تحقیقات بتن
سال هفتم، شمارهٔ دوّم
پاییز و زمستان ۹۳
ص ۴۶ – ۳۱
تاریخ دریافت: ۱۸ /۹۳/۸
تاریخ پذیرش: ۹۴/۵/۱۰

ارائهٔ محدودهٔ دانه‌بندی مناسب برای ساخت بتن خودتراکم با استفاده از پارامترهای طبقه‌بندی خاک

امیر باقری
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران - ژئوتکنیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان
فرهنگ فرخی
استادیار گروه مهندسی عمران - سازه و ژئوتکنیک،دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان
مهدی مهدیخانی
استادیار دانشکده عمران، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره) قزوین
رضا فرخ‌زاد[6]
عضو هیئت علمی دانشکده عمران و نقشه برداری،دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین
جمشید بغدادی
عضو مرکز تحقیقات صنعت ساختمان و بتن دانشگاه آزاد اسلامی واحد قزوین(CCRC)

چکیده

امروزه از بتن خودتراکم به دلیل دارا بودن خواص تازه و سخت شده مناسب، به صورت انبوه در پروژه‌های عمرانی استفاده می‌شود. این خصوصیات به پارامترهای متعددی از قبیل ترکیب و میزان خمیر سیمانی، میزان حجم سنگدانه، دانه‌بندی سنگدانه و عوامل دیگر وابسته می‌باشد. در این بین سنگدانه‌ها می‌توانند در تأمین خواص مورد نیاز بتن خودتراکم تأثیر قابل توجهی داشته باشند. از آنجا که افزایش مقدار مصالح سنگی در بتن سبب کاهش میزان خمیر سیمان مصرفی جهت پرکردن فضای خالی سنگدانه‌ها می‌شود، لذا در این مقاله هدف، دستیابی به محدوده دانه‌بندی مناسب با کمترین فضای خالی با استفاده از روابط کاربردی ضریب یکنواختی و ضریب انحناء در مکانیک خاک می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که رابطه مستقیم و معکوسی بین به ترتیب ضریب انحناء و ضریب یکنواختی با میزان فضای خالی در مصالح سنگی وجود دارد.همچنین محدوده‌دانه‌بندی به دست آمده برای ساخت بتن خودتراکم شامل دانه‌بندی‌هایی است که تمامی ضوابط پذیرش خصوصیات تازه و سخت شده بتن خودتراکم را ارضاء می‌کند.

واژه‌های کلیدی: **تراکم انباشتگی، دانه‌بندی، ضریب یکنواختی، ضریب انحنا، بتن خود متراکم.**

*نویسنده مسؤول: R.Farokhzad@qiau.ac.ir

۱-مقدمه

بتن خودتراکم شاخه جدید بتن با مقاومت متوسط به بالا و یک فن‌آوری نوپا در عرصه ساخت و ساز دنیا می‌باشد که بدون ویبره کردن، تحت وزن خود در میان انبوه اجزای سازه‌ای جریان یافته و داخل قالب را پر می‌کند، بدون اینکه سنگدانه‌های درشت از ملات جدا شوند [۱]. در اوایل دهه هشتاد میلادی، کاهش نیروی کار ماهر در صنعت ساخت و ساز ژاپن و تراکم نامناسب ناشی از افزایش حجم میلگردهای مصرفی و به تبع عملکرد بهتر سازه‌ای مورد بحث و بررسی قرار گرفت، تا اینکه نظریه بتن خود متراکمی که بتواند تحت وزن خودش و بدون نیاز به ویبراتور متراکم شده و تمام زوایای قالب را پر کند به عنوان راه حلی برای رفع مشکل دوام سازه‌های بتنی توسط اوکامورا در سال ۱۹۸۶ مطرح گردید [۲].

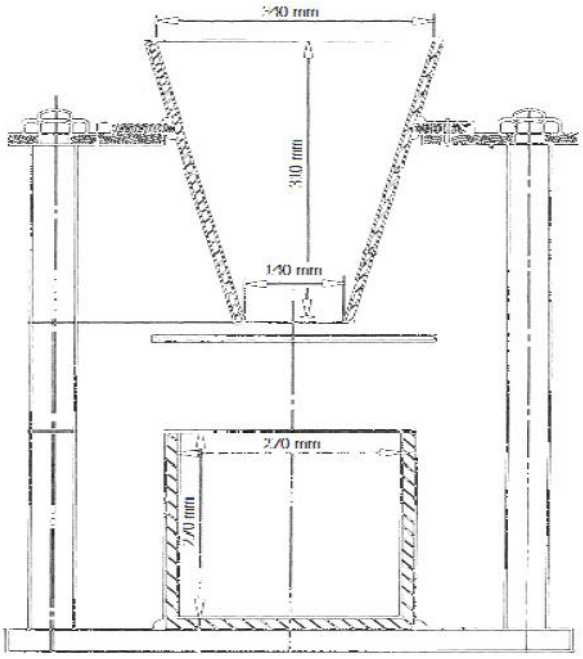
برای ساخت بتن خودتراکم به سیمان بیشتر، فوق روان کننده و ماده قوام آور نیاز است که باعث افزایش چشمگیر هزینه ساخت بتن خودتراکم می‌شود. از طرفی کاهش نیاز به کارگر ماهر به‌خصوص برای متراکم کردن این بتن، سبب کاهش هزینه و جبران هزینه‌های مربوط به سیمان و مواد افزودنی می‌شود. سنگدانه‌ها از عناصر اصلی تشکیل دهنده بتن خودتراکم می‌باشندکه بیش از ۶۰٪ حجم بتن را شامل می‌شوند. بنابراین به جهت صرفه اقتصادی بیشتر، مناسب‌ترین روش ممکن افزایش هرچه بیشتر میزان سنگدانه و به تبع آن کاهش میزان فضای خالی و در نهایت کاهش مصرف سیمان، می‌باشد.

از آنجا که بتن خودتراکم نسبت به بتن معمولی دارای مقدار کمتری از درشت‌دانه می‌باشد؛ بنابراین انتخاب حداکثر اندازه مناسب سنگدانه، می‌تواند علاوه بر افزایش کارایی، هزینه را نیز کاهش دهد [۳]. افزایش حداکثر اندازه سنگدانه‌ها باعث بیشتر شدن میزان آب انداختگی سطحی می‌شود. با درشت‌تر شدن و کاهش سطح مخصوص سنگدانه‌ها، توانایی ملات در نگه داشتن آب کم شده و سبک‌تر بودن آب نسبت به سایر اجزای ملات باعث حرکت آن به سمت بالا می‌شود؛ همچنین میزان پخش شدگی همگن ملات خودتراکم کمتر می‌شود [۴].

کیفیت و دانه‌بندی سنگدانه‌ها تأثیر زیادی بر مشخصات رفتار شناسی بتن تازه و مشخصات مکانیکی بتن سخت شده دارد. همچنین دانه‌بندی ماسه نسبت به دانه‌بندی شن، بر مشخصات رفتاری بتن خودتراکم تأثیر بیشتری دارد. از طرفی ممکن است دانه‌بندی شن و ماسه مناسب نبوده ولی با ترکیب آن‌ها یک نمودار مناسب دانه‌بندی شکل بگیرد [۵]. نتایج آزمایش‌های انجام گرفته روی توزیع سنگدانه با توجه به اندازه ذرات نشان می‌دهد که دانه‌ها با اندازه بین ۰/۲۵ الی ۰/۵ میلی‌متر دارای بیشترین مقدار مساحت سطح سنگدانه می‌باشند. این گواهی بر اهمیت ریزدانه با توجه به کارایی و قابلیت جریان بتن خودتراکم می‌باشد [۶].

تعیین نسبت سنگدانه‌های بتن وابسته به ویژگی‌های هندسی آنها مانند: ظاهر، زاویه‌داری، بافت، توزیع اندازه ذرات و نوع تراکم می‌باشد. موارد ذکر شده به طور کلی در پارامتری با عنوان تراکم انباشتگی (Packing Density) خلاصه شده است [۷]. تراکم انباشتگی شاخصی است که نشان دهنده میزان فضای خالی می‌باشد. سنگدانه‌ها با تراکم انباشتگی بالا دارای فضای خالی کمتر بوده که منجر به کمینه شدن خمیر سیمان جهت پر کردن فضای خالی می‌شود. جدای از فواید اقتصادی مصرف کمتر سیمان، تحقیقات نشان داده که تراکم انباشتگی تأثیر قابل توجهی در خصوصیات بتن تازه دارد [۸]. همچنین مقدار بیشتر سنگدانه، باعث بهبود خصوصیات بتن سخت شده نظیر جمع‌شدگی، خزش، مقاومت و سختی می‌شود [۹].تراکم انباشتگی سنگدانه‌ها توسط روش آزمایشگاهی مطابق با استاندارد ASTM C29 بصورت اصلاح شده به‌دست می‌آید. در این آزمایش ۱۴ کیلوگرم سنگدانه که در سطل قرار دارد، از ارتفاع مشخص (۲۰۰ میلی‌متر از زیر سطل تا بالای ظرف استوانه‌ای) داخل ظرف استوانه‌ای ریخته می‌شود. سطل دارای قطر بالایی ۳۴۰ میلی‌متر، قطر پائینی ۱۴۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۱۰ میلی‌متر می‌باشد. یک دریچه لولایی جهت خروج مصالح در پائین سطل نیز موجود می‌باشد. ظرف استوانه‌ای دارای قطر ۲۷۰ میلی‌متر و ظرفیت ۱۰لیتر می‌باشد (شکل ۱). پس از ترکیب این مصالح و ریختن آن‌ها در ظرف بالای دستگاه، اقدام به باز نمودن دریچه پائین کرده تا مصالح سنگی به ظرف پائینی بریزد.

با دانستن وزن هر کدام از سنگدانه‌ها که در سطل ترکیب شده‌اند، می‌توان میزان فضای خالی (Void Content) را به‌دست آورد و سپس با داشتن میزان فضای خالی به محاسبه تراکم



شکل ۱- دستگاه آزمایش فاکتور تراکم

انباشتگی پرداخت. روابـــط مورد نیاز جهت محاسبه میزان فضای خالی به شرح زیر می باشد:

$$Void\ Content$$

$$\left(V_C - \left(\left(\frac{M_1}{S_1}\right) + \left(\frac{M_2}{S_2}\right) + \left(\frac{M_3}{S_3}\right) + \cdots\right)\right) \Big/ V_C \qquad (۱)$$

که در آن V_C حجم ظرف استوانه‌ای، M_1 و M_2 و M_3 جرم هر نوع از سنگدانه‌ها و S_1 و S_2 و S_3 وزن مخصوص هر کدام از انواع سنگدانه‌ها می‌باشد[۱۰].

$$Packing\ Density = 1 - Void\ Content \qquad (۲)$$

نتایج نشان می‌دهد که مخلوط‌های بـا تـراکم انباشـتگی مـاکزیمم دارای تخلخـل و نفـوذ حـداقل و اسـلامپ و مقاومـت فشـاری حداکثر می‌باشند [۱۱ و ۱۲]. مطالعـات متعـددی در زمینـه تـراکم انباشتگی صورت گرفته است. بطور کلی تغییرات هر چند انـدک در این پارامتر ممکن است تأثیر بسزایی در رفتار رئولوژیکی بـتن ایجاد نماید که در بتن خودتراکم نیز کاربرد دارد [۹].

طرح مخلوط بتن خود متراکم، نوعی بهینه سازی مواد و مصالح اولیه بوده که به طرز قابل توجهی به خصوصیات تمامی مصالح وابسته است. اطلاعات مکفی در زمینه انتخاب مصالح سیمانی و مواد افزودنی و نسبت مورد نیاز آنها برای ساخت بتن خودتراکم وجود دارد، اما داده‌های محدودی در رابطه با انتخاب و ترکیب مصالح سنگی با توجه به تأثیر بسزای آن در خصوصیات بتن خودتراکم موجود می‌باشد [۱۳]. لذا در این مقاله با استفاده از آزمایش‌های تازه و سخت شده و همچنین پارامترهای طبقه بندی خاک، نسبت به سنجش قابلیت خود متراکمی و ارائه محدوده دانه‌بندی مناسب برای ساخت بتن خودتراکم اقدام می‌گردد. روشی که ارائه می‌شود، صرف نظر از جنس،بافت وظاهر سنگدانه‌ها، می‌تواند با اطمینان کامل برای تعیین نوع ترکیب سنگدانه‌ها مورد استفاده واقع شود.

۲-برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

در این مقاله از سیمان پرتلند تیپ ۲ شرکت سیمان آبیک استفاده شده است.

ماسه مصرفی از نوع رودخانه‌ای با وزن مخصوص ۲۶۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب، با اندازه دانه بین ۴/۷۵ تا ۰/۰۷۵ میلی‌متر می‌باشد. درشت‌دانه از نوع شکسته با وزن مخصوص ۲۵۸۰ کیلوگرم بر متر مکعب، با اندازه دانه بین ۱۹ تا ۴/۷۵ میلی‌متر می‌باشد. تمامی مصالح سنگی از یک منبع قرضه در منطقه هشتگرد استان البرز تهیه شده‌اند.

ماده افزودنی از نوع فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات ساخت شرکت اِل جی با نام تجاری (CP-WBM) بوده که دارای وزن مخصوص ۱۱۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب و غلظت ۴۰٪ می‌باشد. ضمناً از هیچ ماده قوام آوری در این طرح استفاده نشده است.

۲-۲- طرح اختلاط

در این مقاله محدوده دانه‌بندی شن و ماسه مطابق با آئین نامه ASTM C33 انتخاب شده است [۱۴]. این محدوده‌ها با ۵ منحنی دانه‌بندی تقسیم شده اند که در شکل ۲ و شکل ۳ نمایش داده شده است. برای ساخت ترکیب‌های مختلف سنگدانه، این منحنی‌ها را با یکدیگر ادغام کرده که حاصل آن، ۲۵ منحنی دانه‌بندی می‌شود کهدانه‌بندی آن‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. به عنوان مثال دانه‌بندیSEGA از ترکیب منحنی E از شکل ۳ مربوط به ماسه و منحنی A از شکل ۲ مربوط به شن به‌دست آمده است. به دلیل تداخل منحنی دانه‌بندی ۲۵ ترکیب سنگدانه، از ترسیم نمودار دانه‌بندی آن‌ها خودداری شده است. در میان

پارامترهایی که بر تراکم انباشتگی تأثیر می‌گذارد، توزیع ذرات بر اساس اندازه آنها می‌باشد که پارامتری شناخته شده در علم مکانیک خاک بوده و ضریب یکنواختی (C_u) نام دارد [۱۵]. این پارامتر جهت بیان توزیع ذرات بر اساس اندازه آنها انتخاب شده است و به بیان کیفیت توزیع دانه‌ها می‌پردازد. به عبارت دیگر C_u به بیان درجه یکنواختی و دانه‌بندی ذرات و سنگدانه‌ها می‌پردازد. هرچه C_u بزرگتر باشد، نرخ توزیع سنگدانه‌ها وسیع‌تر می‌باشد.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad (۳)$$

که در آن D_{60} اندازه الکی که ۶۰ درصد سنگدانه‌ها از آن عبور کرده‌اند و D_{10} اندازه الکی که ۱۰ درصد سنگدانه‌ها از آن عبور کرده‌اند، می‌باشد.

شکل۴ رابطه بین ضریب یکنواختی و تراکم انباشتگی را نشان می‌دهد که بیانگر وابستگی این دو پارامتر به یکدیگر می‌باشد. هرچه ضریب یکنواختی افزایش پیدا می‌کند مقدار تراکم انباشتگی نیز افزایش می‌یابد. علت آن توسعه دامنه سنگدانه‌ها با افزایش ضریب یکنواختی بوده که به تبع آن تراکم انباشتگی بهبود می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود تا از این ارتباط جهت به‌دست آوردن تراکم انباشتگی سنگدانه‌ها استفاده شود. ضریب یکنواختی با تغییر نوع دانه‌بندی تغییر می‌کند [۱۳].

از آنجا که ضریب یکنواختی نمی‌تواند فقدان یا ناچیز بودن مقدار اندازه خاصی از دانه‌ها را در فاصله D_{60} و D_{10} دقیقاً مشخص کند، لذا از پارامتری دیگر با عنوان ضریب انحناء یا خمیدگی (C_c) استفاده می‌شود [۱۵].

$$C_c = \frac{{D_{30}}^2}{D_{60} \times D_{10}} \qquad (۴)$$

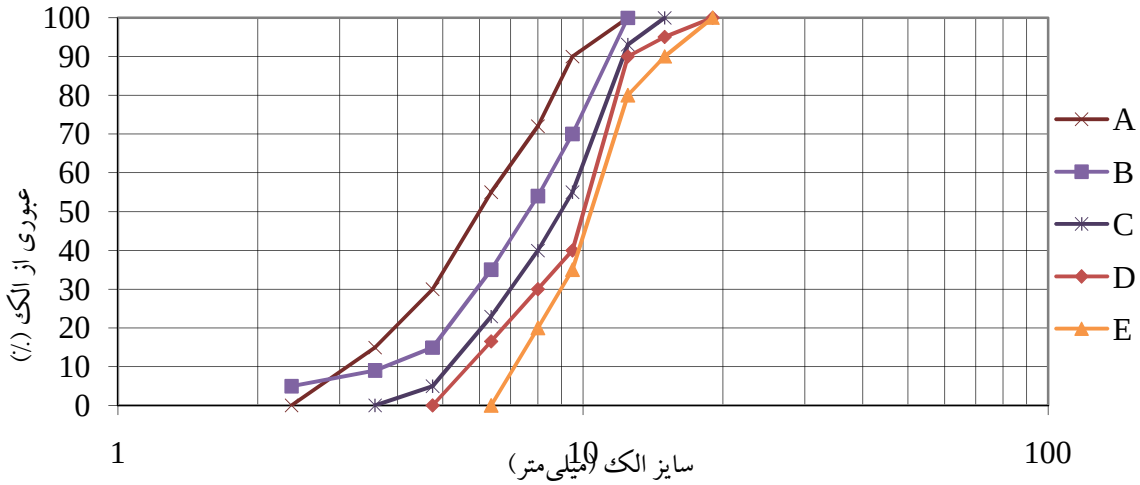
که در آن D_{30} اندازه الکی که ۳۰ درصد سنگدانه‌ها از آن عبور کرده‌اند.

مقدار C_c نشانه‌ای از شکل منحنی دانه‌بندی بین D_{60} و D_{10} می‌باشد. هرچه C_c از واحد دور شود، نشانه آن است که اندازه‌ای از دانه‌ها در فاصله بین D_{60} و D_{10} وجود ندارد (منحنی ناپیوسته است). از این پارامتر نیز می‌توان در شناسایی دانه‌بندی‌هایی که بخشی از ذرات با اندازه خاص را دارا نمی‌باشند، استفاده نمود. شکل۵رابطه بین ضریب یکنواختی و ضریب انحناء را نشان می‌دهد که بیانگر ارتباط معکوس این دو پارامتر با یکدیگر است.

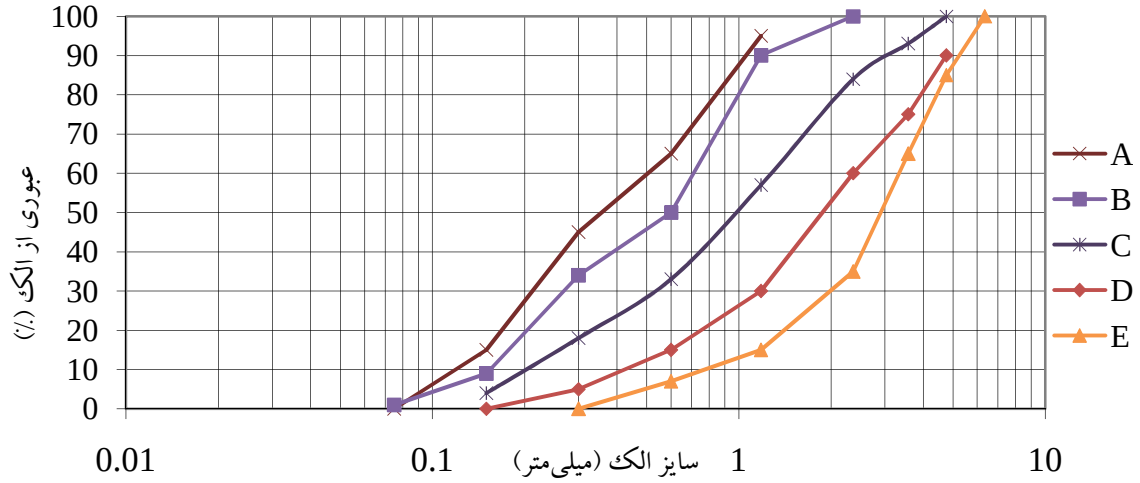
هرچه ضریب یکنواختی افزایش می‌یابد از مقدار ضریب انحناء کاسته می‌شود. علت این موضوع انتقال منحنی دانه‌بندی به سمت ریزدانه بوده که با افزایش ضریب یکنواختی تراکم بهبود یافته است. به عبارت دیگر فضای خالی بیشتری توسط ریزدانه پر شده که به همین دلیل از مقدار D_{30} کاسته و به تبع آن مقدار C_c کاهش می‌یابد. ضریب انحناء می‌تواند در انتخاب دانه‌بندی با بهترین نحوه قرار گیری ذرات در کنار یکدیگر، کمک کند؛ و این یعنی ذرات با اندازه‌های متفاوت می‌توانند در نحوه قرار گیری جهت تراکم بهتر، تأثیر گذار باشند.

میزان فضای خالی نمایانگر حداقل خمیر سیمان لازم جهت پر کردن حجم خالی بتن می‌باشد. علاوه بر این کافی است با داشتن حداقل خمیر سیمانی به محاسبه ترکیب خمیر سیمان (شامل نسبت آب به سیمان، سیمان و مواد افزودنی چسبنده) بپردازیم. مقدار خمیر سیمانی مازاد بر میزان فضای خالی می‌بایست با توجه به کارایی مطلوب محاسبه شود. هرچه تراکم انباشتگی بیشتر باشد به همان نسبت فضای خالی کمتری وجود خواهد داشت؛ پس خمیر سیمانی کمتری برای پر کردن فضای خالی نیاز بوده، به همین دلیلی ما بقی خمیر سیمانی به روغن کاری سطح سنگدانه‌ها می‌پردازد. از اینرو به جای محاسبه تراکم انباشتگی که فرآیندی وقت گیر و سخت به حساب می‌آید، می توان به محاسبه ضریب یکنواختی پرداخت و بزرگترین مقادیر آنرا به عنوان معیاری برای انتخاب سنگدانه با بیشترین تراکم انباشتگی در نظر گرفت. همچنین ضریب انحناء می‌تواند در انتخاب دانه‌بندی با منحنی یکنواخت استفاده شود، که تأثیر به سزایی در خواص رئولوژیکی بتن خودتراکم می‌گذارد.

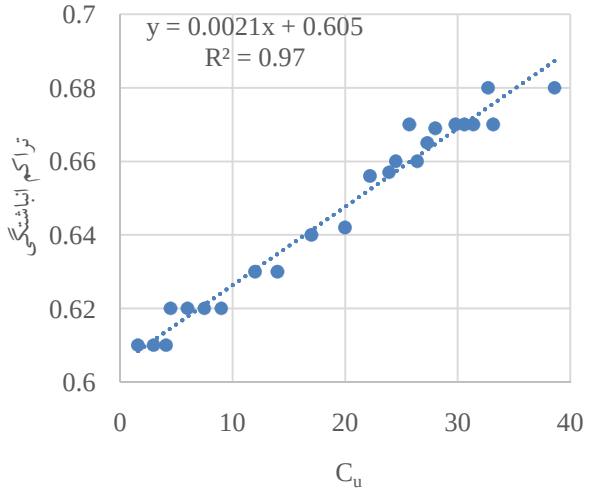
ضریب یکنواختی ۲۵ نوع ترکیب سنگدانه که در جدول ۱ نشان داده شده است،توسط روش آزمایشگاهی محاسبه شده و بر مبنای آن ۱۲ نوعترکیبدانه‌بندی بهینه انتخاب شده است (SAGA، SAGB، SBGA، SBGB، SBGD، SCGA، SCGB، SCGC، SCGD، SCGE، SDGB و SDGD). در اینجا باید خاطر نشان کرد که از این ۱۲ ترکیب دانه‌بندی، تعدادی جهت صحت سنجی رابطه بین ضریب انحناء و ضریب یکنواختی با رئولوژی و مقاومت بتن خودتراکم انتخاب شده‌اند و مابـقی ترکیب‌ها صرفاً در تعیین محدوده مناسب بتن خودتراکم به کار برده شده‌اند.



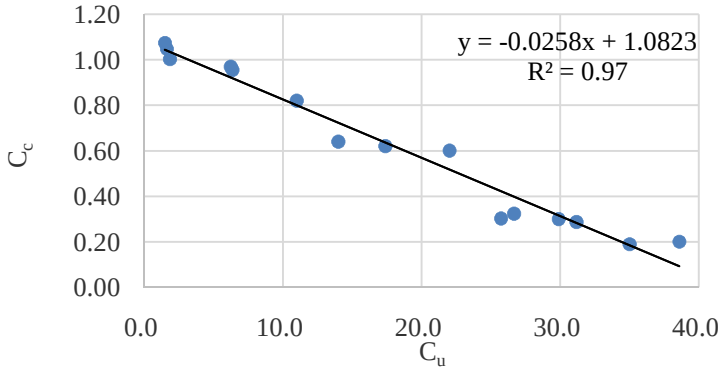
شکل ۲- نمودار تقسیم بندی محدوده دانه‌بندی شن



شکل ۳- نمودار تقسیم بندی محدوده دانه‌بندی ماسه



شکل ۴- رابطه بین ضریب یکنواختی و تراکم انباشتگی سنگدانه‌ها



شکل ۵- رابطه بین ضریب یکنواختی و ضریب انحناء

جهت به‌دست آوردن نسبت‌های بهینه مخلوط و حصول شرایط بهینه خودتراکم بودن، اعم از روانی، پر کنندگی و مقاومت در برابر جدا شدگی، اقدام به انجام آزمایش‌های اولیه به صورت سعی و خطا گردید. مطابق نتایج و مطابق با بررسی ادبیات فنی، به دلیل مصرف مقدار کمتر شن نسبت به ماسه در بتن خود متراکم، سهم حجمی شن و ماسه به ترتیب برابر ۳۸ به ۶۸ درصد انتخاب شد و برای تمامی طرح‌ها ثابت نگاه داشته شد. برای ساخت بتن از سه عیار سیمانی ۴۵۰، ۵۰۰ و ۵۵۰ کیلوگرم در متر مکعب به همراه سه نسبت آب به سیمان برابر ۰/۳۵، ۰/۴ و ۰/۴۵ استفاده شده است. مقدار فوق روان کننده با توجه به تغییرات مکرر در نوع دانه‌بندی، عیار سیمانی و نسبت آب به سیمان، به صورت بصری تنظیم شده تا بهترین و مناسبترین روانی برای بتن‌های ساخته شده پدید آید. همچنین درصد هوای محبوس در بتن ۱ درصد در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش هدف مقایسه دانه‌بندی‌ها با یکدیگر نمی‌باشد، بلکه مقصود اصلی بررسی انواع دانه‌بندی در حصول شرایط خودتراکم بودن و دارا بودن ظرفیت مقاومتی بتن می‌باشد. از اینرو مقادیر فوق روان کننده و خمیر سیمانی برای تمامی طرح‌ها به صورت ثابت نمی‌باشد. جدول ۲ طرح‌های مخلوط را نشان می‌دهد.

۲-۳- سنجش رئولوژی و مقاومت بتن خود متراکم

برای هر طرح مخلوط، خصوصیات تازه بتن خودتراکم شامل قابلیت جریان، قابلیت عبور و قابلیت پرکنندگی مطابق پیشنهاد آئین نامه EFNARC توسط دستگاه‌های آزمایش جریان اسلامپ، جعبه L شکل، جعبه U شکل و قیف V شکل انجام گرفته است [۱۶]. باید در نظر داشت که آزمایش جعبه U شکل از سخت گیرانه‌ترین آزمایش‌های بتن تازه می‌باشد [۱۷] و در اینجا جزء پارامترهای تعیین کننده در تأیید ترکیب‌های سنگدانه گمارده شده است، اما چنانچه طرح مخلوطی ضوابط این آزمایش را ارضاء نکند، دلیل بر خودتراکم نبودن آن طرح مخلوط نمی‌شود. مقادیر قابل قبول برای آزمایش‌های فوق در جدول ۳ گردآوری شده است.

برای سنجش مقاومت فشاری بتن از قالب‌های فولادی مکعبی به ابعاد ۱۰ سانتیمتر استفاده شده است و برای دو سن ۷ روزه و ۲۸ روزه هر کدام سه نمونه آماده شده‌اند. بتن تمامی قالب‌ها یکباره ریخته شده و هیچ تراکم مکانیکی بر آن‌ها اعمال نشده است. قالب برداری پس از ۲۴ ساعت انجام شده و بعد از آن در حوضچه آب تا رسیدن به سن مورد نظر نگهداری شده‌اند. ۲ ساعت قبل از شکستن نمونه‌ها اقدام به بیرون آوردن آنها از حوضچه آب کرده تا هیچ رطوبت اضافی در آن وجود نداشته باشد. نتایجآزمایش‌های مقاومت فشاری و رئولوژی بتن خودتراکم به ترتیب در جدول ۴ و جدول ۵ نشان داده شده است.

۳-تحلیل داده‌ها و تفسیر نتایج

در بخش‌های قبلی، روش‌های آزمایشگاهی توضیح داده شد. در این قسمت، تأثیر نسبت سنگدانه بر روی خصوصیات بتن خودتراکم توضیح داده شده است. از این رو، این قسمت به دو شاخه تقسیم شده است که در ابتدا به بیان رئولوژی و سپس به بیان خصوصیات مکانیکی بتن می‌پردازد و نهایتاً هر دو همزمان با هم بیان می‌شوند.

۳-۱- نتایج بتن تازه

در آئین نامه EFNARC، یک ترکیب بتن می‌تواند تنها به یک دلیل بتن خودتراکم نامیده شود که ملزومات آن یعنی قابلیت عبور و پر کنندگی و مقاومت در برابر جدا شدن را در واقعیت دارا باشد. جدول ۵ نتایج بتن تازه‌ای را نشان می دهد که به طور کلی تعیین کیفیت خصوصیات بتن تازه را اتخاذ می‌کند. در مورد بتن خود متراکم، آزمایش جریان اسلامپ به عنوان آزمایش پایه و اساسی برای معتبر ساختن ترکیب بتن به عنوان بتن خودتراکم انتخاب شده است. بر اساس EFNARC، مقدار اسلامپ می‌تواند بین ۶۵۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر باشد که این عدد به درجه قابلیت پر کنندگی بستگی دارد. برای کاهش یافتن سختی، استفاده از دانه‌بندی ریزدانه پیشنهاد شده است و برای تنزل لزجت، استفاده از دانه‌بندی درشت پیشنهاد شده است. در نتیجه، SDGD-500.4 به عنوان ترکیبی که دارای بیشترین سختی دانه‌بندی با بیشترین سایز سنگدانه به مقدار ۱۲/۵میلی‌متر دارای جریان اسلامپ به مقدار ۵۳۰ میلی‌متر می‌باشد. از سوی دیگر، SAGA-500.4 به عنوان ترکیبی که دارای بیشترین صافی دانه‌بندی با بیشترین سایز سنگدانه به مقدار ۹/۵میلی‌متر دارای جریان اسلامپ به مقدار ۷۲۵ میلی‌متر می باشد. شکل ۶ و شکل ۷ به درون و بیرون دامنه مجاز جریان اسلامپ اختصاص یافته است. در کل، از ترکیباتی با دامنه جریان اسلامپ کمتر از ۶۵۰ میلی‌متر و بیشتر از ۸۰۰ میلی‌متر صرف نظر شده است. بنابراین، تمام ترکیبات آماده شده با نسبت سنگدانه SDGD و ترکیب SDGB-450.35 به جز SDGD-550.35 و SDGD-550.4 حذف شده‌اند. این امر به این علت است که هم شن و هم ماسه استفاده شده در SDGD درشت می‌باشند، بنابراین ترکیب آن چسبندگی بیشتری پیدا می‌کند و این امر بر جریان اسلامپ تأثیر می‌گذارد. همچنین، ضریب یکنواختی SDGD از ترکیباتی که دارای جریان اسلامپ بهتری بوده‌اند، کمتر است. در آخر، تمام ترکیبات ساخته شده با هر دو نوع سنگدانه‌های SBGB و SBGD دارای جریان اسلامپ قابل قبولی بوده‌اند. لازم به ذکر است که نتایج بدست آمده از SBGB بهتر از SBGD بوده است، با یادآوری این واقعیت که SBGD دارای شن درشت تری نسبت به SBGB می‌باشد.

نسبت قابل قبول برای آزمایش جعبه L شکل بین ۰/۸ و ۱/۰ می‌باشد. با این دیدگاه ترکیبات SDGB-500.4 و SDGD-550.35 نادیده گرفته شده است. این اتفاق می‌تواند با نگاه به سایز ذره شن و ماسه استفاده شده در SDGB توضیح داده شود. همانطور که در شکل ۲ و ۳ دیده می‌شود، ماسه درشت و شن ریز می‌باشد. این امر بدان معنی است که نسبت کلی، شامل سنگدانه‌های یک شکل است و فضاهای خالی کاملاً با سنگدانه‌ها پر نشده است. بنابراین، خمیر سیمانی باید این کار را انجام بدهد و این امر باعث می‌شود که در آزمایش جعبه L شکل، در انتهای جعبه انسدادرخ دهد و جلوی روان شدن بتن را بگیرد. ترکیباتی که در آزمایش جریان اسلامپ رد شده‌اند، در آزمایش جعبه L شکل از نظر کیفیتی مورد بررسی قرار نگرفته‌اند.

بر اساس نتایج آزمایش جعبه L شکل که در جدول ۵ آورده شده است، می‌توان مشاهده کرد که ترکیباتی که با SBGD ساخته شده‌اند دارای نرخ بیشتری نسبت به SBGB می‌باشند. این امر می‌تواند به دلیل این مشخصه باشد که با سنگدانه‌های درشت‌تر، لزجت کاهش پیدا می‌کند که به قابلیت جریان بیشتری منتج می‌شود. هر چند، این دو نوع دانه‌بندی سنگدانه دارای نسبتی تقریباً بیشتر از ۰/۹ می‌باشند.

تا اینجا، ۱۰ نسبت از ۳۸ طرح مخلوط برای نامیده شدن به عنوان بتن خودتراکم واجد شرایط نبوده‌اند. با این وجود، به بررسی با استفاده از روش بازبینی آزمایش قیف V شکل بر روی بقیه ترکیب‌ها پرداخته شده است. به هر حال، هیچ یک از طرح مخلوط‌ها به جز SDGD نتوانستند نتایجی بدست آوردند که بتن خودتراکم نامیده شوند و زمان جریان قیف V شکل برای ترکیبات باقی مانده خوب و بر اساس مقدارهای داده شده در EFNARC بوده است.

آخرین و حساس ترین آزمایشی که برای بررسی کردن خصوصیات تازه بتنانتخاب شده است، آزمایش جعبه U شکل می‌باشد. با این وجود، بعضی از ترکیبات بتن خودتراکم نتوانستند این مرحله را پشت سر بگذارد. این آزمایش به عنوان سخت‌ترین روش کنترل ترکیبات بتن خودتراکم شناخته شده است. از نتایج بدست آمده به طور واضح می‌توان مشاهده کرد که حذف طرح مخلوط‌های قبلی به درستی انجام شده است.

جدول ۱- ترکیب سنگدانه‌ها با دانه‌بندی‌های متفاوت

دانه‌بندی / الک	SAGA	SAGB	SAGC	SAGD	SAGE	SBGA	SBGB	SBGC	SBGD	SBGE	SCGA	SCGB	SCGC
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۱۰۰	۱۰۰	۹۷/۳	۹۶/۲	۹۲/۴	۱۰۰	۱۰۰	۹۷/۳	۹۶/۲	۹۲/۴	۱۰۰	۱۰۰	۹۷/۳
۹/۵	۹۶/۲	۸۸/۶	۸۲/۹	۷۳/۴	۷۵/۳	۹۶/۲	۸۸/۶	۸۲/۹	۷۳/۴	۷۵/۳	۹۶/۲	۸۸/۶	۸۲/۹
۶/۳۵	۸۲/۹	۷۵/۳	۷۰/۷	۶۸/۱	۶۲	۸۲/۹	۷۵/۳	۷۰/۷	۶۸/۱	۶۲	۸۲/۹	۷۵/۳	۷۰/۷
۴/۷۵	۷۳/۴	۶۷/۷	۶۳/۹	۶۲	۶۲	۷۳/۴	۶۷/۷	۶۳/۹	۶۲	۶۲	۷۳/۴	۶۷/۷	۶۳/۹
۳/۵۷	۶۷/۷	۶۵/۴	۶۲	۶۲	۶۲	۶۷/۷	۶۵/۴	۶۲	۶۲	۶۲	۶۳/۴	۶۱/۱	۵۷/۷
۲/۳۶	۶۲	۶۳/۹	۶۲	۶۲	۶۲	۶۲	۶۳/۹	۶۲	۶۲	۶۲	۵۲/۱	۵۴	۵۲/۱
۱/۱۸	۵۸/۹	۵۸/۹	۵۸/۹	۵۸/۹	۵۸/۹	۵۵/۸	۵۵/۸	۵۵/۸	۵۵/۸	۵۵/۸	۳۵/۴	۳۵/۴	۳۵/۴
۰/۶	۴۰/۳	۴۰/۳	۴۰/۳	۴۰/۳	۴۰/۳	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۳۱	۲۰/۵	۲۰/۵	۲۰/۵
۰/۳	۲۷/۹	۲۷/۹	۲۷/۹	۲۷/۹	۲۷/۹	۲۱/۱	۲۱/۱	۲۱/۱	۲۱/۱	۲۱/۱	۱۱/۲	۱۱/۲	۱۱/۲
۰/۱۵	۹/۳	۹/۳	۹/۳	۹/۳	۹/۳	۵/۶	۵/۶	۵/۶	۵/۶	۵/۶	۲/۵	۲/۵	۲/۵
۰/۰۷۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶
C_u	۱۰	۹/۰۶	۱۰	۱۰	۱۰	۹/۹۵	۹/۳۱	۱۰	۹/۹۵	۱۰	۱۱/۶۴	۱۲/۳۶	۱۴/۳۶
C_c	۰/۴۵	۰/۴۹	۰/۴۵	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۹۹	۱/۰۶	۰/۸۹	۹۹	۰/۸۹	۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۷۸

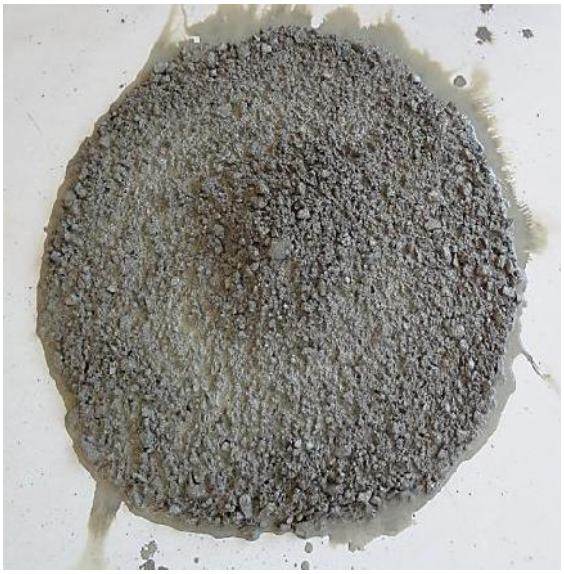
ادامه جدول ۱- ترکیب سنگدانه‌ها با دانه‌بندی‌های متفاوت

دانه‌بندی / الک	SCGD	SCDE	SDGA	SDGB	SDGC	SDGD	SDGE	SEGA	SEGB	SEGC	SEGD	SEGE
۱۹	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۱۲/۵	۹۶/۲	۹۲/۴	۱۰۰	۱۰۰	۹۷/۳	۹۶/۲	۹۲/۴	۱۰۰	۱۰۰	۹۷/۳	۹۶/۲	۹۲/۴
۹/۵	۷۳/۴	۷۵/۳	۹۶/۲	۸۸/۶	۸۲/۹	۷۳/۴	۷۵/۳	۹۶/۲	۸۸/۶	۸۲/۹	۷۳/۴	۷۵/۳
۶/۳۵	۶۸/۱	۶۲	۸۲/۹	۷۵/۳	۷۰/۷	۶۸/۱	۶۲	۸۲/۹	۷۵/۳	۷۰/۷	۶۸/۱	۶۲
۴/۷۵	۶۲	۶۲	۶۷/۲	۶۱/۵	۵۷/۷	۵۵/۸	۵۵/۸	۶۴/۱	۵۸/۴	۵۴/۶	۵۲/۷	۵۲/۷
۳/۵۷	۵۷/۷	۵۷/۷	۵۲/۲	۴۹/۹	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۶/۵	۴۰/۳	۴۳/۷	۴۰/۳	۴۶	۴۰/۳
۲/۳۶	۵۲/۱	۵۲/۱	۳۷/۲	۳۹/۱	۳۷/۲	۳۷/۲	۳۷/۲	۲۱/۷	۲۳/۶	۲۱/۷	۲۱/۷	۲۱/۷
۱/۱۸	۳۵/۴	۳۵/۴	۱۸/۶	۱۸/۶	۱۸/۶	۱۸/۶	۱۸/۶	۹/۳	۹/۳	۹/۳	۹/۳	۹/۳
۰/۶	۲۰/۵	۲۰/۵	۹/۳	۹/۳	۹/۳	۹/۳	۹/۳	۴/۳	۴/۳	۴/۳	۴/۳	۴/۳
۰/۳	۱۱/۲	۱۱/۲	۳/۱	۳/۱	۳/۱	۳/۱	۳/۱	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۱۵	۲/۵	۲/۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۰/۰۷۵	۰/۶	۰/۶	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
C_u	۱۵/۲۷	۱۵/۲۷	۶/۷۲	۷/۲	۸/۰۸	۸/۴	۹/۲	۳/۶	۳/۹۲	۱۰	۴/۳۲	۴/۷۲
C_c	۰/۷۴	۰/۷۳	۱/۲۶	۱/۰۹	۱/۰۵	۱/۰۱	۰/۹۱	۱/۳	۱/۱۹	۰/۸۹	۱/۲	۱/۰۶

جدول ۲- طرح مخلوط

ردیف	نام طرح	نسبت آب به سیمان	سیمان (KG/M^3)	آب(KG/M^3)	شن(KG/M^3)	ماسه(KG/M^3)	روان کننده(%)
۱	SAGA-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۱۰
۲	SAGB-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۷/۵
۳	SBGA-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۴/۵
۴	SBGB-450.35	۰/۳۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۷۰۰	۱۱۲۰	۱/۵
۵	SBGB-450.40	۰/۴	۴۵۰	۱۸۰	۶۸۰	۱۰۸۵	۱/۵
۶	SBGB-450.45	۰/۴۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۶۵۵	۱۰۴۵	۱/۴
۷	SBGB-500.35	۰/۳۵	۵۰۰	۱۷۵	۶۷۰	۱۰۶۵	۱/۴
۸	SBGB-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۰/۵
۹	SBGB-500.45	۰/۴۵	۵۰۰	۲۲۵	۶۲۰	۹۸۵	۰/۴
۱۰	SBGB-550.35	۰/۳۵	۵۵۰	۱۹۲/۵	۶۳۵	۱۰۱۰	۲/۱
۱۱	SBGB-550.40	۰/۴	۵۵۰	۲۲۰	۶۰۵	۹۷۰	۱/۸
۱۲	SBGB-550.45	۰/۴۵	۵۵۰	۲۴۷/۵	۵۸۰	۹۲۵	۱
۱۳	SBGD-450.35	۰/۳۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۷۰۰	۱۱۲۰	۱۶
۱۴	SBGD-450.40	۰/۴	۴۵۰	۱۸۰	۶۸۰	۱۰۸۵	۶
۱۵	SBGD-450.45	۰/۴۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۶۵۵	۱۰۴۵	۲
۱۶	SBGD-500.35	۰/۳۵	۵۰۰	۱۷۵	۶۷۰	۱۰۶۵	۴/۵
۱۷	SBGD-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۰/۶
۱۸	SBGD-500.45	۰/۴۵	۵۰۰	۲۲۵	۶۲۰	۹۸۵	۰/۲۵
۱۹	SBGD-550.35	۰/۳۵	۵۵۰	۱۹۲/۵	۶۳۵	۱۰۱۰	۱/۲۵
۲۰	SBGD-550.40	۰/۴	۵۵۰	۲۲۰	۶۰۵	۹۷۰	۰/۵
۲۱	SBGD-550.45	۰/۴۵	۵۵۰	۲۴۷/۵	۵۸۰	۹۲۵	۰/۳۵
۲۲	SCGA-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۱/۳
۲۳	SCGB-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۰/۶
۲۴	SCGC-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۰/۶
۲۵	SCGD-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۱
۲۶	SCGE-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۱/۱
۲۷	SDGB-450.35	۰/۳۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۷۰۰	۱۱۲۰	۲/۵
۲۸	SDGB-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۰/۵
۲۹	SDGB-550.45	۰/۴۵	۵۵۰	۲۴۷/۵	۵۸۰	۹۲۵	۰/۱
۳۰	SDGD-450.35	۰/۳۵	۴۵۰	۱۵۷/۵	۷۰۰	۱۱۲۰	۱/۶
۳۱	SDGD-450.40	۰/۴	۴۵۰	۱۸۰	۶۸۰	۱۰۸۵	۰/۴۵
۳۲	SDGD-450.45	۰/۴۵	۴۵۰	۲۰۲/۵	۶۵۵	۱۰۴۵	۰/۲۵
۳۳	SDGD-500.35	۰/۳۵	۵۰۰	۱۷۵	۶۷۰	۱۰۶۵	۱/۴
۳۴	SDGD-500.40	۰/۴	۵۰۰	۲۰۰	۶۴۵	۱۰۲۵	۰/۳۵
۳۵	SDGD-500.45	۰/۴۵	۵۰۰	۲۲۵	۶۲۰	۹۸۵	۰/۲۵
۳۶	SDGD-550.35	۰/۳۵	۵۵۰	۱۹۲/۵	۶۳۵	۱۰۱۰	۱/۳
۳۷	SDGD-550.40	۰/۴	۵۵۰	۲۲۰	۶۰۵	۹۷۰	۰/۵۵
۳۸	SDGD-550.45	۰/۴۵	۵۵۰	۲۴۷/۵	۵۸۰	۹۲۵	۰/۲۵

شکل ۶- نمونه‌ای از بتن خودتراکم با اسلامپ مطلوب



شکل ۷- نمونه‌ای از بتن خودتراکم با اسلامپ نامطلوب

جدول ۳- ضوابط پذیرش بتن خود متراکم[۱۶]

روش آزمایش	واحد	حدود تغییرات اندازه‌ها	
		حداقل	حداکثر
جریان اسلامپ	mm	650	800
قیف V شکل	sec	2	8
جعبه L شکل	-	0.8	1
جعبه U شکل	mm	0	30

جدول ۴- نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن خود متراکم

ردیف	نام طرح	۷ روزه (MPA)	۲۸ روزه (MPA)
۱	SAGA-500.40	۴/۴	۱۸/۳
۲	SAGB-500.40	۱۳	۲۲
۳	SBGA-500.40	۱۳/۸	۲۴/۵
۴	SBGB-450.35	۲۵/۱	۳۲/۲
۵	SBGB-450.40	۲۶	۲۸
۶	SBGB-450.45	۲۴/۷	۳۳
۷	SBGB-500.35	۲۲/۳	۳۱
۸	SBGB-500.40	۲۶/۳	۳۴/۸
۹	SBGB-500.45	۲۹/۳	۳۹/۹
۱۰	SBGB-550.35	۳۷/۱	۴۴/۵
۱۱	SBGB-550.40	۳۷/۶	۵۰/۸
۱۲	SBGB-550.45	۳۸/۴	۴۸/۷
۱۳	SBGD-450.35	۲/۷	۱۰/۸
۱۴	SBGD-450.40	۱۷/۸	۲۸
۱۵	SBGD-450.45	۱۸/۹	۲۹/۳
۱۶	SBGD-500.35	۲۹/۲	۴۵/۴
۱۷	SBGD-500.40	۳۴	۵۹/۸
۱۸	SBGD-500.45	۲۵/۹	۳۹/۶
۱۹	SBGD-550.35	۳۶/۹	۵۰/۷
۲۰	SBGD-550.40	۲۸/۹	۴۴/۹
۲۱	SBGD-550.45	۲۸/۵	۴۸/۸
۲۲	SCGA-500.40	۲۷/۶	۳۸/۳
۲۳	SCGB-500.40	۲۷/۴	۳۸/۶
۲۴	SCGC-500.40	۲۸/۲	۳۴/۴
۲۵	SCGD-500.40	۳۴/۶	۴۷
۲۶	SCGE-500.40	۳۵/۲	۴۸/۷
۲۷	SDGB-450.35	۲۹/۲	۴۰/۱
۲۸	SDGB-500.40	۳۴/۶	۴۴/۳
۲۹	SDGB-550.45	۳۰/۹	۴۳
۳۰	SDGD-450.35	۳۰/۳	۳۴/۷
۳۱	SDGD-450.40	۲۶/۶	۳۱/۴
۳۲	SDGD-450.45	۳۶/۹	۴۸/۸
۳۳	SDGD-500.35	۴۰/۱	۴۵/۱
۳۴	SDGD-500.40	۳۰/۹	۳۴/۶
۳۵	SDGD-500.45	۳۳/۶	۳۹
۳۶	SDGD-550.35	۳۹/۳	۴۵/۵
۳۷	SDGD-550.40	۳۹/۶	۴۵/۹
۳۸	SDGD-550.45	۵۱/۷	۵۹/۹

به عنوان یک نتیجه، SDGD- 550.4 و تمامی ترکیبات ساخته شده بر اساس SDGD در این آزمایش رد شده‌اند. در ادامه، مقایسه SBGB و SBGD به لزجت کمتر در عین داشتن دانه‌بندی با نسبت سنگدانه درشت‌تر، منتج شد.

نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های بالا، تایید می‌کند که با استفاده از دانه‌بندی سنگدانه درشت‌تر، لزجت کاهش پیدا می‌کند. همچنین، تهیه کردن دامنه دانه‌بندی قابل اجرا به تنهایی بر خصوصیات بتن خودتراکم تازه بستگی ندارد.

۳-۲- نتایج مقاومت فشاری

اگرچه هدف اصلی در بتن خود متراکم، دست یافتن به یک خصوصیات رئولوژیکی مناسب می‌باشد، اما مقاومت فشاری یک موضوعکلیدی در طراحی بتن یه شمار می‌آید؛ به دلیل اینکه بتن خودتراکم با مقاومت فشاری کم در صنعت ساختمان مورد استفاده نیست، در این قسمت برای حل مشکل تأثیر خصوصیات بتن تازه و سخت شده، نمونه‌ها با مقاومت فشاری کمتر از ۲۸ مگاپاسکال در سن ۲۸ روز حذف شده‌اند. نتایج مقاومت فشاری نشان داده شده در جدول ۴، مقدار میانگین برای ۳ نمونه در هر سن از آن می‌باشد. با وجود این واقعیت که ۲۷ ترکیب باقی مانده دارای مشخصه رئولوژیکی مناسب می‌باشند، بعضی از آنها مقاومت فشاری رضایت بخشی ندارند. به دلیل اینکه این ترکیبات خواستار مقدار زیادی از فوق روان کننده (بین ۴/۵ و ۱۶ درصد) بوده‌اند، بنابراین زمان گیرش بتن افزایش پیدا کرده است، لذا زمان قالب باز کردن به ۴۸ ساعت پس از نمونه گیری تاخیر پیدا کرده و این امر نمونه‌های بتن را به عمل آوری نا مناسب وا می‌دارد که باعث ایجاد خصوصیات نامطلوب می‌گردد. بنابراین، مخلوط‌ها با نام‌های SAGA-500.40 و SAGB-500.40 و SBGA-500.40 و SBGD-450.35 از تحقیقات حذف شده‌اند. حذف SBGD-450.35 به این حقیقت که حجم ناکافی سیمان باعث کاهش لزجت می‌شود، ربط داده شده است. بنابراین، نیاز به فوق روان کننده به دلیل کسب کردن رئولوژی مناسب افزایش یافته است. از این رو، با استفاده فوق روان کننده بیشتر از ۱۶ درصد باعث تأثیر بر خصوصیات مکانیکی شد و در آخر طرح مخلوط مورد نظر حذف گردید.

نمونه‌های شکسته شده در آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۸ نشان داده شده است که توزیع یکنواخت سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد و بیانگر مقاومت مناسب در برابر جدا شدگی بوده و این طرح مخلوط‌ها واجد شرایط خود متراکمی هستند.

شکل ۸- توزیع یکنواخت سنگدانه‌ها در نمونه‌های فشاری

۳-۳- توسعه محدوده دانه‌بندی بتن خود متراکم

برای تعیین یک دامنه مشخص برای بتن خود متراکم، تمام نتایج خصوصیات رئولوژیکی و مکانیکی بتن همانطور که در قسمت‌های پیشین گفته شد، باید مطلوب و قابل قبول باشد. در انتها، طرح مخلوط‌های باقی مانده زمینه ساز ایجاد یک محدوده دانه‌بندی برای بتن خودتراکم می‌شوند. با نادیده گرفتن تأثیر خصوصیات مکانیکی، محدوده دانه‌بندی شامل ۱۰ منحنی دانه‌بندی می‌شود. بعد از آن، با خذف منحنی‌های میان منحنی‌های کرانه‌ای، محدودهدانه‌بندی‌ای حاصل می شود که بتن ساخته شده با دانه‌بندی سنگدانه در این محدوده، خصوصیات رئولوژی بتن خودتراکم را ارضاء می‌کند که در شکل ۹ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۹، دامنه دانه‌بندیبتن خودتراکم به SAGA و SCGE محدود می‌شود. با این دیدگاه، بتن خودتراکم تولیدی با کارایی تضمین شده بوجود می‌آید، اما تضمینی وجود ندارد که بتنی با مقاومت فشاری مناسب به‌دست آید. اگر چنین باشد، برای قبول کردن بتن از نظر رئولوژیکی و مکانیکی، نتیجه آزمایش‌ها پیشنهاد می‌کند که منحنی‌هایی که با مقاومت فشاری سازگار نیستند، حذف شوند. حال می‌توان در مورد محدوده دانه‌بندی و تأثیر آن بر خصوصیات بتن تازه و سخت شده متمرکز شد. شکل ۱۰ به محدوده دانه‌بندی نهایی اشاره می‌کند که مطمئناً می‌تواند در به‌دست آوردن بهترین نسبت سنگدانه ممکن، برای ساختن مخلوط بتن خودتراکم با کارایی و مقاومت قابل قبول مورد

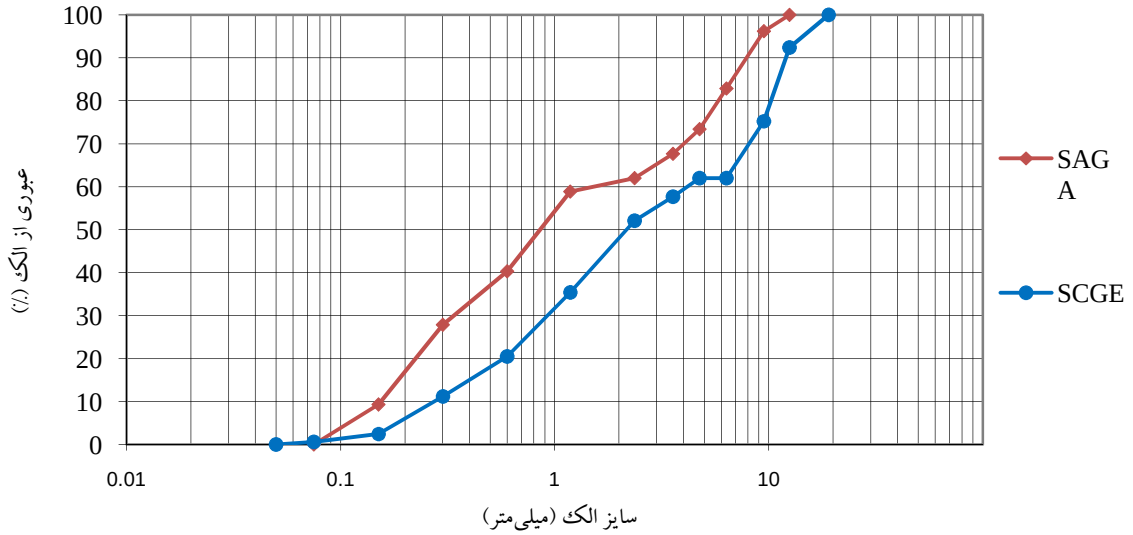
استفاده قرار گیرد. همچنین در این نمودار به وضوح دیده می‌شود که دامنه فعلی محدودتر از حالت قبلی شده است.

مطابق شکل ۱۰، محدوده دانه‌بندیتن خودتراکم به SBGB و SCGE محدود شده است و به وضوح نشان می‌دهد که SAGA منحنی دانه‌بندی‌ای می باشد که با ضریب کنترل مقاومت فشاری سازگار نیست. به عنوان یک نتیجه، SDGD- 550.4 و تمامی ترکیبات ساخته شده بر اساس SDGD در این آزمایش رد شده‌اند. در ادامه، مقایسه SBGB و SBGD به لزجت کمتر در عین داشتن دانه‌بندی با نسبت سنگدانه درشت‌تر، منتج شد.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج آزمایش‌های تازه و سخت شده بتن خودتراکم بررسی شد. در بخش ابتدایی، تمرکز بر روی انواع دانه‌بندی برای بتن صورت گرفت و به دنبال آن نحوه انتخاب بهترین دانه‌بندییان شد. اهم نتایج به‌دست آمده در این پژوهش مطابق زیر می‌باشد:

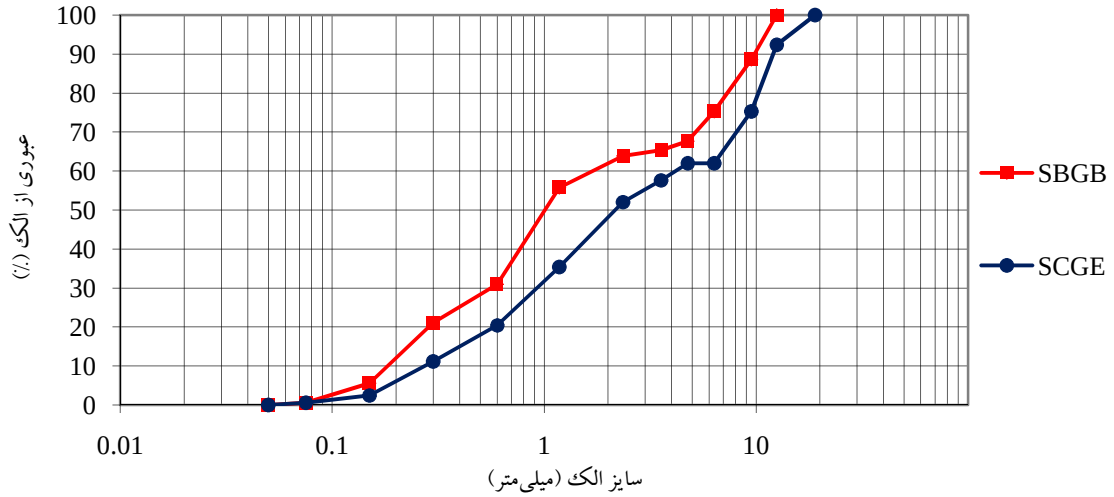
- با انجام آزمایش‌های تازه و سخت شده روی طرح‌های مخلوط و با توجه به ضوابط پذیرش این طرح‌ها، یک محدوده مناسب برای بتن خودتراکم حاصل شد که از آن می‌توان در کارخانجات ساخت بتن آماده با اطمینان استفاده نمود.
- مقدار اسلامپ بالا گواه بر خودتراکم بودن بتن نمی‌باشد، حتی اگر هیچ گونه جداشدگی و یا آب انداختگی وجود نداشته باشد؛ زیرا ممکن است پارامترهای دیگر بتن همچون قابلیت عبور و پرکنندگی در آزمایش‌های دیگر ارضاء نشده باشد. به عنوان مثال طرح SDGD-550.35به اسلامپ ۷۸۰ میلی‌مترختم شد اما در آزمایش‌های جعبه U شکل و جعبه L شکل موفق نبود.
- کیفیت و دانه‌بندی سنگدانه‌ها تأثیر به سزایی در خواص تازه و سخت شده بتن خودتراکم دارد، به‌طوریکه در برخی موارد بخش ریزدانه همانند فیلتر عمل کرده و سبب تنظیم لزجت خمیری بتن شده است. این کار باعث حذف قوام آور در ساخت بتن خودتراکم شده که منجر به اقتصادی شدن این بتن می گردد.
- بخش ریزدانه مصالح سنگی نسبت به درشت‌دانه اثر گذاری بیشتری روی رئولوژی بتن خودتراکم دارد. مطابق نتایج، با استفاده از سنگدانه درشت‌تر، لزجت خمیری افزایش یافته و به سبب آن احتمال جدا شدگی، انسداد و آب انداختگی افزایش می‌یابد، ولی با استفاده از مصالح سنگی ریزتر از مقدار تنش تسلیم کاسته شده که خود باعث بهبود رئولوژی می‌شود و همچنین سبب بهبود مقاومت فشاری بتن خودتراکم نیز می گردد.
- آنالیز داده‌ها نشان داد که چنانچه از شن و ماسه ریزدانه استفاده شود، میزان مصرف فوق روان کننده افزایش پیدا می کند و این میزان خارج از میزان مصرف رایج و مجاز می‌باشد که سبب‌دیرگیر شدن سیمان و عدم موفقیت در آزمایش مقاومت فشاری می‌شود. بنابراین چنانچه طرح مخلوطی با مصرف بیش از حد مجاز فوق روان کننده مصادف شود، می‌توان از نامناسب بودن دانه‌بندی آن اطمینان حاصل نمود.



شکل ۹- دامنه دانه‌بندی سنگدانه بتن خودتراکم بر اساس رئولوژی

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های رئولوژی بتن خودتراکم

ردیف	طرح	اسلامپ (mm)	نرخ انسداد	قیف V (sec)	جعبه U (mm)	انسداد	آب انداختگی	جدا شدگی
۱	SAGA-500.40	۷۲۵	۰/۹۲	۳/۷۵	۰	ندارد	ندارد	ندارد
۲	SAGB-500.40	۷۹۰	۰/۹۹	۴/۳۵	۱۰	ندارد	ندارد	ندارد
۳	SBGA-500.40	۷۶۰	۰/۹۷	۳/۵	۲	ندارد	ندارد	ندارد
۴	SBGB-450.35	۷۳۵	۱	۳/۵	۸	ندارد	ندارد	ندارد
۵	SBGB-450.40	۶۸۵	۰/۸۴	۳/۶	۱۵	ندارد	ندارد	ندارد
۶	SBGB-450.45	۷۰۰	۰/۸۹	۳/۶	۲	ندارد	ندارد	ندارد
۷	SBGB-500.35	۷۲۰	۰/۸۹	۳/۶	۲۵	ندارد	ندارد	ندارد
۸	SBGB-500.40	۷۱۰	۰/۸۵	۳	۲۵	ندارد	ندارد	ندارد
۹	SBGB-500.45	۶۵۰	۰/۷۹	۳	۵	ندارد	ندارد	ندارد
۱۰	SBGB-550.35	۷۸۵	۰/۹۴	۶	۵	ندارد	ندارد	ندارد
۱۱	SBGB-550.40	۷۰۰	۰/۹۴	۴/۵	۵	ندارد	ندارد	ندارد
۱۲	SBGB-550.45	۸۰۰	۱	۳	۵	ندارد	ندارد	ندارد
۱۳	SBGD-450.35	۷۶۳	۰/۹۹	۴/۵	۱۰	ندارد	ندارد	ندارد
۱۴	SBGD-450.40	۶۷۰	۰/۸۸	۵/۳	۱۰	ندارد	ندارد	ندارد
۱۵	SBGD-450.45	۶۶۶	۰/۹۴	۳/۷	۱۰	ندارد	ندارد	ندارد
۱۶	SBGD-500.35	۷۳۳	۱	۵/۸	۵	ندارد	ندارد	ندارد
۱۷	SBGD-500.40	۷۸۵	۰/۹۶	۲/۹	۴	ندارد	ندارد	ندارد
۱۸	SBGD-500.45	۶۳۰	۰/۴۸	۳/۴	۱۵	ندارد	ندارد	ندارد
۱۹	SBGD-550.35	۷۸۰	۰/۹۵	۳/۷	۱	ندارد	ندارد	ندارد
۲۰	SBGD-550.40	۸۱۰	۰/۹۹	۲/۴	۳	ندارد	ندارد	ندارد
۲۱	SBGD-550.45	۷۹۵	۱	۲/۳	۰	ندارد	ندارد	ندارد
۲۲	SCGA-500.40	۷۲۵	۰/۸۸	۳/۸۵	۵	ندارد	ندارد	ندارد
۲۳	SCGB-500.40	۷۲۵	۰/۸۸	۳/۵	۱۰	ندارد	ندارد	ندارد
۲۴	SCGC-500.40	۷۴۰	۰/۹۴	۳/۳	۶	ندارد	ندارد	ندارد
۲۵	SCGD-500.40	۷۳۰	۰/۹۴	۳/۳	۵	ندارد	ندارد	ندارد
۲۶	SCGE-500.40	۷۱۰	۰/۸۸	۴	۱۰	ندارد	ندارد	ندارد
۲۷	SDGB-450.35	۴۵۰	۰	-	-	دارد	دارد	دارد
۲۸	SDGB-500.40	۶۹۷	۰/۶۵	۷/۶	۳۲۰	ندارد	ندارد	ندارد
۲۹	SDGB-550.45	۶۹۵	۰/۴۶	۲	۱۵	ندارد	ندارد	ندارد
۳۰	SDGD-450.35	۵۰۰	۰	-	-	دارد	دارد	دارد
۳۱	SDGD-450.40	۶۰۵	۰/۷۱	۱۷/۵	۳۹۵	دارد	دارد	دارد
۳۲	SDGD-450.45	۶۱۰	۰/۵۹	۱۳/۵	۳۳۰	ندارد	ندارد	ندارد
۳۳	SDGD-500.35	۵۲۵	۰/۵۷	۱۵	-	دارد	دارد	دارد
۳۴	SDGD-500.40	۵۳۰	۰/۶۱	۴/۵	۳۳۵	ندارد	ندارد	ندارد
۳۵	SDGD-500.45	۶۳۰	۰/۷	۳/۵	۹۵	ندارد	ندارد	ندارد
۳۶	SDGD-550.35	۷۸۰	۰/۵۳	۶	-	دارد	دارد	دارد
۳۷	SDGD-550.40	۶۸۰	۱	۱۱	۳۱۰	دارد	دارد	دارد
۳۸	SDGD-550.45	۵۵۰	۰/۴۴	۵	۵۰	ندارد	ندارد	ندارد



شکل ۱۰- محدوده دانه‌بندی پیشنهادی سنگدانه بتن خودتراکم بر اساس رئولوژی و مقاومت فشاری

۵- مراجع

[1].Sonebi,Mohammed.“Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans”Cement and concrete research. 34,pp 1199, 2004.

[2].Okamura, Hajime and Ouchi, Masahiro.“Self-Compacting Concrete”Journal of AdvancedConcreteTechnology. 1 (1), pp5-15, 2003.

[3].Domone P.L. and Jin, J. “Properties of mortar for self-compacting concrete”International RILEM symposium on self-compacting concrete. 1, pp 109–120, 1999.

[۴].شکرچی‌زاده، محمد؛ لیبر، نیکلاس‌علی؛ خوش‌نظر، راحیل؛ پورضرابی، علی؛ اعتمادرضایی، امیرمهدی؛ مرتضوی مهریزی، سید وحید. «بررسی تأثیر حداکثر اندازه سنگدانه بر خواص رفتاری ملات تازه خود متراکم» کنگره ملی بتن خودتراکم، مرکز بین‌المللی علوم و تکنولوژی.۱۳۹۰.

[۵].شکرچی‌زاده، محمد؛ لیبر، نیکلاس‌علی؛ ماهوتیان، مهرداد؛ مهدی‌پور، ایمان؛ وحدانی، محمد. «تأثیر دانه‌بندی سنگدانه بر خواص بتن خودتراکم تازه وسخت شده» کارگاه تخصصی بتن خود متراکم،تهران-دانشگاه تهران. دوره اول، ۱۳۸۵.

[6].Reinhardt, H.W. and Wustholz, T. “About the influence of the content and composition of the aggregates on the rheological behavior of self-compacting concrete” Materials and Structures. 39, pp 683–693, 2006.

[7].Goltermann, P., Johansen, V. and Palbol, L. “Packing of aggregates: an alternative tool to determine the optimal aggregate mix” ACI Materials Journal. 94(5), pp435-443, 1997.

[8].Glavind, M. and Pedersen, E.J. “Packing calculations applied for concrete mix design” In: Proceedings of creating with concrete, University of Dundee. pp 1–10, 1999.

[9].Johansen, V. and Andersen, P.J. “Particle packing and concrete properties” Material Science of Concrete II, The American Ceramic Society, Westerville. pp 111–147, 1991.

[10].ASTM C29.“Standard test method for bulk density(Unit Weight) and voids in aggregate” American Society forTesting and Materials Standards, West Conshohocken.2001.

[11].Standish, N. and Yu, A.B. “Porosity calculations of ternary mixtures of particles” Powder Technology. 49(3), pp. 249-253, 1987.

[12].Ridgway, K. and Tarbuck, K.J.“Particulate mixture bulk densities”Chemical Engineering and Processing. 49, pp 103–105, 1968.

[13].Nanthagopalan,P. andSanthanam,M. “An empirical approach for the optimization of aggregate combinations for self-compacting concrete”Materials and Structures. 45, pp 1167–1179, 2012.

[14].ASTM C33.“Standard Specification for Concrete Aggregates” American Society forTesting and Materials Standards, West Conshohocken.2004.

[15].Hazen, A. “Some physical properties of sandsandgravels” Massachusetts State Board of Health, AnnualReport. pp 539–556, 1892.

[16].EFNARC. “Guidelines for self-compacting concrete” London, UK: Association House.2005.

[17].Shekarchi, M., Libre, N. A., Mahoutian, Mohebi, A., Behradi Yekta, S. “SCC Test Methods and Discussion of the Results of Fresh SCC Stability” Proceedings of SCC Workshop in University of Tehran.2007.

Representing Appropriate Aggregates Grading Zone for Self-consolidating Concrete by Using Soil Classifying Parameters

A. Bagheri
Post Graduate student of Civil Engineering - Geotechnics, Faculty of Engineering, Zanjan University.
F. Farrokhi
Assistant professor of Civil Engineering – Structure and Geotechnics, Faculty of Engineering, Zanjan University.
M. Mahdikhani
Assistant professor in Civil Engineering, Imam Khomeini International University
R. Farokhzad[G]
Member of faculty, Department of Civil Engineering, Qazvin Branch, Islamic Azad University
J. Baghdadi
Post Graduate student of Civil Engineering - Geotechnics, Faculty of Engineering, Zanjan University.

Abstract
Today, we see frequent use of self-consolidating concrete (SCC) because of its special fresh and hardened properties in civil projects. These properties are depend on numerous parameters such as paste content and composition and aggregates volume and its grading. Hence, aggregates as an inexpensive material, can play an important role in concrete production. Since an increase in aggregates properties results in reduction of cement paste which is used to fill up the voids, therefore this paper proposes a method to approach a proper aggregates gradingzone with lesser voids content by using uniformity coefficient and coefficient of gradation in soil mechanics. From the results, it can be seen that there is a direct and inverse correlation between uniformity coefficient, coefficient of gradation and void content, respectively. The presented grading zone shows that all the concluding aggregate proportions satisfy all fresh and hardened properties andwill lead to produceSCC.

Keywords: Packing density, Aggregates grading, Uniformity coefficient, Coefficient of gradation, Self-consolidating concrete.

* Corresponding author: R.Farokhzad@qiau.ac.ir