بسم‌الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی عمران

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سازه

ارزیابی ضریب K در بتن خودتراکم حاوی پوزولان های طبیعی و مصنوعی

نگارنده:

امیرخانی

استاد راهنما:

دکتر وحید رضا کلات جاری

دکتر محسن تدین

استاد مشاور:

مهندس سید محمد سجادی عطار

شهریورماه ۱۳۹۶

تقدیم اثر:

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام‌بخش آلام زمینی‌ام است

به استوارترین تکیه‌گاهم، دستان پرمهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگی‌ام، چشمان سبز مادرم

که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانی‌تان را سپاس نتوانم بگویم .

امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

آوردی گران‌سنگ‌تر از این ارزان نداشتم تا به خاک‌پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگی‌تان را بزداید .

بوسه بر دستان پرمهرتان

به‌پاس تشکر و قدردانی پایان‌نامه حاضر را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

امیرخانی

شهریورماه ۱۳۹۶

تقدیر و تشکر

سپاس و ستایش خدای جل و جلالِ که آثار قدرت او بر چهره روز روشن، تابان است و انوار حکمت او در دل شب تار، درفشان. آفریدگاری که خویشتن را به ما شناساند و درهای علم را بر ما گشود و عمری و فرصتی عطا فرمود تا بدان، بنده ضعیف خویش را در طریق علم و معرفت بیازماید.

بدین‌وسیله تشکر و قدردانی خود را از اساتید بزرگوارم جناب آقای دکتر وحید رضا کلات جاری و جناب آقای دکتر محسن تدین که در طول انجام این پژوهش با همفکری خویش همواره حامی من بوده‌اند، بیان می‌نمایم.

بر خود لازم می‌دانم کمال تشکر و قدردانی ویژه‌ای از جناب آقای مهندس سید محمد سجادی عطار، مدرس دانشکده فنی مشهد (شهید محمد منتظری) و مدیر آزمایشگاه کنترل کیفیت خط ۲ قطار شهری مشهد، به دلیل یاری‌ها و راهنمایی‌های بی‌چشم‌داشت ایشان که بسیاری از سختی‌ها را برایم آسان‌تر نمودند، داشته باشم.

همچنین از شرکت صنایع شیمیایی ژیکاوا و کارشناسان محترم جناب آقایان مهندس حیدری، اسلامی، عطاریان، صمدی زاده، قدرتی و کارکنان محترم به‌پاس همکاری‌هایشان سپاسگزارم.

و تشکر ویژه‌ای از دوست عزیزم جناب آقای مهندس ابراهیم کمکی که همواره از حمایت‌های فکری و راهنمایی‌های خالصانه ایشان بهره‌مند بوده‌ام.

تعهد نامه

اینجانب امیرخانی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته سازه دانشکده عمران دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه ارزیابی ضریب K در بتن خودتراکم حاوی پوزولان های طبیعی و مصنوعی تحت راهنمائی جناب آقای دکتر وحیدرضا کلات‌جاری و جناب آقای دکتر محسن تدین متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه شاهرود » و یا « Shahrood University» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

با توسعه روزافزون سازه‌های بتنی و با تأکید بر مقاومت و دوام ازیک‌طرف و عدم وجود کارگران ماهر از طرف دیگر؛ گسترش صنعت پیش‌ساخته‌ی بتنی در دنیا موجب گردید بتنی طراحی گردد که برای تراکم خود نیازی به لرزش در هنگام بتن‌ریزی نداشته باشد. استفاده از انواع پوزولان‌ها به‌عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای، خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری در سنین بالا و دوام بتن نظیر نفوذپذیری را بهبود می‌بخشد؛ همچنین استفاده از مواد پوزولانی همراه با مواد افزودنی شیمیایی در سال‌های اخیر این امکان را برای دانشمندان علم تکنولوژی بتن فراهم نموده است که بتوانند بتن‌های خاصی را برای شرایط مختلف طراحی نمایند. در تحقیق حاضر به بررسی ضریب K در بتن‌خودتراکم پرداخته شده است. ضریب k بیانگر میزان اثربخشی پوزولان‌های مختلف بر مقاومت و دوام بتن می‌باشد به نحوی که میکروسیلیس در مقادیر برابر اثر بیشتری نسبت به سیمان دارند در حالی که خاکستر بادی و پوزولان‌های طبیعی معمولا در اوزان مساوی کم اثرتر می‌باشند. در تحقیق انجام‌شده ۳۹ طرح مخلوط بتن‌خودتراکم در نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ با مصرف میکروسیلیس، پوزولان خاش، زئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی استفاده گردیده که با بتن شاهد در سن مقاومتی ۲۸ روزه مورد مقایسه قرارگرفته است و ضریب K در بتن خودتراکم محاسبه گردیده است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، ضریب K، میکروسیلیس، پوزولان خاش، زئولیت، سرباره کوره آهن‌گدازی

فهرست

فصل اول

۱-۱ کلیات..... ۲

۱- ۲هدف تحقیق..... ۳

۱-۳روش تحقیق و برنامه مطالعات..... ۴

فصل دوم

۲-۱ تاریخچه بتن خودتراکم..... ۸

۲-۱-۱ مقدمه..... ۸

۲-۱-۲ سرعت گسترش شناخت بتن خودتراکم..... ۱۰

۲-۲ فواید و امتیازات به‌کارگیری بتن خودتراکم..... ۱۴

۲-۳ آشنایی با برخی مفاهیم مرتبط با بتن خودتراکم ۱۶

۲-۳-۱ رئولوژی ۱۶

۲-۳-۲ کارایی ۱۷

۲-۳-۳ قابلیت پر کردن ۱۷

۲-۳-۴ قابلیت عبور ۱۷

۲-۳-۵ پایداری ۱۷

۲-۴ عوامل مؤثر بر قابلیت پر کردن، قابلیت عبور و پایداری ۱۷

۲-۵ آزمایش‌های رئولوژی بتن خودتراکم ۱۷

۲-۵-۱ آزمایش جریان اسلامپ ۲۱

۲-۵-۲ آزمایش حلقه J شکل ۲۲
۲-۵-۳ آزمایش قیف V ۲۳
۲-۵-۴ آزمایش جعبه U ۲۵
۲-۵-۵ آزمایش جعبه L ۲۶
۲-۶ استانداردها و پیشنهادها ۲۸
۲-۷ انتخاب اهداف کارایی مناسب برای بتن خودتراکم ۳۲
۲-۸ معیارهای قابل‌قبول بتن خودتراکم ازنظر کارایی ۳۳
۲-۹ مروری بر تحقیق‌های انجام‌شده ۳۵
۲-۹-۱پوزولان‌ها و عملکرد آن‌ها در خمیر سیمانی ۳۵
۲-۹-۲جنبه‌های دوام پوزولان‌ها ۳۶
۲-۹-۳دلایل استفاده از پوزولان طبیعی در بتن خودتراکم ۳۷
۲-۹-۴مزایای استفاده از پوزولان طبیعی ۳۸
۲-۹-۵تأثیر پوزولان‌های طبیعی بر خواص بتن تازه ۳۹
۲-۹-۶تأثیر پوزولان طبیعی بر خواص بتن سخت شده ۴۰
۲-۹-۷ مدول ارتجاعی بتن‌های حاوی پوزولان ۴۲
۲-۹-۸ خزش بتن‌های حاوی پوزولان ۴۲
۲-۹-۹میکروسیلیس ۴۳
۲-۹-۱۰ اثر دوده سیلیس بر خواص بتن تازه ۴۴
۲-۹-۱۱ اثر دوده سیلیس بر خواص مکانیکی بتن سخت شده ۴۴
۲-۹-۱۲ عمل‌آوری بتن‌های حاوی دوده سیلیس ۴۵

۲-۹-۱۳ ریز ساختار،تخلخل و نفوذپذیری ۴۶
۲-۹-۱۴مواد افزودنی ۴۷
۲-۱۰ ضریبK ۴۸
۲-۱۱ مثال‌هایی از استفاده بتن خودتـــراکم در پروژه ها ۴۹
۲-۱۱-۱ پروژه‌های خارج از ایران ۵۰
۲-۱۱-۲ پروژه‌های داخل کشور ۵۳

فصل سوم

۳-۱ مقدمه ۶۰
۳-۲ مصالح مصرفی ۶۰
۳-۲-۱ مصالح سنگی ۶۱
۳-۲-۱-۱ مصالح سنگی درشت‌دانه ۶۱
۳-۲-۱-۲ مصالح سنگی ریزدانه ۶۱
۳-۲-۱-۳ پودر سنگ ۶۲
۳-۲-۲ آزمایش‌های انجام‌شده روی مصالح سنگی و نتایج آن‌ها ۶۲
۳-۲-۲-۱ آزمایش دانه‌بندی مصالح سنگی ۶۲
۳-۲-۲-۲ سایر نتایج مشخصات مصالح سنگی ۶۵
۳-۲-۳ سیمان ۶۶
۳-۲-۴ آب ۶۶
۳-۲-۵ مواد افزودنی ۶۸
۳-۲-۶ میکروسیلیس ۶۸

۳-۲-۷ پوزولان خاش ۶۹
۳-۲-۸ زئولیت ۶۹
۳-۲-۹ سرباره کوره آهن‌گدازی ۷۰
۳-۳ برنامه آزمایشگاهی و ساخت طرح‌های مخلوط ۷۱
۳-۴ اصول اولیه ساخت طرح‌های مخلوط ۷۳
۳-۵ روش‌های طرح مخلوط بتن خودتراکم ۷۳
۳-۵-۱ اصلاح و تعدیل مخلوط ۷۴
۳-۶ نرم‌افزار محاسبه طرح مخلوط ۷۶
۳-۶-۱ حداقل آزمایش‌های لازم برای طرح مخلوط ۷۷
۳-۶-۲ دانه‌بندی مصالح سنگی ۷۹
۳-۶-۳ مشخصات سیمان، مواد سیمانی و افزودنی‌ها ۸۵
۳-۶-۴ طراحی مخلوط بتن خودتراکم ۸۶
۳-۶-۴-۱ کنترل وزنی عبوری از الک ۲۰۰ ..... ۸۸
۳-۶-۵ اصلاح طرح‌ها ۸۹
۳-۶-۶ برآورد هزینه ۹۲
۳-۷ روش مخلوط مصالح ۹۴
۳-۸ نام‌گذاری مخلوط‌های بتن خودتراکم ۹۴
۳-۹ مقادیر و نسبت‌های مخلوط بتن ۹۶
۳-۱۰ روش نمونه‌گیری و نگهداری نمونه‌ها در آزمایشگاه ۹۸
۳-۱۱ شرح آزمایش‌های انجام‌شده ۱۰۰

۳-۱۲ آزمایش‌های انجام‌شده در فاز خمیری ۱۰۱
۳-۱۲-۱ آزمایش جریان اسلامپ ۱۰۱
۳-۱۲-۲ آزمایش حلقه J ۱۰۲
۳-۱۲-۳ آزمایش جعبه L ۱۰۴
۳-۱۲-۴ آزمایش جعبه U ۱۰۵
۳-۱۲-۵ آزمایش قیف V ۱۰۶
۳-۱۳ آزمایش‌های انجام‌شده در فاز سخت شده ۱۰۸
۳-۱۳-۱ آزمایش تعیین مقاومت فشاری ۱۰۸
۳-۱۳-۲ آزمایش هدایت الکتریکی ۱۰۹
۳-۱۳-۳ آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار ۱۱۰
۳-۱۳-۴ آزمایش جذب آب نهایی ۱۱۲

فصل چهارم

۴-۱ نتایج آزمایش‌های فاز خمیری بتن خودتراکم ۱۱۶
۴-۲ تحلیل نتایج فاز خمیری بتن خودتراکم ۱۱۸
۴-۲-۱ آزمایش جریان اسلامپ و T50 ..... ۱۱۹
۴-۲-۲ آزمایش حلقه J ۱۲۱
۴-۲-۳ آزمایش قیف V ۱۲۴
۴-۲-۴ آزمایش جعبه U ۱۲۵
۴-۲-۵ آزمایش جعبه L ۱۲۷
۴-۳ نتایج آزمایش‌های فاز سخت شده و محاسبه ضریبK ۱۲۹

۴-۳-۱ نتایج مقاومت فشاری ۱۲۹
۴-۳-۲ محاسبه ضریبK ۱۳۳
۴-۳-۳ نتایج آزمایش هدایت الکتریکی ۱۴۰
۴-۳-۴ نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار ۱۴۵
۴-۳-۵ نتایج آزمایش جذب آب نهایی ۱۴۹

فصل پنجم

۵-۱ ملاحظات فنی و اجرایی بتن خودتراکم ۱۵۲
۵-۱-۱ تأمین مصالح ۱۵۲
۵-۱-۲ نمونه‌برداری از مصالح ۱۵۲
۵-۱-۳ انبار کردن مصالح ۱۵۴
۵-۱-۴ توزین مصالح، نسبت‌ها، ساخت و پذیرش بتن خودتراکم در کارگاه ۱۵۴
۵-۱-۵ قالب‌بندی، بتن‌ریزی، تراکم و پرداخت بتن خودتراکم ۱۵۵
۵-۲ برآورد اقتصادی بتن خودتراکم ۱۵۶
۵-۳ ارتباط مقاومت فشاری با کارایی بتن خودتراکم ازنظر اقتصادی ۱۶۲

فصل ششم

۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۶۶
۶-۲ پیشنهادها ۱۷۲
مراجع ۱۷۴

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱: بتن‌ریزی با بتن خودتراکم برای سگمنت‌های تونل..... ۱۱

شکل ۲-۲ : افزایش کاربرد بتن خودتراکم برای قطعات بتنی در ژاپن..... ۱۲

شکل۲-۳ : دست یافتن به سیستم‌های ساختمانی جدید با استفاده از SCC ۱۲

شکل۲-۴: بتن‌ریزی با بتن خودتراکم برای سازه‌های ساندویچی تونل غوطه‌ور در Kobe ژاپن.....۱۳

شکل ۲-۵ : تصویری از لوگو خط۲ قطار شهری مشهد ۱۶

شکل ۲-۶: شاخص چشمی پایداری استاتیکی بتن سخت شده از مقطع نمونه استوانه‌ای ۱۸

شکل۲-۷: شکل شماتیک آزمایش جریان اسلامپ ۲۲

شکل ۲-۸: مشخصات ابعادی و شکل شماتیک حلقهJ ۲۳

شکل ۲-۹: مشخصات ابعادی و تصویر شماتیک قیف V.....۲۴

شکل ۲-۱۰ : مشخصات ابعادی جعبه U ۲۵

شکل ۲-۱۱: دستگاه جعبه U ژاپنی ۲۶

شکل ۲-۱۲: تصویر شماتیک و مشخصات ابعادی جعبه L ۲۷

شکل۲-۱۳: آزمایش اصلاح‌شده جریان لرزان M.VF ۲۹

شکل۲-۱۴: آزمایش جعبه پُر کردن ۲۹

شکل ۲-۱۵: آزمایش جداشدگی استاتیکی پایداری ستون ۳۰

شکل۲-۱۶: آزمایش Orimet ۳۰

شکل۲-۱۷: تاثیر جایگزینی سیمان پرتلند با پوزولان طبیعی(برحسب سن ۲۸ روزه) ۴۱

شکل ۲-۱۸:افزایش مقاومت پوزولان‌های مختلف باگذشت زمان ۴۱

شکل۲-۱۹: تاثیر زمان بارگذاری و جایگزینی پوزولان‌ها با سیمان پرتلند برخزش ۴۲

شکل ۲-۲۰:رابطه میان نسبت w/c و مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیس ۴۵
شکل ۲-۲۱: اثر دوده سیلیس بر تخلخل کل ۴۶
شکل ۲-۲۲: برج Land Mark و پل معلق Akashi-Kaikyo ۵۰
شکل ۲-۲۳: استفاده از SCC در فونداسیون آسمان‌خراش PORTA NUOVA ۵۱
شکل ۲-۲۴ : آسمان‌خراش PORTA NUOVA ۵۱
شکل ۲-۲۵: تصویر شماتیک مقاطع بزرگراه Wu-Yang در تایوان ۵۲
شکل۲-۲۶ : نمایی از ستون‌های اجراشده با SCC در بزرگراه Wu-Yang ۵۲
شکل ۲-۲۷: قطعات سگمنتال سرستون نصب‌شده در محور پروژه ۵۴
شکل ۲-۲۸: تونل نیایش تهران ۵۵
شکل۲-۲۹: ریب در اطراف مقطع ۵۵
شکل ۲-۳۰: تونل رسالت تهران ۵۶
شکل۲-۳۱: مقطع نهایی تونل رسالت ۵۷
شکل۲-۳۲: مقاوم‌سازی فونداسیون آسیاب گلوله‌ای کارخانه سیمان کرمان ۵۷
شکل۲-۳۳: ستون پر آرماتور اجراشده با بتنNC ۵۸
شکل ۲-۳۴: مغزه دیوار پروژه‌ای که با NC اجراشده ۵۸
شکل ۳-۱: منحنی دانه‌بندی شن نخودی، ماسه طبیعی و ماسه‌بادی ۶۴
شکل ۳-۲: مشخصات شیمیایی میکروسیلیس صنایع فروسیلیس سمنان ۶۸
شکل۳-۳: مشخصات شیمیایی پوزولان خاش ۶۹
شکل۳-۴: مشخصات شیمیایی زئولیت ۷۰
شکل۳-۵: مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی ۷۱

شکل۳-۶: منحنی دانه‌بندی ترکیبی اصلاح‌شده فولر-تامسون ۸۳
شکل۳-۷: مصالح مصرفی برای ساخت بتن خودتراکم ۸۴
شکل۳-۸: نمودار درصد هزینه تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم (طرحN1) ۹۳
شکل ۳-۹: نمونه‌گیری و نگهداری نمونه‌ها در آزمایشگاه ۹۹
شکل ۳-۱۰: آزمایش جریان اسلامپ و T50 ..... ۱۰۲
شکل۳-۱۱: آزمایش حلقه J ۱۰۳
شکل۳-۱۲: آزمایش جعبه L ۱۰۴
شکل ۳-۱۳: آزمایش جعبه U ۱۰۶
شکل ۳-۱۴: آزمایش قیف V ۱۰۷
شکل ۳-۱۵: آزمایش مقاومت فشاری ۱۰۸
شکل۳-۱۶: آزمایش هدایت الکتریکی ۱۱۰
شکل ۳-۱۷: آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار ۱۱۱
شکل ۳-۱۸: نمونه‌های داخل گرمچال آزمایش جذب آب نهایی ۱۱۳
شکل۴-۱: جریان اسلامپ طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم ۱۲۰
شکل۴-۲: جریان اسلامپ طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم-ادامه ۱۲۱
شکل۴-۳: مقایسه آزمایش جریان اسلامپ با آزمایش حلقه J ۱۲۲
شکل۴-۴: مقایسه آزمایش جریان اسلامپ با آزمایش حلقه J- ادامه ۱۲۲
شکل۴-۵: اختلاف قطر آزمایش جریان اسلامپ با حلقه J و مقایسه با استاندارد ISIRI ۱۲۳
شکل۴-۶: اختلاف قطر آزمایش جریان اسلامپ با حلقه J و مقایسه با استاندارد ISIRI-ادامه ۱۲۳
شکل۴-۷: اختلاف قطر آزمایش جریان اسلامپ با حلقه J و مقایسه با استاندارد ISIRI-ادامه ۱۲۴

شکل۴-۸: مقایسه نموداری آزمایش قیف V در ۱ و ۵ دقیقه ۱۲۵
شکل۴-۹: مقایسه نموداری آزمایش قیف V در ۱ و ۵ دقیقه -ادامه..... ۱۲۵
شکل۴-۱۰: نتایج آزمایش جعبه U ۱۲۶
شکل۴-۱۱: نتایج آزمایش جعبه U- ادامه ۱۲۶
شکل۴-۱۲: نتایج آزمایش جعبه U - ادامه..... ۱۲۷
شکل۴-۱۳: مقایسه نتایج آزمایش جعبه L با مرجع[۳] ۱۲۸
شکل۴-۱۴: مقایسه نتایج آزمایش جعبه L با مرجع[۳]-ادامه ۱۲۸
شکل۴-۱۵: مقایسه نتایج آزمایش جعبه L با مرجع[۳]-ادامه ۱۲۹
شکل۴-۱۶: نتایج مقاومت فشاری طرح‌های N1 الی N20 .....۱۳۰
شکل۴-۱۷: نتایج مقاومت فشاری طرح‌های N21 الی N39 - ادامه ۱۳۰
شکل۴-۱۸: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۵
شکل۴-۱۹: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۷/۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۵
شکل۴-۲۰: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۱۰ ٪ با بتن شاهد ۱۳۵
شکل۴-۲۱: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش ۱۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۶
شکل۴-۲۲: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش ۲۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۶
شکل۴-۲۳: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش ۳۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۶
شکل۴-۲۴: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی زئولیت ۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۷
شکل۴-۲۵: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی زئولیت ۱۰ ٪ با بتن شاهد ۱۳۷
شکل۴-۲۶: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی زئولیت ۱۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۷
شکل۴-۲۷: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی ۲۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۸

شکل۴-۲۸: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی ۳۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۸
شکل۴-۲۹: ضریبK و مقایسه بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۵ ٪ با بتن شاهد ۱۳۸
شکل۴-۳۰: نتایج ضریب K برای پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در بتن خودتراکم ۱۳۹
شکل۴-۳۱: ارتباط بین نسبت آب به مواد سیمانی و آزمایش هدایت الکتریکی ۱۴۱
شکل۴-۳۲: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۱۴۲
شکل۴-۳۳: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش ۱۴۲
شکل۴-۳۴: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی زئولیت ۱۴۳
شکل۴-۳۵: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۴۳
شکل۴-۳۶: نتایج آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم ۱۴۴
شکل۴-۳۷: مقایسه نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس با نمونه شاهد ۱۴۶
شکل۴-۳۸:مقایسه نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در نمونه‌های حاوی پوزولان خاش با نمونه شاهد ۱۴۶
شکل۴-۳۹: مقایسه نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در نمونه‌های حاوی زئولیت با نمونه شاهد..... ۱۴۶
شکل۴-۴۰:مقایسه نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی با نمونه شاهد ۱۴۶
شکل۴-۴۱: نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار ۱۴۸
شکل۴-۴۲: مقایسه تغییرات جذب آب نهایی نمونه‌ها در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ ..... ۱۴۹
شکل۴-۴۳: مقایسه تغییرات جذب آب نهایی نمونه‌ها در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵ ..... ۱۴۹
شکل۴-۴۴: مقایسه تغییرات جذب آب نهایی نمونه‌ها در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵۰ ..... ۱۵۰
شکل۵-۱: مقایسه قیمت تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس با شاهد ۱۵۹
شکل۵-۲: مقایسه قیمت تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش با شاهد ۱۶۰
شکل۵-۳: مقایسه قیمت تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم حاوی زئولیت با شاهد ۱۶۰
شکل۵-۴: مقایسه قیمت تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی با شاهد.. ۱۶۰

شکل۵-۵: هزینه تولید یک مترمکعب بتن خودتراکم در تحقیق انجام‌شده ۱۶۱

فهرست جدول‌ها

جدول۲-۱ : عوامل مؤثر بر قابلیت پر کردن بتن خودتراکم..... ۱۹

جدول۲-۲: عوامل مؤثر بر قابلیت عبور بتن خودتراکم..... ۱۹

جدول۲-۳ : عوامل مؤثر بر پایداری بتن خودتراکم ۲۰

جدول۲-۴: اسامی و ویژگی آزمایش‌های رئولوژی بتن خودتراکم تحقیق حاضر ۲۱

جدول ۲-۵: برخی شماره استانداردها و پیشنهادهای آزمایش‌های فاز خمیری بتن خودتراکم ۳۱

جدول۲-۶: انتخاب اهداف کارایی مناسب برای بتن خود تراکم ۳۲

جدول ۲-۷: معیارهای قبول بتن خودتراکم ازنظر کارایی و عوامل پدیدآورنده اختلال در نتایج ۳۳

جدول ۲-۸: رابطه بین برخی از عملیات اصلاحی و عیوب ایجادشده بر روی بتن ۳۴

جدول ۲-۹: طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم اجراشده در پروژه بزرگراه طبقاتی صدر ۵۴

جدول۳-۱: نتایج دانه‌بندی مصالح سنگی ۶۲

جدول۳-۲: سایر مشخصات مصالح سنگی ۶۵

جدول ۳-۳: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ دو بجنورد ۶۷

جدول۳-۴: الزامات ACI237 در طراحی بتن خودتراکم ۷۲

جدول۳-۵: مشخصات بتن خودتراکم ارائه‌شده توسط جامعه مهندسین عمران ژاپن ۷۴

جدول۳-۶: دانه‌بندی ماسه ۷۹

جدول۳-۷: دانه‌بندی شن نخودی ۷۹

جدول۳-۸: دانه‌بندی ماسه‌بادی ۸۰

جدول۳-۹: نتایج دانه‌بندی مصالح سنگی ۸۱

جدول۳-۱۰: سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی در طرح‌های مخلوط ۸۲
جدول۳-۱۱: محدوده مجاز دانه‌بندی ۸۴
جدول۳-۱۲: مشخصات خواص فیزیکی مواد سیمانی ۸۵
جدول۳-۱۳: کنترل درصد وزنی عبوری از الک ۲۰۰ ..... ۸۹
جدول۳-۱۴: برآورد هزینه طرح N1 برای هر مترمکعب ۹۳
جدول۳-۱۵: نام‌گذاری و درصد مصرف پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در بتن خودتراکم ۹۴
جدول۳-۱۶: طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم ۹۷
جدول۳-۱۷: آزمونه‌ها و آزمایش‌های انجام‌شده در فاز سخت شده ۹۹
جدول۳-۱۸: آزمایش‌های انجام‌شده در فاز خمیری ۱۰۰
جدول۴-۱: نتایج آزمایش‌های رئولوژی طرح مخلوط بتن خودتراکم ۱۱۶
جدول۴-۲: محدوده قابل‌قبول برای رفتار بتن خودتراکم در فاز خمیری ۱۱۹
جدول۴-۳: نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷،۳ و ۲۸ روزه ۱۳۲
جدول۴-۴: نتایج ضریب K برای پوزولان‌های مصنوعی و طبیعی در بتن خودتراکم ۱۳۹
جدول۴-۵: مقادیر ضریب K برای پوزولان‌های مصرف‌شده در بتن خودتراکم ۱۴۰
جدول۵-۱: قیمت مصالح بر اساس ۳ ماهه اول ۱۳۹۶ شهر مشهد ۱۵۷
جدول۵-۲: هزینه طرح مخلوط‌های آزمایشگاهی بتن خودتراکم ۱۵۷
جدول۶-۱: مقادیر ضریب K محاسبه‌شده در تحقیق حاضر ۱۷۰

فصل اول:

مقدمه

۱-۱ کلیات

بتن به‌عنوان یکی از مصالح نسبتاً ارزان و پایا می‌باشد که می‌توان با قالب‌بندی آن را به هر شکل هندسی موردنظر درآورد؛ اما در بعضی موارد به دلایل طراحی ضعیف، ضعف در اجرا، کیفیت نامرغوب مصالح و شرایط محیطی لحاظ نشده در طراحی و یا ترکیبی از این عوامل، سازه بتن‌آرمه‌ی ساخته‌شده کارایی موردنظر را در دوره عمر مفید خود نخواهد داشت.

از مهم‌ترین عواملی که در سازه‌های بتنی باعث ضعف در معماری و همچنین سازه‌ای می‌شود نوع تراکم و زمان تراکم بتن است.

تراکم بتن شامل فشرده‌سازی بتن تازه است تا در اطراف قالب‌ها و اطراف میلگردها کاملاً شکل‌گرفته و روی آن‌ها را بپوشاند؛ همچنین هوای محبوس را به میزان زیادی از بتن خارج کرده و از کرمو شدن داخل و سطوح بتن جلوگیری نموده و ذرات جامد را به یکدیگر نزدیک کند.

روش تراکم باید به‌گونه‌ای اتخاذ و اجرا شود که از جداشدگی اجزا به هر صورت جلوگیری شود. به‌ویژه آنکه عموماً جداشدگی اجزا قابل‌رؤیت نیست و لذا باید روش‌های صحیح و غلط را دقیقاً شناخت و در اجرا از آن بهره برد. روش‌های تراکم، به دلیل ضربه و ارتعاشی که عموماً در آن‌ها به‌کاررفته می‌شود، موجب آن می‌شود که به قالب‌های با مقاومت بیشتری نیاز باشد. عدم اجرای صحیح تراکم در روش‌های دستی معمولاً موجب تراکم ناکافی و در روش‌های ماشینی، معمولاً موجب غیریکنواختی بتن خواهد شد.

عواملی که بر انتخاب روش تراکم مؤثر است نوع بتن، کارپذیری بتن، حجم بتن‌ریزی، میزان آرماتورها و فواصل آن‌ها، نوع روش انتقال و جای دادن آن‌ها (نظیر استفاده از پمپ بتن)، پیچیدگی قالب‌بندی و شکل هندسی عضو یا اعضاء و امکانات موجود است.

تراکم ممکن است به‌صورت دستی مانند میله کوبی در نمونه‌های آزمایشگاهی بتن معمولی و یا روش‌های مکانیکی مانند استفاده از دستگاه‌های لرزاننده یا ویبراتورها، میزهای لرزان، دستگاه‌هایی با کوبنده‌های موتوری، دستگاه‌های مبتنی بر نیروی گریز از مرکز و یا ترکیبی از آن‌ها مانند غلتک لرزشی انجام شود.

با توجه به اهمیت موضوع تراکم بتن و مدت‌زمان آن و همچنین به دلیل معایب و هزینه‌هایی که به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم به پروژه‌ها تحمیل می‌گردد، هدف حذف هر نوع ویبره کردن (داخلی یا خارجی) در تولید قطعات بتنی با استفاده از بتن خودتراکم می‌باشد.

استفاده از انواع پوزولان‌ها به‌عنوان ماده جایگزین سیمان در بتن علاوه بر کمک به کاهش مصرف سیمان و انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای، خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری در سنین بالا و دوام بتن نظیر نفوذپذیری را بهبود می‌بخشد؛ همچنین استفاده از مواد پوزولانی همراه با مواد افزودنی شیمیایی در سال‌های اخیر این امکان را برای دانشمندان علم تکنولوژی بتن فراهم نموده است که بتوانند بتن‌های خاصی را برای شرایط مختلف طراحی نمایند.

۱-۲ هدف تحقیق

تولید سیمان یکی از صنایع آلاینده محیط‌زیست محسوب می‌شود به‌نحوی‌که به ازای تولید هر تن کلینکر سیمان تقریباً یک‌تن گاز دی‌اکسید کربن وارد جو می‌شود. به همین علت تولید بتن مقاوم و بادوام باسیمان کمتر و به‌جای آن استفاده از افزودنی‌های معدنی و شیمیایی می‌تواند تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای در حفظ محیط‌زیست داشته باشد[۱].

یکی از مزایایی که درروش طرح ملی مخلوط بتن وجود دارد جامعیتی است که نسبت به سایر روش‌ها در آن دیده می‌شود و نقش عوامل متعددی که در ویژگی‌های بتن اثرگذار است در آن دیده‌شده است. ازجمله این موارد میزان اثربخشی پوزولان‌ها بر مقاومت و دوام بتن می‌باشد که با ضریب K تعیین‌شده است. پوزولان‌هایی نظیر میکرو سیلیس در مقادیر برابر اثر بیشتری نسبت به سیمان دارند درحالی‌که موادی مثل

پوزولان‌های طبیعی، سرباره‌ها و خاکستر بادی در اوزان مساوی کم اثرتر نسبت به سیمان دیده می‌شوند. این مسئله درروش طرح ملی مخلوط بتن با ضریب K توصیف‌شده است[۲]. از طرفی با گسترش بتن‌های ویژه نظیر بتن خودتراکم ضرورت تدوین روش طرح ملی مخلوط بتن خودتراکم احساس می‌شود ولی مطالعات اولیه کافی در خصوص آن وجود ندارد.

هدف از تحقیق فعلی به دست آوردن ضریب K برای پوزولان‌های مختلف در بتن خودتراکم است که در شرایط مختلف از دیدگاه مقاومت فشاری مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۳-۱ روش تحقیق و برنامه مطالعات

در تحقیق حاضر با استفاده از امکانات آزمایشگاهی و از طریق ساخت آزمونه‌های بتنی و انجام آزمایش مقاومت فشاری اقدام به ارزیابی ضریب K در بتن خودتراکم می‌شود. براین اساس لازم است اثر عوامل مختلف مؤثر بر ضریب K موردبررسی قرار گیرند. حالت‌های مختلف در نظر گرفته‌شده در طرح‌های مخلوط به شرح ذیل می‌باشند:

- نسبت آب به مواد سیمانی: در ۳ حالت ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰
- پوزولان: شامل پوزولان‌های مصنوعی و طبیعی

مجموعاً ۳۹ طرح مخلوط با شرایط ذکرشده ساخته می‌شود و آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده به شرح ذیل بر روی آنها انجام می‌شود:

آزمایش‌های بتن تازه شامل:

- جریان اسلامپ
- T50
- جعبه L
- جعبه U

- قیف V یک دقیقه
- قیف V پنج دقیقه
- حلقه J
- تعیین شاخص ارزیابی ظاهری بتن (VSI)

آزمایش‌های بتن سخت شده شامل:

- مقاومت فشاری مکعبی
- جذب آب حجمی نهایی
- عمق نفوذ آب تحت‌فشار
- هدایت الکتریکی

فصل دوم

مروری بر بتن خودتراکم

۲-۱ تاریخچه بتن خودتراکم[۱](SCC)

۲-۱-۱ مقدمه

مهم‌ترین توسعه متحولانه در ساخت و اجرای بتن در سه دهه اخیر، استفاده از بتن‌های خودتراکم می-باشد[۳]. بتن خودتراکم بتنی است بسیار روان، درعین‌حال بدون جداشدگی که جاری‌شده، تمام فضای قالب را پرکرده و بدون نیاز به هرگونه تراکم داخلی یا خارجی میلگردها را در برگیرد. ایـن بتن بانام‌های دیگری نظیر بتن خودتحکیم[۲] و بتن خود تراز[۳] نیز شناخته می‌شود. در ژاپن این بتن به بتن خودتراکم و در کانادا و آمریکای شمالی به بتن خودتراکم معروف است. کلمه اختصاری SCC نیز برای این بتن درنظرگرفته شده است[۴].

همچنین از این بتن در ابتدای تولید به دلیل بدون لرزش و سروصدای ناشی از آن به بتن بی‌صدا نام‌برده شده است.

از سال ۱۹۸۳ به بعد دوام سازه‌های بتنی، موضوع موردعلاقه مهندسین عمران در ژاپن قرارگرفت لذا لازم بود بتن مورداستفاده در ساخت سازه‌های بتنی بادوام به‌قدر کافی توسط نیروی کار ماهر متراکم گردد. باوجوداین، کاهش تدریجی در تعداد نیروی کار ماهر در صنایع ساختمانی ژاپن، منجر به کاهش مشابهی در کیفیت کارهای ساختمان گردید. بهترین راه‌حل جهت دستیابی به سازه‌های بتنی بادوام، مستقل از کیفیت اجرا، به کار بردن بتن خودتراکم بود که می‌توانست بدون نیاز به نیروی کار ماهر جهت لرزاندن، تحت اثر وزن خود متراکم شده و به‌خوبی قالب را با خارج نمودن هوای داخل آن پر کند[۵].

---

[۱] Self compacting concrete
[2] Self consolidting concrete
[3] Self leveling concrete

اولین بار ضرورت وجود چنین بتنی توسط Okamura در سال ۱۹۸۶ پیشنهاد شد. Ozawa و Maekawa، اولین کسانی بودندکه بعد از Okamura مطالعات اساسی بر روی کارایی بتن خودتراکم را در دانشگاه توکیو انجام دادند[۶].

بعد از ساخت اولین نمونه از بتن خودتراکم در سال ۱۹۸۶، آزمایش‌هایی بر روی آن انجام گرفت که نتایج رضایت‌بخشی از نظر جمع شدگی ناشی از خشک شدن، گرمای هیدراسیون و مقاومت فشاری حاصل شد. تقریباً در همان زمان بتن توانمند[۴] به دلیل داشتن نسبت آب به سیمان پائین، به‌عنوان یک بتن بادوام توسط Aitcin اعلام گردید. از آن به بعد در دنیا بتن بادوام، بتن توانمند نام گرفت. بنابراین Okamura بتن خودتراکم را بانام بتن خودتراکم توانمند[۵] معرفی کرد[۵].

پوزولان‌ها موادی سیلیسی یا سیلیسی آلومینانی هستند که دارای مقدار نسبتاً زیادی (۵۰ تا بیش از ۹۰ درصد در پوزولان‌های مختلف) سیلیس می‌باشند و به‌خودی‌خود خاصیت چسبانندگی کمی داشته و یا ندارند، ولی در مجاورت رطوبت و در دمای معمولی با هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)2$ واکنش داده و ترکیباتی با خواص سیمانی (عمدتاً ژل سیلیکاتی) به وجود می‌آورند.

قدیمی ترین نمونه چسباننده هیدرولیکی ترکیبی از آهک و پوزولان به نام دیاتمه است که در منطقه خلیج فارس در حدود ۵۰۰۰ سال قبل از میلاد کشف گردید. کاربردهای بعدی پوزولان طبیعی به ۶۰۰ سال قبل از میلاد مسیح در منطقه مدیترانه در جزیره اژه ثرا که امروزه سنتورین نامیده می‌شود و در ۷۹ سال پس از میلاد مسیح در خلیج ناپل ایتالیا و سایر مناطق برمی‌گردد[۷].

رومی ها و یونانی ها از ترکیب پوزولان و آهک به عنوان مواد چسباننده برای بسیاری از سازه‌ها در ۲۰۰۰ سال پیش استفاده می‌کردند. چنین ملات هایی حاوی سه پیمانه پوزولان، دو پیمانه آهک و یک پیمانه

[4] High performance concrete
[5] Self compacting high performance concrete

ماسه بودند. این ملات ها به عنوان اولین سیمان‌های هیدرولیک برای آبراهها، پل‌ها، فاضلاب‌ها و سایر انواع سازه‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفتند[۷].

میکروسیلیس اولین بار در نروژ در اوایل دهه ۱۹۵۰ در بتن مورد آزمایش قرار گرفت. برای بتن‌های حاوی دوده سیلیس؛ مقاومت بالاتری به دست آمد. عملکرد بتن‌های حاوی دوده سیلیس در محیط‌های سولفاتی نیز بهتر از بتن‌های سیمان پرتلند معمولی بود. پس از ۲۰ سال و بر اثر محدودیت‌های زیست محیطی برای صنعت ریخته‌گری در نروژ، مقدار زیادی از دوده سیلیس در فرآیند فیلتر نمودن تولید گردید. فعالیت‌های پژوهشی وسیعی به منظور یافتن کاربردهای گوناگون دوده سیلیس صورت پذیرفت. بهبود دوام بتن‌های حاوی دوده سیلیس موجب افزایش استفاده از آن در صنعت بتن گردید[۷].

به‌منظور افزایش دوام و کاهش میزان نفوذ خمیر سیمان دو روش پیشنهاد می‌شود؛ اول کم کردن نسبت آب به سیمان و دوم استفاده از مواد جایگزین سیمان یا پوزولان‌ها. کاهش نسبت آب به سیمان علاوه بر از دست دادن کارایی، به‌تنهایی برای کاهش منافذ خمیر سیمان کافی نیست. استفاده از مواد پوزولانی، نقش به سزایی در کاهش نفوذپذیری ایفا می‌کند و در جهت توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست و منابع طبیعی تجدید ناپذیر به کار می‌آید. بنابراین، یکی از راه‌های کاهش مصرف سیمان، استفاده از مواد مکمل سیمان و پوزولان است[۸].

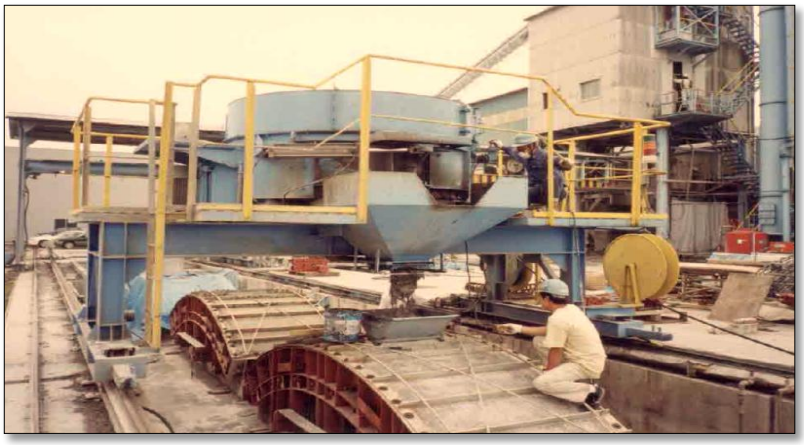
۲-۱-۲ سرعت گسترش شناخت بتن خودتراکم

اولین مقاله درزمینه‌ی بتن خودتراکم توسط Ozawa در دومین کنفرانس East-Asia and pacific در ژانویه ۱۹۸۹ ارائه شد وبعدازآن در ماه می سال ۱۹۹۲ در کنفرانس International Canmet & ACI در استانبول، مقاله دیگری توسط وی ارائه گردید که باعث شتاب بخشیدن به‌سرعت معرفی این بتن به جهانیان شد. پس از برگزاری کارگاه ACI Workshop اجرای این نوع بتن در یک سازه بتنی توسط

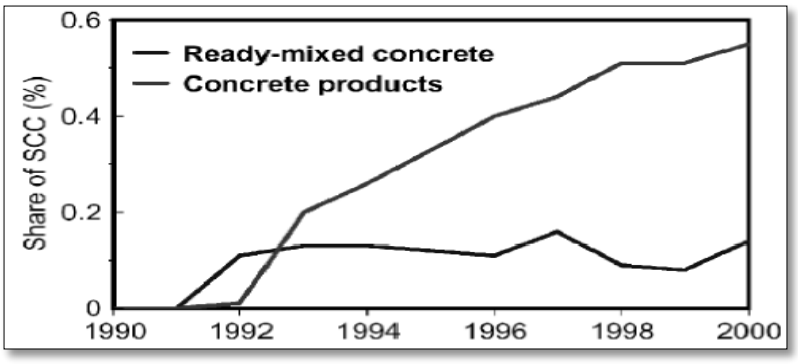
pavlzia در نوامبر ۱۹۹۴ در بانکوک مورداستفاده قرار گرفت. این نوع بتن موردعلاقه بسیاری از محققان و مهندسانی که به دوام بتن در ساخت سازه‌های بتنی علاقه‌مند بودند، واقع شد[۹].

در سال ۱۹۹۶ سخنرانی Okamura در همایش New Orkean ACI باعث علاقه‌مندی بیشتر محققان و مهندسان آمریکای جنوبی به شناخت هرچه بهتر این نوع بتن شد و مطالعات و تحقیقات بر روی بتن خودتراکم با سرعت بیشتری ادامه یافت. این فعالیت‌ها شامل تحقیقات گسترده در کانادا توسط Aictin و تشکیل یک کمیته تحقیقاتی در ژانویه ۱۹۹۷ در Rilem می‌باشد[۵].

بتن خودتراکم به‌منظور حذف سروصدای ناشی از ویبره در قطعات بتنی، کاربرد قابل‌توجهی پیداکرده است (شکل ۲-۱). این نوع بتن محیط کار در کارگاه را به لحاظ حذف آلودگی صوتی بهبود بخشیده و حتی امکان ایجاد کارگاه قطعات بتنی در سطح شهر را میسر می‌سازد. بتن خودتراکم عمر قالب‌های قطعات بتنی را افزایش می‌دهد. استفاده از بتن خودتراکم در ساخت قطعات بتنی رفته‌رفته رو به افزایش است (شکل ۲-۲)[۱۰].

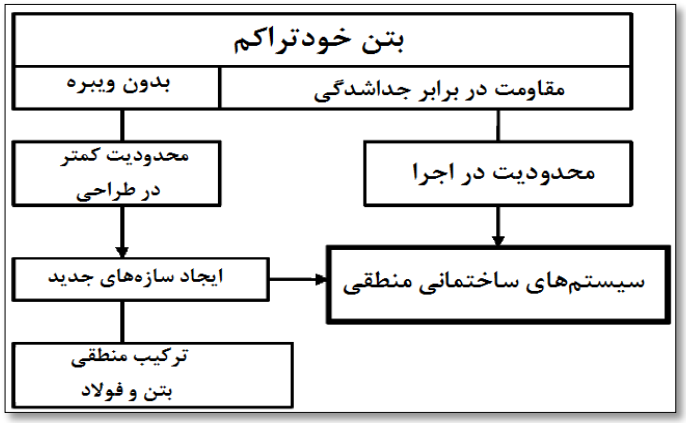


شکل ۲-۱: بتن‌ریزی با بتن خودتراکم برای سگمنت‌های تونل[۱۰]



شکل ۲-۲: افزایش کاربرد بتن خودتراکم برای قطعات بتنی در ژاپن[۱۰]

استفاده از بتن خودتراکم هزینه ویبره را ذخیره می‌کند و تراکم بتن در سازه‌ها را نیز تضمین می‌کند. البته در همه سازه‌ها به‌استثناء پروژه‌ها در مقیاس بزرگ همیشه نمی‌توان هزینه را کاهش داد. طبق آیین‌نامه، سیستم‌های ساختمانی ذاتاً با فرض تراکم لرزشی کامل و ضروری بتن طراحی می‌شوند. بتن خودتراکم، سیستم‌های ساختمانی قبلی را که بتنی با تراکم لرزشی موردقبول بود به‌طور چشمگیری بهبود بخشیده است (شکل ۲-۳)[۱۰].



شکل ۲-۳: دست یافتن به سیستم‌های ساختمانی جدید با استفاده ازSCC [۱۱]

لازم به ذکر است در بعضی سازه‌ها استفاده از بتن خودتراکم تنها گزینه می‌باشد. برای مثال سازه‌های ساندویچی که داخل پوسته‌های فولادی آن با بتن پُر می‌شود. این قبیل از سازه‌ها در کوبه ژاپن ساخته‌شده

و به این نتیجه رسیدند که بدون توسعه و استفاده از بتن خودتراکم نمی‌توان به ساخت این سازه‌ها نائل شد (شکل ۲-۴)[۱۰].

شکل ۲-۴: بتن‌ریزی با بتن خودتراکم برای سازه‌های ساندویچی تونل غوطه‌ور در Kobe ژاپن[۱۰]

در راستای پژوهش‌های انجام‌گرفته در مورد بتن خودتراکم توسط محققان، شرکت‌های عمرانی بزرگ و انجمن‌های گوناگون نیز در این زمینه دست به فعالیت زدند که از آن جمله می‌توان موارد زیر را ذکر کرد. در سال ۱۹۹۷ انجمن مهندسین عمران ژاپن[۶] و مؤسسه معماری ژاپن[۷] مجموعه پیشنهادهایی در رابطه با طرح مخلوط و روش‌های اجرای بتن خودتراکم ارائه کردند.

از دیگر موارد می‌توان به راهنمای بتن خودتراکم اشاره کرد که توسط Efnarc[۸] در سال ۲۰۰۵ ارائه شد. کمیته ACI237 نیز مجموعه‌ای منتشر کرده که در آن مطالعات محققین گوناگون در سالیان متوالی بیان‌شده است.

[6] Japan Society of Civil Engineers
[7] Architectural Institute of japan
[۸] Efnarc یك راهنمای اروپائي است که در انگلیس واقع‌شده و در سال ۱۹۸۹ پایه‌گذاری شده است. این تشکیلات زیر نظر کمیته اروپایي بتن به فعالیت مي‌پردازد و نتایج کار آن در آینده زمینه‌ساز استانداردها و آئین‌نامه‌های اروپایي مي‌گردد. درزمینهٔ بتن خودتراکم، این موسسه از کارهاي انجام‌شده در دانشگاه paisley استفاده نموده است.

۲-۲ فواید و امتیازات به‌کارگیری بتن خودتراکم

یک بتن خودتراکم دارای طرح مخلوط درست و روش جا دادن مناسب، می‌تواند برای مصرف‌کننده فواید اقتصادی و فنی به همراه داشته باشد. صرفه‌جوئی در هزینه‌ها، افزایش کارایی یا هر دو این پدیده‌ها در کنار یکدیگر، می‌توانند از نتایج به‌کارگیری بتن خودتراکم باشند. امتیازات استفاده از بتن خودتراکم به شرح زیر می‌باشد[۴]:

- کاهش در تعداد افراد نیروی کار و بهینه‌سازی مدیریت بر نیروی کار و تجهیزات.

- حذف یا نیاز کمتر به عملیات پرداخت سطح، جهت دستیابی به سطوح مسطح، به دلیل داشتن ویژگی خود تراز بودن.

- عدم نیاز به ویبراسیون جهت تراکم مناسب. این مطلب منجر به‌صرفه جویی در عملیات و خرید و نگهداری تجهیزات می‌شود.

- به وجود آوردن امکان ریختن بتنی که بتواند خواص مکانیکی مطلوب را مستقل از مهارت پرسنل ویبره به وجود آورد.

- شتاب بخشیدن به اجرا از طریق سرعت‌بالای ریختن و زمان اجرای کوتاه‌تر.

- سهولت بخشیدن و تسریع در پر کردن مقاطع دارای میلگرد با تراکم زیاد و قالب‌های پیچیده، درحالی‌که کیفیت اجرای مناسبی نیز حاصل گردد. این ویژگی می‌تواند به بازدهی بالاتر و درعین‌حال کاهش نیروی کار و هزینه منجر شود.

- دارا بودن قابلیت انعطاف‌پذیری بیشتر در پراکندگی نقاط ریختن بتن. در طول زمان ریختن این ویژگی لزوم حرکت مکرر کامیون‌ها و جابجایی بیش‌ازحد لوله‌های پمپ را در هنگام ریختن کاهش می‌دهد (چنین کاهشی می‌تواند در تعداد پمپ‌ها، متصدیان پمپ‌ها و تهیه وسایل دیگر اثر گذاشته و منجر به صرفه‌جوئی در هزینه و زمان گردد).

- حذف سروصدای ویبراتورها در محل کار. این ویژگی در مناطق شهری و برای بتن‌هایی (بتن الیافی) که نیازمند تراکم سنگین می‌باشند، مفید است.

ـ افزایش ساعات کار. در مناطق شهری به دلیل حذف سروصدای ویبراتورها، بتن‌ریزی در ساعات بیشتری از شبانه‌روز می‌تواند انجام پذیرد.

ـ کاهش حق بیمه، با حذف سروصدای ناشی از ویبره که معمولاً باعث به وجود آمدن عیوب شنیداری در کارگران می‌شود، حق بیمه پرداختی به آژانس‌های بیمه‌ای کاهش می‌یابد. کاهش در حق بیمه می‌تواند تا حدی هزینه مواد اضافی بتن خودتراکم را جبران کرده و این بتن را برای عملیات پیش‌ساختگی جذاب‌تر نماید.

- استفاده از بتن خودتراکم (به دلیل عدم نیاز به ویبراتور) به طراح این اجازه را می‌دهد که برای کنترل ترک بتواند از میلگردهایی با فواصل کم مشروط به ایجاد پیوستگی (باند) مطلوب، استفاده نماید.

- امکان استفاده از این بتن به‌عنوان بتن نما. استفاده از بتن خودتراکم دارای طرح مخلوط مناسب، قالب باکیفیت بالا، مواد رهاساز کافی و عملیات جای‌دهی مناسب، می‌تواند به‌ظاهر شدن سطح صافی منتهی شود.

(شکل ۲-۵) نشان خط ۲ قطار شهری مشهد به ابعاد ۱/۱۰× ۱/۱۰ متر باضخامت ۸ سانتی‌متر را نشان می‌دهد که باوجود پیچیدگی طرح، با بتن خودتراکم بتن‌ریزی شده است. هم‌اکنون نشان حاضر در محل ورودی کارخانه سگمنت پروژه خط ۲ قطار شهری مشهد نصب‌شده است[۱۱].

شکل ۲-۵: تصویری از نشان خط ۲ قطار شهری مشهد[۱۱]

۲-۳ آشنایی با برخی از مفاهیم مرتبط با بتن خودتراکم

همان‌طوری که پیش‌تر گفته شد بتن خودتراکم بتنی است بسیار روان و بدون جداشدگی که می‌تواند پخش‌شده، قالب را پرکرده و بدون نیاز به تراکم دینامیکی، میلگردها را در برگیرد. بنابراین با توجه به مشخصات اشاره‌شده در تعریف بتن خود تراکم، لازم است با برخی مفاهیم آشنا شد[۱۲]:

۲-۳-۱ رئولوژی[9]:

رئولوژی علمی است که در ارتباط با چگونگی حرکت و رفتار مایعات غیر نیوتنی صحبت می‌کند.

[9] Rheology

۲-۳-۲ کارایی[10]:

کارایی سهولت مخلوط، حمل، ریختن، جای‌دهی، تراکم و پرداخت بتن را توصیف می‌کند. کارایی، خواص پرکنندگی بتن تازه را شرح می‌دهد. کارایی بتن خودتراکم برحسب مشخصه‌هایی نظیر قابلیت پر کردن، قابلیت عبور و پایداری بیان می‌گردد و توسط آزمایش‌های خاصی مشخص می‌شود.

۲-۳-۳ قابلیت پر کردن[11] (قابلیت روانی محدود نشده[12]):

این ویژگی، توانائی بتن خودتراکم را در جاری شدن داخل قالب و پر کردن تمامی فضاهای موجود تحت اثر وزن خود توصیف می‌کند.

با توجه به این ویژگی از بتن خودتراکم، روش ریختن و فواصل بین نقاط ریختن بتن مشخص می‌شود.

۲-۳-۴ قابلیت عبور[13] (قابلیت روانی محدودشده[14]):

این ویژگی به سهولت عبور از میان موانع (با فواصل کم از همدیگر) داخل قالب، بدون هیچ‌گونه مسدود شدگی اشاره دارد. انسداد بتن به دلیل جداشدگی ایجادشده در سنگ‌دانه‌ها در محل مانع به وجود می‌آید که مانع از حرکت بتن می‌شود.

۲-۳-۵ پایداری:

پایداری، به توانایی بتن جهت حفظ توزیع یکنواخت مواد تشکیل‌دهنده آن در طول اختلاط، حمل، ریختن جای‌دهی و تراکم گفته می‌شود.

بتن خودتراکم بایستی دو نوع متفاوت از پایداری را با خود به همراه داشته باشد. این دو نوع عبارت‌اند از:

[10] Workability
[11] Filling ability
[12] Unconfined flow ability
[13] Passing ability
[14] Confined flow ability

الف) پایداری دینامیکی[15]: به مقاومت بتن در برابر جداشدگی در مراحل اختلاط، حمل و ریختن اشاره می‌کند.

ب) پایداری استاتیکی[16]: به مقاومت بتن در برابر آب انداختن و نشست سطحی، بعد از ریختن (در حالتی که بتن هنوز در مرحله خمیری خود قرار دارد) اشاره دارد.

در شکل ۲-۶ نمونه شماره صفر(**0**) کاملاً پایدار بوده و دانه‌های درشت در بالای نمونه مشهود است، نمونه شماره ۱ در قسمت بالای نمونه کمی آب انداختگی ملاحظه می‌شود. در نمونه‌های شماره ۲ و ۳ نیز کاملاً ته‌نشینی سنگ‌دانه‌ها در بالای نمونه در فاز خمیری بتن صورت گرفته است و طرح مخلوط ناپایداری استاتیکی دارد.

شکل ۲-۶: شاخص چشمی پایداری استاتیکی بتن سخت شده از مقطع نمونه استوانه‌ای[۱۲]

۲-۴ عوامل مؤثر بر قابلیت پُر کردن، قابلیت عبور و پایداری

میزان قابلیت پر کردن، قابلیت عبور و پایداری لازم برای بتن خودتراکم، توسط موارد استعمال این نوع خاص از بتن تحمیل می‌گردد. برای مثال می‌توان به قابلیت عبور اشاره کرد که تنها در بتن مسلح و بخش‌هایی که روانی بتن در محل محدود می‌شود، موضوعیت دارد. میزان قابلیت عبور توسط مقدار و فاصله میلگردها در سازه مربوطه و برخی موارد دیگر تحمیل می‌شود[۱۱].

[15] Dynamic stability
[16] Static stability

در جداول ۲-۱، ۲-۲ و ۲-۳ عوامل مؤثر بر قابلیت پر کردن، قابلیت عبور و پایداری، همچنین نحوه اثرگذاری آن‌ها ارائه‌شده است.

جدول ۲-۱: عوامل مؤثر بر قابلیت پر کردن بتن خودتراکم[۱۱]

عامل مؤثر	نحوه اثر عامل مربوطه
مقدار میلگردهای موجود	هرچه این مقدار بالاتر رود، از جریان یافتن بتن ممانعت بیشتری به عمل می‌آورد.
پیچیدگی شکل عضو	اشکال پیچیده، سخت‌تَر پُر می‌شوند.
ضخامت دیوار	مقاطع نازک، جلوی جریان یافتن بتن را می‌گیرند.
روش جای‌دهی	ریختن آرام و ناپیوسته، انرژی لازم برای جای‌دهی بتن را می‌کاهد.
طول عضو	فواصل بلندتر، سخت‌تر پر می‌شود.
عوامل مخلوط	روانی بالا، قابلیت پر کردن را بهبود می‌بخشد.
جریان اسلامپ (slump flow)	
میزان لزجت	مقدار لزجت بیش‌ازاندازه، قابلیت پر کردن را می‌تواند محدود نماید.

جدول۲-۲: عوامل مؤثر بر قابلیت عبور بتن خودتراکم[۱۱]

عامل مؤثر	نحوه اثر عامل مربوطه
مقدار میلگردهای موجود	میلگردهای بافاصله نزدیک به هم می‌توانند باعث پل زدن سنگ‌دانه‌ها و درنهایت انسداد بتن شوند.
ضخامت دیوار	مقاطع نازک در قالب‌ها می‌توانند باعث پل زدن سنگ‌دانه‌ها و درنهایت انسداد بتن شوند.
عوامل مخلوط	روانی بسیار کم اجازه شکل‌پذیری کافی را نمی‌دهد، درحالی‌که روانی بسیار بالا ممکن است باعث ناپایداری و جداشدگی در مخلوط شود.
جریان اسلامپ (slump flow)	

میزان لزجت	میزان لزجت مناسب باعث جلوگیری از جداشدگی می‌گردد.
اندازه درشت‌دانه	هر چه اندازه درشت‌دانه بزرگ‌تر باشد، تمایل برای ایجاد انسداد در بتن بالا می‌رود.
مقدار درشت‌دانه	هر چه مقدار درشت‌دانه بیشتر باشد، تمایل برای ایجاد انسداد در بتن بالا می‌رود.

جدول ۲-۳: عوامل مؤثر بر پایداری بتن خودتراکم[۱۱]

عامل مؤثر	**نحوه اثر عامل مربوطه**
میزان میلگردهای موجود	اگر انرژی لازم برای جای‌دهی بتن زیاد باشد جداشدگی در مصالح رخ خواهد داد.
ارتفاع عضو	ارتفاع یک عضو با پتانسیل ته‌نشینی مصالح و رو زدن آب متناسب است.
عوامل مخلوط	هرگاه باقی عوامل ثابت باشند با افزایش دادن درروانی، پایداری کاهش می‌یابد.
جریان اسلامپ (slump flow)	
میزان لزجت	با افزایش لزجت، پایداری افزایش می‌یابد.

۲-۵ آزمایش‌های رئولوژی بتن‌خودتراکم

در جدول ۲-۴، فهرست مربوط به آزمایش‌های رئولوژی بتن‌خودتراکم که در پایان‌نامه حاضر مورداستفاده قرارگرفته، جهت معرفی خواص آن آورده شده است[۳].

جدول ۲-۴: اسامی و ویژگی آزمایش‌های رئولوژی بتن خودتراکم تحقیق حاضر[۳]

نام آزمایش	خاصیت و ویژگی بتن خودتراکم
جریان اسلامپ[۱۷]	قابلیت پر کردن
حلقه J[۱۸]	قابلیت عبور
قیف V[۱۹] (مرحله اول-۱ دقیقه)	قابلیت پر کردن
قیف V (مرحله دوم- ۵ دقیقه)	پایداری دینامیکی
جعبه L[۲۰] (با میلگرد)	قابلیت عبور
جعبه U[۲۱]	قابلیت عبور

۲-۵-۱ آزمایش جریان اسلامپ (اسلامپ فلو)

در آزمایش جریان اسلامپ میزان پخش‌شدگی بتن در سطح افقی مشخص می‌شود و برای بتن‌های خودتراکم مناسب است. در ابتدا این آزمایش در ژاپن و برای ارزیابی بتن‌های ترمی[۲۲] که در بتن‌ریزی زیرآب مورداستفاده قرار می‌گیرد، بکار رفت. نحوه انجام آزمایش مانند آزمایش اسلامپ است اما بجای اندازه‌گیری افت و فرونشستن مخروط بتن، قطر متوسط بتن پهن‌شده در سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود و قابلیت پر کردن (قابلیت سیلان و جریان) را نشان می‌دهد (شکل ۲-۷).

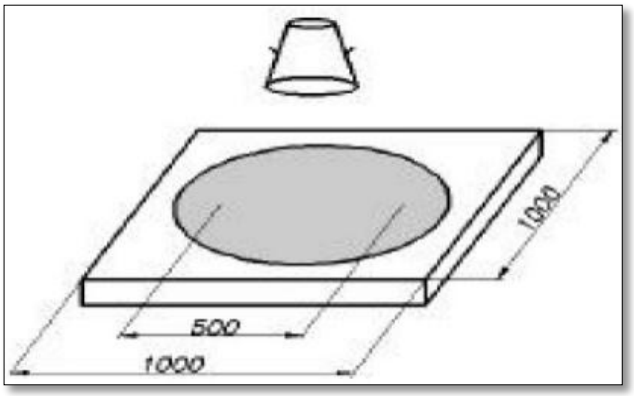
هر چه قطر پخش‌شدگی بتن در سطح افقی بزرگ‌تر باشد معرف قابلیت بیشتر پر کردن قالب و روان شدگی بتن تحت اثر وزن خود می‌باشد.

[17] Slump flow
[18] J-Ring
[19] V-funnel
[20] L-Box
[21] U-Box
[22] Tremie

این آزمایش سریع و ساده است و نیاز به یک تا دو نفر دارد و می‌تواند در کارگاه و در آزمایشگاه بکار گرفته شود. کاربرد آن در دنیا وسعت زیادی پیدا نموده است. هرچند به‌خوبی قابلیت پر کردن را نشان می‌دهد اما قابلیت عبور از بین میلگردها بدون انسداد را نمی‌تواند به نمایش گذارد[۳].

زمان پهن‌شدگی ۵۰۰ میلی‌متر (T50): قبل از انجام آزمایش روی صفحه دوایر متحدالمرکز به قطر ۲۰۰ میلی‌متر تا ۸۰۰ میلی‌متر (هر ۵۰ میلی‌متر) رسم می‌شود. به‌ویژه دایره‌ای به قطر ۵۰۰ میلی‌متر به‌صورت بارز و روشنی مشخص می‌گردد. زمان بالا کشیدن قیف اسلامپ (شروع حرکت بتن) تا رسیدن به قطر ۵۰۰ میلی‌متر با کرنومتر اندازه‌گیری می‌شود.

شاخص پایداری چشمی (VSI[۲۳]): آزمایشگر از عدد صفر (پایدارترین) تا ۳ (ناپایدارترین) به‌صورت چشمی مانند پیشنهادها تصویری در مرجع مخلوط را رتبه‌بندی می‌کند[۱۳].



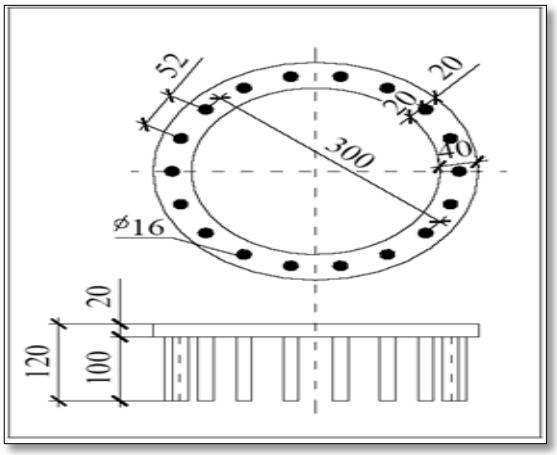
شکل ۲-۷: شکل شماتیک آزمایش جریان اسلامپ[۳]

۲-۵-۲ آزمایش حلقه J

این آزمایش نیز احتمالاً ژاپنی است اما ابداع‌کننده آن ناشناس می‌باشد. آزمایش حلقه J در دانشگاه Paisley توسعه‌یافته است. این آزمایش برای تعیین قابلیت عبور بتن بکار گرفته می‌شود. برای تکمیل

[23] Visual Stability Index

آزمایش جریان اسلامپ سعی کرده‌اند که محدودیت‌هایی را در اطراف آن با قفس میلگرد و وسایل مشابه ایجاد نمایند و قابلیت عبور را نیز بسنجند. هم‌زمان با این آزمایش می‌توان آزمایش T50 را نیز انجام داد. زمان کمتر نشانه قابلیت روانی بیشتر است. مؤسسه تحقیقاتی نروژی Brite Eu Ram مقادیر ۳ تا ۷ ثانیه را به‌عنوان حدود قابل‌قبول در کاربردهای مهندسی عمران و ۲ تا ۵ ثانیه را برای کاربردهای دیگر پیشنهاد نموده است. (شکل ۲-۸) تصویر شماتیک حلقه J و مشخصات ابعادی آن‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۸: مشخصات ابعادی و شکل شماتیک حلقه J [۳]

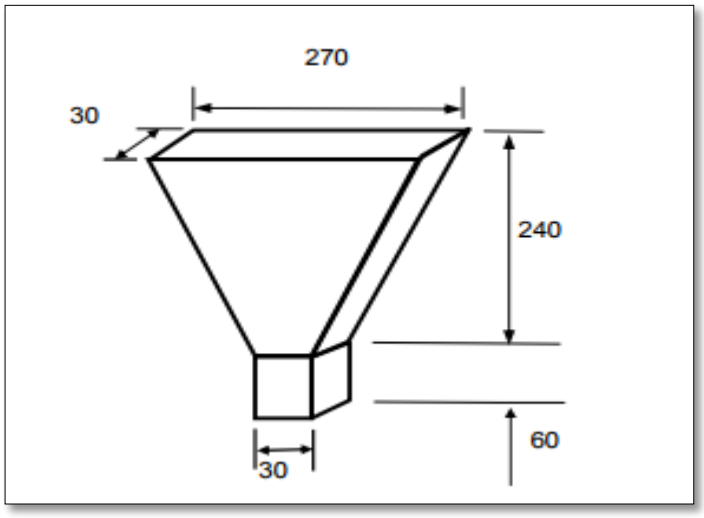
در جداشدگی شدید، بیشتر سنگ‌دانه‌های درشت در مرکز توده بتن و ملات و خمیر سیمان در پیرامون توده به چشم می‌خورد. در جداشدگی جزئی، یک ملات به عرض کم بدون درشت‌دانه در لبه اطراف توده بتن مشاهده می‌شود. اگر هیچ‌یک از این پدیده‌ها مشاهده نگردید باید با اطمینان گفت که هیچ جداشدگی وجود ندارد[۳].

۲-۵-۳ آزمایش قیف V

این آزمایش توسط Ozawa و همکاران وی در کشور ژاپن ابداع و توسعه‌یافته است. درواقع از یک قیف V- شکل برای این آزمایش استفاده می‌شود و با تعیین زمان خروج بتن پرشده در آن (پس از یک دقیقه از زمان پر شدن)، قابلیت پر کردن (روانی) به دست می‌آید (آزمایش قیف V (مرحله اول).

حجم قیف ۱۲ لیتر و این وسیله برای بتن‌هایی با حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۲۰ میلی‌متر کاربرد دارد. گاه در ژاپن و سایر کشورها از قیفی با مقطع دایره‌ای استفاده می‌شود که قیف O نام دارد.

در نوع دیگری از این آزمایش پس از پر کردن قیف با بتن اجازه داده می‌شود ۵ دقیقه بتن در حالت سکون در قیف بماند، سپس زمان خروج بتن به دست می‌آید که در این حالت زمان خروج، جداشدگی را با توجه به افزایش قابل‌ملاحظه زمان نشان می‌دهد (آزمایش قیف V (مرحله دوم).



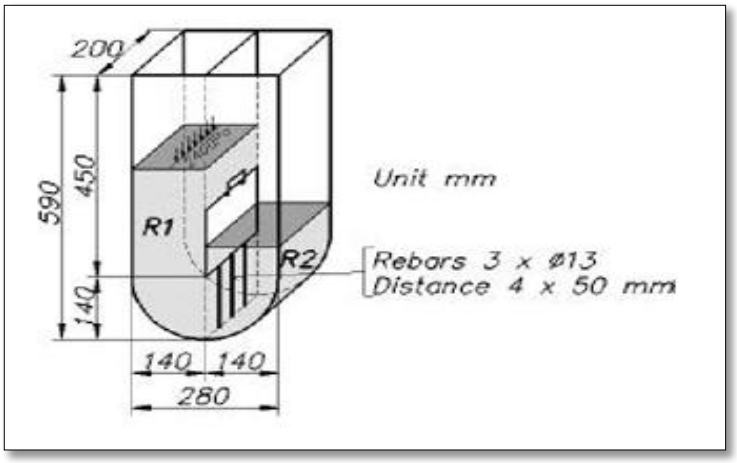
شکل ۲-۹: مشخصات ابعادی و تصویر شماتیک قیف V- شکل[۳]

نتیجه آزمایش علاوه بر قابلیت جریان، تحت تأثیر سایر خواص بتن نیز واقع می‌شود. به‌طور مثال اگر سنگ‌دانه درشت زیادی در بتن موجود باشد، موجب می‌شود که به دلیل شکل قیف به‌خوبی جریان نیابد و انسداد صورت گیرد. همچنین به دلیل لزجت زیاد خمیر و یا اصطکاک زیاد بین ذرات، بتن مانند خمیر سفت می‌شود و زمان جریان افزایش می‌یابد. وسیله آزمایش دارای شکل ساده‌ای است و اثر زاویه قیف و اثر جدار بر جریان روشن نیست؛ زمان خروج کمتر نشانه قابلیت روانی بیشتر است.

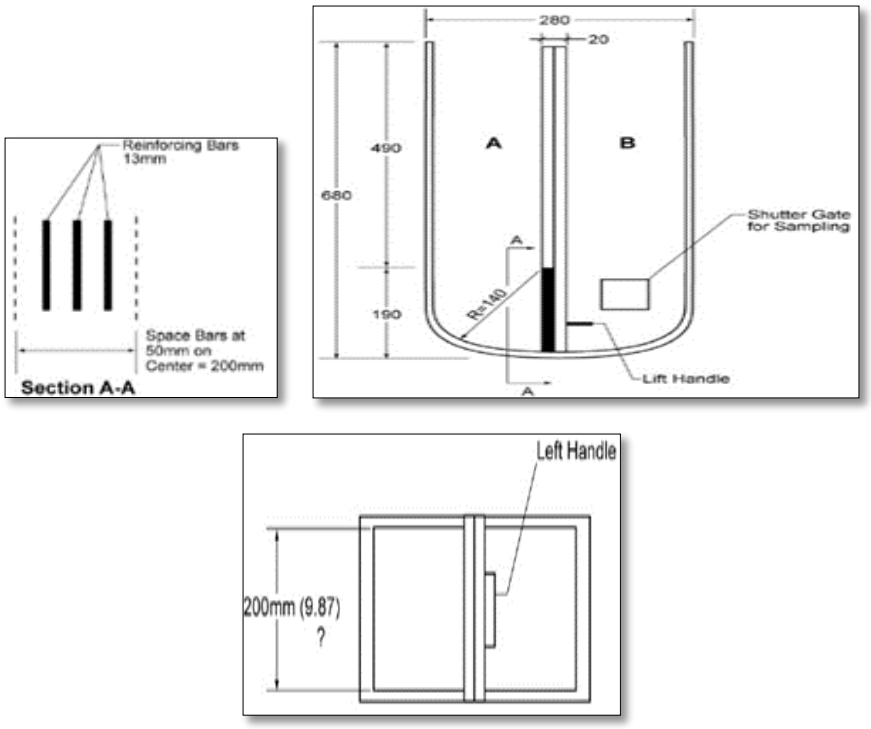
وقتی پس از ۵ دقیقه تأخیر و ماندن بتن در قیف زمان جریان اندازه‌گیری می‌شود، جداشدگی ناشی از ته‌نشینی سنگ‌دانه‌های بتن باعث افزایش زمان جریان می‌شود. افزایش بیش از ۳ ثانیه ابداً مناسب نیست و مسلماً کاهش زمان نیز وجود ندارد[۳].

۲-۵-۴ آزمایش جعبه U

این آزمایش در مرکز تحقیقات تکنولوژی شرکت Taisei ژاپن ابداع و توسعه‌یافته است. گاه این وسیله به شکل جعبه بوده و نام آن آزمایش جعبه شکل (Box- Shared Test) می‌باشد. وسیله موردنظر شامل یک ظرفی است که به کمک یک دیواره میانی به دو بخش تقسیم‌شده است. دریچه کشوئی متحرکی بین دو قسمت تعبیه‌شده است. میلگردهایی با قطر اسمی ۱۳ میلی‌متر در پشت دریچه قرار می‌گیرد که فاصله مرکز تا مرکز میلگردها ۵۰ میلی‌متر (فاصله آزاد حدود ۳۵ میلی‌متر) می‌باشد. بخش سمت چپ با حدود ۲۰ لیتر بتن پر می‌گردد و سپس دریچه بالا کشیده می‌شود (پس از مدت‌زمان۱ثانیه) و بتن به قسمت دیگر وارد می‌شود و به سمت بالا جریان می‌یابد. سپس ارتفاع بتن در این قسمت اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۲-۱۰ تصویر شماتیک دستگاه و مشخصات ابعادی آن را نشان می‌دهد. طرح دیگری از این جعبه با اصول مشابه، توسط انجمن مهندسین عمران ژاپن بکار رفته و توصیه‌شده است (شکل ۲-۱۱).



شکل ۲-۱۰: مشخصات ابعادی جعبه U [۳].



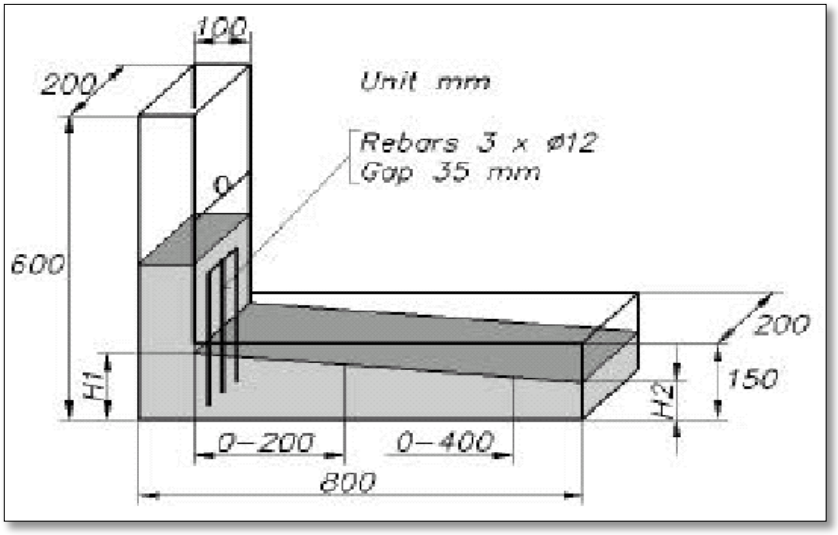
شکل ۲-۱۱: دستگاه جعبه U ژاپنی

اگر بتن مانند آب باشد H_1-H_2=0 می‌شود بنابراین اعداد نزدیک به صفر، روانی بهتری را به نمایش می‌گذارد. این آزمایش بسیار ساده است اما ساخت وسیله ممکن است کمی مشکل باشد. در این آزمایش ارزیابی خوبی از قابلیت پر کردن به دست می‌آید. درصورتی‌که از میلگرد استفاده گردد، به‌نوعی قابلیت عبور نیز نشان داده می‌شود. فاصله ۳۵ میلی‌متری بین میلگردها ممکن است کم به نظر برسد[۳].

۲-۵-۵ آزمایش جعبه L

این آزمایش بر اساس یک طرح ژاپنی برای بتن زیرآب (ترمی) بنانهاده شده است و توسط Petersson مورداستفاده قرارگرفته و تشریح شده است. این آزمایش روانی بتن را مورد ارزیابی قرار می‌دهد و همچنین تا حدی قابلیت انسداد بتن را در برابر میلگردها نشان می‌دهد. وسیله موردنظر شامل یک جعبه با مقطع مستطیل و به شکل یک L می‌باشد و دارای یک بخش افقی و یک قسمت قائم است که توسط یک دریچه متحرک از یکدیگر جداشده‌اند. در جلوی دریچه میلگردهایی به‌صورت قائم قرار دارد که پس از باز شدن

دریچه، بتن بخش قائم می‌تواند از دریچه و میلگردها عبور کرده و به بخش افقی وارد شود. بخش افقی می‌تواند در فواصل ۲۰۰ و ۴۰۰ میلی‌متری دریچه علامت‌گذاری شود و زمان‌های رسیدن بتن به این نقاط اندازه‌گیری گردد. این زمان‌ها به‌عنوان T50 و T40 شناخته می‌شود. شکل ۲-۱۲ تصویر شماتیک و مشخصات ابعادی جعبه L را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۲: تصویر شماتیک و مشخصات ابعادی جعبه L [۳].

قطر میلگردها و فاصله آن‌ها می‌تواند طبق شرایط واقعی پروژه باشد. معمولاً سه برابر حداکثر اندازه سنگ‌دانه می‌تواند فاصله مناسب تلقی شود بااین‌حال برای مشخص کردن قابلیت عبور بتن می‌توان فواصل دیگری (کمتر یا بیشتر) را مدنظر قرارداد.

اگر بتن همچون آب جریان یابد $H_2/H_1 = 1$ می‌گردد. (H_2/H_1 نسبت ارتفاع بتن در انتهای قالب به ارتفاع بتن در ابتدای بخش افقی قالب) هر چه بتن نتواند به‌خوبی جریان یابد و از میلگردها رد شود نسبت مزبور از یک فاصله می‌گیرد. Efnarc حداقل نسبت انسداد را ۰/۸ پیشنهاد داده است. این نسبت مشخصه‌ای برای سهولت جریان را نشان می‌دهد اما به‌طورکلی توافقی در مورد مقدار این نسبت وجود ندارد.

درصورتی‌که سنگ‌دانه‌های درشت انسداد آشکاری را در پشت میلگردها به وجود آورد می‌توان آن را از طریق مشاهده مشخص نمود.

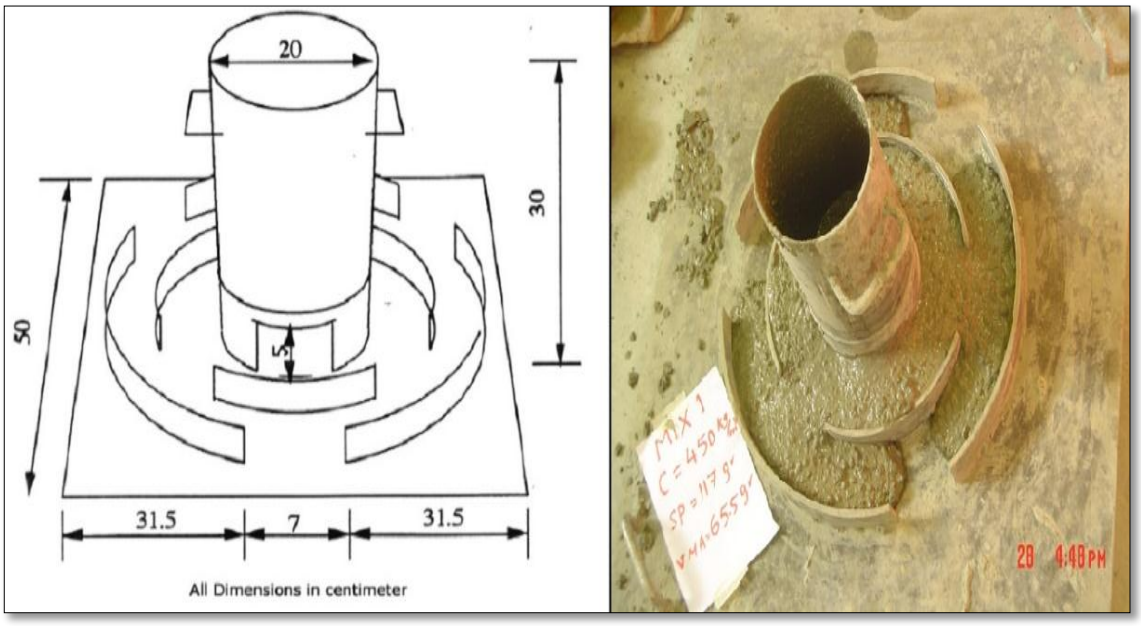
آزمایش جعبه L به‌صورت گسترده‌ای می‌تواند در آزمایشگاه مورداستفاده قرار گیرد و شاید بتوان در کارگاه نیز از آن بهره گرفت. نتیجه آزمایش قابلیت پر کردن و عبور را نشان می‌دهد و مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین فقدان پایداری (جداشدگی) را می‌توان با چشم مشاهده نمود.

متأسفانه فعلاً در مورد جنس، ابعاد و میلگردهای دستگاه توافقی وجود ندارد. بنابراین مقایسه نتایج موجود در تحقیقات، مشکل به نظر می‌رسد. روشن نیست که اثر جداره دستگاه بر روانی بتن چگونه است؛ اما قطر و فاصله میلگردها تا حدی باید مشابه وضعیت معمول در کارگاه باشد.

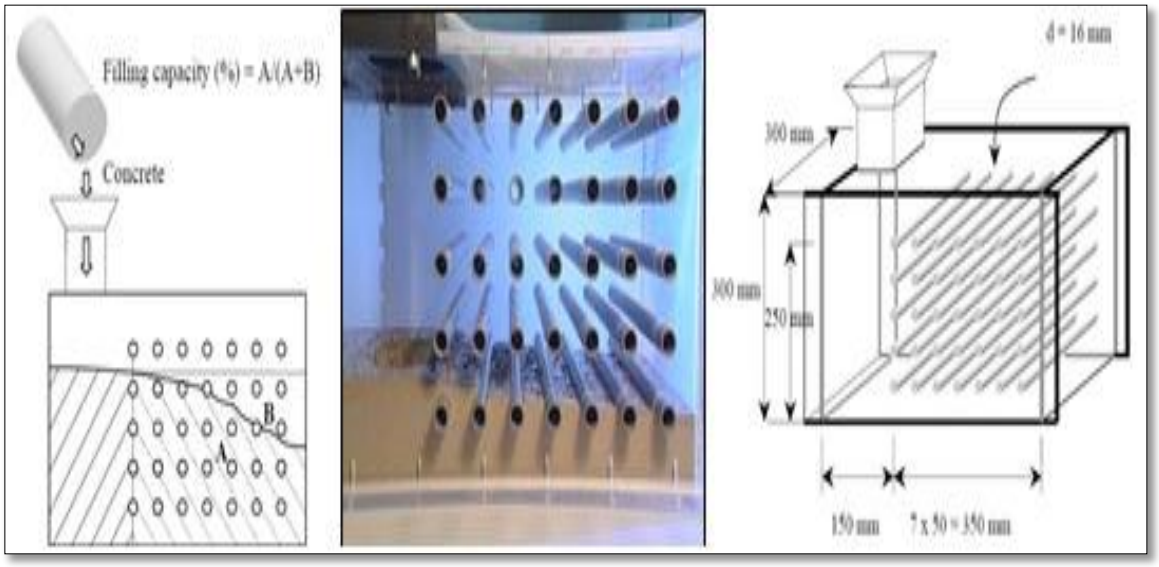
برای آزمایش دو نفر آزمایشگر (به‌ویژه برای اندازه‌گیری زمان) لازم است. خطا تا حدی در این آزمایش از جانب آزمایشگر غیرقابل‌اجتناب است[۳].

۲-۶ استانداردها و پیشنهادها

آزمایش‌های متعدد دیگری در مورد تعیین معیارهای ذکرشده در فاز خمیری بتن خودتراکم وجود دارد؛ اما آزمایش‌هایی که برای آن‌ها استاندارد تدوین‌شده است و پیشنهادهای مختلف در مقالات ارائه‌شده و بیشتر مرسوم است در بالا به آن‌ها اشاره شد. در ادامه نام و تصاویر دیگر آزمایش‌های بتن خودتراکم نشان داده می‌شود و توضیحات بیشتر، از بحث این پایان‌نامه خارج است (شکل‌های ۲-۱۳ الی ۲-۱۶). همچنین آیین‌نامه‌ها و پیشنهادهای متعددی برای آزمایش‌های فوق ارائه‌شده است که بخشی از آن در جدول ۲-۵ لیست شده است[۱۱].

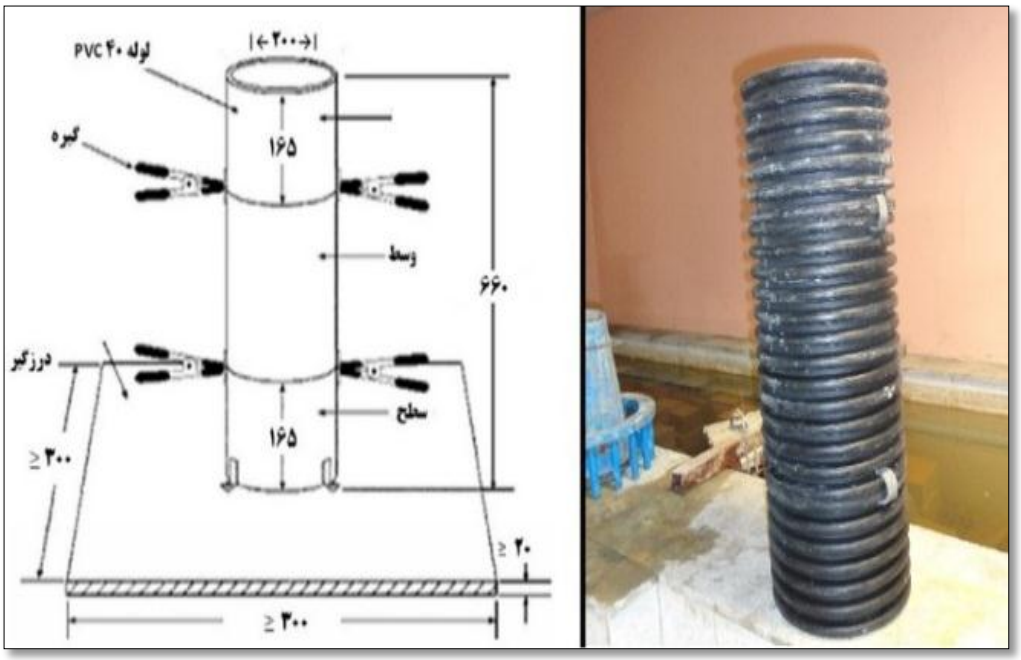


شکل ۲-۱۳: آزمایش اصلاح‌شده جریان لرزان M.VF[۲۴][۱۱]



شکل ۲-۱۴: آزمایش جعبه پُر کردن (Filling Vessel Test)[۱۱]

[24] Modified vibrating flow test



شکل ۲-۱۵: آزمایش جداشدگی استاتیکی پایداری ستون[۱۱]

شکل ۲-۱۶: آزمایشOrimet[۱۱]

جدول ۲-۵: برخی شماره استانداردها و پیشنهادهای آزمایش‌های فاز خمیری بتن خودتراکم[۱۱]

آزمایش	فهرست برخی استانداردها و شماره استانداردها			پیشنهادها		
	ISIRI[۲۵]	EN	ASTM	E[۲۶]	I[۲۷]	J[۲۸]
جریان اسلامپ	۱۱۲۷۰	۱۲۳۵۰-۸	C1611	✓	✓	✓
حلقه J	۱۱۲۷۱	۱۲۳۵۰-۱۲	C1621	✓	✓	-
قیف **V**	۳۲۰۳-۹	۱۲۳۵۰-۹	-	✓	✓	✓
جعبهL	۳۲۰۳-۱۰	۱۲۳۵۰-۱۰	-	✓	✓	✓
جعبه U	-	-	-	✓	✓	✓
جداشدگی الک	۳۲۰۳-۱۱	۱۲۳۵۰-۱۱	-	✓	✓	-
پایداری ستون	۱۲۲۵۵	-	C1610	-	-	-
عمق نفوذ	-	-	C1712	-	-	-
Orimet	-	-	-	✓	✓	-
جعبه پُر کردن	-	-	-	✓	✓	-
M.VF	-	-	-	-	-	✓

علامت ✓ به معنی ذکر آزمایش در منابع و علامت (-) یعنی در این منبع چیزی ذکر نشده است.

[25] سازمان ملی استاندارد ایران
[26] Efnarc
[27] Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete
[28] JSCE: Japan Society of Civil Engineers

۲-۷ انتخاب اهداف کارایی مناسب برای بتن خودتراکم

دستیابی به بتن خودتراکم جهت کاربردهای گوناگون، با ساخت مخلوط‌های آزمایشی آغاز می‌گردد به‌منظور رسیدن به چنین بتنی بایستی از آزمایش‌هایی که پارامترهای مختلف قابلیت پر کردن، قابلیت عبور و پایداری را موردبررسی قرار می‌دهند، استفاده نمود.

جدول ۲-۶: انتخاب اهداف کارایی مناسب برای بتن خود تراکم[۱۱]

		خواص روانی								
		جریان اسلامپ (سانتی‌متر)			جعبه U			T50(ثانیه)		
		۵۵>	۶۵-۵۵	۶۵<	درج ۱	درج ۲	درج ۳	۲>	۴-۲	۴<
میزان میلگرد	کم									
	متوسط	■						■		
	زیاد	■				■	■	■		
پیچیدگی شکل عضو	کم									
	متوسط	■								■
	زیاد	■	■							■
عمق عضو	کم									
	متوسط									
	زیاد							■		
طول عضو	کم									
	متوسط	■								
	زیاد	■	■					■		
مقدار مصالح سنگی درشت-دانه	کم									
	متوسط				■					
	زیاد				■	■				
ضخامت دیوار	کم	■	■							
	متوسط	■								
	زیاد									
اهمیت پرداخت سطح	کم									
	متوسط	■								
	زیاد	■								

در این جدول ویژگی‌های عضو بر اساس نوع کاربرد به سه دسته کم، متوسط و زیاد طبقه‌بندی می‌شود. سطوح تیره، سطوحی‌اند که دارای مشکلات پتانسیلی بوده و باید از آن‌ها دوری کرد. اهداف اولیه بایستی از سطوح سفید انتخاب شوند[۱۴].

۲-۸ معیارهای قبول بتن خودتراکم ازنظر کارایی

در جدول ۲-۷، ملاک‌ها و معیارهای قبول بتن خودتراکم (ازنظر کارایی)، برای حداکثر اندازه سنگ‌دانه کمتر از ۲۰ میلی‌متر آورده شده است. همچنین مجموعه عللی که باعث پدید آمدن جواب‌های ناصحیح برای آزمایش‌های کارایی می‌شوند، بیان‌شده است[۳].

جدول ۲-۷: معیارهای قبول بتن خودتراکم ازنظر کارایی و عوامل پدیدآورنده اختلال در نتایج[۳]

نام آزمایش	محدوده مقادیر قابل‌قبول		واحد	علت احتمالی نتیجه کمتر از محدوده	علت احتمالی نتیجه بیشتر از محدوده
	حداقل	حداکثر			
جریان اسلامپ	۶۵	۸۰	سانتی‌متر	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار پایین	لزجت بسیار پایین جداشدگی
T50 (اسلامپ)	۲	۵	ثانیه	لزجت بسیار پایین	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار بالا
حلقه J	۰	۱۰	سانتی‌متر	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار بالا جداشدگی انسداد	لزجت بسیار پایین جداشدگی
قیفV (مرحله اول)	۶	۱۲	ثانیه	لزجت بسیار پایین	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار بالا انسداد
قیفV (مرحله دوم)	۰	۳+	ثانیه	نتیجه مشکوک	جداشدگی انسداد افت سریع در کارایی

ادامه جدول ۲-۷ : معیارهای قبول بتن خودتراکم ازنظر کارایی و عوامل پدیدآورنده اختلال در نتایج[۳]

جعبه L	۰/۸	۱	$\frac{h_2}{h_1}$ +	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار بالا انسداد	جواب غلط
جعبه U	۰	۳۰	میلی‌متر (اختلاف ارتفاع بتن بین دو قسمت جعبه U)	جواب غلط	لزجت بسیار بالا حد تسلیم بسیار بالا انسداد

+ نسبت ارتفاع بتن در انتهای قالب به ارتفاع بتن در ابتدای بخش افقی قالب

جدول ۲-۸: رابطه بین برخی از عملیات اصلاحی و عیوب ایجادشده بر روی بتن[۳]

	عملیات ممکن	اثرگذار است بر میزان					
		قابلیت پر کردن	قابلیت عبور	مقاومت در برابر جداشدگی	مقاومت	جمع شدگی	خزش
۱	لزجت بسیار بالا						
	افزایش مقدار آب	+	+	−	−	−	−
	افزایش حجم خمیر	+	+	+	+	−	−
	افزایش فوق روان کننده	+	+	−	+	O	O
۲	لزجت بسیار پایین						
	کاهش مقدار آب	−	−	+	+	+	+
	کاهش حجم خمیر	−	−	−	−	+	+
	کاهش فوق روان کننده	−	−	+	−	O	O
	افزایش مواد اصلاح‌کننده لزجت	−	−	+	O	O	O
	استفاده از پودر ریزتر	+	+	+	O	−	−

ادامه جدول ۲-۸: رابطه بین برخی از عملیات اصلاحی و عیوب ایجاد شده بر روی بتن

	استفاده از ماسه ریزتر	+	+	+	O	−	O
۳	حد تسلیم بسیار بالا						
	افزایش فوق روان کننده	+	+	−	+	O	O
	افزایش حجم خمیر	+	+	+	+	−	−
	افزایش حجم ملات	+	+	+	+	−	−
۴	جداشدگی						
	افزایش حجم خمیر	+	+	+	+	−	−
	افزایش حجم ملات	+	+	+	+	−	−
	کاهش مقدار آب	−	−	+	+	+	+
	استفاده از پودر ریزتر	+	+	+	O	−	−
۵	افت سریع کارایی						
	استفاده از سیمان کند گیر	O	O	−	−	O	O
	افزایش کاهنده آب	O	O	−	−	O	O

+: معمولا نتیجه بهتری را برای بتن می‌دهد، -: معمولا نتیجه معکوس می‌دهد، **0**: نتیجه قابل ذکری ندارد.

۲-۹ مروری بر تحقیق‌های انجام‌شده

۲-۹-۱ پوزولان‌ها و عملکرد آن‌ها در خمیرهای سیمانی

بر اساس استاندارد ملی ایران (شماره ۳۴۳۳) و استاندارد آمریکایی آزمایش و مواد[۲۹]، (ASTM C618-99) پوزولان‌ها[۳۰] موادی سیلیسی یا سیلیسی آلومینانی هستند که دارای مقدار نسبتاً زیادی (۵۰ تا بیش از ۹۰ درصد در پوزولان‌های مختلف) سیلیس می‌باشند و به‌خودی‌خود خاصیت چسبانندگی کمی داشته و یا ندارند، ولی در مجاورت رطوبت و در دمای معمولی با هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)2$ واکنش داده و ترکیباتی با خواص سیمانی (عمدتاً ژل سیلیکاتی) به وجود می‌آورند. این مواد علاوه بر بهبود بخشیدن به خواص معینی از بتن معمولاً هزینه کل تولید بتن را نیز کاهش می‌دهند[۱۵].

[29] American Society for Testing and Materials (ASTM)
[30] Pozzolan

البته وجود سیلیس را نمی‌توان به‌تنهایی علت واکنش شیمیایی دانست؛ زیرا کوارتز که دارای ۹۵ درصد دی‌اکسید سیلیسیم SiO_2 است، با آهک در شرایط معمولی ترکیب نمی‌شود. علت آن است که در کوارتز و سنگ‌های مشابه آن سیلیس به‌صورت کریستال است و فقط در دمای بالا (مانند شرایط اتوکلاو[۳۱]) امکان برهم‌خوردگی نظم کریستالی آن و ترکیب با آهک وجود دارد. سیلیس موجود در پوزولان‌ها به‌صورت بی‌شکل است و به همین دلیل دارای میل ترکیبی با اسیدها و بازها می‌باشد[۱۵].

بسیاری از خواص خمیرهای سیمانی براثر استفاده از پوزولان‌ها تغییر می‌یابد. رفتار بهبودیافته بتن تازه، مقاومت و نفوذپذیری بتن سخت شده، مقاومت در مقابل بروز ترک‌های حرارتی، واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها و مقاومت در برابر خرابی‌های سولفاتی و کلروری از خواص بسیار مهمی هستند که براثر فعل‌وانفعالات شیمیایی پوزولان‌ها باسیمان به دست می‌آیند[۱۵].

۲-۹-۲ جنبه‌های دوام پوزولان‌ها

کاربرد بتن به عنوان یک مصالح مهم در صنعت ساخت در مناطق مهاجم یا مناطقی که احتمالا مواد و گازهای مختلف احتمال تهاجم به بتن را دارند رو به فزونی است. سازه های بتنی در مجاورت دریا عمدتا در تهاجم آب دریا قرار دارد. در سال های اخیر تقاضا برای ساخت سازه های بتنی در مناطق حاره‌ای و گرم و مرطوب جهان به منظور استفاده انسان‌ها، قراردادن ماشین آلات و مخازن نگهداری گاز و نفت افزایش چشمگیری داشته است. سازه های بتنی در ساخت راکتورهای اتمی و مخازن تحت‌فشار و دماهای بالا و در شرایط اضطراری کاربرد وسیعی یافته است. امروزه بتن‌های زیادی در تماس با سولفات‌ها و آب‌های اسیدی ریخته می‌شوند. در کلیه این موارد کاربرد پوزولان‌های طبیعی می‌تواند دوام بالا و عمر مفید طولانی‌تری را به ارمغان آورد[۷].

[31] Autoclave

تأثیر انواع مواد سیمانی بر روند توسعه حرارت و مقاومت بتن، دلیل اولیه برای مصرف این مواد در بتن بود، اما دلیل مهم‌تری که برای کاربرد این مواد می‌توان برشمرد، تأثیر آن‌ها بر مقاومت بتن در برابر حمله شیمیایی است که تأثیر اخیر نه‌تنها ناشی از ماهیت شیمیایی خمیر سیمان هیدراته شده، بلکه به دلیل ریزساختار آن نیز، می‌باشد. این نکته که مواد سیمانی تأثیر عمده‌ای بر کلیه جنبه‌های دوام[۳۲] (که با جابه جایی عوامل مهاجم از میان بتن، مرتبط هستند) دارند،اغراق‌آمیز نمی‌باشد. دلیل این امر آن است که مواد سیمانی مذکور، ریزساختار تر از سیمان پرتلند[۳۳] بوده و بنابراین در تراکم ذرات اثر بیشتری خواهند داشت. لذا به‌شرط آنکه عمل‌آوری مرطوب به‌اندازه کافی اعمال شود، وجود آن‌ها نفوذپذیری را کاهش می‌دهد.

دوام بتن معمولا با افزودن دوده سیلیس بهبود می‌یابد. دوده سیلیس می تواند خواص شیمیایی و فیزیکی بتن را بهبود بخشد. کاهش هیدروکسیدهای سدیم، پتاسیم و کلسیم در بتن‌های حاوی دوده سیلیس مشاهده می‌گردد. یک ساختار حفره‌ای کوچک‌سازی شده در بتن سخت شده نیز ناشی از اثر فیزیکی دوده سیلیس در صورت اضافه شدن به مخلوط بتن می‌باشد[۷].

۲-۹-۳ دلایل استفاده از پوزولان در بتن خودتراکم:

هیدروکسید کلسیم $Ca(OH)2$ بخش ضعیف بتن است و قابلیت حل شدن در آب رادارا است. لذا باعث نفوذپذیری بتن می‌شود و مشکلات خوردگی را به وجود می‌آورد. اگر به طریقی بتوانیم هیدروکسید کلسیم را به سیلیکات کلسیم $2CaOSiO2$ هیدراته شده تبدیل کنیم، توانسته‌ایم ریزساختار بتن را ریزتر و نفوذپذیری را کاهش داده و در برابر عوامل مهاجم مقاومت بتن را بهبود بخشیم. بر این اساس کاربرد مواد جایگزین سیمان الزامی گشته است[۱۱].

جایگزین‌های سیمان به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:

[32] durability
[33] Portland cement

۱) مواد پوزولانی مانند تراس (پوزولان طبیعی) یا دوده سیلیسی (پوزولان مصنوعی)

۲) مواد سیمانی مانند روباره

پوزولان‌ها مواد سیلیسی یا سیلیسی آلومینی هستند که در حالت معمولی با آب واکنشی ندارند، لیکن در مجاورت آهک و یا باسیمان پرتلند ایجاد واکنش شیمیایی می‌کنند و ژل سیلیکات کلسیم تولید می‌کنند.

$$SiO2+Ca(OH)2 \rightarrow SiO3\ Ca+H2$$

افزودن پوزولان به بتن باعث تبدیل منافذ بزرگ به کوچک‌شده و درنتیجه از نفوذپذیری بتن کاسته می‌شود. علت این فرآیند تبدیل هیدروکسید کلسیم با منافذ بزرگ به منافذ کوچک‌تر است که درنتیجه ملات و بتن ساخته‌شده با این مواد به‌تدریج افزایش مقاومت پیداکرده و باکم شدن فضاهای داخلی و افزایش چگالی و کاهش نفوذپذیری ملات وبتن، دوام آن‌ها در محیط‌های مختلف افزایش می‌یابد[۱۱].

گرمای پایین هیدراته شدن، نفوذپذیری کمتر، مقاومت زیاد در حمله سولفاتی و واکنش قلیایی سنگ‌دانه‌ها و چسبندگی بهتر از مزایای کاربرد ملات های حاوی پوزولان‌های طبیعی می‌باشند[۷].

در این عمل علاوه بر پر کردن فضاهای خالی و کاستن تخلخل و نفوذپذیری بتن، عامل مخرب در ترکیبات سیمان یعنی هیدروکسید کلسیم که اغلب واکنش‌های شیمیایی خراب کننده بتن ناشی از آن است کاهش‌یافته یا کاملاً ترکیب می‌شود. پوزولان به‌صورت طبیعی سال‌هاست که در بتن مصرف و در موارد زیادی سبب بهبودی کیفیت بتن و افزایش دوام آن شده است[۱۱].

۲-۹-۴ مزایای استفاده از پوزولان:

از مزایای استفاده از پوزولان طبیعی، ارزانی مواد وعدم نیاز به سوخت و تولید $CO2$ است. لذا همین مواد آسیاب شده تا مرز حداکثر ۸۰ ٪در بتن مورداستفاده قرار می‌گیرد. یعنی حدود ۲۰٪ تولید کلینکر خواهیم داشت؛ درنتیجه قدم‌های مثبتی در جهت توسعه پایدار و حفظ محیط‌زیست برداشته‌ایم .این مواد، با تولید

کم سیمان، حرارت را در بتن‌های حجیم در مناطق گرم پایین می‌آورند و باعث جلوگیری از ایجاد ترک‌ها می‌شوند[۱۱].

تولید این مواد چسباننده به‌مرورزمان، فضاهای خالی را پر می‌کنند زیرا حجم آن از مواد اولیه بیشتراست. پر کردن فضاهای خالی موجب افزایش مقاومت، افزایش مدول ارتجاعی و بهبود سایر خواص مکانیکی خمیر سیمان می‌شود .همچنین کاهش فضای خالی موجب افزایش نفوذناپذیری خمیر می‌شود. لذا جذب آب خمیر سیمان کم شده و مسلماً دوام آن در برابر حملات شیمیایی به دلیل نفوذ آب کمتر، افزایش می‌یابد؛ همچنین کاهش جذب آب موجب می‌شود دوام خمیر سیمان در برابر سیکل‌های یخ زدن و آب شدن بهبود یابد. بسیاری از عوامل مضر شیمیایی مانند سولفات‌ها و یون کلر از طریق فضای خالی موجود و حفرات ریز به داخل بتن راه می‌یابند و لذا کاهش این تخلخل‌ها می‌تواند به دوام بیشتر کمک نماید. امروزه محققان معتقدند ضعف موجود دروجه‌مشترک سنگ‌دانه‌ها و خمیر سیمان به خاطر غلظت و تمرکز $Ca(OH)_2$ در اطراف سنگ‌دانه‌ها است که موجب اتصال سست و نفوذپذیری بیشتر در این ناحیه (ناحیه انتقالی) می‌باشد و عامل $Ca(OH)_2$ توسط پوزولان جایگزین شده واین نقیصه را برطرف می‌کند و ناحیه وجه مشترک (انتقالی) بهبود می‌یابد و باعث افزایش مقاومت فشاری، کششی، خمشی و افزایش مدول ارتجاعی می‌گردد[۱۱].

۲-۹-۵ تاثیر پوزولان‌های طبیعی بر خواص بتن تازه

بیشتر پوزولان‌ها وقتی به مقدار مناسب به‌عنوان جایگزین سیمان بکار روند، خصوصیات آب انداختن و جدایی سنگ‌دانه‌ها را در بتن کمتر می‌کند؛ میزان این بهبود نه‌تنها به نرمی و داشتن ذرات پوزولانها بستگی دارد، بلکه به ترکیب معدنی آن‌ها نیز مربوط است. در سنین اولیه مقاومت فشاری بتن‌های حاوی پوزولان، احتمالاً به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای نسبت به بتن‌های معمولی پایین‌تر است، اگرچه مقاومت نهایی بتن حاوی پوزولان دانه‌ریز و فعال باشد که این خود درنتیجه اختلاف میزان آب موردنیاز طرح مخلوط است؛ زیرا

هرچه پوزولان ریزتر باشد مقدار آب بیشتری را جهت رسیدن به روانی مطلوب نیاز دارد، اما در صورت ثابت نگه‌داشتن آب مصرفی مسلماً پوزولان ریزتر مقاومت بهتری را نشان خواهد داد. در سنین اولیه، بتن‌های ساخته‌شده باسیمان های پوزولانی مقاومت فشاری محدودتری را نسبت به بتن‌های ساخته‌شده باسیمان پرتلند نشان می‌دهند، اما با کاهش مناسب آب و به‌کارگیری مواد افزودنی (فوق روان کننده) و مقادیر مناسب پوزولان می‌توان در هر سنی به مقاومت‌های بیشتر از بتن بدون پوزولان و مواد افزودنی دست‌یافت. به‌عنوان یک اصل، پوزولان‌ها به مقاومت مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان کمتر، کمک بیشتری نسبت به مخلوط‌های با نسبت آب به سیمان بیشتر می‌نمایند که در تحقیقات نیز اثبات گردیده است[۱۶].

اکثر پوزولان‌های طبیعی چسبندگی مخلوط را با تولید خمیر پلاستیک بهبود می‌بخشند که به تحکیم و جریان پذیری آن کمک می‌کنند. جداشدگی سنگ‌دانه بتن‌های سیمان پوزولانی همچنین با بهبود چسبندگی آن بهبود می‌یابد[۷].

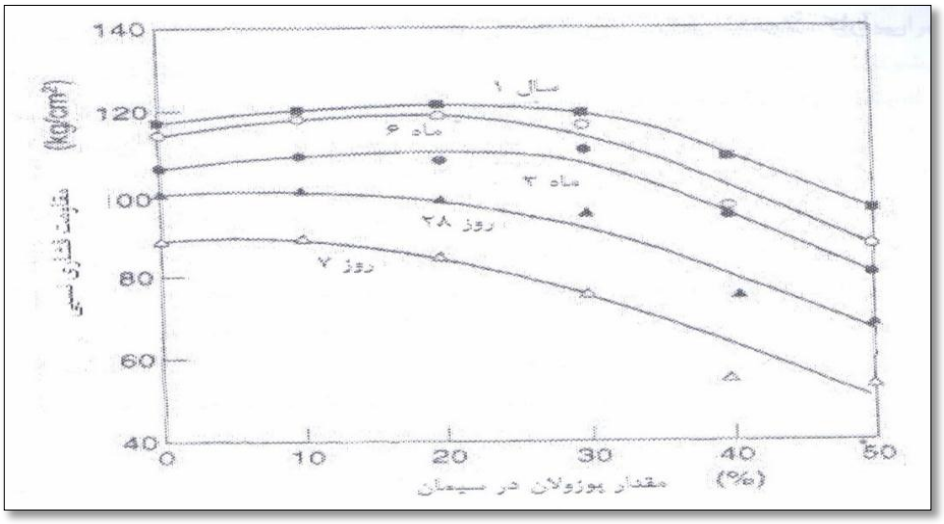
۲-۹-۶ تاثیر پوزولان‌های طبیعی بر خواص بتن سخت شده

مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی پوزولان طبیعی به‌خصوص در سنین بالا تفاوت چندانی با نمونه شاهد ندارد. این مسئله را می‌توان به تولید ژل‌های سیلیکاتی ناشی از واکنش‌های پوزولانی و بهبود ساختار حفرات نسبت داد همچنین مصرف پوزولان‌های طبیعی در بتن به‌عنوان ماده جایگزین سیمان موجب بهبود پارامترهای دوام شده است[۱۷].

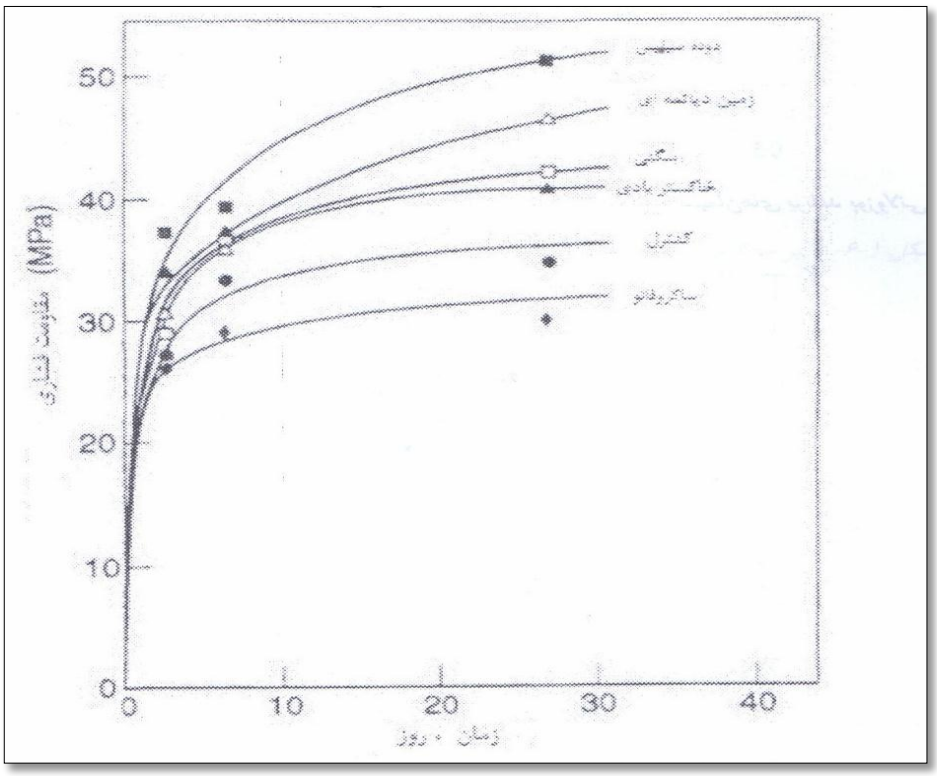
جایگزینی جزئی پوزولان باسیمان در ابتدا نرخ افزایش مقاومت سیمان را کاهش می‌دهد اما در مراحل بعدی مقاومت سیمان‌های پرتلند پوزولانی مشابه و در برخی از مواقع بیشتر از سیمان‌های پرتلند می باشد. شکل ۲-۱۷ نشان دهنده تاثیر پوزولان طبیعی بر مقاومت تا یک سال می باشد[۷].

افزایش مقاومت پوزولان‌های طبیعی در مقایسه با سایر پوزولان‌های مصنوعی در شکل ۲-۱۸ نشان داده‌شده است. کاملا واضح است که دوده سیلیس می تواند مقاومت بتن‌ها را به دلیل فعالیت بالای سیلیس و ریزی

بیشتر افزایش دهد. مقاومت کمتر به مخلوط پوزولان طبیعی با ذرات بزرگتر و فعالیت پوزولانی پایین‌تر متعلق باشد[۷].



شکل ۲-۱۷: تاثیر جایگزینی سیمان پرتلند با پوزولان طبیعی (برحسب سن ۲۸ روزه) [۷] .



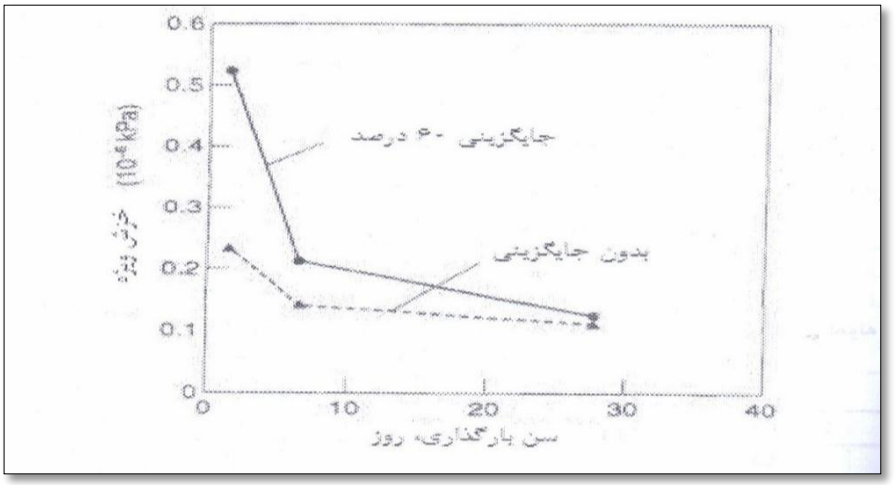
شکل ۲-۱۸: افزایش مقاومت پوزولان‌های مختلف باگذشت زمان[۷]

۲-۹-۷ مدول ارتجاعی بتن‌های حاوی پوزولان

مدول ارتجاعی بتن تابع مقاومت فشاری آن می‌باشد. همانند مقاومت فشاری در بتن‌ها، مدول ارتجاعی بتن‌های دارای پوزولان در سنین اولیه از بتن‌های بدون آن کمتر می باشد؛ اما نتایج تحقیقات نشان می دهد که در دراز مدت بتن‌های دارای پوزولان‌های طبیعی خیلی فعال، دارای مدول ارتجاعی برابر یا کمی بیشتر از بتن‌های معمولی می‌باشند[۷].

۲-۹-۸ خزش بتن‌های حاوی پوزولان

تغییر حجم بتن تحت بار ثابت که به عنوان خزش شناخته می‌شود به بسیاری از عوامل شامل مقاومت و میزان و زمان بارگذاری مربوط می‌شود. مقاومت بتن‌های حاوی پوزولان‌های طبیعی معمولا از بتن شاهد کمتر بوده و بنابراین خزش ویژه زیادتر برای چنین بتن‌هایی در مراحل اولیه پیش‌بینی‌شده است. این امر به‌خوبی در شکل ۲-۱۹ مشاهده می‌شود که در آن جایگزینی مقدار زیادی از پوزولان‌های طبیعی باسیمان انجام‌شده و بتن در مراحل اولیه تحت بارگذاری قرارگرفته است. قابل ذکر است که بعد از دوره مناسب عمل‌آوری بتن، هر دو بتن با بارگذاری بعد از ۲۸ روز، خزش ویژه مشابه از خود نشان داده اند. این مسئله به حصول مقاومت سیمان پوزولانی در مدت طولانی مربوط می‌شود[۷].



شکل ۲-۱۹: تاثیر زمان بارگذاری و جایگزینی پوزولان‌ها با سیمان پرتلند برخزش[۷]

۲-۹-۹ میکرو سیلیس

دوده سیلیس یا میکروسیلیس عبارت است از سیلیس غیربلوری که در کوره های قوس الکتریکی به عنوان محصول جانبی تولید عنصر سیلیسیم، یا آلیاژهای حاوی سیلیسیم تولید می شود. ذرات دوده سیلیس بسیار کوچک بوده و بیش از ۹۵٪ ذرات آن از یک میکرون کوچک‌تر است. ازآنجاکه ذرات دوده سیلیس بسیار کوچک هستند، مساحت سطح مخصوص بسیار بزرگ می‌باشد. مساحت سطح مخصوص ذرات دوده سیلیس بین ۱۵۰۰۰ و $۳۰۰۰۰ m^2/kg$ متغیر می‌باشد. مساحت سطح بالای ذرات دوده سیلیس عامل مهمی است که بر واکنش‌پذیری ذرات اثر می‌گذارد. دوده سیلیس دارای چگالی مخصوص حدود $۲/۲۰ t/m^3$ است که کمتر از سیمان پرتلند می‌باشد؛ بنابراین افزودن دوده سیلیس به یک مخلوط بتن چگالی آن را کاهش می‌دهد[۷].

دوده سیلیس شامل فاز سیلیسی واکنش‌پذیر بسیار فعال بوده، از نظر مقدار سیلیس غیر بلوری بسیار غنی بوده و همچنین شامل ذرات بسیار ریز می باشد. بنابراین در مقایسه با دیگر پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی، دوده سیلیس فعال ترین پوزولان محسوب می‌گردد[۷].

میکرو سیلیس همانند سایر پوزولانها باعث ریزتر شدن منافذ در بتن می‌شود، با این تفاوت که فعالیت پوزولانی دوده سیلیس از تمامی پوزولانها بیشتر است. ذرات بسیار ریز و فعالیت پوزولانی دوده سیلیس و حذف پدیده آب افتادگی سبب پیوستگی بهتر در ناحیه انتقال خمیر سیمان و سنگ‌دانه می‌شود[۱۸].

وانگکئو و همکاران در بررسی خود روی مقاومت فشاری و نفوذ یون کلر در بتن حاوی میکروسیلیسی گزارش دادند که افزودن این مواد پوزولانی موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش نفوذ یون‌کلر می‌شود [۱۹].

در تحقیقات انجام‌شده بهترین میزان جایگزینی میکروسیلیس با سیمان، ۱۰ درصد بیان‌شده است[۲۰].

۲-۹-۱۰ اثر دوده سیلیس بر خواص بتن تازه

افزودن ذرات بسیار ریز دوده سیلیس به مخلوط‌های بتن، چسبندگی مخلوط را افزایش داده و کمی آن را سفت می‌کند. در نتیجه اسلامپ مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس کمتر می باشد. به منظور حفظ کارایی، توصیه می‌شود که افزودنی‌های کاهنده آب در مخلوط‌های بتن حاوی دوده سیلیس استفاده شود[۷].

هنگامی که اثری مانند لرزش به بتن تازه اعمال می‌گردد، ذرات کروی شکل دوده سیلیس به عنوان لغزاننده عمل نموده و قابلیت حرکتی بیشتری را به بتن با دوده سیلیس نسبت به بتن معمولی در اسلامپ مشابه می‌دهد[۷].

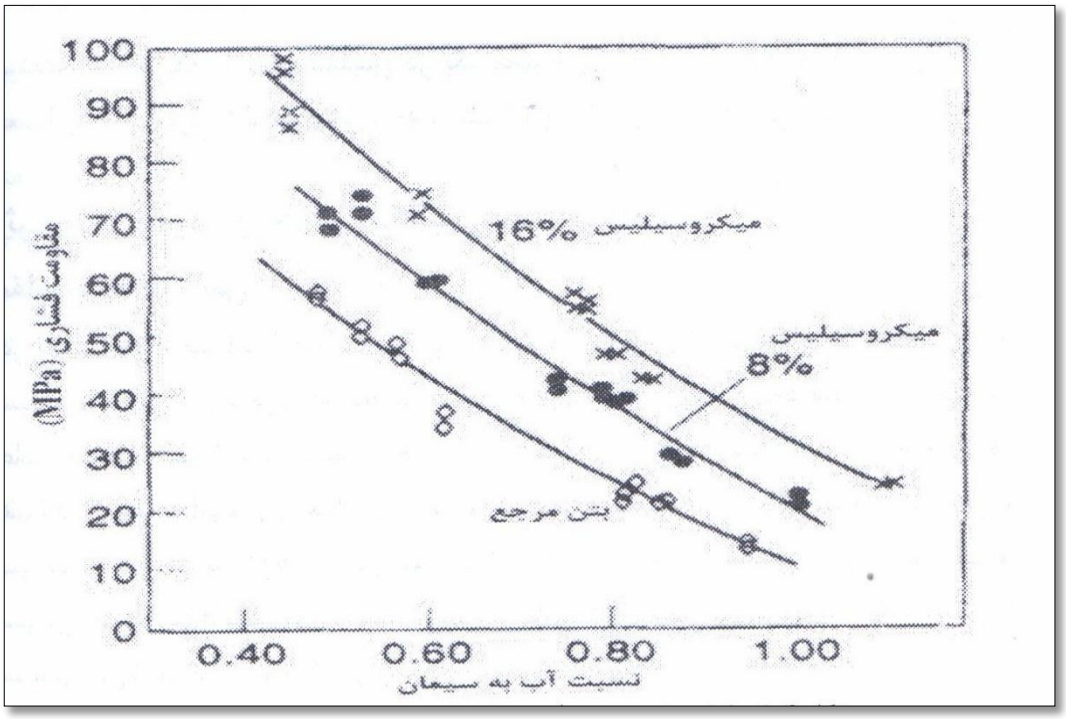
افزودن دوده سیلیس به بتن تازه دارای یک اثر تثبیت‌کنندگی بر رئولوژی آن می‌باشد. این موضوع به ذرات بسیار ریز دوده سیلیس مربوط می‌گردد که چسبندگی را افزایش داده و تمایل به جداشدگی و آب انداختگی مخلوط بتن را کاهش می‌دهند. ذرات بسیار ریز دوده سیلیس در مخلوط‌های بتن همچنین اندازه کانال های جریان را کاهش داده و موجب چند قطعه شدن مسیرهای آب انداختگی می‌گردد. همین موضوع دلیل آب انداختگی کم و یا عدم آب انداختگی بتن حاوی دوده سیلیس می باشد[۷].

بتن حاوی دوده سیلیس نیازمند عمل‌آوری رطوبتی بیشتری به منظور اجتناب از جمع شدگی پلاستیک به‌ویژه در محیط‌های گرم می‌باشد. پرداخت سطح نهایی این بتن باید زودتر از بتن عادی آغاز گردد که دلیل آن همین آب انداختگی پایین می‌باشد[۷].

۲-۹-۱۱ اثر دوده سیلیس بر خواص مکانیکی بتن سخت شده

در بسیاری از تحقیقات انجام‌شده بر روی مقاومت فشاری ملات ها و بتن‌های حاوی دوده سیلیس، افزایش قابل توجهی در مقایسه با ملات ها و بتن‌های معمولی ایجادشده است. چندین عامل مانند نسبت آب به سیمان، خواص سیمان و سنگ‌دانه و مقدار آن‌ها، طرح مخلوط، استفاده از مواد افزودنی و عمل‌آوری، بر میزان بهبود مقاومت در مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس اثر می‌گذارد. بتن‌های شامل دوده سیلیس از نظر

خواص مقاومتی با تغییر نسبت آب به سیمان، مانند بتن‌های معمولی رفتار می کنند. تفاوت در مقاومت بالاتر ناشی از افزودن دوده سیلیس می باشد، همان‌گونه که در شکل ۲-۲۰ ملاحظه می‌گردد[۷].



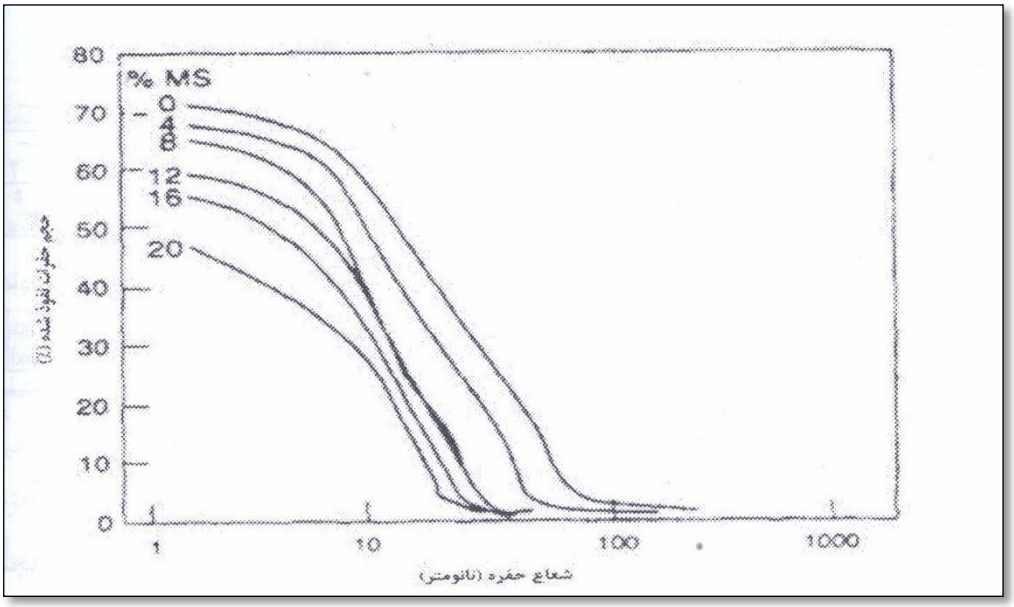
شکل ۲-۲۰: رابطه میان نسبت w/c و مقاومت بتن‌های حاوی دوده سیلیس[۷]

۲-۹-۱۲ عمل‌آوری بتن‌های حاوی دوده سیلیس

دوره عمل‌آوری برای بتن‌های حاوی دوده سیلیس مانند دیگر مواد پوزولانی بسیار مهم می‌باشد. خشک شدن اولیه بتن با دوده سیلیس ممکن است منجر به کاهش قابل ملاحظه مقاومت نهایی آن گردد[۷]. به نظر می‌رسد که عمل‌آوری در هوا اثرات نامطلوبی بر مقاومت فشاری بلند مدت هر دو بتن‌های معمولی و حاوی دوده سیلیس بر جای می‌گذارد، اما این اثر برای بتن با دوده سیلیس برجسته می‌باشد. این پدیده منجر به ریز ترک های احتمالی ناشی از خشک شدن بتن می‌گردد[۷].

۲-۹-۱۳ ریز ساختار، تخلخل و نفوذپذیری

ریز ساختار بتن تحت تاثیر افزودن دوده سیلیس به مخلوط قرار می‌گیرد. تاثیر اصلی عبارت است از کوچک‌سازی ساختار حفره‌ای خمیر سیمان که تخلخل کل ممکن است با افزودن دوده سیلیس تغییر نکند اما حفرات بزرگ به حفرات کوچک‌تر تقسیم‌شده و در نتیجه ریز ساختار خمیر سیمان تغییر می‌نماید. اثر مقادیر مختلف دوده سیلیس بر تخلخل در شکل ۲-۲۱ نشان داده‌شده است[۷].



شکل ۲-۲۱: اثر دوده سیلیس بر تخلخل کل[۷]

افزودن دوده سیلیس به مخلوط بتن همچنین ناحیه انتقال (ITZ) بین خمیر سیمان و سنگ‌دانه را بهبود می‌بخشد. مقدار هیدروکسید کلسیم در ITZ بر اثر واکنش پوزولانی دوده سیلیس کاهش می‌یابد. این امر موجب کاهش تخلخل و نفوذپذیری بتن‌ها در ناحیه انتقال شده و پیوستگی خمیر و سنگ‌دانه‌ها را افزایش می‌دهد[۷].

افزودن پوزولان های طبیعی باعث می‌شود که ژل C-S-H سریع‌تر شکل‌گرفته و منافذ را پر نماید که نفوذپذیری بتن کاهش‌یافته و در نتیجه سبب افزایش دوام بتن می‌گردد[۲۱].

۲-۹-۱۴ مواد افزودنی

موادی هستند که به‌منظور ایجاد و یا بهبود خواص مشخصی به بتن تازه و یا سخت شده در حین ساخت بتن به آن افزوده می‌شوند. استفاده از فوق روان کننده‌ها برای تولید بتن خود تراکم به‌منظور ایجاد کارایی مناسب، ضروری می‌باشد. از انواع دیگر مواد افزودنی می‌توان به عامل اصلاح لزجت به‌منظور اصلاح لزجت، مواد افزودنی حباب‌زا به‌منظور بهبود مقاومت در برابر یخزدگی و آب شدن، کندگیر کننده‌ها به‌منظور کنترل گیرش و... اشاره نمود[۲۲].

کاهش حجم خمیر سیمان ضمن ثابت حفظ نمودن نسبت آب به سیمان، وقتی میسر است که آب و سیمان هر دو کاهش یابند. این امر مشکلاتی جدی برای کارایی بتن ایجاد می‌نماید لذا مصرف افزودنی‌های روان کننده و فوق روان کننده اجتناب‌ناپذیر است[۱].

پخش و توزیع ذرات سیمان به علت وجود افزودنی روان کننده و فوق روان کننده بهتر شده و از طرفی تراکم‌پذیری بتن بهتر انجام می‌شود این امر سبب بهبود مقاومت و دوام بتن می‌گردد[۱].

اگرچه استفاده از افزودنی فوق روان کننده راه مناسبی برای بهبود روانی بتن خودتراکم می‌باشد، با این حال استفاده‌ی بیش از مقدار بحرانی فوق روان کننده، به علت افزایش احتمال ناپایداری، توصیه نمی‌شود مقدار بحرانی افزودنی فوق روان کننده، مقداری است که فراتر از آن مخلوط ناپایدار می‌شود. این مقدار، ثابت نیست و به روانی و نسبت مخلوط وابسته است[۲۳].

Singh و همکارانش در سال ۲۰۱۵به بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان در رشد مقاومت ملات سیمان پرداختند. در تحقیق آن‌ها به کاهش مقاومت فشاری با افزایش نسبت آب به سیمان اشاره‌شده است. از دیگر نتایج این تحقیق تاثیر مثبت استفاده از افزودنی‌های بر پایه ی پلی کربکسیلات در مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی و کاهش نسبت آب به سیمان در ملات‌ها می‌باشد[۲۴].

در صورت استفاده از فوق روان کننده پلی کربکسیلات، اگر غلظت و چگالی فوق روان کننده افزایش پیدا کند، در نتیجه طبق آزمایش‌های انجام‌گرفته زمان جریان قیف V نیز کاهش می‌یابد[۲۵].

زمانی که سیمان و افزودنی نیز رفتار سازگار باهم دارند، رسیدن به مقاومت‌های زودهنگام در سنین اولیه به افزودنی استفاده‌شده در طرح بستگی داشته و سبب می‌شود بتن در سنین اولیه به مقاومت نهایی خود برسد[۲۵].

در طرح مخلوط بتن با بافت درشت، زمانی که از فوق روان کننده استفاده می‌نماییم سبب کاهش استفاده از آب و همچنین کاهش هوای موجود در بتن می‌گردد[۲۶].

خواص رئولوژیکی و ساختار منافذ موجود در بتن به نوع فوق روان کننده استفاده‌شده در بتن نیز بستگی دارد که همین ساختار منافذ نیز به عنوان یک مشخصه اصلی در خواص مکانیکی و دوامی بتن مطرح می‌شود[۲۷].

۲-۱۰ ضریبK

درروش طرح ملی مخلوط بتن برای محاسبه نسبت آب به سیمان معادل و جهت منظور نمودن اثر پوزولان های طبیعی و مصنوعی در طرح مخلوط از ضریب k استفاده می‌شود. ضریب k بیانگر میزان اثربخشی پوزولان‌های مختلف بر مقاومت و دوام بتن می‌باشد به نحوی که میکروسیلیس در مقادیر برابر اثر بیشتری نسبت به سیمان دارند در حالی که خاکستر بادی و پوزولان‌های طبیعی معمولا در اوزان مساوی کم اثرتر نسبت به سیمان می‌باشند. در طرح ملی مخلوط بتن، ضریبK برای میکروسیلیس در بتن معمولی عدد ۲ بیان شده است. به طور مثال می‌توان گفت که مصرف ۱ کیلوگرم میکروسیلیس معادل مصرف ۲ کیلوگرم سیمان در طرح مخلوط می‌باشد. باتوجه به تعریف ضریبK در طراحی مخلوط می‌توان از مصرف بیش از حد سیمان جلوگیری کرده و همچنین از پوزولان‌های تولید شده در صنایع مختلف کشور استفاده نمود.

$$\left(\frac{W}{C}\right)_e = \frac{W}{C + k.M} \qquad (۱-۲)$$

که در آن:

$\left(\frac{W}{C}\right)_e$: نسبت آب به سیمان معادل

W: آب آزاد

M: مقدار افزودنی معدنی پودری فعال

از طرفی با گسترش بتن‌های ویژه نظیر بتن خودتراکم، ضرورت تدوین روش ملی طرح مخلوط بتن خودتراکم احساس می‌شود ولی مطالعات اولیه کافی در خصوص آن وجود ندارد؛ به همین دلیل در این پژوهش سعی بر آن شد که برای میکروسیلیس و پوزولان‌های طبیعی نظیر خاش، زئولیت، سرباره کوره آهن‌گدازی در بتن خودتراکم این ضریب با توجه به استاندارد اروپایی DIN CEN/TR 16639 تعیین گردید.

۲-۱۱ مثال‌هایی از استفاده بتن خودتـــــراکم در پروژه‌ها

۲-۱۱-۱ پروژه‌های خارج از ایران

در ابتدا به چند پروژه در ژاپن که در سال‌های گذشته در استفاده از بتن خودتراکم پیشتاز بوده‌اند اشاره می‌شود[۱۱].

- **برج Land Mark**: این برج با ۲۹۶ متر ارتفاع و ۷۰ طبقه یکی از برج‌های مرتفع ژاپن می‌باشد که در یوکوهاما واقع‌شده است. برای پر کردن ۶۶ ستون در ۹ طبقه ابتدایی آن از بتن خودتراکم استفاده‌شده است. در این پروژه مجموعاً ۸۸۵ مترمکعب بتن خودتراکم مصرف‌شده است (شکل ۲-۲۲- سمت راست)[۱۱].

- **پل معلقAkashi-Kaikyo:** این پل به طول ۳/۹۱۰ کیلومتر، بلندترین پل معلق جهان می‌باشد که در سال ۱۹۹۸ در ژاپن افتتاح شد. در این پروژه حدوداً ۲۹۰۰۰۰ مترمکعب بتن خودتراکم استفاده‌شده است. در این پروژه به دلیل استفاده از بتن خودتراکم از مدت‌زمان ساخت‌وساز آن ۲۰٪ کاسته شده است (شکل ۲-۲۲—سمت چپ)[۱۱].

شکل ۲-۲۲: برج Land Mark و پل معلقAkashi-Kaikyo [۱۱]

-**آسمان‌خراش PORTA NUOVA**: پروژه بزرگ PORTA NUOVA در جهت توسعه و دگرگونی ۳۰۰ هزار مترمربع از مناطق متروکه با کاربری تجاری، اداری، مسکونی و هتل در شهر میلان ایتالیا توسط شرکت هاینز[۳۴] ساخته‌شد و در سال ۲۰۱۳ به بهره‌برداری رسید. همچنین دستاوردهای فرهنگی در سازه و بتن فوق توانمند با مقاومت ۸۵ مگاپاسگال در این برج با ارتفاع حدود ۲۳۱ متر حاصل‌شده است. در این پروژه تمام حجم بتن‌ریزی با بتن خودتراکم صورت گرفته است (شکل ۲-۲۳)[۱۱].

[34] Hines

شکل ۲-۲۳: استفاده از SCC در فونداسیون آسمان‌خراشPORTA NUOVA [۱۱]

شکل ۲-۲۴: آسمان‌خراشPORTA NUOVA [۱۱]

-**پروژه بزرگراه Wu-Yang**: پروژه بزرگراه Wu-Yang به طول ۳۷ کیلومتر و با دو خط عریض در هر طرف در سال ۲۰۱۰ شروع و در سال ۲۰۱۲ به بهره‌برداری رسید. در قسمت‌هایی مسیر عرشه به‌صورت دوطبقه و غیر هم‌سطح اجراشده است. شکل ۲-۲۵ تصویر شماتیک مقاطع این پل را نشان می‌دهد. در این پروژه از ۲۰۰,۰۰۰ مترمکعب بتن خودتراکم و بتن با عملکرد بالا به ترتیب در ستون‌ها و فونداسیون‌ها و عرشه استفاده‌شده است (شکل ۲-۲۶)[۱۱].

شکل ۲-۲۵: تصویر شماتیک مقاطع بزرگراه Wu-Yang در تایوان[۱۱]

شکل ۲-۲۶: نمایی از ستون‌های اجراشده با SCC در بزرگراهWu-Yang [۱۱]

امروزه بتن خودتراکم در بسیاری از موارد نه‌تنها برای ماشینی کردن ساختمان‌های بتنی بلکه به‌منظور آغاز توسعه پایدار و کاهش مصرف سیمان در بتن و افزایش دوام بتن مورداستفاده قرار می‌گیرد[۲۸].

۲-۱۱-۲پروژه‌های داخل کشور

خوشبختانه در این زمینه در سال‌های اخیر در کشور ما نیز پیشرفت‌های نسبتاً خوبی صورت گرفته است. در ذیل به بخشی از پروژه‌های بزرگ در ایران که حجم زیادی از بتن خودتراکم در آن‌ها استفاده‌شده، اشاره‌شده است[۱۱].

-**پروژه بزرگراه طبقاتی شهید صدر:** این پروژه که به‌عنوان اولین پل سگمنتال بتنی تک‌پایه در ایران است در تهران در آذر ۱۳۹۲ به بهره‌برداری رسید. طول این پل حدود ۵ کیلومتر بوده که در ساخت آن تقریباً به‌طور کامل از SCC استفاده‌شده است.

به‌منظور ساخت این پل در حدود ۲۸۳,۰۰۰ مترمکعب بتن که حدوداً ۴/۵ برابر حجم بتن مورداستفاده در برج میلاد می‌باشد، استفاده گردیده است.

طراحی سازه این پل به‌گونه‌ای برنامه‌ریزی‌شده بود تا ساخت شمع‌ها، فونداسیون‌ها و ستون‌ها در مسیر احداث پروژه و با استفاده از بتن معمولی و به‌صورت درجا انجام پذیرد و قطعات سرستون و عرشه به‌صورت اجزای بتنی پیش‌ساخته و در کارخانه‌هایی خارج از محور طرح ساخته شوند. بر این اساس و به‌منظور تسریع درروند ساخت قطعات، افزایش سطح کیفی و دوام، حصول نتایج مطلوب در پارامترهای مقاومتی و سازه‌ای و نهایتاً به جهت تأمین تراکم متناسب باوجود فشردگی بیش‌ازحد میلگردها، استفاده از بتن خودتراکم در فرآیند تولید در دستور کار قرار گرفت.

بعد از انجام طرح‌های مخلوط متعدد و تغییرات مکرر درصدهای مصالح مصرفی، طرح مخلوط‌های اجرایی برای رده بتن C45 طبق نظر طراح (مقاومت هدف ۵۰ مگاپاسگال استوانه‌ای) به‌دست‌آمد که مشخصات آن در جدول ۲-۹ درج گردیده است[۱۱].

جدول ۲-۹: طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم اجراشده در پروژه بزرگراه طبقاتی صدر[۱۱]

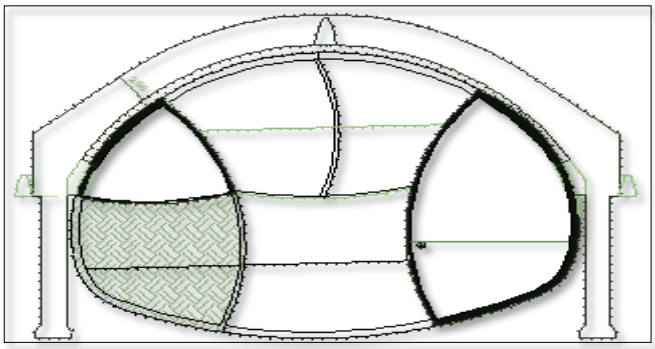
مواد سازنده	طرح ۱	طرح ۲
سیمان (kg/m^3)	۴۰۰	۴۱۰
ماسه (kg/m^3)	۹۵۵	۹۴۰
شن نخودی (kg/m^3)	۳۵۴	۷۰۰
شن بادامی (kg/m^3)	۳۵۴	۰
W/C	۰/۳۹	۰/۳۸
پودر سنگ (kg/m^3)	۱۰۶	۱۱۶

سرستون‌ها از ۷ قطعه سگمنتال با حجم بتن ۱۴۷ مترمکعب تشکیل‌شده است که به دلیل تراکم بسیار زیاد آرماتور از طرح مخلوط شماره دو که دارای حداکثر اندازه سنگ‌دانه ۹/۵ میلی‌متر است استفاده‌شده است. مجموع وزن سبد آرماتورها حدود ۴۶ تن می‌باشد که در شکل ۲-۲۷ مجموعه سرستون نصب‌شده در محور پروژه نمایش داده‌شده است[۱۱].

شکل ۲-۲۷: قطعات سگمنتال سرستون نصب‌شده در محور پروژه[۱۱]

-**تونل نیایش و رسالت:** تونل نیایش در سال ۱۳۹۲ در تهران بهره‌برداری شد و به‌عنوان یکی از طرح‌های برتر بتنی در ۱۶ مهرماه همین سال توسط متخصصین سازه‌های بتنی در انجمن بتن ایران برگزیده‌شد (شکل ۲-۲۸). از ویژگی ارزنده پروژه تونل نیایش، بهره‌وری صنعتی از بتن خودتراکم بوده، به‌نحوی‌که حجم ۲۳۴۰۰۰ مترمکعب از این نوع بتن تولید و در دال‌ها، شمع‌ها و ریب‌ها[۳۵] مصرف گردیده است (شکل ۲-۲۹). همچنین یکی از نوآوری‌های انجام‌شده در پروژه تونل نیایش استفاده از توزیع‌کننده‌های بتن درروی قالب‌ها بوده که با استفاده از بتن خودتراکم و توانایی حرکت این بتن در این سیستم، از حداکثر راندمان بتن‌ریزی در قالب‌ها استفاده‌شده است[۱۱].

شکل ۲-۲۸: تونل نیایش تهران[۱۱]



شکل ۲-۲۹: ریب در اطراف مقطع[۱۱]

[35] Rib

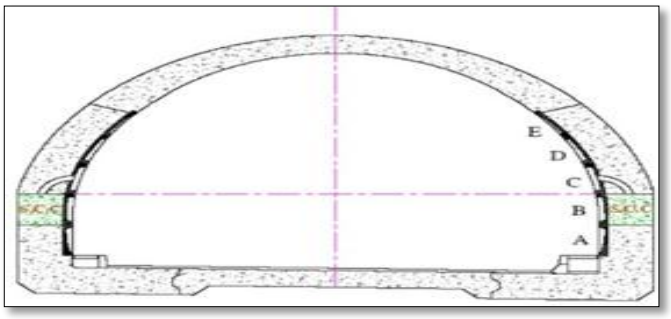
مزایای استفاده از بتن خود تراکم در تونل نیایش:

- کاهش زمان بتن‌ریزی (اجرای ۹۰ متر طول لاینینگ در هفته)
- کاهش خرابی ماشین‌آلات
- سطح نهایی خوب در پوشش نهایی تونل
- کاهش نیروی انسانی در زمان بتن‌ریزی
- پمپاژ بتن تا طول ۳۵۰ متر

قبل از تونل نیایش، از بتن SCC در تونل رسالت در سال ۱۳۸۴ استفاده‌شده است (شکل ۲-۳۰). با توجه به نوع اجرای لاینینگ جداره تونل و همچنین استفاده از قطعات پیش-ساخته در جداره تونل رسالت، دسترسی و ویبره کردن بتن پشت قطعات امکان‌پذیر نبوده و استفاده از بتن خودتراکم الزامی بوده است (شکل ۲-۳۱).

این پروژه نیز در روز بتن سال ۱۳۸۵ به‌عنوان پروژه برتر بتنی کشور انتخاب و معرفی گردید[۱۱].

شکل ۲-۳۰: تونل رسالت تهران[۱۱]



شکل ۲-۳۱: مقطع نهایی تونل رسالت[۱۱]

- **پل هوانیروز و کارخانه آسیاب سیمان کرمان:** برای اولین بار در کرمان اجرای صنعتی بتن خودتراکم با موفقیت انجام شد. در شهریور ۱۳۹۰ پل عابر پیاده تقاطع بلوار جمهوری اسلامی و بلوار هوانیروز کرمان با بتن خودتراکم با ارتفاع حدود ۷ متر و بتن‌ریزی در یک مرحله مقاومت ۲۸ روزه‌ای برابر با Kg/cm^2 ۷۰۰ با موفقیت اجرا گردید[۱۱].

پس‌ازآن همچنین مقاوم‌سازی فونداسیون آسیاب گلوله‌ای کارخانه سیمان کرمان در آذر ۱۳۹۰ با اَبَر بتن خودتراکم با موفقیت انجام گردید. بدین منظور، از اَبَر بتن خودتراکم با مقاومت فشاری۲۸ روزه حدود Kg/cm^2 ۱۲۰۰ را برای مقاوم‌سازی این عضو عظیم با موفقیت بکار گرفته شد (شکل ۲-۳۲)[۱۱].

الف: فونداسیون آسیب‌دیده ب: مقاوم‌سازی با SCC ج: پس از مقاوم‌سازی

شکل ۲-۳۲: مقاوم‌سازی فونداسیون آسیاب گلوله‌ای کارخانه سیمان کرمان[۱۱]

با مشاهده شکل‌های قبلی برای دستیابی به سیستم‌های سازه‌ای مدرن (شکل ۲-۳۳ و ۲-۳۴) بعضاً در اجرا، در قسمت‌هایی از سازه موردنظر به دلیل اعماق زیاد، ضخامت‌های کم، محل‌های با دسترسی نامناسب و یا غیرممکن به وسایل ویبره و... ملزم به استفاده از بتن خودتراکم هستیم[۱۱].

شکل ۲-۳۳: ستون پُر آرماتور اجراشده با بتنNC[۱۱]

شکل ۲-۳۴: مغزه دیوار پروژه‌ای که با NC اجراشده[۱۱]

فصل سوم

برنامه آزمایشگاهی و مصالح مصرفی

۳-۱ مقدمه

همان‌طور که می‌دانیم هدف این تحقیق به دست آوردن ضریب K برای پوزولان‌های مختلف در بتن خودتراکم می‌باشد لذا سعی گردیده است طرح‌های مخلوط ساخته‌شده حتی‌الامکان پارامترهای مؤثر، نظیر نوع و کیفیت مصالح، اعم از سیمان و سنگ‌دانه‌ها شامل حداکثر اندازه سنگ‌دانه و دانه‌بندی مخلوط سنگ‌دانه، ثابت نگه‌داشته شود تا بتوان مقایسه مناسبی را انجام داد. به همین منظور سنگ‌دانه‌های مصرفی را به میزان بیشتر از نیاز در محیط کارخانه انبار کرده و پودر سنگ و پوزولان‌ها نیز به‌صورت کیسه‌ای در محلی مناسب نگهداری گردید. اگرچه سیمان مصرفی از یک نوع و از یک کارخانه تولید سیمان تهیه گردیده است اما به دلایل اجرایی فرآیند تولید سیمان، اختلاف اندک کیفیت تولید اجتناب‌ناپذیر است. ازاین‌رو سیمان موردنیاز در یک تاریخ خریداری گردید و در تمامی طرح‌های مخلوط از همان سیمان خریداری‌شده استفاده گردید. لازم به ذکر است به دلیل تأثیر دما و رطوبت محیط بر روی کیفیت سیمان، تمامی پاکت‌های سیمان در محیطی خشک و به‌دوراز هرگونه رطوبتی نگهداری گردید. همچنین برای افزایش دقت و کنترل کیفیت بهتر کارهای انجام‌شده، تمامی طرح‌های مخلوط بدون وقفه انجام پذیرفت.

۳-۲ مصالح مصرفی

برای ساخت بتن‌های خودتراکم در این تحقیق از مصالح زیر استفاده‌شده است:

۱- سنگدانه‌ها

۲- سیمان

۳- آب

۴- مواد افزودنی

۵- میکروسیلیس

۶- پوزولان خاش

۷- زئولیت

۸- سرباره کوره آهن‌گدازی

۳-۲-۱ مصالح سنگی

مصالح سنگی موردنیاز از شن‌شویی‌های مستقر در جاده کلات در اطراف مشهد تأمین‌شده است. قابل‌ذکر است که پودر سنگ‌آهک از کارخانه و به‌صورت صنعتی تهیه‌شده است.

۳-۲-۱-۱ مصالح سنگی درشت‌دانه

آزمایش‌های زیر بر روی مصالح سنگی درشت‌دانه انجام پذیرفته است:

۱. آزمایش دانه‌بندی، بر اساس استاندارد ASTM C 136-96

۲. آزمایش چگالی اشباع با سطح خشک (SSD) بر اساس استاندارد ASTM C 127-88

۳. آزمایش ظرفیت جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C127-88

۳-۲-۱-۲ مصالح سنگی ریزدانه

ماسه مورداستفاده از نوع گرد گوشه شسته شده از مجموعه‌ی صنعتی ولیعصر و ماسه‌بادی نیز از مجموعه‌ی صنعتی الماس شرق در جاده کلات در اطراف مشهد تأمین‌شده است.

آزمایش‌های زیر بر روی ماسه انجام‌شده است:

۱. آزمایش دانه‌بندی، بر اساس استاندارد ASTM C 136-96

۲. آزمایش چگالی اشباع با سطح خشک بر اساس استاندارد ASTM C 128-97

۳. آزمایش ظرفیت جذب آب بر اساس استاندارد ASTM C128

۳-۲-۱-۳ پودر سنگ

پودر سنگ استفاده‌شده در این پروژه مربوط به سنگ‌آهک بود که از کارخانه پودر سنگ مشهد خریداری شد. آزمایش‌های زیر در مورد پودر سنگ انجام‌شده است:

۱. آزمایش دانه‌بندی، بر اساس استاندارد ASTM C 136

۲. آزمایش چگالی اشباع با سطح خشک بر اساس استاندارد ASTM C 128-97

به دلیل آنکه استانداردی برای تعیین ظرفیت جذب آب مصالح ریزدانه مانند پودر سنگ‌آهک ارائه نشده، ظرفیت جذب آن صفر فرض شده است. به‌هرحال سعی شده آزمایش‌های فوق مطابق با استانداردهای مصالح ریزدانه (ماسه‌ها) صورت گیرد. همچنین با دقت بسیار زیاد ظرفیت جذب آب ماسه‌بادی مانند ماسه معمولی تعیین‌شده است.

۳-۲-۲ آزمایش‌های انجام‌شده روی مصالح سنگی و نتایج آن‌ها

۳-۲-۲-۱ آزمایش دانه‌بندی مصالح سنگی

نتایج دانه‌بندی شن نخودی، ماسه شسته، ماسه‌بادی و پودر سنگ‌آهک به ترتیب در جدول ۳-۱ گزارش و منحنی‌های دانه‌بندی در شکل ۳-۱ نمایش داده‌شده است.

جدول ۳-۱: نتایج دانه‌بندی مصالح سنگی

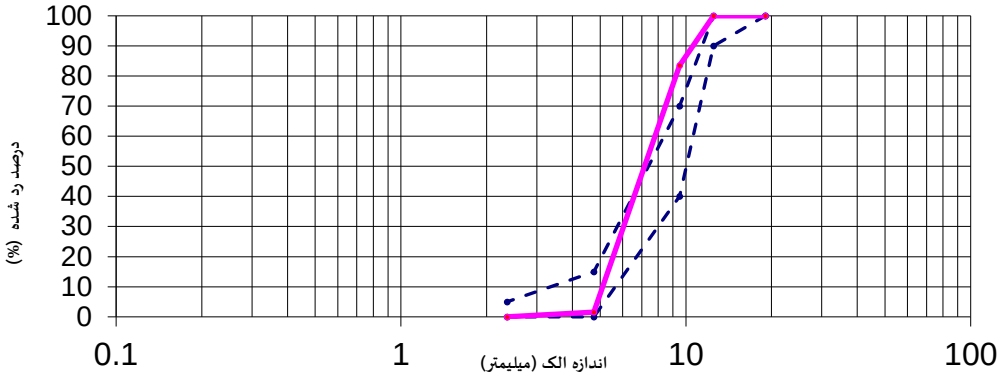
شماره و اندازه الک		شن ریز (نخودی)	ماسه	ماسه‌بادی	پودر سنگ‌آهک
mm	-				
۳۷/۵	۱۱/۲ اینچ	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲۵	۱ اینچ	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۹	۳/۴ اینچ	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

۱۲/۵	۱/۲ اینچ	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۹/۵	۳/۸ اینچ	۸۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴/۷۵	نمره ۴	۲	۹۵	۹۸	۱۰۰
۲/۳۶	نمره ۸	۰/۲۰	۷۲	۹۵	۱۰۰
۱/۱۸	نمره ۱۶	۰/۲۰	۴۶	۹۱	۹۷
۰/۶	نمره ۳۰	۰/۲۰	۲۷	۸۸	۸۴
۰/۳	نمره ۵۰	۰/۲۰	۱۰	۶۹	۶۳
۰/۱۵	نمره ۱۰۰	۰/۲۰	۲	۲۰	۴۹
۰/۰۷۵	نمره ۲۰۰	۰/۲۰	۱	۹	۴۴

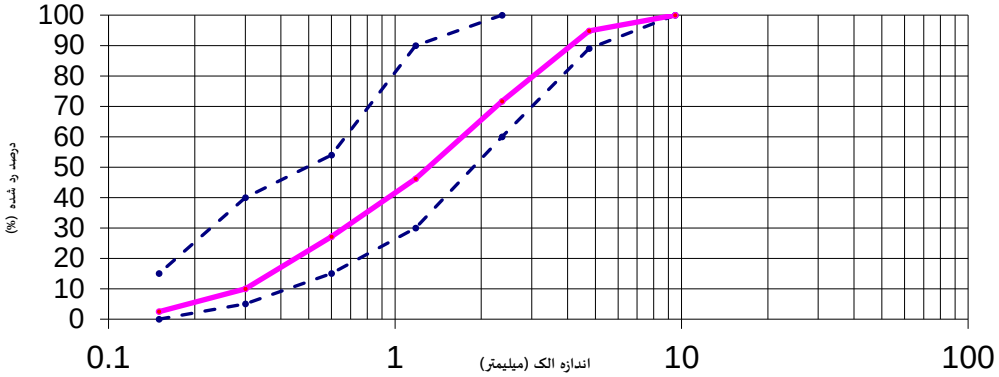
همان‌طور که در منحنی‌های دانه‌بندی مصالح مشاهده می‌شود (شکل ۳-۱)، دانه‌بندی مصالح به‌طور مجزا در محدوده مجاز مندرج در استاندارد ISIRI302 بوده (خطوط خط‌چین) و سهم مصالح در طرح‌ها به‌گونه‌ای تعیین‌شده است که نمودار دانه‌بندی ترکیب مصالح طرح، در محدوده مناسب که طبق فرمول اصلاح‌شده فولر-تامسون ترسیم‌شده است قرار گیرد.

در مورد دانه‌بندی ترکیب مصالح و غیره در قسمت نرم‌افزار توضیحات بیشتر ارائه می‌شود.

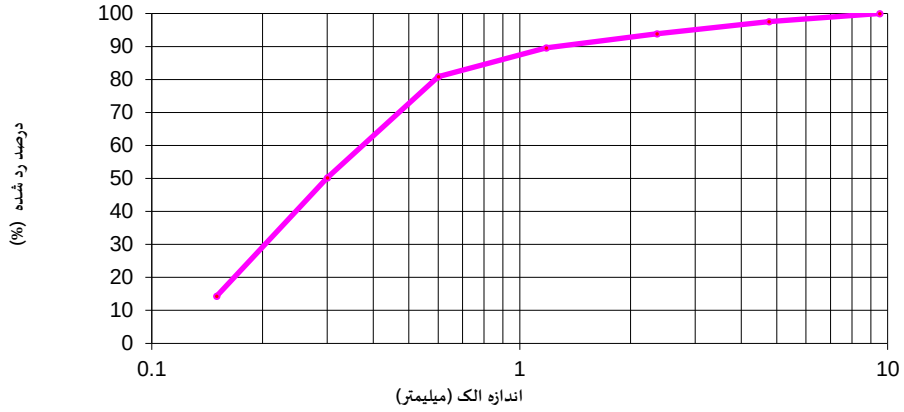
درباره محدوده دانه‌بندی پودر سنگ‌آهک و ماسه‌بادی، در آیین‌نامه‌های آبا، آشتو و روش طرح ملی مخلوط بتن تعریف خاصی وجود ندارد و فقط با استفاده از آن‌ها تا حد مجاز، دانه‌بندی ترکیبی اصلاح‌شده است. به دلیل عدم وجود محدوده دانه‌بندی برای این مصالح، جهت کنترل یکنواختی مصالح ورودی به کارگاه می‌توان منحنی‌های دانه‌بندی را باهم مقایسه و مطابقت داد.



الف



ب



ج

شکل ۳-۱: منحنی دانه‌بندی، الف-شن نخودی، ب- ماسه طبیعی، ج-ماسه بادی

حداکثر مقدار استفاده از ماسه‌بادی به‌اندازه‌ای است که حداکثر درصد عبوری از الک ۲۰۰ در کل ماسه‌ها از ۵٪ مقدار مجاز بیشتر نشود. همچنین مقدار مجاز درصد عبوری از الک ۲۰۰ برای شن‌ها ۱٪ بوده که در طرح موردتوجه قرارگرفته است؛ اما آنچه مهم‌تر است، مقدار درصد عبوری از الک ۲۰۰ در ترکیب سنگ‌دانه‌هاست. این مقدار تابعی از سهم هر نوع مصالح سنگی و درصد عبوری از الک ۲۰۰ همان مصالح در ترکیب سنگ‌دانه‌هاست. بنابراین سهم ماسه‌بادی در طرح طوری انتخاب‌شده که اولاً درصد عبوری از الک ۲۰۰ در کل ماسه‌ها از ۵٪ بیشتر نشود، ثانیاً عبوری از الک ۲۰۰ یعنی مقدار کل ریزدانه کمتر از ۷۵ میکرون، در ترکیب مصالح از مقدار مجاز تجاوز نکند. البته در طرح‌های حاضر، حداکثر سهم ماسه‌بادی در راستای کنترل عبوری از الک ۲۰۰ ترکیب سنگ‌دانه‌ها، به کمتر از ۲۰٪ منجر شده است.

۳-۲-۲-۲ سایر نتایج مشخصات مصالح سنگی

نتایج درصد عبوری از الک ۲۰۰، مدول نرمی، چگالی SSD، جذب آب و درصد شکستگی مصالح سنگی در جدول ۳-۲ آورده شده است.

جدول ۳-۲: سایر مشخصات مصالح سنگی

نوع مصالح / مشخصات مصالح	شن ریز (نخودی)	ماسه	ماسه‌بادی	پودر سنگ
درصد عبوری از الک ۲۰۰ (٪)	۰/۲	۱	۹	۴۴
مدول نرمی (FM)	۶/۱۳	۳/۴۸	۱/۳۹	۱/۰۷
چگالی SSD (t/m^3)	۲/۶۸	۲/۶۶	۲/۶۸	۲/۷۰
جذب آب مصالح (٪)	٪۱/۳	٪۲/۱	٪۷/۸	-
درصد شکستگی (٪)	٪۷۰	-	-	-

۳-۲-۳ سیمان

سیمان مصرفی در کلیه طرح‌های مخلوط، سیمان پرتلند تیپ ۲ کارخانه سیمان بجنورد با چگالی t/m^3 ۳/۱۶۴ می‌باشد.

مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان بجنورد مطابق جدول ۳-۳ گرفته‌شده از این کارخانه گزارش می‌گردد.

۳-۲-۴ آب

کیفیت آب در بتن ازآن‌جهت حائز اهمیت است که ناخالصی‌های موجود در آن ممکن است درگیرش سیمان اثر گذاشته و اختلالاتی به وجود آورند. همچنین آب نامناسب ممکن است روی مقاومت بتن اثر نامطلوب گذاشته و سبب بروز لکه‌هایی در سطح بتن و حتی زنگ‌زدگی آرماتور شود. باید از ورود مواد آلوده به منابع ذخیره آب در کارخانه‌های تولید بتن ممانعت به عمل آید، به‌طوری‌که ویژگی‌های آب دستخوش تغییرات نشود. منابع زیرزمینی آب در کارخانه‌ها به‌ویژه در مناطقی که دارای خاک نامناسب و آلوده به املاح و مواد مضر هستند، باید کاملاً آب‌بندی شوند.

آنالیزهای شیمیایی لازم جهت اندازه‌گیری PH و سایر عوامل ذکرشده در آیین‌نامه در بیشتر کارخانه‌ها انجام نمی‌شود. هرچند که اغلب، آب مصرفی بدون بو و ظاهر آن بدون مشکل خاصی است؛ اما برخی از آیین‌نامه‌ها توصیه می‌کنند سالی یک‌بار بر روی آب مصرفی آنالیز شیمیایی صورت پذیرد که البته طبق استاندارد ایران این مدت شش ماه پیش‌بینی‌شده است. در تحقیق حاضر برای ساخت طرح‌ها از آب آشامیدنی لوله‌کشی آزمایشگاه در شهر چناران استفاده گردیده است.

جدول ۳-۳: مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان تیپ ۲ بجنورد

FARS &KHUZESTAN CEMENT CO.
BOJNOURD CEMENT CO.
QUALITY CONTROL & LABORATORY DEPARTMENT

F08/6

CEMENT TEST REPORT

Product	**Portland Cement Type 2 (M500 , CEM I 52,5 N)**
	Rapid Hardening, High Early Strength, MSR (Moderate Sulfate Resistance)
Standard of Sample	ISIRI 389 , ASTM C150 , GOST 10178-85, GOST 30515-2013, GOST 31108-2003
Date of Report	**May 2017**

Chemical Analysis	Result	Standard Limitation ISIRI 389	Standard Limitation ASTM C150	Standard Limitation GOST 10178-85
SiO_2 (%)	20.70	Min 20.00	*	*
Al_2O_3 (%)	4.24	Max 6.00	Max 6.00	*
Fe_2O_3 (%)	3.80	Max 6.00	Max 6.00	*
CaO (%)	64.05	*	*	*
MgO (%)	2.01	Max 5	Max 6.0	Max 5
Na_2O (%)	0.32	*	*	*
K_2O (%)	0.62	*	*	*
SO_3 (%)	2.56	Max 3.00	Max 3.0	Max 3.5
Insoluble Residue (%)	0.44	Max 0.75	Max 0.75	*
Loss on Ignition (%)	1.30	Max 3.00	Max 3.0	*
Free Lime (F.CaO) (%)	1.1	*	*	*
Chloride (%)	0.022	*	*	*
Equivalent Alkalies (%) (Na_2O+0.658*K_2O), Optional	0.73	*	*	Max 1.20
Lime Saturation Factor (LSF)	95.15	*	*	*
Minerological Composition (Bouge Relations)				
C_3S , Tricalcium Silicate (%)	62.21	*	*	*
C_2S , Dicalcium Silicate (%)	12.44	*	*	*
C_3A ,Tricalcium Aluminat (%)	4.81	Max 8.00	Max 8	Max 8
$2C_3A + C_4AF$	21.18	*	*	*

Physical Analysis		Result	Standard Limitation ISIRI 389	Standard Limitation ASTM C150	Standard Limitation GOST 10178-85
Specific Gravity (ton/m^3)		3.164	*	*	*
Normal Consistency (%)		26.60	*	*	*
Setting Time Vicat test	Initial	165	Min 45	Min 45	Min 45
	Final	03:10	Max 6:00	Max 6:15	Max 10:00
Soundness Expansion					
Autoclave expansion (%)		0.03	Max 0.8	Max 0.8	*
Le Chatelier expansion (mm)		1.2	*	*	*
Sulfate Resistance 14 days exp.(%)		0.04	*	*	*
Fineness					
Specific Surface, Blaine (cm^2/gr)		3650	Min 2800	Min 2800	Min 2800
Retained on 90 µ Sieve (%)		0.30	*	*	80 µ Max 15
Strength Results , Compressive Strength (Kg/cm^2)					
1 Day		170.00	*	*	*
2 Days		290	*	*	*
3 Days		345	Min 100	*	*
7 Days		425	Min 175	*	*
28 Days		520	Min 315	*	Min 500
Heat of Hydration (Cal/gr) , Optional					
7 Days		67.61	Max 70	Max 70	*
28 Days		83.01	*	*	*

Remarks :

Quality Control and Laboratory Management

Lotfi

Q.C LABORATORY

Factory Management

۳-۲-۵ مواد افزودنی

با توجه به لزوم مصرف ماده افزودنی فوق روان کننده به جهت ایجاد روانی بالا در مخلوط بتن خود تراکم، از یک ماده افزودنی فوق روان کننده به نام PF2 محصول شرکت صنایع شیمیایی ژیکاوا استفاده شد. این افزودنی بر پایه‌ی پلی‌کربکسیلات می‌باشد. رنگ این ماده قهوه‌ای مایل به زرد و چگالی آن در دمای $^{\circ}C$ ۲۰ برابر ۱۰۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد، همچنین درصد مواد جامد ۴۹٪ و مقدار یون کلرید موجود در آن کمتر از ۰/۱ درصد است. ضمناً این ماده با تمامی سیمان‌ها سازگار می‌باشد.

۳-۲-۶ میکروسیلیس

میکروسیلیس عبارت است از سیلیس غیربلوری که در کوره‌های قوس الکتریکی به‌عنوان محصول جانبی تولید عنصر سیلیسیم، یا آلیاژهای حاوی سیلیسیم تولید می‌شود. ذرات میکروسیلیس بسیار کوچک بوده و بیش از ۹۵٪ ذرات آن از یک میکرون کوچک‌تر است و ازآنجاکه ذرات میکروسیلیس بسیار کوچک هستند، مساحت سطح بسیار بزرگ می‌باشد. مساحت سطح بالای ذرات میکروسیلیس عامل مهمی است که بر واکنش‌پذیری ذرات اثر می‌گذارد. میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق از محصولات تولیدی صنایع فروسیلیس سمنان بوده که به‌صورت بسته‌بندی از شرکت صنایع شیمیایی بتن ژیکاوا تهیه‌شده است. مشخصات فیزیکی و شیمیایی با توجه به اطلاعات دریافتی از شرکت فروسیلیس سمنان مطابق شکل ۳-۲ می‌باشد.

ترکیب شیمیایی							
SiO_2	Fe_2O_3	CaO	Al_2O_3	MgO	C	L.O.I	رطوبت
مینیمم درصد	ماکزیمم درصد						
۸۵	۲	۱/۵	۱	۲	۳	۳/۵	۱

شکل ۳-۲: مشخصات شیمیایی میکروسیلیس صنایع فروسیلیس سمنان

۳-۲-۷ پوزولان خاش

پوزولان تهیه‌شده از کارخانه سیمان خاش به‌عنوان یکی از مواد پودری معدنی فعالی است که در این سال‌ها شناخته می‌شود به‌گونه‌ای که در ساخت اولین سد بتن غلتکی در ایران واقع در جگین هرمزگان به‌عنوان تنها پوزولان مورد تأیید مهندسین مشاور طرح و در سال ۱۳۸۲ به‌عنوان محصول برتر کشور انتخاب گردیده است. مشخصات شیمیایی پوزولان خاش با توجه به اطلاعات دریافتی از کارخانه سیمان خاش مطابق شکل ۳-۳ نیز می‌باشد.

آزمایشگاه سیمان خاش

مشخصات شیمیایی پودر پوزولان طبیعی

Blain(cm2/gr	%Ins.Res	%SiO2	%Al2O3	%Fe2O3	%CaO	%MgO	%Na2O	% K2O	%Cl	%SO3	%L.O.I
>4500	-	59-62	17.8-19	4.6-5.5	7-8.5	<2.7	<1.9	<2.2	<0.04	<0.4	<2.8

درصد باقیمانده روي الك ٤٥ ميكرون	شاخص فعالیت ۲۸ روزه	شاخص فعالیت ۷روزه
15-20	>%90	>%85

شکل ۳-۳: مشخصات شیمیایی پوزولان خاش

۳-۲-۸ زئولیت

زئولیت یک ماده معدنی است که عمدتاً از آلومینوسیلیکات تشکیل‌شده و به‌طور خلاصه از دسته کانی‌های رسی هستند که همچون سایر کانی‌های رسی از پایه هیدرو سیلیکات‌های آلومینیوم همراه با برخی کاتیون‌ها و اکسیدهای فلزات قلیایی و قلیایی خاکی تشکیل‌شده‌اند. در حال حاضر بیش از ۴۰ نوع کانی زئولیت طبیعی کشف و بیش از یک‌صد و پنجاه نوع زئولیت مصنوعی ساخته‌شده است که هر یک کاربردهای اختصاصی خود را دارد. خواص منحصربه‌فرد ذکرشده این کانی، همراه با مقاومت بالای مکانیکی

و شیمیایی، امکان یک بازه وسیعی از کاربردهای پرشمار در صنایع کشاورزی، پرورش دام و طیـور و آبزیان، پتروشیـمی، پالایشگاه‌ها، محیط‌زیست، تصفـیه آب، تصـفیه فاضـلاب، تصفیه هـوا، بوگیـــر، کاغذسازی، از بین بردن قارچ‌ها و انگل‌ها، جداسازی و تخـلیص گازها (تولید گاز اکسیژن)، داروسازی، صنایع اتمی و ... را فراهم نموده است. مشخصات شیمیایی زئولیت دریافتی از شرکت نگین پودر سمنان مطابق شکل ۳-۴ می‌باشد.

L.O.I	Fe2O3	CaO	K2O	Na2O	Al2O3	SIO2
۱۲/۲	۰/۹-۰/۲	۰/۶	۴/۴	۳/۸	۱۱	۶۸/۵

شکل ۳-۴: مشخصات شیمیایی زئولیت

۳-۲-۹ سرباره کوره آهن‌گدازی

امروزه آهن در کارخانه‌های صنایع فولاد با روش اکسیژن اولیه یا در کارخانه‌ی کوچک‌تر از طریق قوس الکتریکی تولید می‌شوند. درروش اکسیژن اولیه، سنگ‌آهن مذاب یا آهن بازیافتی مذاب با ماده‌ی جانبی اکسید کلسیم (CaO) یا دولومیت ($CaMgCO$) در داخل کوره قرار می‌گیرند و از طریق یک سوزن اکسیژن با فشار زیاد به پاتیل کوره تزریق می‌شود. اکسیژن با ناخالصی‌ها ترکیب‌شده و آن‌ها را از آهن جدا می‌کند. بر روی آهن موجود گازهای کربن دی‌اکسید و کربن مونواکسید ایجاد می‌شوند، درعین‌حال اکسیدهای کلسیم، منگنز و خود آهن هم تشکیل می‌شوند. پس از سرازیر کردن کوره به یک سمت آهن تقریباً خالص از کوره خارج می‌شود. مواد باقی‌مانده در پاتیل کوره سپس از آن خارج‌شده و این مواد پس از سرد شدن، سرباره را تشکیل می‌دهند. سرباره محصولی مصنوعی و جانبی است که به هنگام جداسازی آهن در کوره‌های ذوب آهن از ناخالصی‌های موجود در سنگ آهن به وجود می‌آید. سرباره ترکیبی از سیلیکات و اکسیدهای فلزی پیچیده است که پس از سرد شدن مواد ناخالص، باقی می‌ماند. این

ترکیب پس از شکل گرفتن در مصارفی اعم از سیمان‌های سرباره‌ای و موادنسوز و پشم‌سرباره و بالاست-راه‌آهن و مصالح‌زیرسازی‌جاده و مصالح سنگی آسفالت و بتن کاربرد دارد. مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی با توجه به اطلاعات دریافتی از کارخانه ذوب‌آهن اصفهان مطابق شکل ۳-۵ می‌باشد.

22 - 42%	Tfe
4 - 8 %	CaO
6 - 9%	SiO2
0.5 - 1 %	MnO
0.3 - 0.65%	S
3 - 12%	H2O
25 - 45%	L.O.I
20 - 40%	C
8 - 15%	FeO

34-40%	SiO2
34-40%	CaO
10 -12%	Al2O3
7-10 %	MgO
0.6-2 %	MnO
0.45 - 0.7%	FeO
1.5-2.5%	TiO2
0.02-0.06 %	V2O5
0.5-0.8 %	Na2O
0.55-1.15%	K2O
1.0-1.55%	S
0.85-1.15%	CaO/SiO2
1-7%	H2O

شکل ۳-۵: مشخصات شیمیایی سرباره کوره آهن‌گدازی

۳-۳ برنامه آزمایشگاهی و ساخت طرح‌های مخلوط

طرح مخلوط بتن باید به‌گونه‌ای طراحی گردد که بتواند تمامی ویژگی‌های بتن تازه و سخت شده را برآورده نماید. مطابق با یک برنامه آزمایشگاهی، تعداد ۴۸ طرح مخلوط بتن خودتراکم موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور جهت محاسبه دقیق طرح‌های مخلوط برنامه‌ای در محیط نرم‌افزار اکسل بر طبق راهنمایی‌ها و ضوابط طرح ملی مخلوط بتن و همچنین ACI237 نوشته شد. در این برنامه ابتدا کلیه مشخصات

فیزیکی مصالح سنگی نظیر جذب آب، چگالی و درصد گذشته از الک ۲۰۰ در برنامه اکسل اعمال گردید. پس از اعمال کردن درصد سهم استفاده از مصالح و کنترل منحنی دانه‌بندی ترکیبی ترسیم‌شده، مقدار وزن پودر، حجم خمیر، حجم ملات، حجم درشت‌دانه، وزن مواد سیمانی، نسبت آب به فیلر و وزن آب مطابق ACI237 در برنامه نوشته‌شده کنترل گردید. محدودیت‌های آن در جدول ۳-۴ ملاحظه شود.

جدول ۳-۴: جدول الزامات ACI237 در طراحی بتن خودتراکم

Table 4.1—Suggested powder content ranges*

	Slump flow of < 22 in. (<550 mm)	Slump flow of 22 to 26 in. (550 to 600 mm)	Slump flow of >26 in. (>650 mm)
Powder content, lb/yd^3 (kg/m^3)	600 to 650 (355 to 385)	650 to 750 (385 to 445)	750+ (458+)

*or as needed for strength.

Table 4.2—Summary of SCC proportioning trial mixture parameters

Absolute volume of coarse aggregate*	28 to 32% (>1/2 in. [12 mm] nominal maximum size)
Paste fraction (calculated on volume)	34 to 40% (total mixture volume)
Mortar fraction (calculated on volume)	68 to 72% (total mixture volume)
Typical *w/cm*	0.32 to 0.45
Typical cement (powder content)	650 to 800 lb/yd^3 (386 to 475 kg/m^3) (lower with a VMA)

*Up to 50% (3/8 in. [10 mm] nominal maximum size).

همچنین در شرایط استفاده از سهم مصالح یکسان در تمامی طرح‌های مخلوط، از سه نسبت آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ در ساخت طرح‌ها استفاده گردید.

۳-۴ اصول اولیه ساخت طرح‌های مخلوط

در ابتدای هرروز درصد رطوبت مصالح گرفته‌شده و پس از اعمال درصد رطوبت مصالح مصرفی در برنامه اکسل، مصالح توزین گردیده و ابتدا سنگ‌دانه‌ها و پودر سنگ آهکی درون مخلوط‌کن ریخته شده و پس از یک دقیقه چرخیدن مخلوط‌کن و یکنواخت شدن مصالح، سیمان و پوزولان موجود و در انتها آب نیز به طرح‌ها اضافه می‌گردید. فوق روان کننده به‌عنوان تنها پارامتر متغیر طرح‌ها با توجه به رسیدن اسلامپ فلو در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتیمتر به طرح‌ها اضافه می‌گردید. در مرحله اولیه طراحی مخلوط‌ها، معیار اولیه پذیرش بتن نداشتن آب انداختگی و جداشدگی در مخلوط ساخته‌شده و درعین‌حال دارا بودن جریان اسلامپ در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتی‌متر موردنظر بوده است. پس از آزمایش اسلامپ فلو آزمایش‌های T50، حلقه J، جعبه L، قیف V و جعبه U انجام‌گرفته و نتایج آن‌ها در شیت‌ها ثبت گردید. سپس نمونه‌گیری از بتن ساخته‌شده صورت پذیرفته و نمونه‌ها مطابق با استاندارد ASTM C192 پس از ۲۴ ساعت عمل‌آوری در قالب و با یک‌لایه روکش پلاستیکی بلافاصله پس از خروج از قالب در حوضچه‌های آب با دمای استاندارد تا روز آزمون قرار گرفتند.

۳-۵ روش‌های طراحی مخلوط بتن خودتراکم

در مقالات گوناگون روش‌های طرح مخلوط زیادی راجع به بتن معمولی وجود دارد. روش حجم مطلق ACI، رایج‌ترین روشی است که در صنعت بتن استفاده می‌شود. به دلیل ویژگی‌های خاص بتن خودتراکم تازه، بایستی روش طرح مخلوط بتن معمولی مورد اصلاح و تغییر واقع شود. به‌طورکلی سه مفهوم مختلف از طرح و تولید بتن خودتراکم وجود دارد. بتن خودتراکم می‌تواند با بهره‌گیری از مواد پودری، مواد اصلاح‌کننده لزجت (VMA) یا به‌صورت ترکیبی از این دو ماده تولید شود. در کنار هرکدام از این مواد در بتن خودتراکم لازم است که از مقدار فوق روان کننده بیشتری نسبت به بتن معمولی استفاده شود. نوع پودری بتن خودتراکم، درکشورهای اروپائی به دلیل وجود سیمان‌های آمیخته دارای مواد پودری مطلوب،

رایج‌تر است. لزجت بتن خودتراکم می‌تواند توسط مواد پرکننده نظیر خاکستر بادی، پودر سنگ‌آهک، دوده سیلیسی و برخی انواع دیگر از مواد پرکننده افزایش یابد. در آمریکای شمالی تولید بتن خودتراکم دارای مواد اصلاح‌کننده‌ی لزجت، به دلیل کثرت وجود تولیدکننده‌های این ماده رایج‌تر می‌باشد.

در دهه ۱۹۹۰ میلادی با معرفی مواد اصلاح‌کننده لزجت، امکان ادامه حیات بتن خودتراکم به‌طور فزاینده‌ای بالا گرفت. کلیه مواد اصلاح‌کننده لزجت، ازنظر ساختار شیمیایی به دودسته تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول بر پایه سلولز اصلاح‌شده یا پیش ژلاتینه می‌باشد. دسته دوم نیز بر پایه پلی‌اتیلن – گلیکول و بیوپلی‌مرها می‌باشند [۲۹].

بتن خودتراکم در حالت تازه در کنار سایر نیازمندی‌هایش، نیازمند روانی بالا و توانائی مقاومت در برابر جداشدگی می‌باشد.

در ابتدا Okamura، روشی را پیشنهاد داد که در آن روش آزمایش‌هایی برای تعیین کیفیت خمیر سیمان و ملات و سازگاری مواد تشکیل‌دهنده بتن انجام می‌گیرد[۲۹]. انجمن بتن آماده ژاپن[۳۶] نیز روش طرح مخلوطی بر پایه روش Okamura پیشنهاد داد. جدول ۳-۵، مشخصات پیشنهادشده توسط جامعه مهندسی عمران ژاپن[۳۷] را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۵: مشخصات بتن خود تراکم ارائه‌شده توسط جامعه مهندسین عمران ژاپن [۲۹]

درجه قابلیت پرکنندگی		۱	۲	۳
شرایط ساخت	حداقل فاصله بین میلگردها (mm)	۳۰-۶۰	۶۰-۲۰۰	>۲۰۰
	Amt میلگرد مصرفی (kg/m^3)	>۳۵۰	۱۰۰-۳۵۰	۱۰۰>
حجم مطلق درشت‌دانه‌ها در هر مترمکعب بتن		۰/۲۸-۰/۳	۰/۳-۰/۳۳	۰/۳-۰/۳۶
قابلیت روانی	اسلامپ فلو (Cm)	۶۵-۷۵	۶۰-۷۰	۵۰-۶۵
مقاومت در برابر جداشدگی	زمان تخلیه قیف V (s)	۱۰-۲۰	۷-۲۰	۷-۲۰
	T50 Cm (اسلامپ فلو)	۵-۲۵	۳-۱۵	۳-۱۵

[36] JRMCA
[37] JSCE

Nausu، نیز روشی را در این زمینه ارائه کرده است[۲۹]. در این روش تمرکز اصلی بر روی پر کردن حفرات مابین سنگ‌دانه‌های شل ریخته شده، توسط خمیر سیمان است.

Efnarc نیز محدوده نسبت‌های نوعی، برای دستیابی به بتن خود تراکم را به شرح زیر ذکر نموده است. اصلاحات بیشتر برای حصول به مقاومت و سایر نیازهای اجرائی ضروری است[۳].

- نسبت حجمی آب به پودر (مواد ریز) بین ۰/۸ تا ۱/۱ می‌باشد.
- عیار کل مواد پودری در هر مترمکعب ۱۶۰ تا ۲۴۰ لیتر (حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ کیلوگرم) می‌باشد.
- عیار مصالح سنگی درشت‌دانه معمولاً ۲۸ تا ۳۵ درصد حجمی مخلوط می‌باشد.
- نسبت آب به سیمان با توجه به EN 206 انتخاب می‌شود. به‌طورکلی مقدار آب از ۲۰۰ لیتر در مترمکعب تجاوز نمی‌کند.
- عیار ماسه با توجه به سایر اجزاء به دست می‌آید. مقدار ماسه معمولاً بیش از ۳۸ درصد حجمی ملات است.

به‌طورکلی توصیه می‌شود که طراحی مخلوط به‌صورت محافظه‌کارانه انجام‌شده تا خواص بتن تازه علیرغم تغییرات کیفی مواد متشکله حفظ شود. تغییرات در رطوبت سنگ‌دانه‌ها باید به‌طورجدی مدنظر قرار گیرد چراکه نادیده گرفتن اهمیت درصد رطوبت سبب عدم کنترل دقیق خواص رئولوژیکی در بتن خودتراکم می‌گردد. معمولاً مواد اصلاح‌کننده‌ی لزجت، برای تنظیم نوسانات ناشی از تغییرات دانه‌بندی ماسه و رطوبت سنگ‌دانه‌ها می‌باشند.

۳-۵-۱ اصلاح و تعدیل مخلوط

ساخت بتن خودتراکم در آزمایشگاه به‌منظور دستیابی اولیه به خواص بتن تازه ازنظر رئولوژیکی و آزمودن خواص مکانیکی و دوام می‌باشد و پس از حصول نتایج قابل‌قبول بایستی در کارگاه‌های تولید بتن آماده زیر

نظر واحد کنترل کیفیت طرح‌های مخلوط در حجم گسترده ساخته شود که ممکن است با نتایج آزمایشگاه متفاوت باشد. برای تعدیل و اصلاح طرح‌های مخلوط بایستی اقدامات زیر بسته به شرایط و تجربه فنی واحد کنترل کیفیت صورت پذیرد:

_ استفاده بیشتر از پرکننده یا انواع دیگر پرکننده (در صورت امکان)

_ اصلاح نسبت‌های ماسه یا سنگ‌دانه درشت (شن)

- استفاده از ماده اصلاح‌کننده لزجت (درصورتی‌که قبلاً در طرح مخلوط نباشد)

- تعدیل میزان مصرف فوق روان کننده و یا اصلاح‌کننده لزجت

- استفاده از افزودنی‌های دیگر (فوق روان کننده یا VMA) به‌نحوی‌که با مواد موجود سازگارتر باشد.

- تعدیل میزان مصرف افزودنی در ارتباط با تعدیل مقدار آب و درنتیجه نسبت آب پودر

۳-۶ نرم‌افزار محاسبه طرح مخلوط

در پایان‌نامه حاضر برای طراحی و محاسبه طرح مخلوط بتن خودتراکم در نرم‌افزار Excel در مجموعه Office برنامه‌نویسی گردیده است. برنامه نوشته‌شده تلفیقی از طرح ملی مخلوط بتن و همچنین ضوابط و راهنمایی‌های ACI237 می‌باشد. بدین ترتیب که با اعمال اطلاعات اولیه نظیر انحراف معیار، جذب آب مصالح سنگی، وزن مخصوص مصالح، درصد رطوبت و همچنین دانه‌بندی مصالح سنگی، طرح مخلوط باراهنمایی‌های ACI237 کنترل گردیده و در انتها اطلاعات کافی جهت ساخت بتن را در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

لازم به ذکر است در هنگام ساخت طرح‌ها اگر وزنی از مصالح به بتن اضافه یا کسر گردد، نرم‌افزار قابلیت اصلاح مقادیر برای ساخت حجم دقیق یک مترمکعب را دارا می‌باشد. حال با توجه به اینکه در طرح‌های ساخته‌شده افزودنی فوق روان کننده به‌عنوان تنها پارامتر متغیر می‌باشد لذا مقادیر اصلاح‌شده جهت ساخت دقیق حجم یک مترمکعب بتن در پایان‌نامه حاضر صورت پذیرفته است.

۳-۶-۱ حداقل آزمایش‌های لازم برای طراحی مخلوط

در این قسمت کاربر حداقل آزمایش‌های لازم برای طراحی مخلوط بتن را انجام داده و مقادیر آن را در برنامه نوشته‌شده وارد می‌نماید.

جرم نمونه‌گیری از انبار، برای افزایش دقت بهتر است از حداقل مقادیر پیشنهادی ASTM C127 و ASTM C128 برای مصالح مختلف بیشتر باشد. جرم نمونه خشک‌شده در گرمچال (W_{Dry}) قطعاً کمتر و یا بعضاً به علت خشک بودن نمونه اصلی، مساوی با جرم مرطوب مصالح (W_{Wet}) است. پس می‌توان رطوبت مصالح را بر اساس ASTM C566-97 که می‌تواند صفر (مصالح کاملاً خشک) و یا بیشتر باشد از رابطه (۳-۱) برحسب درصد تعیین کرد.

$$\text{درصد رطوبت} = \frac{W_{Wet} - W_{Dry}}{W_{Dry}} \times 100 \qquad (۳-۱)$$

به دلیل وجود حفره در تمام مصالح، جرم اشباع با سطح خشک مصالح (W_{SSD}) قطعاً بیش از جرم خشک مصالح (W_{Dry}) می‌باشد. می‌توان درصد آب جذب‌شده توسط مصالح درشت‌دانه و ریزدانه را به ترتیب بر اساس استانداردهای ASTM C127 و ASTM C128 و از رابطه (۳-۲) به دست آورد.

$$\text{درصد جذب آب} = \frac{W_{SSD} - W_{Dry}}{W_{Dry}} \times 100 \qquad (۳-۲)$$

همچنین با توجه به رطوبت مصالح، جرم اشباع با سطح خشک نمونه می‌تواند کمتر، بیشتر و یا حتی مساوی با جرم نمونه از انبار باشد.

اگر ($W_{SSD} > W_{Wet}$) درصد رطوبت مصالح کمتر از درصد جذب آب مصالح است و مصالح برای اشباع شدن با سطح خشک (SSD) نیاز به آب دارد (آب مخلوط > آب آزاد).

اگر ($W_{SSD} = W_{Wet}$) در این حالت درصد رطوبت مصالح به‌قدری بوده که مصالح به‌خودی‌خود اشباع با سطح خشک (SSD) می‌باشد (آب مخلوط = آب آزاد).

اگر ($W_{SSD} < W_{Wet}$) درصد رطوبت مصالح بیشتر از درصد جذب آب مصالح است و مصالح از مرز اشباع شدن با سطح خشک (SSD) گذشته است. در این حالت قطعاً سطح دانه‌ها مرطوب و یا آب‌چکان است (آب مخلوط < آب آزاد).

برای تعیین چگالی مصالح در حالت اشباع با سطح خشک (چگالی SSD) و جذب آب مصالح، آن‌ها را به دو گروه درشت‌دانه و ریزدانه تقسیم‌بندی نموده و به ترتیب مطابق با استانداردهای ASTM C127 و ASTM C128 چگالی آن‌ها می‌تواند تعیین شود. چگالی مصالح درشت‌دانه به کمک جرم مستغرق در آب و برای مصالح ریزدانه از چگالی سنج استفاده می‌شود.

در صورت داشتن اطلاعات مقادیر جذب آب، درصد رطوبت و چگالی اشباع با سطح خشک مصالح، کاربر نرم‌افزار می‌تواند اعداد در دسترس را مستقیماً در قسمت‌های مربوطه وارد نماید و پس‌ازآن طرح مخلوط را طراحی نماید.

همچنین درصد شکستگی هرکدام از مصالح به‌ویژه شن‌ها باید توسط کاربر تعیین شود، زیرا در ادامه با توجه به سهم مصرفی سنگ‌دانه درصد شکستگی شن‌ها محاسبه و نسبت آب به سیمان اولیه که یکی از پارامترهای تعیین‌کننده آن درصد شکستگی است، توسط برنامه محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است مقادیر نسبت آب به سیمان با توجه به هدف طرح مخلوط‌ها در این پروژه مقادیر ثابت ۰/۴۰، ۰/۴۵ و ۰/۵۰ در نظر گرفته‌شده است. برای تعیین درصد شکستگی ماسه‌ها استانداردی وجود ندارد و به‌صورت چشمی توسط کاربر تعیین می‌شود.

در صورت استفاده از مصالح دیگر در بتن می‌توان در قسمت سایر نام آن‌ها را وارد نموده و پس از آزمایش-های لازم، مشخصات را در سلول‌های مربوطه وارد تا برنامه محاسبات را انجام دهد. در مراحل بعدی نیز با واردکردن اطلاعات لازم برای این مصالح محاسبات به‌صورت خودکار انجام می‌شود.

۳-۶-۲ دانه‌بندی مصالح سنگی

همان‌طور که در جدول ۳-۶ الی ۳-۸ نشان داده‌شده است، اگر مقادیر خواسته‌شده را برای هر مصالح برحسب گرم وارد کنیم برنامه درصد عبوری الک‌ها را برای هر مصالح تعیین و مدول نرمی هر مصالح را محاسبه می‌کند.

جدول ۳-۶: دانه‌بندی ماسه

دانه‌بندی ماسه				وزن نمونه ۹۹۸/۵ gr		گرم (قبل از شستشو)	
شماره و اندازه الک (mm)		وزن مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد مانده تجمعی	درصد عبوری از الک	محدوده استاندارد طبق ISIRI302	
						حداقل	حداکثر
۳/۸ "	۹/۵	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	
نمره ۴	۴/۷۵	۵۲	۵	۵/۲	۹۵	۸۹	
نمره ۸	۲/۳۶	۲۳۰/۹	۲۳	۲۸/۳	۷۲	۶۰	۱۰۰
نمره ۱۶	۱/۱۸	۲۵۴	۲۵	۵۳/۸	۴۶	۳۰	۹۰
نمره ۳۰	۰/۶	۱۹۱	۱۹	۷۲/۹	۲۷	۱۵	۵۴
نمره ۵۰	۰/۳	۱۷۱	۱۷	۹۰	۱۰	۵	۴۰
نمره ۱۰۰	۰/۱۵	۷۵	۸	۹۷/۵	۲	۰	۱۵
زیرالک		۲۴/۶	۲	۱۰۰	-		

جدول ۳-۷: دانه‌بندی شن نخودی

دانه‌بندی شن ریز (نخودی)				وزن نمونه ۹۹۸ gr		گرم (قبل از شستشو)	
شماره و اندازه الک (mm)		وزن مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد مانده تجمعی	درصد عبوری از الک	محدوده استاندارد طبق ISIRI302	
						حداقل	حداکثر
۳/۴ "	۱۹	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱/۲ "	۱۲/۵	۰	۰	۰	۱۰۰	۹۰	۱۰۰
۳/۸ "	۹/۵	۱۶۴/۲	۱۶	۱۶/۵	۸۴	۴۰	۷۰

نمره ۴	۴/۷۵	۸۱۸/۳	۸۲	۹۸/۴	۲	۰	۱۵
نمره ۸	۲/۳۶	۱۵/۴	۲	۱۰۰	۰	۰	۵
زیرالک		۰	۰	۱۰۰	-		

جدول ۳-۸: دانه‌بندی ماسه‌بادی

دانه‌بندی ماسه‌بادی				وزن نمونه ۱۰۰۰ gr		گرم (قبل از شستشو)	
شماره و اندازه الک (mm)		وزن مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک	درصد مانده تجمعی	درصد عبوری از الک	محدوده استاندارد طبق ISIRI302	
						حداقل	حداکثر
۳/۸ "	۹/۵	۰	۰	۰	۱۰۰	۱۰۰	
نمره ۴	۴/۷۵	۲۰	۲	۲	۹۸	۸۹	
نمره ۸	۲/۳۶	۴۰	۴	۶	۹۴	۶۰	۱۰۰
نمره ۱۶	۱/۱۸	۳۰	۳	۹	۹۱	۳۰	۹۰
نمره ۳۰	۰/۶	۳۰	۳	۱۲	۸۸	۱۵	۵۴
نمره ۵۰	۰/۳	۱۹۰	۱۹	۳۱	۶۹	۵	۴۰
نمره ۱۰۰	۰/۱۵	۴۹۰	۴۹	۸۰	۲۰	۰	۱۵
زیرالک		۲۰۰	۲۰	۱۰۰	-		

برای دانه‌بندی بر اساس ASTM C136، نمونه‌های مصالح از انبار ابتدا کاملاً خشک کرده و توزین می‌شوند. جهت دقت بیشتر در آزمایش، وزن‌های نمونه قبل از شستشو باید بیشتر از حداقل مقادیر استاندارد مذکور برای هراندازه دانه باشد. سپس همان نمونه‌ها (به‌صورت دقیق بدون کاهش یا افزایش وزن) روی الک نمره ۲۰۰ شسته شده و مجدداً خشک و توزین می‌شوند. شستشو مصالح روی الک نمره ۲۰۰ به دلیل تعیین درصد عبوری از الک ۲۰۰ (ریزدانه‌های کوچک‌تر از ۷۵ میکرون) است. بعضاً ممکن است مصالح درشت‌دانه دارای ترکیبی از نخودی و بادامی باشند که در این صورت می‌توان مقادیر توزین شده را دریکی از ستون‌ها وارد نمود.

درصد مانده تجمعی همان الک - (۱۰۰٪) = درصد عبوری هر الک

برای تعیین کیفیت نسبی مصالح ازنظر تمیزی، برنامه درصد عبوری از الک ۲۰۰ هر یک از مصالح را به‌صورت مجزا تعیین نموده و با مقادیر مجاز کنترل می‌کند و در صورت تجاوز از مقدار مجاز برنامه با رنگی

کردن سلول هشدار می‌دهد. از تقسیم اختلاف وزن‌های خشک نمونه در قبل و بعد از شستشو روی الک نمره ۲۰۰ به وزن خشک پس از شستشو، درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ تعیین می‌شود.

همچنین مدول نرمی هر یک از مصالح سنگی، با کسر مجموع درصدهای عبوری از الک‌های ۳۷/۵، ۱۹، ۹/۵، ۴/۷۵، ۲/۳۷، ۱/۱۹، ۰/۶، ۰/۳ و ۰/۱۵ میلی‌متر از عدد ۹۰۰ برحسب درصد محاسبه می‌شود.

به همین صورت درصدهای عبوری از هر الک و مدول نرمی برای هر نوع از مصالح سنگی توسط برنامه به‌صورت خودکار محاسبه می‌شود. جدول ۳-۹ نتایج دانه‌بندی را نشان می‌دهد.

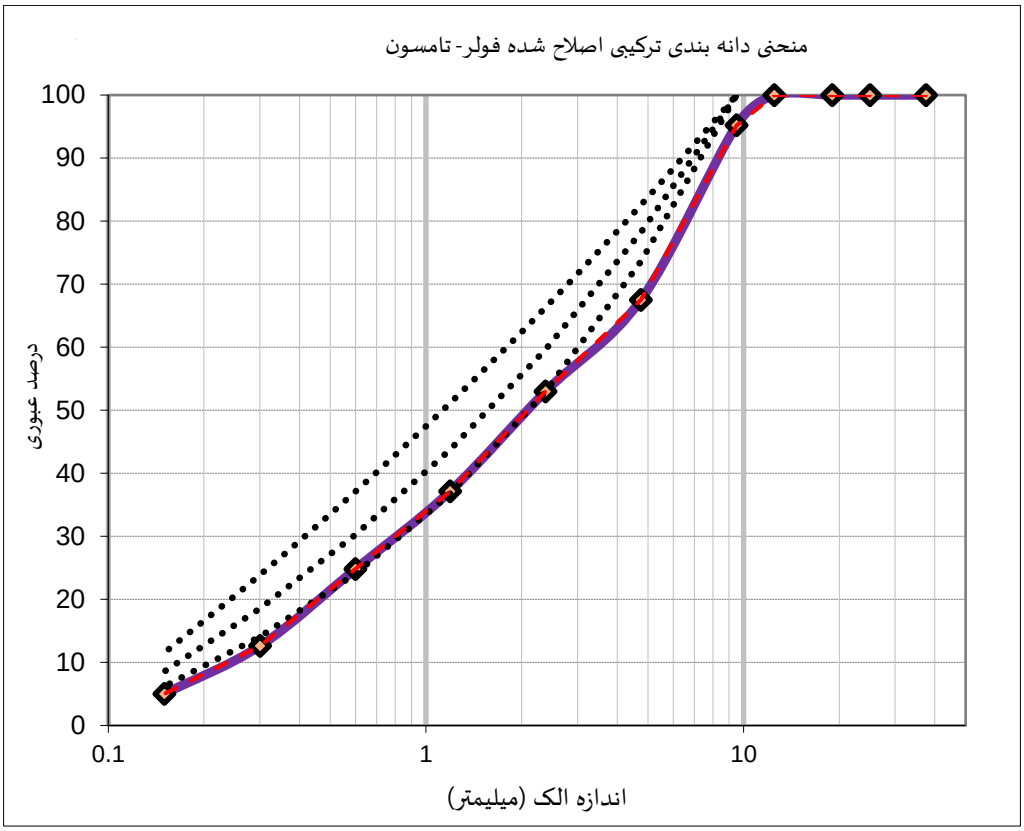
جدول ۳-۹: نتایج دانه‌بندی مصالح

دانه‌بندی مصالح و محدوده دانه‌بندی طبق رابطه اصلاح‌شده فولر تامسون $P = 100\% * [(d/D)^n - (0.075/D)^n] / [1-(0.075/D)^n]$										
الک	اندازه الک	نتیجه آزمایش دانه‌بندی					ترکیب اولیه مصالح	ترکیب نهایی مصالح	N		
	mm	شن متوسط (بادامی)	شن ریز (نخودی)	ماسه	ماسه‌بادی	پودر سنگ			۰/۳۵	۰/۲۲۵	۰/۱
۱ ۱/۲	۳۷/۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	**۱۰۰**	**۱۰۰**			
۱	۲۵	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	**۱۰۰**	**۱۰۰**			
۳/۴	۱۹	۸۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	**۱۰۰**	**۱۰۰**			
۱/۲	۱۲/۵	۸	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	**۱۰۰**	**۱۰۰**			
۳/۸	۹/۵	۰	۸۴	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	**۹۵**	**۹۵**	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۴	۴/۷۵	۰	۲	۹۵	۹۸	۱۰۰	**۶۸**	**۶۸**	۷۴	۷۸	۸۳
۸	۲/۳۸	۰/۴	۰	۷۲	۹۵	۱۰۰	**۵۳**	**۵۳**	۵۳	۶۰	۶۶
۱۶	۱/۱۹	۰/۴	۰/۲	۴۶	۹۱	۹۷	**۳۷**	**۳۷**	۳۷	۴۴	۵۱
۳۰	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۲۷	۸۸	۸۴	**۲۵**	**۲۵**	۲۴	۳۰	۳۷
۵۰	۰/۳	۰/۴	۰/۲	۱۰	۶۹	۶۳	**۱۳**	**۱۳**	۱۴	۱۹	۲۴
۱۰۰	۰/۱۵	۰/۴	۰/۲	۲	۲۰	۴۹	**۵**	**۵**	۶	۹	۱۲
۲۰۰	۰/۰۷۵	۰/۴	۰/۲	۱	۹	۴۴	**۴**	**۴**	۰	۰	۰

ابتدا کاربر باید مقادیر n پیشنهادی را از مرجع[۲]تعیین نماید. به‌هرحال توصیه می‌شود کاربر برای اطلاعات بیشتر از انتخاب n با توجه به نوع قطعه و همچنین تجربیاتی در مورد انتخاب سهم برای نزدیک شدن به محدوده به مرجع[۲] رجوع نماید. درواقع با انتخاب n، محدوده دانه‌بندی ترکیب مصالح سنگی در بتن با توجه به رابطه اصلاح‌شده فولر-تامسون مشخص می‌شود. با توجه به همین محدوده طراحی و قضاوت مهندسی انجام می‌گیرد. سپس سهم حجمی مصالح سنگی به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که منحنی ترکیب سنگ‌دانه‌ها (خط‌چین پررنگ) بر منحنی محدوده دانه‌بندی (سه محدوده) منطبق و یا نزدیک شود. در بتن خودتراکم لزوماً بهتر است قسمت پایین منحنی (بخش ریزدانه) برپوش‌های پیشنهادی منطبق شود. در شکل ۳-۶ منحنی دانه‌بندی ترکیبی مصالح با توجه به اطلاعات جدول ۳-۱۰ ارائه‌شده است.

جدول ۳-۱۰: سهم استفاده از مصالح و مدول نرمی در طرح‌های مخلوط

مصالح	سهم	مدول نرمی FM
شن ریز (نخودی)	۳۰	۶/۱۳
ماسه	۶۰	۳/۴۸
ماسه‌بادی	۴	۱/۳۹
پودر سنگ	۶	۱/۰۷
ترکیب سنگ‌دانه‌ها	۱۰۰	۴/۰۵



شکل ۳-۶: منحنی دانه‌بندی ترکیبی اصلاح‌شده فولر-تامسون

منحنی دانه‌بندی هر نوع از مصالح به‌صورت مجزا ترسیم و با محدود مجاز مقایسه می‌شود و کاربر می‌تواند قضاوت مهندسی انجام دهد. محدوده مجاز دانه‌بندی برای ماسه‌ها با توجه به مرجع [۳۰] تعیین‌شده است، لیکن محدوده مجاز برای شن‌ها با توجه به‌اندازه اسمی سنگ‌دانه متغیر است. کاربر با توجه به مرجع[۳۰]محدوده مجاز را برای شن نخودی و بادامی در جدول ۳-۱۱ تعیین می‌کند.

جدول ۳-۱۱: محدوده مجاز دانه‌بندی

محدوده استاندارد دانه بندی						
اندازه الک	شن متوسط		شن ریز		ماسه ها	
mm	Min	Max	Min	Max	Min	Max
۳۷.۵	۱۰۰	۱۰۰	–	–	*	*
۲۵	۹۰	۱۰۰	–	–	*	*
۱۹	۴۰	۸۵	۱۰۰	۱۰۰	*	*
۱۲.۵	۱۰	۴۰	۹۰	۱۰۰	*	*
۹.۵	۰	۱۵	۴۰	۷۰	۱۰۰	۱۰۰
۴.۷۵	۰	۵	۰	۱۵	۸۹	۱۰۰
۲.۳۸	*	*	۰	۰	۶۰	۱۰۰
۱.۱۹	*	*	*	*	۳۰	۹۰
۰.۶	*	*	*	*	۱۵	۵۴
۰.۳	*	*	*	*	۵	۴۰
۰.۱۵	*	*	*	*	۰	۱۵

شکل ۳-۷: مصالح مصرفی برای ساخت بتن خودتراکم

۳-۶-۳ مشخصات سیمان، مواد سیمانی و افزودنی‌ها

کاربر نوع سیمان مصرفی در بتن را که شامل سیمان‌های تولیدی ایران است را تعیین می‌کند. همچنین در صورت داشتن مقاومت فشاری ۲۸ روزه و چگالی سیمان مصرفی در آزمایشگاه، کاربر مقدار آن‌ها را وارد می‌نماید. در غیر این صورت برنامه از مقادیر پیش‌فرض استفاده می‌کند.

برای تعیین نسبت آب به سیمان یکی از دو گزینه با فوق روان کننده و یا بدون فوق روان کننده را تعیین می‌کند که در پروژه انجام‌شده مقادیر نسبت آب به سیمان به نرم‌افزار داده‌شده است و فوق روان کننده به‌عنوان تنها پارامتر متغیر طرح‌ها می‌باشد. همچنین در صورت استفاده از مواد سیمانی و مواد افزودنی شیمیایی نوع آن را از لیست انتخاب و چگالی و درصد مصرف نسبت به مجموع سیمان و مواد سیمانی توسط کاربر تعیین‌شده و برنامه وزن‌ها را برای یک مترمکعب محاسبه می‌کند که در تحقیق انجام‌شده میزان مصرف‌شده در آزمایشگاه به نرم‌افزار اعمال گردید و نرم‌افزار مقدار مصرف فوق روان کننده را برای ساخت یک مترمکعب محاسبه نمود. در جدول ۳-۱۲ خواص فیزیکی مواد سیمانی استفاده‌شده در طرح‌های مخلوط آورده شده است.

جدول ۳-۱۲: مشخصات خواص فیزیکی مواد سیمانی

	وزن مخصوص kg/m^3
سیمان	۳۱۶۴
میکروسیلیس	۲۲۰۰
پوزولان خاش	۲۶۰۰
زئولیت	۲۳۰۰
سرباره کوره آهن‌گدازی	۲۷۵۰

۳-۶-۴ طراحی مخلوط بتن خودتراکم

درصد شکستگی معادل سنگ‌دانه‌های درشت و درصد شکستگی معادل کل سنگ‌دانه‌ها از روابط (۳-۳) و (۳-۴) تعیین‌شده و به ترتیب از آن‌ها برای تعیین نسبت آب به سیمان و تعیین آب آزاد حداقل استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است نسبت‌های آب به سیمان با توجه به هدف تحقیق حاضر به نرم‌افزار داده می‌شود و در ذیل روش مرسوم طراحی مخلوط با توجه به روش ملی طرح مخلوط بتن آورده شده است.

$$a_{nG} = \frac{P_1.a_{n1} + P_2.a_{n2}}{P_1 + P_2} \qquad (۳-۳)$$

$$a_{ne} = \frac{P_G.a_{nG} + 2P_s.a_{ns}}{P_G + 2P_s} \qquad (۳-۴)$$

a_{nG} = درصد شکستگی متوسط شن‌ها

a_{ni} = درصد شکستگی هر یک از شن‌ها

P_i = سهم هر یک از شن‌ها

a_{ne} = معادل درصد شکستگی متوسط مخلوط سنگ‌دانه‌های بتن

a_{nG} = درصد شکستگی متوسط شن‌ها

a_{ns} = درصد شکستگی متوسط تقریبی ماسه‌ها

P_G = مجموع سهم شن‌ها

P_S = مجموع سهم ماسه‌ها

حجم خمیر و سنگ‌دانه از روابط (۳-۵) و (۳-۶) نیز برای واحد حجم مترمکعب محاسبه می‌شود. حجم خمیر (V_{paste}) به ترتیب شامل مجموع حجم مواد سیمانی (CM)، حجم آب، حجم سیمان و حجم هوا است.

$$V_{paste} = \sum_{CM} \frac{W}{\gamma} + \sum_{\text{Additives}} \frac{W}{\gamma} + \frac{W_{Cement}}{\gamma_{cement}} + V_{Air} \qquad (۵-۳)$$

$$V_{\text{Aggregate}} = 1000 - V_{paste} \qquad (۶-۳)$$

هم‌زمان با تغییرات سهم مصالح، وزن اشباع با سطح خشک مصالح (W_{SSD}) با توجه به رابطه (۳-۷) تعیین می‌شود.

$$W_{SSD} = \gamma_{SSD} \times V_{Aggregate} \times \text{سهم‌در مخلوط} \% \times \frac{\text{حجم مورد نیاز}}{1000} \qquad (۷-۳)$$

مدول نرمی ترکیب سنگ‌دانه‌ها نیز مانند تعیین مدول نرمی مجزا مصالح برای درصدهای عبوری از الک‌های ۳۷/۵، ۱۹، ۹/۵، ۴/۷۵، ۲/۳۷، ۱/۱۹، ۰/۶، ۰/۳، ۰/۱۵، میلی‌متر در منحنی ترکیب سنگ‌دانه‌ها محاسبه می‌شود.

بزرگ‌ترین اندازه اسمی سنگ‌دانه عبارت است از اندازه کوچک‌ترین الکی که حداکثر ۱۰ درصد وزنی سنگ‌دانه‌ها روی آن باقی بماند. برنامه با درون‌یابی این مقدار را تعیین می‌کند و در فرمول فولر- تامسون از این مقدار استفاده می‌کند.

در کنترل‌های بتن خودتراکم مطابق با پیشنهادهای ارائه‌شده موارد زیر در نظر گرفته می‌شود:

پودر: در این نرم‌افزار و پایان‌نامه حاضر به تمام ذرات کوچک‌تر از ۰/۰۷۵ میلی‌متر یا ۷۵ میکرون پودر اطلاق می‌شود. شامل وزن درصد عبوری از الک ۲۰۰ مصالح سنگی، وزن کامل سیمان و مواد سیمانی می‌شود.

حجم سنگ‌دانه‌ها: اگر از کل حجم بتن، حجم خمیر سیمان (سیمان، مواد سیمانی، آب و فوق روان کننده) و حجم هوای فرضی در طرح مخلوط کاسته شود، حجم باقی‌مانده همان حجم سنگ‌دانه‌ها در بتن است.

سهم ماسه و شن در ترکیب سنگ‌دانه‌ها: از ترکیب مصالح سنگی به دست می‌آید. به‌طوری‌که پودر، ماسه‌بادی و مقدار درصد عبوری از الک نمره ۴ شن نیز به‌عنوان سهم ماسه شناخته می‌شود. همچنین درصد مانده روی الک نمره ۴ ماسه در سهم شن تأثیر می‌گذارد. به‌طور خلاصه عبوری از الک نمره ۴ در ترکیب مصالح را ماسه و مانده روی الک نمره ۴ شن نامیده شده است.

سهم ماسه و شن در کل مخلوط: از حاصل‌ضرب سهم فوق در نسبت کل حجم سنگ‌دانه در مخلوط این سهم قابل‌تعیین است. قطعاً سهم ماسه و شن در کل مخلوط کمتر از سهم آن‌ها در ترکیب سنگ‌دانه‌هاست.

۳-۶-۴-۱ کنترل وزنی عبوری از الک ۲۰۰

الزاماً فقط درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ و یا آزمایش ارزش ماسه‌ای معیار قضاوت مهندسی نیست. ممکن است درصدهای عبوری از الک نمره ۲۰۰ خاصیت رسی نداشته و مانند پُرکننده مفید واقع شوند. بدین منظور پیشنهاد می‌شود خاصیت خمیری و شاخص خمیری برای ریزدانه‌ها تعیین و ازنظر رفتار رسی بررسی شوند و سپس قضاوت مهندسی صورت پذیرد.

اغلب ممکن است موارد فوق انجام نشود و صرفاً درصد عبوری از الک نمره ۲۰۰ برای هر یک از مصالح به‌صورت مجزا با مقادیر مجاز در مرجع[۳۰] مقایسه شود. لیکن اشاره به این نکته ضروری است که اگر کنترل عبوری از الک ۲۰۰ برای مصالح به‌صورت مجزا برای مانند ماسه‌بادی موردقبول واقع نشد آیا امکان استفاده از این مصالح وجود ندارد؟ در پاسخ به این سؤال می‌توان این‌گونه بیان نمود که ممکن است وزن

عبوری از الک ۲۰۰ در ترکیب مصالح کاهش‌یافته و از مقدار مجاز کمتر شود. به همین منظور برنامه مقادیر وزنی موجود و مجاز درصدهای عبوری از الک ۲۰۰ را در هر مترمکعب برای هر مصالح به‌صورت مجزا محاسبه می‌کند. مقادیر مجاز و موجود به ترتیب از حاصل‌ضرب وزن مصالح خشک در درصدهای موجود و مجاز همان مصالح محاسبه و باهم مقایسه می‌شود. همچنین مقادیر موجود و مجاز وزنی عبوری از الک ۲۰۰ درمجموع ماسه‌ها (ماسه‌بادی، ماسه شسته، ماسه شکسته)، شن‌ها (بادامی و نخودی) و در کل مصالح با جمع جبری قابل‌محاسبه و با مقدار مجاز نیز قابل‌مقایسه است. بدیهی است که مقادیر وزنی عبوری از الک ۲۰۰ در یک مترمکعب بتن وابسته به سهم هر مصالح است. در جدول ۳-۱۳ کنترل وزن عبوری از الک ۲۰۰ نیز آورده شده است.

جدول ۳-۱۳: کنترل درصد وزنی عبوری از الک ۲۰۰

مصالح	کنترل مقدار مواد عبوری از الک ۲۰۰	
	مجاز	موجود
شن ریز (نخودی)	۵/۲۴	۱/۲۶
ماسه	۵۲/۸۶	۱۱/۶۳
ماسه‌بادی	۳/۷۴	۶/۳۶
مجموع	**۶۱/۸۴**	**۱۹/۲۵**

۳-۶-۵ اصلاح طرح‌ها

در این قسمت ابتدا کاربر حجم بتنی که نیاز دارد را مشخص می‌کند. سپس مقادیر وزنی طرح اولیه موردنظر برای سه حالت رطوبتی مصالح برای اجزاء تشکیل‌دهنده بتن توسط برنامه به‌صورت خودکار محاسبه و نشان

داده می‌شود. برای ساخت بتن مقادیر وزن و یا حجم مرطوب مورداستفاده قرار می‌گیرد. از مقادیر وزنی و حجمی در حالات رطوبتی SSD و خشک، برای تعیین آب آزاد، آب کل و آب مخلوط استفاده‌شده است. جرم SSD (W_{SSD})، جرم خشک (W_{Dry}) و جرم مرطوب (W_{Wet}) از روابط زیر قابل‌محاسبه است.

$$W_{SSD} = \gamma_{SSD} \times V_{\text{Aggregate}} \times \%\,\text{سهم‌در مخلوط} \times \frac{\text{حجم‌مورد نیاز}}{1000} \qquad (۸-۳)$$

$$W_{Dry} = \frac{W_{SSD}}{1 + \frac{\text{درصد جذب آب}}{100}} \qquad (۹-۳)$$

$$W_{Wet} = W_{Dry} \times (1 + \frac{\text{درصد رطوبت}}{100}) \qquad (۱۰-۳)$$

آب محاسبه‌شده در حالت SSD همان آب فعال یا آب آزاد است که با کنترل‌های حداقل و حداکثر توسط کاربر تعیین‌شده است.

برای محاسبه آب کل باید مقدار آبی که مصالح نیاز دارند تا به حالت SSD (اشباع با سطح خشک) درآیند را به آب آزاد طرح اضافه نمود. سپس اگر از آب کل طرح مخلوط، آب موجود در مصالح (جمله داخل پرانتز رابطه (۳-۱۲) کسر شود آب مخلوط به دست می‌آید. آب کل و آب مخلوط نیز با استفاده از روابط زیر محاسبه‌شده است:

$$\text{آب کل} = \text{آب آزاد} + (\sum_{\text{مصالح}} W_{SSD} - \sum_{\text{مصالح}} W_{Dry}) \qquad (۱۱-۳)$$

$$\text{آب مخلوط} = \text{آب کل} - (\sum_{\text{مصالح}} W_{Wet} - \sum_{\text{مصالح}} W_{Dry}) \qquad (۱۲-۳)$$

همان‌طور که پیش‌تر بیان شد آب مخلوط ممکن است مساوی با آب کل (اگر مصالح کاملاً خشک باشند $W_{Wet} = W_{Dry}$) و یا مساوی با آب فعال (اگر مصالح کاملاً SSD باشند $W_{Wet} = W_{SSD}$) به دست آید. اغلب

ممکن است با توجه به درصد رطوبت و جذب آب مصالح، آب مخلوط کمتر یا بیشتر از آب فعال توسط برنامه محاسبه شود.

موضوعی که محاسبات آن بسیار تأثیرگذار بوده و بعضاً توسط طراح مخلوط در طرح‌های آزمایشگاهی نادیده گرفته می‌شود، اصلاح طرح مخلوط در حین اختلاط است. ممکن است مقداری از آب طرح و یا مواد افزودنی در حین اختلاط به مخلوط اضافه نشود و یا جهت اصلاح مخلوط از آب، مواد افزودنی، حتی مصالح سنگی و مواد سیمانی بیشتری نسبت به طرح اولیه به مخلوط‌کن اضافه شود. بدیهی است نگه‌داشتن اجزاء طرح و یا افزودن بیشتر اجزاء نسبت به طرح اولیه به مخلوط‌کن، سبب کاهش و یا افزایش حجم طراحی می‌شود. چون نسبت‌ها در طرح مخلوط برای حجم واحد است درنتیجه طرح اولیه کاملاً تغییر کرده و مقادیر عیار سیمان، نسبت آب به سیمان، درصد مصرف مواد سیمانی و افزودنی و حتی قرارگیری منحنی دانه‌بندی در محدوده مجاز و کنترل‌های مربوط به بتن خودتراکم تحت تأثیر قرارگرفته و باید مجدد بررسی شوند.

در صورت افزودن و یا نگه‌داشتن مصالح پس از واردکردن مقادیر آن‌ها، برنامه به‌صورت خودکار و معکوس به ترتیب جرم مرطوب، جرم خشک و جرم SSD طرح اصلاحی را محاسبه می‌کند.

$$W_{Wet}\text{اصلاح‌شده} = W_{Wet} + (\text{نگه‌داشتن مصالح}) - (\text{افزودن مصالح}) \qquad (۱۳-۳)$$

$$W_{Dry}\text{اصلاح‌شده} = \frac{W_{Wet}\text{اصلاح شده}}{(1+\frac{\text{درصدرطوبت}}{100})} \qquad (۱۴-۳)$$

$$W_{SSD}\text{اصلاح‌شده} = W_{Dry} \times (1+\frac{\text{درصدجذب آب}}{100}) \qquad (۱۵-۳)$$

واضح است با داشتن جرم اصلاح‌شده و چگالی SSD مصالح می‌توان حجم SSD طرح اصلاح‌شده را نیز با استفاده از رابطه $V=\frac{W}{\gamma}$ به دست آورد. حجم نهایی طرح اصلاح‌شده از مجموع احجام SSD اجزاء مخلوط و حجم آب به همراه در نظر گرفتن حجم هوا از رابطه ۳-۱۶ به دست می‌آید.

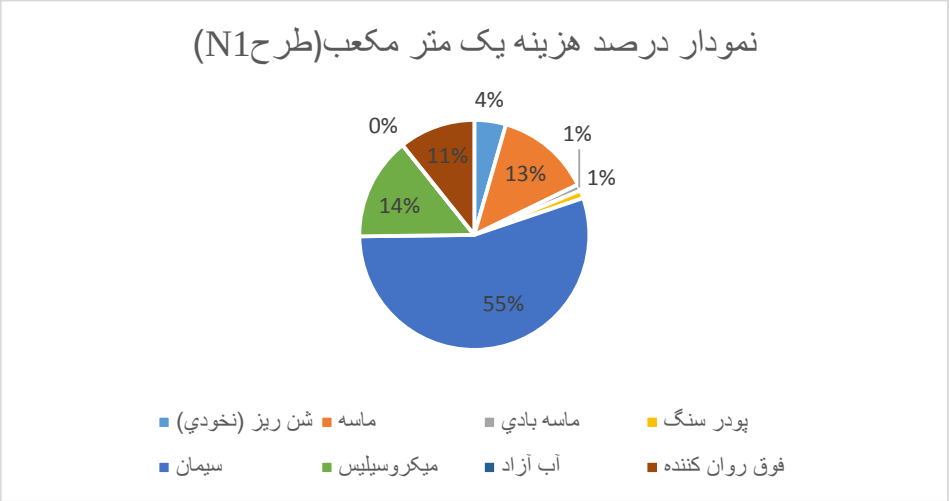
$$\text{حجم نهایی مخلوط } V=\frac{\sum_{\text{اجزاء مخلوط}} V_{SSD}+V_{Water}}{(1+\frac{\text{درصدهوا}}{100})} \qquad (۱۶-۳)$$

جرم SSD نهایی هریک از اجزاء مخلوط برای حجم واحد مترمکعب از رابطه (۳-۱۷) به‌صورت خطی قابل‌محاسبه است.

$$\text{جرم نهایی مخلوط پس از اصلاح } W_{SSD}=\frac{\text{اصلاح شده } W_{SSD}}{\text{نهايي مخلوط } V}\times 1000 \qquad (۱۷-۳)$$

۳-۶-۶ برآورد هزینه

در این بخش کاربر قیمت هر تن از اجزاء مخلوط را در حجم واحد مترمکعب تعیین می‌کند. برنامه به‌صورت خودکار قیمت اجزاء مصرف‌شده در طرح نهایی مخلوط و قیمت کل مخلوط و درصد سهم هزینه را برای یک مترمکعب محاسبه می‌کند. به عنوان نمونه درصد سهم هزینه در طرح مخلوط و نمودار هزینه اجزاء مخلوط در شکل ۳ -۸ و جدول ۳-۱۴ نشان داده شده است.(براساس قیمت‌های سه ماه اول سال ۱۳۹۶ شهر مشهد)



شکل ۳-۸: نمودار درصد هزینه تولید هر مترمکعب (طرح N۱)

جدول ۳-۱۴: برآورد هزینه طرح N۱ برای هر مترمکعب

وزن مصالح			قیمت یک کیلوگرم مصالح(ریال)	قیمت کل	درصد هزینه
شن ریز (نخودی)	kg/m³	۵۱۷	۸۰	۴۱۳۹۸	%۴
ماسه	kg/m³	۱۰۳۵	۱۲۰	۱۲۴۱۹۵	%۱۳
ماسه‌بادی	kg/m³	۶۹	۱۲۰	۸۲۸۰	%۱
پودر سنگ	kg/m³	۱۰۴	۱۰۰	۱۰۴۲۷	%۱
سیمان	kg/m³	۴۲۷	۱۲۰۰	۵۱۱۸۶۶	%۵۵
میکروسیلیس	kg/m³	۲۲	۶۰۰۰	۱۳۴۷۰۲	%۱۴
آب آزاد	kg/m³	۱۹۰	۱۰	۱۹۰۰	%۰
فوق روان کننده	kg/m³	۱/۴۳	۷۰۰۰۰	۹۹۷۷۹	%۱۱
			قیمت هر مترمکعب	**۹۳۰۶۴۷**	

۳-۷ روش اختلاط مصالح

پس از توزین مصالح و ریختن مصالح به داخل مخلوط‌کن، آن‌ها را مخلوط کرده و مشخص است که روش اختلاط مصالح، یکی از پارامترهای مؤثر در تهیه یک بتن همگن می‌باشد. در ابتدای هرروز درصد رطوبت مصالح گرفته‌شده و پس از توزین مصالح، ابتدا سنگ‌دانه‌ها و پودر سنگ آهکی درون مخلوط‌کن ریخته شد و پس از یک دقیقه چرخیدن مخلوط‌کن و یکنواخت شدن مصالح، سیمان و پوزولان و در انتها آب نیز به طرح اضافه می‌گردد. فوق روان کننده به‌عنوان تنها پارامتر متغیر طرح‌ها با توجه به رسیدن اسلامپ فلو در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتی‌متر به طرح‌ها اضافه شود.

۳-۸ نام‌گذاری مخلوط‌های بتن خودتراکم

نام‌گذاری طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم ساخته‌شده در جدول ۳-۱۵ ارائه گردیده است.

جدول ۳-۱۵: نام‌گذاری و درصد مصرف پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در بتن خودتراکم

ردیف	نام نمونه	نسبت آب به مواد سیمانی	درصد مصرف پوزولان	نوع پوزولان	عیار مواد سیمانی
۱	N۱	۰/۴۰	%۵	میکروسیلیس	۴۵۰
۲	N۲	۰/۴۵	%۵	میکروسیلیس	۴۵۰
۳	N۳	۰/۵۰	%۵	میکروسیلیس	۴۵۰
۴	N۴	۰/۴۰	%۷/۵	میکروسیلیس	۴۵۰
۵	N۵	۰/۴۵	%۷/۵	میکروسیلیس	۴۵۰
۶	N۶	۰/۵۰	%۷/۵	میکروسیلیس	۴۵۰
۷	N۷	۰/۴۰	%۱۰	میکروسیلیس	۴۵۰
۸	N۸	۰/۴۵	%۱۰	میکروسیلیس	۴۵۰

ادامه جدول ۳-۱۵: نام‌گذاری و درصد مصرف پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در بتن خودتراکم

۹	N۹	۰/۵۰	%۱۰	میکروسیلیس	۴۵۰
۱۰	N۱۰	۰/۴۰	%۱۵	خاش	۴۵۰
۱۱	N۱۱	۰/۴۵	%۱۵	خاش	۴۵۰
۱۲	N۱۲	۰/۵۰	%۱۵	خاش	۴۵۰
۱۳	N۱۳	۰/۴۰	%۲۵	خاش	۴۵۰
۱۴	N۱۴	۰/۴۵	%۲۵	خاش	۴۵۰
۱۵	N۱۵	۰/۵۰	%۲۵	خاش	۴۵۰
۱۶	N۱۶	۰/۴۰	%۳۵	خاش	۴۵۰
۱۷	N۱۷	۰/۴۵	%۳۵	خاش	۴۵۰
۱۸	N۱۸	۰/۵۰	%۳۵	خاش	۴۵۰
۱۹	N۱۹	۰/۴۰	%۵	زئولیت	۴۵۰
۲۰	N۲۰	۰/۴۵	%۵	زئولیت	۴۵۰
۲۱	N۲۱	۰/۵۰	%۵	زئولیت	۴۵۰
۲۲	N۲۲	۰/۴۰	%۱۰	زئولیت	۴۵۰
۲۳	N۲۳	۰/۴۵	%۱۰	زئولیت	۴۵۰
۲۴	N۲۴	۰/۵۰	%۱۰	زئولیت	۴۵۰
۲۵	N۲۵	۰/۴۰	%۱۵	زئولیت	۴۵۰
۲۶	N۲۶	۰/۴۵	%۱۵	زئولیت	۴۵۰
۲۷	N۲۷	۰/۵۰	%۱۵	زئولیت	۴۵۰

ادامه جدول ۳-۱۵: نام‌گذاری و درصد مصرف پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در بتن خودتراکم

۲۸	N۲۸	۰/۴۰	%۲۵	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۵۰
۲۹	N۲۹	۰/۴۵	%۲۵	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۵۰
۳۰	N۳۰	۰/۵۰	%۲۵	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۵۰
۳۱	N۳۱	۰/۴۰	%۳۵	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۵۰
۳۲	N۳۲	۰/۴۵	%۳۵	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۵۰
۳۳	N۳۳	۰/۵۰	%۳۵	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۵۰
۳۴	N۳۴	۰/۴۰	%۱۵	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۵۰
۳۵	N۳۵	۰/۴۵	%۱۵	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۵۰
۳۶	N۳۶	۰/۵۰	%۱۵	سرباره کوره آهن‌گدازی	۴۵۰
۳۷	N۳۷	۰/۴۰	%۰	شاهد	۴۵۰
۳۸	N۳۸	۰/۴۵	%۰	شاهد	۴۵۰
۳۹	N۳۹	۰/۵۰	%۰	شاهد	۴۵۰

۳-۹ مقادیر و نسبت‌های مخلوط بتن

مقادیر و نسبت مخلوط‌های طرح‌های بتن خودتراکم ساخته‌شده مطابق جدول ۳-۱۶ در ذیل ارائه گردیده است.

جدول ۳-۱۶: طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم

نام طرح	مجموع مواد سیمانی (kg)	درصد مصرف پوزولان	نسبت آب به مواد سیمانی	سیمان	پوزولان	شن	ماسه	ماسه‌بادی	پودر سنگ	فوق روان کننده
				(kg)						
N۱	۴۵۰	٪۵	۰/۴۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵	۵۱۷	۱۰۳۵	۶۹	۱۰۴	۱/۴۳
N۲	۴۵۰	٪۵	۰/۴۵	۴۲۷/۵	۲۲/۵	۴۹۹	۹۹۸	۶۷	۱۰۱	۰/۶۶
N۳	۴۵۰	٪۵	۰/۵۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵	۴۸۱	۹۶۱	۶۴	۹۷	۰/۳۱
N۴	۴۵۰	٪۷/۵	۰/۴۰	۴۱۶/۲۵	۳۳/۷۵	۵۱۳	۱۰۲۶	۶۸	۱۰۳	۰/۷۳
N۵	۴۵۰	٪۷/۵	۰/۴۵	۴۱۶/۲۵	۳۳/۷۵	۴۹۴	۹۸۷	۶۶	۹۹	۱/۰۳
N۶	۴۵۰	٪۷/۵	۰/۵۰	۴۱۶/۲۵	۳۳/۷۵	۴۷۵	۹۴۹	۶۳	۹۶	۰/۴۷
N۷	۴۵۰	٪۱۰	۰/۴۰	۴۰۵	۴۵	۵۰۷	۱۰۱۵	۶۸	۱۰۲	۱/۸۷
N۸	۴۵۰	٪۱۰	۰/۴۵	۴۰۵	۴۵	۴۸۸	۹۷۶	۶۵	۹۸	۱/۰۹
N۹	۴۵۰	٪۱۰	۰/۵۰	۴۰۵	۴۵	۴۶۹	۹۳۷	۶۲	۹۴	۰/۶۹
N۱۰	۴۵۰	٪۱۵	۰/۴۰	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۵۳۴	۱۰۶۷	۷۱	۱۰۸	۲/۱۸
N۱۱	۴۵۰	٪۱۵	۰/۴۵	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۵۱۸	۱۰۳۵	۶۹	۱۰۴	۱/۵۶
N۱۲	۴۵۰	٪۱۵	۰/۵۰	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۵۰۱	۱۰۰۲	۶۷	۱۰۱	۱/۳۱
N۱۳	۴۵۰	٪۲۵	۰/۴۰	۳۳۷/۵	۱۱۲/۵	۵۳۸	۱۰۷۶	۷۲	۱۰۸	۲/۸
N۱۴	۴۵۰	٪۲۵	۰/۴۵	۳۳۷/۵	۱۱۲/۵	۵۲۳	۱۰۴۶	۷۰	۱۰۵	۲/۰۲
N۱۵	۴۵۰	٪۲۵	۰/۵۰	۳۳۷/۵	۱۱۲/۵	۵۰۷	۱۰۱۵	۶۸	۱۰۲	۱/۷۱
N۱۶	۴۵۰	٪۳۵	۰/۴۰	۲۹۲/۵	۱۵۷/۵	۵۴۰	۱۰۸۱	۷۲	۱۰۹	۵/۵۸
N۱۷	۴۵۰	٪۳۵	۰/۴۵	۲۹۲/۵	۱۵۷/۵	۵۲۸	۱۰۵۵	۷۰	۱۰۶	۳/۱۱
N۱۸	۴۵۰	٪۳۵	۰/۵۰	۲۹۲/۵	۱۵۷/۵	۵۱۴	۱۰۲۸	۶۹	۱۰۴	۱/۸۷
N۱۹	۴۵۰	٪۵	۰/۴۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵	۵۲۵	۱۰۴۹	۷۰	۱۰۶	۱/۸۷
N۲۰	۴۵۰	٪۵	۰/۴۵	۴۲۷/۵	۲۲/۵	۵۰۷	۱۰۱۴	۶۸	۱۰۲	۱/۷۵
N۲۱	۴۵۰	٪۵	۰/۵۰	۴۲۷/۵	۲۲/۵	۴۸۹	۹۷۸	۶۵	۹۹	۱/۲۲
N۲۲	۴۵۰	٪۱۰	۰/۴۰	۴۰۵	۴۵	۵۲۱	۱۰۴۲	۶۹	۱۰۵	۳/۵۷
N۲۳	۴۵۰	٪۱۰	۰/۴۵	۴۰۵	۴۵	۵۰۴	۱۰۰۸	۶۷	۱۰۲	۲/۳۴

ادامه جدول ۳-۱۶: طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم

N۲۴	۴۵۰	٪۱۰	۰/۵۰	۴۰۵	۴۵	۴۸۷	۹۷۴	۶۵	۹۸	۱/۴
N۲۵	۴۵۰	٪۱۵	۰/۴۰	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۵۲۰	۱۰۳۹	۶۹	۱۰۵	۲/۹۲
N۲۶	۴۵۰	٪۱۵	۰/۴۵	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۵۰۲	۱۰۰۴	۶۷	۱۰۱	۲/۴۹
N۲۷	۴۵۰	٪۱۵	۰/۵۰	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۴۸۴	۹۶۹	۶۵	۹۸	۱/۸۷
N۲۸	۴۵۰	٪۲۵	۰/۴۰	۳۳۷/۵	۱۱۲/۵	۵۴۰	۱۰۷۹	۷۲	۱۰۹	۳/۱۴
N۲۹	۴۵۰	٪۲۵	۰/۴۵	۳۳۷/۵	۱۱۲/۵	۵۲۴	۱۰۴۹	۷۰	۱۰۶	۲/۴۹
N۳۰	۴۵۰	٪۲۵	۰/۵۰	۳۳۷/۵	۱۱۲/۵	۵۰۹	۱۰۱۸	۶۸	۱۰۳	۱/۸۷
N۳۱	۴۵۰	٪۳۵	۰/۴۰	۲۹۲/۵	۱۵۷/۵	۵۴۵	۱۰۸۹	۷۳	۱۱۰	۳/۷۳
N۳۲	۴۵۰	٪۳۵	۰/۴۵	۲۹۲/۵	۱۵۷/۵	۵۳۱	۱۰۶۲	۷۱	۱۰۷	۲/۱۸
N۳۳	۴۵۰	٪۳۵	۰/۵۰	۲۹۲/۵	۱۵۷/۵	۵۱۶	۱۰۳۳	۶۹	۱۰۴	۱/۸۷
N۳۴	۴۵۰	٪۱۵	۰/۴۰	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۵۳۵	۱۰۷۰	۷۱	۱۰۸	۱/۸۷
N۳۵	۴۵۰	٪۱۵	۰/۴۵	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۵۱۸	۱۰۳۷	۶۹	۱۰۴	۱/۸۷
N۳۶	۴۵۰	٪۱۵	۰/۵۰	۳۸۲/۵	۶۷/۵	۵۰۲	۱۰۰۴	۶۷	۱۰۱	۱/۴۷
N۳۷	۴۵۰	٪۰	۰/۴۰	۴۵۰	-	۵۲۷	۱۰۵۴	۷۰	۱۰۶	۱/۵۶
N۳۸	۴۵۰	٪۰	۰/۴۵	۴۵۰	-	۵۰۹	۱۰۱۹	۶۸	۱۰۳	۱/۲۵
N۳۹	۴۵۰	٪۰	۰/۵۰	۴۵۰	-	۴۹۲	۹۸۳	۶۶	۹۹	۰/۵۶

۳-۱۰ روش نمونه‌گیری و نگهداری نمونه‌ها در آزمایشگاه

جهت سنجش مقاومت فشاری از آزمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری استفاده گردید که معیار ارزیابی و محاسبه ضریب K طبق DIN CEN/TR 16639، سن ۲۸ روزه می‌باشد. جهت ارزیابی دقیق‌تر از ۳ آزمونه در این سن و میانگین‌گیری نتایج استفاده گردید[۳۱].

در تمام طرح‌های ساخته‌شده به تعداد آنچه که در جدول ۳-۱۷ لیست شده نمونه‌گیری صورت گرفته است.

جدول ۳-۱۷: آزمونه‌ها و آزمایش‌های انجام‌شده در فاز سخت شده

آزمایش‌های فاز سخت شده		نوع نمونه و ابعاد Cm	استاندارد آزمایش	تعداد در هر طرح	تعداد درکل طرح‌ها
مقاومت فشاری	۳ روزه	۱۰×۱۰ مکعبی	EN12390-3	۲	۹۶
	۷ روزه	۱۰×۱۰ مکعبی	EN12390-3	۲	۹۶
	۲۸ روزه	۱۰×۱۰ مکعبی	EN12390-3	۳	۱۴۴
هدایت الکتریکی		۱۰×۲۰ استوانه	ASTM C1760	۲	۹۶
عمق نفوذ آب تحت‌فشار		۱۵×۱۵ مکعبی	EN12390-8	۲	۹۶
جذب آب نهایی		۱۰×۱۰ مکعبی	ASTM C642	۲	۹۶

طرح‌های مخلوط ساخته‌شده پس از یک روز از قالب خارج گردیده و تا روز انجام هر آزمایش مربوط در حوضچه‌های آب در دمای ۲۱ الی ۲۵ درجه داخل فضای آزمایشگاه مطابق استاندارد ASTM C192 قرار گرفتند[۳۲].

شکل ۳-۹: نمونه‌گیری و نگهداری نمونه‌ها در آزمایشگاه

۳-۱۱ شرح آزمایش‌های انجام‌شده

در جدول ۳-۱۸ آزمایش‌های انجام‌شده در فاز خمیری بتن‌های معمولی و خودتراکم با ذکر شماره استاندارد یا دستورالعمل پیشنهادی و تعداد مرتبه آزمایش آورده شده است.

جدول ۳-۱۸: آزمایش‌های انجام‌شده در فاز خمیری

آزمایش‌های فاز خمیری	استاندارد یا دستورالعمل آزمایش	تعداد کل آزمایش
جریان اسلامپ	EFNARC 2005	۴۸
حلقه J	EFNARC 2005	۴۸
جعبه L	EFNARC 2005	۴۸
جعبه U	EFNARC 2005	۴۸
قیف V – ۱ دقیقه	EFNARC 2005	۴۸
قیف V - ۵ دقیقه	EFNARC 2005	۴۸
T50	EFNARC 2005	۴۸

قالب آزمونه‌های بتن خودتراکم در یک مرحله با سطل و بدون هیچ میله کوبی و تراکمی تهیه‌شده است. بعضاً برای تصحیح سطح فوقانی قالب‌ها و یا به دلیل گذشت زمان در اثر انجام آزمایش‌های فاز خمیری بتن خودتراکم، با استفاده از تکان دادن قالب قسمت فوقانی قالب مسطح شد و بتن اضافی روی سطح آن توسط میله مخصوص تسطیح گردید.

۳-۱۲ آزمایش‌های انجام‌شده در فاز خمیری

۳-۱۲-۱ آزمایش جریان اسلامپ

ابتدا سطح وسایل آزمایش مرطوب می‌شود. سپس ۶ لیتر بتن درون مخروط ناقص که در مرکز صفحه غیر جاذب کاملاً مسطح قرار دارد ریخته می‌شود. بدون اعمال ضربه یا لرزش بتن اضافی با ماله یا خط کش برداشته و بتن اطراف پای مخروط نیز کاملاً تمیز می‌شود. مخروط به‌صورت قائم بالا کشیده شده تا بتن به سهولت و بدون مانع روان شود.

درصورتی‌که قصد اندازه‌گیری زمان برای آزمایش T50 (زمان پهن‌شدگی ۵۰ سانتی‌متر) باشد هم‌زمان با بالا کشیدن قالب مخروط ناقص، کرونومتر راه‌اندازی و زمان لازم برای رسیدن بتن به دایره ۵۰ سانتی‌متری با دقت ۰/۲ ثانیه اندازه‌گیری و گزارش می‌شود. برای تعیین قطر پهن‌شدگی جریان اسلامپ لازم است پس از توقف بتن روی صفحه کف، قطر نهائی و متوسط پهن‌شدگی را که برای دو قطر عمود بر هم به‌دست‌آمده است با تقریب ۵± میلی‌متر گزارش نمود.

همچنین لازم است مشاهدات را در مورد همگنی بتن در مرکز و در پیرامون بتن ازنظر درشتی و ریزی و میزان خمیر سیمان بیان و تشریح کرد.

شکل ۳-۱۰: آزمایش جریان اسلامپ و T50

۳-۱۲-۲ آزمایش حلقه J

این آزمایش مطابق با دستورالعمل پیشنهادی EFNARC 2005 انجام گرفت. با رعایت جزئیات روش آزمایش جریان اسلامپ، در این روش حلقه J را در وسط صفحه قرار داده و مخروط ناقص اسلامپ در داخل آن گذاشته می‌شود، به‌نحوی‌که در مرکز صفحه قرار گیرد و کاملاً توسط آزمایشگر محکم نگه‌داشته می‌شود. همانند آزمایش جریان اسلامپ، قیف اسلامپ را بدون لرزش به‌صورت قائم بالا کشیده و اجازه داده می‌شود بتن روان شود. در این حالت نیز قطر نهائی متوسط با اندازه‌گیری دو قطر عمود برهم بتن پهن‌شده اندازه-گیری و گزارش می‌شود. همچنین اختلاف ارتفاع بتن در داخل و خارج حلقه J (قفس) در مجاورت میلگردهای عمودی در چهار نقطه تعیین و متوسط آن‌ها برحسب میلی‌متر (با دقت ۱ میلی‌متر) گزارش می‌شود. همچنین مشاهدات در مورد کیفیت اطراف و پیرامون توده بتن و جداشدگی احتمالی و وجود ملات یا خمیر سیمان فاقد سنگ‌دانه درشت قید می‌شود.

شکل ۳-۱۱: آزمایش حلقهJ

۳-۱۲-۳ آزمایش جعبه L

ابتدا جعبه روی سطح محکم و تراز (افقی) قرار داده و از حرکت دریچه کشویی اطمینان حاصل می‌شود. سطوح داخلی جعبه مرطوب شده، دریچه را بسته و بخش قائم با حدود ۱۴ لیتر بتن پر می‌شود. به مدت یک دقیقه اجازه داده می‌شود بتن در این قسمت باقی بماند. سپس دریچه را بازکرده تا بتن به بخش افقی وارد شود. وقتی بتن از حرکت بازماند ارتفاع H_1، H_2 (در ابتدا و انتهای بتن) اندازه‌گیری و نسبت H_2/H_1 محاسبه و گزارش می‌شود. این نسبت را ضریب انسداد یا نسبت بلوکه شدن می‌نامند. تمام آزمایش باید ظرف ۵ دقیقه انجام شود.

شکل ۳-۱۲: آزمایش جعبه L

۳-۱۲-۴ آزمایش جعبه U

دستگاه را روی سطح محکمی قرار داده و از کارکرد مناسب دریچه کشوئی اطمینان حاصل می‌شود. سطح داخلی وسیله را باید مرطوب کرده و آب اضافی تخلیه شود. دریچه را بسته و یک قسمت از وسیله را با حدود ۲۰ لیتر بتن پرکرده و اجازه داده می‌شود بتن به مدت حدود یک دقیقه در این حالت باقی بماند. سپس دریچه را بالا کشیده و وقتی بتن از حرکت بازایستاد، ارتفاع H_1، H_2 در هر دو قسمت دستگاه اندازه‌گیری می‌شود؛ سپس اختلاف آن‌ها یعنی (H_1-H_2) بنام اختلاف ارتفاع پر کردن گزارش می‌شود. تمام آزمایش باید ظرف مدت ۵ دقیقه انجام گیرد.

شکل ۳-۱۳: آزمایش جعبه U

۳-۱۲-۵ آزمایش قیف V

قیف V را روی جای محکمی قرار داده و سطوح داخلی آن مرطوب می‌شود. از بسته بودن دریچه خروجی اطمینان حاصل نموده و یک سطل زیر آن گذاشته می‌شود. قیف را کاملاً با حدود ۱۲ لیتر بتن بدون اعمال تراکم یا ضربه پر نموده و بتن اضافی آن را با ماله یا کمچه برداشته و سطح آن به‌آرامی صاف می‌شود. ۱ دقیقه پس از پر کردن قیف، دریچه تحتانی را باز و زمان خروج تمام بتن ثبت و به‌عنوان زمان جریان قیف V یادداشت و گزارش می‌شود. وقتی می‌توان گفت بتن خارج‌شده که اگر از بالا به داخل قیف نگاه کنیم نور را از زیر (به علت خروج بتن) ببینیم. کل آزمایش باید ظرف ۵ دقیقه انجام شود.

برای انجام آزمایش قیف V در زمان ۵ دقیقه نباید سطوح داخلی قیف را پس از انجام آزمایش فوق پاک یا مرطوب نمود بلکه باید دریچه تحتانی را بسته و مجدداً قیف را با سرعت و فوراً (پس از اندازه‌گیری زمان جریان) پر کرد. ۵ دقیقه پس‌ازاینکه قیف پر شد دریچه تحتانی را بازکرده و اجازه داده می‌شود بتن در اثر

وزن خود خارج شود و زمان جریان با روش فوق‌الذکر اندازه‌گیری می‌شود. در این مرحله زمان جریان را زمان جریان در زمان ۵ دقیقه می‌نامند.

شکل ۳-۱۴: آزمایش قیف V

۳-۱۳آزمایش‌های انجام‌شده در فاز سخت شده

۳-۱۳-۱ آزمایش تعیین مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری آزمونه‌های مکعبی ۱۰×۱۰ سانتی‌متری بر اساس EN12390-3 انجام شد[۳۳]. قبل از انجام آزمایش مقاومت فشاری ابعاد آزمونه‌ها بر اساس استاندارد ISIRI3202 تعیین‌شده و سرعت بارگذاری جک برای تمام آزمونه‌ها یکسان در نظر گرفته‌شده است. لازم به ذکر است پس از آزمایش، نوع شکست نمونه‌ها با توجه به همین مرجع بررسی‌شد. شکست تمام نمونه‌ها جزء شکست‌های صحیح بوده است.

شکل ۳-۱۵: آزمایش مقاومت فشاری

۳-۱۳-۲ آزمایش هدایت الکتریکی

در این آزمایش میزان هدایت الکتریکی یک نمونه بتنی سخت شده در حالت اشباع را اندازه‌گیری می‌کنیم که نشانه‌ای از مقاومت در برابر نفوذ یون کلر می‌باشد. در این آزمایش مقدار جریان الکتریکی از یک نمونه

اشباع بتن با اختلاف ولتاژ ۶۰ به‌صورت مستقیم در دو سر آن اندازه‌گیری می‌شود. اندازه نمونه می‌تواند یک استوانه به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و یا با کرگیری از بتن به قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌متر باشد. دستگاه و شرایط نمونه همانند آزمایش C1202 می‌باشد، با این تفاوت که اطراف نمونه نیاز به مهروموم شدن ندارد. مقدار جریان پس از اعمال اولین ولتاژ اندازه‌گیری می‌شود.

به دلیل اینکه جریان الکتریکی وابسته به درجه اشباع است، نمونه‌ها باید به‌اندازه کافی اشباع‌شده باشند تا آزمایش به‌درستی صورت پذیرد. همچنین بایستی نمونه‌ها وکیوم شده و اگر نمونه‌ها در حالت اشباع نیستند باید در گزارش ذکر شود. نوع نمونه‌ها و شرایط نگهداری با توجه به هدف آزمایش متفاوت است. سن نمونه‌ها تأثیر زیادی بر نتایج آزمایش دارد؛ به‌طوری‌که در صورت عمل‌آوری مناسب باگذشت زمان، هدایت الکتریکی کمتر می‌شود. در آزمایش انجام‌شده از نمونه‌های ۲۸ روزه استفاده گردیده است و ازآنجاکه نتایج این آزمایش تابعی از مقاومت الکتریکی است، وجود میلگرد در بتن و یا موادی با هدایت الکتریکی بالا باعث ایجاد نتایج غلط می‌گردد.

بایستی دقت گردد که فاکتورهای زیادی ازجمله نسبت آب به سیمان، نوع و مقدار مواد مکمل سیمانی، درصد ترکیبات پلیمری، ترکیبات شامل نمک محلول، سن نمونه، حفرات بتن (شبکه حفرات)، نوع سنگ‌دانه، درجه تحکیم، درجه اشباع و نوع عمل‌آوری بر نتایج این آزمایش تأثیرگذار می‌باشند. همچنین اگر طرح‌های مخلوط حاوی محلول‌های شیمیایی ازجمله کلسیم نیتریت و غیره نیز باشد می‌تواند نتایج به‌صورت غلط نتیجه‌گیری و تفسیر شود[۳۴].

روش آزمایش به این صورت است که نمونه‌ها را از آب خارج کرده و اطراف آن را با دستمال تمیز خشک کرده و قطر نمونه‌ها را با دقت ۱± میلی‌متر با میانگین‌گیری دو قطر به دست آورده و نمونه‌ها تا زمان انجام آزمایش بایستی در حالت اشباع نگهداری شوند. نگهداری نمونه‌ها در حالت اشباع معمولاً توسط دسیکاتور صورت می‌پذیرد که در تحقیق انجام‌شده به علت تعداد بالای نمونه‌ها برای انجام آزمایش، نمونه‌ها پس از

خارج شدن از حوضچه‌های آب داخل دستگاه قرارگرفته و سل‌های دستگاه با محلول NaCl (نمک) پرشده و سیم‌های دستگاه متصل شده و جریان در زمان ۱ دقیقه با دقت ۵± ثانیه ثبت گردیده است[۳۴].

شکل ۳-۱۶: آزمایش هدایت الکتریکی

۳-۱۳-۳ آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار

هدف از انجام این آزمایش تعیین میزان نفوذ آب تحت‌فشار در بتن سخت شده می‌باشد که در آب عمل‌آوری شده است. بدین ترتیب که آب با فشار به سطح بتن سخت شده اعمال می‌شود و سپس آزمونه به دونیم تقسیم‌شده و عمق نفوذپذیری مربوط به پیشروی آب اندازه‌گیری می‌شود. ۲ عدد آزمونه‌ی مکعبی ۱۵×۱۵

برای انجام این آزمایش در نظر گرفته شد که آزمونه‌ها باید حداقل در سن ۲۸ روزه مورد آزمایش قرار گیرد. روش آزمایش بدین گونه است که آزمونه را درون دستگاه قرار داده و فشار آبی برابر ۴۵۰ الی ۵۵۰ کیلو پاسکال در مدت ۷۲ ساعت اعمال گردد. در طول آزمون به‌طور پیوسته سطوحی از آزمونه را که در معرض فشار آب قرار ندارد کنترل تا آب نشت و تراوش نداشته باشد. پس از اعمال فشار در مدت‌زمان مشخص، آزمونه را از درون دستگاه خارج کرده و قطرات آب اضافی سطحی از آزمونه که فشار آب بر روی آن اعمال‌شده را پاک و سپس آزمونه را از جهت عمود بر سطحی که در معرض فشار آب قرارگرفته به دونیم شکاف می‌دهیم. هنگامی‌که آزمونه دونیم شد، سطحی از آزمونه دونیم شده را که در معرض فشار آب قرارگرفته بود را به سمت پایین قرار داده و به‌محض شکستن آزمونه پیشروی آب روی آزمونه را علامت-گذاری کرده به‌طوری‌که پیشرفت نفوذ آب به‌وضوح در سطح قابل‌مشاهده باشد و آزمونه دونیم شده خشک نشود، سپس بیشترین عمق نفوذ اندازه‌گیری و به میلی‌متر ثبت می‌گردد. نتیجه آزمون بیشترین عمق نفوذ آب است که به میلی‌متر بیان گردیده است[۳۵].

شکل ۳-۱۷: آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار

۳-۱۳-۴ آزمایش جذب آب نهایی

برای آزمایش جذب آب نهایی از ۲ عدد نمونه ۱۰×۱۰ سانتیمتر استفاده شد. ابتدا نمونه‌ها را در سن ۲۸ روزه از حوضچه‌ها خارج نموده سپس نمونه‌ها را در داخل گرمچال در دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴۸ ساعت قرار داده تا کاملاً خشک شود و در معرض هوا قرار داده تا دمای آن به ۲۰ الی ۲۵ درجه سانتی‌گراد برسد سپس جرم نمونه‌ها با ترازو اندازه‌گیری می‌گردد. اگر نمونه‌ها زمانی که دفعه اول توزین گردیدند مرطوب بود بایستی نمونه‌ها را دوباره در گرمچال قرار داده و پس از ۲۴ ساعت دوباره در دمای ۲۰ الی ۲۵ درجه توزین می‌گردد.

مطابق با استاندارد ASTM C642 جذب آب نهایی مطابق با رابطه ۳-۱۸ تعیین می‌گردد[۳۶].

$$[(B-A)/A]\times 100 \qquad (۱۸-۳)$$

که داریم:

A: جرم نمونه‌ی خشک‌شده در گرمچال

B: جرم نمونه مرطوب با سطح خشک‌شده در هوا بعد از خروج از حوضچه

شکل ۳-۱۸: نمونه‌های داخل گرمچال آزمایش جذب آب نهایی

فصل چهارم

نتایج آزمایش‌های رئولوژی و فاز سخت شده

۴-۱ نتایج آزمایش‌های فاز خمیری بتن خودتراکم

پس از ساخت طرح مخلوط‌های بتن، آزمایش‌های رئولوژی بتن تازه شامل جریان اسلامپ، زمان قطر پهن‌شدگی ۵۰ سانتی‌متر (T50)، شاخص پایداری چشمی (VSI)، حلقه J (J-Ring)، زمان تخلیه قیف V در ۱ و ۵ دقیقه، جعبه U و جعبه L انجام شد. نتایج، تحلیل و نتیجه‌گیری کلی مربوط به آزمایش‌ها که در فصل سوم تشریح شد، در این فصل آورده شده است. هرچند لازم به ذکر است، اغلب اختلاف‌های نتایج فاز خمیری به دلیل گذشت زمان و کثرت آزمایش‌های فاز خمیری، اثرات فوق روان کننده و یا لزجت زیاد (T50 زیاد) طرح‌ها بوده است.

جدول ۴-۱ نتایج آزمایش‌های فاز خمیری بتن خودتراکم را نشان می‌دهد.

جدول ۴-۱: نتایج آزمایش‌های رئولوژی طرح مخلوط بتن خودتراکم

نام طرح	اسلامپ فلو (cm)	T50(sec)	حلقه J (cm)	جعبه L	VSI	قیف V (MIN۵)	قیف V (MIN۱)	جعبه U
N۱	۵۷	۳	۴۸	۰/۸۰	۰	۵/۲	۳/۹۵	۶/۲
N۲	۶۱	۲/۷	۵۲	۰/۸۴	۰	۵	۴/۲	۴/۲
N۳	۶۲	۲/۳	۵۸	۰/۸۶	۱	۴/۷	۳/۷	۳/۵
N۴	۶۷/۵	۳/۲	۶۰	۰/۹۲	۰	۵/۴	۴/۲	۳/۱
N۵	۶۰	۲/۶	۵۱	۰/۸۸	۱	۵/۱	۴/۱	۳/۲
N۶	۵۸/۵	۲/۱	۵۰/۵	۰/۸۲	۰	۴/۶۵	۳/۹	۴/۷
N۷	۶۷	۲/۴	۵۹	۰/۹۴	۰	۶/۲	۴/۲	۲/۷
N۸	۵۹	۲/۱۵	۵۰	۰/۸۰	۰	۵/۸	۴	۳/۲
N۹	۶۳	۲	۵۵	۰/۸۴	۰	۵/۲۵	۳/۸	۳
N۱۰	۷۶	۴/۷	۶۹	۰/۹۴	۲	۷/۶۵	۵/۳۵	۱/۳
N۱۱	۶۰/۵	۳/۷	۵۳	۰/۸۹	۱	۷/۴	۵/۲	۲/۷
N۱۲	۵۸	۳/۳	۵۲/۵	۰/۸۸	۰	۶/۸۵	۴/۶۵	۳/۶

ادامه جدول ۴-۱: نتایج آزمایش‌های رئولوژی طرح مخلوط بتن خودتراکم

N۱۳	۷۴/۵	۴/۴	۶۸,۵	۰/۹۵	۱	۷/۵۵	۵/۲	۱/۷
N۱۴	۷۴	۳/۷	۶۵	۰/۹۱	۰	۷/۲۵	۵/۲	۱/۴۵
N۱۵	۷۲/۵	۳/۱	۶۷	۰/۸۹	۰	۶/۶۵	۵/۱	۱/۸۵
N۱۶	۷۰	۳/۸	۶۳	۰/۹۷	۱	۶/۸	۴/۹	۲/۱
N۱۷	۷۰/۵	۳/۲	۶۱	۱	۱	۶/۴	۵/۲	۱/۶
N۱۸	۶۷	۳/۱	۵۸	۰/۸۴	۰	۵/۸	۳/۸	۲/۶
N۱۹	۶۹	۳/۸۵	۶۵	۰/۸۷	۱	۵/۹	۳/۷	۲/۴
N۲۰	۶۰	۳/۹	۵۶	۰/۷۶	۰	۵/۷	۳/۲	۲/۹
N۲۱	۶۰	۳/۴	۵۷	۰/۷۷	۰	۵/۶۵	۲/۹۵	۳/۱۲
N۲۲	۷۳	۳/۴۵	۷۱	۰/۸۹	۱	۵/۷	۳/۲	۱/۷
N۲۳	۷۵	۳/۱۵	۷۱	۰/۹۲	۲	۵/۶	۲/۶	۱/۶
N۲۴	۷۵/۵	۳/۴	۵۳	۰/۷۱	۰	۶/۲	۴/۵	۷/۶
N۲۵	۶۹	۳/۶۵	۶۵	۰/۸۶	۱	۵/۷	۳/۸	۲/۴
N۲۶	۶۷	۳/۸	۶۳	۰/۸۱	۱	۵/۸	۴/۱	۲/۵
N۲۷	۶۲	۴/۲	۵۸	۰/۷۸	۰	۶/۱	۴/۳۵	۲
N۲۸	۷۰	۴/۶	۶۷	۰/۹۲	۲	۵/۴	۳/۶	۱/۸
N۲۹	۶۷/۵	۴/۸۵	۶۱	۰/۸۷	۱	۵/۶۵	۳/۲	۲/۲
N۳۰	۶۰	۵/۲	۵۷	۰/۸۲	۰	۶/۱	۲/۸۵	۳/۲
N۳۱	۶۸/۵	۴/۷	۶۴	۰/۸۹	۱	۶/۲۵	۳/۸	۲/۱
N۳۲	۵۷	۴/۸	۵۳	۰/۸۰	۰	۶/۸۵	۴/۱	۴/۷
N۳۳	۵۵	۴/۶	۵۱	۰/۷۶	۰	۶/۶۵	۴/۱	۵/۳
N۳۴	۶۶	۴/۷	۵۸	۰/۹۰	۱	۵/۸	۲/۹	۳/۷
N۳۵	۷۳	۳/۸	۶۹	۰/۸۶	۲	۵/۲	۲/۷	۲/۶
N۳۶	۶۰	۵/۱	۵۳	۰/۷۹	۱	۵/۴	۲/۶	۲/۸

ادامه جدول ۴-۱: نتایج آزمایش‌های رئولوژی طرح مخلوط بتن خودتراکم

N۳۷	۶۶	۳/۲	۵۵	۰/۹۲	۱	۴/۲	۲/۸۵	۲/۱
N۳۸	۵۷	۳/۵	۴۸	۰/۸۴	۰	۴/۸	۲/۳۵	۵/۲
N۳۹	۵۶	۳/۸	۴۷/۵	۰/۸۲	۰	۴/۷۵	۲/۲	۴/۸

۴-۲ تحلیل نتایج فاز خمیری بتن خودتراکم

با توجه به نتایج آزمایش‌ها در جدول ۴-۱، مقایسه و ارتباط آن‌ها با یکدیگر مورد تحلیل و ارزیابی قرارگرفته و به‌صورت خلاصه در ذیل بیان می‌شود. محدوده پیشنهادی آزمایش‌ها در فصل دوم و همچنین تشریح کامل آزمایش‌ها در فصل سوم ارائه شد.

همان‌طور که در فصول قبل بیان شد، برای آنکه یک طرح مخلوط در زمره بتن‌های خودتراکم قرار گیرد، باید خصوصیات خمیری آن دارای شرایط لازم باشد؛ به‌عبارت‌دیگر سه قابلیت جریان پذیری، توانایی عبور و مقاومت در برابر جدایی را داشته باشد. بدین منظور آزمایش‌های ذکرشده در بالا، در فاز خمیری برای بتن انجام‌شده و نتایج آن با مقادیر پیشنهادی آئین‌نامه‌ها، مقایسه می‌شود. اگر نتایج در فاز خمیری شرایط آیین‌نامه‌ای را ارضا نمود آنگاه می‌توان طرح مخلوط مزبور را بتن خودتراکم تلقی کرد. همچنین طرح‌ها از منظر مرجع [37] نیز در سه حالت خوب، ضعیف و متوسط مورد ارزیابی قرارگرفته‌اند. محدوده نتایج آزمایش‌های فاز خمیری بر اساس پیشنهاد مرجع [37]، در جدول ۴-۲ ارائه‌شده است.

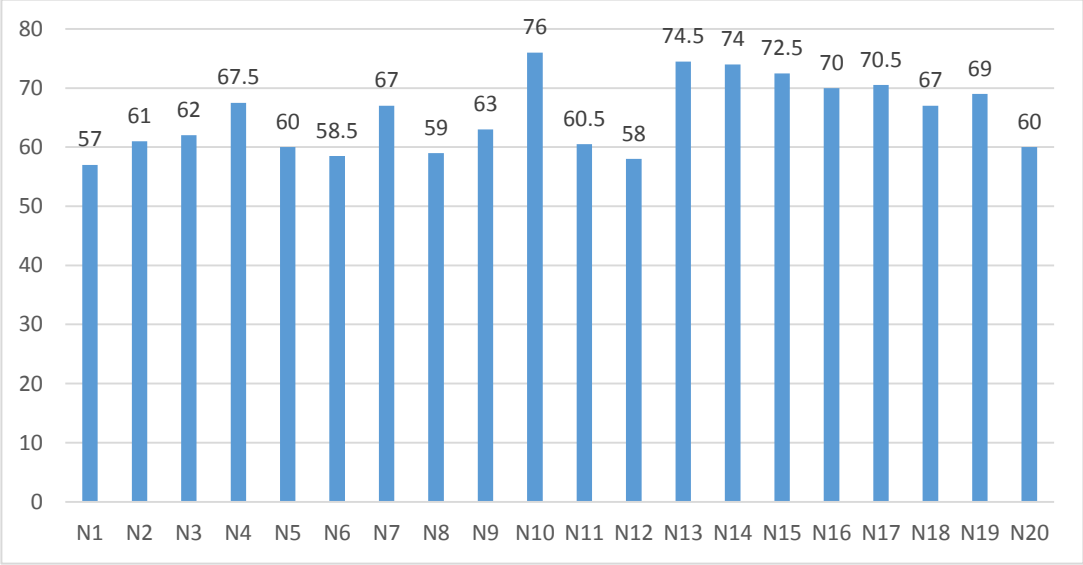
جدول ۴-۲: محدوده قابل‌قبول برای رفتار بتن خودتراکم در فاز خمیری [۳۷]

آزمایش	پارامتر اندازه‌گیری شده (P)	محدوده		
		خوب	متوسط	ضعیف
جریان اسلامپ	Flow (cm)	۶۱≤ P ≤۷۱	۷۱< P ≤۷۸ & ۵۳≤ P <۶۱	P ≥۷۸ & ≤ ۵۳
	T50 (Sec)	P ≤ ۶	۶ < P ≤ ۷	P ≥ ۸
	VSI	P ≤۱/۰	۱/۰ < P ≤ ۲/۰	P ≥ ۲/۵
جعبه L	H2/H1	۰/۸۵≤ P ≤۱/۰	۰/۵۴≤ P <۰/۸۵	P <۰/۵۴
جعبه U	H2-H1	۳ ≤ P	-	P< ۳
حلقه J	t2-t1	۱ ≥ P	-	P> ۱
	Flow – Flow J	P ≤ ۲/۵	۲/۵ < P ≤ ۵	P > ۵
قیف v	T (Sec)	۸≤ P ≤۱۲	۶≤ P <۸ & ۱۲< P ≤۱۶	P >۱۶ &P < ۶
نتایج حلقه J و جعبه U با پیشنهادهای EFNARC مقایسه شده است.				

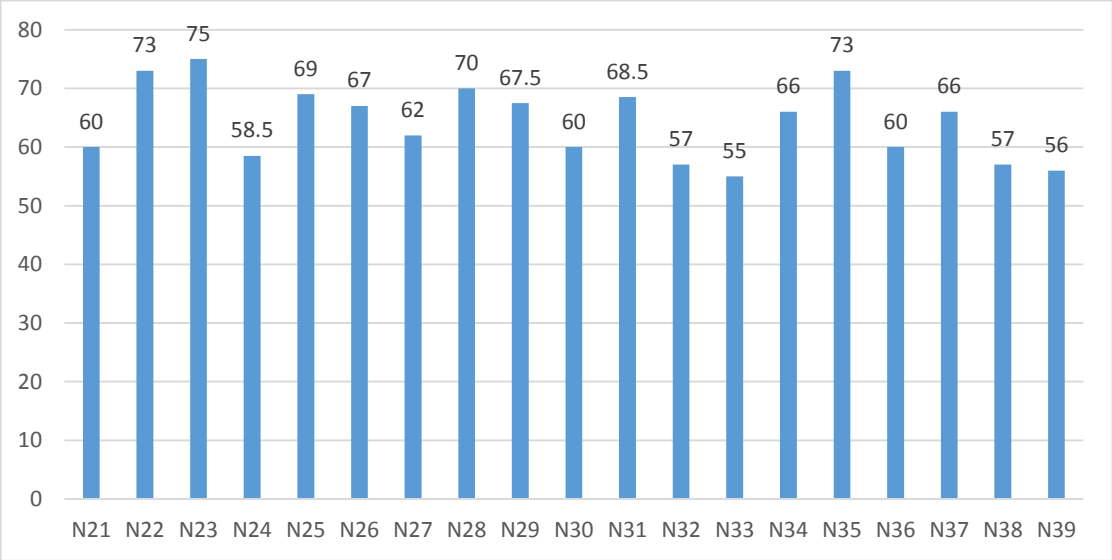
۴-۲-۱ آزمایش جریان اسلامپ و T50

شاخص پایداری چشمی (VSI) در تمام طرح‌ها در محدوده مجاز است وبنابراین قابل‌قبول می‌باشد(جدول ۴-۱). ازجمله پارامترهای حائز اهمیت در بتن خود تراکم تعیین زمان پهن‌شدگی ۵۰۰ میلی‌متر است که هم‌زمان با آزمایش جریان اسلامپ اندازه‌گیری می‌شود. بعضاً به دلیل لزجت بالا ممکن است طرح مخلوطی

با جریان اسلامپ بیشتر، کارایی یا قابلیت پرکنندگی کمتری داشته باشد. پیشنهاد می‌شود به دلیل آسان بودن تعیین این پارامتر، بخصوص در بتن‌ریزی‌های کارگاهی این زمان حتماً اندازه‌گیری و گزارش شود. گاهی لزجت بسیار بالا باعث کاهش کارایی، پُرکنندگی و حتی با مقایسه قطر جریان اسلامپ با قطر پهن‌شدگی در حلقه J می‌توان گفت باعث کاهش قابلیت عبور در بتن شده است. تمامی طرح‌های مخلوط در محدوده جریان اسلامپ ۵۵ الی ۷۵ سانتی‌متر ساخته‌شده است و در بین نتایج طرح‌های ساخته‌شده بهترین نتیجه برای آزمایش T50 را بتن‌های حاوی پوزولان خاش، سرباره کوره آهن‌گدازی دارا می‌باشد. همچنین طرح حاوی پوزولان خاش ازنظر شاخصVSI بهترین شرایط را ازنظر پایداری دارا می‌باشد. نتایج اسلامپ فلو در اشکال ۴-۱ و ۴-۲ آورده شده است.



شکل ۴-۱: جریان اسلامپ طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم

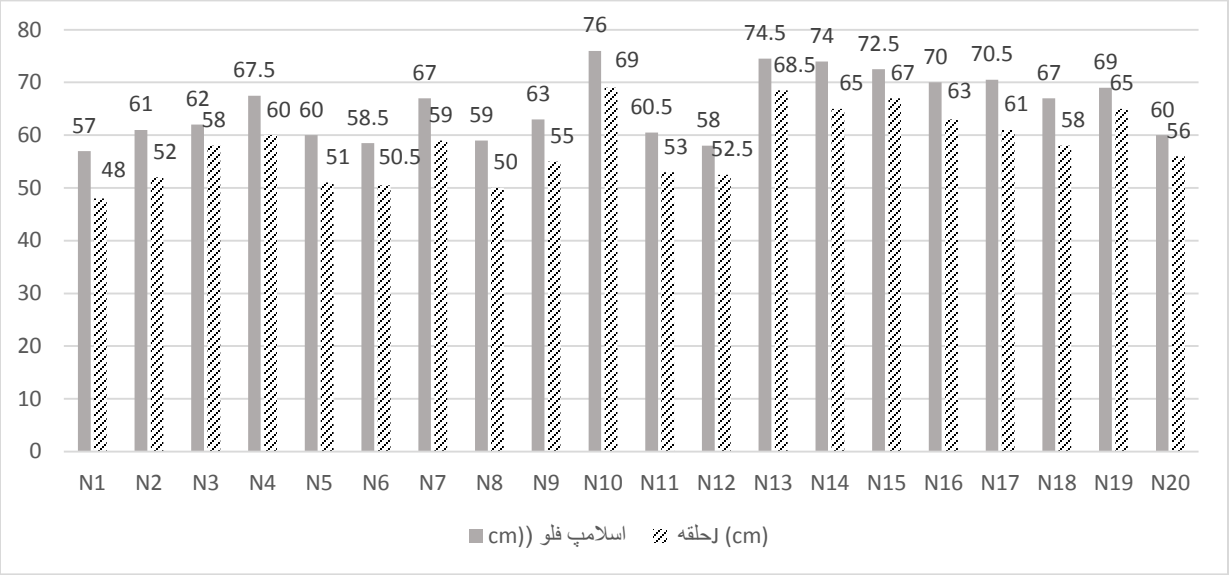


شکل ۴-۲: جریان اسلامپ طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم-ادامه

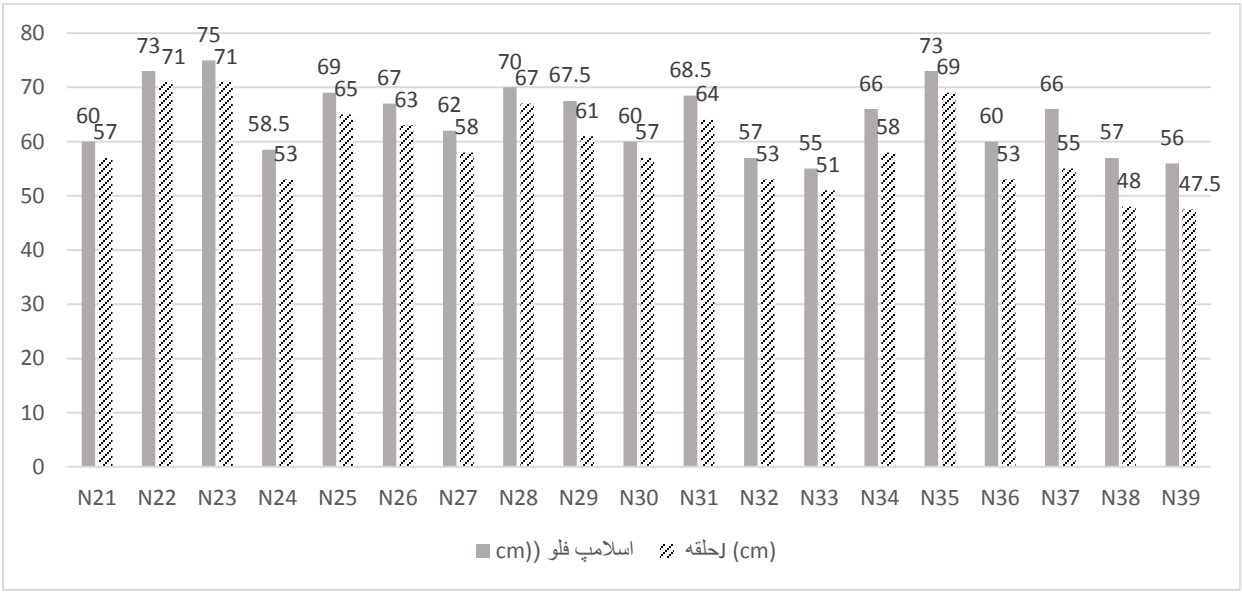
همان‌طور که از آزمایش جریان اسلامپ ملاحظه می‌گردد بتن های حاوی پوزولان خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی دارای بیشترین مقادیر جریان می‌باشند. در طرح‌های مخلوط ساخته‌شده، نتایج آزمایش جریان اسلامپ در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتی‌متر می‌باشد.

۴-۲-۲ آزمایش حلقه J

استاندارد ملی ایران (ISIRI 11271) حداکثر اختلاف قطر جریان اسلامپ و قطر جریان حلقه J را به ۵ سانتیمتر محدود می‌کند. در اشکال ۴-۳ و ۴-۴ مقایسه نتایج آزمایش اسلامپ فلو و آزمایش حلقه J آورده شده است.



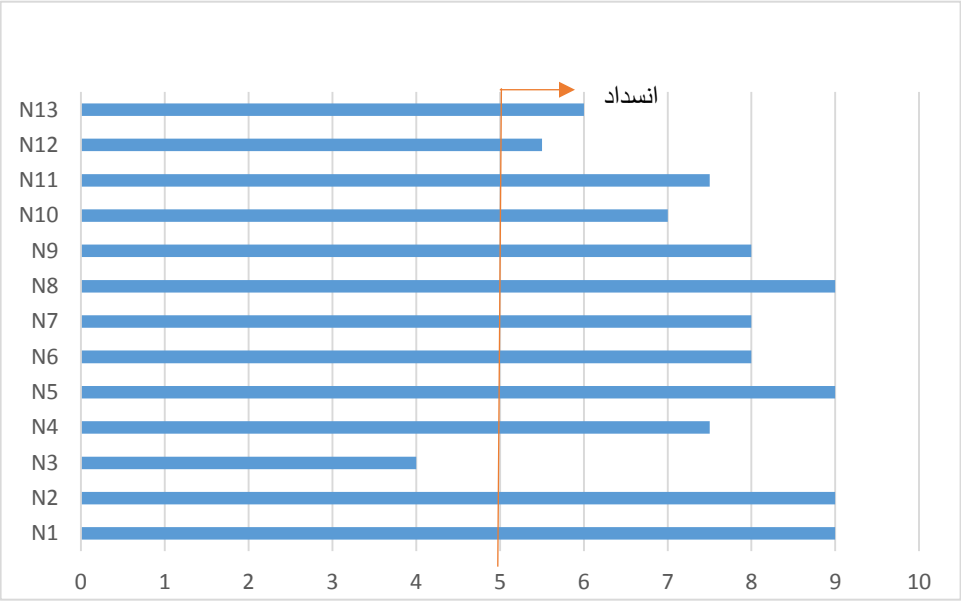
شکل ۴-۳: مقایسه آزمایش جریان اسلامپ با آزمایش حلقه J



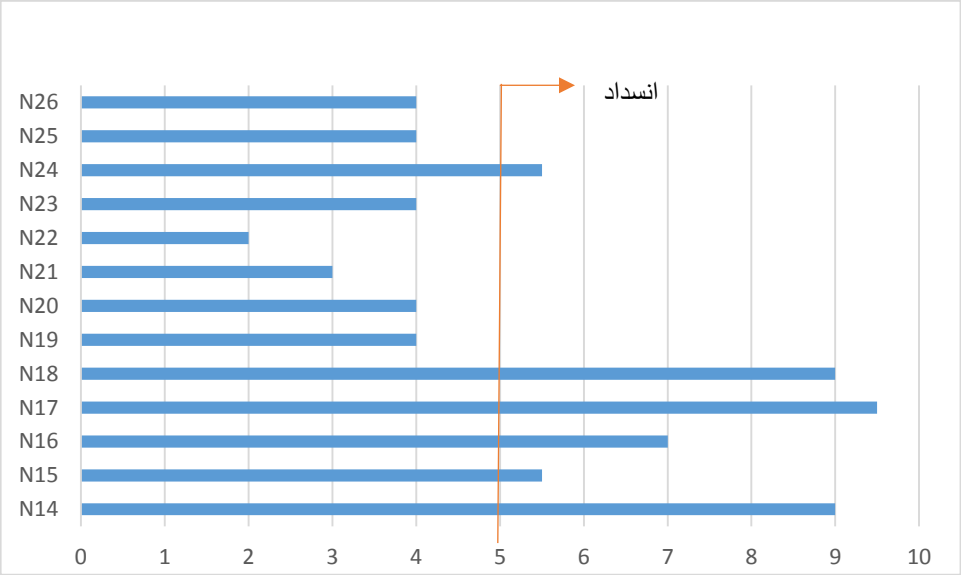
شکل ۴-۴: مقایسه آزمایش جریان اسلامپ با آزمایش حلقه J-ادامه

همان‌طور که در شکل‌های ۴-۵ الی ۴-۷ ملاحظه می‌گردد از اختلاف قطرهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های اسلامپ فلو و حلقه J نتیجه می‌شود طرح‌های مخلوط حاوی میکروسیلیس و پوزولان خاش موجب انسداد می‌گردد؛ اما در بتن‌های حاوی زئولیت، سرباره کوره آهن‌گدازی دارای اختلاف قطر کمتر از ۵ سانتی‌متر می‌باشند و لذا برای بتن‌ریزی‌هایی که قابلیت عبور مدنظر قرار می‌گیرد استفاده از این نوع

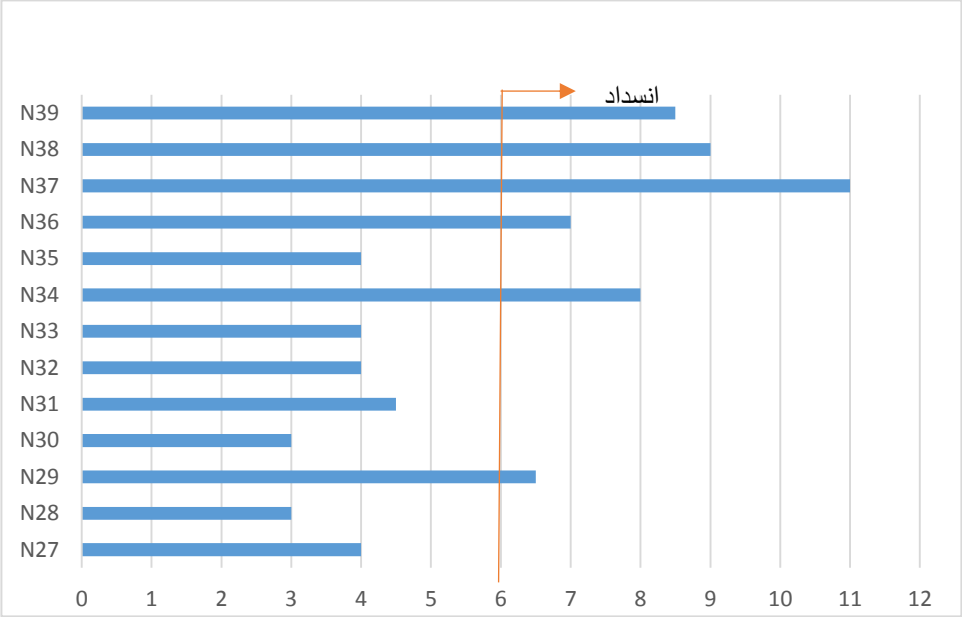
بتن‌ها پیشنهاد می‌گردد. همچنین هر ۳ طرح بتن‌های خودتراکم شاهد که پوزولانی در آنها مصرف نگردیده است دچار انسداد شده‌اند. هرچند لازم به ذکر است، اغلب اختلاف‌های نتایج فاز خمیری (به‌عنوان‌مثال افزایش اختلاف قطر جریان اسلامپ و جریان حلقه J) به دلیل گذشت زمان و کثرت آزمایش‌های فاز خمیری، اثرات فوق روان کننده و یا لزجت زیاد (T50 زیاد) طرح‌ها بوده است.



شکل ۴-۵: اختلاف قطر آزمایش اسلامپ فلو با حلقه J و مقایسه با استاندارد ISIRI



شکل ۴-۶: اختلاف قطر آزمایش اسلامپ فلو با حلقه J و مقایسه با استاندارد ISIRI-ادامه

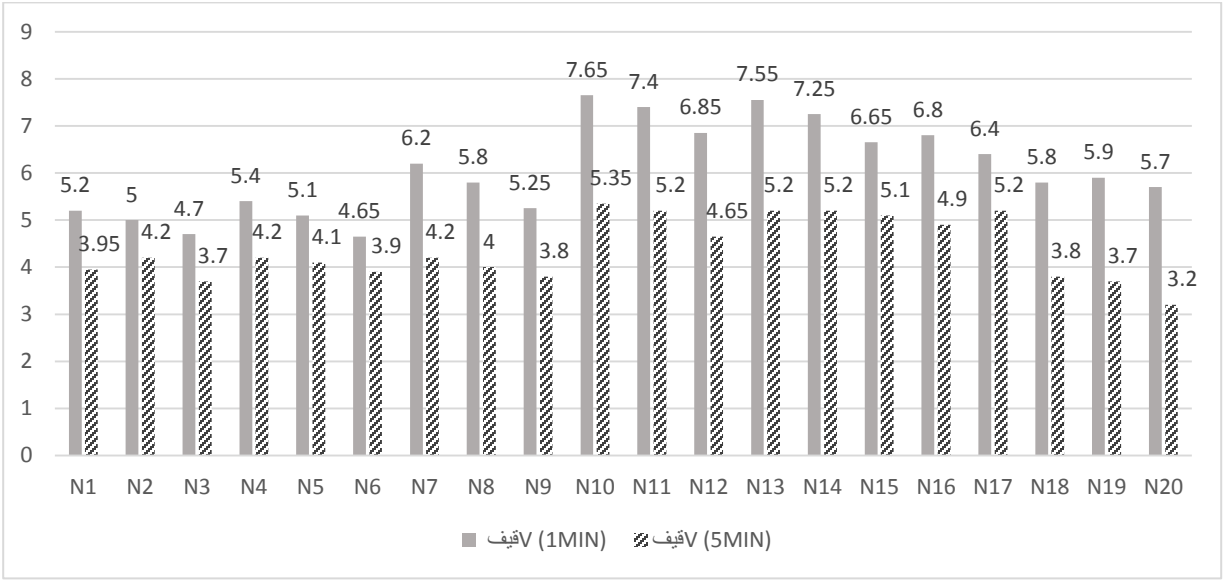


شکل ۴-۷: اختلاف قطر آزمایش اسلامپ فلو با حلقه J و مقایسه با استاندارد ISIRI-ادامه

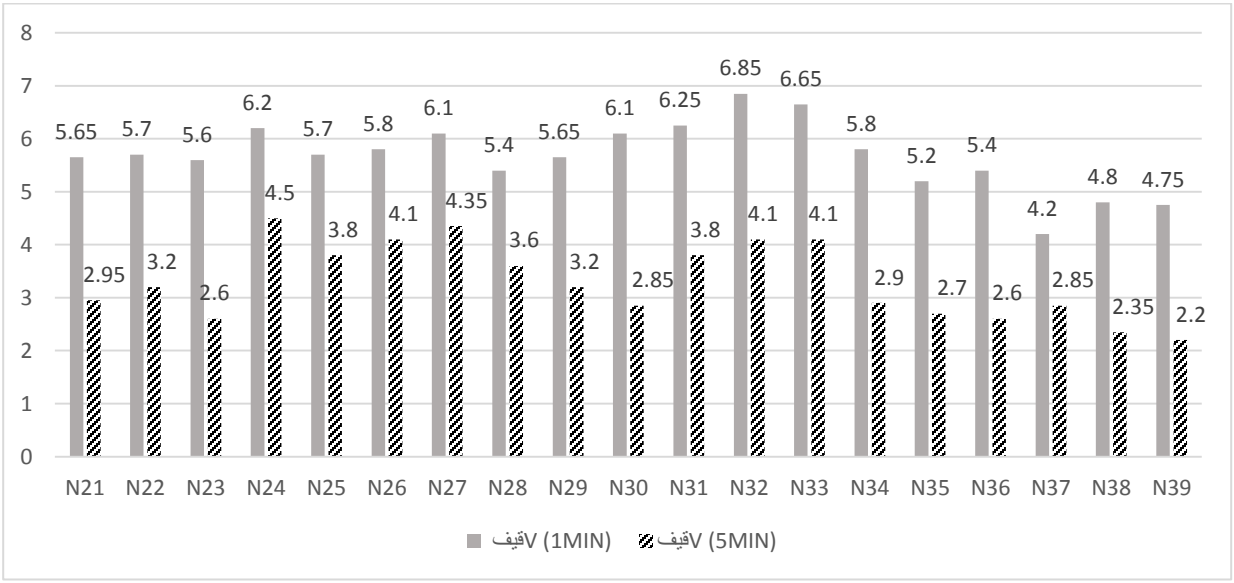
۴-۲-۳ آزمایش قیف V

زمان تخلیه قیف V در ۵ دقیقه در تمامی طرح‌ها بیشتر از زمان تخلیه قیف V در ۱ دقیقه بوده است که این امری بدیهی است؛ لیکن خلاف این موضوع بعید به نظر می‌رسد. با توجه به نتایج حاصله اختلاف‌زمان تخلیه در دو مرحله (۱ و ۵ دقیقه) در اکثر طرح‌های مخلوط کمتر از ۳ ثانیه و یا نزدیک به ۳ ثانیه می‌باشد. این موضوع بیانگر پایداری استاتیکی طرح‌ها است. در صورت ناپایداری استاتیکی مخلوط، ته‌نشینی صورت گرفته و موجب انسداد یا افزایش اختلاف بین زمان‌های تخلیه در ۵ دقیقه و ۱ دقیقه می‌شود. نتایج آزمایش قیف V در زمان‌های ۱ دقیقه و ۵ دقیقه در شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ ملاحظه می‌گردد.

نتایج از روی نمودارهای ترسیم‌شده حاکی از آن است که بتن‌های حاوی پوزولان خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی با توجه به حدود درصد مصرف یکسان از پوزولان، دارای زمان‌های تخلیه شبیه به هم بوده و بیانگر این می‌باشد که این دو نوع بتن از نظررئولوژی در آزمایش قیفV شبیه هم می‌باشند.



شکل ۴-۸: مقایسه نموداری آزمایش قیف V در ۱ و ۵ دقیقه

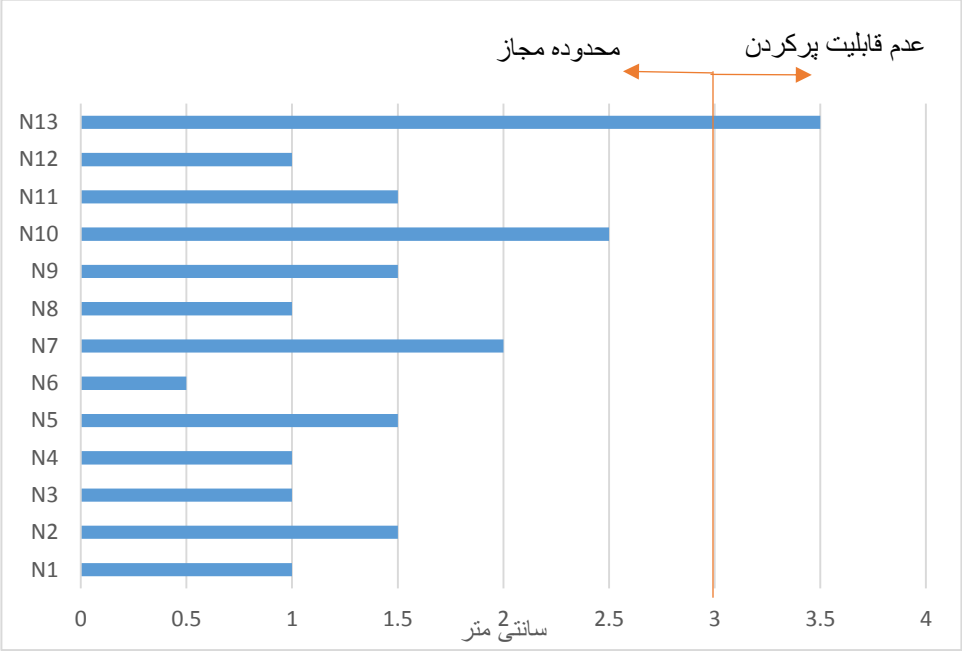


شکل ۴-۹: مقایسه نموداری آزمایش قیف V در ۱ و ۵ دقیقه-ادامه

۴-۲-۴ آزمایش جعبه U

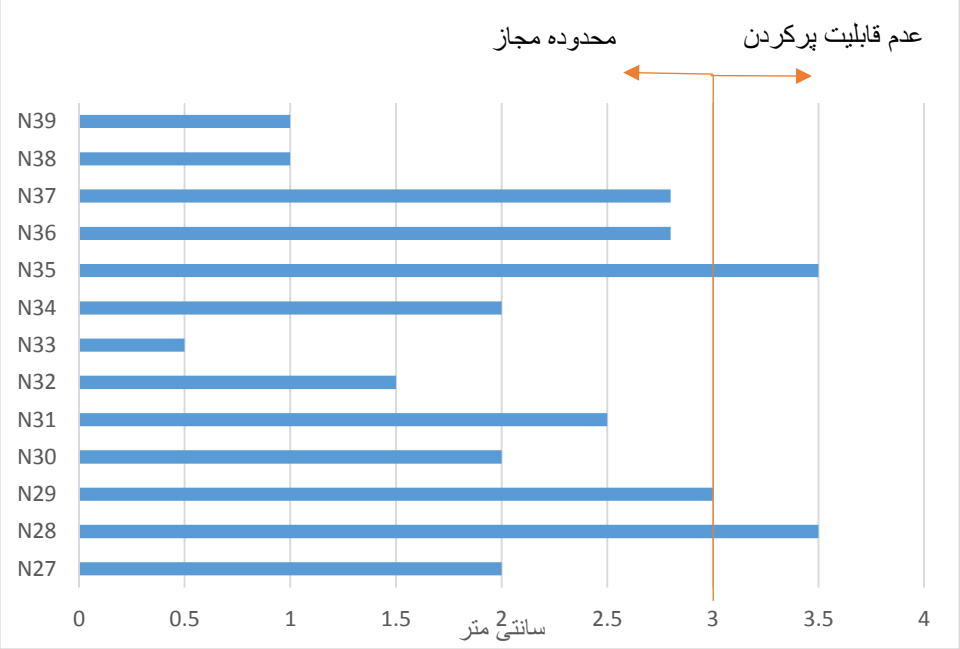
نتایج آزمایش‌های جعبه U برای طرح‌های با جریان اسلامپ کمتر از ۶۵ سانتیمتر مناسب نبوده و قابلیت پرکنندگی ندارند. همان‌طور که در شکل‌های ۴-۱۰ الی ۴-۱۲ ملاحظه می‌گردد اکثر طرح‌های ساخته‌شده با میکروسیلیس و همچنین بتن‌های شاهد اختلاف بیش از ۳ سانتی‌متر داشته و بیانگر عدم قابلیت پر

کردن در این نوع بتن‌های ساخته‌شده می‌باشد. همچنین بتن‌های حاوی پوزولان خاش، زئولیت، سرباره کوره آهن‌گدازی در محدوده مجاز ازنظر استاندارد می‌باشند.



شکل ۴-۱۰: نتایج آزمایش جعبه U

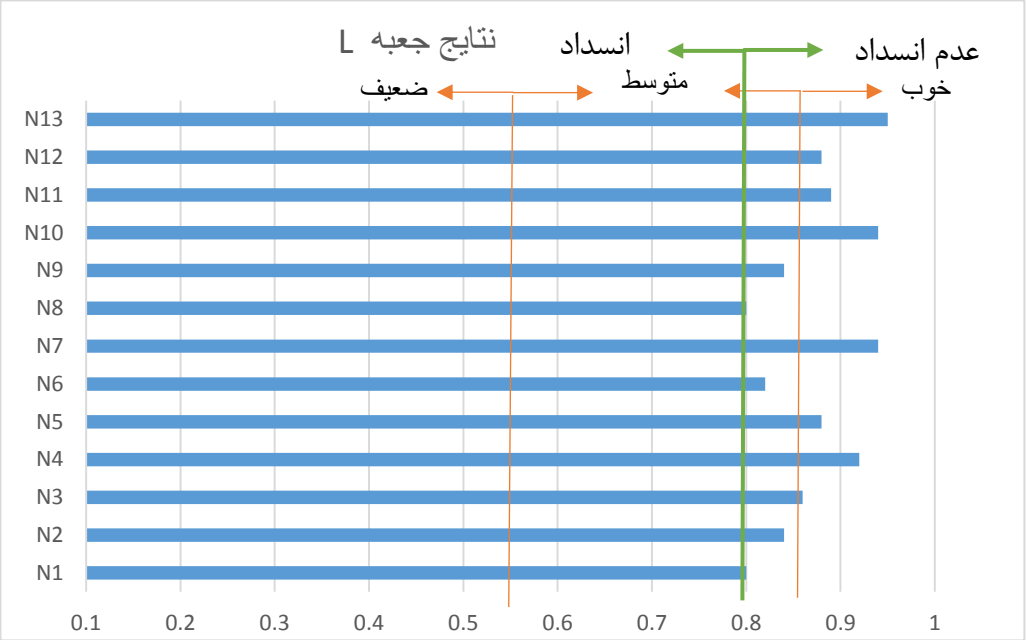
شکل ۴-۱۱: نتایج آزمایش جعبه U-ادامه



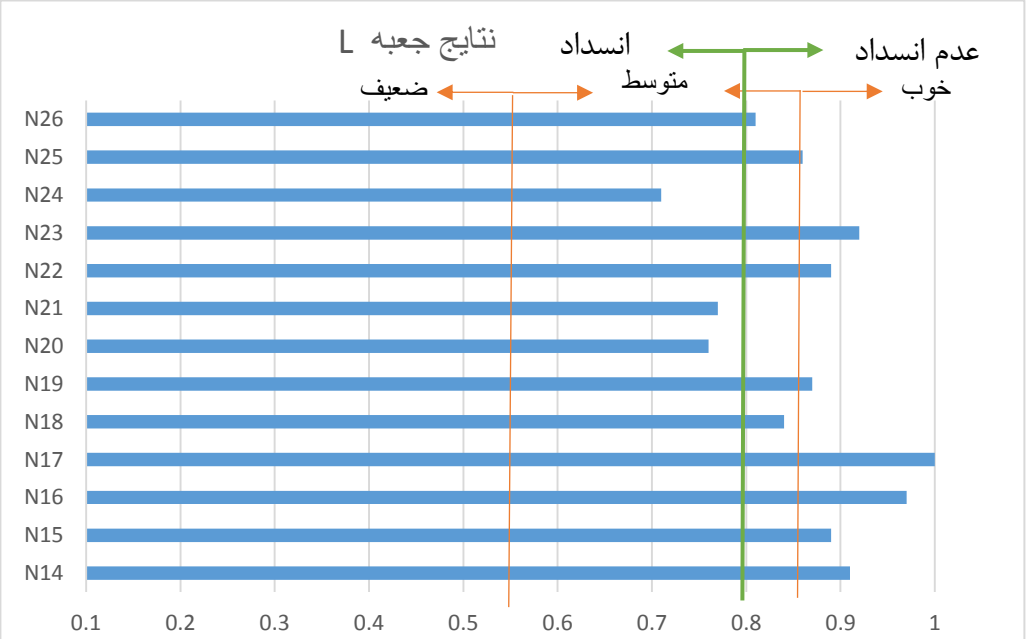
شکل ۴-۱۲: نتایج آزمایش جعبه U- ادامه

۴-۲-۵ آزمایش جعبه L

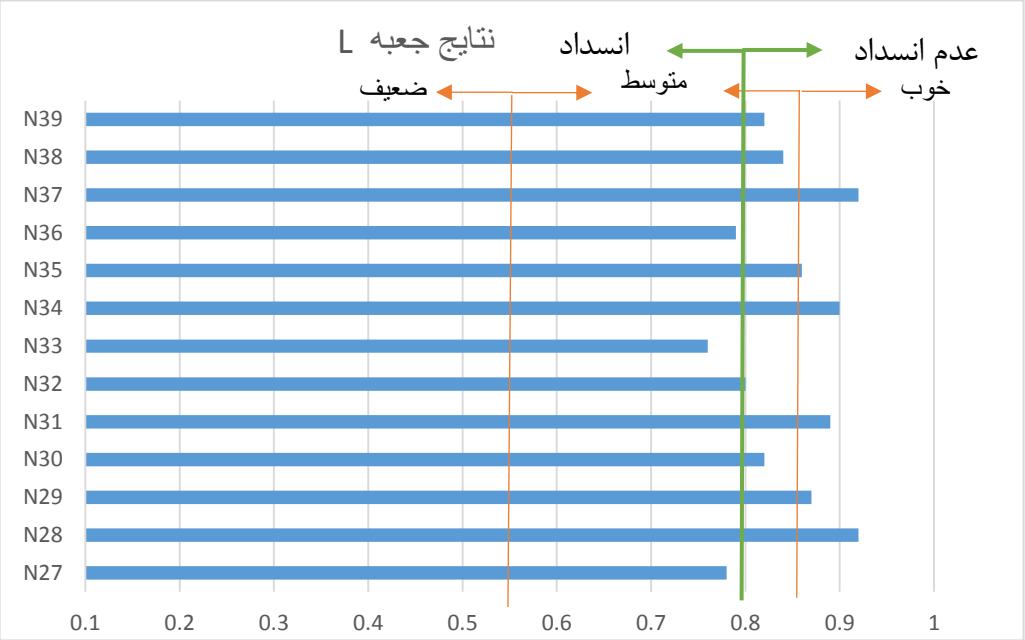
این آزمایش مانند آزمایش جعبه U بسیار سخت‌گیرانه طراحی‌شده است و در صورت جوابگو بودن، به بتن خودتراکم حاصل تا حدود زیادی می‌توان اطمینان داشت. همان‌طور که در شکل‌های ۴-۱۳ الی ۴-۱۵ ملاحظه می‌گردد نتایج حاکی از آن است که طرح‌های حاوی زئولیت دارای کمترین مقادیر در آزمایش جعبه L می‌باشد و این طرح‌ها دچار انسداد می‌گردد و مابقی طرح‌های ساخته‌شده نتایج قابل قبولی را دارا می‌باشند.



شکل ۴-۱۳: مقایسه نتایج آزمایش جعبه L با مرجع [۳].



شکل ۴-۱۴: مقایسه نتایج آزمایش جعبه L با مرجع [۳]- ادامه.



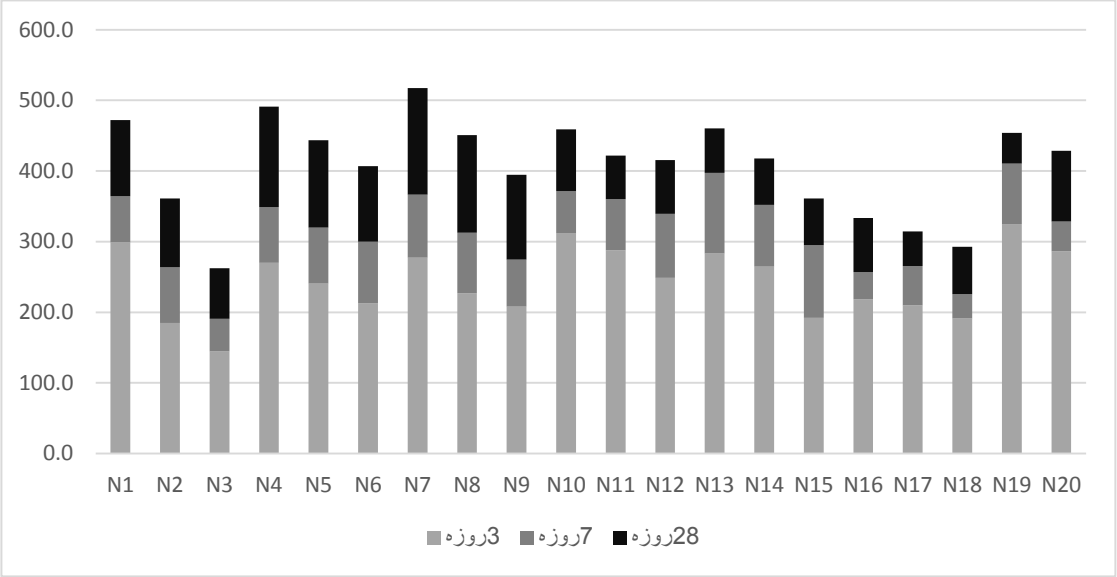
شکل ۴-۱۵: مقایسه نتایج آزمایش جعبه L با مرجع [۳]- ادامه.

۴-۳ نتایج آزمایش‌های فاز سخت شده و محاسبه ضریب K

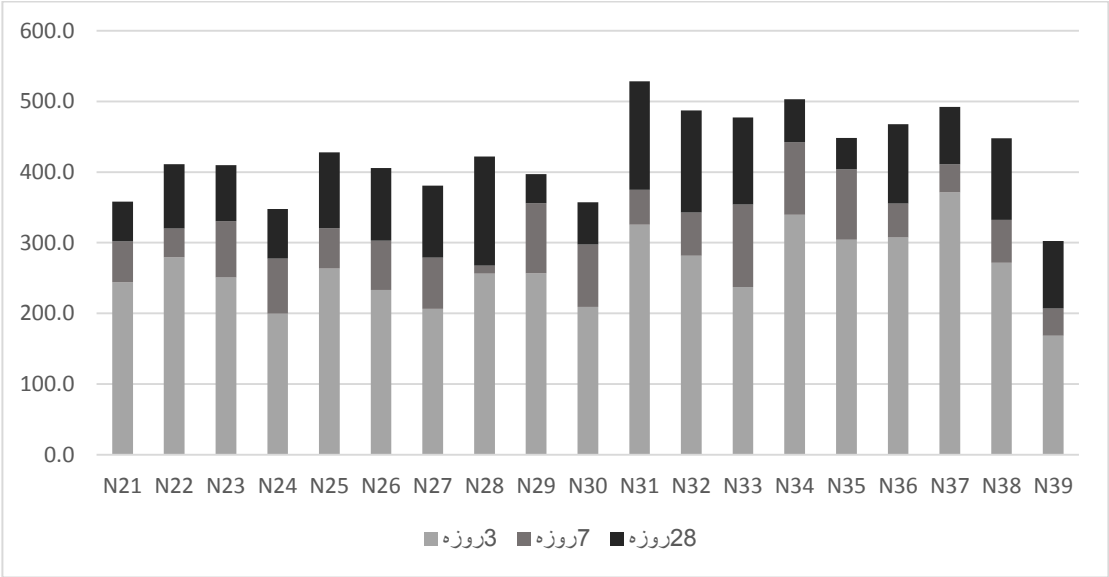
نوع نمونه‌گیری، تعداد، سن آزمایش و تشریح آزمایش‌های فاز سخت شده در فصل سوم بیان شد. در این بخش فقط به ارائه نتایج و تحلیل آن‌ها پرداخته می‌شود.

۴-۳-۱ نتایج مقاومت فشاری

برای هریک از طرح‌ها تعداد ۷ عدد آزمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ گرفته‌شده است که ۴ عدد از این آزمونه‌ها در سنین ۳ و ۷ و در سن ۲۸ روزه برای افزایش دقت ۳ آزمونه مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج در اشکال ۴-۱۶ و ۴-۱۷ آورده شده است.



شکل ۴-۱۶: نتایج مقاومت فشاری طرح‌های N۱ الی N۲۰



شکل ۴-۱۷: نتایج مقاومت فشاری طرح‌های N۲۱ الی N۳۹- ادامه

همان‌طور که انتظار آن را داشتیم با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری نیز افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به طرح‌های مخلوط ساخته‌شده شاهد آن هستیم که با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی از ۰/۴۰

به ۰/۵۰ مقاومت فشاری کاهش‌یافته است. بیشترین و کمترین مقادیر مقاومت فشاری به ترتیب مربوط به طرح‌های N۳۱ و N۳ می‌باشد.

نتایج مقاومت فشاری در طرح‌های مخلوط حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی از بقیه طرح‌های مخلوط ساخته‌شده ازنظر میانگین مقاومتی بهتر می‌باشد. همچنین می‌توان گفت که ۹ طرح ساخته‌شده با زئولیت دارای نتایج مقاومت فشاری تقریباً یکسانی بوده و درصد بهینه مصرف زئولیت در ساخت بتن خودتراکم حدود ۱۰ درصد توصیه می‌گردد.

نتایج مقاومت فشاری در بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان خاش در درصدهای مصرف ۱۵ و ۲۵ درصد دارای حدود میانگین مقاومتی یکسانی می‌باشد و در بتن‌های با مصرف ۳۵ درصد پوزولان خاش شاهد کاهش مقاومت فشاری می‌باشیم، لذا درصد مصرف بهینه استفاده از پوزولان خاش حدود ۲۰ درصد توصیه می‌گردد.

در بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس با افزایش مصرف میکروسیلیس در طرح‌های مخلوط شاهد آن هستیم که مقاومت فشاری بهبودیافته و برای رسیدن به مقاومت فشاری بالاتر میزان مصرف میکروسیلیس در طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم حدود ۱۰ درصد توصیه می‌گردد. نتایج مقاومت فشاری طرح‌ها در جدول ۴-۳ ارائه‌شده است.

با مقایسه نمودارهای مقاومت فشاری طرح‌های مخلوط حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی شاهد آن هستیم که با افزایش مصرف سرباره کوره آهن‌گدازی مقاومت فشاری افزایش‌یافته و درصد مصرف بهینه استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی حدود ۲۵ درصد توصیه می‌گردد.

جدول ۴-۳: نتایج مقاومت فشاری در سنین ۳،۷ و ۲۸ روزه(kg/cm^2)

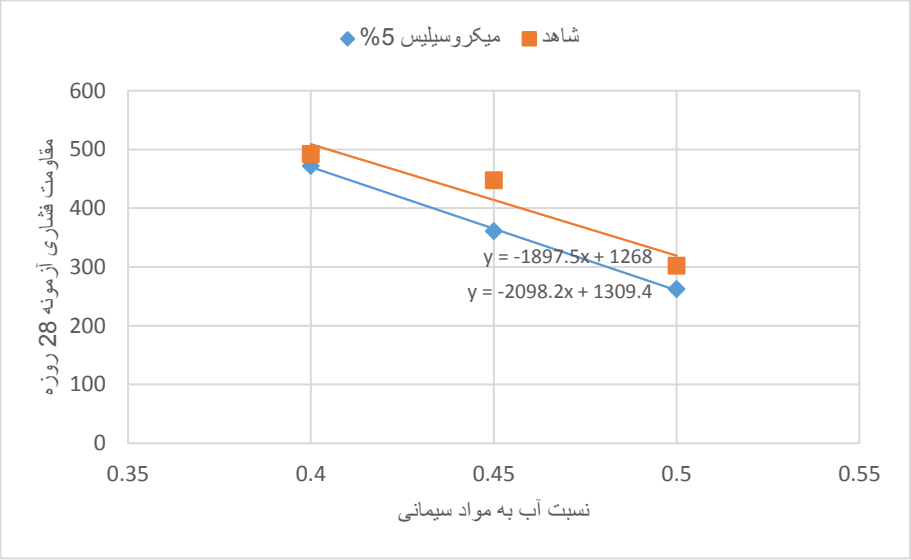
شماره طرح	۳ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه
N۱	۲۹۹/۱	۳۶۴/۴	۴۷۲
N۲	۱۸۴/۷	۲۶۳/۸	۳۶۱/۳
N۳	۱۴۴/۷	۱۹۰/۸	۲۶۲/۲
N۴	۲۶۹/۹	۳۴۸/۸	۴۹۰/۹
N۵	۲۴۰/۷	۳۱۹/۸	۴۴۳/۵
N۶	۲۱۲/۵	۳۰۰	۴۰۶/۸
N۷	۲۷۷/۴	۳۶۶/۳	۵۱۷/۲
N۸	۲۲۷/۱	۳۱۲/۷	۴۵۰/۷
N۹	۲۰۷/۸	۲۷۴/۶	۳۹۴/۶
N۱۰	۳۱۲/۲	۳۷۱/۵	۴۵۹/۲
N۱۱	۲۸۷/۸	۳۶۰/۲	۴۲۱/۸
N۱۲	۲۴۸/۷	۳۳۹/۵	۴۱۵/۶
N۱۳	۲۸۳/۴	۳۹۷/۴	۴۶۰/۲
N۱۴	۲۶۴/۷	۳۵۲/۲	۴۱۷/۸
N۱۵	۱۹۲/۳	۲۹۴/۸	۳۶۱/۳
N۱۶	۲۱۸/۶	۲۵۶/۷	۳۳۳/۴
N۱۷	۲۰۹/۷	۲۶۵/۷	۳۱۴/۳
N۱۸	۱۹۱/۲	۲۲۵/۴	۲۹۲/۹
N۱۹	۳۲۴/۹	۴۱۰/۵	۴۵۴/۱
N۲۰	۲۸۶/۳	۳۲۸/۷	۴۲۸/۴
N۲۱	۲۴۴	۳۰۱/۹	۳۵۸/۲
N۲۲	۲۷۹/۳	۳۲۰/۲	۴۱۱/۲
N۲۳	۲۵۰/۶	۳۳۰/۶	۴۰۹/۶

ادامه جدول ۴-۳: نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷،۳ و ۲۸ روزه

N۲۴	۱۹۹/۸	۲۷۷/۴	۳۴۷/۸
N۲۵	۲۶۳/۳	۳۲۰/۷	۴۲۷/۸
N۲۶	۲۳۳/۲	۳۰۲/۹	۴۰۵/۵
N۲۷	۲۰۶/۴	۲۷۸/۸	۳۸۰/۸
N۲۸	۲۵۶/۲	۲۶۷/۵	۴۲۱/۸
N۲۹	۲۵۶/۷	۳۵۶	۳۹۷/۱
N۳۰	۲۰۹/۱	۲۹۷/۳	۳۵۷/۳
N۳۱	۳۲۵/۵	۳۷۵/۱	۵۲۸/۶
N۳۲	۲۸۱/۶	۳۴۲/۸	۴۸۷/۱
N۳۳	۲۳۷/۴	۳۵۴/۱	۴۷۷/۴
N۳۴	۳۳۹/۷	۴۴۲/۳	۵۰۳/۲
N۳۵	۳۰۴/۲	۴۰۴	۴۴۸/۵
N۳۶	۳۰۷/۵	۳۵۵/۵	۴۶۷/۶
N۳۷	۳۷۱/۵	۴۱۱	۴۹۲/۱
N۳۸	۲۷۱/۸	۳۳۲/۵	۴۴۷/۹
N۳۹	۱۶۸/۳	۲۰۶/۸	۳۰۲/۳

۴-۳-۲ محاسبه ضریب K

مطابق استاندارد DIN CEN/TR 16639 ابتدا نمودار نسبت آب به مواد سیمانی و مقاومت فشاری برای بتن‌های حاوی پوزولان و نمونه شاهد ساخته‌شده در شرایط یکسان ترسیم و پس‌ازآن معادله خط هر دو نمودار به دست می‌آید. به‌عنوان‌مثال برای طرح N۱ در برنامه نوشته‌شده در نرم‌افزار اکسل داریم:



پس از به دست آوردن معادله‌های خط و گذاشتن پارامترهای لازم در رابطه ۴-۲ مقدار ضریب K محاسبه می‌گردد.

$$k = \frac{(A_a - A_o)\cdot(1+a/c)}{B_a \cdot a/c}\cdot\frac{1}{\omega_o} + \left[\frac{B_o\cdot(1+a/c)}{B_a} - 1\right]\cdot\frac{1}{a/c} \qquad (۴-۲)$$

که در آن:

ω_0: نسبت آب به مواد سیمانی نمونه شاهد

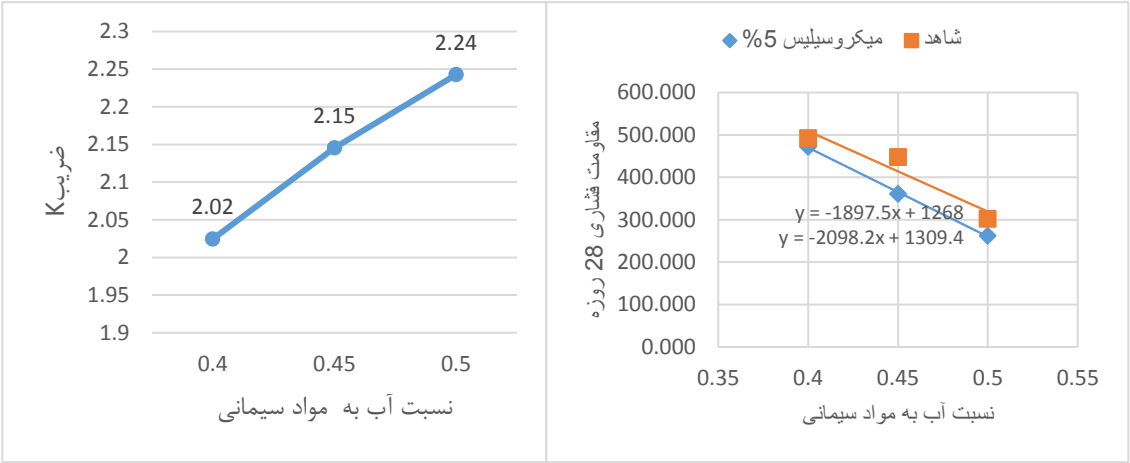
a: مقدار مواد پودری فعال معدنی (پوزولان)

C: مقدار سیمان مصرفی در طرح‌های مخلوط

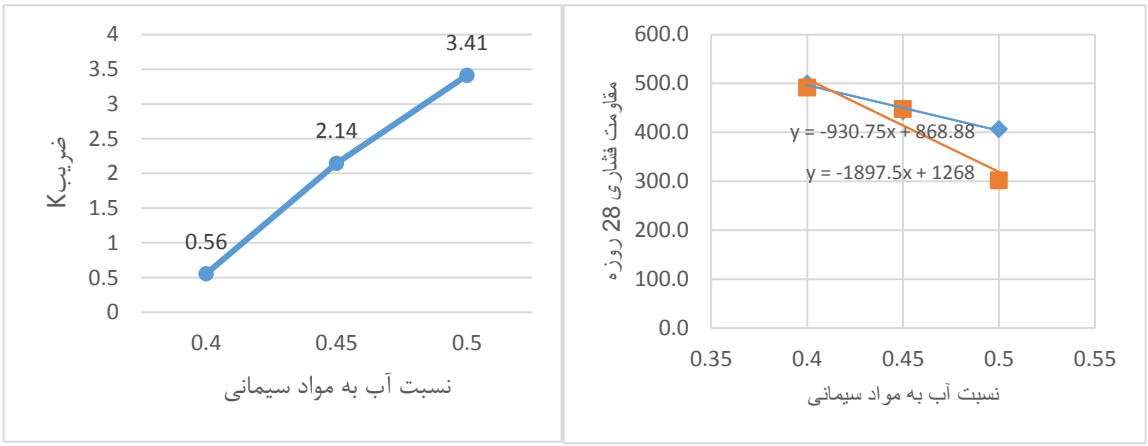
f_o,fc: مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌های شاهد و حاوی پوزولان

A_o, Aa, B_o, Ba: ضرایب ثابت در رابطه خطی مقاومت فشاری نمونه‌های شاهد و حاوی پوزولان

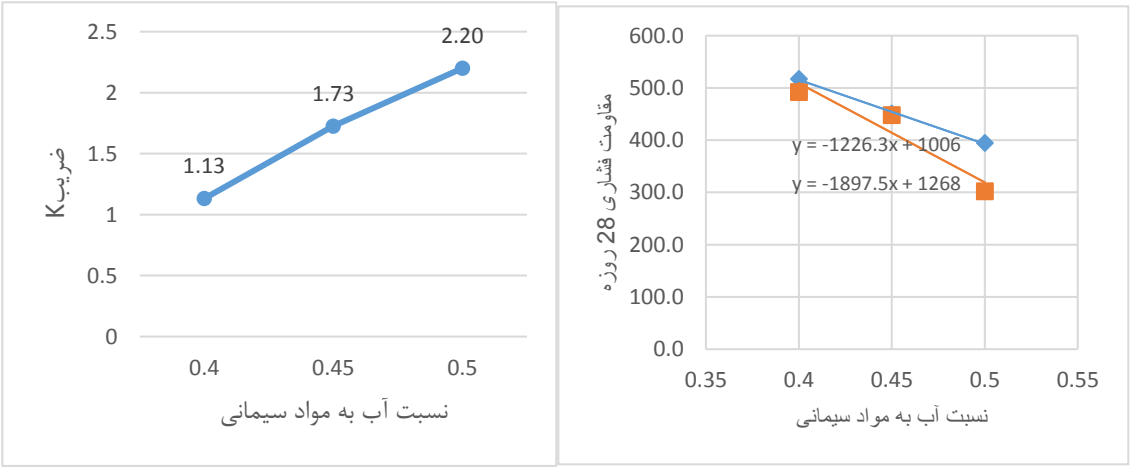
در بتن خودتراکم برای طرح‌های ساخته‌شده نمودارهای ضریب K در نسبت آب به مواد سیمانی مطابق شکل‌های ۴-۱۸ الی ۴-۲۹ بدست می‌آید.



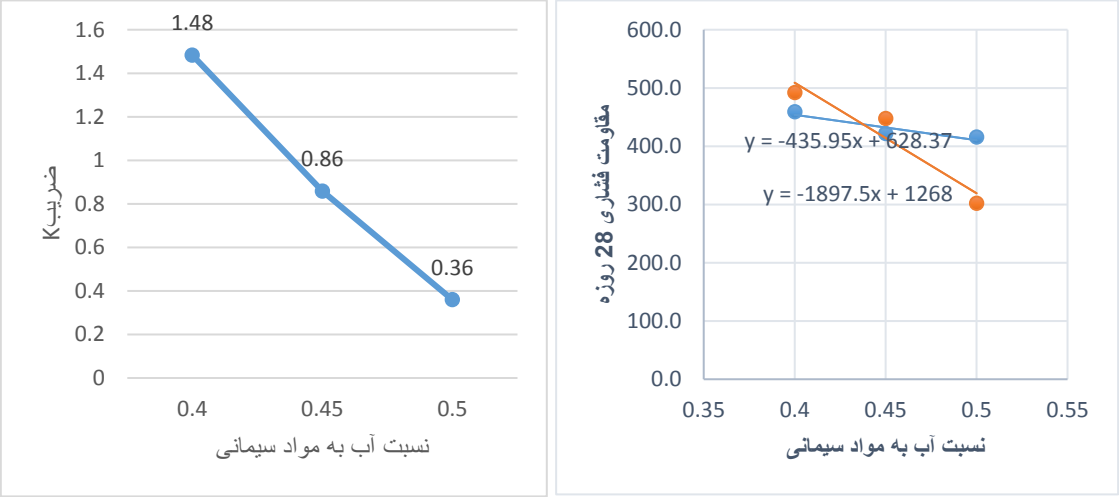
شکل ۴-۱۸: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۵٪ با بتن شاهد



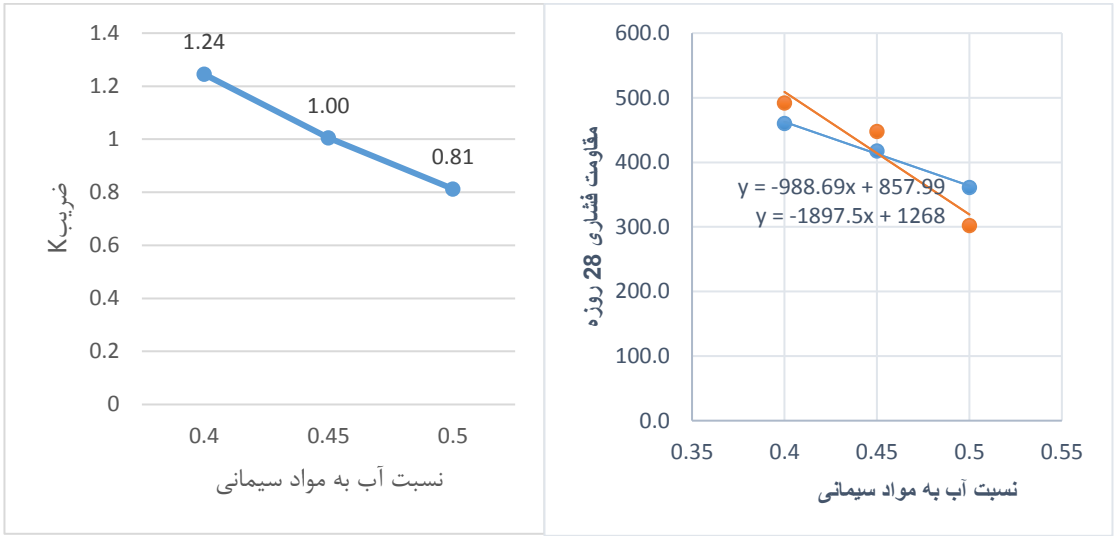
شکل ۴-۱۹: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۷/۵٪ با بتن شاهد



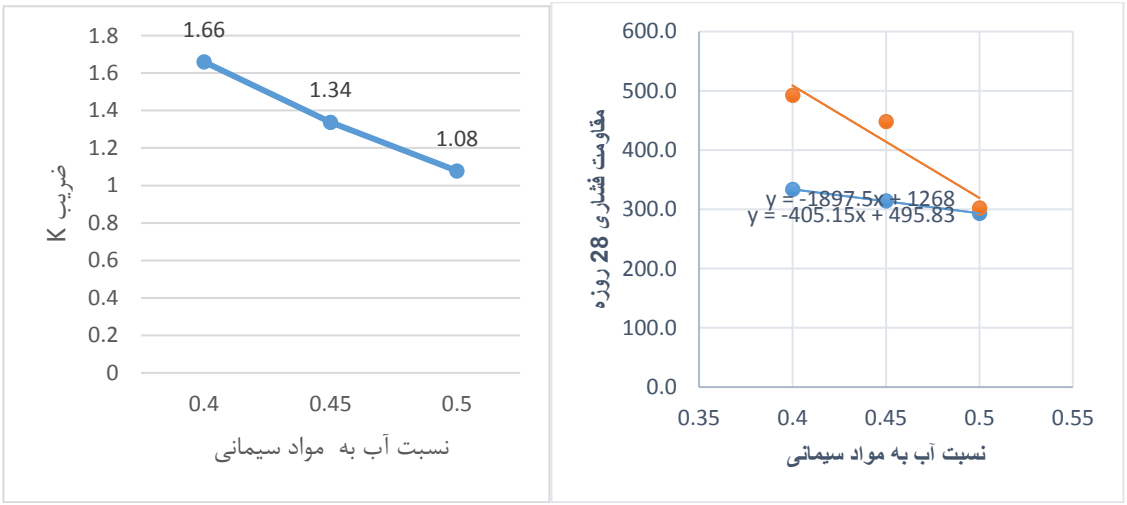
شکل ۴-۲۰: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۱۰٪ با بتن شاهد



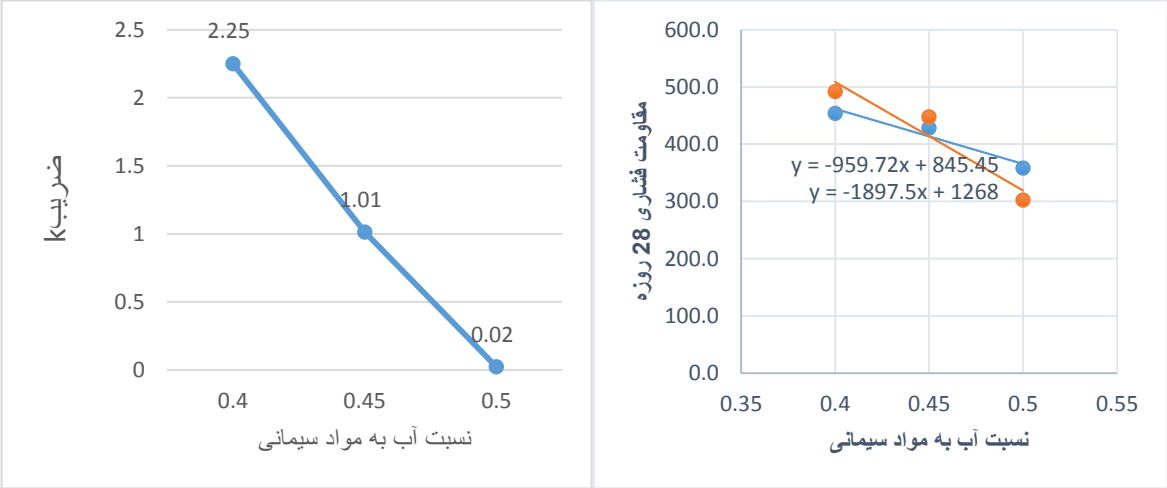
شکل ۴-۲۱: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش ۱۵٪ با بتن شاهد



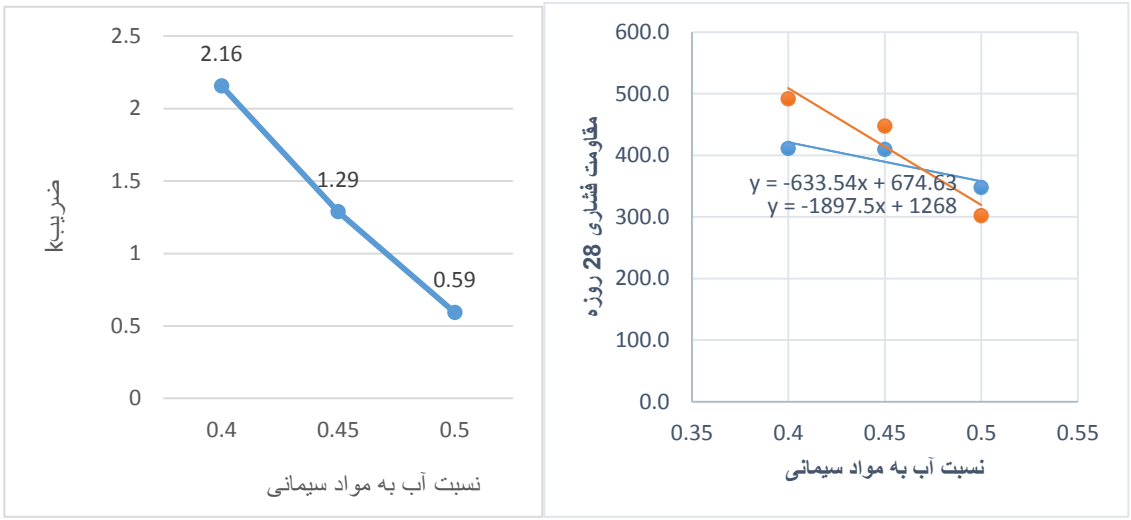
شکل ۴-۲۲: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش ۲۵٪ با بتن شاهد



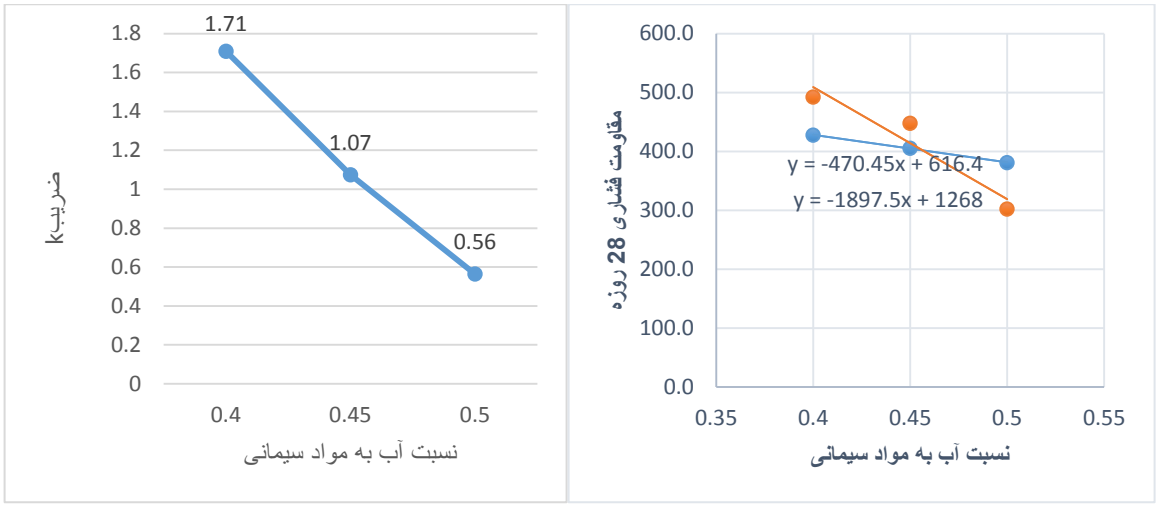
شکل ۴-۲۳: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش ۳۵٪ با بتن شاهد



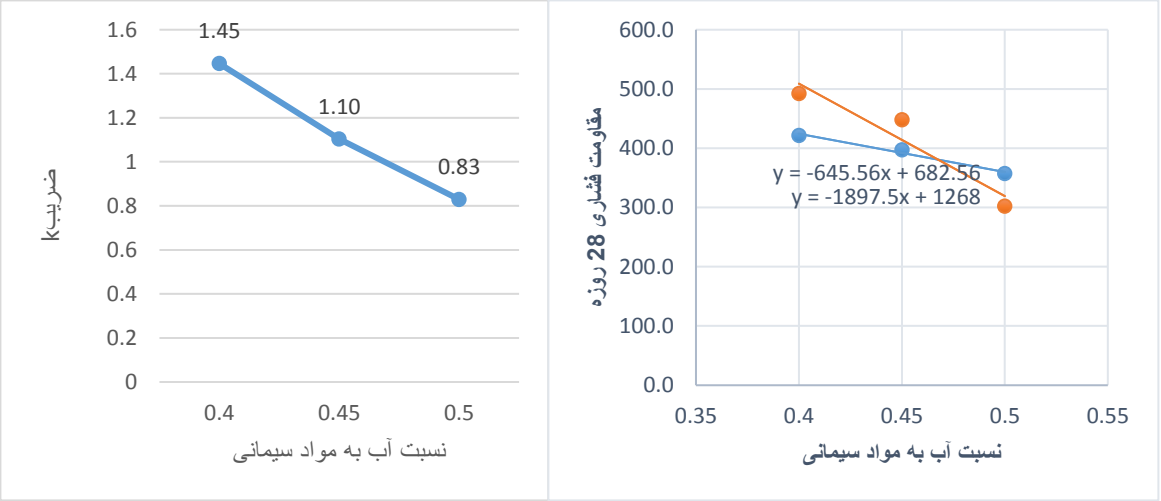
شکل ۴-۲۴: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان زئولیت ۵٪ با بتن شاهد



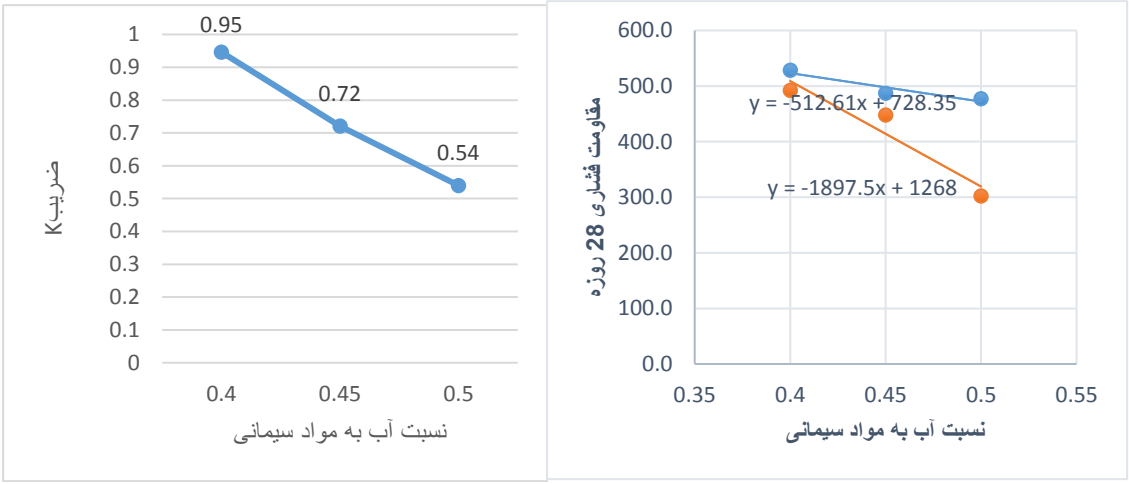
شکل ۴-۲۵: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان زئولیت ۱۰٪ با بتن شاهد



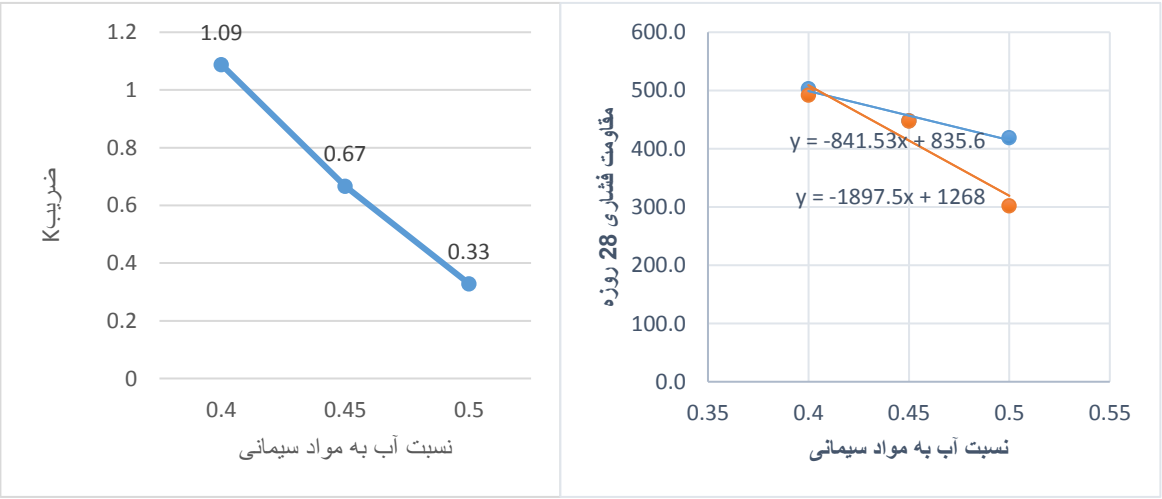
شکل ۴-۲۶: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان زئولیت ۱۵٪ با بتن شاهد



شکل ۴-۲۷: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان سرباره کوره آهن‌گدازی ۲۵٪ با بتن شاهد



شکل ۴-۲۸: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان سرباره کوره آهن‌گدازی ۳۵٪ با بتن شاهد



شکل ۴-۲۹: ضریب K و مقایسه بتن خودتراکم حاوی پوزولان سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۵٪ با بتن شاهد

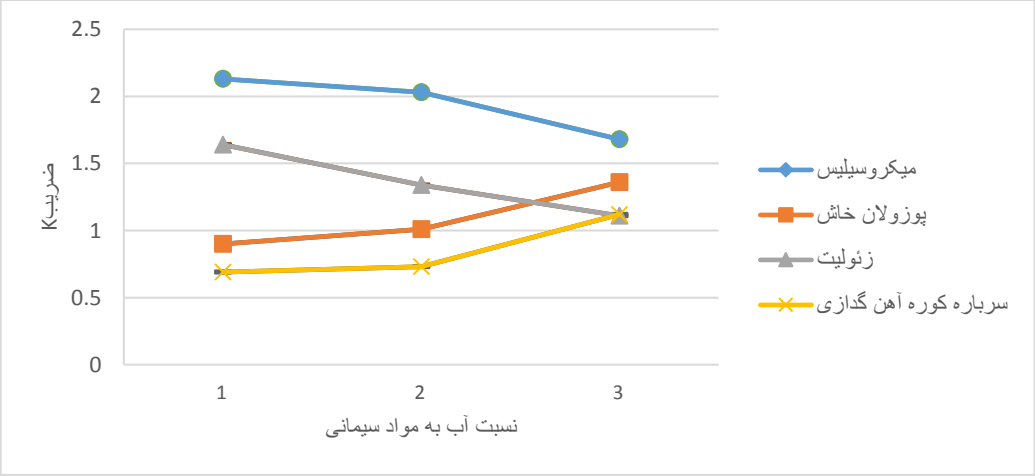
همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی در محدوده ۰/۴۰ الی ۰/۵۰ در بتن‌های حاوی میکروسیلیس مقدار ضریب K رو به افزایش است و این در حالی است که در بتن‌های حاوی پوزولان خاش، زئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی بدین گونه نمی‌باشد و با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی مقادیر ضریب K کاهش می‌یابد.

نتایج ضریب K پس از بررسی و میانگین‌گیری نتایج با توجه به افزایش درصد مصرف هر نوع پوزولان در طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم در جدول ۴-۴ و شکل ۴-۳۰ ارائه گردیده است.

جدول ۴-۴: نتایج ضریب K برای پوزولان‌های مصنوعی و طبیعی در بتن خودتراکم

محدوده مصرف	میکروسیلیس	پوزولان خاش	زئولیت	سرباره کوره آهن‌گدازی
۱	۲/۱۳	۰/۹۰	۱/۶۴	۰/۶۹
۲	۲/۰۳	۱/۰۱	۱/۳۴	۰/۷۳
۳	۱/۶۸	۱/۳۶	۱/۱۱	۱/۱۲

نکته: منظور از محدوده مصرف ۱، ۲ و ۳ این است که با افزایش درصد مصرف هر نوع پوزولان در طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم نیز اعداد ۱، ۲ و ۳ تعریف‌شده است.



شکل ۴-۳۰: نتایج ضریب K برای پوزولان‌های مصنوعی و طبیعی در بتن خودتراکم

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده نتیجه می‌گیریم که با افزایش مصرف پوزولان‌های میکروسیلیس و زئولیت در طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم ضریب K کاهش می‌یابد و در پوزولان‌های خاش و سرباره کوره آهن-گدازی این‌گونه نبوده و افزایش مصرف در طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم سبب افزایش مقادیر ضریب K می‌گردد.

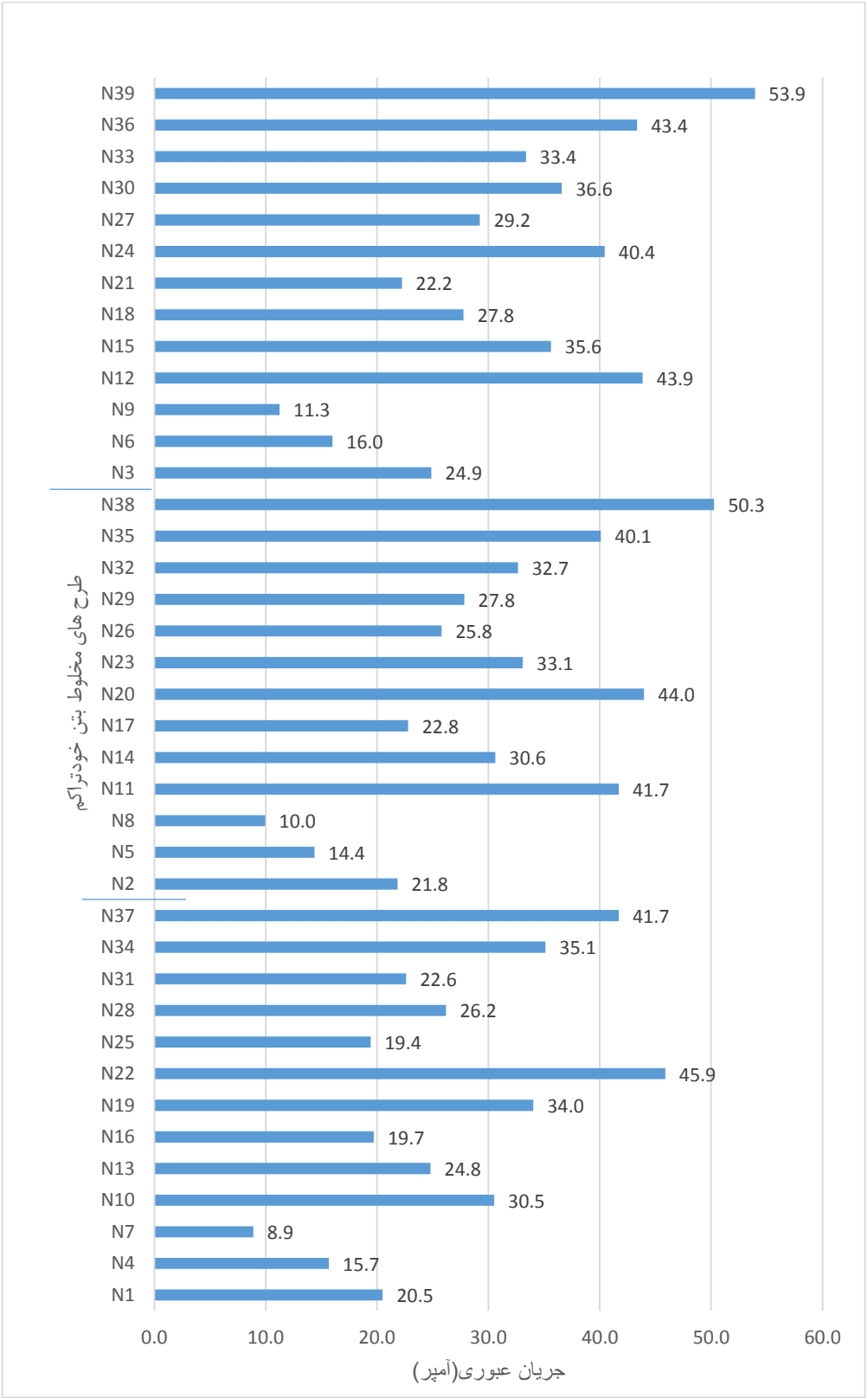
در جدول ۴-۵ مقادیر ضریب K برای پوزولان‌های مصرفی در بتن خودتراکم ساخته‌شده در این تحقیق آورده شده است.

جدول ۴-۵: مقادیر ضریب K برای پوزولان‌های مصرف‌شده در بتن خودتراکم

نام پوزولان مصرفی	محدوده نسبت آب به مواد سیمانی	ضریب K
میکروسیلیس	۰/۴۰ – ۰/۵۰	۱/۷۰ – ۲/۲۰
خاش	۰/۴۰ – ۰/۵۰	۰/۹۰ – ۱/۴۰
زئولیت	۰/۴۰ – ۰/۵۰	۱/۱۰ – ۱/۶۰
سرباره کوره آهن‌گدازی	۰/۴۰ – ۰/۵۰	۰/۷۰ – ۱/۱۵

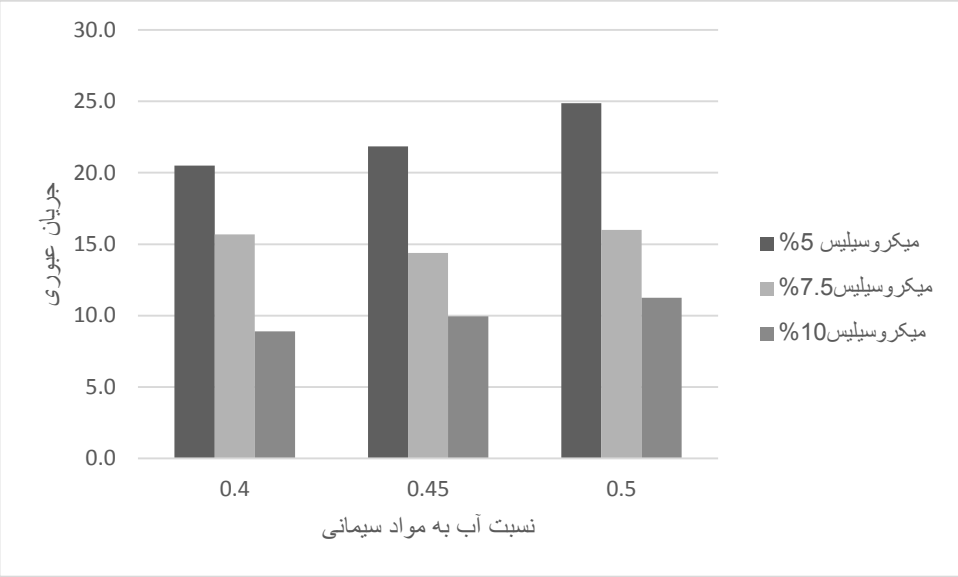
۴-۳-۳ نتایج آزمایش هدایت الکتریکی

در آزمایش هدایت الکتریکی به‌طورکلی می‌توان گفت که نسبت آب به مواد سیمانی رابطه مستقیمی با جریان عبوری نمونه‌های آزمایش‌شده دارد و هرچه نسبت آب به مواد سیمانی افزایش یابد؛ مقدار جریان عبوری در نمونه‌های ساخته‌شده افزایش می‌یابد. با مشاهده شکل ۴-۳۱ می‌توان ارتباط بین نسبت آب به مواد سیمانی و آزمایش هدایت الکتریکی را ملاحظه نمود.

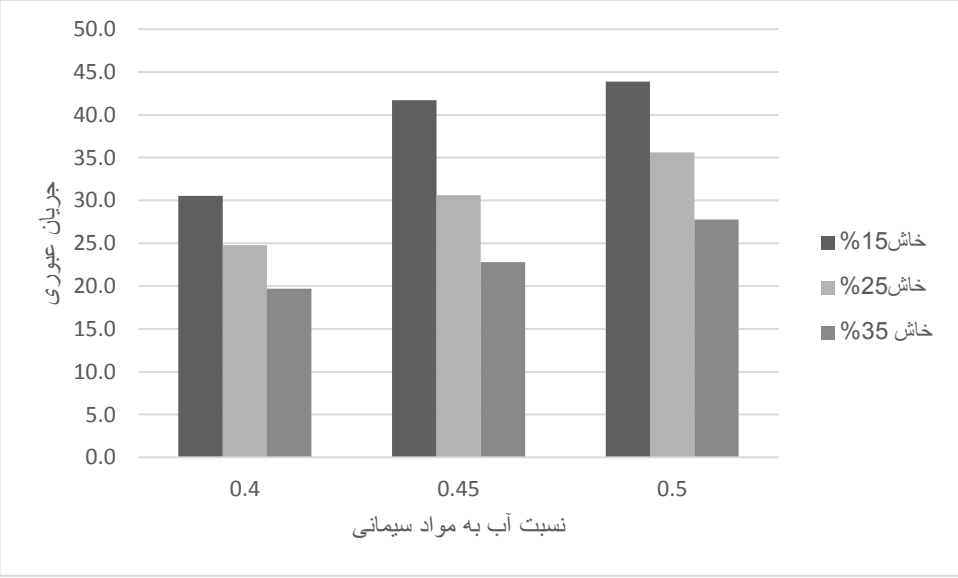


شکل ۴-۳۱: ارتباط بین نسبت آب به مواد سیمانی و آزمایش هدایت الکتریکی

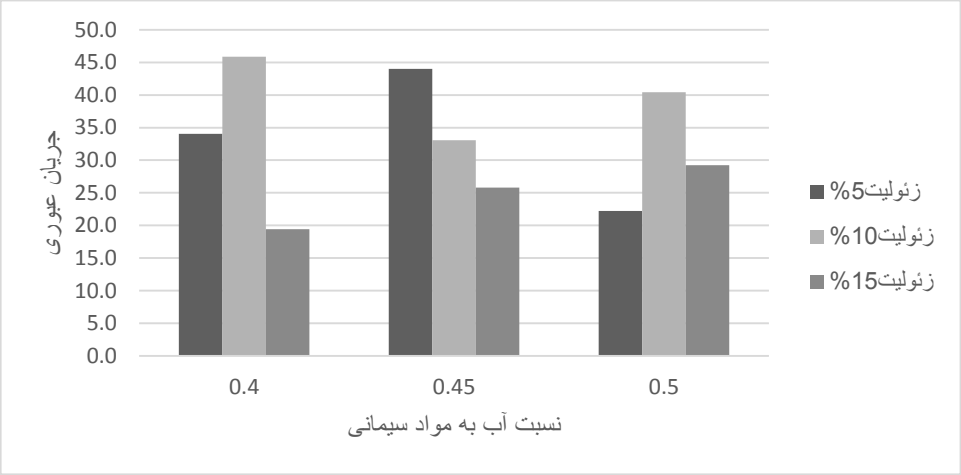
همچنین با بررسی شکل‌های ۴-۳۲ الی ۴-۳۵ شاهد آن هستیم که با افزایش درصد مصرف پوزولان‌هایی نظیر میکروسیلیس، خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی مقدار جریان عبوری در نمونه‌ها کاهش‌یافته و در پوزولان زئولیت نتایج تغییر چندانی نمی‌کند.



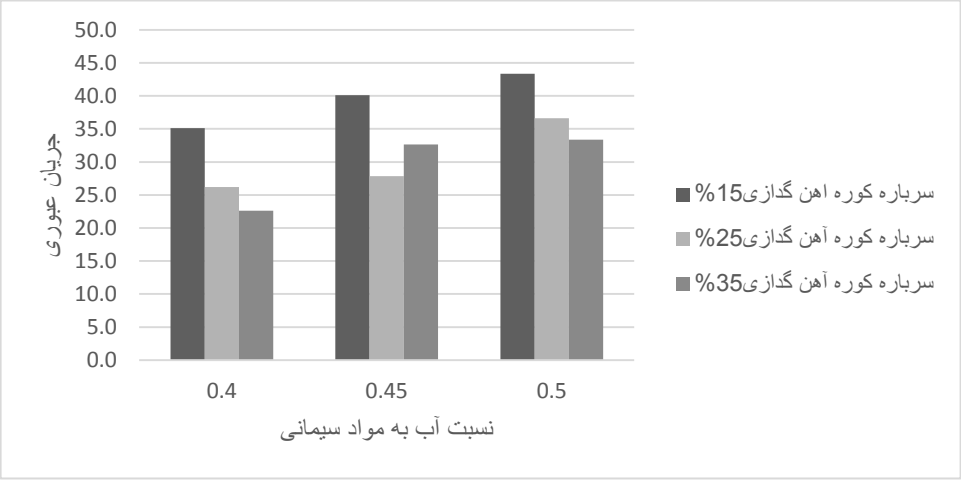
شکل ۴-۳۲: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس



شکل ۴-۳۳: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش

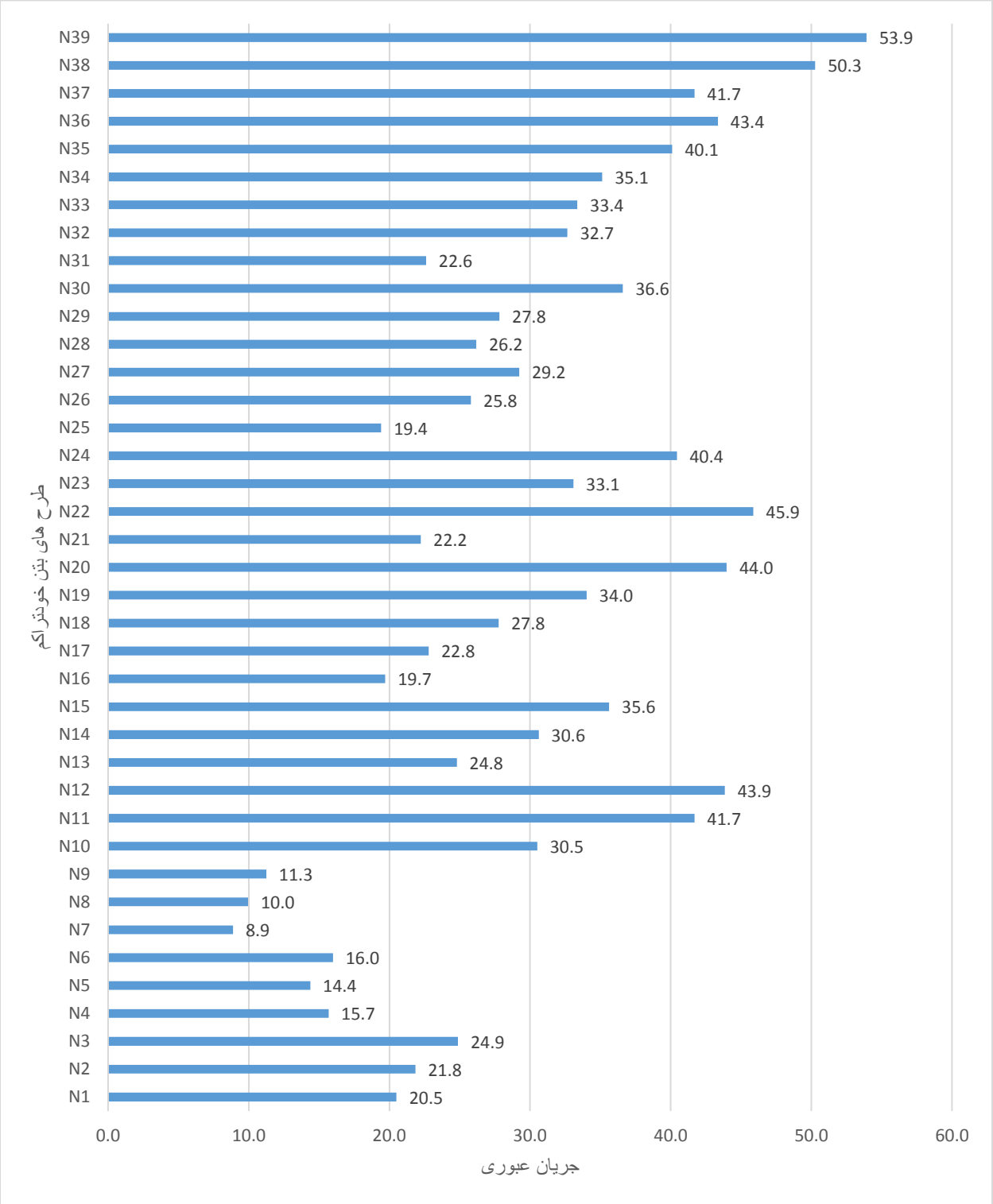


شکل ۴-۳۴: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی زئولیت



شکل ۴-۳۵: نتیجه آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی

با توجه به شکل ۴-۳۶ می‌توان گفت که استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی موجب کاهش جریان عبوری نسبت به نمونه‌های شاهد بدون استفاده از پوزولان گردیده و افزایش دوام بتن را در پی دارد.

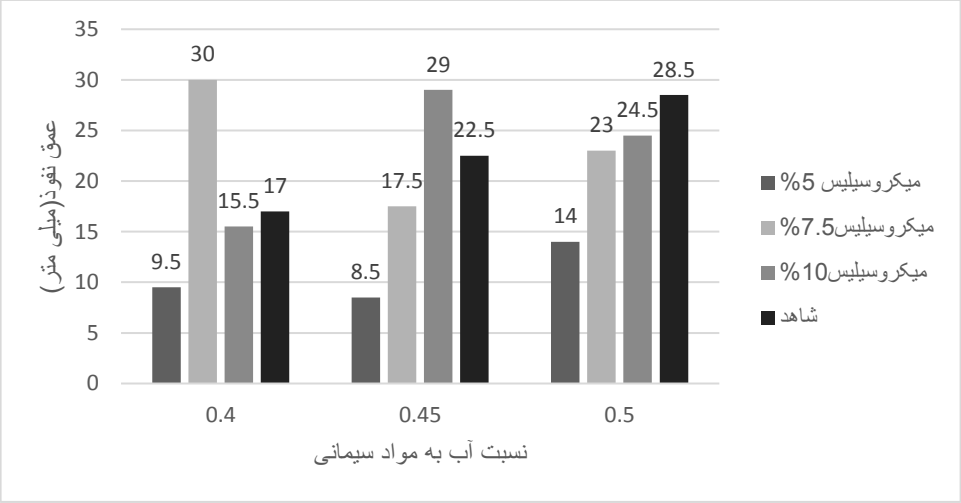


شکل ۴-۳۶: نتایج آزمایش هدایت الکتریکی در بتن خودتراکم

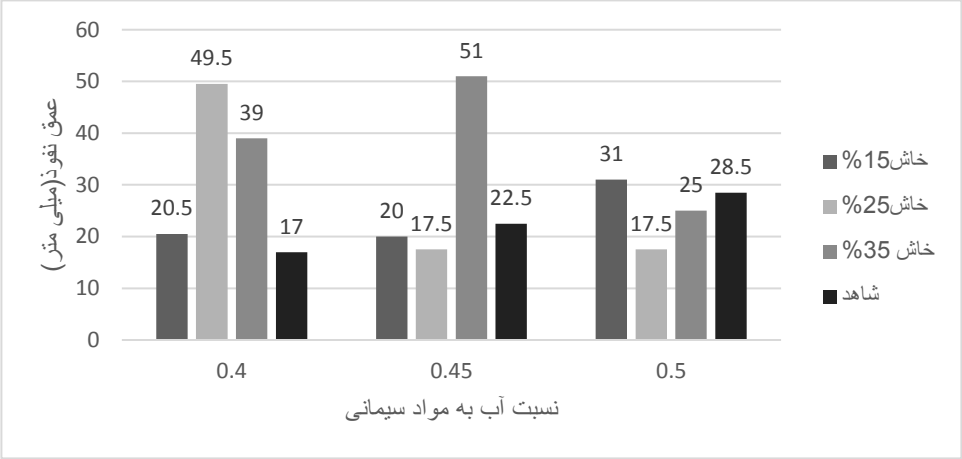
بیشترین مقدار جریان عبوری در آزمایش هدایت الکتریکی در طرح شماره N۳۹ مربوط به نمونه شاهد با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵۰ و کمترین مقدار جریان عبوری مربوط به طرح شماره N۷ مربوط به نمونه حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ می‌باشد. بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس در ۳ حالت مصرف مختلف و همچنین زئولیت ۱۵٪ و سرباره کوره آهن‌گدازی ۲۵٪ و ۳۵٪ بهترین نتایج آزمایش هدایت الکتریکی را داشته و می‌توان تفسیر نمود که برای افزایش دوام بتن‌های خودتراکم بهتر است از این نوع پوزولان‌ها استفاده نمود.

۴-۳-۴ نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار

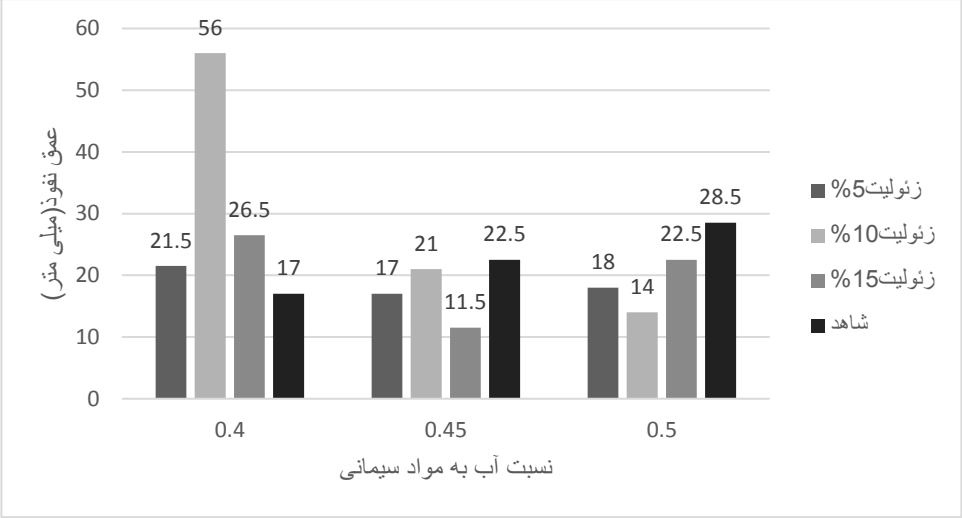
نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم حاوی پوزولان طبیعی و مصنوعی در مقایسه با بتن خودتراکم شاهد مطابق شکل‌های ۴-۳۷ الی ۴-۴۰ می‌باشد.



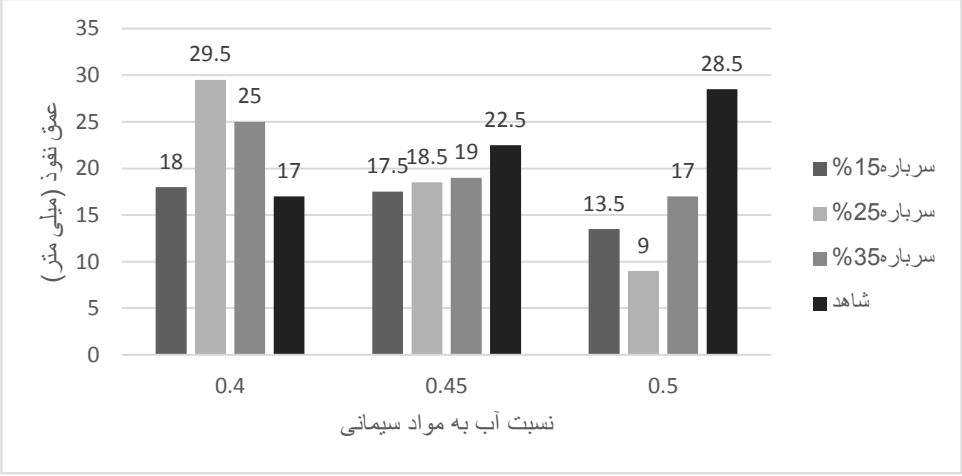
شکل ۴-۳۷: مقایسه نتیجه آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در نمونه‌های حاوی میکروسیلیس با نمونه شاهد



شکل ۴-۳۸: مقایسه نتیجه آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در نمونه‌های حاوی پوزولان خاش با نمونه شاهد



شکل ۴-۳۹: مقایسه نتیجه آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در نمونه‌های حاوی زئولیت با نمونه شاهد

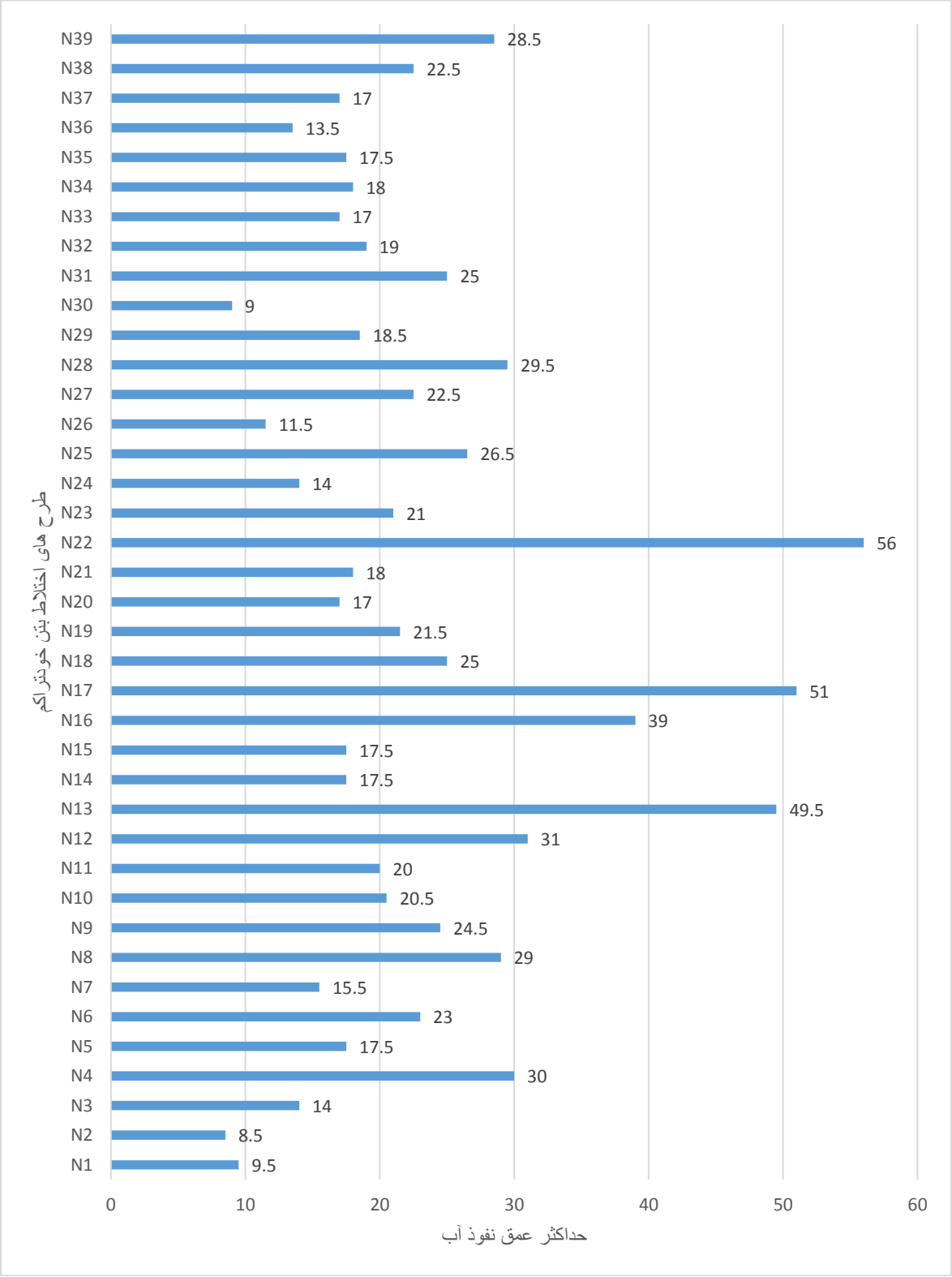


شکل ۴-۴۰: مقایسه نتیجه آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در نمونه‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی با نمونه شاهد

از مقایسه نمودارهای عمق نفوذ آب تحت‌فشار در طرح‌های حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی با نمونه شاهد نتیجه می‌شود که استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی سبب کاهش عمق نفوذ آب نیز می‌گردد. همچنین بایستی دقت کافی در میزان مصرف پوزولان‌ها برای افزایش دوام بتن نیز صورت پذیرد. کمترین عمق نفوذ آب تحت‌فشار در طرح N۲ به مقدار ۸/۵ میلی‌متر و بیشترین عمق نفوذ آب تحت‌فشار در طرح N۲۲ به مقدار ۵۶ میلی‌متر مشاهده می‌شود. از بررسی کلی آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار و مقایسه با نمونه‌های شاهد ملاحظه می‌گردد که بهترین نتایج آزمایش مربوط به بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۵٪، زئولیت ۵٪ و سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۵٪ می‌باشد.

ذکر این نکته حائز اهمیت است که خطای ناشی از انجام آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار به دلیل مصرف افزودنی فوق روان کننده جهت رسیدن به الزامات حالت خمیری غیرقابل‌اجتناب بوده و مصرف این ماده سبب افزایش هوازایی در بتن می‌گردد که درنتیجه موجب افزایش خلل و فرج در نمونه‌ها شده و افزایش عمق نفوذ را در بردارد؛ لذا توصیه می‌گردد برای افزایش دقت در انجام آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار در بتن‌های حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی میزان مصرف افزودنی فوق روان کننده نیز مدنظر قرار گیرد. در نمودارهای فوق ملاحظه می‌گردد که در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ به دلیل افزایش مصرف فوق روان کننده و درنتیجه امکان هوازایی بیشتر در بتن خودتراکم نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار نیز دارای دقت کافی و مطلوبی نمی‌باشد و نسبت به نمونه‌های شاهد ساخته‌شده عمق نفوذ بیشتری را گزارش می‌کند.

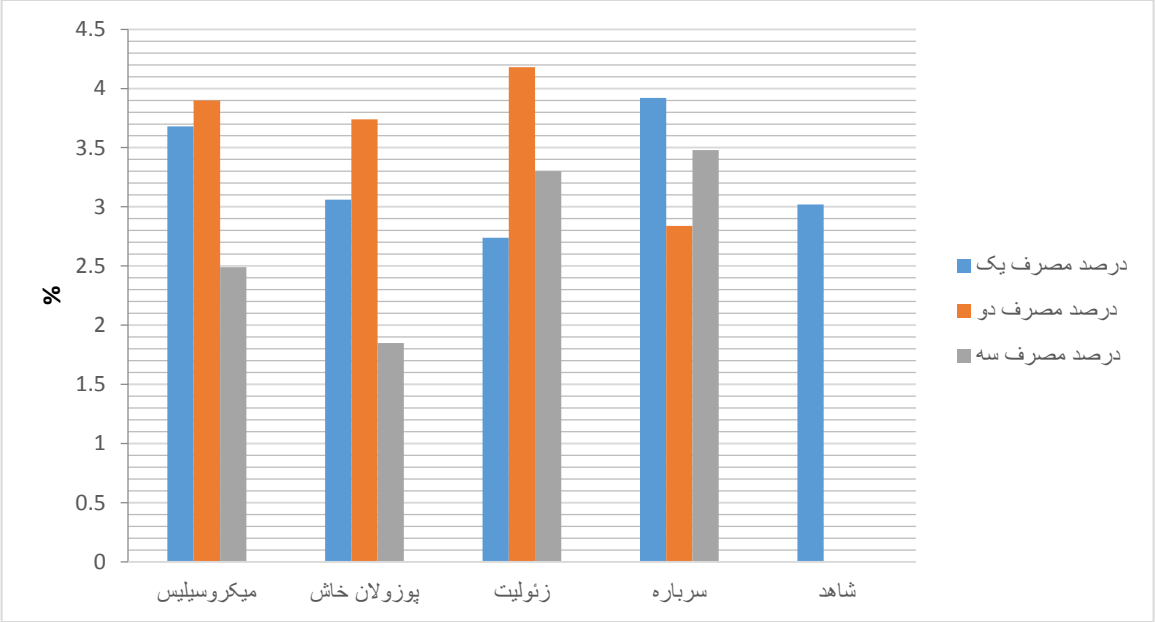
در شکل ۴-۴۱ نتایج کلی آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار ملاحظه می‌گردد.



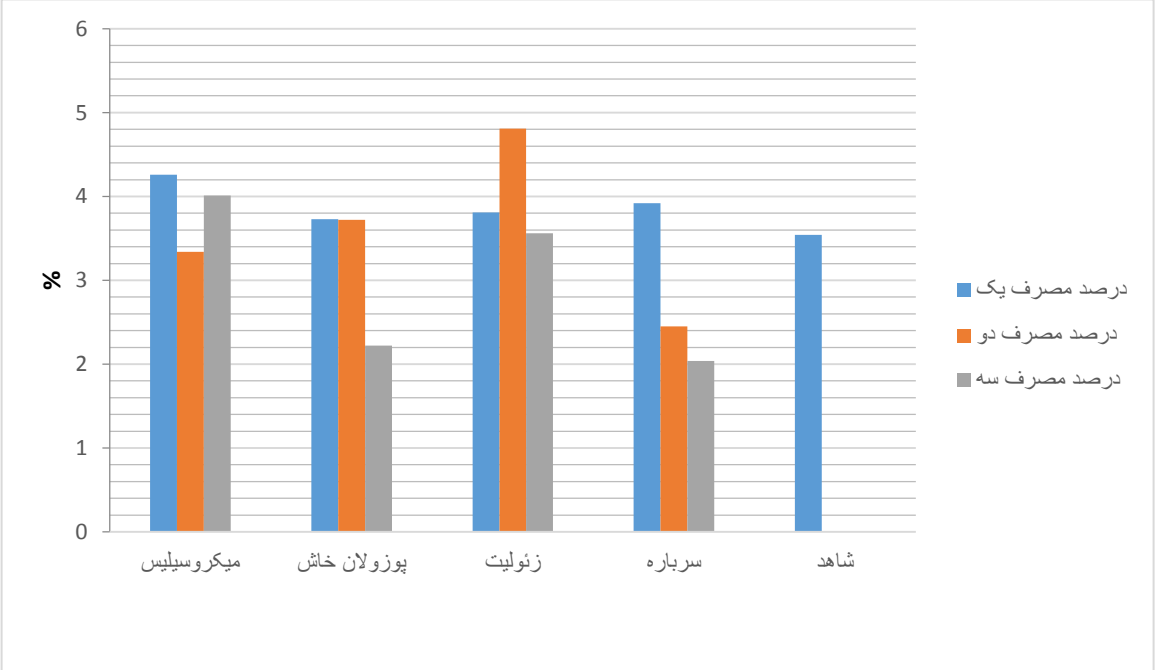
شکل ۴-۴۱: نتایج آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار

۴-۳-۵ نتایج آزمایش جذب آب نهایی

در شکل‌های ۴-۴۲ الی ۴-۴۴ تغییرات جذب آب نمونه‌ها با توجه به نوع پوزولان‌های مصرفی در سه نسبت آب به مواد سیمانی نشان داده‌شده است.



شکل ۴-۴۲: مقایسه تغییرات جذب آب نهایی نمونه‌ها در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰



شکل ۴-۴۳: مقایسه تغییرات جذب آب نهایی نمونه‌ها در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۵

شکل ۴-۴۴: مقایسه تغییرات جذب آب نهایی نمونه‌ها در نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵۰

نتایج تغییرات جذب آب نمونه‌ها نشان می‌دهند که پوزولان خاش در جایگزینی ۳۵٪ نسبت به نمونه‌های شاهد دارای بیشترین کاهش جذب آب در نمونه‌ها می‌باشند. می‌توان عامل افزایش شاخص دوام در پوزولان خاش را در درصد بالای مصرف آن و ایجاد بافت مناسب دانست.

فصل پنجم

ملاحظات فنی، اجرایی و اقتصادی

۵-۱ ملاحظات فنی و اجرایی بتن خودتراکم

۵-۱-۱ تأمین مصالح

مدول نرمی ترکیب سنگ‌دانه‌های بتن خودتراکم از بتن معمولی کمتر می‌باشد و دارای بافت ریزتری نسبت به بتن معمولی است. معمولاً برای تأمین بافت ریزتر از موارد زیر استفاده می‌شود:

۱- افزایش سهم سنگ‌دانه‌های ریز مانند ماسه‌ها

۲- استفاده از فیلر (شامل پوزولان، پودر سنگ‌آهک، خاکستر بادی و یا حتی بعضاً سیمان ممکن است نقش پرکننده نیز داشته باشد)

به‌طورکلی اصلاح بافت سنگ‌دانه‌ها. با بهره‌گیری از تکنولوژی و ماشین‌آلات صنعتی مدرن در معادن تولید ماسه شسته انجام‌شده و می‌توان مانع از شسته شدن بیش‌ازحد و هدر رفتن بخش ریزدانه ماسه‌ها شده و یا با مصالحی مانند ماسه‌بادی به‌صورت کنترل‌شده به اصلاح مصالح مبادرت نمود.

با توجه به موارد ذکرشده برای بتن خودتراکم تأمین سنگدانِ ریزتر و یا مواد افزودنی در دستور کار قرار می‌گیرد. در مقابل معمولاً درشت‌دانه در طرح وجود ندارد.

۵-۱-۲ نمونه‌برداری از مصالح

نمونه‌برداری از مصالح بتن شامل آب، سیمان عیناً می‌تواند برای تولید هر دو نوع بتن یکسان باشد؛ اما بخش مهم و ضروری کنترل بیشتر و نمونه‌برداری مستمر از سنگ‌دانه‌ها و مواد افزودنی برای بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی است.

نوع فوق روان کننده و مقدار مصرف آن در طرح مخلوط و اثرات آن بر کارایی بتن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. با تغییرات فوق روان کننده باید مقدار مصرف آن در طرح تعیین گردد و حتی در طول یک دوره (مثلاً ۱ ماه) در یک فوق روان کننده ثابت، توصیه می‌شود اثرات آن مجدد بررسی شود. همچنین بهتر

است درصد مواد جامد و غلظت فوق روان کننده‌هایی که به کارگاه وارد می‌شوند تعیین شود. مقدار مصرف فوق روان کننده و تأثیراتی که بر کاهش آب و مقاومت فشاری می‌گذارند، زمان عملکرد آن‌ها در بتن و نوع تغییر بر کارایی بتن و غیره ارزیابی شود. به‌هرحال باید تمامی فوق روان کننده‌ها در یک طرح مخلوط پایه استفاده شود و نهایتاً نسبت مقدار مصرف به قیمت باید برای فوق روان کننده‌هایی که مناسب تشخیص داده‌شده است تعیین و سپس تصمیم‌گیری در مورد تهیه آن‌ها صورت پذیرد. استفاده از فوق روان کننده‌هایی که درواقع به نام بتن خودتراکم (به دلیل وجود کمی مواد قوام آور در آن‌ها) معرفی می‌شوند ارجحیت دارد.

بتن خودتراکم نسبت به رطوبت سنگ‌دانه‌ها، درصد عبوری از الک ۲۰۰ و همچنین دانه‌بندی به‌خصوص حداکثر اندازه واقعی سنگ‌دانه حساسیت بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد و باید با دقت بیشتری کنترل این موارد صورت پذیرد.

ضروری است با ورود ماسه‌بادی به کارگاه نمونه‌گیری صورت گرفته و آزمایش‌های لازم مانند دانه‌بندی (الک و هیدرومتری)، عبوری از الک ۲۰۰ نیز مشخص شود. برای پذیرش ماسه‌بادی واردشده به کارگاه و معیار قابل‌پذیرش در مورد یکنواختی مصالح، دانه‌بندی (الک و هیدرومتری) در دوره‌های مختلف باهم مطابقت داده می‌شود.

اغلب آزمایش‌های سنگ‌دانه‌های ریز مانند چگالی، دانه‌بندی و غیره، روی دیگر مصالح سنگی ازجمله ماسه‌بادی و پودر سنگ‌آهک قابل انجام است. توجه به این نکته ضروری است که جذب آب مصالح پرکننده مانند پودر سنگ و پوزولان در نسبت آب به سیمان واقعی بسیار مؤثر است. برای تعیین جذب آب این مصالح (فیلرها) استانداردی وجود ندارد اما می‌توان به روش‌های پیشنهادی آن را تعیین نمود. به‌عنوان‌مثال هنگام تعیین جذب آب ماسه‌ها، می‌توان ابتدا ماسه و پُرکننده (Filler) را با نسبت‌های موردنظر در طرح مخلوط بتن با یکدیگر ترکیب نموده و سپس جذب آب ماسه را تعیین و در طراحی مدنظر قرارداد.

بدین‌صورت جذب آب پُرکننده در جذب آب ماسه‌ها تأثیر گذاشته است. همچنین می‌توان با اشباع کردن ریزدانه‌ها قبل از ترکیب با مخلوط از خطاهای جذب آب ریزدانه‌ها ممانعت نمود.

۵-۱-۳ انبار کردن مصالح

برای انبار کردن مصالح سنگی در بتن خودتراکم رعایت موارد زیر اهمیت ویژه دارد:

۱- سنگ‌دانه‌ها باید به نحوی انبار گردند که جداشدگی در آن‌ها به حداقل برسد.

۲- ضروری است که آب سنگ‌دانه‌های ورودی به کارگاه زهکشی گردد به‌نحوی‌که از تجمع آب در آن‌ها جلوگیری به عمل آید و سنگ‌دانه‌ها با رطوبت یکنواخت در طرح مخلوط مورداستفاده قرار گیرند.

۳- لازم است از تابش مستقیم آفتاب در تابستان که موجب تغییر در دما و رطوبت انباشته مصالح می‌شود ممانعت به عمل آید. بهتر است از یخ زدن سطح سنگ‌دانه‌های انبارشده در زمستان جلوگیری شود و همچنین شرایط جوی باعث از بین رفتن فیلر مصالح نشود.

به دلیل وجود رس در ماسه‌بادی، باید از کلوخه شدن آن با روش‌هایی مانند مرطوب نگه‌داشتن ماسه‌بادی (به صورتی که رطوبت کل یکسان باشد)، ممانعت به عمل آید. تجربیات نشان داده است که پودر سنگ نیز امکان کلوخه شدن تحت تأثیر رطوبت محیط و یا در هنگام افزودن به بچینگ به دلیل خشک بودن را دارد. برای انبار این مصالح باید تدابیر لازم اتخاذ شود. لازم به ذکر است شرایط کنترل دمای سنگ‌دانه‌ها در تابستان و زمستان در هردو نوع بتن یکسان است.

۵-۱-۴ توزین مصالح، نسبت‌ها، ساخت و پذیرش بتن خودتراکم در کارگاه

مخلوط‌کن‌های دارای پره چرخان (Forced Action) شامل مخلوط‌کن‌های نوع paddle، مخلوط‌کن‌های ریزشی آزاد (Free Fall) شامل تراک میکسرها و سایر انواع مخلوط‌کن می‌تواند بکار رود لیکن مخلوط‌کن نیرویی (Force action mixers) و مخلوط‌کن‌های تغاری (پره جدا از دیگ) ارجحیت دارد و موجب

کاهش زمان اختلاط می‌گردد. مدت اختلاط تابع عواملی مانند شرایط محیطی و دمای مصالح، نوع بتن و اجزاء تشکیل‌دهنده بتن، میزان کارایی بتن، نوع مخلوط کننده و حجم مخلوط (بچینگ)، مدت اختلاط و غیره دارد که در آزمایش‌های عملی کارگاهی باید مشخص شود. به‌طورکلی زمان مخلوط برای بتن خودتراکم طولانی‌تَر از بتن‌های معمولی و سنتی است. این مسئله به علت حجم بالاتر خمیر سیمان و همچنین افزایش زمان لازم برای فعال شدن فوق روان کننده می‌باشد. البته افزایش زمان مخلوط شدن بتن خودتراکم با توجه به روند انتقال بتن و بتن‌ریزی هیچ‌گونه تأثیر منفی در سرعت تولید ندارد. زمان افزودن افزودنی‌ها از اهمیت برخوردار است و با هماهنگی تولیدکننده افزودنی روش کار باید مشخص شود. اگر بخواهیم روانی بتن را پس از مخلوط اولیه اصلاح کنیم، می‌توان از افزودنی‌ها استفاده نمود. همچنین قبل از توزیع در بچینگ، مواد افزودنی مختلف نباید با یکدیگر مخلوط شوند، مگر اینکه تولیدکننده این مواد صراحتاً این عمل را بلامانع بداند. در انتها لازم به ذکر است که نوع افزودن مصالح در بچینگ، نوع مخلوط‌کن و به‌طورکلی شرایط واقعی کارگاه بهتر است که در آزمایشگاه نیز مدنظر قرار گیرد.

کنترل کیفیت باید توسط افراد مجرب و بادانش فنی انجام شود. بهتر است طرح مخلوط‌ها قبل از ساخت در آزمایشگاه ساخته‌شده تا در طرح مخلوط اجرایی و نهایی مشکلات کارایی و فاز خمیری به حداقل برسد. در مراحل اولیه بهتر است تمام آزمایش‌های فاز خمیری تا حد امکان در اجرا انجام شود و سپس به انجام تعداد آزمایش‌های فاز خمیری کمتر ازجمله، جریان اسلامپ، شاخص پایداری چشمی و زمان پهن‌شدگی ۵۰ سانتی‌متر ممکن است بتوان اکتفا نمود. نمونه‌گیری از بتن خودتراکم باید بدون هیچ‌گونه ضربه و لرزشی صورت پذیرد.

۵-۱-۵ قالب‌بندی، بتن‌ریزی، تراکم و پرداخت بتن خودتراکم

شرایط و دمای محیط، بتن، قالب برای بتن خودتراکم عیناً می‌تواند مانند بتن معمولی باشد. قالب‌ها از نوع فولادی بوده و باید قبل از بتن‌ریزی به‌خوبی تمیز گردند. قابل‌توجه است که روغن قالب اضافی می‌تواند

باعث لک شدن بر روی سطح بتن، حفظ حباب هوا و یا دیگر نقایص شود. روغن قالب باید از نوعی باشد که این امکان را بدهد تا هوا به طرز کنترل‌شده‌ای حرکت و از بتن خارج شود. یک روغن قالب غلیظ، زمانی که با قالب نفوذناپذیر مورداستفاده قرار می‌گیرند به علت لزجت بالا اجازه خروج هوا به نحو کامل را نمی‌دهند. این باعث می‌شود حباب‌های هوا به سطح قالب بچسبند و باعث ایجاد حفره در سطح بتن گردند.

انتقال بتن خودتراکم همانند بتن معمولی به محل پروژه‌ها صورت می‌پذیرد.

برای بتن خودتراکم نیاز به هیچ‌گونه تراکم (داخلی و خارجی) نبوده و می‌توان با تعداد نیروی کاری کمتر کار را پیش بُرد. ذکر این نکته ضروری است که کوچک‌ترین تراکم داخلی یا خارجی موجب جداشدگی در بتن خودتراکم می‌شود.

هرچند بتن خودتراکم با بتن‌های قبلاً ریخته شده پیوند خوبی برقرار می‌کند اما توصیه می‌شود بتن‌ریزی در یک مرحله صورت پذیرد تا از ایجاد درز سرد جلوگیری شود.

بتن خود تراکم سریع‌تر از بتن معمولی خشک می‌شود اما پدیده آب انداختگی در این بتن یا ناچیز است و یا کلاً وجود ندارد. بنابراین عمل‌آوری اولیه باید هر چه زودتر پس از ریختن بتن آغاز شود تا خطر ترک‌خوردگی ناشی از جمع شدگی خمیری به حداقل برسد.

۵-۲ برآورد اقتصادی بتن خودتراکم

هزینه طرح‌های آزمایشگاهی در جدول ۵-۱ باقیمت‌های ۳ ماهه اول سال ۱۳۹۶ در شهر مشهد ارائه‌شده است. هزینه ساخت یک مترمکعب بتن خودتراکم و درصد سهم هزینه هر جز بتن در جدول ۵-۲ آورده شده است.

جدول ۵-۱: قیمت مصالح بر اساس ۳ ماهه اول ۱۳۹۶ شهر مشهد

مصالح	قیمت یک کیلوگرم (ریال)
نخودی	۸۰
ماسه	۱۲۰
ماسه‌بادی	۱۲۰
سیمان	۱۲۰۰
میکروسیلیس	۶۰۰۰
پوزولان خاش	۱۱۰۰
زئولیت	۲۰۰۰
سرباره	۱۲۰۰
فوق روان کننده	۷۰۰۰۰

جدول ۵-۲: هزینه طرح مخلوط‌های آزمایشگاهی بتن خودتراکم

نام طرح	درصد هزینه هر جز بتن از کل هزینه ساخت طرح در مخلوط							هزینه تولید هر مترمکعب (ریال)
	نخودی	ماسه	ماسه‌بادی	پودر سنگ	سیمان	پوزولان	فوق روان کننده	
N۱	۴	۱۳	۱	۱	۵۵	۱۴	۱۱	۹۳۰۶۴۷
N۲	۵	۱۴	۱	۱	۵۹	۱۵	۵	۸۷۰۹۹۵
N۳	۵	۱۴	۱	۱	۶۳	۱۶	۰	۸۱۹۱۷۹
N۴	۴	۱۳	۱	۱	۵۳	۲۲	۵	۹۳۵۳۸۳
N۵	۴	۱۲	۱	۱	۵۳	۲۱	۸	۹۴۸۷۲۳
N۶	۴	۱۳	۱	۱	۵۵	۲۲	۴	۹۰۳۲۸۳

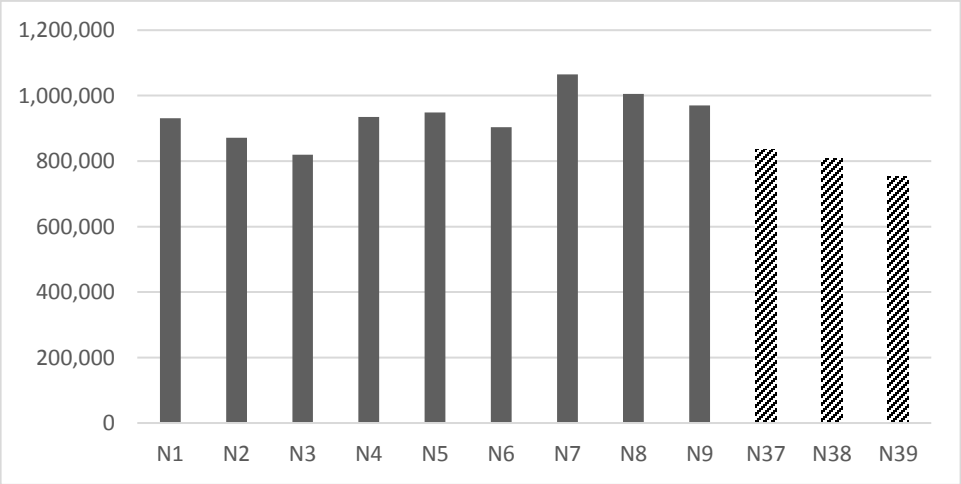
ادامه جدول ۵-۲: هزینه طرح مخلوط‌های آزمایشگاهی بتن خودتراکم

N۷	۴	۱۱	۱	۱	۴۵	۲۵	۱۲	۱۰۶۵۴۰۱
N۸	۴	۱۲	۱	۱	۴۸	۲۷	۸	۱۰۰۵۰۲۰
N۹	۴	۱۲	۱	۱	۵۰	۲۸	۵	۹۷۰۱۶۵
N۱۰	۵	۲۵	۱	۱	۵۲	۸	۱۷	۸۷۴۱۴۷
N۱۱	۵	۱۵	۱	۱	۵۵	۹	۱۳	۸۲۵۴۰۲
N۱۲	۵	۱۵	۱	۱	۵۷	۹	۱۱	۸۰۲۳۱۰
N۱۳	۵	۱۴	۱	۱	۴۴	۱۳	۲۱	۹۱۴۰۸۷
N۱۴	۵	۱۵	۱	۱	۴۷	۱۴	۱۷	۸۵۵۰۵۶
N۱۵	۵	۱۵	۱	۱	۴۹	۱۵	۱۴	۸۲۸۰۳۰
N۱۶	۴	۱۲	۱	۱	۳۲	۱۶	۳۵	۱۱۰۲۵۴۴
N۱۷	۵	۱۴	۱	۱	۳۸	۱۹	۲۳	۹۲۷۳۵۱
N۱۸	۵	۱۵	۱	۱	۴۲	۲۱	۱۶	۸۳۶۵۹۸
N۱۹	۵	۱۴	۱	۱	۵۹	۵	۱۵	۸۷۴۱۲۲
N۲۰	۵	۱۴	۱	۱	۶۰	۵	۱۴	۸۵۹۱۳۹
N۲۱	۵	۱۴	۱	۱	۶۳	۶	۱۰	۸۱۶۲۹۸
N۲۲	۴	۱۲	۱	۱	۴۸	۹	۲۵	۱۰۰۸۶۰۰
N۲۳	۴	۱۳	۱	۱	۵۳	۱۰	۱۸	۹۱۶۹۴۵
N۲۴	۵	۱۴	۱	۱	۵۷	۱۱	۱۲	۸۴۶۳۶۴
N۲۵	۴	۱۳	۱	۱	۴۷	۱۴	۲۱	۹۸۱۰۵۸
N۲۶	۴	۱۳	۱	۱	۴۸	۱۴	۱۸	۹۴۴۷۹۶
N۲۷	۴	۱۳	۱	۱	۵۱	۱۵	۱۵	۸۹۵۶۶۲
N۲۸	۵	۱۴	۱	۱	۴۲	۱۴	۲۳	۹۴۹۴۱۵

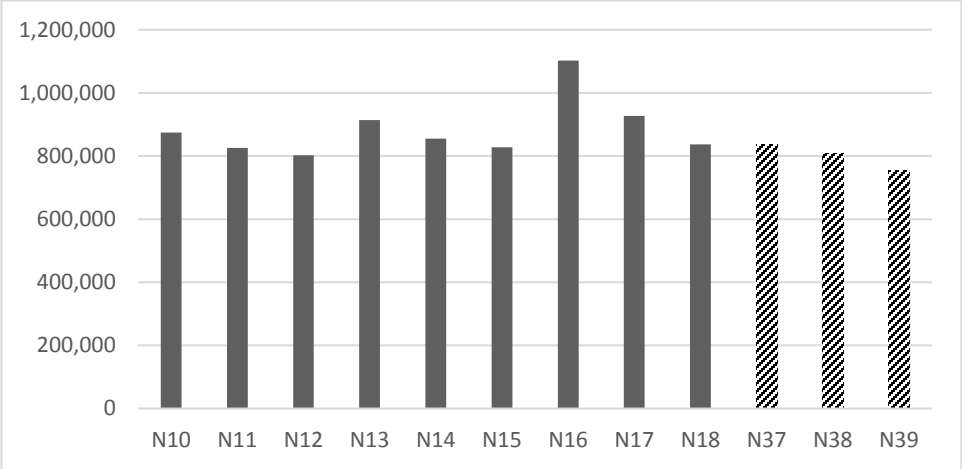
ادامه جدول ۵-۲: هزینه طرح مخلوط‌های آزمایشگاهی بتن خودتراکم

N۲۹	۵	۱۴	۱	۱	۴۵	۱۵	۱۹	۸۹۹۰۰۲
N۳۰	۵	۱۴	۱	۱	۴۷	۱۶	۱۵	۸۵۰۶۲۷
N۳۱	۴	۱۳	۱	۱	۳۵	۱۹	۲۶	۹۹۱۸۳۹
N۳۲	۵	۱۴	۱	۱	۴۰	۲۱	۱۷	۸۷۹۹۳۲
N۳۳	۵	۱۵	۱	۱	۴۱	۲۲	۱۵	۸۵۳۲۴۵
N۳۴	۵	۱۵	۱	۱	۵۳	۹	۱۵	۸۵۹۸۹۲
N۳۵	۵	۱۵	۱	۱	۵۴	۹	۱۵	۸۵۳۹۵۰
N۳۶	۵	۱۵	۱	۱	۵۶	۱۰	۱۳	۸۲۰۱۶۸
N۳۷	۵	۱۵	۱	۱	۶۴	۰	۱۳	۸۳۵۵۲۰
N۳۸	۵	۱۵	۱	۱	۶۷	۰	۱۱	۸۰۷۶۶۱
N۳۹	۵	۱۶	۱	۱	۷۲	۰	۵	۷۵۴۰۰۱

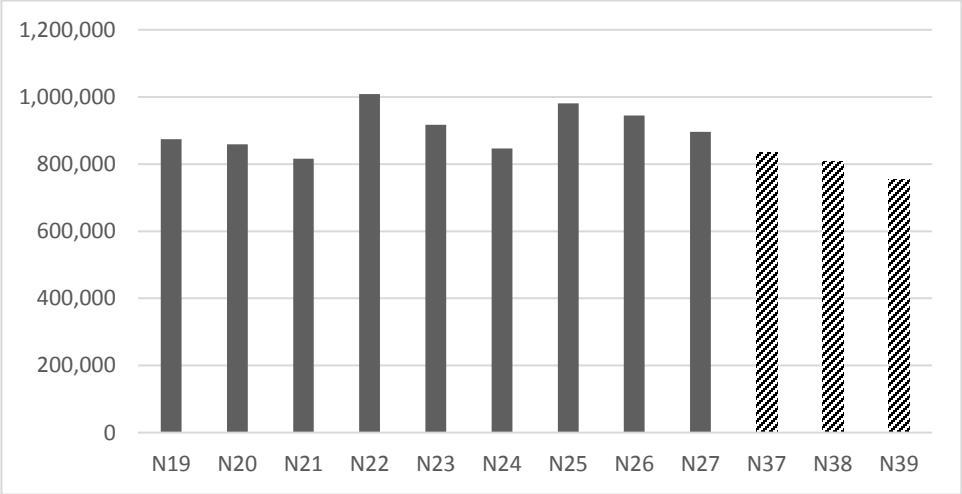
هزینه‌های هر مترمکعب تولید بتن خودتراکم حاوی پوزولان‌ها و مقایسه با بتن خودتراکم شاهد مطابق شکل‌های ۵-۱ الی ۵-۴ می‌باشد.



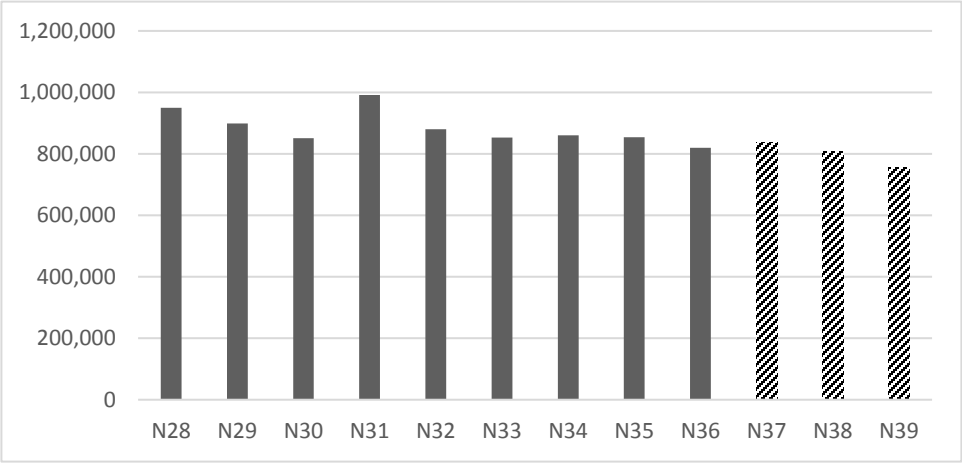
شکل ۵-۱: مقایسه قیمت تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم حاوی میکروسیلیس با شاهد



شکل ۵-۲: مقایسه قیمت تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم حاوی پوزولان خاش با شاهد

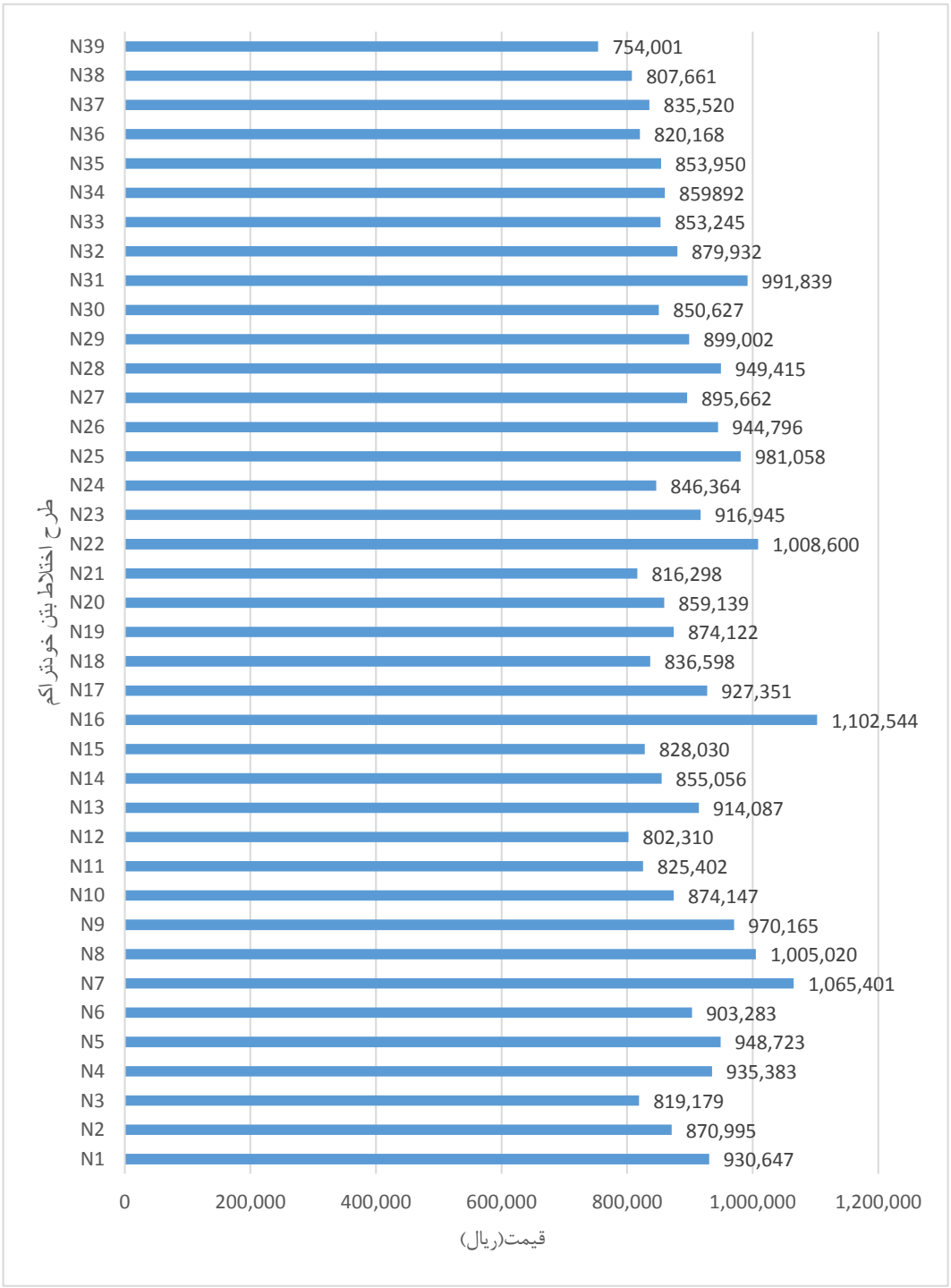


شکل ۵-۳: مقایسه قیمت تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم حاوی زئولیت با شاهد



شکل ۵-۴: مقایسه قیمت تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی با شاهد

همچنین در شکل ۵-۵ هزینه تولید یک مترمکعب بتن خودتراکم در تحقیق انجام‌شده نیز آورده شده است.



شکل ۵-۵: هزینه تولید یک مترمکعب بتن خودتراکم در تحقیق انجام‌شده

در بین طرح‌های مخلوط ساخته‌شده بیشترین و کمترین هزینه تولید یک مترمکعب بتن خودتراکم به ترتیب مربوط به طرح‌های N۱۶ و N۱۲ می‌باشد. همان‌طور که انتظار داشتیم افزایش نسبت آب به مواد سیمانی در طرح‌های مشابه سبب کاهش هزینه تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم گردیده است. در یک نگاه کلی درمی‌یابیم که هزینه تولید بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته و همچنین بایستی دقت کافی در میزان مصرف هر پوزولان و قیمت پوزولان نیز مدنظر قرار گیرد. به‌عنوان‌مثال میزان متعارف مصرف میکروسیلیس ۵ الی ۱۰ درصد وزن مواد سیمانی و میزان متعارف مصرف پوزولان سرباره کوره آهن‌گدازی بین ۱۵ الی ۴۰ درصد وزن مواد سیمانی می‌باشد و این در حالی است که تفاوت قیمت هر تن از میکروسیلیس با پوزولان سرباره کوره آهن‌گدازی قابل‌توجه می‌باشد. از طرفی بایستی با توجه به نتایج فاز خمیری و سخت شده که در فصل چهارم به آن پرداخته‌ایم و بسته به شرایط و پروژه در حال اجرا نسبت به استفاده از بتن خودتراکم حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی مبادرت گردد.

۵-۳ ارتباط مقاومت فشاری با کارایی بتن خودتراکم ازنظر اقتصادی

موارد متعددی در افزایش مقاومت فشاری بتن نقش دارند؛ اما از موارد مهمی که بیشترین نقش را در مقاومت فشاری بتن دارند و موارد دیگر به‌طور غیرمستقیم به آن‌ها وابسته است: ۱) نسبت آب به مواد سیمانی، ۲) تراکم بتن، ۳) شکستگی سنگ‌دانه‌ها

در یک مقاومت فشاری ثابت که ممکن است در یک نسبت آب به سیمان ثابت اتفاق افتد، به‌منظور افزایش کارایی بتن از فوق روان کننده استفاده می‌شود و یا ممکن است با افزایش سیمان و آب، نسبت آب به سیمان را ثابت نگه‌داشته و تغییرات محدودی در کارایی بتن صورت پذیرد که هردو این موارد هزینه‌بر است. البته ممکن است با استفاده از مصالح شکسته امکان افزایش نسبت آب به سیمان وجود داشته باشد و کارایی افزایش داده شود، اما لازم به ذکر است که در این صورت بازهم به دلیل استفاده از مصالح شکسته

افزایش هزینه وجود دارد و همچنین نمی‌توان بتن اجرایی با کارایی مناسب تولید کرد. باید ابتدا هزینه‌ی فقط ساخت بتن با کارایی متفاوت محاسبه شود. لذا اگر طرح بهینه باشد قطعاً مقدار هزینه با افزایش کارایی صعودی است؛ اما ممکن است با توجه به مقاومت فشاری طرح، با افزایش کارایی افزایش هزینه به‌صورت خطی یا غیرخطی افزایش یابد. همچنین تمامی هزینه‌های ناشی از تراکم که به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم تحمیل می‌شود باید محاسبه شوند. لذا با افزایش کارایی انرژی و درنتیجه هزینه تراکم کاهش می‌یابد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۶-۱ نتیجه‌گیری

استفاده از بتن‌های ویژه نظیر بتن خودتراکم روزبه‌روز در حال گسترش و توسعه می‌باشد. همچنین ضرورت تدوین روش طرح ملی مخلوط بتن خودتراکم احساس می‌شود لذا مطالعات اولیه کافی در خصوص آن وجود ندارد، به همین جهت در تحقیق حاضر به بررسی و ارزیابی ضریب K برای سیمان مصرفی مورد نظر و پوزولان‌های مصرفی صحت دارد و شامل همه انواع سیمان‌ها و پوزولان‌ها نمی‌شود و محدوده نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ الی ۰/۵۰ نیز می‌باشد که نتایج زیر قابل‌استخراج می‌باشد:

۱- شاخص پایداری چشمی (VSI) در تمامی طرح‌های مخلوط ساخته‌شده موردبررسی و ارزیابی قرار گرفت که نتایج آن در بیشتر از ۹۰ درصد طرح‌ها قابل‌قبول بوده و در بتن‌های خودتراکم ساخته‌شده هیچ‌گونه جداشدگی و آب انداختگی ملاحظه نگردید و بهترین شرایط ازنظر شاخص پایداری چشمی(VSI) در طرح‌های مخلوط ساخته‌شده مربوط به بتن‌های خودتراکم حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی نیز می‌باشد. البته لازم به ذکر است که اغلب اختلاف‌های نتایج فاز خمیری به دلیل گذشت زمان، کثرت آزمایش‌های فاز خمیری، اثرات فوق روان کننده و یا لزجت زیاد طرح‌ها بوده است.

۲- آزمایش زمان پهن‌شدگی ۵۰ سانتیمتر هم‌زمان با آزمایش جریان اسلامپ اندازه‌گیری شده است. بعضاً به دلیل لزجت بالا ممکن است طرح مخلوط‌های با جریان اسلامپ بیشتر، کارایی یا قابلیت پرکنندگی کمتری داشته باشند که بهترین نتایج آزمایش زمان پهن‌شدگی ۵۰ سانتی‌متر (T50) در بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی نیز می‌باشد.

۳- در طرح‌های مخلوط ساخته‌شده نتایج آزمایش جریان اسلامپ در محدوده ۵۵ الی ۷۵ سانتیمتر می‌باشد. همچنین نتایج آزمایش جریان اسلامپ در طرح‌های مخلوط حاوی پوزولان خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی دارای بیشترین مقادیر گزارش‌شده می‌باشد و این در حالی است که بتن‌های

حاوی پوزولان خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی دارای بهترین نتایج در آزمایش زمان پهن‌شدگی ۵۰ سانتیمتر (T50) نیز می‌باشد.

۴- قابلیت عبور بتن خودتراکم معمولاً توسط آزمایش حلقه J نیز سنجیده می‌شود و مطابق استاندارد ISIRI 11271 حداکثر اختلاف قطر جریان اسلامپ و قطر جریان حلقه J می‌بایستی ۵ سانتیمتر باشد. نتایج آزمایش حلقه J و مقایسه اختلاف قطر اندازه‌گیری شده در آزمایش حلقه J با آزمایش جریان اسلامپ حاکی از آن است که طرح‌های مخلوط حاوی زئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی دارای اختلاف قطری کمتر از ۵ سانتی‌متر می‌باشند و لذا برای بتن‌ریزی‌هایی که قابلیت عبور بایستی مدنظر قرار گیرد استفاده از این نوع طرح‌های مخلوط نیز پیشنهاد می‌گردد و این در حالی است که بتن‌های حاوی میکروسیلیس و پوزولان خاش دارای اختلافی بیش از ۵ سانتیمتر بوده و دچار انسداد می‌گردند. هرچند بازهم لازم به ذکر است که اغلب اختلاف نتایج فاز خمیری به دلیل گذشت زمان، کثرت آزمایش‌های فاز خمیری، اثرات فوق روان کننده و یا لزجت زیاد طرح‌های مخلوط نیز می‌باشد.

۵- اختلاف‌زمانی آزمایش قیف V در یک و پنج دقیقه در اکثر طرح‌ها کمتر از ۳ ثانیه و یا نزدیک به ۳ ثانیه می‌باشد که این موضوع بیانگر پایداری استاتیکی طرح‌های مخلوط ساخته‌شده می‌باشد. نتایج آزمایش قیف V نشان می‌دهد که بتن‌های حاوی پوزولان خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی با توجه به درصد مصرف یکسان، دارای زمان‌های تخلیه یکسان بوده و پایداری استاتیکی آن‌ها مشابه یکدیگر می‌باشد.

۶- نتایج آزمایش جعبه U نشان می‌دهد که در طرح‌های مخلوط با جریان اسلامپ کمتر از ۶۵ سانتی‌متر مناسب نبوده و قابلیت پرکنندگی ندارد. طرح‌های مخلوط حاوی میکروسیلیس و شاهد دارای اختلافی بیش از ۳ سانتی‌متر بوده و بیانگر عدم قطعیت پر کردن در این نوع بتن‌ها می‌باشد.

همچنین بتن‌های حاوی پوزولان‌های خاش، زئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی در محدوده مجاز ازنظر پیشنهاد استاندارد می‌باشد.

۷- آزمایش جعبه L همانند آزمایش جعبه U بسیار سخت‌گیرانه طراحی‌شده است و در صورت جوابگو بودن نتایج تا حدود زیادی می‌توان در پذیرش بتن خودتراکم اطمینان حاصل نمود. نتایج حاکی از آن است که طرح‌های مخلوط حاوی زئولیت دچار انسداد گردیده و مابقی طرح‌های مخلوط ساخته‌شده نتایج قابل قبولی را دارا می‌باشند.

۸- نتایج آزمایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که با افزایش سن نمونه‌ها، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. همچنین با توجه به طرح‌های ساخته‌شده، افزایش نسبت آب به مواد سیمانی سبب کاهش مقاومت فشاری نیز گردیده است. بیشترین و کمترین مقادیر مقاومت فشاری به ترتیب مربوط به طرح‌های حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی۳۵ درصد و میکروسیلیس ۵ درصد می‌باشد.

۹- در بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی نتایج مقاومت فشاری نشان می‌دهد که طرح‌های مخلوط حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی نسبت به مابقی طرح‌های مخلوط ساخته‌شده از حدود مقاومتی بهتری برخوردار می‌باشد. البته ذکر این نکته بسیار مهم است که میزان استفاده از پوزولان‌های مختلف با یکدیگر تفاوت دارد.

۱۰- در طرح‌های مخلوط ساخته‌شده با زئولیت شاهد نتایج مقاومت فشاری یکسانی در استفاده از درصدهای مختلف از زئولیت نیز می‌باشیم لذا درصد مصرف بهینه زئولیت در ساخت بتن خودتراکم حدود ۱۰ درصد توصیه می‌گردد.

۱۱- نتایج مقاومت فشاری در طرح‌های مخلوط حاوی پوزولان خاش در جایگزینی ۱۵ و ۲۵ دارای حدود مقاومتی یکسانی می‌باشد و در جایگزینی ۳۵ درصد شاهد کاهش مقاومت فشاری نیز می‌باشیم لذا درصد مصرف بهینه استفاده از پوزولان خاش در بتن خودتراکم حدود ۲۰ درصد توصیه می‌گردد.

۱۲- در بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس با افزایش مصرف میکروسیلیس در طرح‌های مخلوط شاهد آن هستیم که مقاومت فشاری افزایش‌یافته و درصد مصرف بهینه استفاده از میکروسیلیس حدود ۱۰ درصد توصیه می‌گردد.

۱۳- با مقایسه نمودارهای مقاومت فشاری طرح‌های مخلوط حاوی سرباره کوره آهن‌گدازی شاهد آن هستیم که با افزایش مصرف سرباره کوره آهن‌گدازی مقاومت فشاری افزایش‌یافته و درصد مصرف بهینه استفاده از سرباره کوره آهن‌گدازی حدود ۲۵ درصد نیز توصیه می‌گردد.

۱۴- همان‌طور که ملاحظه می‌گردد با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی در محدوده ۰/۴۰ الی ۰/۵۰ در بتن‌های حاوی میکروسیلیس مقدار ضریب K رو به افزایش است و این در حالی است که در بتن‌های حاوی پوزولان خاش، زئولیت و سرباره کوره آهن‌گدازی بدین گونه نمی‌باشد و با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی مقادیر ضریب K کاهش می‌یابد.

۱۵- با توجه به بررسی‌های انجام‌شده نتیجه می‌گیریم که با افزایش مصرف پوزولان‌های میکروسیلیس و زئولیت در طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم ضریب K کاهش می‌یابد و در پوزولان‌های خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی این‌گونه نبوده و افزایش مصرف در طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم سبب افزایش مقادیر ضریب K نیز می‌گردد.

۱۶-مقادیر ضریب K برای پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی در طرح‌های مخلوط بتن خودتراکم ساخته‌شده در این تحقیق مطابق جدول ۶-۱ گزارش می‌گردد.

جدول ۶-۱: مقادیر ضریب K محاسبه‌شده در تحقیق حاضر

نام پوزولان مصرفی	ضریب K
میکروسیلیس	۱/۷۰ – ۲/۲۰
خاش	۰/۹۰ – ۱/۴۰
زئولیت	۱/۱۰ – ۱/۶۰
سرباره کوره آهن‌گدازی	۰/۷۰ – ۱/۱۵

۱۷- در آزمایش هدایت الکتریکی به‌طورکلی می‌توان گفت که نسبت آب به مواد سیمانی رابطه مستقیمی با جریان عبوری نمونه‌های آزمایش‌شده دارد و هرچه نسبت آب به مواد سیمانی افزایش یابد؛ مقدار جریان عبوری در نمونه‌های ساخته‌شده افزایش می‌یابد.

۱۸- نتایج آزمایش هدایت الکتریکی نشان می‌دهد که افزایش درصد مصرف پوزولان‌هایی نظیر میکروسیلیس، خاش و سرباره کوره آهن‌گدازی سبب کاهش جریان عبوری شده و در پوزولان زئولیت نتایج تغییر چندانی نمی‌کند.

۱۹- استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی موجب کاهش جریان عبوری نسبت به نمونه‌های شاهد بدون استفاده از پوزولان گردیده و افزایش دوام بتن را به عهده دارد.

۲۰- بیشترین مقدار جریان عبوری در آزمایش هدایت الکتریکی در طرح مربوط به نمونه شاهد با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۵۰ و کمترین مقدار جریان عبوری مربوط به نمونه حاوی ۱۰٪ میکروسیلیس با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴۰ نیز می‌باشد.

۲۱- بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس در ۳ حالت مصرف مختلف و همچنین زئولیت ۱۵٪ و سرباره کوره آهن‌گدازی ۲۵٪ و ۳۵٪ بهترین نتایج آزمایش هدایت الکتریکی را داشته و می‌توان تفسیر نمود که برای افزایش دوام بتن‌های خودتراکم بهتر است از این نوع پوزولان‌ها استفاده نمود.

۲۲- از مقایسه نمودارهای عمق نفوذ آب تحت‌فشار در طرح‌های حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی با نمونه شاهد نتیجه می‌شود که استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی سبب کاهش عمق نفوذ آب نیز می‌گردد.

۲۳- کمترین عمق نفوذ آب تحت‌فشار در طرح مخلوط حاوی میکروسیلیس ۵ درصد به مقدار ۸/۵ میلی‌متر می‌باشد و بیشترین عمق نفوذ آب تحت‌فشار در طرح مخلوط حاوی زئولیت ۱۰ درصد به مقدار ۵۶ میلی‌متر نیز گزارش می‌شود.

۲۴- از بررسی کلی آزمایش عمق نفوذ آب تحت‌فشار و مقایسه با نمونه‌های شاهد ملاحظه می‌گردد که بهترین نتایج آزمایش مربوط به بتن‌های خودتراکم حاوی میکروسیلیس ۵٪، زئولیت ۵٪ و سرباره کوره آهن‌گدازی ۱۵٪ نیز می‌باشد.

۲۵- نتایج تغییرات جذب آب نمونه‌ها نشان می‌دهند که پوزولان خاش در جایگزینی ۳۵٪ نسبت به نمونه شاهد دارای بیشترین کاهش جذب آب در نمونه‌ها می‌باشند. می‌توان عامل افزایش شاخص دوام در پوزولان خاش را در درصد بالای مصرف آن و ایجاد بافت مناسب دانست.

۲۶-در بین طرح‌های مخلوط ساخته‌شده بیشترین و کمترین هزینه تولید یک مترمکعب بتن خودتراکم به ترتیب مربوط به طرح‌های زئولیت ۱۰درصد و شاهد می‌باشد. همان‌طور که انتظار داشتیم افزایش نسبت آب به مواد سیمانی در طرح‌های مشابه سبب کاهش هزینه تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم گردیده است.

۲۷- در یک نگاه کلی نتیجه می‌گیریم که هزینه تولید بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی تفاوت چندانی با یکدیگر نداشته و همچنین بایستی دقت کافی در میزان مصرف هر پوزولان و قیمت پوزولان نیز مدنظر قرار گیرد. به‌عنوان‌مثال میزان متعارف مصرف میکروسیلیس ۵ الی ۱۵ درصد وزن مواد سیمانی و میزان متعارف مصرف پوزولان سرباره کوره آهن‌گدازی بین ۱۵ الی ۴۰ درصد وزن مواد سیمانی می‌باشد و این در حالی است که تفاوت قیمت میکروسیلیس با پوزولان سرباره کوره آهن‌گدازی قابل‌توجه می‌باشد.

۲۸- از بررسی هزینه‌های تولید هر مترمکعب بتن خودتراکم ملاحظه می‌گردد که اکثر طرح‌های مخلوط حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی دارای هزینه بیشتری نسبت به نمونه‌های شاهد نیز می‌باشند. شایان‌ذکر است که برآورده کردن الزامات رئولوژی نظیر پایداری استاتیکی و دینامیکی، لزجت و دوام نیز مستلزم صرف هزینه بیشتر نیز می‌باشد و بسته به نوع قطعه و شرایط پروژه بایستی استفاده از انواع پوزولان‌ها نیز مدنظر قرار گیرد.

۶-۲ پیشنهادها

- ارتباط بیشتر صنعت و دانشگاه و درنتیجه استفاده از دانش فنی و علمی متخصصان به‌طوری‌که سبب پیشرفت کشور عزیزمان گردد.
- بررسی آزمایش‌های رئولوژی بتن خودتراکم در پوزولان‌هایی نظیر پومیس، خاکستر بادی و ... که در تحقیق حاضر بررسی نگردیده‌اند.
- بررسی و مقایسه ضریب K در بتن خودتراکم و معمولی حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی
- بررسی و مقایسه نتایج آزمایش‌های فاز سخت شده نظیر مقاومت فشاری، جذب آب، عمق نفوذ آب تحت‌فشار و ... در بتن‌های خودتراکم و معمولی حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی
- بررسی تخصصی پارامترهای دوام بتن‌های خودتراکم حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی

- بررسی تأثیر فوق روان کننده‌های مختلف در نتایج فاز خمیری و سخت شده بتن خودتراکم حاوی پوزولان طبیعی و مصنوعی
- بررسی ضریب K در بتن خودتراکم حاوی پوزولان‌هایی نظیر پومیس، خاکستر بادی و ... که در تحقیق حاضر بررسی نگردیده‌اند.
- مقایسه بتن خودتراکم حاوی لزجت دهنده (VMA) و بتن خودتراکم حاوی پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی و بررسی رفتار خمیری و سخت شده.

مراجع

[۱]. هنرمند هانی، کلهری موسی، تدین محسن، تأثیر روان کننده‌ها بر کاهش عیار سیمان، اولین کنفرانس ملی بتن،۱۳۸۸.

[۲]. روش ملی طرح مخلوط بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن،۱۳۸۶.

[۳].Efnarc, Specification and Guidelines for Self-compacting concrete,2005.

[۴].ACI237, Self-consolidating concrete,2005.

[۵].ouchi.M,hibino.M, Development applications and investigations of Selfcompacting concrete,1999.

[۶].ozawa.K,kunishima.M,maekawa.K, Development of High performance Concrete Based on the Durability Design of Concrete Structures, Proceedings of the second East-Asia and Pacific Conference on Structural Engineering and Construction,1989-pg 445-450

[۷]. رمضانیان پور علی‌اکبر، مواد جایگزین سیمان (پوزولان‌ها) خواص، دوام و توسعه پایدار،۱۳۹۵، صفحه ۲۸۵-۱

[۸]. رمضانیان پور و همکاران، تأثیر شرایط محیطی سواحل جنوبی ایران بر روی دوام درازمدت بتن با سیمان‌ها و پوزولان‌های مختلف، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن،۱۳۸۵.

[۹]. قهرمانی غلامرضا، تأثیر عیار سیمان بر برخی از پارامترهای دوام (خوردگی میلگرد) بتن خودتراکم، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه علم و صنعت ایران،۱۳۹۱.

[۱۰]. H. Okamura; M. Ouchi,Self-Compacting Concrete,Journal of Advanced Concrete Technology,2003

[۱۱]. قلی زاده وحید، طراحی، ساخت و مقایسه فنی، اجرایی و اقتصادی بتن خود تراکم و معمولی در سگمنت‌های تونل خط ۲ قطار شهری مشهد، رساله کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان،۱۳۹۲.

[۱۲]. مقصودی علی‌اکبر، بتن خودمتراکم، سازمان نظام‌مهندسی استان کرمان،۱۳۹۰.

[۱۳]. Interim Guidelines for the Use of Self-Consolidating Concrete in Precast/Prestressed Concrete Institute Member Plants,Printed in the United States of AMERICA,2004

[۱۴]. Report No.BD 503,Mix Design and Testing of Self-consolidating concrete using Florida Materials,2004

[۱۵]. رمضانیان پور علی‌اکبر، پاشایی رضا، تعمیر و حفاظت سازه‌های بتنی، انتشارات نورپردازان،۱۳۸۶.

[۱۶]. پیکرنگار، همکاران، بررسی تأثیر نسبت آب به سیمان بر آهنگ میزان نفوذ یون کلر و پتانسیل خوردگی فولاد در بتن حاوی متاکائولن و دوده سیلیس، پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران،۱۳۸۹.

[۱۷]. رمضانیان پور علی‌اکبر، پیدایش منصور، میر ولد سید سجاد، آرامون احسان، مهدی‌خانی مهدی، اثر انواع پوزولان‌های طبیعی بر دوام بتن در برابر حمله کلرایدی، اولین کنفرانس ملی بتن،۱۳۸۸.

[۱۸]. رمضانیان پور علی‌اکبر، پیدایش منصور، ضریب بازدهی بتن دارای میکروسیلیس، مجموعه مقالات سمینار بین‌المللی کاربرد میکروسیلیس در بتن، مرکز تحقیقات مسکن و ساختمان،۱۳۸۶.

[۱۹]. Wongkeo W; Thongsanitgarn P; Ngamjarurojana A; Chaipanich-A,Compressive strength and chloride resistance of self-compacting concrete containing high level fly ash and silica fume,Materials & Design Volume 64,2014,pg261–269

[۲۰]. توتونچی هادی، خانزادی مصطفی، فامیلی هرمز، بررسی تأثیر عیار سیمان بر رئولوژی و خواص مکانیکی بتن خود تراکم حاوی میکروسیلیس، اولین کنفرانس ملی بتن،۱۳۸۸.

[۲۱]. A.M. Ramezanianpour, Kh. Esmaeili, S.A. Ghahari, A.A. Ramezanianpour, Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete, Construction and Building Materials,2014.

[۲۲]. رمضانیان پور علی‌اکبر، اعرابی نگین، تکنولوژی بتن، ترجمه آدام نویل و جی جی بروکس، ویراست دوم، چاپ چهارم،۱۳۹۵.

[۲۳]. شکرچی زاده محمد، لیبر نیکلاس علی، خوش نظر راحیل، اعتماد رضایی امیرمهدی، زارع رامی کیوان، تأثیر افزودنی‌های فوق روان کننده به همراه مواد قوام آور در خصوصیات رفتاری بتن تازه خودتراکم، دومین کنفرانس ملی بتن،۱۳۸۹.

[۲۴]. Singh S.B; Munjal P; Thammishetti N,Role of water/cement ratio on strength development of cement mortar,Journal of Building Engineering,2015.

[۲۵]. Ali Mardani-Aghabaglou, Murat Tuyan, Gökhan Yılmaz, Ömer Arıöz, Kambiz Ramyar, Effect of different types of superplasticizer on fresh,

rheological and strength properties of self-consolidating concrete, Construction and Building Materials,2013.

[۲۶]. Aneta Nowak-Michta, Influence of superplasticizer on porosity structures in hardened, 7th Scientific-Technical Conference Material Problems in Civil Engineering,2015.

[۲۷]. T. GORZELANCZYK, J. HOLA, Pore structure of self-compacting concretes made using different superplasticizers, ARCHIVES OF CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERING,2011.

[۲۸]. MOTC,Review of SCC Application in Taiwan,Taiwan Area National Expressway Engineering Bureau (TANEEB),2013.

[۲۹]. Report No.BD 503, Mix Design and Testing of Self-consolidating concrete using Florida Materials, Desember 2004.

[۳۰]. مقررات ملی ساختمان، مبحث نهم، طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه، وزارت مسکن و شهرسازی، معاونت امور مسکن و ساختمان، ۱۳۸۸.

[۳۱]. DIN CEN/TR 16639.(2014), Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept, technical report.

[۳۲].ASTM C192/C 192M-02, Standard practice for making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory.

[۳۳].BS EN12390-3, Compressive strength of test specimens,February 2009.

[۳۴].ASTM C1760-12, Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete.

[۳۵].BS EN12390-8, Depth of penetration of water under pressure,2000.

[۳۶].ASTM C642-97, Standard Test Method for Density,Absorption,and Voids in Hardened Concrete.

[۳۷]. علی‌اکبر رمضانیان پور، علیرضا پورخورشیدی، آیین‌نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج‌فارس و دریای عمان، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، چاپ اول، ۱۳۸

Evaluation of K factor in self-consolidating concrete containing natural and artificial Pozzolan

Abstract

Improvement of concrete structures with the attention on strength and durability, on the other hand, lack of professional worker and growing expansion of prefabricated concrete structures made the production of concrete necessary to produce a concrete with no need to vibrate to consolidate. Use of pozzolan as a replacement of cement in concrete not only would reduce the usage of cement, energy and production of greenhouse gases but also it would benefit concrete with increasing compressive strength and reducing permeability. Furthermore, the use of pozzolan in addition of chemical additives in the recent years help researchers to design specific concrete for specifics situations. In this research we evaluate the K factor in self-consolidating concrete. The k factor, expresses the effect of various pozzolans on strength and durability of concrete. Whereas in the same values the effect of silica fume is better than cement, fly ash and nature pozzolan have less effect in the same values. Thirty nine concrete mix designs with the water per cement ratios of 0.4, 0.45 and 0.50 and with the addition of silica fume, Khash natural pozzolan, zeolite and blast furnace slag were compared with normal concrete and then the K factor in self-consolidating concretes were calculated.

Keywords: self-consolidating concrete, K factor, silica fume, Khash natural pozzolan, zeolite, Blast furnace slag

Shahrood University of Technology

Faculty of Civil Engineering

M.Sc. Thesis in Structural Engineering

Evaluation of K factor in self-consolidating concrete containing natural and artificial Pozzolan

By: Amir Khani

Supervisor:

Dr. Vahidreza Kalatjari

Dr. Mohsen Tadayon

Advisor:

M.Sc. Seyed Mohamad Sajjadi Attar

September 2017