بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده عمران و معماری

عنوان پایان نامه :

اثر میکروسیلیس بر نرخ کسب مقاومت بتن

استاد راهنما :

دکتر محسن طالب زاده

دانشجو:

داود تقاضایی اول

تقدیم به :

پدر ، مادر و همسر گرامیم ...

تشکر و قدردانی

با سپاس از زحمات بی شائبه استاد بزرگوار جناب آقای دکتر طالب زاده که در انجام این تحقیق ، دلسوزانه اینجانب را راهنمایی فرمودند .

همچنین از کلیه بزرگوارانی که به هر نوعی در هر مرحله از انجام این پایان نامه ، قبول زحمت فرموده یا متحمل سختی های فراوانی گشته اند تشکر می نمایم بخصوص از دوست عزیزم جناب آقای مهندس مهدی جامکلو صمیمانه قدردانی می کنم .

چکیده :

هیدروکسید کلسیم آزاد شده از هیدراسیون سیمان که ۲۰ تا ۲۵ درصد ملات بتن را تشکیل می دهد ، در واقع علت مهم زیان های وارده بر بتن است . SIO_2 می تواند هیدروکسیدکلسیم را به سیلیکات کلسیم تبدیل نماید که این امر باعث کاهش مضرات وارده بر بتن می شود .

میکروسیلیس علاوه بر دارا بودن بیش از ٪۹۰ SIO_2 ، از ذرات بسیار ریز حدود ۰,۲ میکرون تشکیل یافته است که خود موجب بهبود مشخصات و افزایش کسب مقاومت بتن می شود .

در این تحقیق سعی شده با بکاربردن این پوزولان ارزشمند (میکروسیلیس) در بتن ساخته شده با مصالح مصرفی شاهرود ، تاثیر آن بر مقاومت فشاری در نسبت های مختلف آب به سیمان بررسی گردد .

نتایج آزمایش ها نشان می دهند که به طور کلی میکروسیلیس بر افزایش مقاومت بتن اثر مثبت داشته و برای نسبت های آب به سیمان بالاتر به درصدهای بیشتری از میکروسیلیس جایگزین سیمان نیاز می باشد .

کلمات کلیدی : بتن ، میکروسیلیس ، مقاومت فشاری ، مصالح شاهرود

« فهرست مطالب »

فصل اول – مقدمه

۱-۱ کلیات ۱

۱-۲ میکروسیلیس ۲

۱-۳ خواص فیزیکی میکروسیلیس ۳

۱-۴ خواص شیمیایی میکروسیلیس ۴

۱-۵ واکنش شیمیایی میکروسیلیس در بتن ۵

۱-۶ هدف تحقیق ۶

۱-۷ اصول کلی تحقیق و برنامه ریزی مطالعات ۷

۱-۸ تقسیم بندی فصول پایان نامه ۷

فصل دوم – مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱ اثر میکروسیلیس در بتن تازه ۹

۲-۲ اثر میکروسیلیس در بتن سفت شده ۱۳

۲-۲-۱ مقاومت فشاری ، کششی ، خمشی ۱۳

۲-۲-۲ مدول الاستیسیته ۱۷

۲-۲-۳ ظرفیت کرنش ۱۸

۲-۲-۴ نسبت پواسون ۱۹

۲-۲-۵ مقاومت پیوستگی ۲۰

۲-۲-۶ افزایش مقاومت با عمر بتن ۲۰
۲-۲-۷ نفوذ پذیری ۲۱
۲-۲-۸ مقاومت در برابر خوردگی ۲۵
۲-۲-۹ مقاومت در برابر یخ زدن..... ۲۶
۲-۲-۱۰ مقاومت شیمیایی ۲۷
۲-۲-۱۱ مقاومت در برابر سایش و فرسایش ۳۰

فصل سوم – مقاومت فشاری بتن و عوامل موثر بر آن

۳-۱ مقدمه ۳۱
۳-۲ مقاومت فشاری و عوامل موثر بر آن ۳۲
۳-۲-۱ مشخصات و خواص مصالح ۳۲
۳-۲-۱-۱ نسبت آب به سیمان ۳۳
۳-۲-۱-۲ میزان هوا در بتن ۳۵
۳-۲-۱-۳ نوع سیمان ۳۶
۳-۲-۱-۴ سنگدانه ۳۸
۳-۲-۱-۵ آب اختلاط ۴۱
۳-۲-۱-۶ مواد افزودنی ۴۲
۳-۲-۲ شرایط عمل آوری ۴۳
۳-۲-۲-۱ زمان ۴۴
۳-۲-۲-۲ رطوبت ۴۵
۳-۲-۲-۳ درجه حرارت ۴۵

۳-۲-۲-۴ تاریخچه دما ۴۷
۳-۲-۳ عوامل موثر بر آزمایش ۴۹
۳-۲-۳-۱ پارامتر های نمونه ۴۹
۳-۲-۳-۲ شرایط بار گذاری ۵۱

فصل چهارم- مصالح مصرفی و تشریح برنامه آزمایشگاهی

۴-۱ مقدمه ۵۳
۴-۲ مصالح مصرفی ۵۴
۴-۲-۱ سنگدانه معمولی ریز دانه ۵۴
۴-۲-۲ سنگدانه معمولی درشت دانه..... ۵۵
۴-۲-۳ سیمان ۵۷
۴-۲-۴ فوق روان کننده ۵۷
۴-۲-۵ آب ۵۹
۴-۲-۶ میکروسیلیس ۶۰
۴-۳ طرح اختلاط های بتن ۶۱
۴-۴ نحوه عمل آوری نمونه های آزمایشی بتن ۶۱
۴-۵ نحوه نام گذاری طرح اختلاط ها ۶۲
۴-۶ روش طرح اختلاط ۶۲
۴-۷ مشخصات مصالح مورد استفاده ۶۴
۴-۸ مقادیر مصالح مصرفی در طرح اختلاط ها ۶۴
۴-۹ روش ساختن و عمل آوردن نمونه ها ۶۶

۴-۱۰ آزمایش تعیین مقاومت فشاری استوانه ای ۶۶

فصل پنجم – نتایج آزمایش ها

۵-۱ مقدمه ۶۷

فصل ششم – نتیجه گیری و پیشنهاد ها

۶-۱ مقدمه ۸۵

۶-۲ بحث در نتایج ۸۵

۶-۳ نتیجه گیری نهایی ۸۷

۶-۴ پیشنهاد ها ۸۸

ضمیمه : تصاویر ۹۰

مراجع ۱۰۵

فصل اول : مقدمه

۱ـ۱ کلیات

مواد افزودنی معدنی، مواد خوب تفکیک شده ای می باشند که در مقادیر مختلفی به بتن به منظور بهبود خواص آن افزوده می شوند. اگر چه پوزولانها به صورت خام یا بعد از فعال سازی حرارتی در برخی نقاط دنیا مورد استفاده قرار می گیرند، ولی به دلایل اقتصادی، بسیاری از زائدات صنعتی به عنوان منبع اصلی مواد افزودنی معدنی به کار گرفته می شوند. واحدهای نیروگاهی برقی که از زغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می کنند و کوره های متالوژیکی تولید چدن، فلز سیلسیم و آلیاژهای فروسیلسیم منبع اصلی مواد زائد صنعتی هستند که به میزان ده ها میلیون تن در سال در بسیاری از کشورهای صنعتی تولید می شوند. بیرون ریختن این مواد زائد صنعتی به منزله هدر دادن مواد و نیز سبب مسایل جدی آلودگی زیست محیطی می باشد.

مقادیر زیادی از محصولات زائد صنعتی پس از کنترل کیفیت می توانند در ساختن بتن به شکل سیمان پرتلند آمیخته یا به عنوان مواد افزودنی معدنی، بکار برده شوند. وقتی که خواص پوزولانی و یا سیمانی یک ماده طوری باشد که به عنوان جایگزین نسبی برای سیمان پرتلند در بتن بتواند به کار گرفته شود، صرفه جویی زیادی در انرژی و هزینه نتیجه خواهد شد. کاربرد

مواد افزدونی معدنی در بتن بهبود مقاومت در برابر ترک خوردگی حرارتی به علت حرارت کمتر هیدراسیون، زیادتر شدن مقاومت نهایی و نفوذ ناپذیری به خاطر بهبود وضعیت منافذ، و در نتیجه کاهش درجه قلیایی، دوام بهتر در مقابل حملات شیمیایی مانند آب سولفاتی و انبساط قلیایی- سنگدانه را نشان داده است [۱].

۱-۲ میکروسیلیس

دوده سیلیسی[۱] که با نامهای دیگری مانند سیلیس فرار، میکروسیلیس، گرد سیلیس نیز شناخته می شود، محصول زائد کوره های قوس الکتریکی القایی در صنایع تولید فلز سیلیسیم و آلیاژ فروسیلیسم است. تبدیل کوارتز به سیلیسم در دمایی حدود ۲۰۰۰ درجه سانتیگراد، تولید بخار SIO می کند که در ناحیه دمای کم به شکل ذرات کروی شکل کوچک شامل سیلیس غیر متبلور ، اکسیده و متراکم می گردد . ماده جمع آوری شده بوسیله فیلترهای کیسه ای گازهای خروجی ، دارای قطر متوسط حدود ۰/۱ میکرون و مساحت سطح در حدود $۲۰ \, m^2/gr$ تا ۲۵ می باشد.

در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی و خاکسترهای بادی[۲] متعارف، نمونه های دوده سیلیسی توزیع اندازه ذراتی را نشان می دهند که خیلی نرمتر هستند. این ماده بسیار پوزولانی است واز طرف دیگر مشکلات جا به جایی دارد ونیازمندی به آب را در بتن نیز به طور محسوس افزایش می دهد، مگر آنکه همراه با آن مواد افزودنی کاهنده آب به کار برده شوند [۱]. در ایران دو شرکت صنایع فروآلیاژ ایران و شرکت فروسیلیس ایران عهده دار تولید این ماده می باشند که در این تحقیق محصول شرکت فروسیلیس ایران که کارخانه تولید آن واقع در استان سمنان می باشد مورد استفاده قرار گرفت.

---

۱. Silica Fume

۲. Fly Ash

کوره های الکتریکی مذکورکه دوده سیلیس در آن تولید می شود در کیفیت میکروسیلیس حاصله نقش مهمی را ایفا می نماید. در صورتیکه کوره دارای سیستم بازیافت حرارتی باشد دمای گازهای خروجی حدوداً ۸۰۰ درجه سانتی گراد و رنگ میکروسیلیس حاصله به رنگ روشن خواهد بود لیکن در صورتیکه این کوره ها فاقد سیستم بازیافت حرارتی باشند به دلیل کاهش دمای گازهای خروجی که حدوداً ۲۰۰ درجه سانتی گراد می باشد و همچنین وجود مقداری کربن (که به نحوی سوخته نشده و در آن باقی مانده است) میکروسیلیس حاصله به رنگ خاکستری تولید می گردد [۱].

میکروسیلیس را می توان بصورت جامد و یا بصورت متراکم شده (Compacted) و یا مخلوط شده در آب (Water Based Slurry) و همچنین بصورت مخلوط شده با سیمان پرتلند مورد استفاده قرار داد.

۱-۳ خواص فیزیکی میکروسیلیس

رنگ میکروسیلیس که از حالت خاکستری روشن تا خاکستری تیره متغیر است به نظر می‌رسد میزان کربن و در مقیاس کمتری میزان آهن موجود در رنگ آن تأثیر خواهد داشت[۲].

چگالی میکروسیلیس بسته به نوع آلیاژ تولید شده ۲/۲ تا ۳/۱ می باشد و اگر چه اندازه ذرات آن متغیر است لیکن مشاهدات میکروسکوپ الکترونی نشان داده است که بیشتر ذرات کروی شکل و دارای قطر متوسط بین ۰/۱ تا ۰/۲μm می باشند که در مقایسه با ذرات سیمان با قطر متوسط حدوداً ۱۵ میکرون بسیار ریزدانه است [۳].

سطح مخصوص میکروسیلیس از ۲۰ تا ۲۵ متر مربع بر گرم اندازه گیری شده است این خصوصیت مهم یعنی دانه بندی ریز میکروسیلیس اثرات خوبی در پر کردن فضای بین ذرات سیمان و شن و ماسه داشته و باعث افزایش مقاومت بتن می گردد[۴].

وزن مخصوص ظاهری میکروسیلیس بصورت جامد از ۲۵۰ تا ۳۰۰ کیلوگرم در مترمکعب [۵] و بصورت متراکم حدود ۵۰۰ کیلوگرم در مترمکعب می باشد [۳].

ذرات میکروسیلیس کروی و با قطر ۰/۰۱ تا ۰/۳ µm می باشند که متوسط آنها بین ۰/۱ تا ۰/۲ µm اندازه گیری شده است [۳]. مطالعات میکروسکوپی انجام شده بر روی میکروسیلیس داخلی مبین آن است که حداقل اندازه دانه ها ۰/۰ ۳میکرون حداکثر اندازه ۰/۷۶۶ میکرون و متوسط اندازه دانه ها ۰/۲ میکرون می باشد. همچنین میکروسیلیس تولید داخل دارای دانه های کاملاً کروی بوده و نرمی بسیار زیاد و ساختار تجمعی آن سبب شده تا در هنگام مخلوط کردن وکار با بتن حاوی این مواد و همچنین افزایش تقاضای آب مخلوط بتن مشکلاتی به وجود آید که برای رفع این مشکل افزودن فوق روان کننده ها به مخلوط های حاوی میکروسیلیس توصیه شده و اصولاً ضرورت دارد. بر اساس این بررسیها می توان نتیجه گرفت که از نظر فیزیکی میکروسیلیس تولید داخل مشابه میکروسیلیس های مرغوب دنیا می باشد [۲].

۱-۴ خواص شیمیایی میکروسیلیس

در جدول ۲-۲ ترکیب شیمیایی بدست آمده از کوره های مختلف ارائه شده است. ترکیب شیمیایی میکروسیلیس بستگی به ترکیب محصول اصلی دارد که در کوره تولید می شود بدیهی است ترکیب شیمیایی مواد خاص که در کوره ریخته می شوند و همچنین نوع کوره نیز در ساختار شیمیایی میکروسیلیس موثر است. همانطور که قبلاً اشاره شد کوره ای که مجهز به سیستم بازیافت حرارتی است تولید میکروسیلیس با درصد کربن کم تولید می نماید.

جدول۱-۱: مقادیر ترکیبات شیمیایی در میکروسیلیس[۲]

ترکیب شیمیائی	جدول مقادیر بدست آمده (٪)
Sio_2	۷۵ - ۹۸
Al_2o_3	۰/۰۳ - ۵/۸۷
Fe_2o_3	۰/۰۶ - ۴/۵۴
Cao	۰/۰۱ - ۰/۸۳
Mgo	۰/۳۶ - ۰/۵۲
Na_2o	۰/۱۷ - ۰/۲۳
K_2o	۲/۰۲ - ۱/۱۵
افت سرخ شدن	۰/۴۱ - ۲/۷۵

۱-۵ واکنش شیمیایی میکروسیلیس در بتن

میکروسیلیس بعنوان یک سوپر پوزولان دارای اختلافی اساسی با سایر پوزولانها می باشد و آن سرعت حصول فعالیت پوزولانی میکروسیلیس می باشد. بدلیل اینکه میکروسیلیس می تواند کریستالهای هیدروکسید کلسیم که در بتن مضر هستند را به ژل تبدیل کند و در واقع افزودن میکروسیلیس به مخلوط بتن، درصد هیدروکسید کلسیم خمیر سیمان را به شدت کاهش می دهد، بصورتی که با افزودن ۲۰ درصد میکروسیلیس حدوداً تمام هیدروکسید کلسیم خمیر سیمان به ژل تبدیل می گردد.

توضیح مضر بودن هیدروکسید کلسیم و دلیل منشا ضعف آنرا در بتن اینگونه می توان دانست که آب می تواند هیدروکسید کلسیم را در خود حل نموده و از بتن به خارج انتقال دهد که در این حالت پودر کربنات کلسیم بر روی سطح بتن بصورت لایه ای از سفیدک ظاهر

می شود و از طرف دیگر سولفاتها می توانند با آن ترکیب شده و گچ یا سولفوآلومینات کلسیم را بوجود آورند که از نظر حجمی چند برابر حجیم تر هستند و این تغییر حجم باعث ایجاد فشار و تخریب بتن خواهد شد. همچنین واکنش های قلیائی سیلیس سنگدانه ها را نیز با وجود هیدروکسید کلسیم در خمیر سیمان تشدید می نماید .

از آنجا که بهبود خواص بتن و در راس آن مقاومت فشاری همواره مورد توجه بوده است ، در این تحقیق اثر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن کارگاهی با بکارگیری مصالح شاهرود، مورد بررسی قرار گرفته است . برای این منظور ۷۵ نمونه استوانه ای ۳۰×۱۵ با نسبت آب به سیمان و درصدهای مختلف میکروسیلیس در آزمایشگاه تکنولوژی بتن دانشگاه صنعتی شاهرود ساخته شد و پس از نگهداری در شرایط مطلوب در سن هفت روزه مقاومت فشاری آنها تعیین گردید .

۱-۶ هدف تحقیق:

در طرح و کنترل کیفیت بتن، مقاومت فشاری خاصیتی است که اغلب مقدار آن مشخص می گردد. دلیل این امر آن است که در مقایسه با سایر خواص، مقاومت فشاری بتن به آسانی قابل آزمایش و اندازه گیری است . علاوه بر این بسیاری از خواص بتن نظیر مدول ارتجاعی، ضد آب بودن یا نفوذ ناپذیری، مقاومت در مقابل هوازدگی ، مستقیماً به این مقاومت مربوط بوده و می توان از نتایج مقاومت ، به آن خواص پی برد. از طرفی می دانیم که امروزه افزودنیهای معدنی از قبیل خاکستر بادی، روباره آهن گذاری[۱]، میکروسیلیس و خاکستر پوسته برنج جهت اصلاح برخی از مشخصه های بتن در آن به کار برده می شوند. لذا میکروسیلیس تولیدی کارخانه فروسیلیس استان سمنان برای این مهم انتخاب گردید تا اثر آن بر مقاومت فشاری بتنی که تمامی مصالح به کار رفته در آن از شهر شاهرود می باشد، مورد بررسی قرارگیرد.

---

۱. Blast furnace slag

۱ـ۷ اصول کلی تحقیق و برنامه ریزی مطالعات:

از آنجایی که طبیعت و شرایط تحقیق به صورت آزمایشگاهی و تجربی است. با مشخص شدن اهداف و محدوده فعالیت پژوهشی، برنامه ریزی جهت ساخت نمونه های آزمایشگاهی و انجام آزمایش های مربوطه انجام شد.

ابتدا آزمایش های قابل انجام درتحقیق مشخص شدند. سپس درخصوص تهیه ملزومات آزمایش ها اقدام گردید و همزمان اطلاعات لازم برای انجام آزمایش ها نیز جمع آوری شد. مطالب علمی که در خصوص موضوع تحقیق موجود بود مورد بررسی قرار گرفت. سپس اقدامات لازم جهت تامین مصالح مناسب انجام شد. در نهایت با معلوم بودن آزمایش ها، تعداد نمونه ها، نسبت های مناسب اختلاط و شرایط لازم برای عمل آوری بتن، اقدام به ساخت بتن و تهیه نمونه ها در آزمایشگاه گردید. با در نظر گرفتن زمان مورد نیاز برای انجام آزمایش های مختلف، انجام دقیق این آزمایش ها در دستور کار قرار گرفت. پس از اتمام‌آزمایش ها، نتایج به نحوه مطلوب جمع آوری شده و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با توجه به اهداف تحقیق، نتایج نهایی و پیشنهاداتی جهت تداوم تحقیق ارائه شد.

۱ـ۸ تقسیم بندی فصول پایان نامه:

در فصل اول اطلاعاتی کلی در خصوص این تحقیق ارائه گردیده است. هدف از انجام تحقیق و روش مناسب برای رسیدن به آن تشریح گردیده و در ضمن به معرفی میکروسیلیس و خواص آن پرداخته شده است. این فصل به عنوان یک راهنما در استفاده روشن تر از سایر فصول گرد آوری شده است.

در فصل دوم با توجه به این که عنوان پایان نامه اثر میکروسیلیس بر نرخ کسب مقاومت فشاری بتن بود، مروری کلی بر تحقیقات انجام شده در زمینه تاثیر میکروسیلیس بر مشخصات بتن انجام پذیرفت .

در فصل سوم با توجه به ضرورتی که در خصوص عوامل موثر بر مقاومت فشاری بتن احساس می شد، نسبت به گردآوری اطلاعات در این زمینه اهتمام شد که با اشکال و جداول و نمودارهای تهیه شده از مراجع معتبر، مفاهیم به صورت گویا و روشن بیان گردیده است.

در فصل چهارم، ابتدا در مورد خصوصیات مصالح مصرفی اعم از سیمان، سنگدانه، آب و فوق روان کننده توضیحاتی داده شده و ویژگی های فیزیکی و شیمیایی آنها تشریح شده است. سپس در خصوص مخلوط های آزمایشی[۱] و نسبت های مخلوط،[۲] روش طرح اختلاط، نحوه نامگذاری طرح اختلاط و نمونه ها، تعداد، شکل و وضعیت عمل آوری نمونه ها توضیحات کاملی ارائه گشته است. در انتها آزمایش های انجام شده مورد بررسی قرار گرفته و تشریح شده است.

در فصل پنجم نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن ارائه گردیده است و برای نمایش نتایج از نرم افزار Excel استفاده شده است . اثر درصد میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به مصالح سیمانی (سیمان و میکروسیلیس) مختلف با نمودارهای جداگانه ای نشان داده شده است و در انتها همه منحنی های با نسبت آب به سیمان گوناگون و نیز منحنی های با درصدهای مختلف میکروسیلیس در یک نمودار ترسیم شد.

در فصل ششم به تفسیر و تحلیل نتایج بدست آمده پرداخته شد . در این فصل با استفاده از منحنی های فصل پنجم مقاومت های بدست آمده برای درصدهای مختلف میکروسیلیس به کار رفته و همچنین مقایسه آنها با مقاومت نمونه های بدون میکروسیلیس مورد بررسی و تجزیه و تحلیل قرار گرفت . همچنین در ادامه نتیجه گیری نهایی و پیشنهادها آورده شده است.

---

۱. Trial mixes

۲. Mix proportion

فصل دوم : مروری بر تحقیقات انجام شده

۲-۱ اثر میکروسیلیس در بتن تازه

با انجام آزمایش اسلامپ برروی بتن دارای میکروسیلیس مشاهده می گردد که اسلامپ کمتری حاصل می شود. از این خاصیت جهت بتن قابل پاشیدن (Shotcrete) می توان بهره گرفت. بالا رفتن ویسکوزیته یا چسبندگی بدلیل افزایش نقاط تماس ذرات جامد به یکدیگر می باشد[۶].

با افزایش میکروسیلیس، میزان لوله های موئینه در داخل ژل سیمان به مقدار زیادی کاهش می یابد زیرا این ذرات بسیار ریز می توانند به فضای خالی بین ذرات سیمان راه یافته و باعث جدا شدن کانالهای آب شوند. در نتیجه پدیده آب انداختگی با استفاده از میکروسیلیس بطور قابل ملاحظه ای کنترل می گردد.

حرارت زایی میکروسیلیس در بتن عمدتاً به عواملی مانند درصد استفاده از میکروسیلیس، نسبت آب به مواد سیمانی و دما در حین واکنش بستگی داشته و تا حد زیادی ناشی از

مکانیزمهای پرکنندگی واکنش پوزولانی که نهایتا منجر به افزایش دوام و مقاومت بتن می گردند، می باشد.

میکروسیلیس به خاطر ریزی ذرات با پخش شدن و توزیع در ماتریس خمیر موجب تسریع واکنش و حرارت زایی ترکیبات سیمان بخصوص C_3S می گردد.

شروع واکنش پوزولانی میکروسیلیس چند ساعت پس از شروع واکنش هیدراسیون سیمان انجام می پذیرد و بسیار سریعتر از پوزولانهای معمولی همانند خاکستر بادی و دیگر پوزولانهای طبیعی رخ می دهد. دلیل این امر نیز آن است که واکنش پوزولانی عمدتاً بین سیلیس موجود در پوزولان و هیدروکسید کلسیم ناشی از هیدراسیون سیمان صورت می گیرد لذا از آنجا که ریزی و خلوص بالای میکروسیلیس بسیار بالا و حدود ۹۰ درصد آنرا Sio_2 تشکیل می دهد، حرارت زایی میکروسیلیس به میزان قابل توجهی از پوزولانهای متعارف بیشتر خواهد بود[۲].

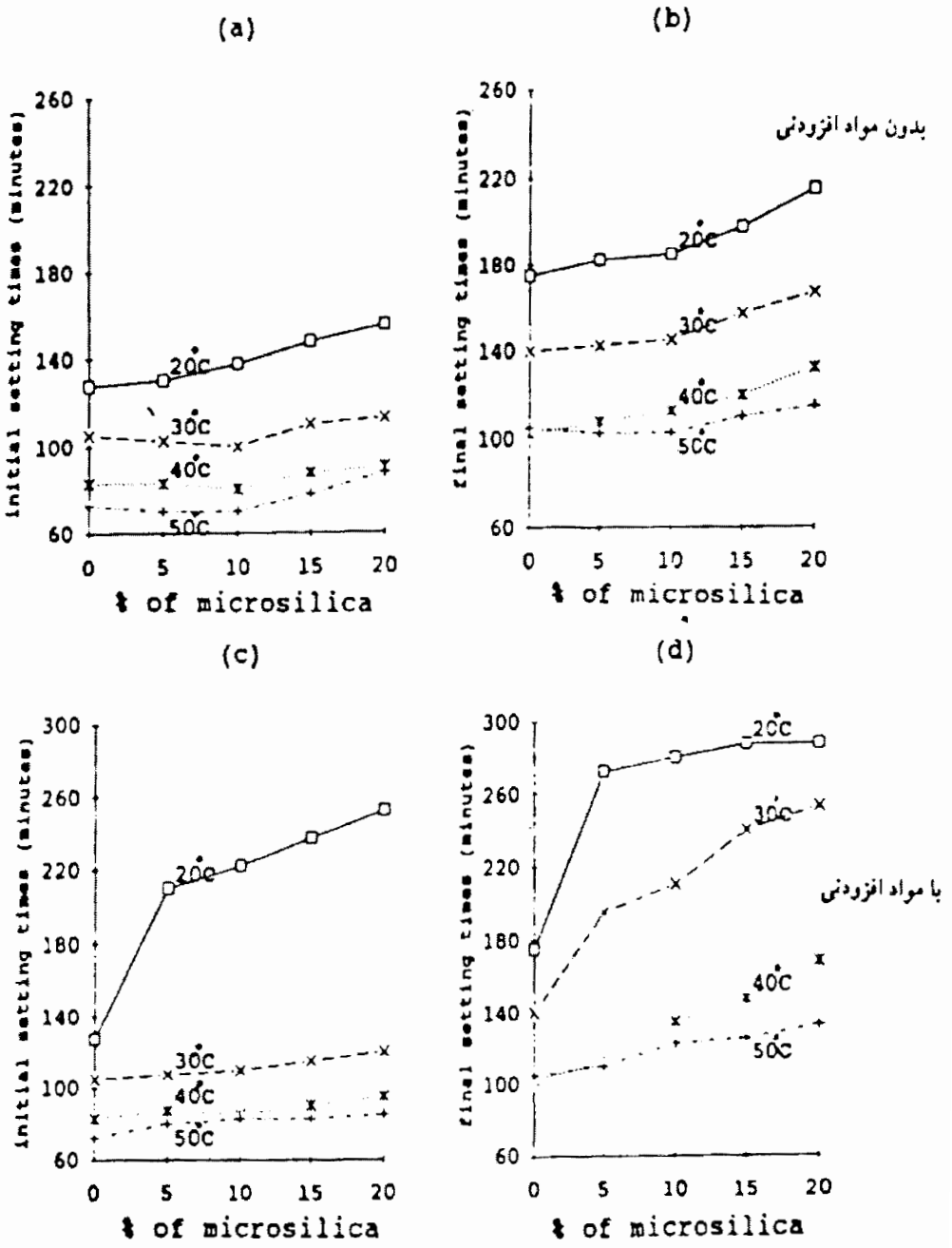
بتن با مقاومت بسیار زیاد در حقیقت مترادف با مصالح سیمانی بیشتر می باشد و این امر باعث بوجود آمدن حرارت بیشتر ناشی از آبگیری سیمان می گردد، که آن نیز به نوبه خود باعث بالا رفتن دما می شود، حتی اگر میزان حرارت تولید شده از واحد وزن سیمان در بتنهای کم سیمان، کاهش داده شود امر مذکور محقق الوقوع خواهد بود بالا رفتن دما در یک عضو ساختمانی به حرارت خارج شده از مواد پرکننده و آهنگ خروج این حرارت که متاثر از اندازه عضو، خواص حرارتی قالب و دمای محیط می باشد، وابسته است. تنش کششی و ترکهای سطحی قابل رؤیت در صورت عدم جلوگیری از انقباض حرارتی ناشی از خنک شدن بتن ریخته شده، بوجود خواهد آمد [۷].

افزایش دمای بتنهای پر مقاومت تقریباً ۱۰ تا ۱۴ درجه سانتیگراد برای هر $۱۰۰Kg/m^3$ سیمان می باشد. در بعضی از ابنیه در دست احداث افزایش دما به ۵۶ درجه سانتی گراد در یک عضو ساختمانی با $۵۰۲\ kg/m^3$ سیمان اندازه گیری شده است.

جمع شدگی در دو مرحله رخ می دهد. مرحله اول جمع شدگی خمیری است که در روزهای اولیه بعد از بتن ریزی اتفاق می افتد در این مرحله اگر سرعت تبخیر رطوبت از سطح بتن بیشتر از سرعت جبران آن توسط لایه های زیرین باشد این پدیده بوجود می آید. در مورد بتن حاوی میکروسیلیس این مساله حائز اهمیت است و خطر ایجاد ترکهای جمع شدگی خمیری به ویژه در مناطق گرم و خشک بسیار زیاد است. لذا به منظور اطمینان از اینکه رطوبت داخلی سریع از دست نرود مراقبت های ویژه به خصوص در سنین اولیه ضروری است در غیر این صورت فعالیت های پوزولانی انجام نمی گیرد.

ب ـ جمع شدگی مرحله دوم خود به خودی است که فقط قسمتی از واکنش های هیدراسیون در هنگام پدیده گیرش کامل می شود و عمل هیدراسیون در داخل خلل و فرج بتن گیرش یافته ادامه پیدا می کند و در نتیجه مقدار آب در این فضاها کاهش می یابد. این موضوع باعث خشک شدگی خود به خودی می گردد. در صورت پایین بودن نسبت آب به سیمان و یا وجود میکروسیلیس جمع شدگی خود به خودی زیاد و ترک خوردگی در سنین اولیه اتفاق می افتد. بنابراین در حالیکه این ترکها مضر می باشند، بهتر است که مقدار میکروسیلیس را محدود نمائیم و نسبت آب به سیمان را خیلی کاهش ندهیم [۸].

افزودن دوده سیلیسی تا حدود ۱۰ در صد وزن سیمان تاثیر مهمی بر زمان گیرش نخواهد داشت ولی مقادیر زیادتر باعث تاخیر در گیرش تا ۴۰ دقیقه می شوند یعنی زمان گیرش افزایش پیدا می کند. دوده سیلیسی از آنجا که جایگزین قسمتی از سیمان می شود بنابراین نتیجه حاصل کاهش قدرت سفت شدن اولیه می گردد. البته درجه حرارت محیط در حصول امر مذکور تاثیر بسزایی دارد و به طور کلی دمای زیاد باعث افزایش دمای آبگیری مواد سیمانی می شود که در نتیجه، حاصل آن کاهش زمان گیرش خواهد شد یعنی در دماهای زیاد محیط، تاخیر زمان گیرش کمتر خواهد شد (شکل ۲-۱).



شکل ۲ـ۱ : تأثیر دوده سیلیسی بر زمان گیرش در دماهای مختلف

آزمایشها نشان داده اند که مقدار آب لازم برای ثابت نگهداشتن اسلامپ مورد نظر بر حسب مقدار دوده سیلیس بصورت خطی تغییر می کند و این افزایش و همچنین مقداری از آب مورد نیاز بتن را باید با استفاده از فوق روان کننده ها جبران نمود ، افزودن فوق روان کننده ها باعث حفظ کارآیی بتن در دراز مدت خواهد شد.

۲-۲ اثر میکروسیلیس در بتن سفت شده

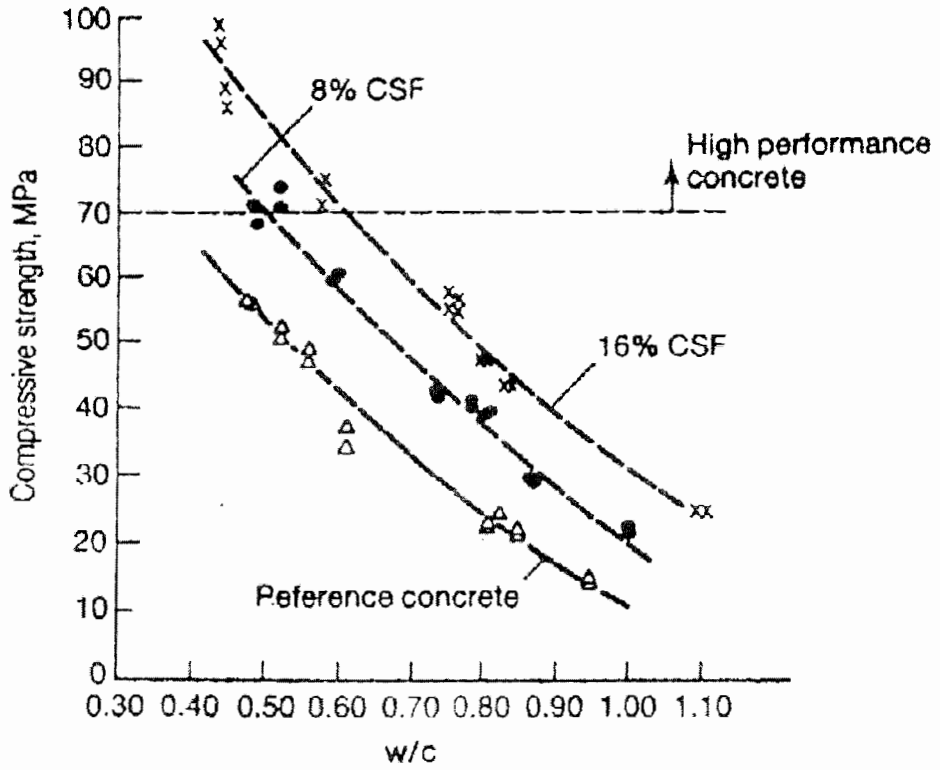
دوده سیلیسی خواص مکانیکی و دوام بتن را نیز اصلاح می کند. در این بخش به اثر دوده سیلیسی بر این خصوصیات که موثر بر رفتار سازه می باشند پرداخته می شود.

۲-۲-۱ مقاومت فشاری ، کششی و خمشی

بتن دارای میکروسیلیس به عنوان بخشی از مواد چسبنده معمولا در اکثر موارد هم ردیف و یکی، با بتن مقاومت بالا است. از این نگرش مطالعه بتن مقاومت بالا کاربرد و اثر دوده سیلیسی را در بر می گیرد. مقاومت بتن شاید مهمترین معیار برای ارزیابی کیفیت باشد. اثر دوده سیلیسی به مقدار تا ۱۶٪ به عنوان ماده چسبنده روی مقاومت بتن درشکل ۲-۲ نشان داده شده است. ملاحظه می شود که برای نیل به مقاومت kg/cm^2 ۷۰۰ در ۲۸ روز برای بتن بدون میکروسیلیس به نسبت آب به سیمان ۰/۳۵، برای بتن با ۸٪ میکروسیلیس به نسبت آب به سیمان حدود ۰/۵ و با ۱۶٪ آن به نسبت آب به سیمان حدود ۰/۶ نیاز است. مشاهده میگردد که مقاومت فشاری بالاتر به سادگی با افزودن دوده سیلیسی و نسبتهای آب به سیمان نسبتا زیاد میسر است.

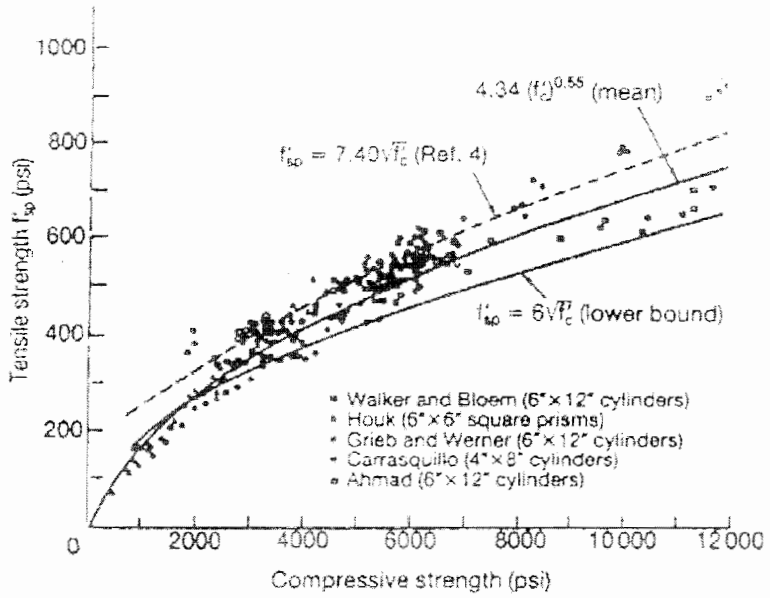
در حضور دوده سیلیسی مقاومت بتن به سمت مقاومت بالا جهت می یابد لذا اشاره به بتن مقاومت بالا در اکثر موارد همانند اشاره به بتن دوده سیلیسی است.

خواص مکانیکی بتن نظیر مدول الاستیسیته، مقاومت کششی و خمشی، مقاومت برشی، رابطه تنش- کرنش و مقاومت پیوستگی بتن با آرماتور معمولا بر حسب مقاومت فشاری ارائه می‌شوند. مقاومت فشاری پایه اصلی برای طراحی اغلب سازه ها است (بجز کف سازی ها که در آنجا نیز برای کنترل کیفیت در نظر گرفته می شود).

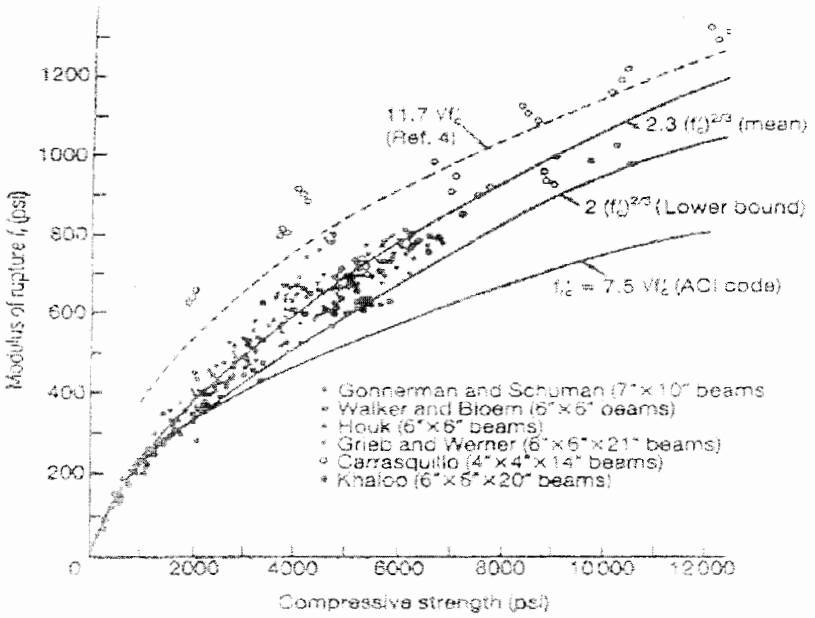


شکل ۲ـ۲: رابطه مقاومت فشاری ۲۸روزه با w/c برای بتن های با مقدار مختلف میکروسیلیس [۹]

مقاومت کششی، کنترل کننده رفتار ترک خوردگی است و دیگر خواص نظیر سختی، عملکرد میرایی، پیوستگی فولاد و دوام بتن را تحت تاثیر قرار می دهد همچنین این مقاومت از نظر رفتار بتن تحت برش اهمیت دارد. مقاومت کششی دو نیمه شدن به پیشنهاد آیین نامه ACI۳۶۳ [۹]، برای بتن های با وزن معمولی از فرمول زیر بدست می آید:



شکل ۲ـ ۳: تغییرات مقاومت کششی برزیلی بتن با وزن معمولی با مقاومت فشاری [۱۰]



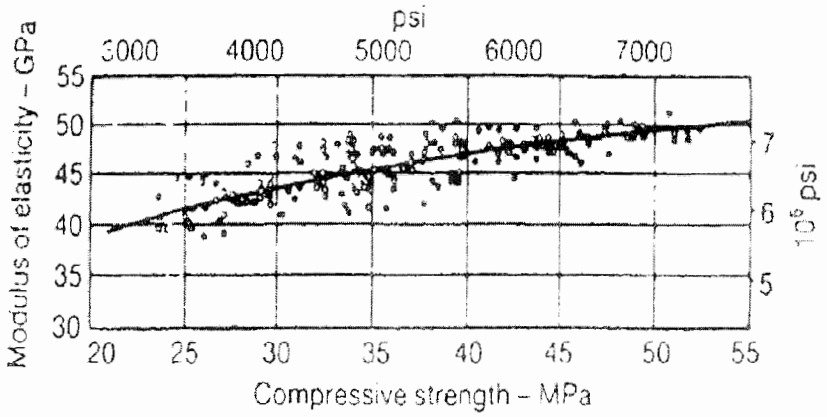
شکل ۲ـ۴: تغییرات مدول گسیختگی با مقاومت فشاری [۱۰]

۲-۲-۲ مدول الاستیسیته

پس از کسب اطلاع از اینکه میکروسیلیس موجب افزایش کسب مقاومت بتن می گردد، به بررسی اثر آن بر مدول الاستیسیته بتن می پردازیم. بر اساس آیین نامه ACI مدول الاستیسیته استاتیکی با افزایش مقاومت بتن بصورت زیر مرتبط است.

$$E_c = 33 w^{1.5} \sqrt{f_c'} \quad Psi \qquad (۳-۲)$$

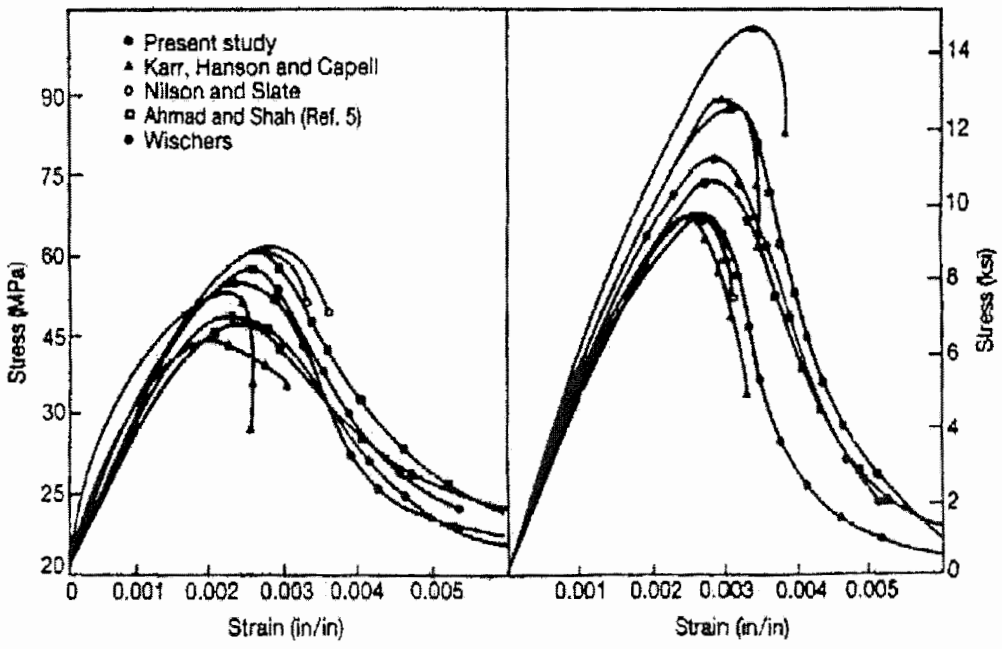
این فرمول نشانگر افزایش مدول الاستیسیته با افزایش مقاومت بتن می باشد. مدول الاستیسیته دینامیکی برای بتن با مقاومت های پایین، متوسط و بالا بطور کلی به ترتیب ۴۰٪، ۳۰٪، ۲۰٪ بالاتر از مدول الاستیسیته استاتیکی است رابطه بین مقاومت فشاری بتن و مدول الاستیسیته دینامیکی در شکل ۲-۵ ارائه شده است. در این شکل مشاهده می شود که افزایش مدول دینامیکی به افزایش مقاومت فشاری بستگی دارد.



شکل ۲ـ۵: رابطه بین مدول الاستیسیته دینامیکی با مقاومت فشاری

۲-۲-۳ ظرفیت کرنش

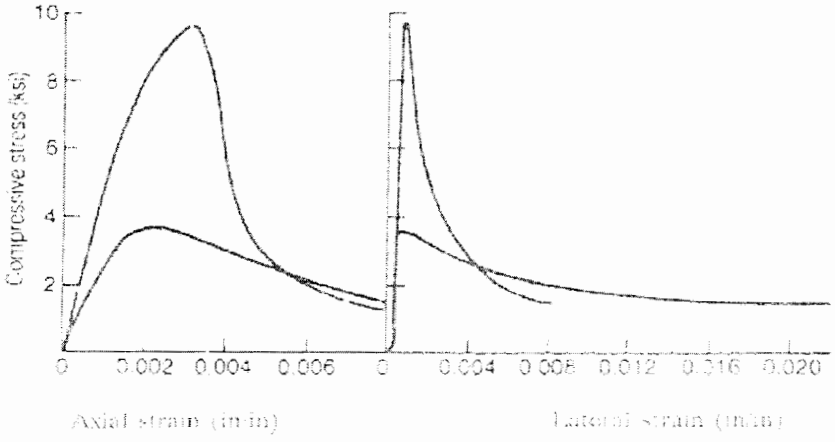
رفتار تنش ـ کرنش بتن بستگی به پارامترهای متعددی نظیر نوع سنگدانه ها و شرایط آزمایش همانند عمر نمونه، سرعت بارگذاری و گرادیان کرنش دارد. از آنجا که میکروسیلیس در افزایش مقاومت فشاری بتن نقش بسزایی دارد به بررسی رابطه ظرفیت کرنش با بتن های مقاومت بالا می پردازیم. که منحنی های تنش کرنش بتن تا مقاومت ۹۸ MPa در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. در بتن با مقاومت بالاتر قسمت صعودی منحنی به حالت خطی نزدیکتر می شود و شیب آن نیز تندتر می گردد و کرنش متناظر با مقاومت ماکزیمم اندکی بیشتر، و شیب بخش سرازیری تندتر می گردد.



شکل ۲ـ ۶: منحنی های تنش ـ کرنش مختلف ارائه شده برای بتن های مقاومت بالا تحت فشار تک محوری[۱۰]

۲-۲-۴ نسبت پواسون

نسبت پواسون در بارگذاری تک محوری بصورت نسبت کرنش عرضی به کرنش در جهت بار تعریف می‌شود. در منطقه غیرالاستیک به دلیل انبساط حجمی حاصل از ریزترکهای داخلی نسبت پواسون ثابت نبوده و تابعی صعودی از کرنش محوری می گردد. بر اساس اطلاعات آزمایشگاهی موجود نسبت پواسون بتن با مقاومت بالاتر دارای میکروسیلیس در محدوده الاستیک قابل مقایسه با بتن با مقاومت پایین تر است. در محدوده غیر الاستیک افزایش نسبی در کرنش های عرضی برای بتن با مقاومت بالاتر دارای میکروسیلیس در مقایسه با بتن مقاومت پایین تر کمتر است. بدین معنی که بتن با مقاومت بالاتر انبساط حجمی کمتری نسبت به بتن با مقاومت پایین تر از خود نشان می دهد (شکل ۲-۷). این نشان می دهد که ریزترکهای داخلی برای بتن با مقاومت بالاتر کمتر است. انبساط نسبی کمتر در محدوده غیرالاستیک بیانگر اثر تنشهای سه محوری متفاوت با بتن معمولی برای بتن با مقاومت بالاتر است. برای مثال تأثیر حلقه محصور کننده در بتن مقاومت بالا کمتر است. اطلاعات راجع به نسبت پواسون بتن برای بتن با مقاومت بالاتر از $۸۴۰\ kg/cm^۲$ موجود نیست.



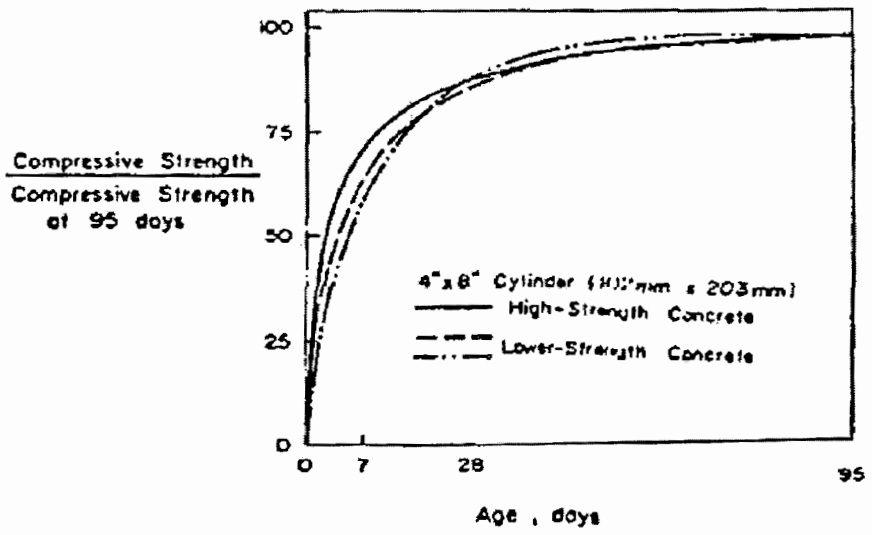
شکل ۲ ـ ۷: تنش ـ کرنش محوری و کرنش جانبی برای بتن معمولی و مقاومت بالای دارای میکروسیلیس

۲-۲-۵ مقاومت پیوستگی

با استفاده از میکروسیلیس پیوستگی بین سنگدانه ها و چسبندگی بین سیمان و فولاد بهبود می یابد. میکروسیلیس با کاهش آب انداختگی در بتن تازه، باعث کاهش تجمع آب آزاد در زیر دانه و فولاد می گردد و نتیجتاً مقاومت پیوستگی را افزایش می دهد. همچنین با افزایش مقدار میکروسیلیس، مقاومت بیرون کشیدگی میلگرد از بتن بطور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد که دلیل این امر نیز کاهش ضخامت و تخلخل منطقه انتقالی بین ماتریس سیمان و فولاد است.

۲-۲-۶ افزایش مقاومت با عمر بتن

بتنهای پر مقاومت میزان بیشتری از کسب مقاومت را در مراحل اولیه بتن ریزی نسبت به بتنهای معمولی از خود نشان می دهند اما در مراحل بعدی تفاوت چندانی وجود ندارد. به نظر میرسد این امر به دلیل اولاً یک افزایش در دمای عمل آوری داخلی بتن در اثر حرارت بیشتر آبگیری سیمان بوده و ثانیاً فاصله کوتاهتر بین ذراتی که آبگیری نموده و حرارت آزاد نموده اند در اثر نسبت پایین تر آب به سیمان می باشد (شکل ۲-۸) .



شکل ۲ ـ ۸: افزایش مقاومت نسبت به عمر بتن[۷]

۲-۲-۷ نفوذپذیری

یکی از برتری های اصلی بتن های با مقاومت بالا در مقایسه با بتن های معمولی، همگن تر بودن ریز ساختار آنهاست. وقتیکه سیمان پرتلند با ذرات بسیار ریز میکروسیلیس در نسبت آب به سیمان کم مخلوط می شود بتنی را به وجود می آورد که ریز ساختار آن شامل هیدراتهای بلورین کمی می باشد و تشکیل خمیر متراکم تر با خلل و فرج کمتری را می دهد. با افزایش میزان میکروسیلیس مقدار بیشتری هیدروکسیدکلسیم تبدیل به هیدروسیلیکات کلسیم می شود و هیدروکسید کلسیم باقیمانده باعث ایجاد کریستال های کمتری در مقایسه با خمیرهای سیمان پرتلند خالص می شود در جدول ۲-۱ مشاهده می شود که با افزایش درصد میکروسیلیس نسبت کلسیم به سیلیکات در هیدراتها کاهش می یابد. این موضوع به هیدراتها اجازه می دهد که با یون هایی از قبیل قلیایی ها و آلومینیوم ترکیب شوند. در نتیجه با افزایش مقدار میکروسیلیس مقاومت در برابر یون های مهاجم و واکنش قلیایی سنگدانه ها اضافه می شود. مقاومت الکتریکی نیز اضافه می شود[۹].

جدول ۲ـ۱: تأثیر میکروسیلیس بر روی نسبت کلسیم به سیلیکات مواد هیدراته شده

سیمان	نسبت Ca/Si
سیمان پرتلند (OPC)	۱/۶
OPC + ۱۸٪ میکروسیلیس	۱/۳
OPC + ۲۸٪ میکروسیلیس	۰/۹

در بتن های با نسبت آب به سیمان بسیار کم ترک های میکروسکوپی ایجاد شده در اثر خشک شدگی خود به خودی ممکن است نفوذ پذیری را افزایش دهد. اساسا وجود میکروسیلیس در بتن های با مقاومت بالا باعث افزایش جمع شدگی خود به خودی می گردد.

در بتن های با مقاومت بالا و بدون میکروسیلیس مقدار جمع شدگی خود به خودی با آن مقدار در بتن های معمولی تفاوت زیادی نمی کند. اما وجود میکروسیلیس ممکن است باعث افزایش جمع شدگی خود به خودی تا حدود دو برابر مقدار فوق در بتن های معمولی گردد.

یکی از تاثیرات اصلی میکروسیلیس در بتن های با مقاومت بالا بهتر کردن ریز ساختار ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر سیمان می باشد. در بتن های معمولی ودارای سیمان پرتلند خالص ناحیه انتقال اطراف سنگدانه ها که بین ۲۰ تا ۱۰۰ میکرو متر می باشد نسبت به سایر قسمتهای خمیر دارای ریز ساختاری متفاوت است. این ناحیه دارای کیفیتی نا مرغوب می باشد و ناحیه ضعیفی را بین سنگدانه ها و خمیر سیمان ایجاد می کند . خصوصیات این ناحیه از قرار زیر می باشد:

۱ـ ناحیه انتقال نسبت به سایر قسمت های خمیر، دارای مقدار بیشتری هیدروکسید کلسیم و اترینگایت است. در اغلب موارد می توان در اطراف سنگدانه ها ناحیه ای را که دارای مقدار زیادی هیدروکسید کلسیم است، مشاهده نمود.

۲ـ خلل و فرج موجود در ناحیه انتقال نسبت به سایر قسمتهای خمیر بزرگتر می باشد و با دور شدن از سطح سنگدانه ها میزان فضاهای خالی کاهش می یابد.

در بتن های معمولی ریز ساختار مخصوص ناحیه انتقال ظاهراً به تشکیل فضاهای پر از آب در اطراف سنگدانه های بتن تازه مربوط می شود. این موضوع به دلیل آب انداختن داخلی و اثر جداره به همراه تجمع ذرات بی اثر سیمان در اطراف سنگدانه ها می باشد. هیدروکسید کلسیم و اترینگایت ترجیحا در فضاهای خالی بزرگ رشد می کنند و به همین دلیل آنها را در ناحیه انتقال بیشتر می توان یافت. همچنین در این ناحیه نسبت آب به سیمان بیشتر از سایر نواحی بتن است و بنابراین توسط خلل و فرج بزرگتر مشخص می شود.

با اضافه کردن میکروسیلیس به سیستم و به ویژه در بتن های با مقاومت بالا تغییرات قابل ملاحظه ای در ریز ساختار ناحیه انتقال به وجود می آید. تحقیقات انجام شده نشان می دهند که بتن های با مقاومت بالا و دارای میکروسیلیس به اندازه بتن های معمولی متبلور و متخلخل نیستند و تمام فضاهای اطراف سنگدانه ها توسط هیدراتهای سیلیکات کلسیم بی شکل اشغال شده اند[۱۱]. همچنین پیوستگی مستقیمی بین سنگدانه ها و هیدراتهای سیلیکات کلسیم ایجاد می شود. این پیوستگی قویتر از ارتباط سنگدانه ها و هیدروکسید کلسیم در بتن های معمولی است.

همان طور که در جدول ۲-۲ دیده می شود اضافه کردن میکروسیلیس تاثیر زیادی روی نفوذپذیری بتن دارد. با اضافه کردن ۲۰٪ میکروسیلیس به بتن دارای ۱۰۰ کیلو گرم بر متر مکعب سیمان، به همان نفوذپذیری بتن دارای ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان می رسیم. اضافه کردن ۱۰٪ میکروسیلیس به بتن دارای ۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان باعث ایجاد نفوذپذیری به اندازه $۱/۸\times۱۰^{-۱۴}$ متر بر ثانیه می شود.

جدول ۲-۲: اثر میکروسیلیس بر روی نفوذپذیری بتن

Cement (OPC) Lb/yd (kg/m^3)	Silica Lb/yd^3 (kg/m^3)	Permeability M/s
۱۶۸,۶ (۱۰۰)	۰ (۰)	$۱,۶\times۱۰^{-۷}$
۱۶۸,۶ (۱۰۰)	۱۶,۹ (۱۰)	$۴,۰\times۱۰^{-۱۰}$
۱۶۸,۶ (۱۰۰)	۳۳,۷ (۲۰)	$۵,۷\times۱۰^{-۱۴}$
۴۲۱,۵ (۲۵۰)	۰ (۰)	$۴,۸\times۱۰^{-۱۱}$
۴۲۱,۵ (۲۵۰)	۴۲,۱ (۲۵)	$۱,۸\times۱۰^{-۱۴}$

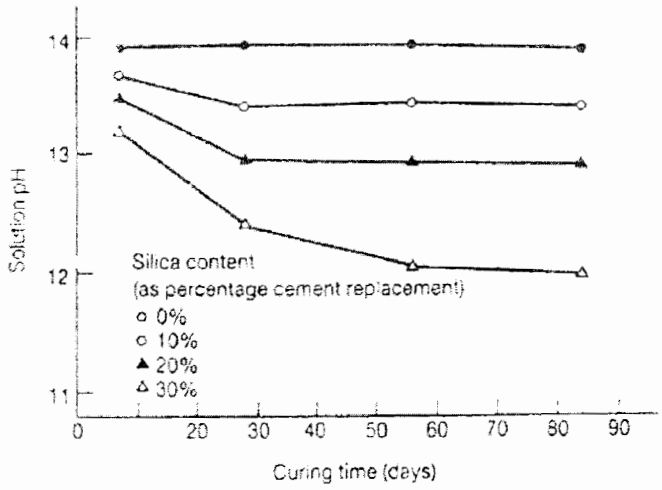
در خمیرهای سیمان دارای نسبت آب به سیمان بین ۰/۲ تا ۰/۳ آزمایش ها نشان داده اند که جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس به جای سیمان حجم کل فضاهای خالی را به مقدار کمی کاهش می دهد[۱۲]. اما در اندازه سوراخها بهبودی حاصل می شود و مقدار فضاهای خالی بزرگ کاهش می یابند. با افزایش نسبت آب به سیمان سرعت نفود یون کلر در داخل بتن افزایش می یابد ولی با جایگزینی ۱۰٪ میکروسیلیس این سرعت به مقدار قابل ملاحظه ای کاسته می شود و اثر نسبت آب به سیمان شدیداً کاهش می یابد.

مشاهدات کمی و کیفی فوق نشان می دهند که در بتن های با مقاومت بالا، خمیر خیلی متراکم است و اصولا این خمیر فشرده تا سطح سنگدانه ها گسترش می یابد بطوریکه غیریکنواختی ناحیه انتقال را به مقدار قابل ملاحظه ای از بین می برد. اثبات شده است که ایجاد این ریز ساختار اصلاح شده با کاهش نفوذپذیری و پیشرفت کیفیت اجرا در بتن های با مقاومت بالا ارتباط نزدیک دارد.

۲-۲-۸ مقاومت در برابر خوردگی

از آنجا که بتن های با مقاومت بالا نسبت به بتن های معمولی دارای خلل و فرج کمتر و ریز ساختار یکنواخت تر می باشند در برابر نفوذ دی اکسید کربن و یون کلر مقاومترند. اما در هنگام ساخت بتن های با مقاومت بالا ایجاد ترک های ریز ناشی از جمع شدگی پلاستیک و خشک شدگی خود به خودی می تواند محافظت در برابر خوردگی را کاهش می دهد. همچنین این موضوع تا حدودی به مقدار مواد افزودنی معدنی بستگی دارد که می تواند در میزان خاصیت قلیایی خمیر سیمان و توانایی آن در جلوگیری از نفوذ یون های کلر مؤثر باشد.

با افزایش مقدار میکروسیلیس تمرکز یونهای OH^- , k^+ قطعاً کاهش می یابند. اما همانطور که در شکل ۲-۹ مشاهده می شود با جایگزینی میکروسیلیس تا ۲۰٪ وزن سیمان مقدار PH از آن مقدار در محلول هیدروکسیدکلسیم اشباع که حدوداً ۱۲/۵می باشد کمتر نمی گردد. حتی با جایگزینی به اندازه ۳۰٪ وزن سیمان مقدار PH از ۱۱/۵ که آستانه ای برای عدم مقاومت میلگردهای موجود در بتن در برابر خوردگی است کمتر نمی شود. تحقیقات انجام شده نشان می دهند که برطرف سازی قلیایی ها از مواد محلول داخل حفره ها به همراه کاهش PH درنسبت های پایین آب به سیمان به صورت ناقص تر اتفاق می افتد. بنابراین مشخص می شود که کربناسیون بتن و نفوذ کلریدها عوامل کنترل کننده میزان خوردگی میلگردها هستند. کربناسیون در بتن های با مقاومت بالای دارا و یا بدون مواد افزودنی معدنی شدیداً مشکل آفرین است.



شکل ۲-۹: تاثیر میکروسیلیس بر روی خاصیت قلیایی خمیر سیمان دارای نسبت آب به سیمان ۰/۵

از آنجا که با کاهش نفوذپذیری عموماً نرخ نفوذ کلرید ها کاهش می یابد واضح است که بتن های با مقاومت بالا نسبت به بتن های معمولی در برابر نفوذ کلریدها مقاومترند. اضافه کردن افزودنی های معدنی از قبیل میکروسیلیس، روباره و یا خاکستر بادی نیز مقاومت در برابر نفوذ کلریدها را افزایش می دهند .

با توجه به اطلاعات موجود میتوان گفت که بتن های با مقاومت بالا توانایی زیادی در جلوگیری از خوردگی میلگردها از خود نشان می دهند.

۲-۲-۹ مقاومت در برابر یخ زدن

حتی ایجاد یک سیستم حباب هوای خوب و پایدار در بتن های معمولی نیز کار دشواری است. در صورت وجود فوق روان کننده ها به مقدار زیاد در بتن به وجود آوردن سیستم فوق به مراتب مشکل تر می شود. در تولید بتن های با مقاومت بالا ایجاد حباب هوا در سیستم مطلوب نمی باشد چرا که باعث کاهش مقاومت بتن می گردد. لذا پیدا کردن روشی برای بالا بردن

مقاومت در برابر یخ زدن بتن های با مقاومت بالا بدون وارد کردن حباب هوا در سیستم توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است.

مشکل اصلی در تخمین زدن مقاومت در برابر یخ زدن بتن عدم همبستگی بین روشهای آزمایشگاهی موجود و مسائل کارگاهی است. همچنین روشها و شرایط آزمایشگاهی مختلف باعث رسیدن به جوابهای متفاوتی می گردد.

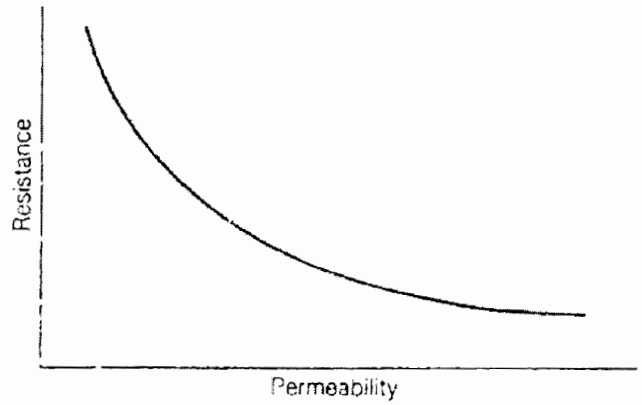
با استفاده از آیین نامه ASTM C۶۶۶ -A و آزمایش بر روی بتن های دارای سیمانهای مختلف که دارای نسبتهای آب به سیمانی برابر ۰/۳ و ۰/۳۵ بودند این نتیجه حاصل آمد که داخل کردن حباب هوا در این بتن ها برای مقاومت در برابر یخ زدن لازم است. تحقیقات دیگری بر روی بتن های بدون حباب هوا و دارای ۰و۱۰٪ میکروسیلیس که دارای نسبت آب به سیمان بین ۰/۲۵ و۰/۴ بودند انجام گرفته است [۱۳]. با وجود میکروسیلیس حتی در پایین ترین نسبت های آب به سیمان هم تعدادی از نمونه ها در هنگام آزمایش خسارت دیدند. این مشاهدات با این مسئله که در سیستم مقدار آب قابل انجماد ناچیز بود در تناقض می باشد. علت این موضوع را محققین خستگی حرارتی عنوان کرده اند که به علت اختلاف بسیار زیاد ضریب انبساط حرارتی سنگدانه ها و خمیر به وجود می آید.

۲-۲-۱۰ مقاومت شیمیایی

خرابی های شیمیایی بتن را می توان به سه دسته که به واکنش های شیمیایی اصلی مربوط می شوند، تقسیم بندی کرد. خوردگی بتن پدیده ای است که در آن قسمتی از خمیر سیمان سخت شده از بتن جدا می شود. نوع اول این مسئله به علت عملکرد آب کربناتهای با سختی کم و یا اسید کربنیک ها به وجود می آید. پدیده بعدی، خوردگی توسط واکنش های تبادلی و جدا شدن اجزای قابل حل از خمیر سیمان سخت شده می باشد. این پدیده در نتیجه

واکنش تبادلی بین اجزای قابل حل خمیر سیمان سخت شده و محلول های مهاجم اتفاق می افتد. پدیده سوم خوردگی تورمی است که تا حد زیادی در نتیجه تشکیل اجزای جدید و پایدار در خمیر سیمان سخت شده به وجود می آید. این مسئله اصولا در نتیجه حمله نمکهای مشخصی ایجاد می شود. همچنین واکنش قلیایی سنگدانه ها باعث انبساط می گردد، بطوریکه بتن سرانجام به خاطر فشارهای ناشی از تورم تخریب می شود.

در کلیه خرابی های فوق، نفوذ پذیری بتن عامل کلیدی و مشخص کننده نرخ خرابی است (شکل ۲ـ۱۰) به علاوه، هیدروکسید کلسیم ماده ای است که سریعاً حل می شود و در برابر حمله های شیمیایی، بسیار آسیب پذیر است.



شکل ۲-۱۰: ارتباط بین مقاومت در برابر خرابی های شیمیایی و نفوذپذیری

در محلول های دارای سولفات، هیدروکسید کلسیم یا سولفات ها واکنش انجام می دهد و سنگ گچ تولید می کند که در مرحله بعد ممکن است با آلومینات ها واکنش نماید و اترینگایت حاصل گردد. هم سنگ گچ و هم اترینگایت می توانند انبساط های تخریب کننده، به وجود آورند. پوزولانهایی که عموماً در بتن های با مقاومت بالا مصرف می شوند در کاهش میزان هیدروکسید کلسیم بسیار مؤثرند، و بنابراین به مقدار قابل ملاحظه ای مقاومت در برابر حمله سولفات ها را بالا می برند. میکروسیلیس علاوه بر تأثیر فوق، هیدراتهای سیلیکات کلسیم را به

وجود می آورد، که با یونهای آلومینیم ترکیب می شوند و بنابراین مقدار آلومینیوم موجود برای تولید اترینگایت را کاهش می دهند.

اثرات سودمند استفاده از میکروسیلیس در محیط هایی که مقدار سولفات در آنها زیاد است، توسط تعدادی از محققین تأیید شده است. در این گزارش آمده است که اثر میکروسیلیس، مشابه و یا در برخی موارد بهتر از اثر سیمان های ضد سولفات بوده است . در یکی از تحقیقات تعدادی از بتن های با مقاومت بالا به مدت ۱۸۰ روز، در معرض محلول های دارای ۵٪ سولفات سدیم و ۱٪ جوهر نمک و اسید سولفوریک قرار گرفته اند [۹]. میزان C_3A در سیمان مصرفی برابر ۷٪ بود. نتایج نشان دادند که در نسبت آب به سیمان بین ۰/۳۳ و ۰/۳۵مقدار نفوذپذیری خیلی کم است و هیچگونه انهدامی صورت نمی گیرد. در محیط های خورنده تر، بتن های دارای سیمان پرتلند خالص خرابی های بیشتری داشتند، ولی با اضافه کردن میکروسیلیس این مشکل حل گردید. حتی اگر در بتن های معمولی از میکروسیلیس استفاده شود، عملکرد آنها در محیط های بسیار خورنده اصلاح می شود.

استفاده از پوزولانهایی مانند میکروسیلیس، می تواند انبساط ناشی از واکنش قلیائی سنگدانه ها را نیز کنترل نماید. مطالعه بر روی آب حفره ای در خمیرهای سیمان دارای میکروسیلیس، توانایی این پوزولان را برای کاهش سریع تمرکز قلیائی ها در این منافذ، اثبات کرده است. بنابراین سرعت واکنش قلیائی سنگدانه ها در صورت وجود میکروسیلیس کاهش می یابد. همچنین اثر خشک شدگی خود به خودی در بتن های با مقاومت بالا، می تواند رطوبت را به اندازه ای کاهش دهد که واکنش قلیائی سنگدانه ها اصلاً اتفاق نیفتد.

۲-۲-۱۱ مقاومت در برابر سایش و فرسایش

Berra [۱۴] در تحقیقات خود ملات های حاوی ۱۵٪ میکروسیلیس، حاوی اکریلیک و همراه با پوشش سنگدانه های حاوی آهن را با ملات شاهد مقایسه نمود. سایش ملات حاوی میکروسیلیس، بطور قابل توجهی نسبت به ملات شاهد و ملات حاوی پوشش سنگدانه های آهنی کاهش یافت. Mirza [۱۴] بر روی ملات های مختلف که با سیمان کوره آهن گدازی ساخته شده اند، از نظر مقاومت سایشی تحقیقاتی انجام داد. وی از سه ملات شاهد، حاوی الیاف و حاوی میکروسیلیس والیاف استفاده نمود. نتایج حاصله نشان دادند که گرچه مقاومت فشاری و خمشی ملات حاوی الیاف نسبت به ملات شاهد بهبود یافت ولی افزودن الیاف بر مقاومت سایشی تاثیری نداشته اما استفاده از میکروسیلیس در ملات حاوی الیاف علاوه بر بهبود قابل توجه مقاومت فشاری و خمشی، مقاومت سایشی را نیز تا ۵۰٪ افزایش داده است.

بتن حاوی میکروسیلیس در سازه های آبی مانند سرریز سدها و تونل های انتقال آب که در معرض سایش قرار دارند مورد استفاده قرار می گیرد. طی تحقیقات Causey [۱۴] برروی سه نوع بتن معمولی ، حاوی مواد پلیمری و حاوی میکروسیلیس، خواص این سه نوع بتن بر اساس آزمایش مقاومت سایشی در زیر آب مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده ، بتن های حاوی مواد پلیمری و حاوی میکروسیلیس نسبت به بتن معمولی بهبود قابل توجهی از نظر مقاومت سایشی از خود نشان می دهند .

تحقیقات Berra [۱۴] نشان می دهد که میزان پیوستگی و چسبندگی ملات حاوی میکروسیلیس نسبت به ملات شاهد به میزان قابل توجهی افزایش می یابد. به همین جهت این نوع ملات با بتن در تعمیر آسیب دیدگی های ناشی از سایش و فرسایش مورد استفاده قرار می گیرد.

فصل سوم : مقاومت فشاری بتن و عوامل مؤثر بر آن

۳-۱ مقدمه

مقاومت فشاری بتن مهمترین خاصیت و مشخصه بتن نزد طراحان و مهندسان کنترل کیفیت بتن می باشد. در جامدات رابطه معکوس بین تخلخل و مقاومت، یک اصل است. در نتیجه در بتن و مواد ترکیبی نظیر آن تخلخل هر جزء تشکیل دهنده می تواند بر مقاومت تاثیر بگذارد. از آنجا که سنگدانه ها عموماً متراکم و با مقاومت بالا هستند، لذا تخلخل خمیر سیمان سخت شده و ناحیه انتقال بین سنگدانه و خمیر اغلب تعیین کننده مقاومت مشخصه بتن های معمولی است.

اگر چه پارامتر نسبت آب به سیمان در تعیین و میزان تخلخل خمیر و ناحیه انتقال و در نتیجه مقاومت بتن بسیار اهمیت دارد ولی عواملی نظیر تراکم و عمل آوری بتن (درجه هیدراسیون سیمان)، اندازه و کانیهای سنگدانه ها، مواد افزودنی، ابعاد و شکل نمونه، شرایط

رطوبت، نوع تنش و سرعت بارگذاری نیز در مقاومت بتن اهمیت دارند. در این فصل، تاثیر عوامل مختلف بر روی مقاومت بتن، همراه با جزئیات بررسی می گردد.

۳-۲ مقاومت فشاری و عوامل مؤثر بر آن

عملکرد بتن در مقابل تنشهای وارده نه فقط به نوع تنش بلکه همچنین به چگونگی ترکیب عوامل مختلف مؤثر بر تخلخل اجزای مختلف بتن بستگی دارد . عوامل فوق شامل خواص و نسبتهای مصالح تشکیل دهنده بتن ، درجه تراکم آن و شرایط عمل آوری بتن می باشد. از نقطه نظر مقاومت، ارتباط بین نسبت آب به سیمان بتن و تخلخل بدون شک مهمترین عامل است، زیرا مستقل از سایر عوامل، این پارامتر بر تخلخل، هم در خمیر سیمان و هم در ناحیه مشترک بین خمیر و سنگدانه درشت، موثر می باشد. تعیین مستقیم تخلخل اجزای بتن به صورت جداگانه، یعنی خمیر سخت شده و ناحیه انتقال، غیر عملی است و لذا پیش بینی مدلهای دقیق مقاومت بتن بسیار مشکل است. بهر حال در طول زمان روابط تجربی مفیدی به دست آمده است که برای کارهای عملی، به طور غیر مستقیم، اطلاعات کافی ای را در مورد تأثیر عوامل مختلف بر مقاومت فشاری به دست می دهد عوامل موثر بر مقاومت فشاری تحت سه رده (۱) مشخصات و خواص مصالح (۲) شرایط عمل آوری، و (۳) پارامتر های آزمایش، بحث و بررسی می شوند.

۳-۲-۱ مشخصات و خواص مصالح

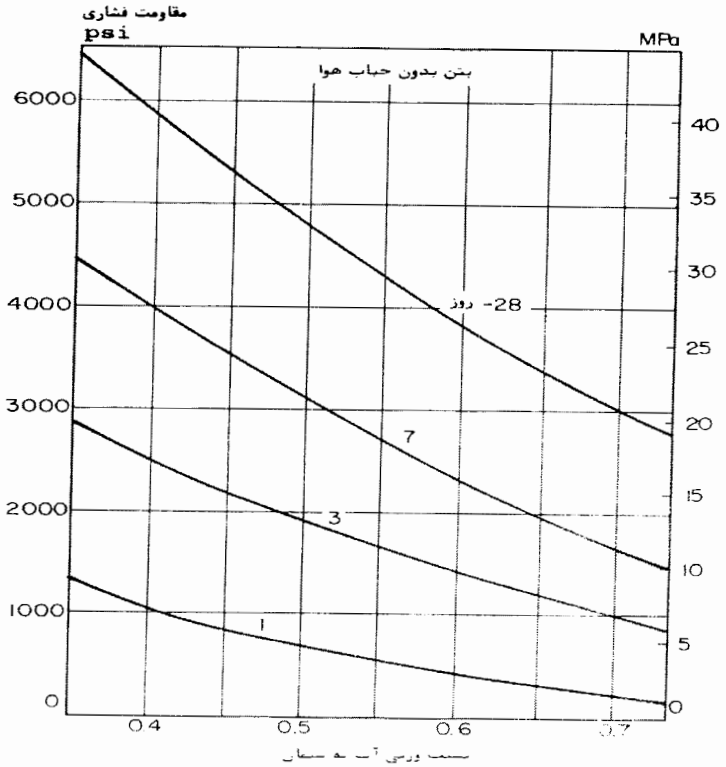
قبل از هر اختلاط بتن ، انتخاب مصالح مناسب و تعیین نسبت آنها اولین قدم در دست یابی به بتنی است که بتواند مطابق مشخصات باشد. بایستی توجه داشت که در عمل بسیاری از عوامل طرح اختلاط به هم وابسته بوده و لذا تأثیر آنها نمی تواند جداگانه باشد.

۳-۲-۱-۱- نسبت آب به سیمان

در سال ۱۹۱۸ در نتیجه تحقیقات و آزمایشهای انجام شده در موسسهٔ لویس دانشگاه ایلینوی، آبرام ارتباط بین نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری بتن را بیان نمود. این رابطه که به قانون نسبت آب به سیمان آبرام معروف است ارتباط معکوس بین این دو عامل را به صورت زیر بیان می کند[۴]:

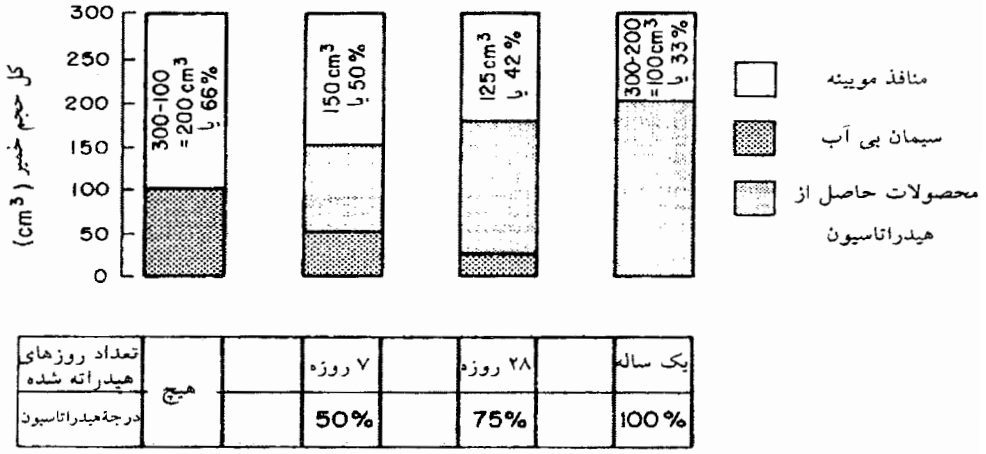
$$F_C = \frac{K_1}{K_2^{\,W/C}} \qquad (۱_۳)$$

که در آن w/c نسبت آب به سیمان در مخلوط بتنی و k_1 , k_2 ثابتهای تجربی هستند. منحنی های معمول نمایش دهنده ارتباط نسبت آب به سیمان و مقاومت فشاری بتن در یک سن مشخص عمل آوری مرطوب در شکل ۳-۱ آمده است.

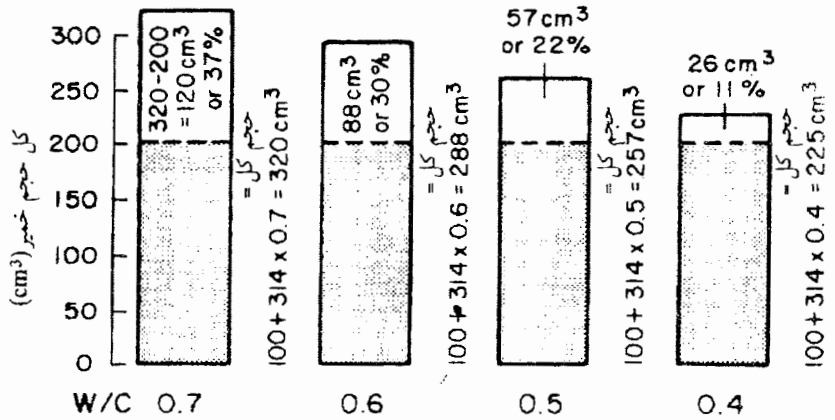


شکل ۳-۱- تأثیر نسبت آب به سیمان و مدت عمل آوری مرطوب بر روی مقاومت فشاری بتن [۱۵].

با توجه به عوامل مؤثر بر مقاومت خمیر سیمان هیدراته شده و تأثیر افزایش نسبت آب به سیمان بر روی تخلخل، در درجه هیدراسیون (آبگیری) داده شده (شکل ۳ـ۲ حالت ب)، رابطه نسبت آب به سیمان و مقاومت بتن می تواند بازتاب طبیعی ضعف بیشتر خمیر به علت افزایش تخلخل آن بر اثر افزایش نسبت آب به سیمان باشد.



حالت الف: ۱۰۰ سانتیمتر مکعب سیمان، W/C=۰/۶۳ (ثابت)، درجات مختلف هیدراسیون



حالت ب: ۱۰۰ سانتیمتر مکعب سیمان، ۱۰۰ درصد هیدراسیون، مقادیر متغیر W/C

شکل ۳-۲- تغییرات تخلخل مویینگی با تغییرات نسبت آب به سیمان و درجه هیدراسیون

مقاومت فشاری بتن تابع نسبت آب به سیمان و درجه هیدراسیون سیمان می باشد. در یک دمای هیدراسیون معین، درجه هیدراسیون و مقاومت توابعی از زمان هستند. به هر حال توضیح موضوع به صورت فوق، تأثیر نسبت آب به سیمان بر روی مقاومت ناحیه انتقال را در نظر نمی گیرد. در بتن های با مقاومت پایین تا متوسط ساخته شده با سنگدانه های معمول، هم تخلخل ناحیه انتقال و هم تخلخل خمیر تعیین کننده هستند و رابطه مستقیمی بین نسبت آب به سیمان و مقاومت وجود دارد. به نظر نمی رسد که این رابطه در حالت بتن های با مقاومت بالا (با نسبت آب به سیمان خیلی پایین) کاملا صادق باشد. برای مخلوطهای با نسبت آب به سیمان زیر ۰/۳ افزایش متناسب مقاومت بر اثر تغییر بسیار جزیی نسبت آب به سیمان حاصل می شود. این پدیده به بهبود مقاومت ناحیه انتقال در نسبت آب به سیمانهای پایین نسبت داده می شود. استدلال دیگر آن است که با کاهش نسبت آب به سیمان اندازه بلورهای هیدروکسید کلسیم نیز کوچکتر می گردد[۴].

۳-۲-۱-۲ میزان هوا در بتن

در اکثر موارد این نسبت آب به سیمان است که تخلخل خمیر را در درجه معینی از هیدراسیون تعیین می کند. به هر حال هنگامی که حبابهای هوا در نتیجه عدم تراکم کافی یا بر اثر کاربرد مواد حباب هوازا در مخلوط بوجود می آید، این حبابها تاثیر عمده ای در افزایش تخلخل و کاهش مقاومت خواهند داشت.

به ازای یک نسبت آب به سیمان و یا مقدار سیمان معین، میزان هوای بتن عموما سبب کاهش مقاومت می شود. برای مقادیر سیمان خیلی پایین، هوای ایجاد شده در بتن سبب افزایش مقاومت می شود.

افت مقاومت بر اثر حبابهای هوا نه فقط به نسبت آب به سیمان مخلوط بتن بلکه به میزان سیمان نیز بستگی دارد. در یک نسبت آب به سیمان مشخص، بتن های با مقاومت بالا (دارای مقدار بالای سیمان) افت مقاومت زیادی بر اثر افزایش حباب هوا پیدا می کنند. در حالی که در بتن های با مقاومت پایین (دارای مقدار کم سیمان) بر اثر حباب هوا افت مقاومتی ناچیز و یا ممکن است افزایش مقاومتی نیز در آنها پدید آید. این نکته اهمیت زیادی در طرح بتن های حجیم دارد.

تأثیر نسبت آب به سیمان و میزان سیمان در بتن تحت تنش می تواند از اثرات متضادی که میزان هوا در بتن دارد نتیجه و بیان گردد. با افزایش تخلخل خمیر، حباب هوا اثر معکوسی بر روی مقاومت ماده مرکب می گذارد. از طرف دیگر با افزایش کارایی و قابلیت تراکم خمیر، حباب هوا می تواند باعث افزایش مقاومت ناحیه انتقال (بخصوص در مخلوطهای با آب به سیمان پایین) شده و در نتیجه مقاومت بتن را بهبود بخشد. چنین به نظر می رسد که در بتن کم سیمان، زمانی که ایجاد حباب هوا همراه با کاهش مقدار قابل ملاحظه ای از آب مخلوط باشد، تأثیر معکوس حباب هوا بر روی مقاومت خمیر بیش از اثر مثبت و جبران کننده ای است که بر روی ناحیه انتقال دارد.

۳-۲-۱-۳ نوع سیمان

درشکل ۳-۲ ملاحظه شدکه هم نسبت آب به سیمان و هم درجه هیدراسیون سیمان، تعیین کننده تخلخل خمیر سیمان هیدراته شده هستند. تحت شرایط عمل آوری استاندارد، سیمان پرتلند نوع ۳ سریعتر از سیمان پرتلند نوع ۱ با آب واکنش داده، و بنابراین در سنین اولیه واکنش هیدراسیون و به ازای نسبت آب به سیمان مشخص، بتن با سیمان پرتلند نوع۳ تخلخلی کمتر و مقاومت خمیری بیشتر از بتن با سیمان پرتلند نوع ۱ خواهد داشت.

بایستی توجه داشت که در دمای معمولی، روند هیدراسیون و افزایش مقاومت سیمانهای پرتلند نوع ۲ و ۴ و ۵ و نوع IS (سیمان پرتلند روباره ای) و نوع IP (سیمان پرتلند پوزولانی) کمی کندتر از سیمان پرتلند نوع ۱ می باشند. در دمای معمولی و برای سیمانهای مختلف پرتلند و سیمانهای پرتلند مخلوط، درجه هیدراسیون در سن ۹۰ روز و بالاتر تقریبا یکسان است. تأثیر نوع سیمان پرتلند بر روی مقاومت نسبی بتن در سنین ۱ و ۷ و ۲۸ و ۹۰ روز در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جدول ۳-۱ : تأثیر نوع سیمان بر مقاومت نسبی تقریبی بتن

نوع سیمان پرتلند بر اساس استاندارد ASTM	ویژگی	مقاومت فشاری (به صورت درصدی از مقاومت بتن با سیمان پرتلند نوع ۱ یا معمولی)			
		۱ روز	۷ روز	۲۸ روز	۹۰ روز
۱	معمولی	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲	با حرارت هیدراسیون و مقاومت متوسط دربرابرسولفات	۷۵	۸۵	۹۰	۱۰۰
۳	مقاومت بالا در سنین اولیه	۱۹۰	۱۲۰	۱۱۰	۱۰۰
۴	با حرارت زایی پایین	۵۵	۶۵	۷۵	۱۰۰
۵	مقاوم در برابر سولفات	۶۵	۷۵	۸۵	۱۰۰

۳-۲-۱-۴ سنگدانه

در تکنولوژی بتن تاکید زیاد بر تأثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت، تأثیر سنگدانه ها بر مقاومت را کم رنگ تر نموده است. صحیح این است که مقاومت سنگدانه معمولا عامل مهمی در مقاومت بتن های معمولی نیست و به غیر از سنگدانه های سبک، اغلب سنگدانه ها چندین برابر مقاوم تر از خمیر و ناحیه انتقال در یک بتن هستند. به عبارت دیگر در بیشتر موارد، مقاومت سنگدانه به سختی در بتن سودمند واقع می شود. زیرا که شکست و گسیختگی بتن از دو عامل خمیر و ناحیه انتقال نتیجه می گردد.

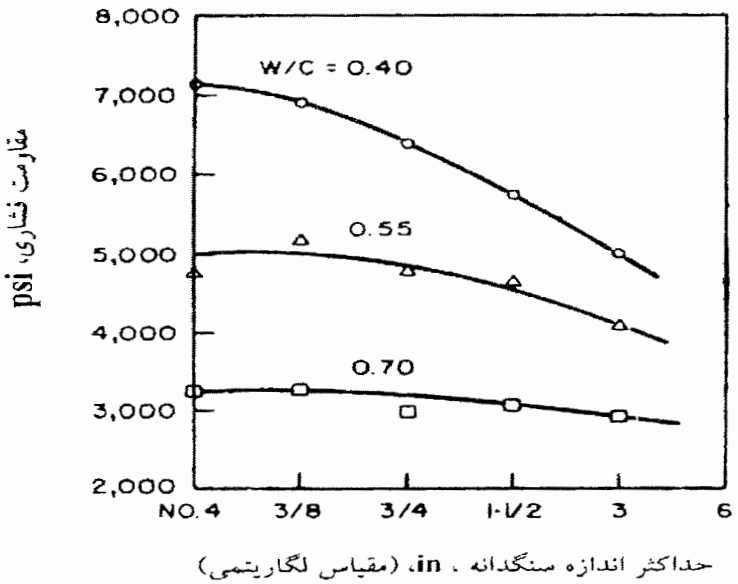
اما سایر خواص سنگدانه به جز مقاومت، نظیر اندازه، شکل، بافت سطحی، دانه بندی و کانیهای سنگدانه ها به نسبت های مختلف بر روی مقاومت بتن تأثیر می گذارند.

تغییر در حداکثر اندازه سنگدانه های درشت دانه بندی شده، از یک کانی مشخص، دو تأثیر متفاوت بر روی مقاومت بتن دارد. به ازای مقدار سیمان و روانی یکسان، مخلوطهای بتنی که دانه های درشت تری دارند به آب اختلاط کمتری، نسبت به سنگدانه های ریزتر، نیاز دارند . در مقابل، سنگدانه های درشت تر تمایل به تشکیل لایه انتقال ضعیف تر با ریز ترکهای بیشتری دارند. تأثیر خالص این مسأله، با تغییر نسبت آب به سیمان و تنشهای وارده بر بتن، تغییر می کند. کردن و گیلیسپی [۱۶] (شکل ۳-۳) نشان دادند که محدوده اندازه الک نمره ۴ تا الک ۳ اینچ (۵ تا ۷۵ میلیمتر) تأثیر اندازه حداکثر دانه درشت بر مقاومت ۲۸ روزه بتن با مقاومت بالا (نسبت آب به سیمان ۰/۴) و بتن با مقاومت متوسط (نسبت آب به سیمان ۰/۵۵) بیش از بتن های با مقاومت پایین (نسبت آب به سیمان ۰/۷) می باشد. دلیل این امر این است که در نسبت آب به سیمان پایین، کاهش تخلخل ناحیهٔ انتقال، نقش مهمتری در مقاومت بتن ایفا می کند. بعلاوه چون ناحیهٔ انتقال تأثیر بیشتری بر روی مقاومت کششی بتن نسبت به مقاومت فشاری آن دارد لذا باید انتظار

داشت که در یک مخلوط بتن با نسبت آب به سیمان ثابت، نسبت مقاومت کششی به مقاومت فشاری با کاهش اندازه سنگدانه های درشت افزایش یابد.

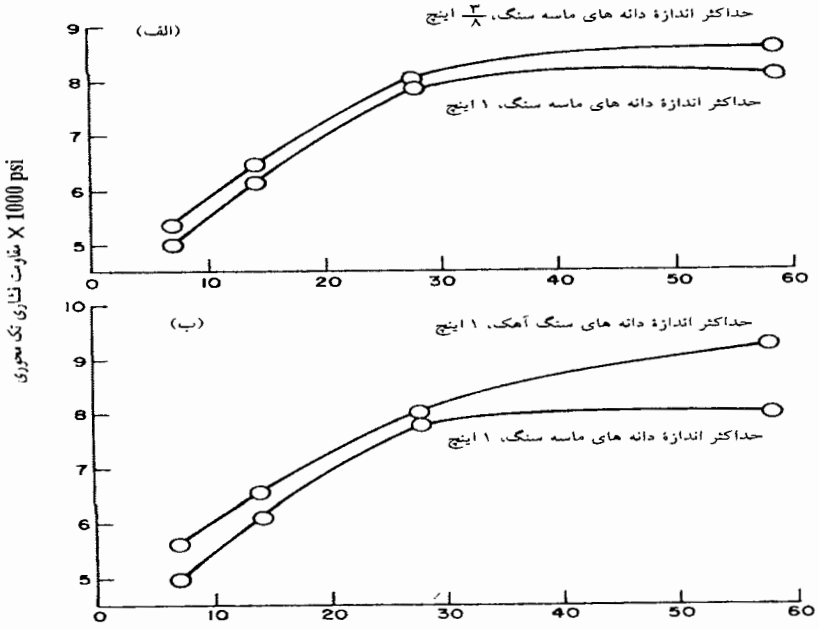
برای نسبت آب به سیمان معین، مخلوطهای بتنی با اسلامپ بالاتر تمایل بیشتری به آب انداختن داشته و در نتیجه مقاومت کمتری دارند. لذا اقتصادی نیست که مخلوطهای بتنی با اسلامپهای بیش از حد نیاز تولید شوند.

مخلوطهای بتنی ساخته شده از سنگدانه های شکسته با بافت خشن و زبر اغلب مقاومت (بخصوص مقاومت کششی) بالاتری در سنین اولیه نسبت به بتن های ساخته شده با سنگدانه های طبیعی و سطح صاف با کانیهای یکسان نشان می دهند. علت این افزایش به پیوستگی فیزیکی قویتر بین سطح سنگدانه و خمیر هیدراته شده در این حالت نسبت داده می شود. در سنین بالاتر هنگامی که واکنشهای شیمیایی بین سطح سنگدانه و خمیر سیمان صورت می پذیرد، تأثیر بافت سطحی سنگدانه بر روی مقاومت کاهش می یابد. از نقطه نظر پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان، بایستی توجه داشت که حتی سطح به نظر صاف شن هوازده نیز دارای زبری و سطح کافی برای پیوستگی است و این مسأله با استفاده از میکروسکوپ کاملا مشهود است. از طرفی با یک میزان سیمان مشخص، سنگدانه های با سطح زبر و خشن، به آب بیشتری برای ایجاد کارایی مشخص نیاز دارند که این امر مزیت مقاومت بالاتر این نوع سنگدانه را در بتن خنثی می کند.



شکل ۳-۳ تأثیر اندازه سنگدانه و نسبت آب به سیمان بتن بر روی مقاومت بتن[۱۶]

ترکیبات مختلف کانیهای سنگدانه ها نیز در مقاومت بتن مؤثر بوده است. گزارشهای زیادی حاکی از این است که تحت شرایط یکسان، جایگزینی کانیهای آهکی با سیلیسی سبب افزایش مقاومت بتن گشته است. نه فقط کاهش حداکثر قطر سنگدانه (شکل ۳-۴ الف) بلکه جابه جایی ماسه سنگ با سنگ آهک (شکل ۳-۴ ب) نیز سبب بالا رفتن مقاومت نهایی (مثلا ۵۶ روزه) بتن می گردد. هر متر مکعب از مخلوط بتن نشان داده شده در شکل ۳-۴ دارای ۴۷۵ کیلوگرم سیمان نوع ۱، ۱۱۹ کیلوگرم خاکستر بادی ، ۱۹۶ کیلوگرم آب، ۱۰۳۸ کیلوگرم شن شکسته، ۵۹۰ کیلوگرم ماسه سیلیسی طبیعی، و یک لیتر ماده افزودنی کاهنده آب می باشد.



شکل ۳-۴ تأثیر اندازه سنگدانه و کانی های آن بر روی مقاومت بتن

۳-۲-۱-۵ آب اختلاط

وجود ناخالصیهای بیش از حد در آب بتن علاوه بر تأثیر بر مقاومت و زمان گیرش آن می تواند سبب بروز شوره در سطح و خوردگی میلگرد در بتن گردد. به طور کلی کیفیت آب اختلاط عامل مهمی در مقاومت نیست و این کیفیت، اغلب در مشخصات با عبارت اینکه آب مصرفی در بتن باید برای آشامیدن مناسب باشد آورده می شود. آبهای شهری بندرت دارای مواد محلول بیش از ppm ۱۰۰۰ (قسمت در میلیون) می باشند.

به عنوان یک قاعده، آب نامناسب برای آشامیدن ممکن است لزوما نامناسب برای اختلاط بتن نباشد. از نقطه نظر مقاومت، آبهای اسیدی، قلیایی، نمکدار، شور، رنگی و دارای بو نباید سریعا مردود

شوند. این مسأله دارای اهمیت خاصی است بخصوص که آبهای برگشتی از معادن و یا از کارخانه های صنعتی ممکن است با اطمینان برای ساخت بتن بکار روند. بهترین راه برای تعیین مناسب بودن آب ناشناخته برای ساخت بتن، مقایسه بین زمان های گیرش سیمان، و مقاومت ملاتهای مکعبی ساخته شده از آب ناشناخته و آب تمیز به عنوان نمونه شاهد می باشد. نمونه های مکعبی ساخته شده با آب ناشناخته بایستی مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه ای برابر با حداقل ۹۰ درصد مقاومت نمونه های ساخته شده از آب تمیز و شناخته شده داشته وهمچنین نباید زمان گیرش سیمان را تا میزان غیر قابل قبولی تغییر بدهد.

آب دریا که اغلب تا ppm ۳۵۰۰۰ نمک حل شده دارد برای مقاومت بتن غیر مسلح زیان آور نیست. اما به هر حال استفاده از آن در بتن مسلح و بتن پیش تنیده می تواند خطر خوردگی فولاد را بالا برده و بنابراین نباید در چنین شرایطی از آب دریا در ساخت بتن استفاده شود . به عنوان یک راهنمای کلی، از نقطه نظر مقاومت ، وجود مقادیر زیادتر از حد روغن، نمک یا شکر در آب اختلاط بتن می تواند به عنوان زنگ خطر تلقی گردد[۱۷].

۳-۲-۱-۶ مواد افزودنی

تا کنون در مورد تأثیر معکوس مواد حباب هوازا بر روی مقاومت بتن بحث شده است. به ازای یک نسبت آب به سیمان معین، وجود مواد کاهش دهنده آب در بتن می تواند معمولا اثر مثبتی بر روی میزان هیدراسیون سیمان و افزایش مقاومت اولیه بتن داشته باشد. مواد افزودنی کندگیر کننده و تندگیر کننده تأثیر عمده ای بر روی آهنگ افزایش مقاومت خواهند داشت، ولی بیشتر آنها بر روی مقاومت نهایی بتن تأثیر قابل ملاحظه ای نخواهند داشت. اما بسیاری از محققین مشخص

کرده اند که مقاومت نهایی بتن در صورتی که نرخ افزایش مقاومت آن در سنین اولیه کند گردد، افزایش خواهد یافت.

به دلیل ملاحظات زیست محیطی و اقتصادی، کاربرد پوزولانها و مواد مصنوعی با خاصیت سیمانی به عنوان مواد افزودنی روز به روز افزایش می یابد. اگر این مواد به عنوان جایگزین سیمان مصرف شوند اغلب آهنگ افزایش مقاومت را کند می کنند. این مواد در دمای معمولی با هیدروکسید کلسیم به دست آمده از واکنشهای سیمان و آب ترکیب شده و تولید سیلیکات کلسیم هیدراته شده می کنند که این امر سبب کاهش تخلخل هم در خمیر سیمان و هم در ناحیه انتقال می شود. بنابراین کاربرد مواد پوزولانی در بتن می تواند منجر به افزایش مقاومت نهایی و کاهش تراوایی آن گردد. بایستی توجه داشت که مواد پوزولانی بخصوص مقاومت کششی بتن را افزایش می دهند.

۳-۲-۲ شرایط عمل آوری

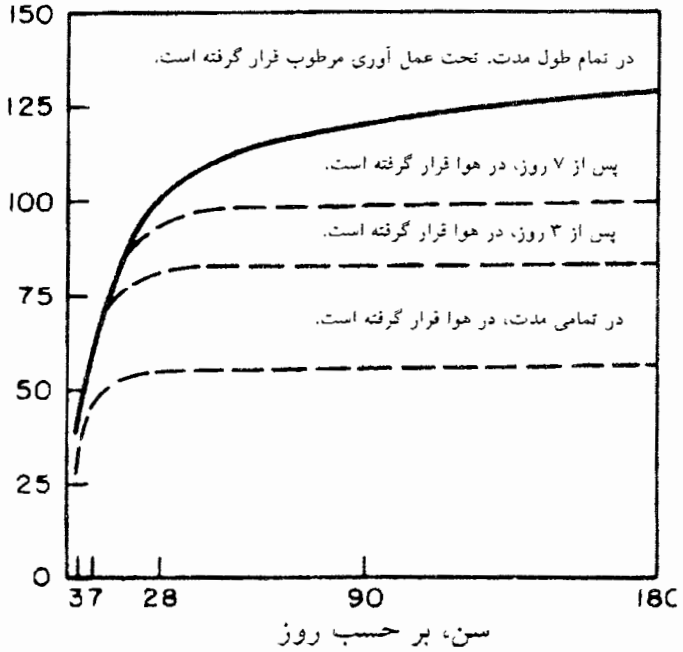
عمل آوری به مجموع عملیاتی گفته می شود که برای ادامه واکنشهای سیمان بلافاصله بعد از ریختن بتن در قالب اعمال می شود و شامل کنترل زمان، درجه حرارت و رطوبت است.

برای یک نسبت آب به سیمان مشخص، تخلخل خمیر سیمان هیدراته شده، از روی درجهٔ هیدراسیون سیمان تعیین می شود (شکل ۳-۲، حالت الف). در دمای معمولی، بلافاصله پس از ریختن آب بر روی سیمان، واکنش های اجزای اساسی آن شروع می شود، ولی با پوشیده شدن دانه‌های سیمان هیدراته نشده توسط محصولات هیدراسیون، این واکنش ها به میزان زیادی کاهش می‌یابند. علت این امر آن است که واکنشهای سیمان تنها تحت رطوبتهای درحد اشباع ادامه می یابند و اگر فشار بخار آب در لوله های مویینه کمتر از ۸۰ درصد شود تقریباً متوقف می شوند.

بنابراین زمان و رطوبت عوامل بسیار مهمی در ادامه واکنشها می باشند. همچنین همانند سایر واکنش های شیمیایی، دما سبب تسریع واکنشهای سیمان و آب می گردد.

۳-۲-۲-۱ زمان

در رابطه بین مقاومت و زمان برای بتن عموما فرض می شود که شرایط عمل آوری، محیط مرطوب و دمای معمولی است. به ازای یک نسبت آب به سیمان مشخص، افزایش مدت عمل آوری در محیط مرطوب سبب افزایش مقاومت می گردد (شکل ۳-۱) به شرط اینکه واکنشهای دانه های سیمان هیدراته نشده هنوز ادامه داشته باشد. در قطعات نازک بتنی در صورتی که آب لوله های موئینه بواسطه تبخیر از دست برود، شرایط عمل آوری در هوا حاکم شده و مقاومت با زمان افزایش نخواهد یافت (شکل ۳-۵) .



شکل ۳-۵ تأثیر شرایط عمل آوری بتن بر روی مقاومت آن[۴]

۳-۲-۲-۲ رطوبت

تأثیر رطوبت عمل آوری بر روی مقاومت بتن را می توان به وضوح از نتایج شکل (۳-۵) مشاهده کرد. نتایج نشان می دهند که بعد از ۱۸۰ روز، به ازای یک نسبت آب به سیمان مشخص، مقاومت بتن به عمل آمده در شرایط کاملا مرطوب در حدود ۳ برابر مقاومت همین بتن تحت شرایط عمل آوری در هوا گشته است. به علاوه، در نتیجه ایجاد ترکهای مویین در ناحیهٔ انتقال به علت جمع شدگی ناشی از خشک شدن، در قطعات نازکی که به صورت مرطوب عمل آوری شده اند، پس از آنکه در محیط خشک و در هوا قرار می گیرند کاهش مقاومت کمی نیز دیده می شود. آهنگ کاهش آب بتن بلافاصله بعد از ریختن آن در قالب نه تنها به نسبت سطح به حجم عضو بتنی وابسته است بلکه با تغییرات دما، رطوبت نسبی و سرعت باد اطراف آن نیز تغییر می یابد.

حداقل مدت ۷ روز عمل آوری مرطوب برای بتن های ساخته شده با سیمان معمولی توصیه می شود. بدیهی است برای سیمانهای آمیخته و سیمانهای پوزولانی، برای رسیدن به مقاومت نهایی و انجام واکنشهای کامل پوزولانی، زمان بیشتری لازم می باشد. عمل آوری کاملاً مرطوب با پاشیدن آب بر روی بتن و یا در آب قرار دادن نمونه و یا استفاده از ماسه مرطوب، خاک اره خیس و پارچه کتانی فراهم می شود.

۳-۲-۲-۳ درجه حرارت

در بتن با عمل آوری مرطوب تأثیر دما بر روی مقاومت بتن، به تاریخچه زمان ـ درجه حرارت در بتن ریزی و عمل آوری بستگی دارد. این تأثیرات می توانند در سه حالت زیر نشان داده شوند: حالت اول آن است که بتن در یک دمای خاص ریخته و عمل آورده می شود. حالت دوم مربوط به

بتن هایی است که در دماهای مختلف ریخته شده ولی در دمای معمولی نگهداری و عمل آوری می‌شود و بالاخره در حالت سوم، بتن در دمای معمولی ریخته شده ولی در دماهای مختلف عمل آوری می شود. با تغییرات دما بین ۴ تا ۴۶ درجه سانتیگراد در بتنی که در دمای ثابت معینی ریخته و عمل آوری می شود، معمولا تا سن ۲۸ روز هر چه دما بالاتر باشد واکنشهای سیمان سریعتر شده و افزایش مقاومت نیز بیشتر است. از نتایج شکل (۳-۶ الف) چنین مشهود است که مقاومت ۲۸ روزه نمونه های ریخته و نگهداری شده در ۴ درجه سانتیگراد حدود ۸۰ درصد مقاومت نمونه هایی است که در دمای ۲۱ تا ۴۶ درجه سانتیگراد ریخته و عمل آوری شده اند. در سنین بالاتر، با کاهش درجه هیدراسیون سیمان چنین تفاوتهایی در مقاومت بتن ها دیگر مشاهده نمی شود. به عبارت دیگر همانطور که در زیر توضیح داده خواهد شد، هر چه دمای اولیه ریختن و عمل آوری بتن بالاتر می رود مقاومت نهایی آن کمتر می شود.(آحاد ارائه شده در شکل۳-۶ برای راحتی به سانتیگراد تبدیل گشته اند. در صورت نیاز میتوان از رابطه F= ۱,۸.C+۳۲ برای دما و ضریب ۰/۰۰۶۸۹ برای تبدیل واحد PSI به MPa استفاده نمود).

نتایج شکل (۳-۶ ب) تاریخچه تغییرات زمان ـ دما را در ریختن و عمل آوری نشان می دهد. دمای بتن ریزی (دما در ۲ ساعت اول بعد از بتن سازی) بین ۴ تا ۴۶ درجه سانتیگراد متغیر بوده و سپس کلیه بتن ها در رطوبت کامل و در دمای ۲۱ درجه سانتیگراد عمل آورده شده اند. نتایج نشان می دهد که مقاومت نهایی (۱۸۰ روزه) بتن ساخته شده در ۴ تا ۱۳ درجه سانتیگراد بیشتر از بتن های ساخته شده در دمای ۲۱ ، ۲۹ ، ۳۸ یا ۴۶ درجه سانتیگراد بوده است. با بررسی میکروسکوپی ریزساختار سیمان هیدراته شده بسیاری از محققین این افزایش مقاومت در عمل آوری در دمای پایینتر را به یکنواخت تر بودن خمیر هیدراته شده (بخصوص پخش فضاهای ریز در خمیر) نسبت می دهند.

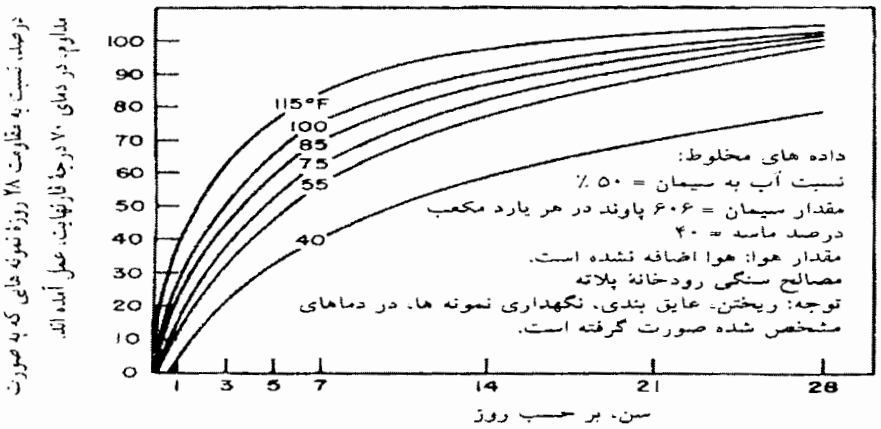
برای بتن هایی که در ۲۱ درجه سانتیگراد ساخته شده و سپس در دماهای مختلف از زیر صفر تا ۲۱ درجه سانتیگراد عمل آوری شده اند تاثیر دماهای عمل آوری بر روی مقاومت، در شکل (۳-۶ ج) نشان داده شده است. در حالت کلی، هر چه دمای عمل آوری کمتر باشد، مقاومت بتن تا سن ۲۸ روزگی نیز کمتر است. در دمای نزدیک صفر، مقاومت ۲۸ روزه بتن تقریبا نصف مقاومت بتن عمل آوری شده در ۲۱ درجه سانتیگراد است و به سختی می توان افزایش مقاومتی برای بتن تقریبا در دمای عمل آوری زیر صفر مشاهده نمود.

از آنجا که واکنش های سیمان و آب نسبتا کند می باشد، لذا لازم است که درجه حرارت برای مدت مشخصی در یک سطح مناسب نگهداشته شود تا انرژی لازم برای انجام واکنشها موجود باشد. این عمل باعث ادامه واکنش ها و افزایش مقاومت و پر شدن فضاهای خالی با محصولات هیدراسیون خواهد شد.

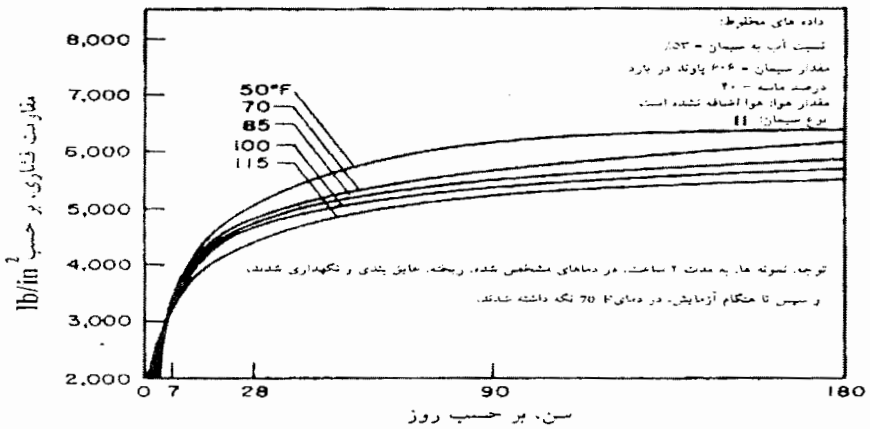
۳-۲-۲-۴ تاریخچه دما

زمان بر روی مقاومت بتن تاثیر عمده ای داشته و کاربرد زیادی درعمل پیدا نموده است. از آنجا که از نظر مقاومت، دمای دوران عمل آوری بسیار مهمتر از دمای بتن ریزی است، لذا لازم است در بتن های معمولی در هوای سرد برای مدتی مشخص حداقل دما را بالا نگهداشت.

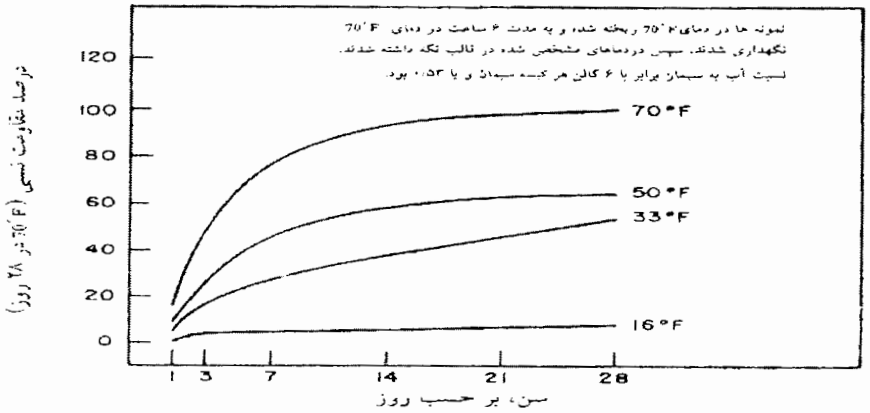
بتن های عمل آمده در هوای گرم ودر مناطق حاره مقاومت اولیه بالاتر ولی مقاومت نهایی پایینتری از بتنی که در زمستان یا در هوای سرد عمل آوری می شود نشان می دهند. در صنعت پیش ساخته، از عمل آوری با بخار به منظور تسریع مقاومت و باز کردن سریعتر قالبها استفاده می شود. در یک بتن حجیم و بدون کنترل دما، بتن برای مدت طولانی، دمایی به مراتب بالاتر از دمای محیط خواهد داشت.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳-۶ تاثیر دمای ریختن و عمل آوری بر روی مقاومت بتن.

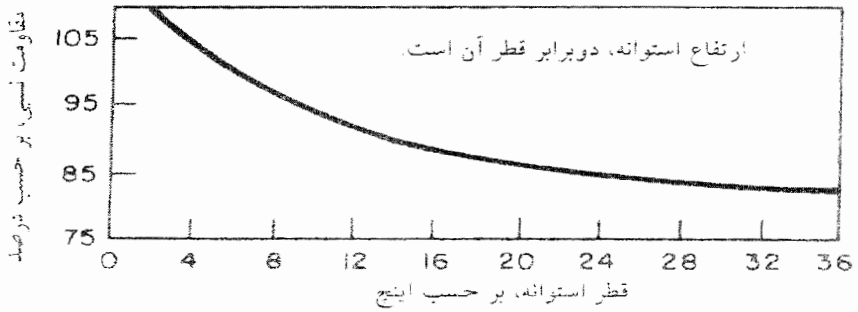
بنابراین در مقایسه با مقاومت بتن های ساخته شده در دمای معمول آزمایشگاه، بتن های ساخته شده در محل اغلب مقاومت اولیه بالاتر و نهایی پایین تری خواهند داشت[۱۸].

۳-۲-۳ عوامل موثر بر آزمایش

اغلب اتفاق می افتد که نتایج حاصل از مقاومت بتن تحت تاثیر عوامل آزمایش نمونه ها و شرایط بارگذاری قرار می گیرند، پارامترهای نمونه شامل تاثیر اندازه، هندسه، رطوبت و شرایط انتهایی نمونه می باشد، در حالی که پارامترهای بارگذاری شامل میزان تنش و مدت، آن و نرخ اعمال تنش، مشخصات دستگاه آزمایش و تاثیر صفحات بارگذاری می باشند.

۳-۲-۳-۱ پارامترهای نمونه

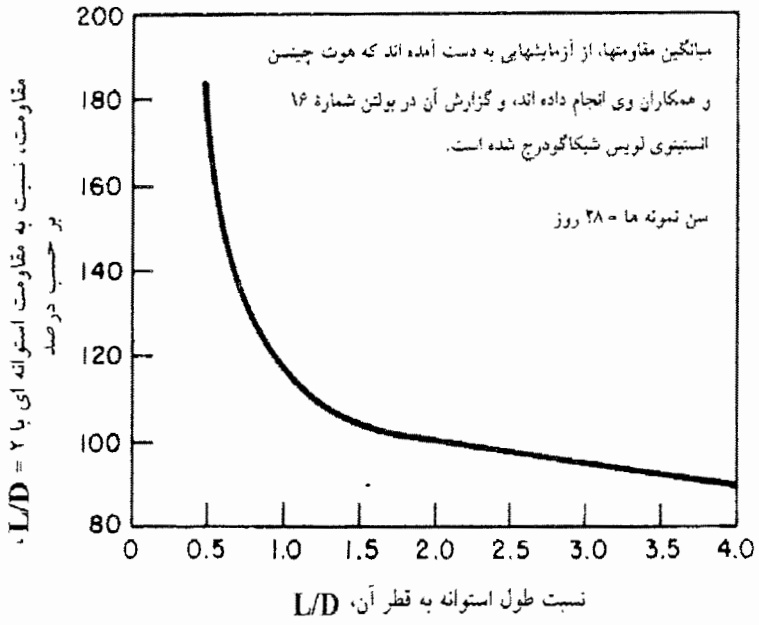
در استاندارد آمریکایی، اندازه نمونه استاندارد برای مقاومت فشاری، استوانه ۳۰ × ۱۵ سانتیمتر (۱۲×۶ اینچ) می باشد. با ثابت نگهداشتن نسبت ارتفاع به قطر استوانه برابر با ۲، هر چه قطر نمونه استوانه ای بزرگتر شود مقاومت فشاری نمونه کمتر خواهد شد. نتایج نشان داده شده در شکل ۳-۷ در مقایسه با نمونه استاندارد، مقاومتی برابر ۱۰۸ و ۱۰۶ درصد برای نمونه های استوانه ای ۱۰ × ۵ سانتیمتر (۴ × ۲ اینچ) و نمونه های ۱۵ × ۷/۵ سانتیمتر (۶×۳ اینچ) نسبت می دهد.



شکل ۳-۷ تأثیر قطر نمونه بر روی مقاومت بتن در نمونه های با نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۲

هنگامی که قطر نمونه از ۴۵ سانتیمتر (۱۸ اینچ) بیشتر شود تقلیل بیشتری در مقاومت مشاهده می گردد. این گونه تغییرات مقاومت، بر اثر تغییرات در اندازه نمونه، به افزایش درجه همگنی آماری در نمونه های بزرگ نسبت داده می شود.

تاثیر هندسه نمونه (تغییرات نسبت ارتفاع به قطر) بر روی مقاومت فشاری، در شکل ۳-۸ نشان داده شده است. به طور کلی هر چه نسبت ارتفاع به قطر نمونه بیشتر شود مقاومت کاهش می یابد. به عنوان مثال در مقایسه با مقاومت نمونه استاندارد (نسبت ارتفاع به قطر برابر با ۲)، نمونه های با نسبت ارتفاع به قطر برابر ۱ حدود ۱۵ درصد افزایش نشان دادند. شایان ذکر است که نمونه های بتنی مکعبی ۱۵سانتیمتری (۶ اینچ) که در اروپا بیشتر رایج است، مقاومتی در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد بیش از همان بتن با نمونه های استوانه ای استاندارد (۳۰ × ۱۵ سانتیمتر) نشان داده اند. به علت تاثیر رطوبت بر مقاومت نمونه، بر اساس استاندارد، نمونه ها در هنگام آزمایش مقاومت بایستی مرطوب باشند. در آزمایش، مقاومت فشاری نمونه های خشک شده در هوا در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد بیشتر از آن نمونه های مشابه ولی در حالت اشباع به دست آمده است. مقاومت کمتر در بتن اشباع شده احتمالاً می تواند بر اثر وجود فشار جداکننده در خمیر سیمان باشد. بر طبق استانداردASTM C۳۹ در رابطه با تعیین مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای، باید ابعاد پستی وبلندی های روی سطوح انتهایی کمتر از ۰/۰۵ میلیمتر باشند. این ضابطه از طریق کلاهک گذاری (معمولاً با استفاده از ملات گوگرد) یا بریدن یا ساییدن سطوح انتهایی اجرا می گردد. متأسفانه شرایط انتهایی متفاوت، می تواند باعث ایجاد تغییراتی در مقاومت اندازه گیری شده شود. بنابراین در هر پروژه به خصوص که در آن از بتن با مقاومت بالا استفاده می شود، باید به طور صریح نحوه آماده کردن انتهای نمونه ها را مشخص نمود[۴].



شکل ۳-۸ تاثیر تغییرات نسبت ارتفاع به قطر نمونه، بر روی مقاومت بتن

۳-۲-۳-۲- شرایط بارگذاری

در آزمایشگاه مقاومت فشاری نمونه های بتنی از طریق آزمایش فشاری تک محوری تعیین میشود(ASTM C۴۶۹). در این آزمایش، بار بتدریج افزایش می یابد تا نمونه ظرف مدت ۲ تا ۳ دقیقه بشکند. در عمل، اغلب اعضای بتنی تحت بار مرده به مدت نامعین وگاه تحت بارهای تکراری و ضربه ای قرار می گیرند. بنابراین جالب آن است که ارتباط بین مقاومت بتن تحت شرایط نمونه های آزمایشگاهی و تحت شرایط بارگذاری واقعی مشخص گردد.

در هنگام آزمایش بتن های با مقاومت بسیار بالا، باید ظرفیت دستگاه آزمایش را مد نظر قرار داد. ظرفیت ماشین در تعیین مقاومت نمونه ها باید به اندازه ای باشد که بار شکست نمونه ها از ۶۷ در صد آن تجاوز نکند. آزمایشگاه های تجارتی نسبتاً کمی برای انجام آزمایش بر روی بتن های با

مقاومت بالا تجهیز شده اند. ظرفیت دستگاه های آزمایش متداول معمولاً ۱/۳ مگانیوتون می باشد. برای آزمایش بر روی نمونه های استوانه ای (۳۰۰ mm × ۱۵۰) دارای مقاومت ۱۵۰ مگاپاسکال، نیاز به یک دستگاه ۴ مگانیوتون است ودر آزمایشگاه های معمولی به ندرت چنین دستگاهی یافت می شود. این موضوع باعث شده است که افراد به استفاده از نمونه های کوچکتر (۲۰۰ mm ×۱۰۰) تمایل پیدا کنند .

مجدداً در بتن های معمولی تأثیر صفحات بارگذاری قابل توجه نیست. آنها ضوابط استاندارد ASTM C۳۹ در رابطه با مقاومت فشاری نمونه های استوانه ای بتن را رعایت می کنند. اما مطالعات انجام شده بر روی بتن های با مقاومت بالا نشان داده اند که در آنها حتی این اثر را نیز نمی توان نادیده گرفت. صفحاتی که طوری تغییر شکل می دهند که تنش در پیرامون نمونه بیشتر از مرکز آن شود، نسبت به صفحاتی که با تغییر شکلشان باعث می شوند تنش های حداکثر در مرکز نمونه ایجاد گردند، سبب رسیدن به مقاومت اسمی بالاتری می شوند. در بتن های با مقاومت فشاری بیش از ۱۱۲ مگاپاسکال، این اختلاف به حدود ۱۵ درصد هم می تواند برسد[۴].

فصل چهارم: مصالح مصرفی و تشریح برنامه آزمایشگاهی

۴ـ۱ مقدمه

در این فصل به بررسی مصالح مورد استفاده در ساختن نمونه های آزمایشی، خصوصیات آنها و نتایج آزمایش های مصالح می پردازیم. همچنین نحوه نامگذاری مخلوط های بتن، اصول انتخاب نسبت مصالح و روش طرح اختلاط های مورد استفاده توضیح داده می شود. در ادامه توضیحاتی در خصوص آزمایش های انجام شده بتن داده شده است. نحوه ساخت و عمل آوری آزمون ها و مشخصات آنها شامل تعداد نمونه ها و غیره نیز در این بخش مورد بررسی قرار می گیرد.

۴ـ۲ مصالح مصرفی

در این تحقیق اهتمام بر آن بوده است تا بتنی مورد بررسی قرار گیرد که نتایج حاصل از آن برای شاهرود مورد استفاده باشد لذا آب ، سنگدانه، سیمان شاهرود و میکروسیلیس کارخانه فروسیلیس سمنان انتخاب گردید. فقط در مورد فوق روان کننده به دلیل فقدان تولید آن در شاهرود از تهران تهیه شد.

در ساخت بتن های این تحقیق از مصالح زیر استفاده شده است.

۱ـ سنگدانه معمولی ریزدانه (ماسه) با محدوده اندازه اسمی (۶ ـ۰) میلیمتر

۲ـ سنگدانه معمولی درشت دانه (شن ریز) با محدوده اندازه اسمی (۱۲ـ۶) میلیمتر

۳ـ سنگدانه معمولی درشت دانه (شن متوسط) با محدوده اندازه اسمی (۲۵ـ۱۲) میلیمتر

۴ـ سیمان پرتلند تیپ II کارخانه سیمان شاهرود

۵ـ فوق روان کننده سکو دنس[۱]

۶ـ آب شرب لوله کشی شبکه شهری

۴ـ۲ـ۱ سنگدانه معمولی ریزدانه (ماسه)

ماسه مورد استفاده در بتن های این تحقیق با محدوده اندازه اسمی (۶ ـ۰ میلیمتر) از نوع ماسه شکسته است و از معدن جعفـرخان شاهرود تامیـن شده است. این ماسه با مدول نرمی ۳/۵۶ کمی درشت تر از ماسه استاندارد می باشد آزمایش های زیر بر روی ماسه انجام شد:

۱ـ آزمایش دانه بندی بر اساس استاندارد ASTMC 136 – 84a

۲ـآزمایش چگالی و جذب آب بر اساس استاندارد ASTMC 128-88

---

۱. Seko Dense

۳ـ آزمایش وزن مخصوص و فضای خالی مصالح خشک متراکم با میله طبق ASTM C29/C29M-90

۴ـ۲ـ۲ سنگدانه معمولی درشت دانه (شن)

سنگدانه درشت در دو اندازه اسمی مورد استفاده قرار گرفته است: شن ریز (۱۲ـ۶ میلیمتر) و شن متوسط (۲۵ـ۱۲ میلیمتر). این شن ها نیز از معدن جعفرخان شاهرود تأمین شد. توضیح اینکه این معدن از معادن پر مصرف در شاهرود می باشد. آزمایش های زیر در مورد شن ها انجام شده است:

۱ـ آزمایش دانه بندی بر اساس ASTMC 136 – 84a

۲ـ آزمایش چگالی و جذب آب بر اساس ASTMC 127 – 88

۳ـ آزمایش وزن مخصوص و فضای خالی مصالح خشک متراکم با میله بر اساس ASTM C29/C29M-90 .

الف ـ نتایج آزمایش دانه بندی

نتایج دانه بندی مصالح سنگی به تفکیک هر نوع در جدول ۴ـ۱ ذکر شده است. منحنی دانه بندی شن ها (با اختلاط ۵۰٪ از هر کدام) در محدوده دانه بندی ASTMC 33 قرار می گیرد ولی منحنی دانه بندی ماسه در این محدوده واقع نمی شود که با توجه به درشت بودن ماسه امری طبیعی است.

ب ـ نتایج سایر آزمایش ها

نتایج مندرج در جدول ۳ـ۲ از سایر آزمایش های سنگدانه های درشت دانه و ریزدانه معمولی بدست آمده است.

جدول ۴ـ۱ـ دانه بندی (درصد رد شده) سنگدانه های معمولی

ماسه (۶ـ۰) میلیمتر	شن ریز (۱۲ـ۶) میلیمتر	شن متوسط (۲۵ـ۱۲) میلیمتر	اندازه چشمه الک (mm)	الک ASTM
		۱۰۰	۲۵/۰	۱″
	۱۰۰	۷۵/۴۹	۱۹/۰	۳/۴″
	۹۷/۷۴	۱۲/۱۳	۱۲/۵	۱/۲″
	۸۰/۰۷	۴/۵۱	۹/۵	۳/۸″
۱۰۰	۲۹/۲۵	۱/۱۹	۶/۳۵	۱/۴″
۹۶/۶۳	۵/۲۵	۰/۲۹	۴/۷۵	۴
۶۹/۴۸			۲/۳۸	۸
۴۲/۸۹			۱/۱۹	۱۶
۲۰/۰۵			۰/۶	۳۰
۱۲/۷۳			۰/۴۵	۴۰
۱۱/۳۶			۰/۳	۵۰
۳/۹۸			۰/۲۳	۷۰
۳/۳۶			۰/۱۵	۱۰۰
۱/۳			۰/۱۳	۱۴۰
۰/۹۹			۰/۱	۱۷۰
۰/۸۱			۰/۰۷۵	۲۰۰

جدول ۴ـ۲ نتایج آزمایش های سنگدانه های معمولی

ویژگی و شرح آزمایش	واحد	شن متوسط	شن ریز	ماسه (۶ـ۰)mm
جذب آب	%	۰/۷۱۵	۰/۶۷۴	۱/۸۴
چگالی حجمی اشباع با سطح خشک	gr/cm^3	۲/۷۴۸	۲/۷۷۲	۲/۶۳۱
چگالی حجمی ذرات (خشک)	gr/cm^3	۲/۷۲۸	۱/۹۳	۲/۴۹۴
چگالی ظاهری ذرات (خشک)	gr/cm^3	۲/۷۸۳	۲/۸۰۶	۲/۸۹۰
دانستیه متراکم با میله (خشک)	gr/cm^3	۱/۵۶۸	۱/۵۴۸	۱/۵۴۳

۴-۲-۳ سیمان

سیمان مصرفی در کلیه طـرح اختلاط ها، سیمان تیپ II شاهرود می باشد. با توجه به اطلاعات کسب شده از کارخانه سیمان شاهرود، ویژگیهای شیمیایی و فیزیکی سیمان به ترتیب در جدول (۴-۳) و (۴-۴) آورده شده است. چگالی ذرات سیمان تیپ II شاهرود به وسیله فلاسک لوشاتلیه و بر اساس استاندارد ASTMC 188-86 در آزمایشگاه تعیین شده و مقدار آن $۳/۱۵ gr/cm^3$ می باشد.

۴ـ۲ـ۴ فوق روان کننده

به طور یکنواخت در تمامی طرح اختلاط ها به دلیل فراهم آوردن شرایط یکسان از نوعی فوق روان کننده به نام سکو دنس از شرکت کلینیک ساختمانی ایران استفاده شده است. چگالی این افزودنی در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر با kg/lit ۱/۱۱ می باشد. رنگ آن قهوه ای تیره و مقدار مصرف آن به صورت متعارف در هر کیسه ۵۰ کیلویی سیمان یک لیتر می باشد که به لحاظ وزنی این مقدار حدود ۲ درصد وزن سیمان است.

جدول ۴ـ۳ـ ویژگی های شیمیایی سیمان تیپ II شاهرود

ترکیب شیمیایی	درصد	ترکیب شیمیایی	درصد
SiO_2	۲۱/۱۱	LOI	۲/۱۵
Al_2O_3	۴/۲۸	IR	۰/۵۳
Fe_2o_3	۳/۷۳	Free CaO	۰/۹۲
CaO	۶۴/۳۸	C_3S	۶۰/۴۰
MgO	۱/۶۷	C_2S	۱۵
SO_3	۲/۵۱	C_3A	۵
K_2O	۰/۵۳	C_4AF	۱۱/۴۰
Na_2O	۰/۳۸	LSF	۹۴/۳۰
SIM	۲/۶۴	ALM	۱/۱۵

جدول ۴ـ۴ـ ویژگی های فیزیکی و مکانیکی سیمان تیپ II شاهرود

ویژگی		واحد	نتیجه آزمایش
ریزی سیمان		Cm^2/gr	۳۲۰۰
زمان گیرش	اولیه	Min	۱۱۲
	نهایی		۱۷۰
مقاومت فشاری ملات استاندارد	۳ روزه	Kg/cm^2	۲۲۵
	۷ روزه		۳۰۸
	۲۸ روزه		۳۸۵

۴ـ۲ـ۵ آب

آب مصرفی جهت ساخت و عمل آوری بتن از آب شرب شهر شاهرود تامین گردید .ترکیب شیمیایی آب که توسط آزمایشگاه شرکت آب و فاضلاب شاهـرود بـه دست آمده ، در جدول (۴-۵) آورده شده است.

جدول۴ـ۵ آنالیز شیمیایی‌آب مصرفی در ساخت و عمل آوری بتن های تحقیق

آزمایش		واحد	مقدار
کلرور	Cl^-	mg/lit	۸۰
سولفات	SO_4^{2-}	mg/lit	۵۴
کربنات	CO_3^{2-}	mg/lit	۰
بی کربنات	HCO_3^-	mg/lit	۱۵۰
نیتریت	NO_2^-	mg/lit	۰
فسفات	PO_4^{3-}	mg/lit	۰/۰۴
نیترات	NO_3^-	mg/lit	۳/۷۸
سیلیکات	SiO_2^-	mg/lit	۱۰
کلسیم	Ca^{2+}	mg/lit	۳۸/۴
منیزیم	Mg^{2+}	mg/lit	۲۴
پتاسیم	K^+	mg/lit	۲/۲
آهن	Fe	mg/lit	۰/۰۱
منگنز	Mn	mg/lit	۰/۰۰۷
PH		—	۷/۳۷
هدایت الکتریکی		μ moh/Cm	۵۶۵
کدروت		Ntu	۰/۵۶
کل جامدات محلول	TDS	mg/lit	۲۸۲
سختی تام	$CaCO_3$	mg/lit	۲۱۰

۴-۲-۶ میکروسیلیس

میکروسیلیس به کار رفته در این تحقیق تولید کارخانه فروسیلیس ایران می باشد که ساختار آن بدون شکل (آمورف) می باشد و شکل ذرات آن کروی است. دانه بندی ذرات از ۰/۲ تا ۰/۳ میکـــرون و وزن مخصوص ظاهری آن ۲۵۰ کیلوگـــرم بر متـرمکعب می باشد.

مشخصات شیمیایی این نوع میکروسیلیس که توسط کارخانه فروسیلیس سمنان تعیین شده است در جدول (۴-۶) آورده شده است:

جدول۴-۶ مشخصات شیمیایی میکروسیلیس شرکت فروسیلیس ایران

SiO_2	۹۳/۶ ٪
Fe_2O_3	۰/۸۷٪
Al_2O_3	۱/۳۲٪
CaO	۰/۴۹٪
MgO	۹۷٪
Na_2O_3	۰/۳۱٪
N_2O	۱/۰۱٪
P_2O_5	۰/۱۶٪
SO_3	۰/۱۰٪
Ci	۰/۰۴٪

۴-۳ طرح اختلاط های بتن

در این تحقیق جهت بررسی اثر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری، طرح اختلات بتن برای نسبت های مختلف آب به مصالح سیمانی و مقادیر مختلف میکروسیلیس صورت پذیرفت. نسبت های آب به مصالح سیمانی ۰/۲۵ ، ۰/۳ ، ۰/۳۵ ، ۰/۴ ، ۰/۴۵ انتخاب گردید. برای هر نسبت آب به مصالح سیمانی پنج طرح اختلاط انجام پذیرفت که مقدار مصرف میکروسیلیس در هر طرح اختلاط ۰ ، ۵ ، ۱۰ ، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن سیمان انتخاب گردید. در تعیین نسبت آب به مصالح سیمانی از تقسیم وزن آب به مجموع وزن سیمان و میکروسیلیس استفاده گردید. برای هر نسبت آب به مصالح سیمانی تمامی درصدهای میکروسیلیس بکار گرفته شده مجموعا" ۲۵ سری آزمایش برنامه ریزی شد . در هر سری آزمایش تعداد سه نمونه با استفاده از قالب های استوانه ای فلزی ۳۰ × ۱۵ سانتی متر (ASTM) تهیه و قالب گیری شد. بنابراین تعداد ۷۵ آزمونه به غیر از آزمونه های کنترلی ساخته و عمل آوری گردید. بر اساس بند ۶-۵-۱-۱ آیین نامه بتن ایران در هر سری آزمایش تعداد نمونه های آزمایشی سه عدد انتخاب شد.

۴ـ۴ نحوه عمل آوری نمونه های آزمایشی بتن

پس از ساختن بتن و نمونه گیری از آن، ابتدا آزمونه ها در محل آزمایشگاه و در زیر چتایی که یکبار خیس می شد نگهداری تا زمان گیرش اولیه آنها سپری شود. مطابق ASTM این زمان می بایستی ۶ ± ۲۴ ساعت باشد. نمونه های آزمایشی پس از ۲ ± ۲۰ ساعت از قالب خارج و در داخل آب با دمـای ۲۰ درجه سانتی گراد منتقل گردیدند. این مرحله نیز به مدت ۶ روز متوالی به طول انجامید تا مجموعا هر نمونه ۷ روز عمل آوری را تجربه کرده باشد.

۴ـ۵ نحوه نامگذاری طرح اختلاط ها

برای نامگذاری نمونه های آزمایشی نمونه ها به پنج گروه A ، B ، C ، D و E تقسیم شدند. نسبت آب به مصالح سیمانی این گروه ها به ترتیب ۰/۲۵ ، ۰/۳ ، ۰/۳۵ ، ۰/۴ و ۰/۴۵ است. هر نمونه با نام گروه و شماره نمونه در آن گروه و درصد میکروسیلیس بکاررفته مشخص گردید. برای مثال B-3-20 ، نمونه گروه B با نسبت آب به مصالح سیمانی ۰/۳ ، شماره نمونه ۳ و مقدار میکروسیلیس جایگزین سیمان ، ۲۰ درصد می باشد.

۴ـ۶ روش طرح اختلاط

طرح اختلاط بتن برای گروههای مختلف نسبت آب به مصالح سیمانی بر اساس روش وزنی ACI-211-89 انجام پذیرفت.

حداکثر اندازه سنگدانه های انتخابی ۲۵ میلیمتر تعیین شد. در انتخاب نسبت آب به مصالح سیمانی ، می بایستی مقادیر مختلفی بررسی می گردید که برای این منظور نسبت های مناسب ۰/۲۵ ، ۰/۳ ، ۰/۳۵، ۰/۴، ۰/۴۵ در نظر گرفته شد. سیمان مورد استفاده ، سیمان تولیدی کارخانه سیمان شاهرود از نوع سیمان پرتلند تیپ II بود که مقاومت متوسط در برابر سولفات ها را دارا می باشد.

اسلامپ طرح اختلاط ها حدود ۲/۵ الی ۵ سانتی متر انتخاب گردید و مقادیر آب لازم و هوای غیر عمدی و دانه های درشت از جداول مربوطه مطابق با $ACI-211-89$ به ترتیب $179\ kg/m^3$، ۱/۵ درصد و $1083\ kg/m^3$ تعیین آمد. با مشخص شدن میزان آب و تقسیم آن بر نسبت آب به مصالح سیمانی در هر اختلاط وزن سیمان و میکروسیلیس مصرفی حاصل می شود. مقدار ریزدانه از رابطه زیر برای هر اختلاط بدست آمد:

$$FA = U - CA - W - (C+SF)$$

بطوریکه در آن FA وزن ریز دانه ، U وزن واحد حجم بتن ، CA وزن مصالح سنگی درشت دانه ، W وزن آب ، C وزن سیمان و SF وزن میکروسیلیس که از رابطه زیر حاصل خواهد شد :

$$U = 10G_a(100 - A) + C(1 - \frac{G_a}{G_c}) + SF(1 - \frac{G_a}{G_{SF}}) - w(G_a - 1)$$

که در آن G_{SF} , G_C , W , SF , C , A به ترتیب درصد هوای محبوس غیرعمدی، وزن سیمان، وزن میکروسیلیس، وزن آب، چگالی سیمان و چگالی میکروسیلیس می باشد. همچنین G_a چگالی متوسط دانه های ریز و درشت از رابطه زیر بدست می آید:

$$G_a = \frac{1}{2}(G_{CA} + G_{FA})$$

شایان ذکر است روش به کار رفته جهت به دست آوردن مقدار ریزدانه، روش وزنی ACI-211-89 می باشد. اعداد به دست آمده از روابط و جداول مربوط به روش ذکر شده برای حالتی است که دانه ها در حالت اشباع با سطح خشک (SSD) هستند. بنابراین سنگدانه ها نه آبی از مخلوط جذب کرده و نه آبی به آن اضافه می نمایند. در صورتیکه در عمل چنین نمیباشد و لذا لازم است تصحیحات مناسب در اوزان شن و ماسه و آب صورت پذیرد. برای این منظور از روابط زیر استفاده می گردد.

$$CA_W = CA\ (1 + W_{CA})$$
$$FA_W = FA\ (1 + W_{FA})$$
$$W_{(\text{اصلاح شده})} = W_{(\text{قبلی})} - CA\ (W_{CA} - W_{SSD,CA}) - FA\ (W_{FA} - W_{SSD,FA})$$

که در روابط فوق FA_W , CA_W به ترتیب وزن شن و ماسه در حالت مرطوب و , W_{FA} W_{CA} درصد رطوبت طبیعی آنها همچنین $W_{SSD,CA}$, $W_{SSD,FA}$ به ترتیب رطوبت حالت اشباع با سطح خشک شن و ماسه می باشند.

۴ـ۷ مشخصات مصالح مورد استفاده

با توجه به آزمایش های انجام شده بر روی مصالح که ابتدا تشریح شد، مشخصات و فرضیات زیر جهت تعیین مقدار مصالح مورد استفاده قرار گرفت:

ـ سیمان تیپ II شاهرود با چگالی ذرات معادل ۳/۱۵ gr/cm^3

ـ سنگدانه معمولی درشت دانه با محدوده اندازه اسمی (۲۵ ـ ۱۲) میلیمتر با ظرفیت جذب آب ۰/۷۱۵ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک برابر ۲/۷۴۸ gr/m^3

ـ سنگدانه معمولی درشت دانه با محدوده اندازه اسمی (۱۲ـ۶) میلیمتر با ظرفیت جذب آب ۰/۶۷۴ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک برابر با ۲/۷۷۲ gr/m^3

ـ سنگدانه معمولی ریـزدانه با محــدوده اندازه اسمی (۶ـ۰) میلیمتر با ظـرفیت جذب آب ۱/۸۴ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک برابر با ۲/۴۹۴ gr/m^3

ـ مایع فوق روان کننده سکو دنس با چگالی ۱/۱۱ gr/m^3 به میزان ۲ درصد وزنی سیمان

ـ درصد هوای مفروض ۱/۵ درصد می باشد.

ـ چگالی اشباع با سطح خشک میانگین کل سنگدانه ها شامل ماسه، شن ریز و شن متوسط، برابر با ۲/۶۷۱ gr/m^3 می باشد.

۴ـ۸ مقادیر مصالح مصرفی در طرح اختلاط ها

همانطور که توضیح داده شد ۲۵ طرح اختلاط برای ۵ حالت نسبت آب به مصالح سیمانی و همچنین ۵ نسبت میکروسیلیس به سیمان در نظر گرفته شد که جزئیات مقادیر مصالح مصرفی در این ۲۵ طرح اختلاط در جدول ۴ـ۷ ذکر شده است.

جدول ۴-۷ مقادیر مصالح مصرفی در بتن طرح اختلاط ها

ردیف	میکروسیلیس (kg/m^3)	عیار سیمان (kg/m^3)	نسبت آب به مصالح سیمانی	نسبت آب به سیمان	وزن خشک مصالح سنگی			آب (kg/m^3)	فوق روان کننده (kg/m^3)	هوای فرض شده (٪)	وزن مخصوص محاسباتی بتن تازه (kg/m^3)
					ماسه (۶ mm-۰)	شن ریز (۱۲ mm-۶)	شن متوسط (۲۵mm-۱۲)				
۱	۰	۷۱۶	۰/۲۵	۰/۲۵	۴۵۲	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۴/۳	۱/۵	۲۴۱۱
۲	۳۴	۶۸۲	۰/۲۵	۰/۲۶	۴۵۲	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۴/۳	۱/۵	۲۴۱۱
۳	۶۵	۶۵۱	۰/۲۵	۰/۲۷	۴۵۲	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۴/۳	۱/۵	۲۴۱۱
۴	۹۳	۶۲۳	۰/۲۵	۰/۲۸	۴۵۲	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۴/۳	۱/۵	۲۴۱۱
۵	۱۱۹	۵۹۷	۰/۲۵	۰/۳	۴۵۲	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۴/۳	۱/۵	۲۴۱۱
۶	۰	۵۹۷	۰/۳	۰/۳	۵۵۵	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۲	۱/۵	۲۳۹۱
۷	۲۸	۵۶۹	۰/۳	۰/۳۱	۵۵۵	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۲	۱/۵	۲۳۹۱
۸	۵۴	۵۴۳	۰/۳	۰/۳۳	۵۵۵	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۲	۱/۵	۲۳۹۱
۹	۷۸	۵۱۹	۰/۳	۰/۳۴	۵۵۵	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۲	۱/۵	۲۳۹۱
۱۰	۱۰۰	۴۹۷	۰/۳	۰/۳۶	۵۵۵	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۲	۱۲	۱/۵	۲۳۹۱
۱۱	۰	۵۱۱	۰/۳۵	۰/۳۵	۶۲۹	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۱۰	۱/۵	۲۳۷۷
۱۲	۲۴	۴۸۷	۰/۳۵	۰/۳۷	۶۲۹	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۱۰	۱/۵	۲۳۷۷
۱۳	۴۶	۴۶۵	۰/۳۵	۰/۳۸	۶۲۹	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۱۰	۱/۵	۲۳۷۷
۱۴	۶۷	۴۴۴	۰/۳۵	۰/۴	۶۲۹	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۱۰	۱/۵	۲۳۷۷
۱۵	۸۵	۴۲۶	۰/۳۵	۰/۴۲	۶۲۹	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۱۰	۱/۵	۲۳۷۷
۱۶	۰	۴۴۷	۰/۴	۰/۴	۶۸۴	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۹	۱/۵	۲۳۶۶
۱۷	۲۱	۴۲۶	۰/۴	۰/۴۲	۶۸۴	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۹	۱/۵	۲۳۶۶
۱۸	۴۱	۴۰۶	۰/۴	۰/۴۴	۶۸۴	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۹	۱/۵	۲۳۶۶
۱۹	۵۸	۳۸۹	۰/۴	۰/۴۶	۶۸۴	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۹	۱/۵	۲۳۶۶
۲۰	۷۵	۳۷۲	۰/۴	۰/۴۸	۶۸۴	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۹	۱/۵	۲۳۶۶
۲۱	۰	۳۹۸	۰/۴۵	۰/۴۵	۷۲۷	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۸	۱/۵	۲۳۵۸
۲۲	۱۹	۳۷۹	۰/۴۵	۰/۴۷	۷۲۷	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۸	۱/۵	۲۳۵۸
۲۳	۳۶	۳۶۲	۰/۴۵	۰/۴۹	۷۲۷	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۸	۱/۵	۲۳۵۸
۲۴	۵۲	۳۴۶	۰/۴۵	۰/۵۲	۷۲۷	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۸	۱/۵	۲۳۵۸
۲۵	۶۶	۳۳۲	۰/۴۵	۰/۵۴	۷۲۷	۵۴۱	۵۴۱	۱۶۱	۸	۱/۵	۲۳۵۸

۴ـ۹ روش ساختن و عمل آوردن نمونه ها

پس از توزین مصالح، ابتدا مصالح سنگی درشت دانه و به دنبال آن مصالح سنگی ریزدانه مخلوط شدند. سپس سیمان و در صورت وجود میکروسیلیس به آن اضافه گردید. در نهایت آب و فوق روان کننده (از قبل مخلوط شده) به این مخلوط اضافه و عمل اختلاط صورت پذیرفت. سپس مخلوط، قالب گیری و جهت تراکم بر روی میز لرزان قرارگرفت. نهایتا" عمل Capping سطح خارجی نمونه با استفاده از مخلوط میکروسیلیس و سیمان و ماسه سیلیس گذشته از الک نمره ۵۰ با نسبتهای حجمی مساوی انجام گرفت.

نمونه های استوانه ای در زیر چتایی خیس شده پس از حدود ۲۰ ساعت از قالب باز و برای عمل آوری به حوضچه آب با دمای حدود ۲۰ درجه سانتی گراد جابجا شدند. پس از گذراندن عمل آوری اولیه و کسب بلوغ ۷ روزه ، از حوضچه آب خارج و در جک هیدرولیکی جهت تعیین مقاومت فشاری تا مرحله شکستن تحت تاثیر بار قرار گرفتند.

۴-۱۰ آزمایش تعیین مقاومت فشاری استوانه ای

همه نمونه های عمل آوری شده بلافاصله و در حالت مرطوب به زیر جک گذاشته شده و با سرعت بارگـذاری مجاز ASTM به طور یکنـواخت بـارگذاری شدند و چـون از قالب های استوانه ای ۳۰ × ۱۵ سانتی متر استفاده شده بود نیاز به هیچ گونه ضریب اصلاح مقاومت هم نبود.

فصل پنجم : نتایج آزمایش ها

۵-۱ مقدمه

در این فصل نتایج آزمایش مقاومت فشاری انجام شده بر روی هر یک از نمونه های بتنی ساخته شده به صورت جداولی تهیه و ارایه گشته است. این جداول شامل اطلاعاتی از قبیل نوع شکست ، نیروی گسیختگی، مقاومت گسیختگی و مقدار مقاومت متوسط می باشد . در ادامه نمودارهایی حاوی منحنی های مقاومت فشاری نمونه ها به تفکیک نسبت های آب به مصالح سیمانی و آب به سیمان و نسبت های میکروسیلیس جایگزین ارایه گردیده است . همچنین در اشکال ۵-۱۱ و ۵-۱۲ و ۵-۱۳ تلاش شده است تا با روی هم گذاری منحنی های بدست آمده بتوان مقایسه مناسبی را انجام داد .

در جدول ۵-۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۲۵ با نسبتهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان نشان داده شده است.

جدول۵-۱ نتایج آزمایش مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۲۵

شماره و مشخصات نمونه	نوع شکست	نیروی گسیختگی KN	مقاومت گسیختگی Kg/cm^2	مقاومت متوسط Kg/cm^2
A-۱-۰	مخروطی و ستونی	۸۵۰	۴۸۰	۴۸۹
A-۲-۰	مخروطی	۸۷۶	۴۹۵	
A-۳-۰	مخروطی	۸۷۱	۴۹۲	
A-۱-۵	مخروطی و برشی	۱۰۰۰	۵۶۵	۵۲۱
A-۲-۵	مخروطی توام با دونیم شدن	۹۲۰	۵۲۰	
A-۳-۵	مخروطی توام با دو نیم شدن	۸۵۰	۴۸۰	
A-۱-۱۰	مخروطی و برشی	۹۰۰	۵۱۰	۵۰۹
A-۲-۱۰	ستونی	۷۰۰	۳۹۶	
A-۳-۱۰	مخروطی	۱۱۰۰	۶۲۲	
A-۱-۱۵	مخروطی و ستونی	۸۴۰	۴۷۵	۴۹۶
A-۲-۱۵	مخروطی و برشی	۹۴۰	۵۳۱	
A-۳-۱۵	مخروطی	۸۵۵	۴۸۳	
A-۱-۲۰	مخروطی	۸۹۰	۵۰۳	۴۵۲
A-۲-۲۰	مخروطی	۷۱۰	۴۰۱	
A-۳-۲۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۳۱۰	کرمو - حذف	

در جدول ۵-۲ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۳ با نسبتهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان نشان داده شده است.

جدول۵-۲ نتایج آزمایش مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۳

شماره و مشخصات نمونه	نوع شکست	نیروی گسیختگی KN	مقاومت گسیختگی Kg/cm^2	مقاومت متوسط Kg/cm^2
B-۱-۰	مخروطی برشی	۱۰۰۰	۵۶۵	۴۷۱
B-۲-۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۷۰۰	۳۹۶	
B-۳-۰	مخروطی برشی	۸۰۰	۴۵۲	
B-۱-۵	مخروطی برشی	۹۳۰	۴۲۶	۵۱۳
B-۲-۵	مخروطی برشی	۹۵۰	۵۳۷	
B-۳-۵	مخروطی	۸۴۰	۴۷۵	
B-۱-۱۰	مخروطی	۵۱۰	حذف- سطح ناصاف	۴۷۲
B-۲-۱۰	مخروطی برشی	۸۴۸	۴۷۹	
B-۳-۱۰	مخروطی برشی	۸۲۵	۴۶۶	
B-۱-۱۵	مخروطی برشی	۸۹۰	۴۴۶	۴۵۵
B-۲-۱۵	مخروطی برشی	۸۲۰	۴۶۳	
B-۳-۱۵	مخروطی برشی	۸۰۹	۴۵۷	
B-۱-۲۰	برشی	۸۵۰	۴۸۰	۴۳۵
B-۲-۲۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۵۹۰	کرمو – حذف	
B-۳-۲۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۶۹۰	۳۹۰	

در جدول ۵-۳ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ با نسبتهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان نشان داده شده است.

جدول۵-۳ نتایج آزمایش مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۳۵

شماره و مشخصات نمونه	نوع شکست	نیروی گسیختگی KN	مقاومت گسیختگی Kg/cm^2	مقاومت متوسط Kg/cm^2
C-۱-۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۵۵۰	۳۱۱	۳۶۴
C-۲-۰	مخروطی	۷۴۰	۴۱۸	
C-۳-۰	مخروطی برشی	۶۴۰	۳۶۲	
C-۱-۵	مخروطی برشی	۷۸۰	۴۴۱	۴۰۰
C-۲-۵	مخروطی برشی	۶۷۵	۳۸۱	
C-۳-۵	مخروطی برشی	۶۷۰	۳۷۹	
C-۱-۱۰	مخروطی برشی	۵۹۵	۳۳۶	۳۹۵
C-۲-۱۰	مخروطی برشی	۸۳۵	۴۷۲	
C-۳-۱۰	مخروطی برشی	۶۶۵	۳۷۶	
C-۱-۱۵	مخروطی	۷۳۵	۴۱۵	۳۷۷
C-۲-۱۵	مخروطی توام با دو نیم شدن	۶۴۵	۳۶۵	
C-۳-۱۵	مخروطی توام با دو نیم شدن	۶۲۰	۳۵۰	
C-۱-۲۰	مخروطی برشی	۷۲۰	۴۰۱	۳۶۴
C-۲-۲۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۵۵۰	۳۱۱	
C-۳-۲۰	مخروطی برشی	۶۷۵	۳۸۱	

در جدول ۵-۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۴ با نسبتهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان نشان داده شده است.

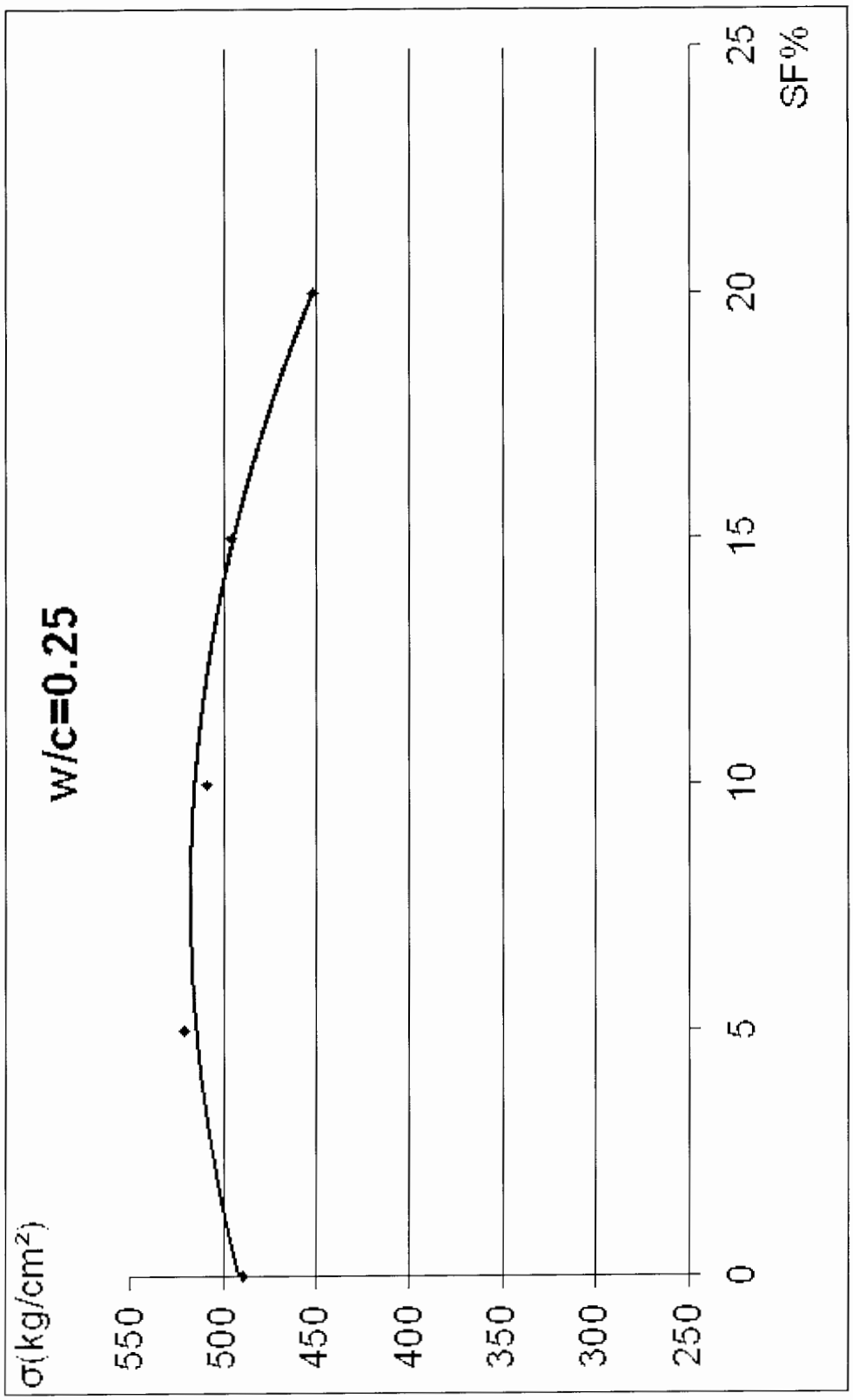
جدول۵-۴ نتایج آزمایش مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۴

شماره و مشخصات نمونه	نوع شکست	نیروی گسیختگی KN	مقاومت گسیختگی Kg/cm^2	مقاومت متوسط Kg/cm^2
D-۱-۰	مخروطی	۵۲۰	۲۹۴	۳۱۵
D-۲-۰	مخروطی و برشی	۵۷۰	۳۲۲	
D-۳-۰	مخروطی	۵۸۰	۳۲۸	
D-۱-۵	مخروطی توام با دو نیم شدن	۶۵۰	۳۶۷	۳۷۷
D-۲-۵	مخروطی و برشی	۶۸۵	۳۸۷	
D-۳-۵	مخروطی توام با دو نیم شدن	۵۳۰	۳۰۰	
D-۱-۱۰	مخروطی و برشی	۶۳۵	۳۵۹	۳۴۷
D-۲-۱۰	مخروطی	۶۲۰	۳۵۰	
D-۳-۱۰	مخروطی و برشی	۵۹۰	۳۳۳	
D-۱-۱۵	مخروطی	۶۵۰	۳۶۷	۳۵۰
D-۲-۱۵	مخروطی و برشی	۵۸۰	۳۲۸	
D-۳-۱۵	مخروطی	۶۳۰	۳۵۶	
D-۱-۲۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۶۰۵	۳۴۲	۳۲۹
D-۲-۲۰	مخروطی و برشی	۵۶۰	۳۱۶	
D-۳-۲۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۴۱۵	کرمو – حذف	

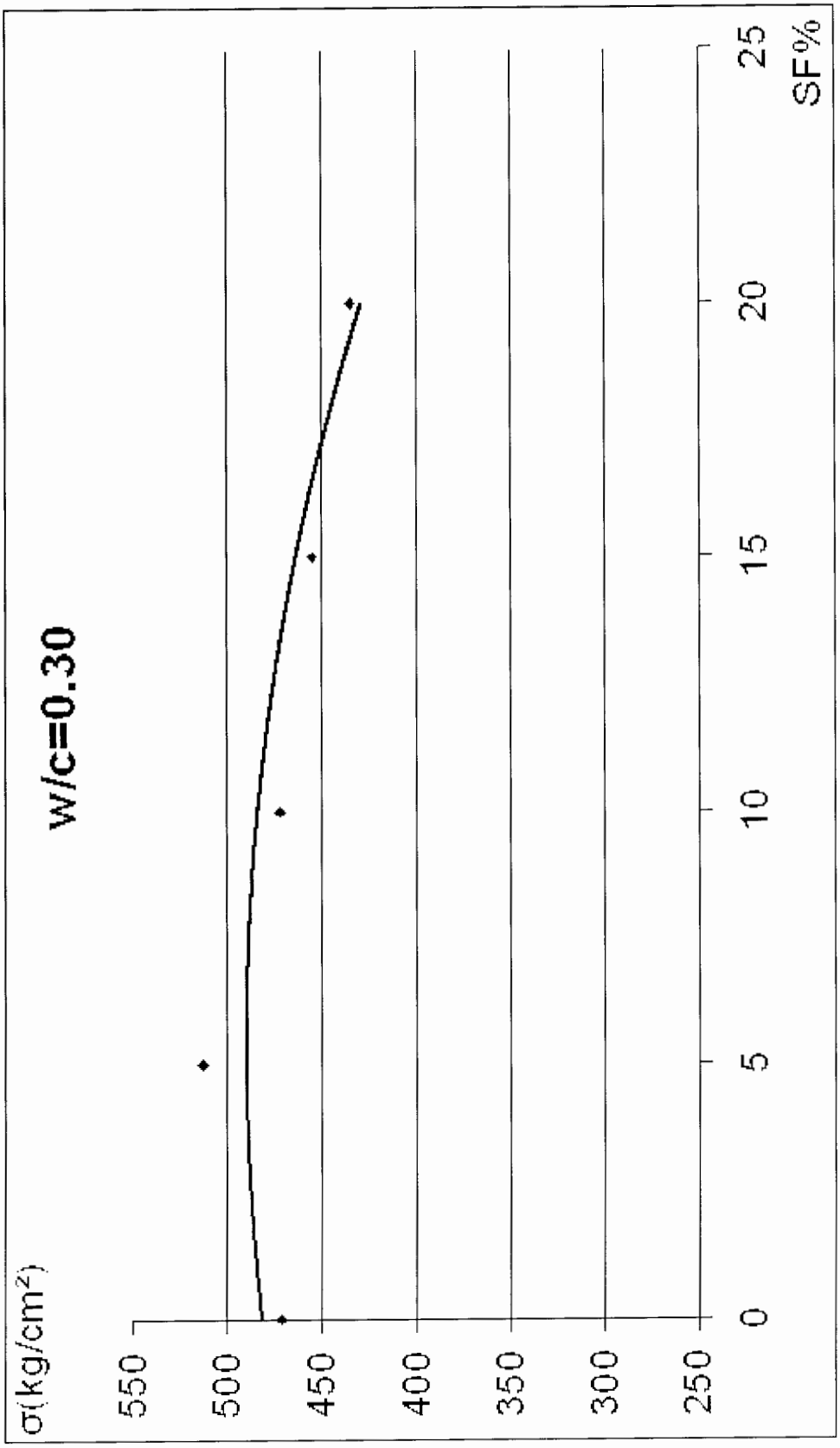
در جدول ۵-۵ نتایج آزمایش مقاومت فشاری مربوط به نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ با نسبتهای ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد میکروسیلیس جایگزین سیمان نشان داده شده است.

جدول۵-۵ نتایج آزمایش مربوط به نسبت آب به سیمان ۴۵/.

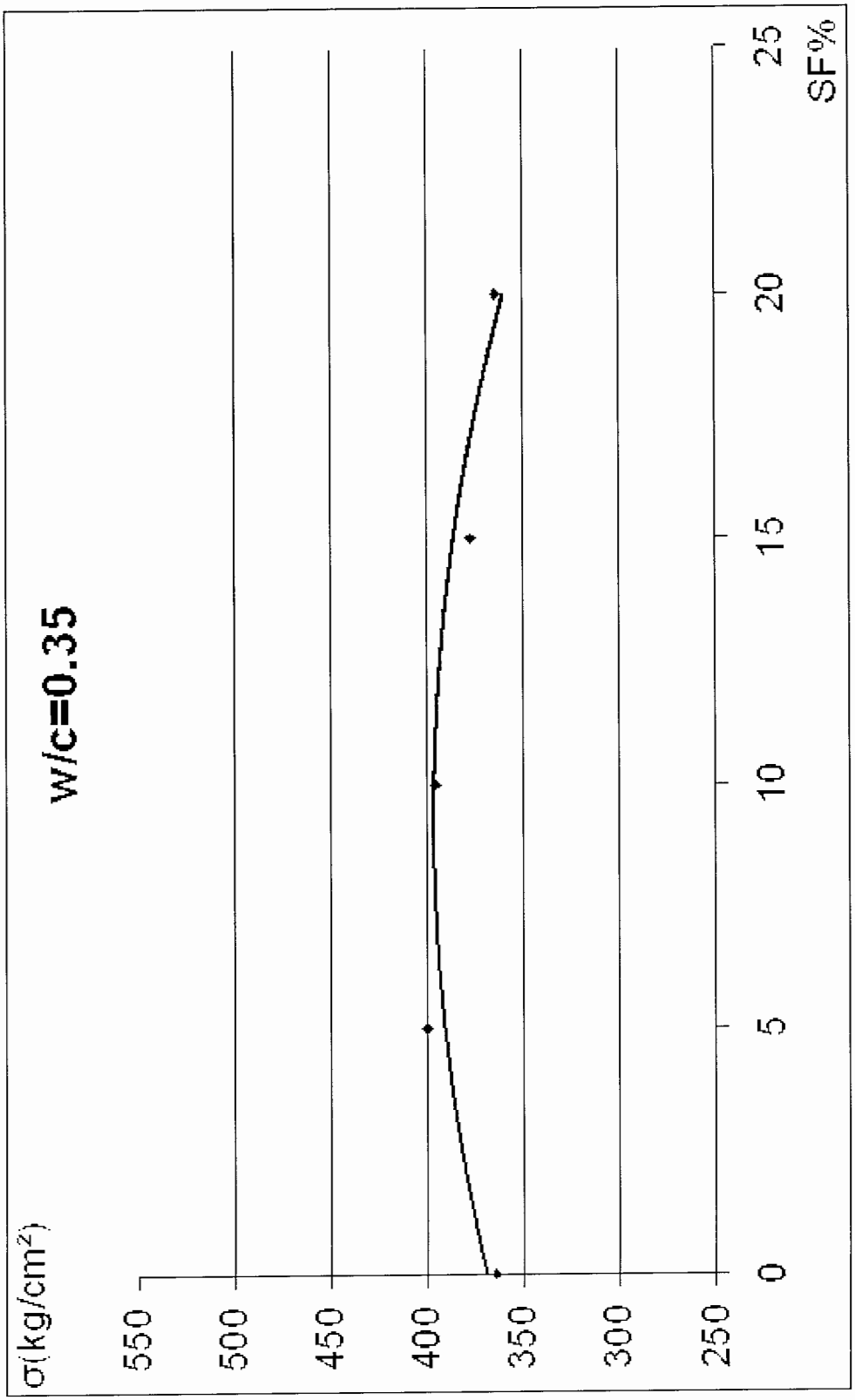
شماره و مشخصات نمونه	نوع شکست	نیروی گسیختگی KN	مقاومت گسیختگی Kg/cm^2	مقاومت متوسط Kg/cm^2
E-۱-۰	مخروطی	۴۲۳	۲۳۹	۲۷۹
E-۲-۰	مخروطی	۴۹۲	۲۷۸	
E-۳-۰	مخروطی	۵۶۵	۳۲۰	
E-۱-۵	مخروطی و برشی	۵۴۰	۳۰۵	۳۰۳
E-۲-۵	مخروطی توام با دو نیم شدن	۴۹۵	۲۸۰	
E-۳-۵	مخروطی و برشی	۵۷۵	۳۲۵	
E-۱-۱۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۴۶۲	۲۶۱	۲۶۵
E-۲-۱۰	مخروطی توام با دو نیم شدن	۴۷۰	۲۶۵	
E-۳-۱۰	ستونی	۴۷۸	۲۷۰	
E-۱-۱۵	برشی	۶۱۴	۳۴۷	۳۴۸
E-۲-۱۵	مخروطی و برشی	۶۲۵	۳۵۳	
E-۳-۱۵	مخروطی توام با دو نیم شدن	۶۱۰	۳۴۴	
E-۱-۲۰	مخروطی	۴۵۳	۲۵۶	۳۰۲
E-۲-۲۰	برشی	۵۳۰	۳۰۰	
E-۳-۲۰	برشی و ستونی	۶۲۰	۳۵۰	



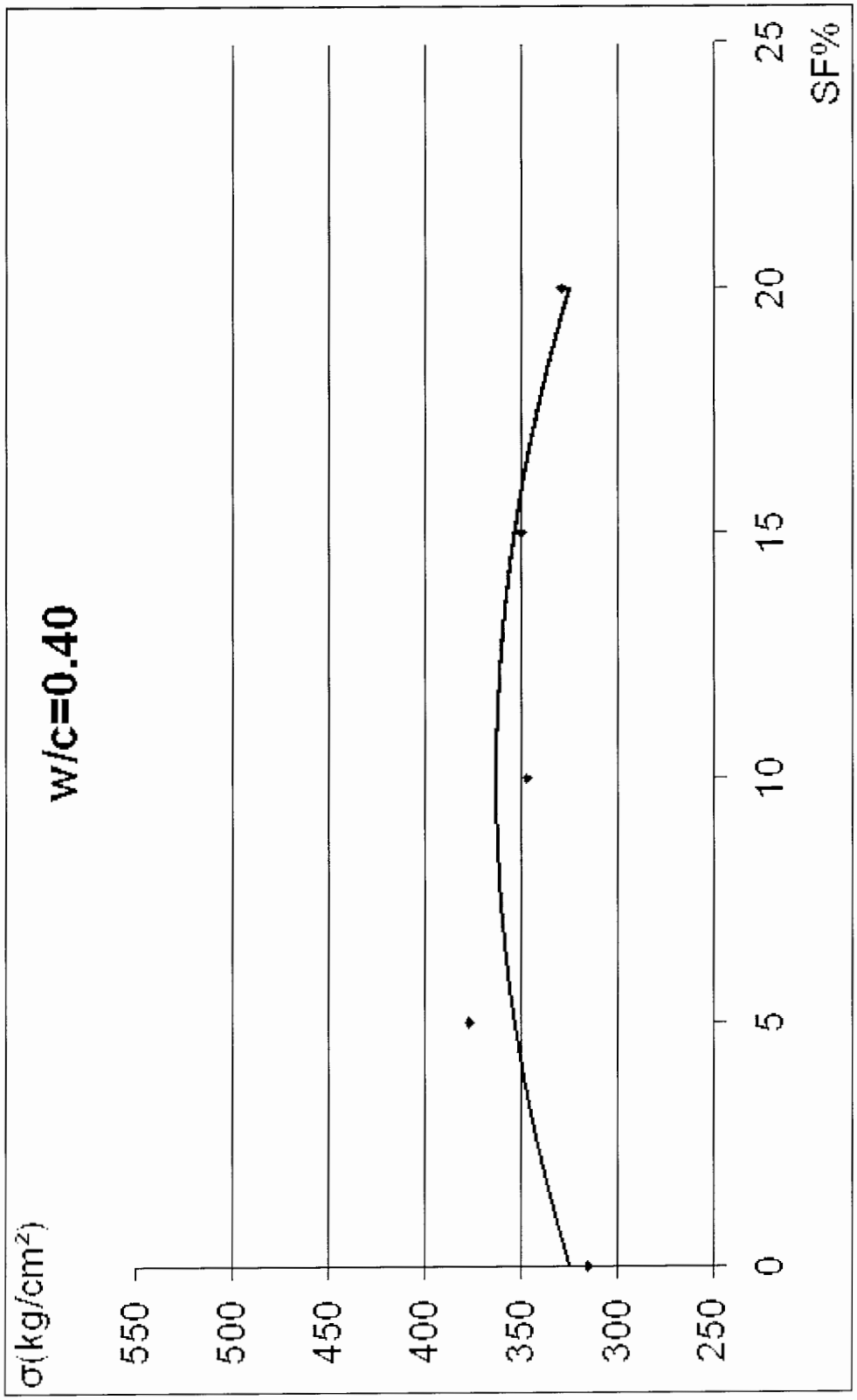
شکل ۵-۱ تاثیر نسبت های مختلف میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۲۵



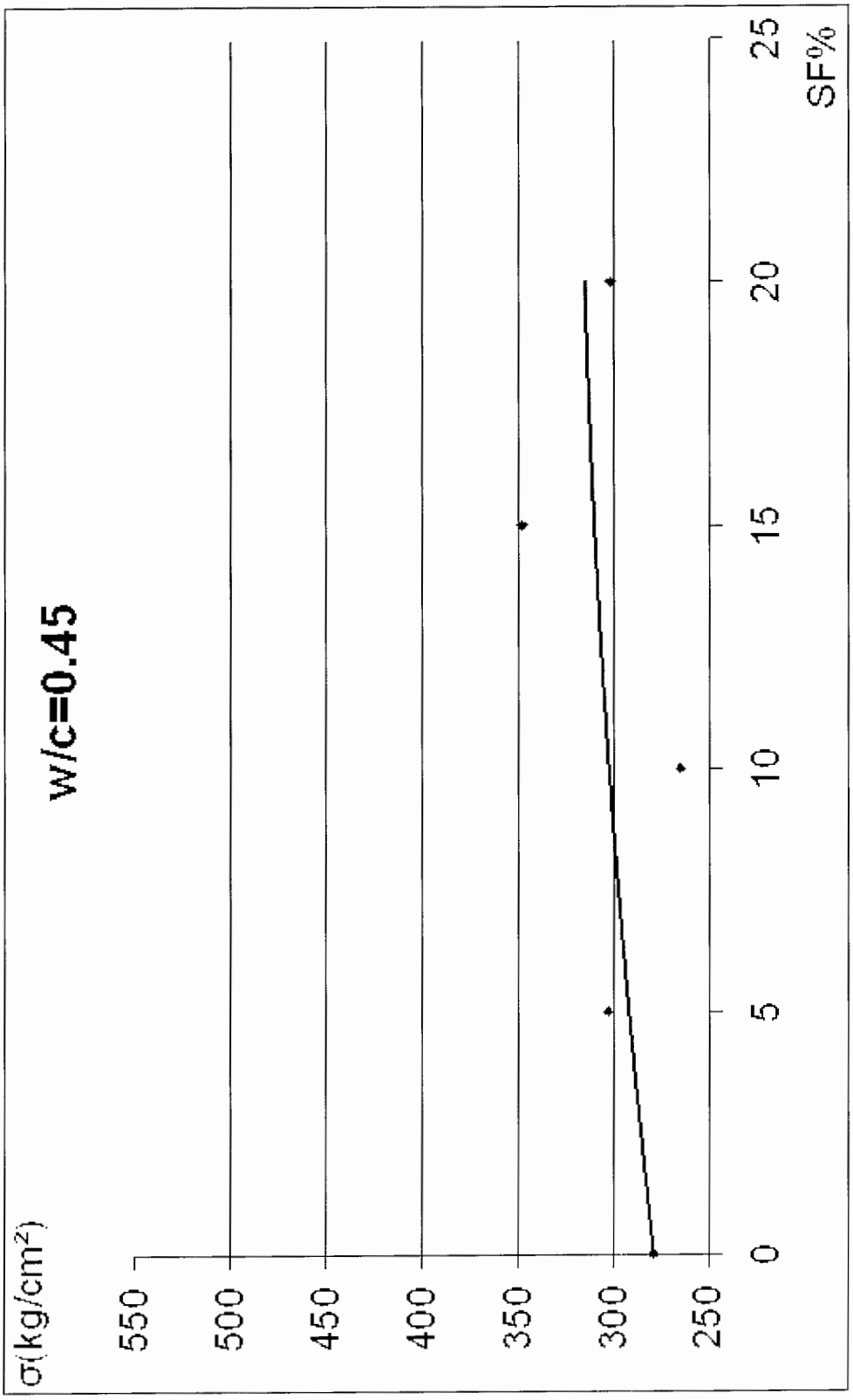
شکل ۵-۲ تاثیر نسبت های مختلف میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳



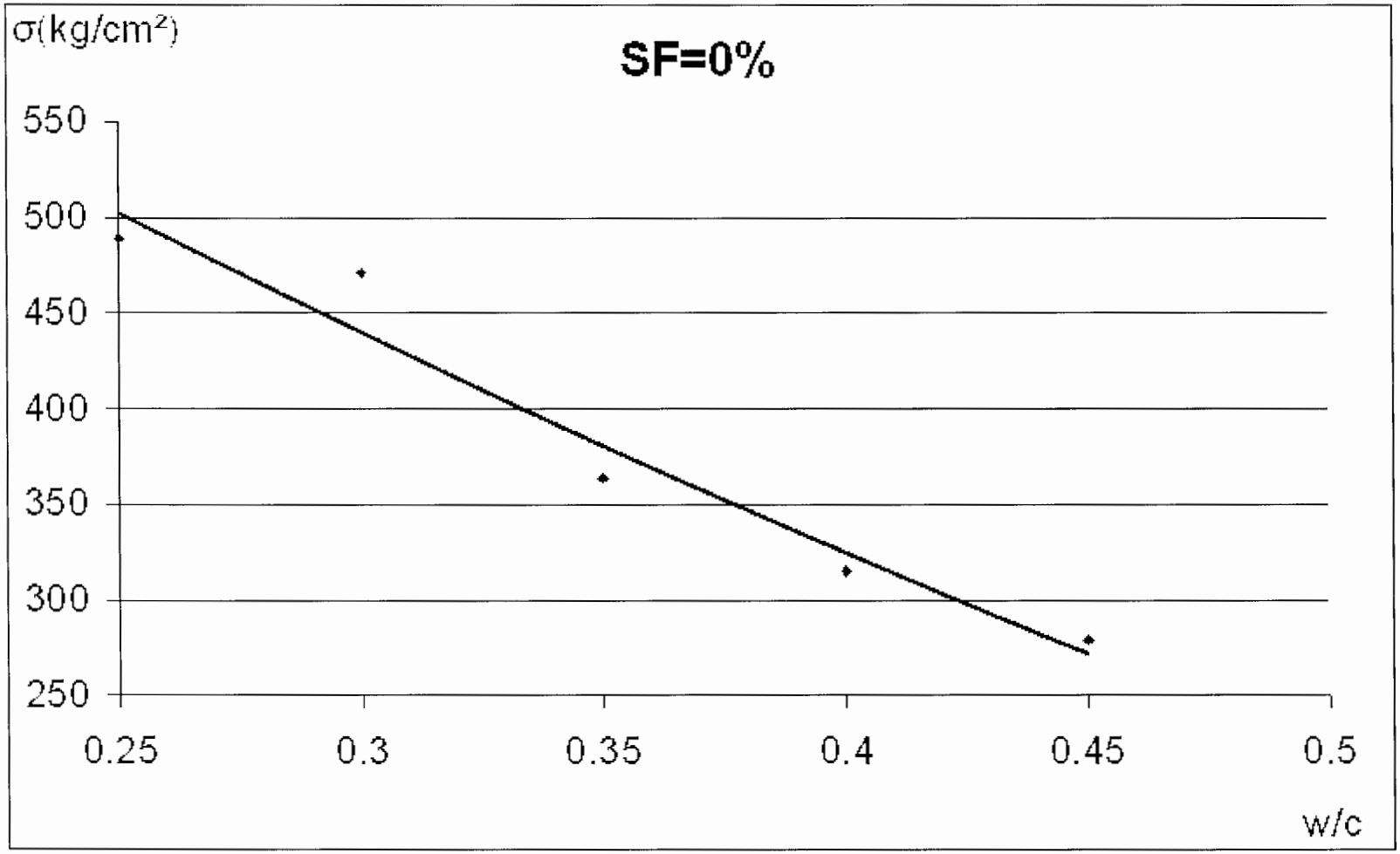
شکل ۵-۳ تاثیر نسبت های مختلف میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۵



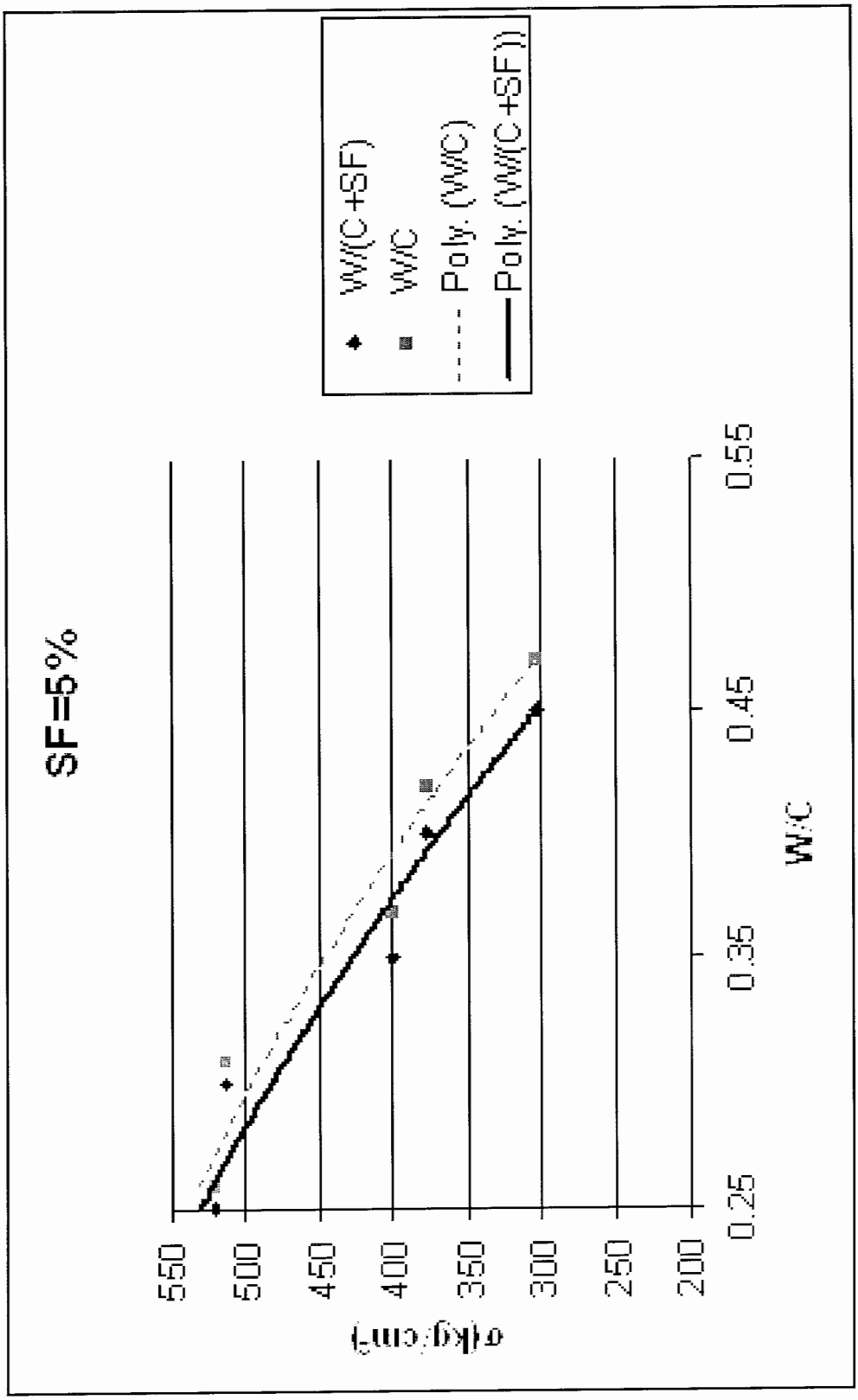
شکل۵-۴ تاثیر نسبت های مختلف میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۴



شکل ۵-۵ تاثیر نسبت های مختلف میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن با نسبت آب به سیمان۰/۴۵

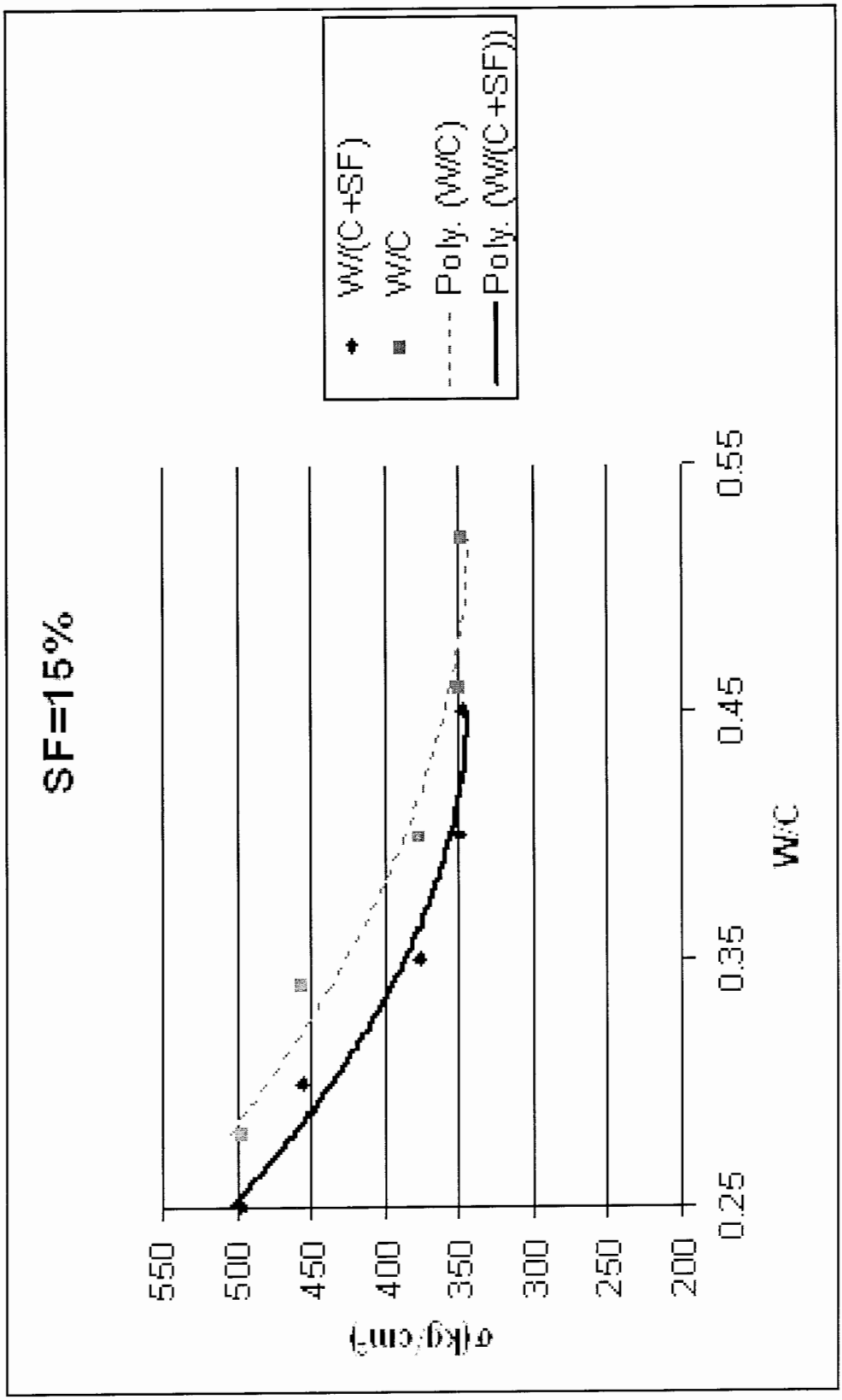


شکل ۵-۶ تاثیر نسبت های مختلف آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن بدون میکروسیلیس.

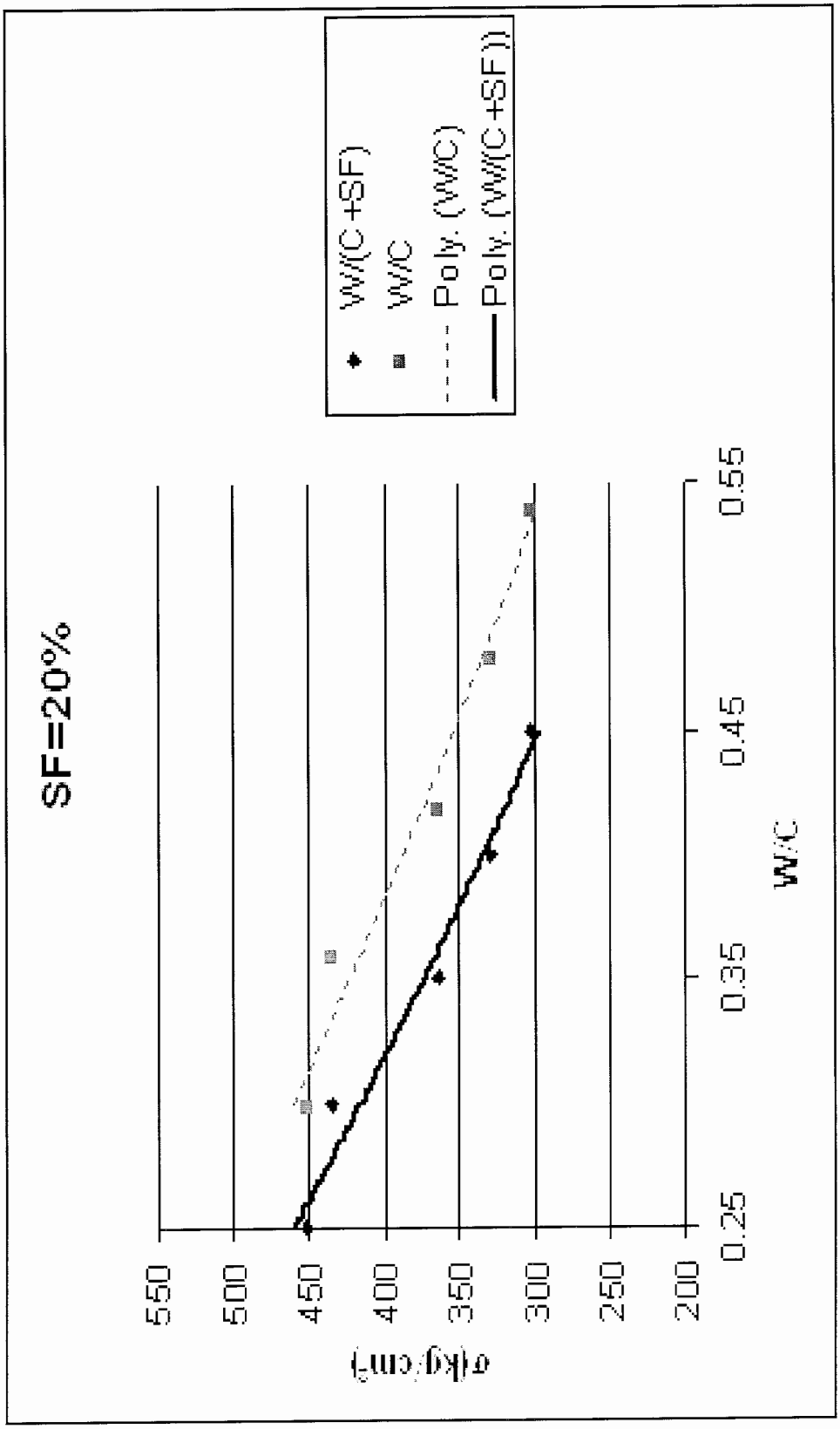


شکل۵-۷ تاثیر نسبت های مختلف آب به سیمان و آب به مصالح سیمانی بر مقاومت فشاری بتن دارای ۵٪ میکروسیلیس.

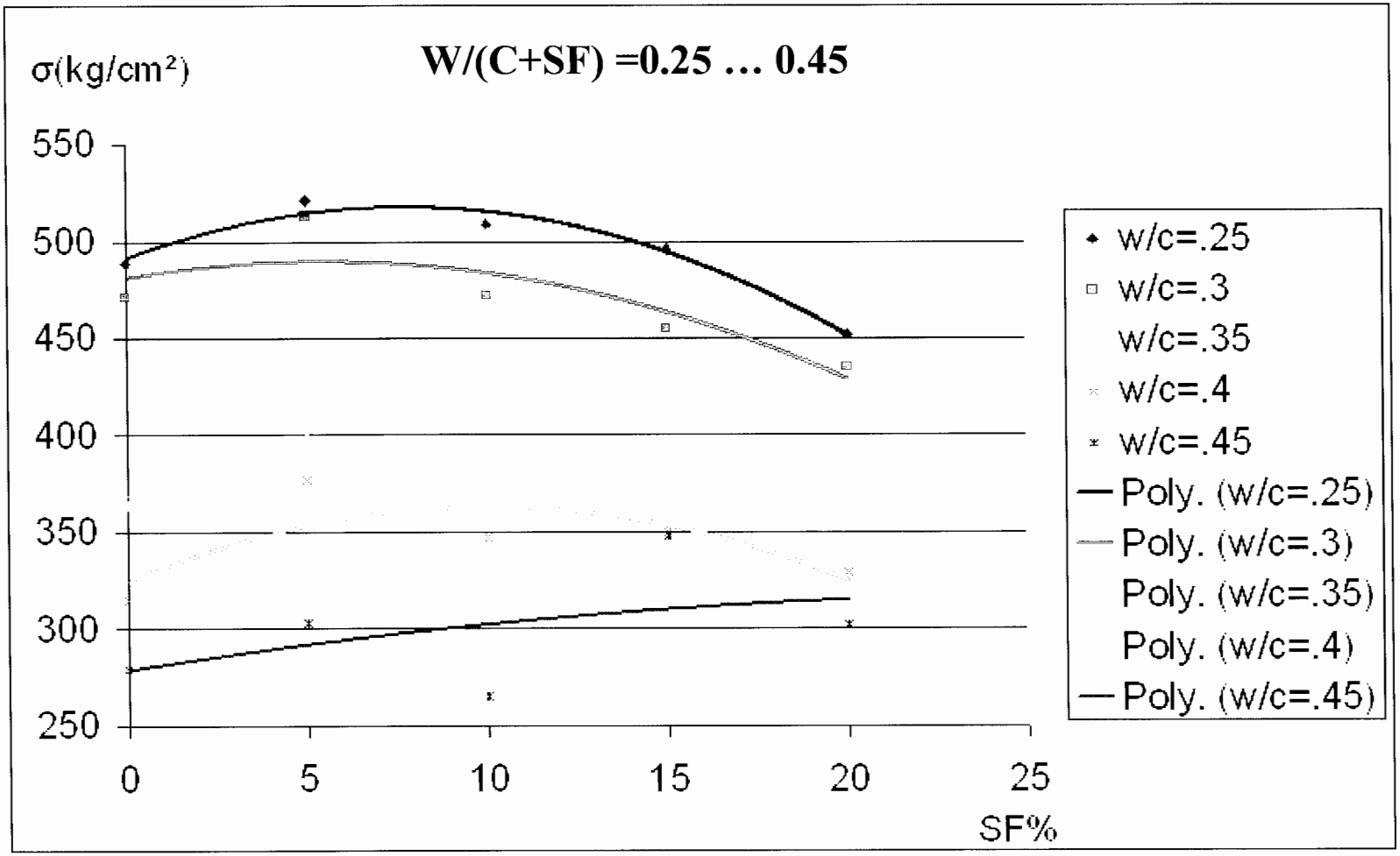
شکل۵-۸ تاثیر نسبت های مختلف آب به سیمانیٔ آب به مصالح سیمانی بر مقاومت فشاری بتن دارای ۱۰٪ میکروسیلیس.



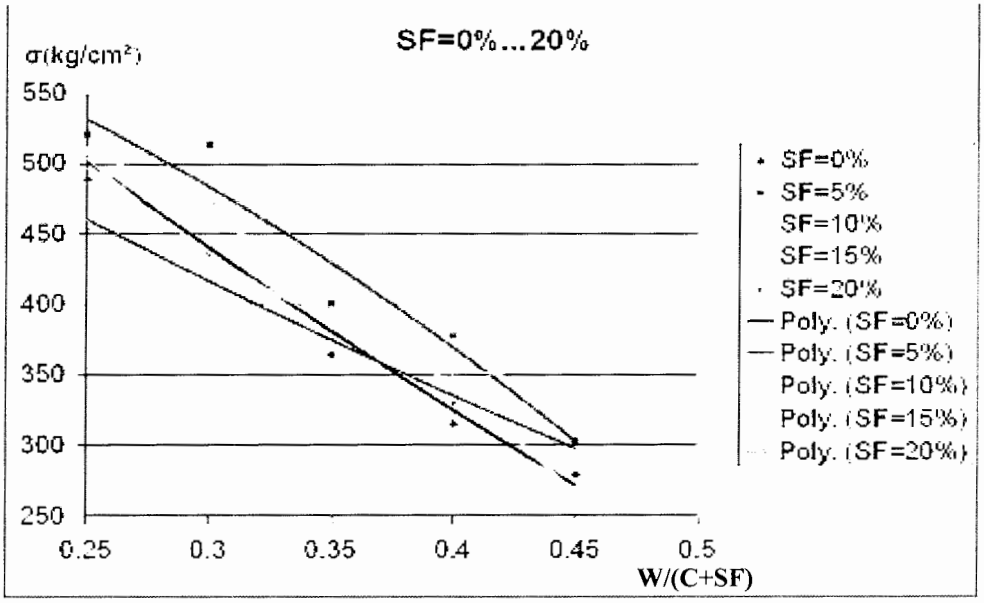
شکل۵-۹ تاثیر نسبت های مختلف آب به سیمان و آب به مصالح سیمانی بر مقاومت فشاری بتن دارای ۱۵٪ میکروسیلیس.



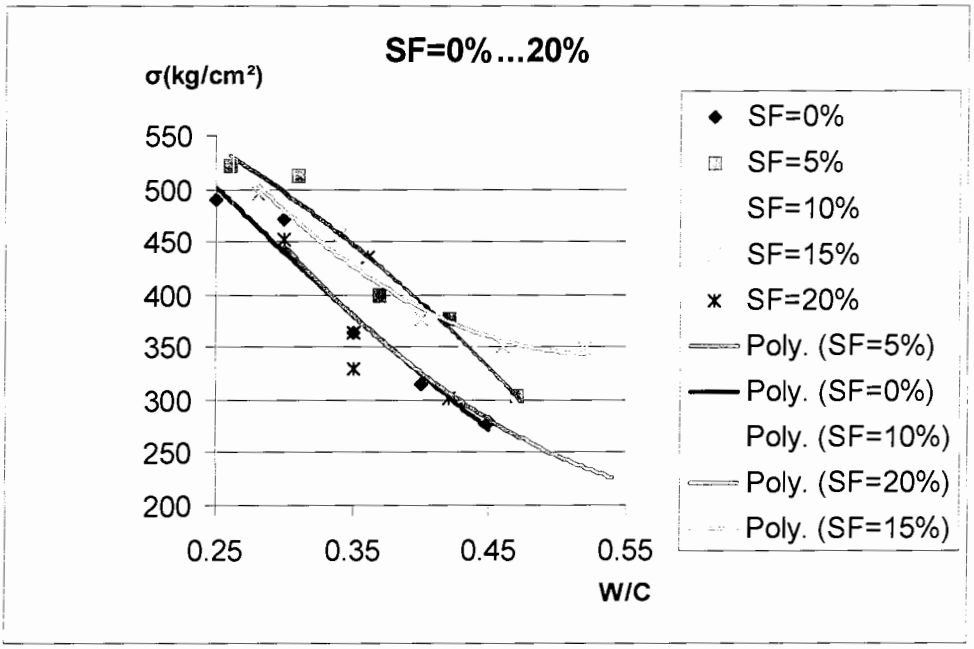
شکل ۵-۱۰ تاثیر نسبت های مختلف آب به سیمانو آب به مصالح سیمانی بر مقاومت فشاری بتن دارای ۲۰٪ میکروسیلیس.



شکل ۵-۱۱ مقایسه تاثیر نسبتهای مختلف میکروسیلیس بر مقاومت فشاری بتن با نسبت های آب به مصالح سیمانی ۰/۲۵ و ۰/۳ و ۰/۳۵ و ۰/۴ و ۰/۴۵



شکل ۵-۱۲ مقایسه تاثیر نسبتهای مختلف آب به مصالح سیمانی بر مقاومت فشاری بتن با نسبت های میکروسیلیس به سیمان ۰٪ و ۵٪ و۱۰٪ و ۱۵٪ و ۲۰٪



شکل ۵-۱۳ مقایسه تاثیر نسبتهای مختلف آب به سیمان بر مقاومت فشاری بتن با نسبت های میکروسیلیس به سیمان ۰٪ و ۵٪ و۱۰٪ و ۱۵٪ و ۲۰٪

فصل ششم : نتیجه گیری و پیشنهادها

۶-۱ مقدمه

در این فصل نتایج آزمایش آزمایشهایی که در فصل پنجم ذکر شدند مورد ارزیابی و بررسی قرار می گیرند . شایان ذکر است برای سهولت در این فصل به جای نسبت آب به مصالح سیمانی از نسبت آب به سیمان استفاده شده است.

۶-۲ بحث و نتایج

۱- با استناد به شکل ۵-۱۲ واضح است که هر چه نسبت آب به سیمان کمتر بوده مقاومت بیشتر می گردد .

۲- با استناد به شکل ۵-۹ بتنهای ساخته شده با ۱۵٪ میکروسیلیس نشان دادند که از نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ به بالا روند کاهش مقاومت آنها کم می شود این در حالی است که در شکل ۵-۱۰ نمونه های حاوی ۲۰٪ میکروسیلیس نیز با شدت کمتری از این قاعده پیروی می کنند .

۳ـ با توجه به اشکال ۵-۷ و ۵-۸ بر خلاف سخن فوق نمونه های حاوی ۵ و ۱۰ درصد میکروسیلیس از نسبت ۰/۳۵ به بالا کاهش مقاومت شدید تری از خود نشان دادند.

۴ـ با استناد به شکل ۵-۶ در مورد نمونه های بدون میکروسیلیس کاهش مقاومت با کاهش نسبت آب به سیمان تقریبا یک نسبت خطی را دنبال می کند.

۵ـ در نسبت آب به سیمان ۰/۲۵ رتبه های اول تا پنجم به لحاظ کسب مقاومت از آن نمونه های با درصدهای میکروسیلیس به ترتیب ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۰ و ۲۰ و در نسبت آب به سیمان ۰/۳ به ترتیب، ۵ و ۱۰ و ۰ و ۱۵ و ۲۰ و در نسبت آب به سیمان ۰/۳۵ به ترتیب، ۵ و ۱۰ و ۱۵ و ۰ و ۲۰ و در نسبت آب به سیمان ۰/۴ به ترتیب، ۵ و ۱۵ و ۱۰ و ۲۰ و ۰ و در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ به ترتیب، ۱۵ و ۵ و ۲۰ و ۰ و ۱۰ می باشد. این مطلب بدین معنی است که در نسبت های بالاتر آب به سیمان نمونه های دارای میکروسیلیس با درصدهای ۱۵ و ۲۰ مقاومت بهتری از خود نشان می دهند بر عکس درصدهای ۱۰ و پایینتر مقاومت های رو به کاهشی از خود نشان می دهند این مطلب موید آن است که میکروسیلیس در نسبت های بیشتر آب به سیمان فرصت بهتری برای واکنش می یابد.

۶ـ با توجه به سن ۷ روزه نمونه ها و اعمال ضریب ۰/۷ برای تبدیل به مقاومت سن ۲۸ روز و در نظر گرفتن مقاومت بالاتر از ۴۲۰ kg/cm^2 به عنوان بتن با مقاومت بالا، به جز نمونه های بدست آمده در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ با مقادیر ۰ و ۱۰ درصد میکروسیلیس بقیه نمونه ها، بتن با مقاومت بالا محسوب می شوند.

۷ـ استفاده میکروسیلیس با درصدهای ۱۵ و ۲۰ در نسبت های کمتر از ۰/۳۷ آب به سیمان همچنین میکروسیلیس با ۱۰ درصد سیمان در نسبت های بیش از ۰/۴۵ آب به سیمان به دلیل کسب مقاومت فشاری کمتر از بتن بدون میکروسیلیس، بی معنا خواهد بود.

۸ـ در شکل ۵-۱۱ مابین منحنی نسبت آب به سیمان ۰/۳ تا ۰/۳۵ اختلاف بسیار بزرگی حدود ۲ برابر بقیه اختلاف هاست. این نشان میدهد که تبدیل $\frac{w}{c}$ از ۰/۳ به ۰/۳۵ کاهش مقاومت شدیدی را که بیش از ۲ برابر اختلاف دیگر نسبت ها با هم می باشد داراست.

۹ـ در شکل ۵-۱۱ به جز نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ در بقیه موارد بزرگترین مقاومت مربوط به ۵٪ میکروسیلیس است که البته با توجه به نمودار برازش متوجه می شویم که بهترین درصد میکروسیلیس برای هر یک از نسبت های آب به سیمان به جز در نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ بین ۵ و ۱۰ می باشد در مورد منحنی ($\frac{w}{c}$=۰/۴۵) بهترین مقاومت برای ۲۰ درصد میکروسیلیس دیده می شود.

۶ـ۳ نتیجه‌گیری نهایی

با در نظر گرفتن آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق و اطلاعات موجود در منابع مختلف و با توجه به محدودیت‌های موجود در مطالعات آزمایشگاهی، موارد ذیل در تاثیر میکروسیلیس بر نرخ کسب مقاومت بتن مطرح بوده و قابل نتیجه‌گیری می‌باشند:

۱ـ استفاده از ۵٪ میکروسیلیس در نسبت‌های آب به سیمان کمتر از ۴۳٪ و استفاده از ۱۵٪ میکروسیلیس در نسبت‌های بیشتر از آن توصیه می‌گردد.

۲ـ هر چه میزان میکروسیلیس در مخلوط بتن نمونه‌ها افزایش می‌یابد، کارایی بتن کمتر می‌گردد. لذا استفاده از فوق روان‌کننده بیشتر ضروری به نظر می‌رسد.

۳ـ در رابطه با سهم میکروسیلیس در بالا رفتن مقاومت بتن، نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد این سهم مقدار ثابتی نیست که صرفاً به مشخصات فیزیکی و شیمیایی میکروسیلیس بستگی داشته باشد بلکه عوامل دیگری مانند نسبت آب به سیمان و شرایط عمل‌آوری نیز مطرح می‌باشند.

۴ـ اثر مثبت میکروسیلیس در بتن عمدتاً به دلیل دو مکانیزم شناخته شده است، یکی به خاطر فعالیت پوزولانی بسیار زیاد آن که موجب کاهش هیدروکسیدکلسیم حاصل از هیدراسیون سیمان پرتلند با آب و افزایش ژل تولیدی در خمیر سیمان خواهد شد و دیگری به دلیل نرمی زیاد آن است که موجب پر کردن خلل و فرج بین ژل و سیمان می‌گردد.

۵ـ نتایج این آزمایش برای آن دسته از سازه‌های بتنی که مصالح مصرفی معین شده در این تحقیق را به کار می‌برند قابل استفاده است.

۶ـ۴ پیشنهادها:

جهت ادامه تحقیق و مشخص شدن ابعاد تازه‌تری از تاثیر میکروسیلیس بر مقاومت بتن، موارد زیر جهت بررسی بیشتر پیشنهاد می‌گردد:

۱ـ بررسی اقتصادی بودن استفاده از میکروسیلیس در پروژه‌ها با توجه به هزینه آن و مشکلات حمل و نقل.

۲ـ بررسی تاثیر انواع خارجی میکروسیلیس و یا نوع دیگر تولید داخل آن بر مقاومت بتن و مقایسه نتایج.

۳ـ بررسی تاثیر میکروسیلیس و سیمان الک شده بر مقاومت بتن و مقایسه نتایج.

۴ـ بررسی تاثیر درصدهای بیشتر از ۲۰٪ میکروسیلیس بر مقاومت بتن.

۵ـ بررسی تاثیر درصدهای بین ۵ تا ۱۰ میکروسیلیس و یافتن بهترین درصد.

۶ـ بررسی تاثیر نسبت‌های آب به سیمان بیشتر و کمتر از حدود این تحقیق.

۷ـ انجام آزمایش‌های خواص مکانیکی کوتاه مدت، جمع‌شدگی، خزش و دوام بر بتن این تحقیق.

۸ـ بررسی تاثیر زمان بر روی مقاومت و سرعت افزایش مقاومت بتن این تحقیق و مقایسه آن با بتن بدون میکروسیلیس.

۹ـ بررسی تاثیر استفاده از فوق روان‌کننده سکو دنس به میزان بیش از ۲٪، به دلیل عدم کارایی نمونه‌های دارای میکروسیلیس.

۱۰ـ بررسی تاثیر انواع دیگر فوق روان‌کننده بر بتن این تحقیق.

۱۱ـ بررسی تاثیر شست‌وشوی مصالح دانه‌ای و مقایسه نتایج.

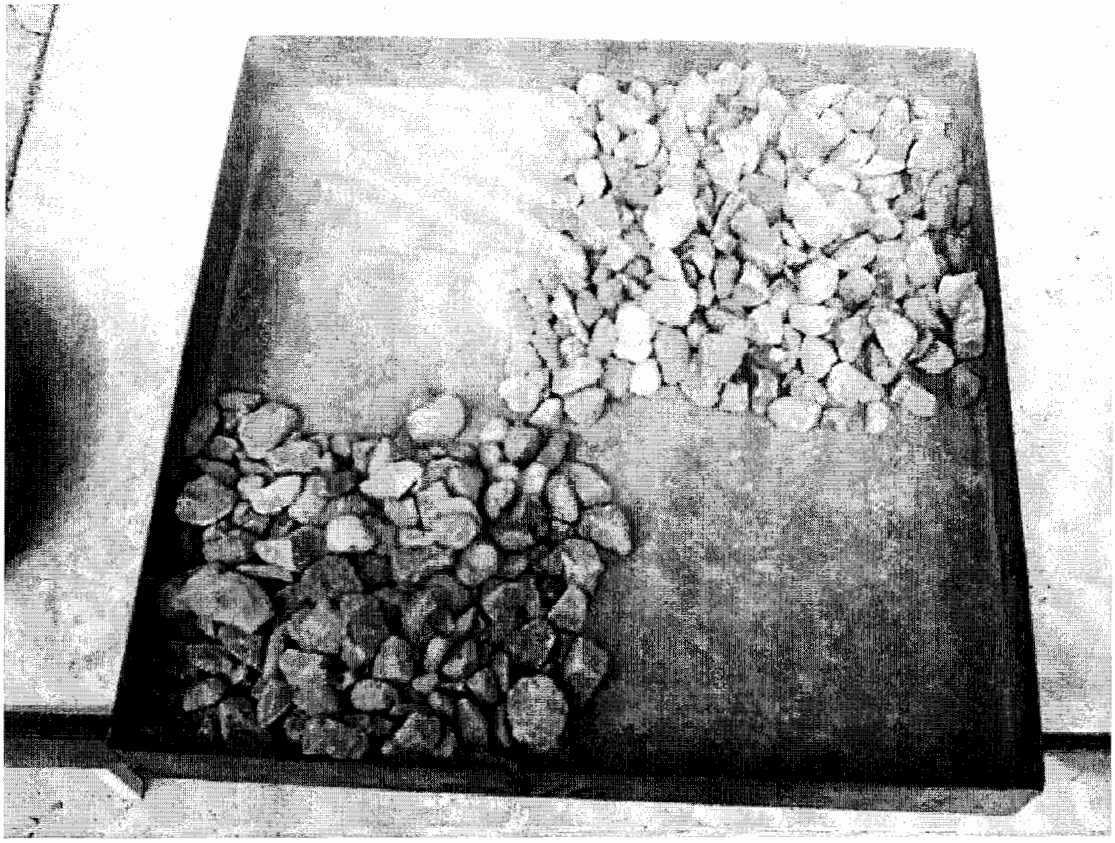
۱۲ـ بررسی تاثیر تغییر حداکثر اندازه سنگدانه و مقایسه نتایج.

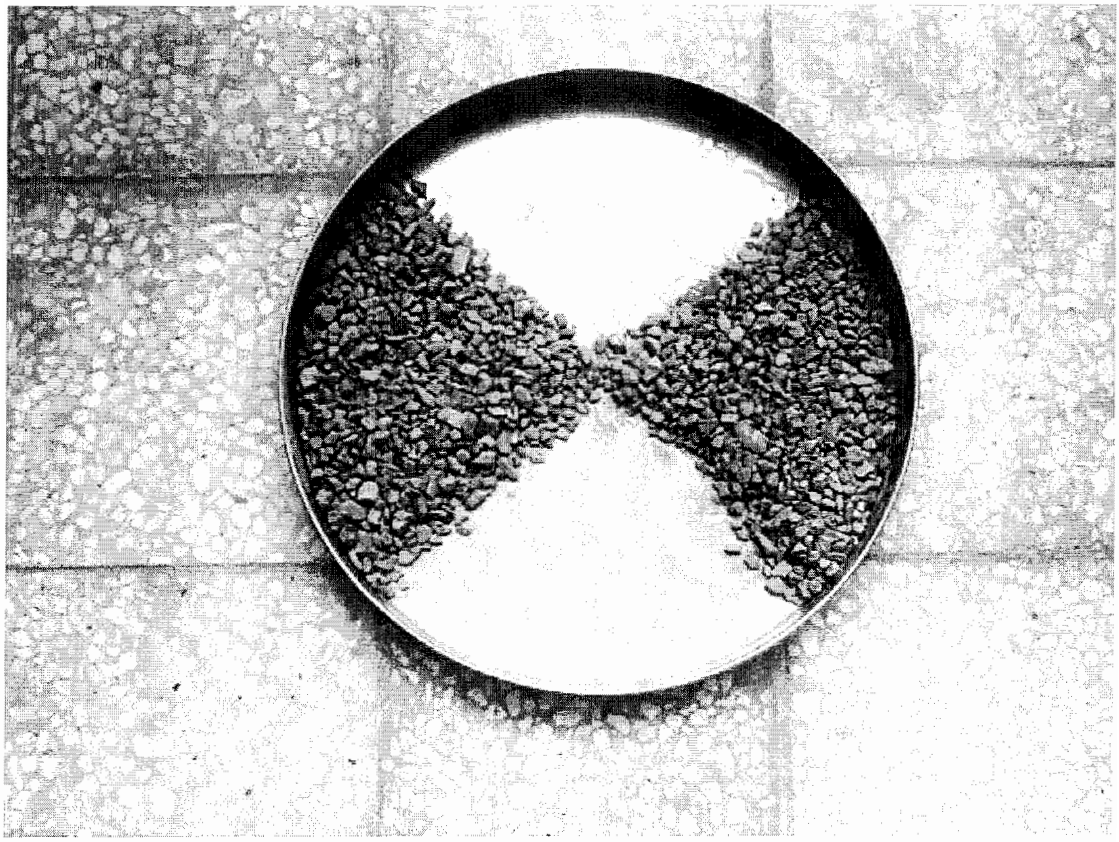
۱۳ـ بررسی تاثیر استفاده از دیگر سنگدانه‌های معادن شاهرود و مقایسه نتایج.

ضمیمه : تصاویر تحقیق

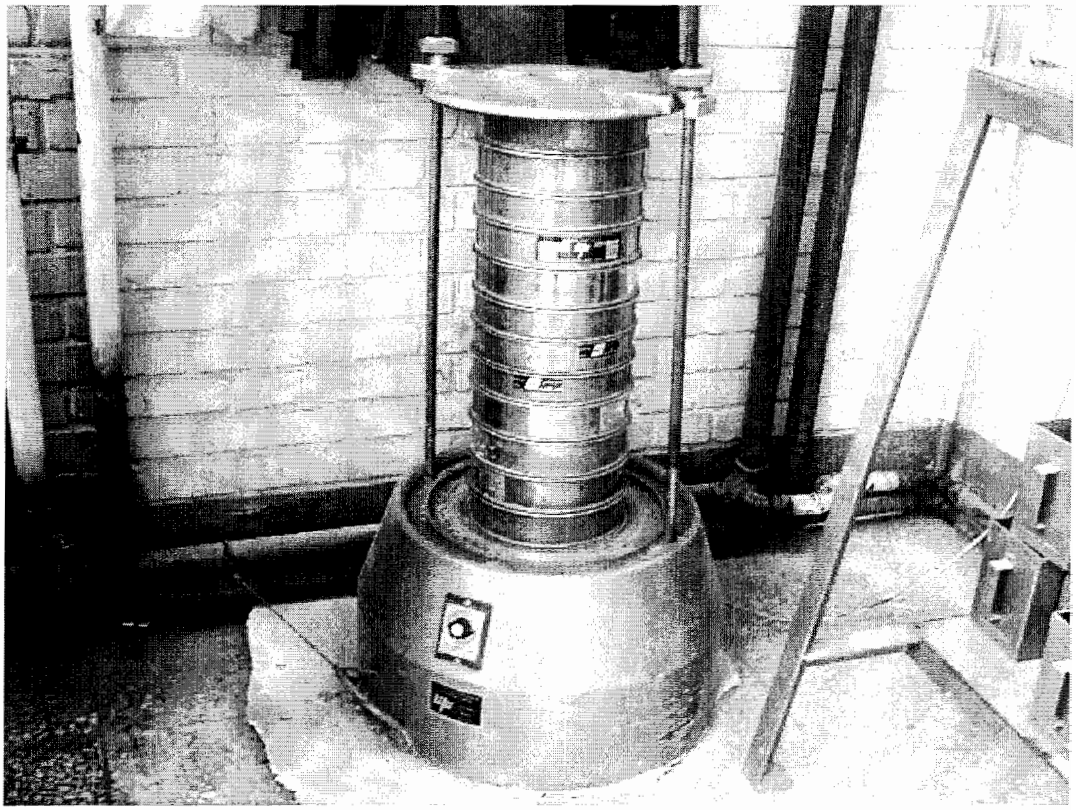
با توجه به اینکه این تحقیق به صورت آزمایشگاهی انجام شده است ، ارائه تصاویری از مراحل مختلف فعالیتها می تواند کامل کننده مشخصات تحقیق باشد .

بر این اساس عکس هایی در حین انجام آزمایش های مختلف تهیه گردید که در این قسمت ارائه می گردد .

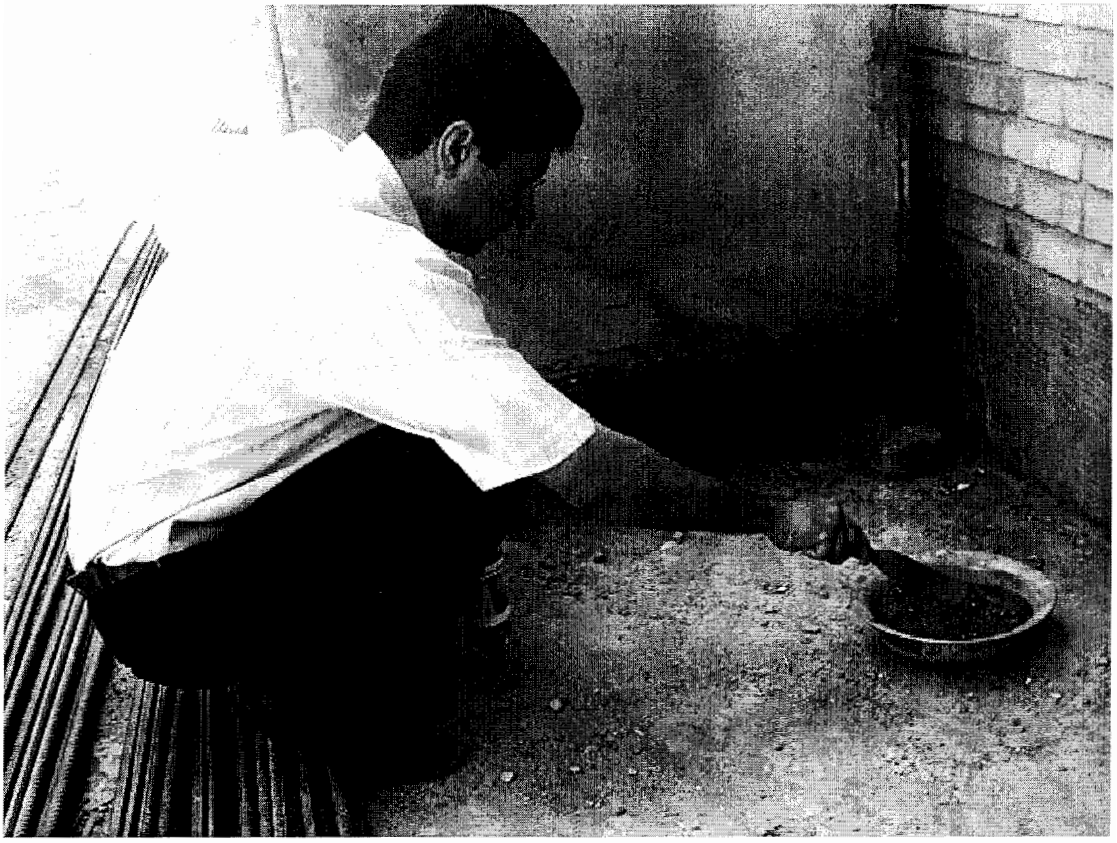




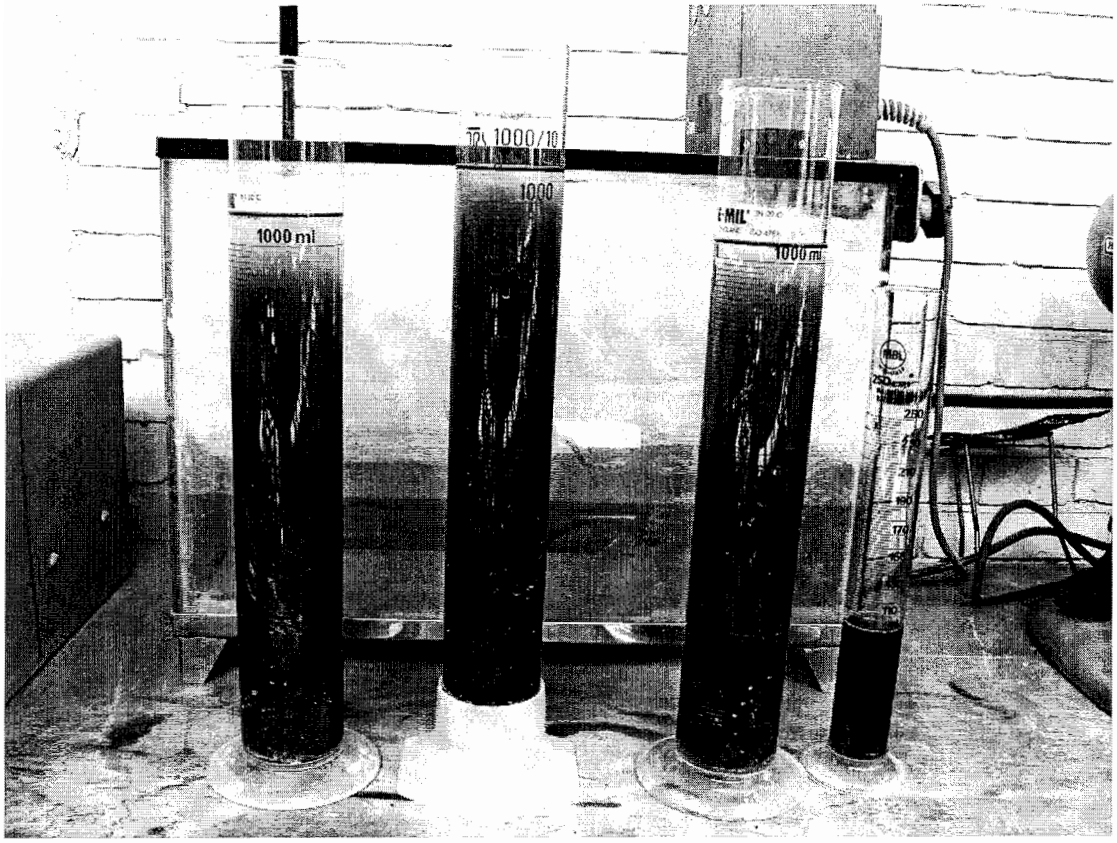
ت ۱ – انتخاب مصالح برای آزمایشهای سنگدانه ها به روش استاندارد ASTM

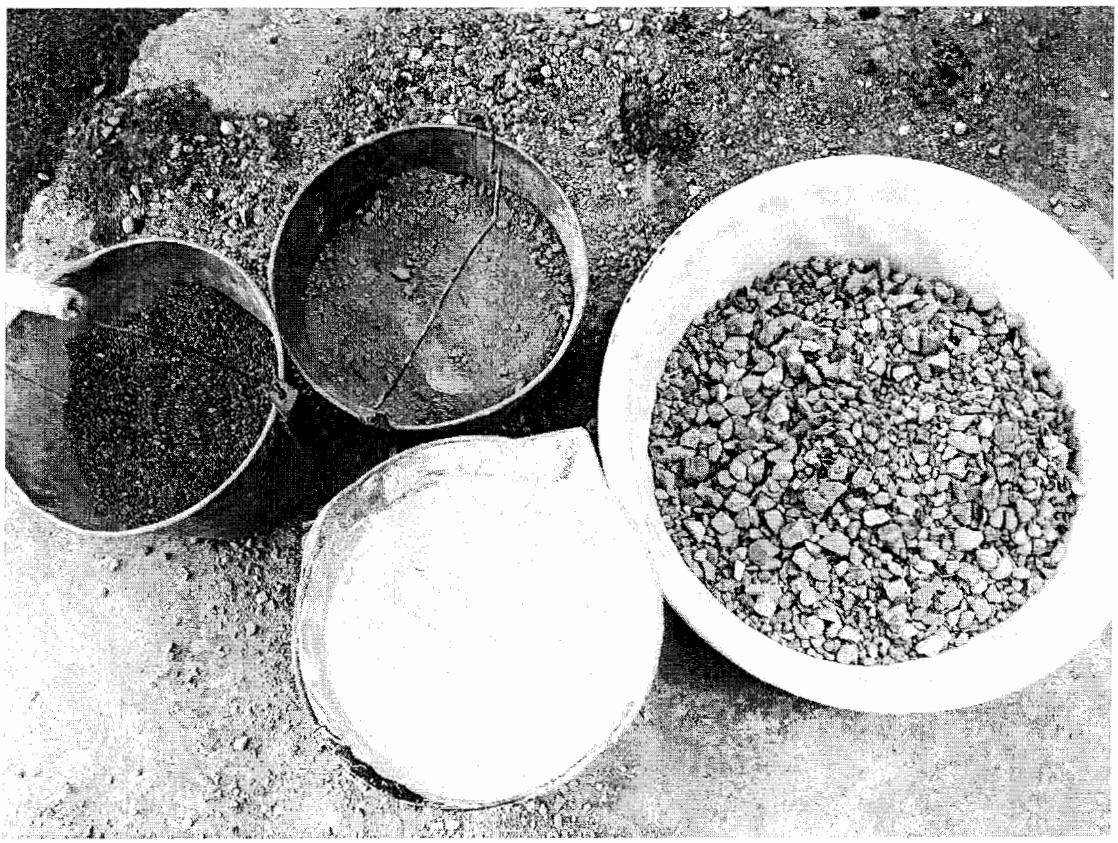


ت ۲ – آزمایش دانه بندی



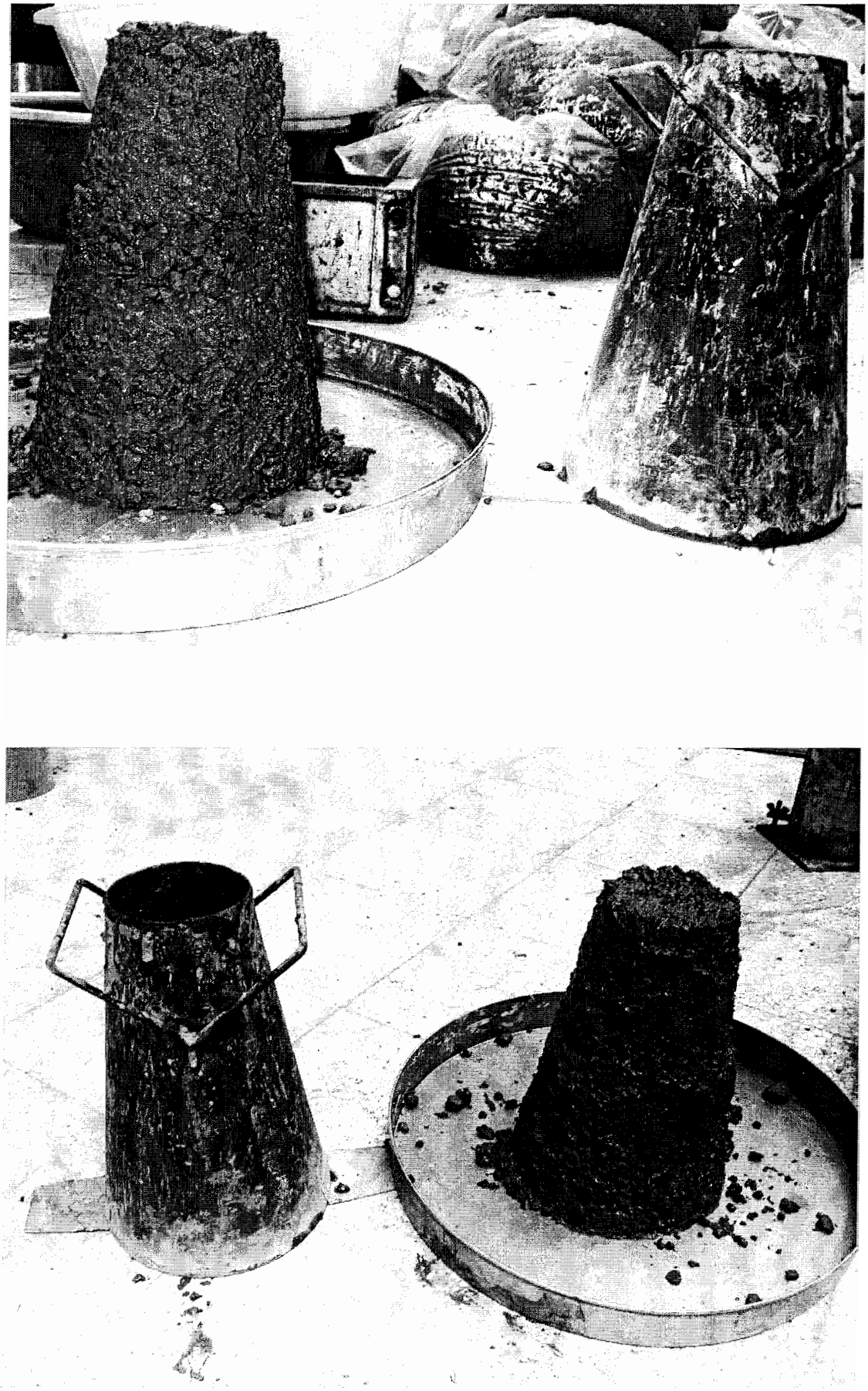
ت ۳ – کاهش رطوبت ماسه جهت رسیدن به حالت اشباع با سطح خشک (SSD)



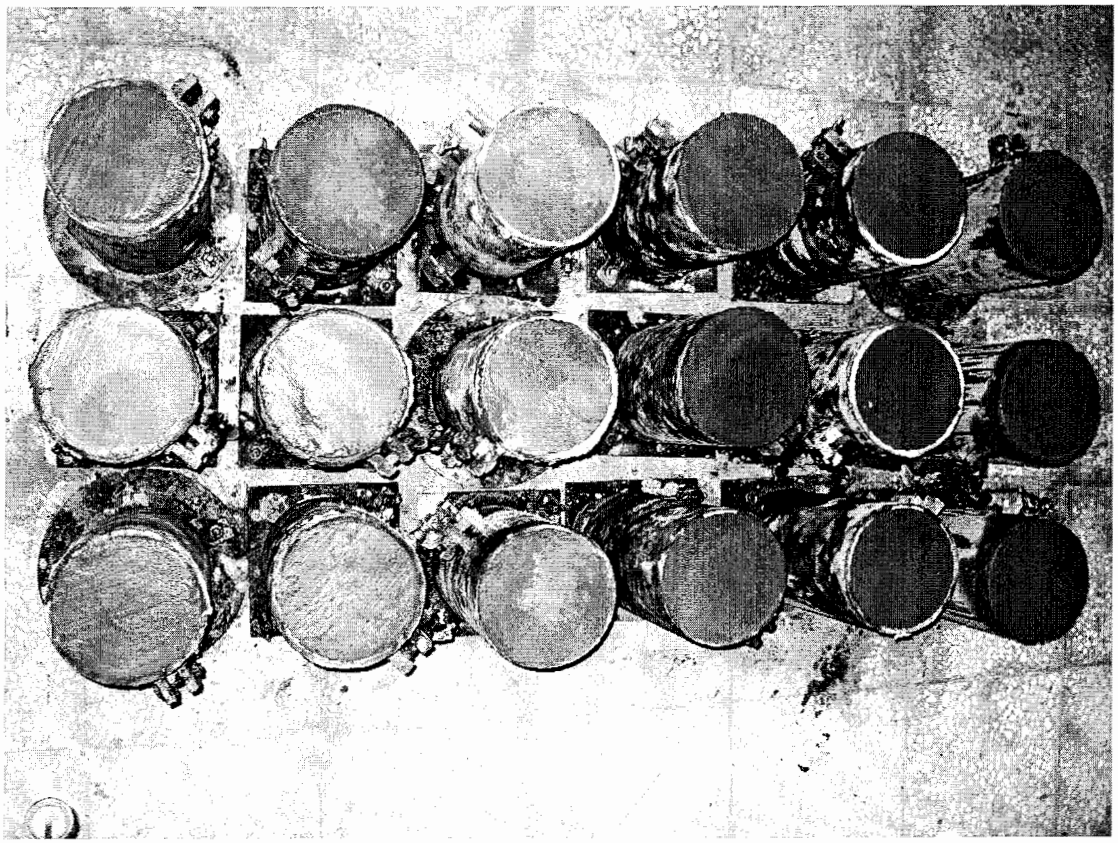


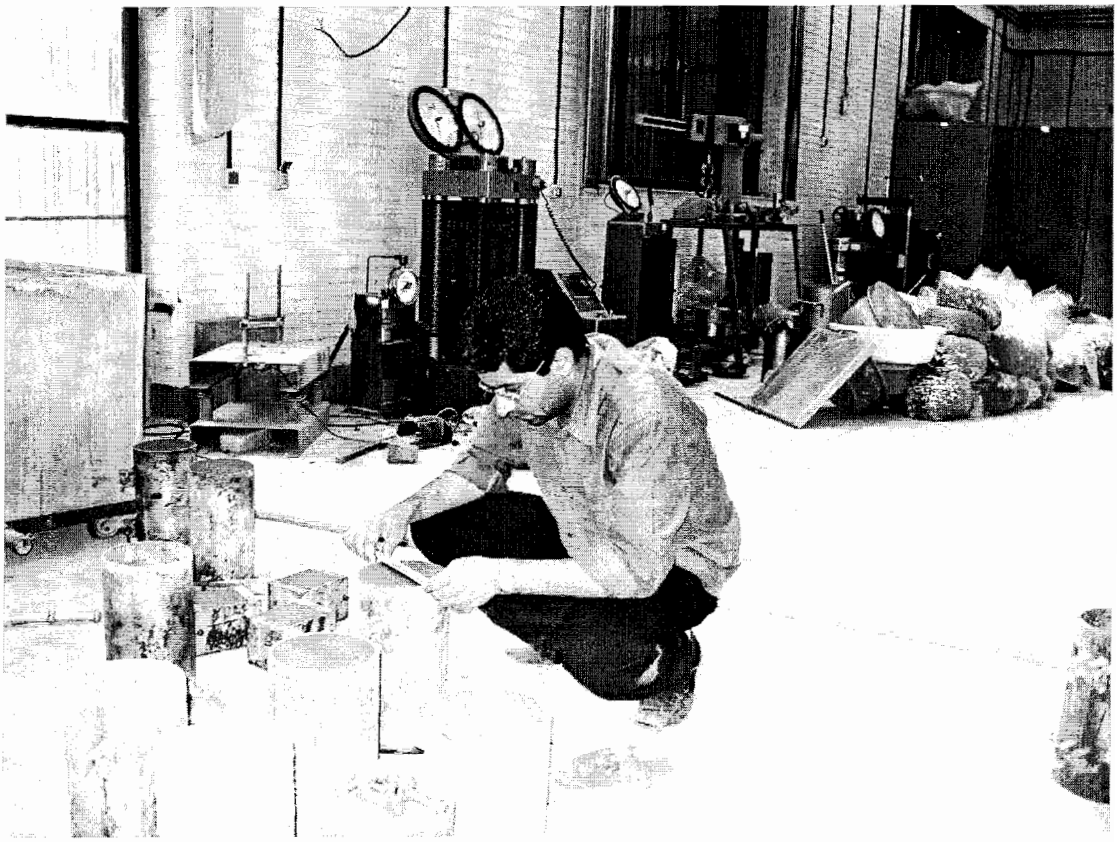
ت ۴ – مصالح توزین شده

ت ۵ – میکس کردن بتن



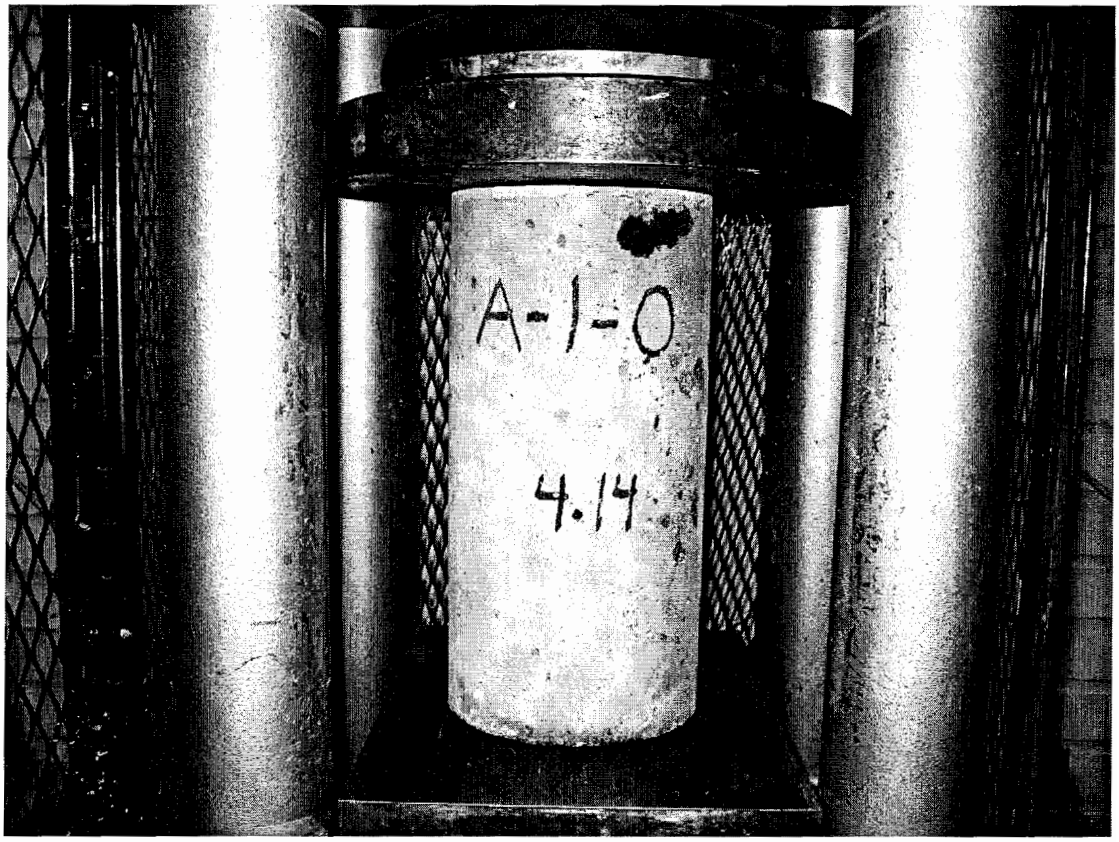
ت ۶ – آزمایش اسلامپ





ت ۷ – عمل مسطح کردن (Capping)

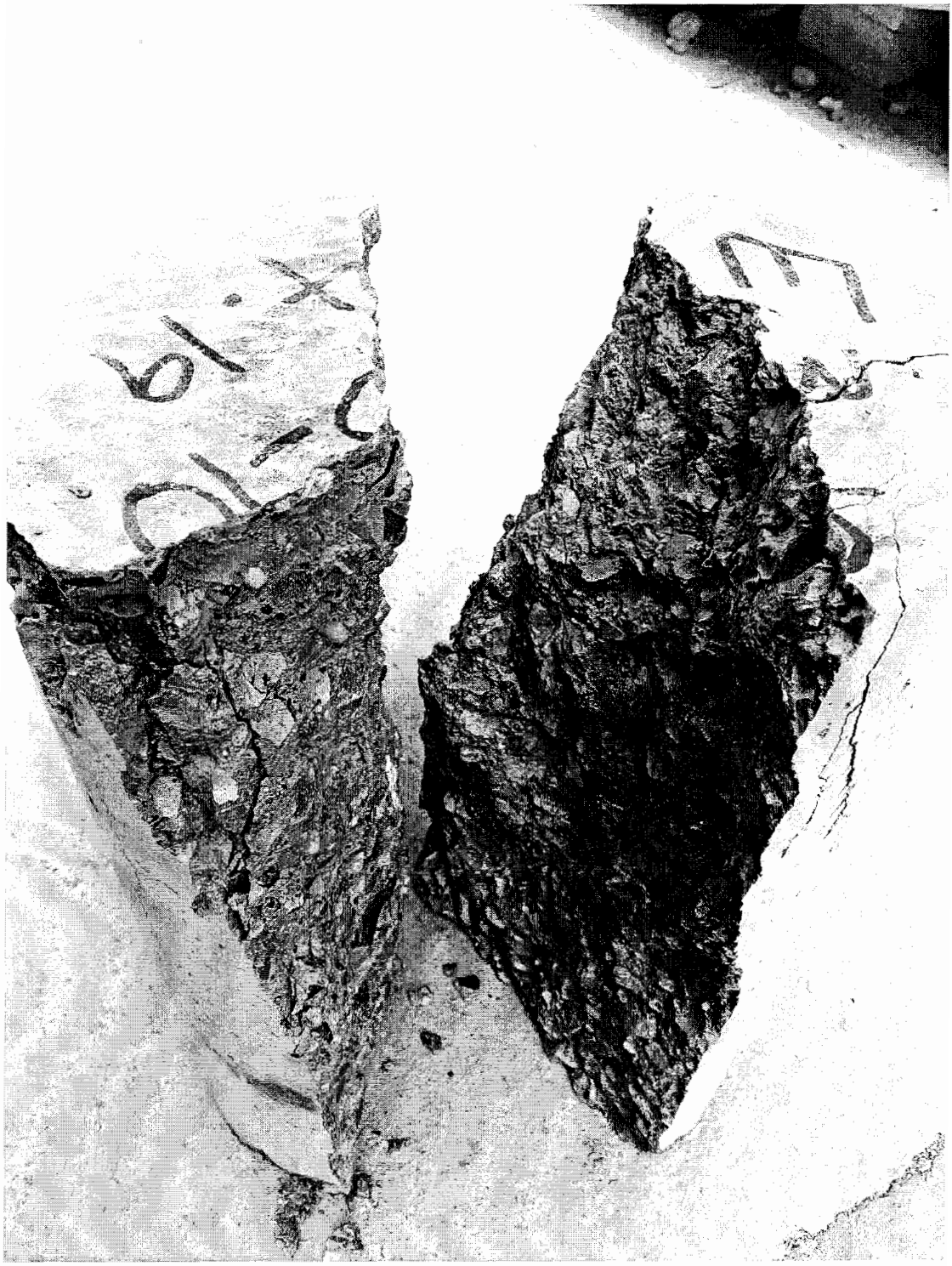
ت ۸ – عمل آوری



ت ۹ – آزمایش مقاومت فشاری

ت ۱۰ – گسیختگی مخروطی ستونی

ت ۱۱– گسیختگی مخروطی برشی



ت ۱۲– گسیختگی ستونی

ت ۱۳ – گسیختگی مخروطی توأم با دو نیم شدن

ت ۱۴ – گسیختگی مخروطی

مراجع

[۱]- Ya Malhotra, V.M , Ramachandran , V. S ,Feldman , R.F.and Aitcin, ۱۹۸۷ ,Condensed Silica Fume In Concrete , CRC Press Inc , Florida

[۲]- باریک بین ، مهدی ، ۱۳۷۹ ، بتن با کیفیت بالا و خواص آن ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه صنعتی امیر کبیر .

[۳]- Krishna Raju . N . ۲۰۰۲ . Design Of Concrete Mixes , Fourth Edition . Satish Kumar Jain For CBS Publishers , India

[٤]- پووپندار مهتا ، پائولو مونته ئیرو ، ۱۳۸۳ . ریز ساختار ، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی بتن پیشرفته) . رمضانیانپور علی اکبر ، قدوسی پرویز ، گنجیان اسماعیل ، چاپ اول انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر ، تهران .

[٥]- باقری علیرضا ، پرهیزکار طیبه ، رمضانیانپور علی اکبر ، قدوسی پرویز ، گنجیان اسماعیل، ۱۳۷۷ ، مواد جایگزین سیمان در بتن ، چاپ اول ، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، تهران .

[٦]- کبیر محمد زمان ، حجازی سامان ، رهبر محمد رضا ، ۱۳۸۰ ، استفاده از میکروسیلیس به منظور افزایش مقاومت بتن پاششی بکاررفته در سازه های پانلی پیش ساخته سبک ، ۴۲۳-۴۱۵ ، مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی بتن و توسعه ، چاپ اول ، تسنیمی ع ، شایانفر م ، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، تهران .

[۷]- تاجیک نصرت ا... ، ۱۳۷۶ ، تاثیر میکروسیلیس بر خواص بتن های پر مقاومت ، ۸۲-۵۳ ، مجموعه مقالات سمینار بین المللی کاربرد میکروسیلیس در بتن ، چاپ دوم ، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، تهران .

[۸]- مظلوم موسی ، ۱۳۸۱ ، خزش و جمع شدگی در بتن ویژه و با مقاومت زیاد دارای میکروسیلیس ، پایان نامه دکتری ، دانشگاه صنعتی امیر کبیر .

[۹]- سوراندرا شاه ، شعیب هارون احمد ، ۱۳۸۳ ، بتن های توانمند و کاربردهای آن ، مظلوم موسی ، رمضانیانپور علی اکبر ، چاپ اول ، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد .

[۱۰]- خالو علیرضا ، ۱۳۷۶ ، رفتار سازه ای بتن دارای میکروسیلیس ، ۱۰۵-۸۴ ، مجموعه مقالات سمینار بین المللی کاربرد میکروسیلیس در بتن ، چاپ دوم ، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، تهران .

[۱۱]- Regourd M . ۱۹۹۳ , Micro Structure Of Field Concretes Containing Silica Fume , Proceedings , ٤th Int . Symp . on Cement Microscopy , Nevada , USA .

[۱۲]-Zhang . M .H . ۱۹۹۱ , Effect Of Silic Fume On Pore Structure And Diffusivity Of Low Porosity Cement Pastes . Cement And Concrete Research .

[۱۳] - ممتازی علی صدر ، ۱۳۸۰ ، ارزیابی دوام بتن با مقاومت زیاد (حاوی دوده سیلیس) در برابر یخ بندان ، ۵۲۶-۵۲۱ ، مجموعه مقالات اولین کنفرانس بین المللی بتن و توسعه ، چاپ اول ، تسنیمی ع ، شایانفر م ، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، تهران .

[۱٤] - پرهیزکار طیبه ، ۱۳۷۶ ، اثر میکروسیلیس در مقاومت سایشی بتن ، ۵۰-۳۰ ، مجموعه مقالات سمینار بین المللی کاربرد میکروسیلیس در بتن ، چاپ دوم ، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن ، تهران .

[۱۵] - طسوجی محمد ابراهیم ، ۱۳۷۰ ، طرح و کنترل مخلوطهای بتن، چاپ سوم، انتشارات مترجم.

[۱٦]- Cordon W.A. and Gillispie , ۱۹۹۳ , J.ACI , Proc . Vol ۶۰ , No ۸ , pp ۱۰۲۹-۱۰۵۰ .

[۱۷] - آیین نامه بتن ایران (آبا) ، ۱۳۸۲ ، چاپ ششم ، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور ، معاونت امور پشتیبانی ، مرکز مدارک علمی و انتشارات ، ص ۴۵ .

[۱۸] - نویل، ۱۳۸۴، تکنولوژی بتن ، رمضانیانپور علی اکبر، شاه نظری محمد رضا، چاپ دوازدهم، انتشارات آذرنگ.

[۱۹] - مستوفی نژاد داوود ، ۱۳۸۰ ، تکنولوژی و طرح اختلاط بتن ، چاپ ششم ، انتشارات ارکان

[۲۰] - شاه نظری محمد رضا ، سحاب محمد قاسم ، ۱۳۷۹ ، دستورالعمل های آزمایشگاه بتن، چاپ سوم ، انتشارات علم و صنعت ۱۱۰ .

[۲۱]- Nawy E.G.۲۰۰۱ , Fundamentals Of High Performance Concrete , ۲th Edition , John Wiley & Sons .

[۲۲] - عشقی ساسان ، ۱۳۷۱ ، آزمایشهای بتن سخت شده ، چاپ دوم ، انتشارات متسم .

[۲۳] - رمضانیانپور علی اکبر ، ۱۳۷۷ ، طرح اختلات بتن ، چاپ پنجم ، انتشارات علم و صنعت ۱۱۰ .