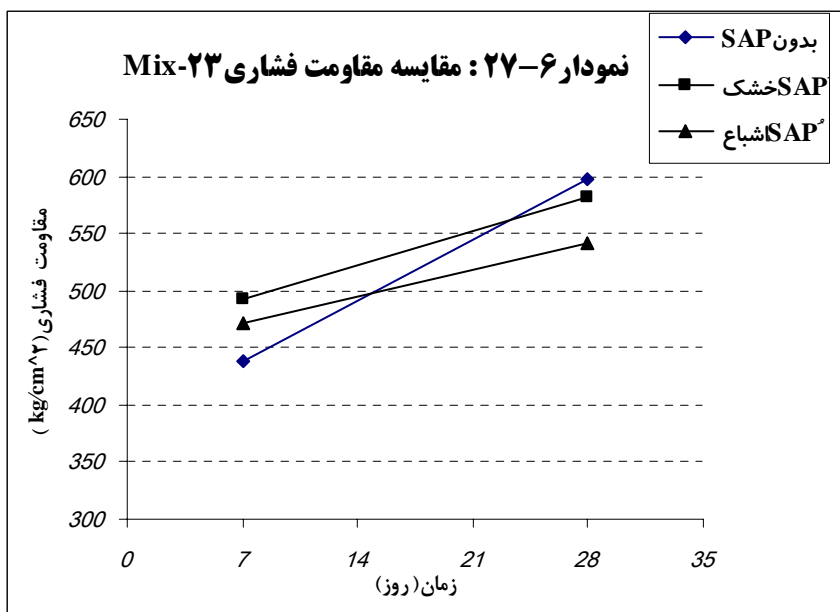
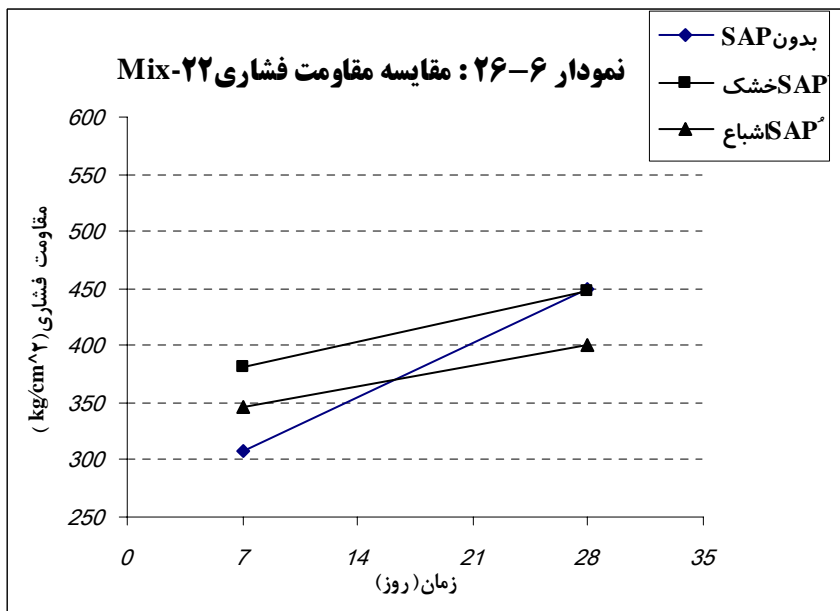
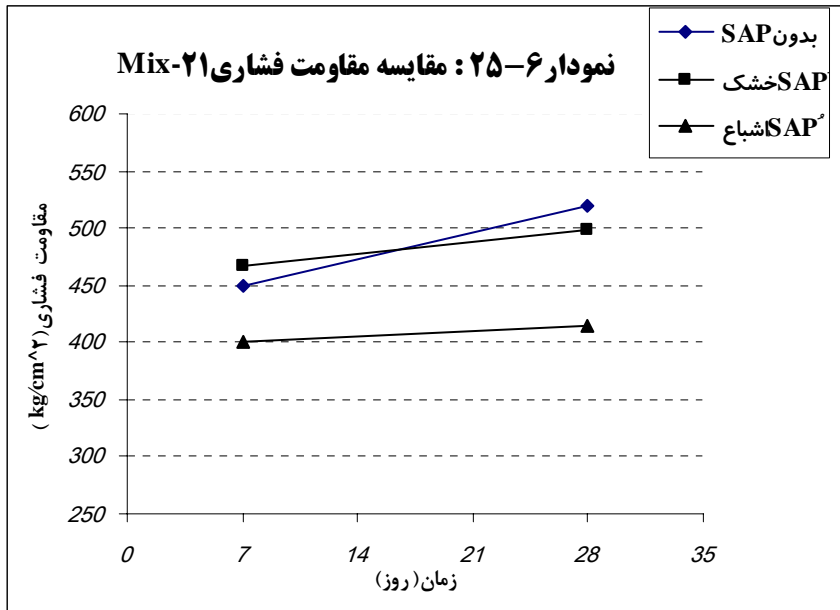
۳-۵-۶ نتایج عمل آوری مرطوب و عمل آوری داخلی بر روی مقاومت و مقایسه آنها برای نمونه های ساخته شده با میکروسیلیس:

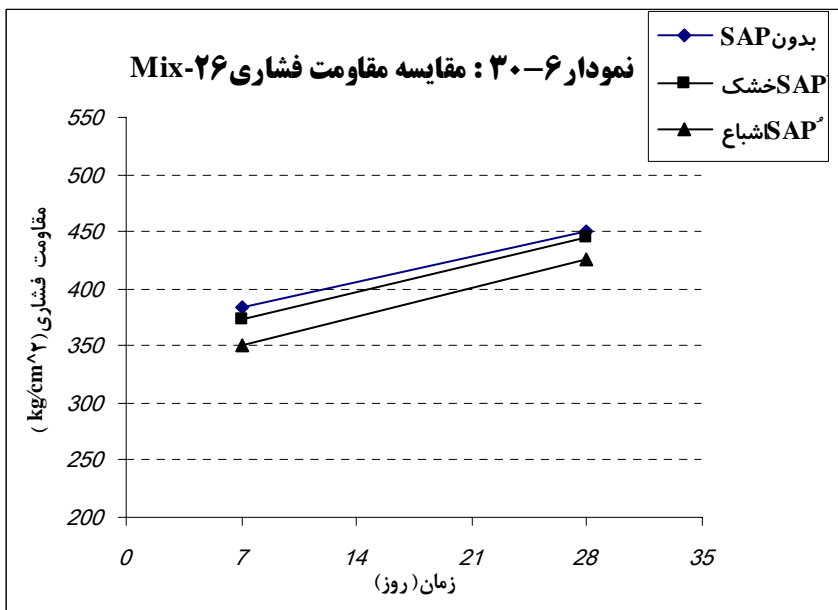
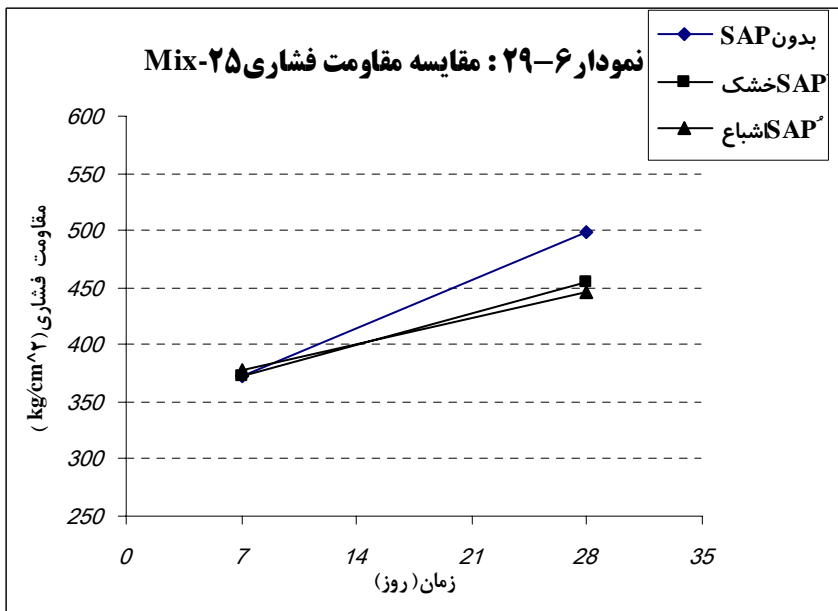
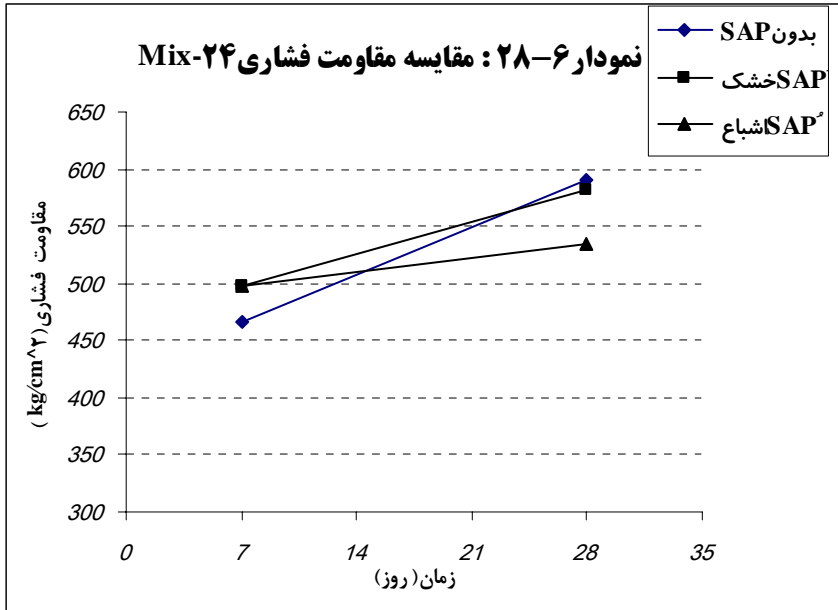
به منظور بررسی این اثر نمونه های با استفاده از میکروسیلیس ساخته شد. نمونه های ساخته شده در این حالت دارای عیار سیمانی برابر با طرح اختلاطهای ارائه شده در جدول ۶-۱۱-الف و ۶-۱۱-ب می باشند. در این قسمت با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایشات قبلی مبنی بر اینکه مقدار آب اضافه شده در مخلوطها با سوپرجاذب خشک، هیچ گونه اثری بر روی مقاومت ندارد، نمونه ها با آب اضافی ساخته شدند. کلیه نمونه های ساخته شده مرجع در محیط مرطوب و در زیر آب نگهداری شده اند. سایر نمونه ها که شامل سوپرجاذب خشک و اشباع می باشند در محیط باز نگهداری شده اند.

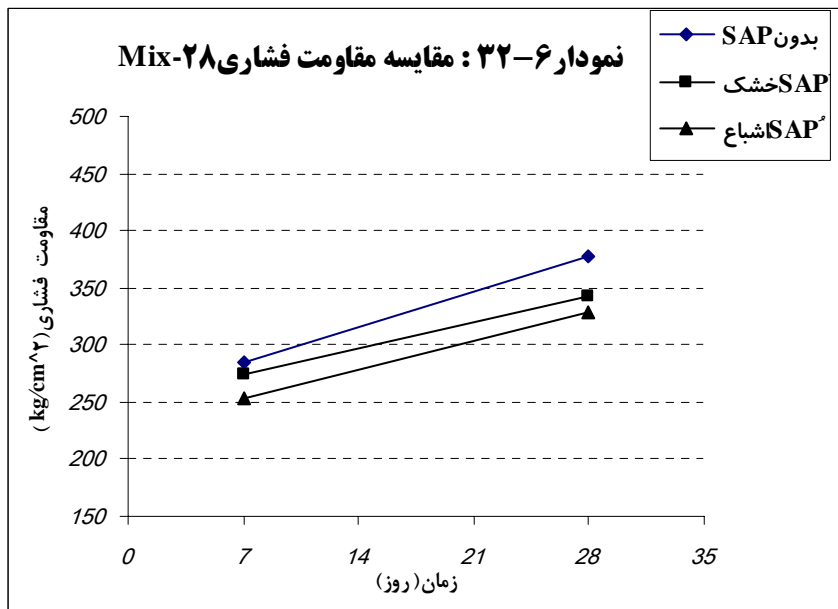
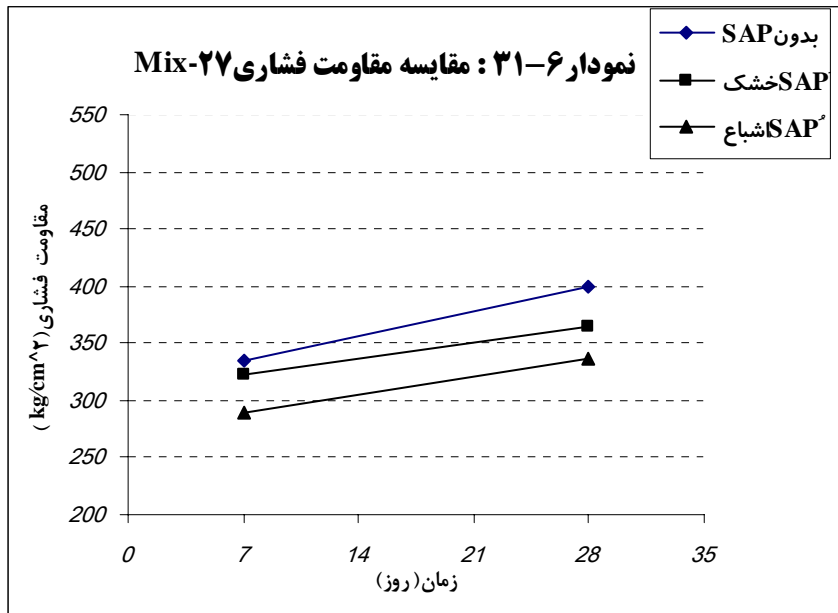
در مورد نمونه هایی که سوپرجاذب به صورت خشک به بتن اضافه می شود افت قابل توجهی در مقاومت مشاهده نمی شود بطوریکه کلیه نمونه ها تقریباً دارای یک مقاومت می باشند. نمونه های ساخته شده با سوپرجاذب اشباع نیز در این حالت مثل حالت های قبلی با کاهش مقاومت همراه خواهد بود. در واقع می توان گفت که در حالتیکه سوپرجاذبها به صورت خشک به بتن های همراه با میکروسیلیس اضافه می شود، شاهد بهتر شدن مقاومت خواهیم بود و این نشان می دهد که این مواد بر روی بتن های ساخته شده با میکروسیلیس، عملکرد بهتری از خود نشان می دهند. نکته جالب توجه در مورد نمونه ساخته شده در این حالت بهبود کارایی بدلیل استفاده از میکروسیلیس می باشد.

جدول ۱۳-۶: طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ برای ماکزیمم اندازه ۱۹mm همراه با میکروسلیس (SF) نمونه ها به غیر از نمونه بدون SAP در محیط بار نگهداری شده است) ($\frac{kg}{m^3}$)

نام مخلوط	نوع	cement	سنگدان (mm)			W	SAP	SF	SP	W/C	W/C-SF	SAP-C-SF	SF/C	SP-C-SF	Slump (cm)	مقاومت	
			0-4.75	4.75-12.5	12.5-19											(kg/cm^2) فشاری	٪وزنه
Mix-21	SAP بدون	353	693	520	520	176.5	-	53	2.43	0.5	0.435	-	0.15	0.6%	5	450	520
	SAP سنگی	353	686	515	515	183	0.11	53	2.43	0.5+0.018	0.45	0.027%	0.15	0.6%	4.5	467	498
	SAP نیبام	353	674	505	505	176.5	0.101	53	2.43	0.5	0.435	0.023%	0.15	0.6%	6	400	414
Mix-22	SAP بدون	375	674	505	505	187.5	-	56.3	2.16	0.5	0.435	-	0.15	0.5%	6	307	449
	SAP سنگی	375	667	501	501	193.5	0.108	56.3	2.16	0.5+0.016	0.448	0.023%	0.15	0.5%	5.5	382	448
	SAP نیبام	375	653	490	490	187.5	0.108	56.3	2.16	0.5	0.435	0.023%	0.15	0.5%	6.5	347	400
Mix-23	SAP بدون	347	715	536	536	156	-	52	3.59	0.45	0.391	-	0.15	0.9%	4	438	597
	SAP سنگی	347	709	531	531	162.4	0.108	52	3.59	0.45+0.018	0.406	0.027%	0.15	0.9%	4	493	582
	SAP نیبام	347	695	522	522	156	0.1	52	3.59	0.45	0.391	0.023%	0.15	0.9%	5	471	541
Mix-24	SAP بدون	373	693	519	519	168	-	56	3.86	0.45	0.392	-	0.15	0.9%	5	467	591
	SAP سنگی	373	686	515	515	174	0.107	56	3.86	0.45+0.016	0.405	0.023%	0.15	0.9%	3.5	498	577
	SAP نیبام	373	672	504	504	168	0.107	56	3.86	0.45	0.392	0.023%	0.15	0.9%	4	497	534
Mix-25	SAP بدون	341	687	515	515	187.5	-	51.2	1.96	0.55	0.478	-	0.15	0.5%	5	373	498
	SAP سنگی	341	682	510	510	193.7	0.106	51.2	1.96	0.55+0.018	0.494	0.027%	0.15	0.5%	4	373	454
	SAP نیبام	341	669	501	501	187.5	0.098	51.2	1.96	0.55	0.478	0.023%	0.15	0.5%	4.5	378	446
Mix-26	SAP بدون	367	663	498	498	202	-	55	0.844	0.55	0.479	-	0.15	0.2%	6	384	451
	SAP سنگی	367	657	493	493	208.5	0.114	55	0.844	0.55+0.018	0.494	0.027%	0.15	0.2%	7	374	445
	SAP نیبام	367	644	482	482	202	0.105	55	0.844	0.55	0.479	0.023%	0.15	0.2%	7	351	426
Mix-27	SAP بدون	336	677	507	507	201.6	-	50.4	0.336	0.6	0.522	-	0.15	0.1%	3	334	400
	SAP سنگی	336	670	503	503	207.6	0.104	50.4	0.336	0.6+0.018	0.537	0.027%	0.15	0.1%	3.5	323	364
	SAP نیبام	336	658	493	493	201.6	0.097	50.4	0.336	0.6	0.522	0.023%	0.15	0.1%	4	289	337
Mix-28	SAP بدون	360	653	489	489	216	-	54	0	0.6	0.522	-	0.15	0	4	284	378
	SAP سنگی	360	646	485	485	221.8	0.103	54	0	0.6+0.0168	0.535	0.023%	0.15	0	5.5	275	343
	SAP نیبام	360	633	475	475	216	0.103	54	0	0.6	0.522	0.023%	0.15	0	7	253	329







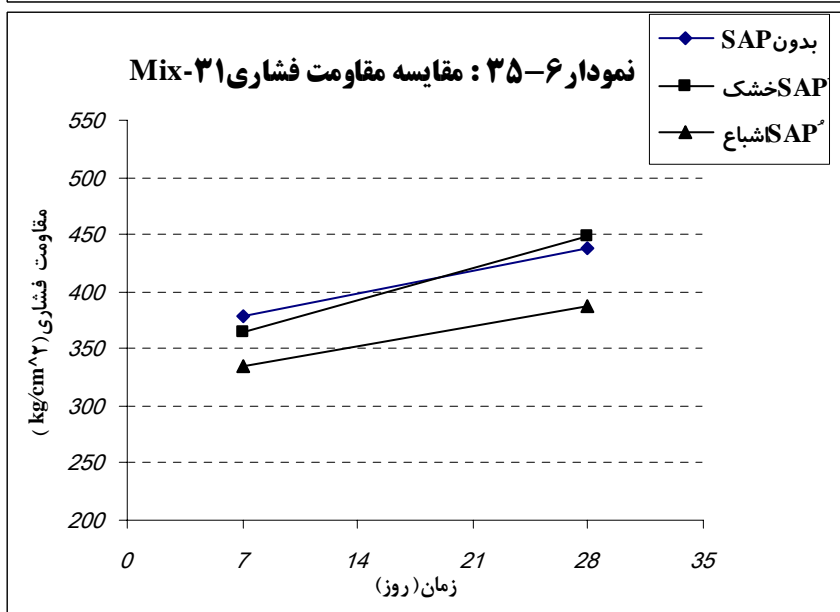
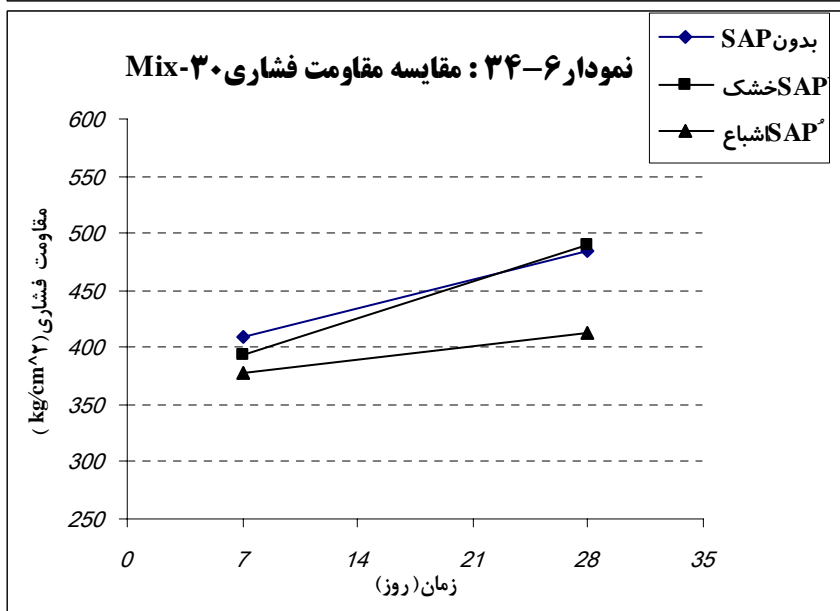
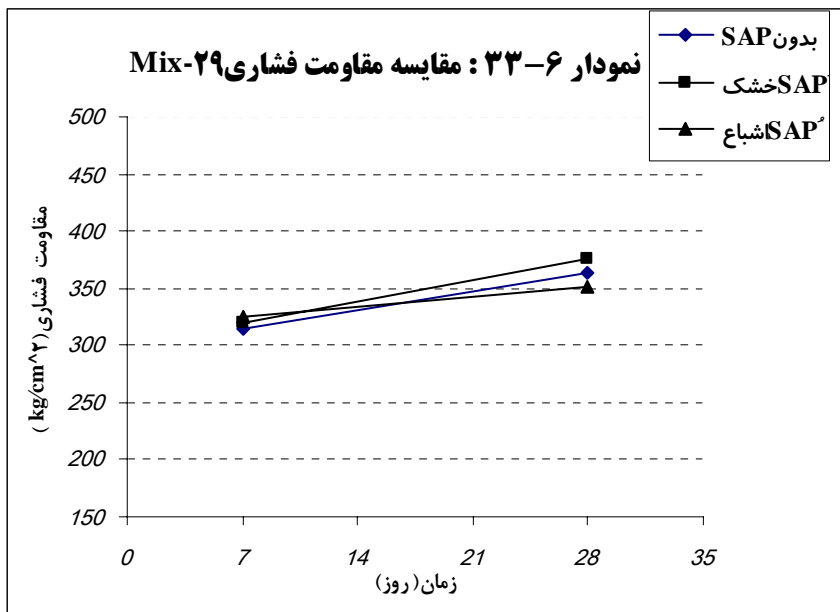
۴-۵-۶ نتایج عمل آوری تناوبی و عمل آوری داخلی بر روی مقاومت و مقایسه آنها:

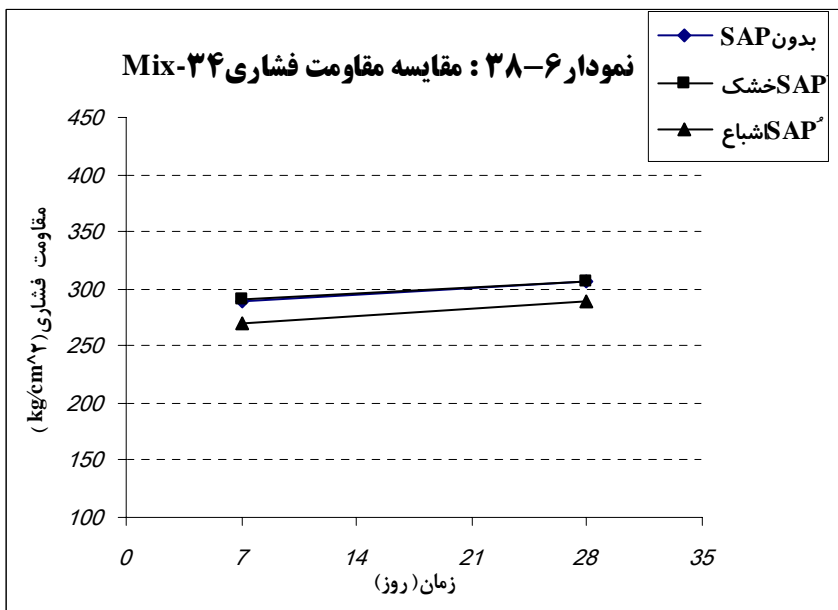
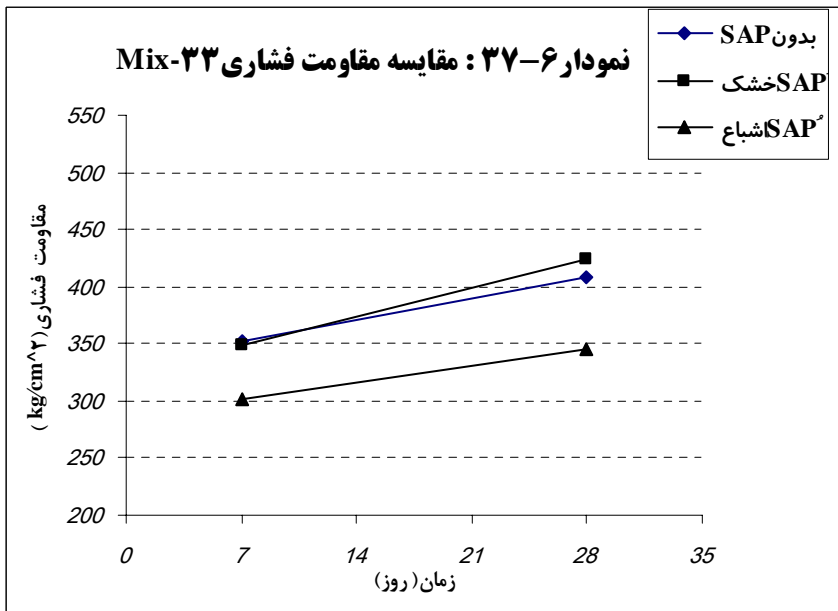
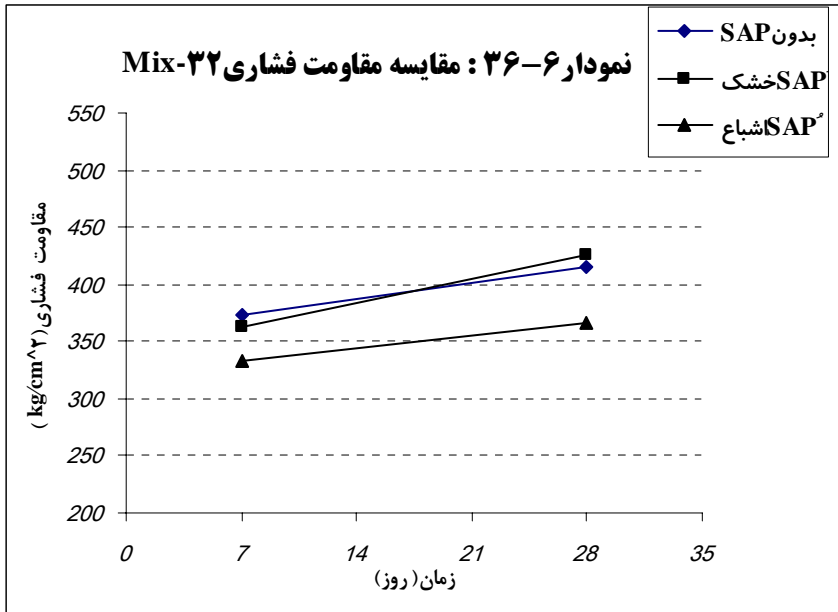
شرایطی که در سطح کارگاه برای عمل آوری بتن استفاده می شود، معمولاً به صورت عمل آوری تناوبی می باشد. که در بسیاری از مواقع به دلیل عدم حضور ناظر و بی توجهی کارگران این مسئله نیز فراموش می شود. لذا برای اینکه بتوان شرایط عمل آوری شده در سطح کارگاه را بیشتر مورد بررسی قرار داد طرح اختلاطهایی که در جدول ۶-۱۴ نشان داده شده است، ساخته شد. ماکزیمم اندازه سنگدانه های بکار گرفته شده در این قسمت $12/5 \text{ mm}$ می باشد. مشکل اساسی در این قسمت افت اسلامپ بدلیل ریزتر شدن سنگدانه ها، بود. لذا با افزایش بیشتر فوق روان کننده این مشکل تا حدودی مرتفع شد. نمونه های ساخته شد در این حالت بعد از قالب برداری در محیط باز نگهداری می شوند. نمونه های مرجع را هفته ای ۳ بار و در هر روز ۲ بار (صبح و بعدازظهر) آب داده می شد، تا شرایط عمل آوری تناوبی بر روی نمونه ها اعمال گردد. نتایج حاکی از این بود که نمونه های مرجع و نمونه ها با سوپر جاذب خشک از مقاومت های تقریباً یکسانی برخوردار می باشند.

جدول ۶-۱۴: طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلاب برای ماکزیمم اندازه ۲/۰mm (نمونه های بدون SAP هفتگی ای سه بار و در هر روز دوبار آب داده شده بقیه نمونه

ها در محیط باز نگهداری شده اند) ($\frac{kg}{m^3}$)

نام مخلوط	نوع	cement	سنگدانه		W	SAP	SP	W/C	SAP/C	SP/C	Shump (cm)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	
			0-4.75mm	4.75-12.5mm								۷ روزه	۲۸ روزه
Mix-29	SAP بدون	317	1109	739	158.5	-	2.57	0.5	-	0.8%	2	315	364
	SAP خشک	317	1109	739	158.5	0.0951	2.57	0.5	0.03%	0.8%	0	320	375
	SAP نیباع	317	1082	721	158.5	0.0951	2.57	0.5	0.03%	0.8%	5	325	352
Mix-30	SAP بدون	334	1088	725	167	-	2.67	0.5	-	0.8%	3	410	485
	SAP خشک	334	1089	726	167	0.1	2.67	0.5	0.03%	0.8%	3.5	393	490
	SAP نیباع	334	1059	706	167	0.1	2.67	0.5	0.03%	0.8%	5	377	412
Mix-31	SAP بدون	333	1081	721	173.2	-	1.66	0.55	-	0.5%	4	378	438
	SAP خشک	333	1081	721	173.2	0.1	1.66	0.55	0.03%	0.5%	2	365	448
	SAP نیباع	333	1042	695	173.2	0.0832	1.66	0.55	0.025%	0.5%	5.5	334	387
Mix-32	SAP بدون	352	1042	695	193.6	-	1.76	0.55	-	0.5%	3	374	415
	SAP خشک	352	1042	695	193.6	0.1056	1.76	0.55	0.03%	0.5%	2	362	425
	SAP نیباع	352	1016	677	193.6	0.088	1.76	0.55	0.025%	0.5%	4	333	367
Mix-33	SAP بدون	398	982	655	218.9	-	0.796	0.55	-	0.2%	8	353	409
	SAP خشک	398	982	654	218.9	0.119	0.796	0.55	0.03%	0.2%	6	348	424
	SAP نیباع	398	954	636	218.9	0.1	0.796	0.55	0.025%	0.2%	9	302	346
Mix-34	SAP بدون	317	1065	710	190.2	-	0.95	0.6	-	0.3%	3.5	289	307
	SAP خشک	317	1065	710	190.2	0.0951	0.95	0.6	0.03%	0.3%	2	291	307
	SAP نیباع	317	1041	694	190.2	0.0792	0.95	0.6	0.025%	0.3%	4	269	289





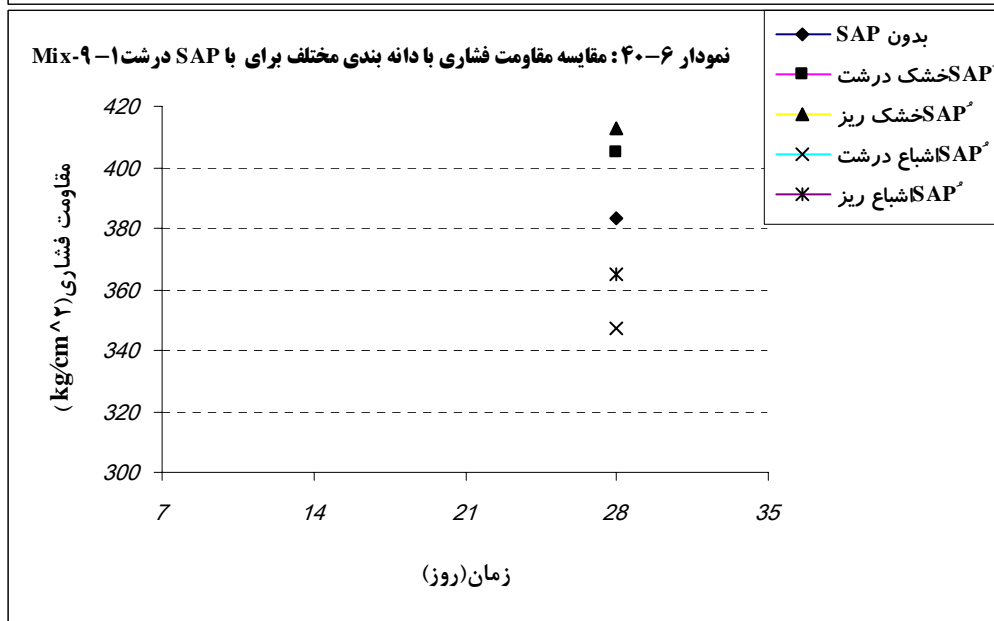
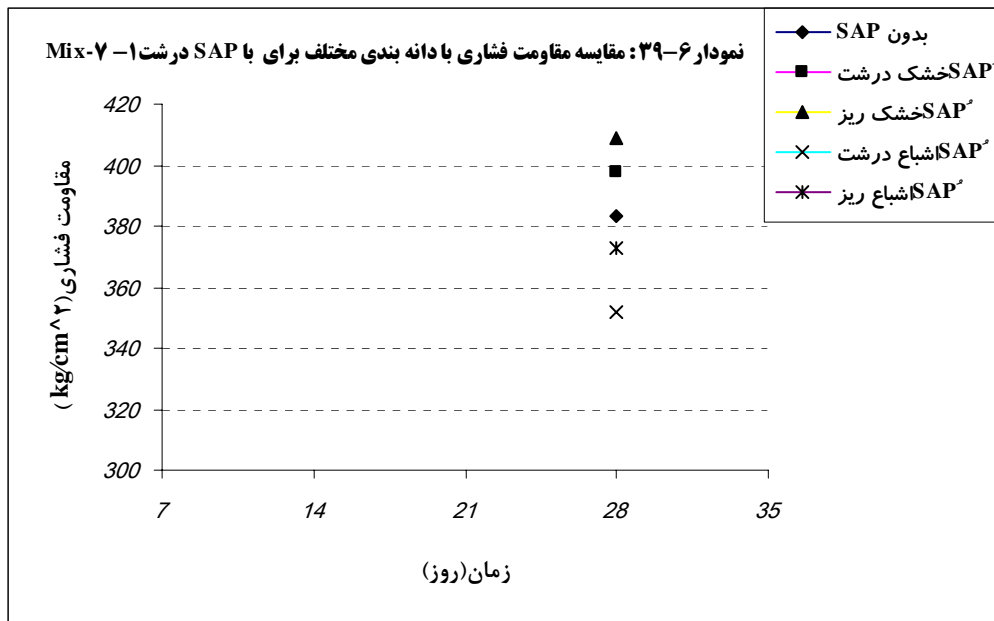
۵-۵-۶ نتایج مربوط به دانه بندی سوپرجاذبها بروی مقاومت و کارایی:

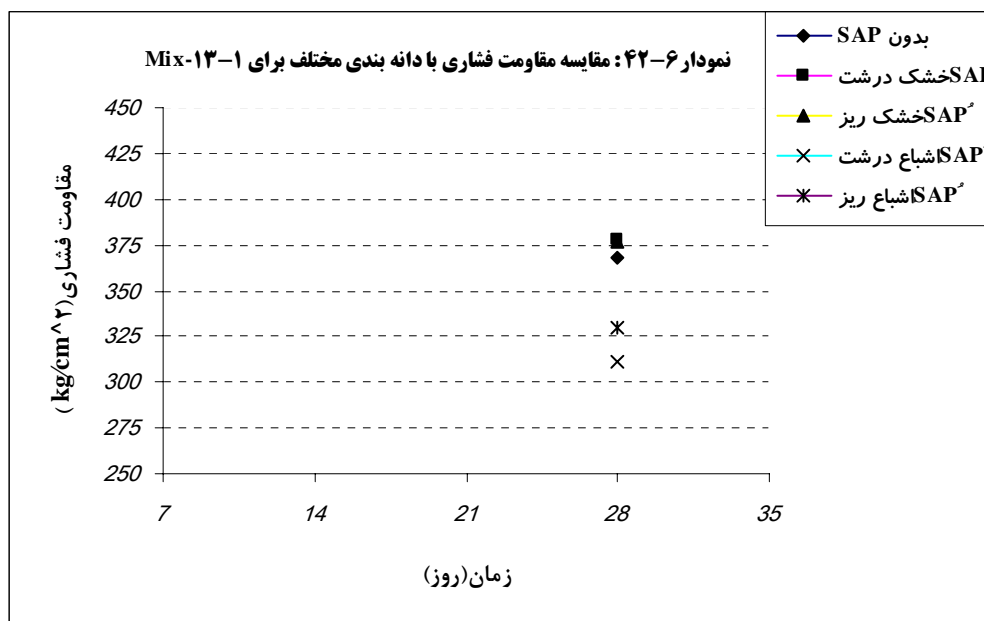
انتظار می رود که بتن های ساخته شده با دانه بندی مختلفی از سوپرجاذبها اثرات متفاوتی بر روی مقاومت و کارایی بگذارند. در محیطهای غیر یونی سوپرجاذبهای درشت دارای سرعت جذب کمتر، اما ظرفیت جذب یکسانی نسبت به دانه های ریزتر دارند. در مجموع باید به این نکته اشاره کرد که سوپرجاذبها درشت در جذب کمتری نسبت به دانه ریزتر در مخلوطهای بتنی از خود نشان می دهند. سوپرجاذبها با دانه بندی ریز پخش شدگی مناسبتری در بتن داشته و باعث بهتر شدن و افزایش هیدراسیون در داخل بتن خواهند شد. دانه بندی ریز می تواند با قرار گیری در نقاط مختلف و آزاد کردن آب جذب شده توسط آنها با کاهش رطوبت داخلی بتن، شرایط خوبی برای فرایند هیدراسیون فراهم آورند.

برای بررسی اثر دانه بندی درشت بر روی مقاومت و کارایی طرح اختلاطهای (Mix7, Mix9, Mix11, Mix13) را با استفاده از سوپرجاذبها با میانگین ذرات $450\mu\text{m}$ ساخته شد. نتایج در جدول ۶-۱۵ نشان داده شده است. در نمونه های ساخته شده در این حالت هیچ گونه تغییر قابل ملاحظه ای در مقاومت و کارایی مشاهده نمی شود. فقط در نمونه های ساخته شده با سوپرجاذب اشباع افت ناچیزی در مقاومت قابل مشاهده می باشد. که یکی از دلایل آن می تواند وجود سوپرجاذبهای اشباع با قطر بزرگ و ایجاد حفرات زیاد در بتن باشد.

جدول ۶-۱۵، طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و اسلامپ با ماکزیمم اندازه ۹ mm برای طرح اختلاطهای Mix-7، Mix-9، Mix-11، Mix-13، نتایج از SAP درشت با میانگین اندازه ۴۵۰ μm استفاده شده است. (کلیه نمونه های در محیط باز نگهداری می شود) ($\frac{kg}{m^3}$)

نام مخلوط	نوع	cement	سنگدانه (mm)			W	SAP	SP	W/C	SAP/C	SP/C	Slump (cm)	مقاومت فشاری (kg/cm^2)	
			0-4.75	4.75-12.5	12.5-19								۷ روزه	۲۸ روزه
Mix-7-1	SAP بدون	353	717	537	537	176	-	1.76	0.5	-	0.5%	5	354	383
	SAP خشک	353	711	533	533	181.8	0.106	1.76	0.5+0.015	0.03%	0.5%	4.5	-	398
	SAP نسیج	353	697	522	522	176	0.106	1.76	0.5	0.03%	0.5%	6	-	352
Mix-9-1	SAP بدون	347	738	553	553	156	-	2.77	0.45	-	0.8%	7	355	383
	SAP خشک	347	732	550	550	161.3	0.104	2.77	0.45+0.015	0.03%	0.8%	4	-	405
	SAP نسیج	347	722	741	741	156	0.086	2.77	0.45	0.025%	0.8%	6	-	347
Mix-11-1	SAP بدون	341	710	532	532	187	-	1.023	0.55	-	0.3%	3.5	289	317
	SAP خشک	341	705	528	528	192.6	0.1023	1.023	0.55+0.015	0.03%	0.3%	6	-	345
	SAP نسیج	341	693	519	519	187	0.092	1.023	0.55	0.027%	0.3%	5	-	302
Mix-13-1	SAP بدون	336	698	524	524	202	-	0.336	0.6	-	0.1%	4	321	368
	SAP خشک	336	693	519	519	206.6	0.1	0.336	0.6+0.015	0.03%	0.1%	4	-	378
	SAP نسیج	336	681	510	510	202	0.09	0.336	0.6	0.027%	0.1%	7	-	311



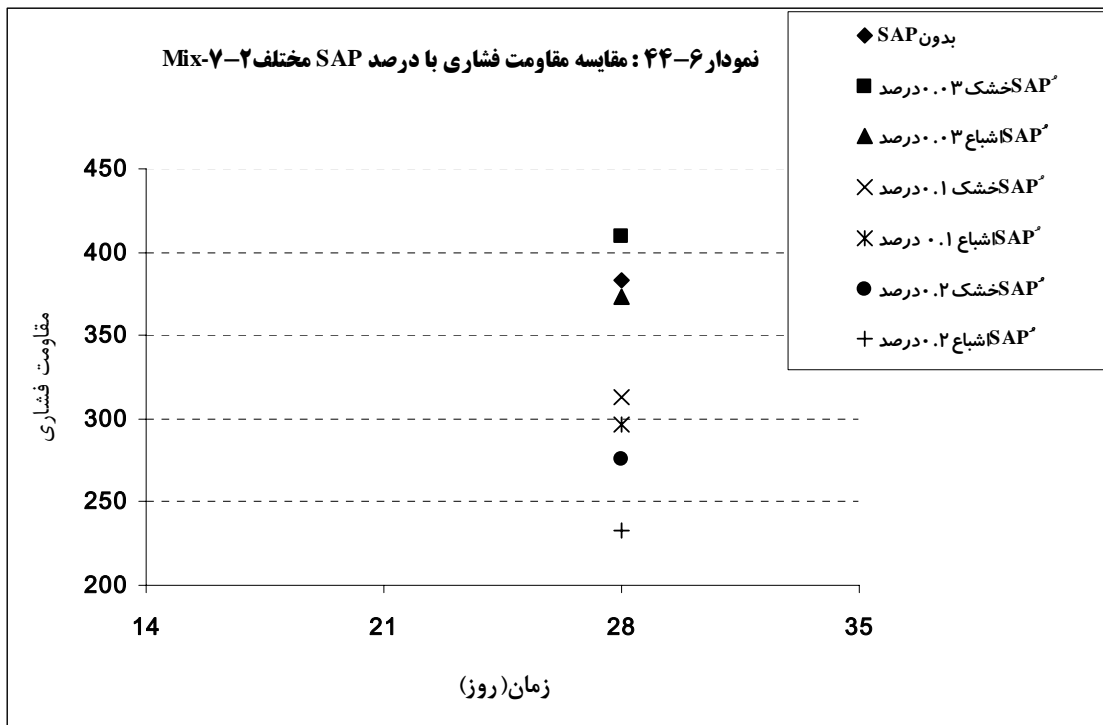


۶-۵-۶ نتایج مربوط به میزان مصرف سوپرجاذبها بر مقاومت و کارایی :

با توجه به اینکه در صنعت سوپرجاذبهای مختلفی وجود داشته که خواص هر کدام از آنها با دیگری متفاوت می باشد، نمی توان از درصدهای ارائه شده در مقالات برای تخمین زدن میزان مصرف آنها در بتن استفاده کرد. در برخی از مقالات این مقدار به ۰/۲٪ وزن سیمان و در برخی دیگر به ۰/۰۵٪ وزن سیمان کاهش داده شده است. به طور قطع هر چقدر میزان جذب این مواد بیشتر باشد، باید مقدار مورد استفاده در بتن نیز کاهش یابد. برای مثال ظرفیت جذب نمونه های ساخته شده با مقدار ۰/۲٪ وزن سیمان، ۲۰ برابر وزن اولیه اش می باشد [۳۳]. مطمئناً در مورد سوپرجاذب A۲۰۰ که دارای ظرفیت جذبی نزدیک به ۱۹۰ برابر وزن اولیه اش می باشد، این مقدار باید کاهش داده شود. زیرا در حالتیکه این مواد به صورت خشک به بتن اضافه می شوند باید آب زیادی جهت اشباع کردن آنها به بتن اضافه کرد که با اضافه شدن این مقدار آب خواص بتن دچار تغییر می شود. در حالت اشباع نیز با بالا رفتن میزان مصرف آنها، آب اضافی زیادی وارد بتن می شود که در کلیه موارد با کاهش مقاومت همراه خواهد بود. لذا برای بررسی بهتر این نمونه هایی با درصد سوپرجاذب بالا ساخته شد. که در کلیه آنها با کاهش مقاومت همراه خواهد بود. برای مثال مقادیر ۰/۲٪ و ۰/۱٪ وزن سیمان برای Mix7 در جدول ۶-۱۶ ارائه شده است. همانطور که از نتایج پیداست افت قابل توجهی در مقاومت بوجود خواهد آمد.

۱۶-۶. طرح اختلاط و نتایج مقاومت فشاری و سلاسیب با ماکزیمم اندازه ۹mm برای Mix-9 با درصد SAP بیشتر (کلیه نمونه ها در محیط بار نگهداری می شود) $\frac{kg}{m^3}$

نام مخلوط	نوع	cement	سنگدانه (mm)			W	SAP	SP	W/C	SAP/C	SP/C	Slump (cm)	مقاومت	
			0-4.75	4.75-12.5	12.5-19								۷ روزه	۲۸ روزه
Mix-7-2	SAP بدون	353	717	537	537	176	-	1.76	0.5	-	0.5%	5	354	383
	SAP متسک	353	693	520	520	197	0.035	1.76	0.5+0.06	0.1%	0.5%	4	-	313
	SAP نیایع	353	649	487	487	176	0.353	1.76	0.5	0.1%	0.5%	9	-	296
Mix-7-3	SAP بدون	353	717	537	537	176	-	1.76	0.5	-	0.5%	5	355	383
	SAP متسک	353	686	515	515	204.7	0.706	1.76	0.5+0.08	0.2%	0.8%	4	-	276
	SAP نیایع	353	582	436	436	176	0.706	1.76	0.5	0.2%	0.8%	13	-	233



فصل هفتم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱ نتیجه گیری :

این تحقیق به منظور بررسی اثر عمل آوری داخلی بر روی مقاومت و کارایی بتن با استفاده از سوپرجاذبها (SAP) انجام گرفت. در ابتدا به منظور رسیدن به یک مقدار بهینه ای که بتوان از آن به عنوان یک ماده عمل آورنده استفاده کرد، طرح اختلاطهایی با مقادیر مختلف SAP ساخته شد. تا اینکه به مقداری که بتواند اثر مثبتی بر روی بتن بگذارد رسیدیم. سپس با توجه به تعریف مدل پاورز نمونه هایی را مورد بررسی قرار دادیم. به منظور بهتر کردن عملکرد بتن های کارگاهی و بررسی این مواد بر روی این نوع از بتن ها آزمایشاتی صورت گرفت.

پس از مراحل مختلف کار آزمایشگاهی نتایج زیر حاصل شد :

- ۱- سرعت و میزان جذب این مواد بسته به شرایط آب و هوایی (دما)، نوع آب، دمای آب، اندازه دانه و نوع آزمایش انجام گرفته، متفاوت می باشد. با افزایش دمای محیط و آب سرعت جذب این مواد بیشتر می شود. به علت قرار گیری این مواد در داخل بتن و تغییر شرایط محیطی مقدار و سرعت جذب این مواد به شدت تغییر خواهد کرد. به طوریکه میزان جذب این مواد تحت تأثیر مصالح مصرف شده در بتن و دانه بندی آنها قرار دارد. با افزایش مقدار سیمان مصرفی در داخل بتن به نظر می رسد که مقدار جذب این مواد نیز کاهش پیدا می کند. همچنین هر چقدر دانه بندی آنها نیز کوچکتر باشد، میزان جذب آنها افزایش پیدا می کند.
- ۲- به نظر می رسد مدل پاورز با این نوع از سوپرجاذبها وابسته به مقدار آب مورد نظر برای عمل آوری داخلی اثرات متفاوتی بر روی مقاومت و کارایی بتن می گذارد. با کاهش مقدار آب داخلی و به دنبال آن کاهش مصرف سوپرجاذب با افزایش مقاومت روبه رو خواهیم بود.
- ۳- میزان مصرف این مواد در داخل بتن بهتر است با توجه به میزان سیمان مصرفی تعیین شود. هر چقدر سیمان مصرفی در داخل بتن افزایش یابد این مواد اثرات منفی بر روی مقاومت خواهند گذاشت. لذا در حالتیکه درصد سیمان مصرفی افزایش یابد، باید نسبت وزن این مواد به سیمان کاهش داده شود تا درصد مصرف این مواد در داخل بتن نیز کاهش یابد. به عبارت دیگر نسبت وزن سوپرجاذب مصرفی به سیمان، ثابت فرض شود. با توجه به آزمایشات انجام گرفته به نظر می رسد در حالتیکه سوپرجاذبها به صورت خشک به بتن اضافه می شوند مقدار این مواد در هر مترمکعب بتن بین ۹۵-۱۰۵ گرم باشد. در حالت اشباع نیز این مقدار به ۹۵-

۸۵ گرم کاهش پیدا می کند. باید دقت کرد که با مصرف بیش از حد سوپرجاذبها در بتن با کاهش مقاومت مواجه خواهیم بود.

۴- نمونه های ساخته شده در حالت خشک با کاهش اسلامپ همراه خواهند بود. که باید با استفاده از اضافه کردن مقداری آب اضافی یا فوق راون کننده این مشکل را برطرف کرد. آب اضافه شده به نظر می رسد که اثر چندانی برروی مقاومت نخواهد گذاشت در واقع در این حالت شاهد روند افزایشی مقاومت هستیم. در مورد نمونه های ساخته شده به صورت اشباع، که به ازای هر گرم سوپرجاذب اضافه شده ۱۹۰ برابر آب جهت اشباع آنها به بتن اضافه می شد، مسئله کاملاً تغییر پیدا می کند. در این حالت با کاهش مقاومت مواجه خواهیم بود. که دلیل اصلی آن هم اضافه شدن مقدار زیادی آب اضافی برای اشباع سوپرجاذبها به بتن می باشد.

۵- مطمئناً سرعت جذب این مواد در آب معمولی و بتن با هم متفاوت می باشد. با توجه به آزمایشات انجام گرفته می توان نتیجه گرفت که در ۵ دقیقه ابتدایی زمان اختلاط سرعت جذب بالا بوده بطوریکه سوپرجاذبها بیشتر آب لازم را جذب خواهند کرد.

۶- با توجه با آزمایشات صورت گرفته، به نظر می رسد با تغییر اندازه سوپرجاذبها در داخل بتن و درشتتر شدن آنها بسته به نحوه اضافه کردن آنها اثرات مختلفی برروی مقاومت و اسلامپ خواهند گذاشت. در حالتیکه این مواد به صورت خشک به بتن اضافه می شوند تغییر قابل ملاحظه ای بر روی مقاومت نخواهند گذاشت. ازطرفی مقدار اسلامپ را هم به مقدار ناچیزی کمتر کاهش می دهند. اما در حالت اشباع با کاهش مقاومت همراه خواهد بود.

۷- در بتن های ساخته شده با میکروسیلیس به نظر می رسد که اثر این مواد برروی مقاومت بهتر باشد. حتی با قرار گیری نمونه مرجع در داخل آب مقاومت تغییر چندانی نخواهد کرد.

۸- هنگامیکه سنگدانه ها به صورت خشک پیمانان و مخلوط می شوند، اگر مقدار جذب بیش از تقریباً یک درصد باشد، و اگر ساختار حفره ای داخلی ذرات سنگدانه بگونه ای باشد که بخش عمده ای از جذب آب در مدت زمان پیش از گیرش اولیه بوقوع بپیوندد، ممکن است بعلت کاهش آب اختلاط، افت اسلامپ به طور قابل ملاحظه ای کاهش یابد. همچنین نسبت آب به سیمان مؤثر نیز به علت کاهش آب مخلوط به علت جذب سنگدانه ها کاهش می یابد [۲۱].

استاندارد ASTM C192 پیشنهاد می کند که در حالتیکه سنگدانه ها به صورت خشک وارد مخلوط می شوند مقدار آب جذب شده برابر با ۸۰ درصد اختلاف بین مقدار واقعی آب در حفره های سنگدانه ها در حالت خشک شده در هوا با مقدار واقعی جذب سنگدانه ها، در نظر گرفته شود.

۹- در آزمایشها صورت گرفته مشخص شد که با کاهش ماکزیمم اندازه ذرات دانه بندی شده و به عبارت دیگر با ریزتر شدن مصالح سنگی کارآیی بتن به طور کلی تغییر خواهد کرد. در واقع در این حالت با بهتر شدن کارآیی روبه رو خواهیم بود. به طوریکه برای دو مخلوط با درصدها یکسانی از سیمان و آب، اما با دانه بندی متفاوت اختلاف زیادی در اسلامپهای اندازه گیری شده با هم دارند. در واقع در این حالت با بهتر شدن کارآیی روبه رو خواهیم بود.

۲-۷-۲-۷ پیشنهادات :

۱- در این تحقیق تنها از یک نوع سوپرجاذب (A۲۰۰) استفاده شد. با توجه با اینکه سوپرجاذبها شاخه ای از هیدروژلها می باشند و این خانواده از مواد شیمیایی دامنه وسیعی را به خود اختصاص می دهند پیشنهاد می شود که از سوپرجاذبهای دیگری که در بازار موجود می باشند استفاده شود. حتی جاذبهای معمولی نیز وجود دارند که میزان جذب آنها به مراتب کمتر از سوپرجاذبها می باشد.

۲- با توجه به مشکلات بسیار زیادی که پدیده انقباض خودبخودی بر روی بتن های با عملکرد بالا بوجود می آورد و باعث ترک خوردگی آنها در سنین اولیه بتن می شود و بر روی عملکرد آنها در دراز مدت اثر می گذارد، لذا پیشنهاد می شود که با توجه به تجهیزات اندازه گیری موجود در بازار و با استفاده از سوپرجاذبها این اثرات را مورد بررسی قرار داد.

۳- با توجه به اینکه شناخت میکروساختار بتن و تغییرات آن در حالت عمل آوری داخلی، از اهمیت بسیار ویژه ای برخوردار است، لذا پیشنهاد می شود تست هایی جهت بررسی میکروساختار بتن انجام شود.

- ۴- یکی دیگر از مواد مصرفی جهت عمل آوری داخلی بتن مصالح سنگی سبک (LWA) می باشد که انواع مختلفی از آنها در کارهای آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته است. لذا پیشنهاد می شود که اثر عمل آوری داخلی با استفاده از این مواد نیز مورد بررسی قرار گیرد.
- ۵- یکی از مهمترین خواص بتن در محیطهای خورنده، دوام بتن می باشد. با توجه به اینکه تاکنون آزمایش کاملاً استاندارد بروی دوام بتن های عمل آوری شده به صورت داخلی صورت نگرفته است، لذا پیشنهاد می شود که این مسئله بسیار مهم در آزمایشاتی استاندارد مورد بررسی قرار گیرد.

- 1- Pietro Lura, "Autogenous Deformation and Internal Curing of Concrete", thesis submitted for the degree of PHD, Jan 2003.
- 2-Lura P, Bentz DP, Lange DA, Kovler K, Bentur A, van Breugel K (2003) "Measurement of water transport from saturated pumice aggregates to hardening cement paste." In: Lange D, Scrivener KL, Marchand J (eds) *Proc. Advances in cement and concrete IX: Volume changes, cracking, and durability*. ECI, USA, Copper Mountain, Colorado, pp 89–99
- 3- Pietro Lura. "Internal water curing with Liapor aggregates." *Department Civil Engineering Technical University of Denmark. HERON, Vol. 50, No 1 (2005)*.
- 4- Lura P, Bentz DP, Lange DA, Kovler K, Bentur A (2004) "Pumice aggregates for internal water curing." In: Kovler K, Marchand J, Mindess S, Weiss J (eds) *PRO 36: Proc. Int. RILEM Symp. on concrete science and engineering – a tribute to Arnon Bentur, 24 March, 2004, Northwestern University, Evanston, Illinois, RILEM Publications, S.A.R.L., pp 137–151*
- 5-, Pietro Lura, Sven Mönig " Superabsorbent Polymers – An Additive to Increase the Freeze-Thaw Resistance of High Strength Concrete". *Cement and Concrete Research 31 (2007)*.
- 6-Pietro Lura, Jan Bisschop "On the origin of eigenstresses in lightweight aggregate concrete." *Cement & Concrete Composites 26 (2004) 445–452*
7. Jensen OM, Hansen PF (2001) "Water-entrained cementbased materials – I. Principles and theoretical background." *Cem Concr Res 31(4):647–654*
- 8 - Jensen OM, Hansen PF (2002) "Water-entrained cementbased materials – II. Experimental observations." *Cem Concr Res 32(6):973–978*

9-Ole Mejlhede Jensen . Pietro Lura" Techniques and materials for internal water curing of concrete". 13 July 2006 _ RILEM 2006

10 -Jensen OM, P.F.Hansen," Models to support justification for internal water curing", *Materials & Structures*, V. 27, No. 174, 2005, pp. 606-615.

11-Dale P. Bentz., " Internal Curing of High-Performance Blended Cements Mortars." *ACI Materials Journal*, V. 104, No, July-agust 2007

12- Dale P. Bentz, "Fibers, Percolation, and Spalling of High-Performance Concrete." *Reprinted from American Concrete Institute(ACI) Materials Journal*, Vol. 97, No. 3,351-359, May-June 2000.

13- Dale P. Bentz, "Low Temperature Calorimetry Studies of Hydrating Portland Cement Pastes." *Materials and Construction Research Division Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899-8615. October 2005.*

14- Dale P. Bentz," Capillary Porosity Depercolation/Repercolation in Hydrating Cement Pastes Via Low-Temperature Calorimetry Measurements and CEMHYD3D Modeling." *J. Am. Ceram. Soc.*, 89 [8] 2606–2611 (2006).

15- Bentz DP, Jensen OM(2004) "Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking." *Cem Comp* 26(6):677-685.

16-Dale P. Bentz, Phillip M. Halleck, Abraham S. Grader, and John W. Roberts., " Water Movement during Internal Curing." *Concrete international / October 2006.*

17-D.P. Bentz , K.K. Hansen,"Preliminary observation of movement in cement pastes during curing using X-ray absorption." *Cement and Concrete Research* 30(2000) 1157-1168.

18- D.P. Bentz, M.R. Geiker, and O.M. Jensen." Mitigating Autogeneous Shrinkage by Internal Curing." *Reprinted from High-Performance Structural Lightweight Concrete, American Concrete Institute Special Publication 218, John P. Ries and Thomas A. Holm, eds., pp. 143-148, 2004.*

19 - Hoa Lam., "Effects of Internal Curing Methods on Restrained Shrinkage and Permeability." *thesis for fulfillment of PhD work at the University of Toronto(2005).*

20- D Bentzm B Persson and L-O Nilsson." Self-desiccation and its importance in concrete technology." *Proceedings of the Fourth International Research Seminar, Gaithersburg, Maryland, USA, June, 2005.*

21-Neville AM and J.J Brooks, " Concrete Technology," *copublished in the United states with John Wiley & Sons, Inc.(1987).*

22- T. C. Powers," Physical Properties of Cement Paste", *Reprinted from Chemistry of Cement Proceedings of the Fourth International Symposium Washington, D. C., 1960, Paper V-1, 577-60.*

23 – T. C. Powers, "A Discussion of Cement Hydration in Relation to the Curing of Concrete", *Authorized Reprint from Copyrighted Proceeding of The Highway Research Board Volume 27, 1947.*

۲۴ - مستوفی نژاد. مسعود. "سازه های بتن آرمه" دانشگاه صنعتی اصفهان. پائیز ۱۳۸۳

۲۵- پرفسور ولفگانگ چرنین "شیمی و فیزیک سیمان برای مهندسين راه و ساختمان" مترجم : مهندس عزیزیان .
شرکت مهندسی و قطعات سیمان ایران. بهار ۱۳۶۴

26-Buchholz F. L.,Graham, A. T.; *Modern Superabsorbent Polymer Technology , Wiley-VCH, New York; 2, 97-132, 140, 152-158, 174-176, 187-127 ; (1998).*

27-Brannon-Peppas L., Harland R. S.; *Absorbent Polymer Technology, Elsevier, Amesterdam; 9, 33 , 99 ;(1990).*

۲۸- سوپر جاذبها؛ محمد جلال ظهوریان مهر؛ استادیار پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران

29-Konstantin kovler and Ole. Jensen., "Novel Techniques for Concrete Curing".*Concrete international / SEPTEMBER 2005.*

30- Dhir, R.K.; Hewlett, P.C.; Lota, J.S.; and Dyer, T.D., "An Investigation into the Feasibility of Formulating 'Self-Cure' Concrete," *Materials & Structures*, V. 27, No. 174, 1994, pp. 606-615.

31- Daniel Cusson and Ted Hoogeveen "Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked lightweight aggregate sand for prevention of autogenous shrinkage cracking." *National Research Council Canada, Ottawa, Ontario, Canada, KIA OR6(2008)*.

32-Karen Friedemann, and Wiete Schoönfelder, and Frank Stallmach, and Joörg Ka¨rger., "NMR relaxometry during internal curing of Portland cements by lightweight aggregates." *Materials and Structures DOI 10.1617/s11527-008-9355-0*. 9 January 2008.

33-Véronique Baroghel-Bouny and Pierre Mounanga,. 'Effects of Self-Desiccation on Autogenous Deformation, Micros Tructure and Longterm Hygral Behaviour." *Proceedings of the Fourth International Research Seminar, Gaithersburg, Maryland, USA, June, 2005*.

34- Luís P. Esteves, Paulo Cachim, Victor M. Ferreira., " Mechanical properties of cement mortars with superabsorbent polymers." *Cement and Concrete Research 31 (2007)*.

35- Zhutovsky S, Kovler K, Bentur A (2004) "Assessment of distance of water migration in internal curing of high-strength concrete." *In: Jensen OM, Bentz DP, Lura P (eds) ACI SP- 220 Autogenous deformation of concrete. Farmington Hills, Michigan, pp 181–197*.

36- Weber and Reinhardt(1997)." How far can the water travel?". *Cem Concr Comp 18(1):67–76*.

37- Zhutovsky S, Kovler K, Bentur A (2002)" Efficiency of lightweight aggregates for internal curing of high strength concrete to eliminate autogenous shrinkage." *Mater Struct 35(246):97–101*

38- Sellevold EJ, Bjøntegaard Ø(2003)" Thermal expansion coefficient (CTE) of cement paste and concrete: Effect of Moisture Content. "In: *Lange D, Scrivener KL, Marchand J (Eds) Advances in cement and concrete IX: volume changes, cracking, and durability, ECI, USA, Copper Mountain, Colorado, pp 27–37*

39-Amir Elsharief, Menashi D. Cohen, Jan Olek. "Influence of lightweight aggregate on the microstructure and durability of mortar." *Cement and Concrete Research 35 (2005) 1368–1376.*

40- A.S. El-Dieb," Self-curing concrete: Water retention, hydration and moisture transport." *Construction and Building Materials 21 (2007) 1282–1287*

41-"Internal Curing Using Expanded Shale, Clay and Slate Lightweight Aggregate." *The text and references are from ASTM 169D Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete Making Materials, Chapter 46 – “Lightweight Concrete and Aggregate,” American Society of Testing Materials, West Conshohocken, PA 2006. (I) was developed by ESCSI and is not in Chapter 46*

Abstract

There are many factors involved in production cost of concrete structures. One of the most important factors is concrete curing. It has significant effect on strength and durability of the concert. Generally curing is the procedures used for promoting the hydration of cement through the temperature control and moisture movement between out and inside concrete.

One new method in concrete curing is called internal curing. Unlike conventional curing ,in internal curing the needful water for hydration is provided by excess water is kept cement paste. The excess water is stored in particles made of superabsorbent polymers(SAPs) and is gradually released for cement hydration.

In the research, the effect of internal curing of concrete on its workability and strength is studied. In site concrete, active curing is stopped before hydration is completed. Studding effect of super absorbent polymers on mechanical properties of site concert is the main target of the research. The other targets of this reset is obtaining thee optimum mix design for construction materials and polymers available in IRAN.

A series of laboratory work is carried out for simulating the site concrete condition. In the first phase, a complete study on available superabsorbent polymers is done. In the second phase on the properties of internally cured concrete i.e. workability and compressive strength was investigated. The results show that internal of curing by using SAPs can keep the concrete quality while avoiding unreadable and costly conventional curing.

Keywords : internal curing of concrete , workability , compressive strength durability , superabsorbent polymers.



Shahrood University of Technology

Faculty OF Civil Engineering Department

Effects of Internal curing on Concrete Strength and Workability

Ghasem Meyghani

Supervisor:

Dr. Ali Keyhani

February 2009