

## روش تجربی جهت رسیدن به یک دانه‌بندی مناسب برای بتن خودمتراکم با استفاده از پارامترهای طبقه‌بندی خاک فرهنگ فرخی<sup>۱</sup>، امیر باقری<sup>۲\*</sup> و جمشید بغدادی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۲</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۳</sup>دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

amir.bagheri@znu.ac.ir

**چکیده:** امروزه از بتن خود متراکم 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، دانه بندی سنگ‌دانه و عوامل دیگر وابسته است. در این بین سنگ‌دانه‌ها به عنوان مصالحی ارزان می‌توانند در تأمین خواص مورد نیاز بتن خود متراکم 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 دانه‌بندی مناسب با کمترین فضای خالی با استفاده از ارزیابی فاکتور تراکم و تأثیر آن روی خواص بتن خود متراکم و همچنین با استفاده از روابط کاربردی ضریب یک‌نواختی و ضریب انحناء در مکانیک خاک، است. نتایج نشان می‌دهد که رابطه منطقی‌ای بین ضریب انحناء، ضریب یک‌نواختی و میزان فضای خالی در مصالح سنگی وجود دارد. در ادامه به بررسی اثر فاکتور تراکم بر خصوصیات تازه و سخت شده بتن خود متراکم پرداخته می‌شود.

**واژگان کلیدی:** فاکتور تراکم، دانه بندی، ضریب یک‌نواختی، ضریب انحناء، بتن خود متراکم.

## An Empirical Method for Determining Appropriate Aggregate Grading in Self-Compacted Concrete, Using Soil Classification Factors

F. Farrokhi, A. Bagheri and J. Baghdadi

**Abstract:** Recently, self-compacted concrete (SCC) is extensively used in civil projects because of their special fresh and hardened properties. These properties result from numerous parameters such as the paste content, the chemical composition of paste, the aggregate volume and aggregate grading. Although aggregates are inexpensive material but they can play an important role in concrete production. An increase in the proportion of aggregate particles directly result in decreasing cement paste content that is commonly used in filling up the voids and therefore, promote the efficiency of concrete particularly its mechanical strength and durability. This work attempts to introduce a method for approaching the proper aggregate grading with lesser void volume, by determining the influence of packing density of aggregates on the properties of SCC and by using uniformity coefficient together with coefficient of gradation in soil mechanics. The obtained results indicate that there is a logic correlation between packing density, uniformity coefficient, coefficient of gradation and void volume. Also, the results verify the effect of aggregate packing density on fresh and hardened properties of SCC.

**Keywords:** Packing Density, Aggregates Grading, Uniformity Coefficient, Coefficient of Gradation, Self-Consolidating Concrete.

**۱ - مقدمه**

بتن خودتراکم شاخه جدید بتن با مقاومت متوسط به بالا و یک فن آوری نوپا در عرصه ساخت و ساز دنیاست که بدون ویریه 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 از یک سو و تراکم نامناسب ناشی از افزایش حجم آرماتورهای مصرفی و به تبع عملکرد بهتر سازه‌ای از سوی دیگر مورد بحث و بررسی قرار گرفت، تا اینکه نظریه بتن خود متراکمی که بتواند تحت وزن خودش و بدون نیاز به ویراتور 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].

از آنجا که بتن خود متراکم نسبت به بتن معمولی دارای مقدار کمتری از درشت‌دانه است (معمولاً بین ۳۱ الی ۳۵ درصد)؛ 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 خود متراکم کمتر می‌شود [۴].

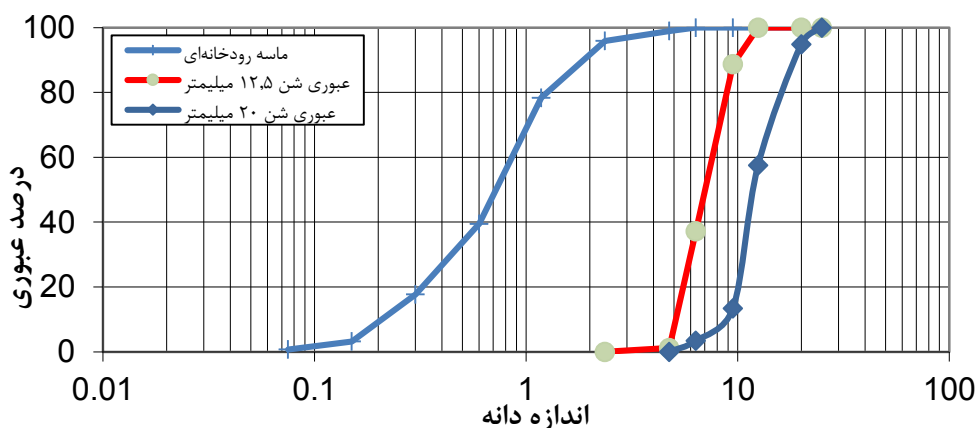
کیفیت و دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها تأثیر زیادی بر مشخصات رفتار شناسی بتن تازه و مشخصات مکانیکی بتن سخت شده دارد. همچنین دانه‌بندی ماسه نسبت به دانه‌بندی شن، بر مشخصات رفتاری بتن خود متراکم تأثیر بیشتری دارد. از سویی ممکن است دانه‌بندی شن و ماسه مناسب نباشد، ولی با ترکیب آنها یک نمودار مناسب دانه‌بندی شکل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

افزایش مساحت سطح سنگ‌دانه سبب افزایش طلب خمیر سیمانی جهت پوشش سطح ذرات، می‌گردد [۶]. تعیین نسبت سنگ‌دانه‌های بتن به پارامترهای متعددی و علی‌الخصوص، مشخصات هندسی آنها وابسته است، که از آنها می‌توان به ظاهر، زاویه‌داری، بافت، توزیع اندازه ذرات و نوع تراکم اشاره نمود. موارد ذکر شده به طور کلی در پارامتری با عنوان فاکتور تراکم (Packing Density) خلاصه شده است [۷]. فاکتور تراکم شاخصی است که نشان دهنده میزان فضای خالی است. سنگ‌دانه‌ها با فاکتور تراکم بالا دارای فضای خالی کمتری هستند که منجر به کمینه شدن خمیر سیمان جهت پر کردن فضای خالی می‌شود. جدای از فواید اقتصادی مصرف کمتر سیمان، تحقیقات نشان داده‌اند که فاکتور تراکم 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]. نتایج نشان می‌دهد که مخلوط‌های با فاکتور تراکم ماکزیمم دارای تخلخل و نفوذ حداقل و اسلامپ و مقاومت فشاری حداکثر است [۱۰ و ۱۱]. برای به دست آوردن فاکتور تراکم روش‌های متعددی وجود دارد، اما روش‌های محدودی قابلیت تعیین فاکتور تراکم و رفتار دقیق بتن را داراست. به طور کلی تغییرات هر چند اندک در این پارامتر ممکن است تأثیر به‌سزایی در رفتار رئولوژیکی بتن ایجاد نماید که در بتن خود متراکم نیز کاربرد دارد [۹].

**۲ - اهمیت تحقیق**

طرح اختلاط بتن خود متراکم، نوعی بهینه‌سازی 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 خود متراکم وجود دارد، اما داده‌های محدودی در رابطه با انتخاب و ترکیب مصالح سنگی با توجه به تأثیر به‌سزای آن در خصوصیات بتن خود متراکم موجود است [۱۲]. لذا در این مقاله به بررسی مقدار بهینه مصالح سنگی با توجه به مقدار فاکتور تراکم آنها پرداخته می‌شود. روشی که ارائه می‌شود، صرف نظر از دانه بندی، ظاهر و اندازه سنگ‌دانه‌ها، می‌تواند با اطمینان کامل برای

تعیین بهینه ترکیب سنگدانه‌ها بدون هیچ پیش فرضی مورد استفاده واقع شود.



شکل ۱: نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی به کار رفته در آزمایش

و ارتفاع ۳۱۰ میلیمتر است. یک دریچه لولایی جهت خروج مصالح در پایین سطل نیز موجود است. ظرف استوانه‌ای دارای قطر ۲۷۰ میلیمتر و ظرفیت ۱۰ لیتر است (شکل ۲). پس از ترکیب این مصالح و ریختن آنها در ظرف بالای دستگاه، اقدام به باز نمودن دریچه پایین کرده تا مصالح سنگی به ظرف پایینی بریزد. با دانستن وزن هر کدام از سنگدانه‌ها که در سطل ترکیب شده‌اند، می‌توان میزان فضای خالی (Void Content) را بدست آورد و سپس با داشتن میزان فضای خالی به محاسبه فاکتور تراکم پرداخت. روابط مورد نیاز جهت محاسبه میزان فضای خالی به شرح زیر می باشد:

$$Void\ Content = \left( V_c - \left( \left( \frac{M_1}{S_1} \right) + \left( \frac{M_2}{S_2} \right) + \left( \frac{M_3}{S_3} \right) \right) \right) / V_c \quad (1)$$

در این رابطه  $V_c$  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 می باشد.

$$Packing\ Density = 1 - Void\ Content \quad (2)$$

فاکتور تراکم ۲۴ نوع ترکیب سنگدانه که در جدول ۱ نشان داده شده است، توسط روش آزمایشگاهی محاسبه گشته که بیشترین مقدار فاکتور تراکم برابر ۰/۶۸ و کمترین مقدار آن برابر ۰/۵۴ بدست آمده است.

در میان پارامترهایی که بر فاکتور تراکم تأثیر می گذارد، توزیع ذرات بر اساس اندازه آنهاست، که بسیار قابل توجه و پارامتری شناخته شده در علم مکانیک خاک بوده است که

### ۳- برنامه آزمایشگاهی

هدف از این مقاله بررسی تأثیر نحوه توزیع سنگدانه‌ها بر اساس اندازه ذرات آنها در ویژگی‌های بتن خود متراکم است. این ویژگی‌ها شامل خصوصیات تازه و سخت شده بتن خود متراکم بوده و توسط آزمایش‌های جریان اسلامپ، زمان رسیدن به قطر ۵۰ سانتیمتر (T50) و حلقه جی برای بتن تازه و آزمایش مقاومت فشاری برای بتن سخت شده مورد بررسی واقع می شود.

مصالح به کار رفته در این آزمایش‌ها شامل سیمان تیپ ۲، روان کننده با پایه پلی کربوکسیلاتی، خاکستر بادی، ماده قوام آور و آب آشامیدنی است. لازم به ذکر است که مقادیر بهینه فوق روان کننده و خاکستر بادی به صورت سعی و خطا در محیط آزمایشگاهی به دست آمده‌اند. در این مقاله از سه نوع مصالح سنگی (شن با ماکزیمم سایز سنگدانه ۲۰ میلیمتر، شن با ماکزیمم سایز سنگدانه ۱۲/۵ میلیمتر و ماسه رودخانه‌ای) استفاده شده است. شکل ۱، دانه بندی این مصالح سنگی را نمایش می دهد. شن به کار رفته در طرح‌ها از نوع معدنی خرد شده است.

فاکتور تراکم سنگدانه‌ها (Packing Density) توسط روش آزمایشگاهی با نام "روش استاندارد تعیین وزن مخصوص و حفرات سنگدانه‌ها" مطابق با ASTM C29M به صورت اصلاح شده به دست می آید [۱۳]. 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 می شود. سطل دارای قطر بالایی ۳۴۰ میلیمتر، قطر پایینی ۱۴۰ میلیمتر

شکل ۳ رابطه بین ضریب یکنواختی و فاکتور تراکم را نشان می‌دهد که بیانگر وابستگی این دو پارامتر به یکدیگر است. در توضیح این رابطه می‌توان گفت که با رسم نقاط و ترسیم بهترین خط تقریبی که تمامی نقاط را پوشش دهد، می‌توان به یک رابطه مستقیم بین فاکتور تراکم و ضریب یکنواختی رسید. بنابراین، هرچه ضریب یکنواختی افزایش پیدا می‌کند مقدار فاکتور تراکم نیز افزایش می‌یابد. علت آن توسعه رنج سنگ‌دانه‌ها با افزایش ضریب یکنواختی بوده که به تبع آن فاکتور تراکم بهبود می‌یابد. بنابراین توصیه می‌شود تا از این ارتباط جهت به دست آوردن فاکتور تراکم سنگ‌دانه‌ها استفاده شود. ضریب یکنواختی با تغییر نوع دانه‌بندی تغییر می‌کند.

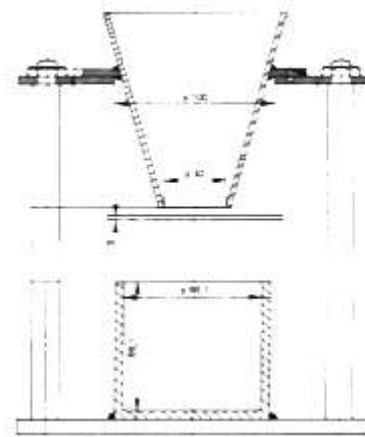
از آنجا که ضریب یکنواختی نمی‌تواند فقدان یا ناچیز بودن مقدار اندازه خاصی از دانه‌ها را در فاصله  $D_{10}$  و  $D_{60}$  دقیقاً مشخص کند، لذا از پارامتری دیگر با عنوان ضریب انحناء یا خمیدگی استفاده می‌شود که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (4)$$

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

مقدار  $C_c$  نشانه‌ای از شکل منحنی دانه بندی بین  $D_{60}$  و  $D_{10}$  است. هرچه  $C_c$  از واحد دور شود، نشانه آن است که اندازه‌های از دانه‌ها در فاصله بین  $D_{60}$  و  $D_{10}$  وجود ندارد (منحنی ناپیوسته است). شکل ۴ رابطه بین ضریب یکنواختی و ضریب انحناء را نشان می‌دهد که بیانگر ارتباط معکوس این دو پارامتر با یکدیگر است.

ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) نام دارد. این پارامتر جهت بیان توزیع ذرات بر اساس اندازه آنها انتخاب شده است و به بیان کیفیت توزیع دانه‌ها می‌پردازد.



شکل ۲: دستگاه آزمایش فاکتور تراکم

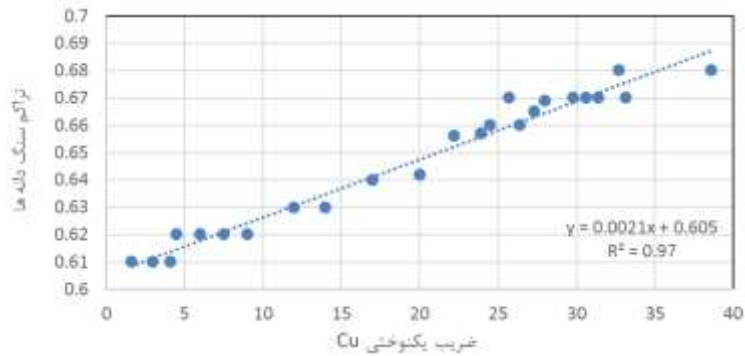
به عبارت دیگر  $C_u$  به بیان درجه یکنواختی و دانه‌بندی ذرات و سنگ‌دانه‌ها می‌پردازد. هرچه  $C_u$  بزرگتر باشد، نرخ توزیع سنگ‌دانه‌ها وسیع‌تر است. این مقدار توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

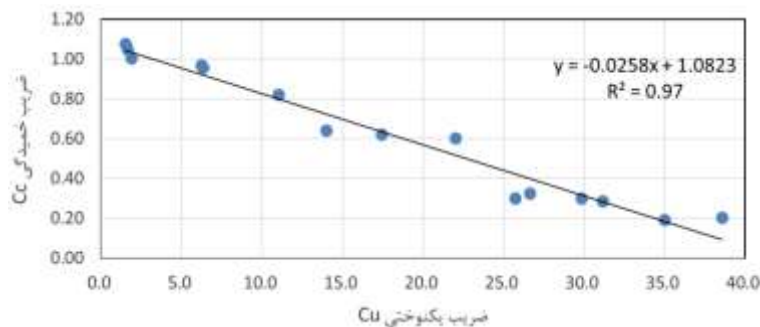
در این رابطه  $D_{60}$  اندازه الکی که ۶۰ درصد سنگ‌دانه‌ها از آن عبور کرده‌اند و  $D_{10}$  اندازه الکی که ۱۰ درصد سنگ‌دانه‌ها از آن عبور کرده‌اند، است. برای هر کدام از دانه‌بندی‌های به‌دست آمده، مقادیر  $D_{60}$  و  $D_{10}$  تعیین و سپس ضریب یکنواختی محاسبه می‌شود.

جدول ۱: ترکیب سنگ‌دانه‌ها با دانه بندی‌های متفاوت

شماره	درصد ماسه	درصد شن ۱۲/۵	درصد شن ۲۰	فاکتور تراکم	شماره	درصد ماسه	درصد شن ۱۲/۵	درصد شن ۲۰	فاکتور تراکم
۱	۱۰۰	۰	۰	۰/۶۱	۱۳	۴۵	۱۰	۴۵	۰/۶۸
۲	۷۰	۰	۳۰	۰/۶۷	۱۴	۴۰	۴۰	۲۰	۰/۶۵
۳	۳۰	۰	۷۰	۰/۶۷	۱۵	۴۰	۳۰	۳۰	۰/۶۶
۴	۰	۰	۱۰۰	۰/۵۴	۱۶	۴۰	۲۰	۴۰	۰/۶۸
۵	۰	۳۰	۷۰	۰/۵۵	۱۷	۳۰	۴۰	۳۰	۰/۶۴
۶	۰	۷۰	۳۰	۰/۵۸	۱۸	۳۰	۳۰	۴۰	۰/۶۷
۷	۰	۱۰۰	۰	۰/۵۲	۱۹	۲۰	۶۰	۲۰	۰/۶۱
۸	۳۰	۷۰	۰	۰/۶۳	۲۰	۲۰	۴۰	۴۰	۰/۶۲
۹	۷۰	۳۰	۰	۰/۶۵	۲۱	۲۰	۲۰	۶۰	۰/۶۲
۱۰	۸۰	۱۰	۱۰	۰/۶۵	۲۲	۱۰	۸۰	۱۰	۰/۵۶
۱۱	۶۰	۲۰	۲۰	۰/۶۸	۲۳	۱۰	۴۵	۴۵	۰/۵۶
۱۲	۴۵	۴۵	۱۰	۰/۶۷	۲۴	۱۰	۱۰	۸۰	۰/۶۱



شکل ۳: رابطه بین ضریب یکنواختی و فاکتور تراکم سنگ‌دانه‌ها



شکل ۴: رابطه بین ضریب یکنواختی و ضریب انحناء

مابقی خمیر سیمانی به روغن کاری سطح سنگ‌دانه‌ها می‌پردازد. از این‌رو به جای محاسبه فاکتور تراکم که فرآیندی وقت گیر و سخت به حساب می‌آید، می‌توان به محاسبه ضریب یکنواختی پرداخت و بزرگترین مقادیر آن را به عنوان معیاری برای انتخاب سنگ‌دانه با بیشترین فاکتور تراکم در نظر گرفت. همچنین ضریب انحناء می‌تواند در انتخاب دانه‌بندی با منحنی یک‌نواخت استفاده شود، که تأثیر به‌سزایی در خواص رئولوژیکی بتن خود متراکم می‌گذارد.

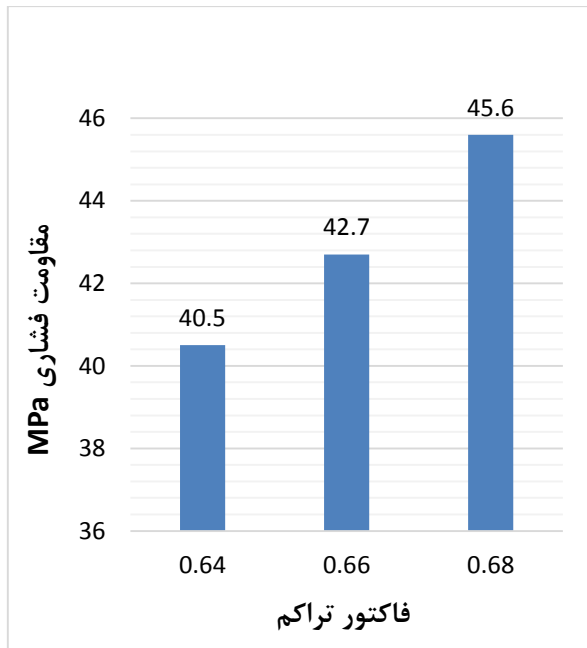
#### ۴- تأثیر فاکتور تراکم بر خصوصیات تازه بتن خود متراکم

در بخش‌های قبلی، روش‌های تجربی و آزمایشگاهی تعیین فاکتور تراکم سنگ‌دانه‌ها ارائه شد، در این بخش به بررسی تأثیر فاکتور تراکم بر رفتار بتن به ویژه خواص تازه بتن خود متراکم پرداخته می‌شود. همان‌طور که مطرح شد هر چه فاکتور تراکم بیشتر باشد، فضای خالی کمتری وجود داشته و به دنبال آن خمیر سیمانی بیشتری برای افزایش قابلیت روانی باقی می‌ماند. بنابراین از بین سنگ‌دانه‌ها با

در اینجا نیز بین نقاط ترسیم شده، بهترین خط تقریبی ترسیم شده است و همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود مقدار  $R^2$  برابر ۰.۹۷ بوده که حاکی از تقریب بسیار مناسب است. بنابراین، هر چه ضریب یکنواختی افزایش می‌یابد از مقدار ضریب انحناء کاسته می‌شود. علت این موضوع انتقال منحنی دانه‌بندی به سمت ریزدانه بوده است 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.

میزان فضای خالی نمایانگر حداقل خمیر سیمان لازم جهت پر کردن حجم خالی بتن است. 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 فاکتور تراکم بیشتر باشد به همان نسبت فضای خالی کمتری وجود خواهد داشت. پس خمیر سیمانی کمتری برای پر کردن فضای خالی نیاز بود، به همین دلیل

مرتبط دانست. همچنین با افزایش فاکتور تراکم مقدار فضای خالی کم شده، بنابراین اضافه خمیر سیمانی باعث تراکم بهتر سنگدانه‌ها شده و در نتیجه مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. پس می‌توان نتیجه گرفت که فاکتور تراکم تأثیر قابل توجهی روی مقاومت فشاری دارد.



شکل ۵: تأثیر تراکم انباشتگی بر مقاومت فشاری

## ۶- بررسی تأثیر سنگدانه با انواع دانه‌بندی دارای

### فاکتور تراکم یکسان روی خواص بتن خود متراکم

از نتایج دو بخش قبلی استنتاج می‌شود، که فاکتور تراکم تأثیر به سزایی روی خواص تازه و سخت شده بتن خود متراکم دارد. در هر حال برای یک ارزیابی دقیق روی خواص بتن خود متراکم، توصیه می‌شود تا روی پارامترهای دیگر، غیر از فاکتور تراکم نیز مطالعه شود. از آنجا که ممکن است برای دانه‌بندی‌های مختلف، مقدار فاکتور تراکم یکسانی بدست آید، بنابراین هیچ تضمینی وجود ندارد تا هر نوع دانه‌بندی با فاکتور تراکم بالا، خواص مشابه بتن خود متراکم را نتیجه دهد. از این‌رو این بخش به بررسی سنگدانه با انواع دانه‌بندی که دارای فاکتور تراکم یکسان هستند، می‌پردازد.

تعداد ۱۰ نوع مختلف از دانه‌بندی سنگدانه‌ها با فاکتور تراکم برابر ۰/۶۸ انتخاب گردید. جزئیات نسبت سنگدانه‌ها در جدول ۳ مشاهده می‌شود. در اینجا نیز مقدار و عیار خمیر سیمانی ثابت نگاه داشته شده است.

فاکتور تراکم‌های مختلف، سه مقدار ۰/۶۸، ۰/۶۶ و ۰/۶۴ که بیشترین مقادیر به دست آمده برای فاکتور تراکم می‌باشند، برای بررسی انتخاب شدند. برای ساخت بتن خود متراکم، مقدار حداقل ۴۰ درصد سنگدانه ریز لازم است [۲۳]؛ علاوه بر آن، این مقدار برای کمینه کردن میزان نیاز به خمیر سیمانی ضروری است. بنابراین مقدار ریزدانه ثابت و برابر ۴۰ درصد نگاه داشته شد و تنها مقادیر درشت‌دانه با ماکزیمم قطر سنگدانه ۱۲/۵ و ۲۰ میلی‌متر با نسبت‌های ۱۰ الی ۵۰ درصد تغییر می‌کند. ترکیب و حجم خمیر سیمانی برای تمامی مخلوط‌ها ثابت نگاه داشته شد. بدین ترتیب، هرگونه خصوصیات تازه بتن خود متراکم ناشی از تغییر فاکتور تراکم است. جزئیات طرح اختلاط و نتایج آزمایش‌های بتن تازه نظیر جریان اسلامپ،  $T_{50}$ ، و حلقه جی در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نتایج مشاهده می‌شود که با افزایش فاکتور تراکم از ۰/۶۴ به ۰/۶۸، جریان اسلامپ از ۴۲۰ میلی‌متر به ۶۱۵ میلی‌متر افزایش می‌یابد. دلیل این افزایش همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این است که با افزایش فاکتور تراکم از فضای خالی کم شده، پس خمیر سیمانی کمتری جهت پر کردن خلل و فرج نیاز است. لذا مابقی خمیر سیمانی موجود باعث افزایش جریان اسلامپ می‌شود. قابلیت عبور بتن نیز توسط آزمایش حلقه جی کنترل می‌شود که نتایج حاکی از آن است که وقتی فاکتور تراکم افزایش می‌یابد، سنگدانه‌ها به راحتی از بین آرماتورها عبور می‌کنند (افزایش از ۳۸۰ به ۶۰۰ میلی‌متر). این نتایج به طرز چشم‌گیری وابسته بودن خصوصیات تازه بتن خود متراکم به فاکتور تراکم سنگدانه‌ها را نشان می‌دهد.

## ۵- تأثیر فاکتور تراکم بر خصوصیات سخت شده بتن

### خود متراکم

در این قسمت نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵ سانتیمتر، در سن ۲۸ روزه برای سه فاکتور تراکم با خمیر سیمانی ثابت تهیه شده‌اند، بنابراین هرگونه تغییر در مقاومت فشاری معرف تأثیر مستقیم فاکتور تراکم سنگدانه‌هاست. از نتایج شکل ۵ مشاهده می‌شود که وقتی فاکتور تراکم از ۰/۶۴ به ۰/۶۸ تغییر می‌کند، مقاومت فشاری از ۴۰/۵ مگاپاسکال به ۴۵/۶ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان با افزایش قفل و بست شدن سنگدانه‌ها با افزایش فاکتور تراکم

روش تجربی جهت رسیدن به یک دانه بندی ...

حالت خمیر سیمانی کافی نیست و جریان اسلامپ کاهش می‌یابد. از سوی دیگر نمونه‌های با درشت‌دانه بیشتر سبب وقوع پدیده جداشدگی و انسداد می‌شود. شکل ۶ تغییر جریان اسلامپ به دلیل تغییر در نسبت سنگ‌دانه‌ها با فاکتور تراکم یکسان را نشان می‌دهد. آزمایش T50 و حلقه جی نیز نتایج مشابه را به دست می‌دهد. با افزایش مقدار ریزدانه میزان طلب خمیر سیمانی افزایش یافته که منجر به افزایش چسبندگی مخلوط و به دنبال آن افزایش تنش تسلیم آن می‌شود. مطابق جدول ۴، مقدار T50 از ۱/۵ ثانیه به ۵/۲ ثانیه افزایش یافت و جریان اسلامپ در حلقه جی از ۷۱۰ میلیمتر به ۳۸۰ میلیمتر کاهش یافت. تفاوت بین آزمایش جریان اسلامپ با حلقه جی و بدون آن حاکی از احتمال وقوع پدیده انسداد است که به علت عدم وجود خمیر سیمانی کافی برای ایجاد قابلیت جریان است.

با بررسی نتایج، مشاهده می‌شود که فاکتور تراکم نقش کلیدی را در ارتقاء خواص بتن خود متراکم داراست. به هر حال نتایج به دست آمده در این بخش نشان می‌دهد که انتخاب بالاترین میزان فاکتور تراکم نباید به تنهایی مورد توجه واقع شود و نسبت سنگ‌دانه‌ها نیز باید مد نظر قرار بگیرد.

جدول ۳: ترکیب سنگدانه‌های مختلف با فاکتور تراکم برابر

۰/۶۸

شماره طرح	درصد حجمی ماسه رودخانه‌ای	درصد حجمی شن ۱۲/۵ میلیمتر	درصد حجمی شن ۲۰ میلیمتر
۱	۴۰	۱۰	۵۰
۲	۴۵	۱۰	۴۵
۳	۴۵	۱۵	۴۰
۴	۵۰	۱۰	۴۰
۵	۵۰	۲۰	۳۰
۶	۵۵	۵	۴۰
۷	۵۵	۱۵	۳۰
۸	۶۰	۱۰	۳۰
۹	۶۰	۲۰	۲۰
۱۰	۶۵	۵	۳۰

نتایجی که در جدول ۴ گردآوری شده است، نشان می‌دهد که با تغییر نوع دانه‌بندی، تغییر قابل ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری دیده نمی‌شود (تغییرات بین ۴۳/۶ الی ۴۴/۹ مگاپاسکال می‌باشد)، اما تأثیر قابل توجهی در جریان اسلامپ مشاهده می‌شود، به طوری که این مقدار از ۷۲۰ میلیمتر به ۴۴۵ میلیمتر تغییر می‌کند. نوسانات حاصله ممکن است به علت افزایش مقدار ریزدانه و به تبع آن افزایش سطح مخصوص ذرات باشد که منجر به طلب خمیر سیمانی بیشتر جهت خیس کردن سطح دانه‌هاست. در این

جدول ۲: طرح اختلاط و نتایج آزمایش‌های تازه بتن خود متراکم با فاکتور تراکم‌های مختلف

فاکتور تراکم	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	خاکستر بادی (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه رودخانه‌ای (kg/m <sup>3</sup> )	شن ۱۲/۵ میلیمتر (kg/m <sup>3</sup> )	شن ۲۰ میلیمتر (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (%)	قوام‌آور (%)	جریان اسلامپ (mm)	T50 (mm)	حلقه جی (mm)
۰/۶۴	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۶۳۰	۸۶۰	۱۷۰	۰/۱۶	۰/۱۱	۴۲۰	-	۳۸۰
۰/۶۶	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۶۳۰	۵۱۵	۵۱۰	۰/۱۶	۰/۱۱	۵۰۰	۹/۷۲	۴۶۵
۰/۶۸	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۶۳۰	۱۷۰	۸۵۰	۰/۱۶	۰/۱۱	۶۱۵	۳/۸۴	۶۰۰

جدول ۴: طرح اختلاط و نتایج آزمایش‌های تازه بتن خود متراکم برای ترکیب سنگ‌دانه‌های مختلف با فاکتور تراکم یکسان

شماره طرح	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	خاکستر بادی (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه رودخانه‌ای (kg/m <sup>3</sup> )	شن ۱۲/۵ میلیمتر (kg/m <sup>3</sup> )	شن ۲۰ میلیمتر (kg/m <sup>3</sup> )	فوق روان کننده (%)	جریان اسلامپ (mm)	T50 (mm)	حلقه جی (mm)	مقاومت فشاری (MPa)
۱	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۶۳۰	۱۷۰	۸۵۰	۰/۱۶	۷۲۰	۱/۵	۷۱۰	۴۴/۹
۲	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۷۱۰	۱۷۰	۷۶۵	۰/۱۶	۶۹۰	۲/۲	۶۷۰	۴۴/۷
۳	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۷۱۰	۲۵۵	۶۸۰	۰/۱۶	۷۰۰	۲/۰۶	۶۷۰	۴۴/۳
۴	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۷۸۵	۱۷۰	۶۸۰	۰/۱۶	۶۶۰	۳/۱۲	۶۳۵	۴۳/۶
۵	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۷۸۵	۳۴۵	۵۱۰	۰/۱۶	۶۳۵	۳/۰۴	۶۱۵	۴۴/۸
۶	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۸۶۵	۸۵	۶۸۰	۰/۱۶	۵۷۰	۴	۵۲۰	۴۴/۶
۷	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۸۶۵	۲۵۵	۵۱۰	۰/۱۶	۵۵۵	۵	۵۰۵	۴۴/۲
۸	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۹۴۵	۱۷۰	۵۱۰	۰/۱۶	۵۳۰	۵/۲	۴۹۵	۴۳/۹
۹	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۹۴۵	۳۴۵	۳۴۰	۰/۱۶	۴۸۰	-	۴۱۵	۴۴/۲
۱۰	۳۵۰	۱۵۰	۱۸۵	۱۰۲۰	۸۵	۵۱۰	۰/۱۶	۴۴۵	-	۳۸۰	۴۳/۸



شکل ۶: نمونه سمت راست جریان اسلامپ با خمیر کافی و نمونه سمت چپ جریان اسلامپ با خمیر ناکافی

## ۷- نتیجه گیری

مقدار خمیر سیمانی ثابت با تغییر مقدار فاکتور تراکم از ۰/۶۴ به ۰/۶۸، بر افزایش جریان اسلامپ از ۴۲۰ به ۶۱۵ میلیمتر، حلقه چپ از ۳۸۰ به ۶۰۰ میلیمتر و مقاومت فشاری از ۴۰/۵ به ۴۵/۶ مگاپاسکال دلالت می‌کند. همچنین ۱۰ ترکیب دانه‌بندی با فاکتور تراکم یکسان (۰/۶۸) انتخاب شد و نتیجه حاصله حاکی از آن است که ترکیب و نسبت سنگ‌دانه‌ها عامل مهمی بود و تأثیر بسزایی روی خواص تازه بتن خود متراکم می‌گذارد. چنانچه مقدار ریزدانه زیاد شود، با ثابت نگاه داشتن خمیر سیمانی، از کارایی بتن کاسته می‌شود و نیز اگر مقدار درشت‌دانه زیاد شود، سبب وقوع انسداد و جداسازی می‌شود. دانه‌بندی ماسه نسبت به دانه‌بندی شن بر مشخصات رفتار شناسی بتن خود متراکم تأثیر بیشتری دارد؛ زیرا افزایش میزان ریزدانه در دانه‌بندی سبب افزایش سطح مخصوص دانه‌ها شده و به دنبال آن به خمیر سیمانی بیشتری جهت خیس کردن دانه‌ها نیاز است. حجم سنگ‌دانه و اندازه درشت‌دانه باید به نحوی انتخاب شود، که میان ملزومات مورد نیاز بتن تازه و بتن سخت شده تعادل برقرار کند. در حالت کلی، می‌بایست ضمن انتخاب بالاترین مقدار ضریب یک‌نواختی برای مصالح سنگی، به ترکیب سنگ‌دانه‌ها و نسبت ریزدانه به درشت‌دانه جهت رسیدن به خواص مطلوب بتن خود متراکم نیز توجه داشت.

خاصیت اصلی تأثیر گذار بر عملکرد خواص تازه بتن خود متراکم در هنگام بتن ریزی و در حین متراکم شدن همان رفتار رئولوژی آن است، که با استفاده از مصالح مرغوب و یک دانه‌بندی مناسب می‌توان این رفتار را که شامل لزجت مناسب و تنش تسلیم پایین است، برآورده کرد.

در این تحقیق فاکتور تراکم سنگ‌دانه‌ها توسط سیستمی کیفی شکل مورد محاسبه واقع شد. رابطه‌ای ساده بین فاکتور تراکم و ضریب یک‌نواختی  $C_u$  و ضریب انحناء  $C_c$  به دست آمد و بیانگر این بود که ضریب یک‌نواختی می‌تواند به عنوان پارامتری ارزشمند و قابل اعتماد جهت بدست آوردن ترکیب بهینه سنگ‌دانه‌ها به جای روش قدیمی تئوری منحنی دانه‌بندی ایده‌آل، مورد استفاده واقع شود. مقدار عددی  $C_u$  ممکن است برای سنگ‌دانه‌های مختلف تغییر کند، اما برای مصالح سنگی به دست آمده از یک منبع قرضه، بیشترین مقدار فاکتور تراکم مربوط به سنگ‌دانه‌هایی است که دارای بیشترین مقدار عددی  $C_u$  باشند. همچنین ترکیب سنگ‌دانه‌هایی که ضریب انحناء آنها از ۱ فاصله بگیرد دچار ناپیوستگی در دانه‌بندی است، که روی خواص بتن خود متراکم تأثیر می‌گذارد. از آنجا که دو ضریب  $C_u$  و  $C_c$  به نحوه توزیع ذرات و کیفیت دانه‌بندی سنگ‌دانه‌ها وابسته است، لذا در انتخاب نسبت‌های طرح اختلاط می‌توان از این دو پارامتر استفاده مؤثر نمود.

تحقیقات جهت ارزیابی تأثیر فاکتور تراکم سنگ‌دانه‌ها روی خواص بتن خود متراکم ادامه یافت. سه فاکتور تراکم مختلف (۰/۶۸، ۰/۶۶ و ۰/۶۴) انتخاب شد. نتایج برای



*compacting concrete*”, Materials and Structures, 39, pp 683–693, 2006.

## مراجع

- [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), pp 435-443, 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] Standish, N. and Yu, A.B., “Porosity calculations of ternary mixtures of particles”, Powder Technology, 49(3), pp. 249-253, 1987.
- [11] Ridgway, K. and Tarbuck, K.J. “Particulate mixture bulk densities”, Chemical Engineering and Processing, 49, pp 103–105, 1968.
- [12] Nanthagopalan, P. and Santhanam, M., “An empirical approach for the optimization of aggregate combinations for self-compacting concrete”, Materials and Structures, 45, pp 1167–1179, 2012.
- [13] ASTM C 29/C29M-09 Standard test method for bulk density (Unit Weight) and voids in aggregate. American Society for Testing and Materials Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, 4.02, pp 1-5, 2009.
- [1] Mohammed Sonebi, “Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans”, Cement and concrete research, 34, pp 1199, 2004.
- [2] Hajime Okamura and Masahiro Ouchi, “Self-Compacting Concrete”, Journal of Advanced Concrete Technology, 1 (1), pp 5-15, 2003.
- [3] Domone P.L. and Jin, J., “Properties of mortar for self-compacting concrete”, In: Proceedings 1st international RILEM symposium on self-compacting concrete, pp 109–120, 1999.
- [4] شکرچی زاده، محمد؛ لیبر، نیکلاس علی؛ خوش نظر، راحیل؛ پورضرابی، علی؛ اعتمادرضایی، امیرمهدی؛ مرتضوی مهریزی، سید وحید؛ "بررسی تأثیر حداکثر اندازه سنگدانه بر خواص رفتاری ملات تازه خودتراکم". کنگره ملی بتن خودتراکم، مرکز بین المللی علوم و تکنولوژی، ۱۳۹۰.
- [5] شکرچی زاده، محمد؛ لیبر، نیکلاس علی؛ ماهوتیان، مهرداد؛ مهدی پور، ایمان؛ وحدانی، محمد؛ "تأثیر دانه بندی سنگدانه بر خواص بتن خودتراکم تازه وسخت شده"، کارگاه تخصصی بتن خودتراکم، دوره اول، تهران-دانشگاه تهران، 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-

