روش طرح اختلاط بتن خود متراکم بر اساس حداقل حجم خمیر سیمان

پرویز قدوسی[۱]؛ آرمین منیرعباسی[۲]

چکیده

کاهش حجم خمیر سیمان در بتن خود متراکم علاوه بر کاهش هزینه ساخت، در بهبود بسیاری از خواص دوامی آن نیز نقش بسزایی دارد. در این مقاله روش جدید طراحی مخلوط بتن خود متراکم ارائه شده است که علاوه بر کاهش حجم خمیر سیمان لازم نسبت به سایر روشها و پیرو آن کاهش هزینه ساخت، به دلیل ایجاد روند اصلاح سیستماتیک مخلوط، زمان دستیابی به مخلوط مطلوب را کاهش می‌دهد. نتایج این تحقیق نشان داد که حداقل حجم خمیر سیمان لازم در بتن خود متراکم، به مقدار زیادی وابسته به دانه بندی سنگدانه‌ها و همچنین ترکیب خمیر سیمان است. همچنین در بتن خود متراکم ممکن است کمترین حجم خمیر سیمان لازم در ترکیبی از سنگدانه‌ها استفاده شود که بیشترین جرم حجمی انباشته را نداشته است.

کلمات کلیدی

بتن خود متراکم، روش طرح اختلاط

Mixture Design Method of Self-Consolidating Concrete Based on Minimum Cement Paste Volume

P.Ghoddousi; A. Monir Abbasi

ABSTRACT

Minimizing of cement paste volume not only decreases the cost of construction but also improves many of attributions regarding durability in self-consolidating concrete. In this paper, a mixture design method of Self-Consolidating Concrete based on minimum cement paste volume is proposed that descends cost of construction, more over because of creating a systematic modification process, achieving desired mixture is accelerated. It's understood from the results that amount of minimum required cement paste in self-consolidating concrete is dependable on aggregate size distribution and composition of cement paste, more over in self-consolidating concrete, it is probable that minimum amount of required cement paste is needed in aggregate composition that haven't maximum packing density.

KEYWORDS

Self-Consolidating Concrete, Mixture Design Method

[۱] عضو هیات علمی دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران : Email:Ghoddousi @ iust.ac.ir

[۲] دانشجوی دکتری مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران : Email:MonirAbbasi@iust.ac.ir

۱- مقدمه

در سالهای اخیر، روشهای طرح اختلاط بتن علاوه بر مقاومت فشاری، کاهش حجم خمیر سیمان را نیز به دلیل تاثیرات مثبت آن در دوام و هزینه تولید بتن بعنوان اهداف اصلی منظور نموده اند[۱].

Okamura[۲]روش طراحی مخلوط بتن خود متراکم را پیشنهاد داده است. ایده اصلی وی، آزمایش روی خمیر و ملات جهت بررسی خواص متراکم‌کنندگی فوق روان کننده سیمان، ماسه و مصالح پوزولانی است. پس از این مرحله مخلوطهای آزمایشی بتن خود متراکم تهیه می‌شود. در این روش در صورت استفاده نکردن از مواد پودری به غیر از سیمان، امکان کاربرد نسبت آب به سیمان بیش از ۰/۳ وجود ندارد. در این حالت به طور متوسط، مقدار خمیر سیمان پیشنهادی برابر ٤٥٠ لیتر در یک متر مکعب بتن می‌باشد.

Su و همکاران[۳]یک روش ساده طرح اختلاط بتن خود متراکم را پیشنهاد داده اند. در این روش ابتدا مقادیر سنگدانه های ریز و درشت مشخص می‌شود سپس میزان خمیر سیمان لازم جهت پر کردن خلل و فرج باقیمانده و ایجاد خواص مطلوب بتن تازه محاسبه می‌شود. در این روش مقدار متوسط خمیر سیمان پیشنهادی برابر ۳۸۰ لیتر در یک متر مکعب بتن بوده است.

Hwang و Hung[۱]روشی برای طراحی مخلوط بتن خود متراکم پیشنهاد داده است. در این روش ابتدا ترکیبات مختلف سنگدانه های ریز و درشت جهت دستیابی به متراکم ترین حالت تهیه و مطابق ASTM C۲۹ متراکم می‌شود. پس از تعیین متراکم ترین ترکیب سنگدانه‌ها، حجم خمیر سیمان لازم جهت پر کردن خلل و فرج و ایجاد خواص مطلوب بتن تازه محاسبه می شود. در این روش میانگین حجم خمیر سیمان پیشنهادی برابر ۳٦۰ لیتر در یک متر مکعب بتن می‌باشد.

Collepardi و Valente [٤]مطالعه ای در خصوص ساخت و تهیه طرح اختلاط بتن خود متراکم با دوام، بدون جمع شدگی و با قابلیت ایجاد رنگهای مختلف انجام داده اند. در این روش مقدار خمیر سیمان پیشنهادی برابر ۳۹٤ لیتر در یک متر مکعب بتن بوده است.

Bui & Montgomery[٥]روشی را به منظور تعیین نسبت‌های اجزاء بتن خود متراکم با حداقل حجم خمیر سیمان پیشنهاد داده‌اند. در این روش ابتدا مقدار حداقل خمیر سیمان لازم در بتن خود متراکم از نسبت‌های مختلف اختلاط تعیین می‌شود. سپس نمودار حداقل حجم خمیر سیمان لازم در بتن خود متراکم بر مبنای درصد شن به کل سنگدانه رسم می‌شود. در مرحله بعد برای تعیین نسبت اجزای مختلف بتن خود متراکم مطلوب، این نمودارها به عنوان راهنما استفاده می‌شود. بر اساس این روش، همواره در یک درصد مشخص شن به کل سنگدانه، مقدار خمیر سیمان لازم جهت دستیابی به یک بتن خود متراکم حداقل است. در این مقاله، نسبت بهینه شن به کل سنگدانه برابر ۵۰ درصد است. همچنین بر اساس این روش در صورتیکه درصد شن به کل سنگدانه از مقدار بهینه آن بیشتر و یا کمتر شود، مقدار حداقل حجم خمیر سیمان لازم جهت دستیابی به بتن خود متراکم افزایش می‌یابد.

Sonebi [۶] مطالعه ای در خصوص ساخت بتن خود متراکم با مقاومت متوسط انجام داده است. در این تحقیق، بتن خود متراکم با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ ساخته شده است. مقادیر سیمان و خاکستر بادی در این مطالعه به ترتیب برابر ۲۹۰ و ۲۲۰ کیلوگرم و حجم خمیر سیمان نیز در این مخلوط برابر ۴۲۰ لیتر بوده است.

Lachemi [۷] مطالعه ای در خصوص ایجاد بتن خود متراکم کم هزینه با استفاده از خاکستر بادی و سرباره انجام داده است. در این تحقیق مشخص گردید امکان ساخت این نوع بتن با جایگزینی ۵۰٪ سیمان با خاکستر بادی و یا ۶۰٪ آن با سرباره وجود دارد. در این حالت حجم خمیر سیمان به ترتیب برابر ۳۲۰ و ۳۰۵ لیتر می‌باشد.

مقاله حاضر روش طرح اختلاطی را ارائه می‌دهد که با استفاده از آن، علاوه بر اینکه از تعداد مخلوطهای آزمایشی لازم جهت دستیابی به مخلوط نهایی کاسته می‌شود، به علت استفاده حجم حداقل خمیر سیمان لازم، مخلوط حاصل از نظر اقتصادی و برخی خواص دوامی نیز خصوصیات بهتری نسبت به مخلوطهای حاصل از سایر روشهای طرح اختلاط بتن خود متراکم دارد.

۲- اهمیت تحقیق

ساخت بتن خود متراکم اغلب مشکل است ضمن اینکه زمان و هزینه زیادی نیز صرف این کار می‌شود. برخلاف این، بیشتر مخلوط حاصل از نظر مصرف خمیر سیمان بهینه نمی‌باشد. از طرفی افزایش حجم خمیر سیمان باعث افزایش جمع شدگی‌های بتن در سنین کم و در سنین بالا می‌شود. به همین دلیل ارائه یک روش طرح اختلاط که بتواند علاوه بر کاهش زمان و هزینه تهیه طرح، مقدار مصرف خمیر سیمان را کاهش داده و پیرو آن هزینه ساخت بتن کاهش یافته و دوام آن نیز افزایش یابد، بسیار مهم و حیاتی می‌باشد.

۳- برنامه آزمایشگاهي

۳-۱- مصالح مصرفي

- **سنگدانه‌های درشت**

سنگدانه‌های درشت مصرفی از نوع شکسته و با حداکثر اندازه ۲۰ میلیمتر و دانه‌بندی آن مطابق شکل (۱) بوده است.

- **سنگدانه‌های ریز**

سنگدانه‌های ریز مصرفی از نوع طبیعی و به صورت دو قرضه با دانه‌بندی‌های متفاوت بوده است. این دانه‌بندی در شکل (۲) نشان داده شده است. مدول نرمی ماسه یک و دو به ترتیب برابر ۳،۱ و ۲،۹ بوده است.

- **سیمان و افزودنی های معدنی**

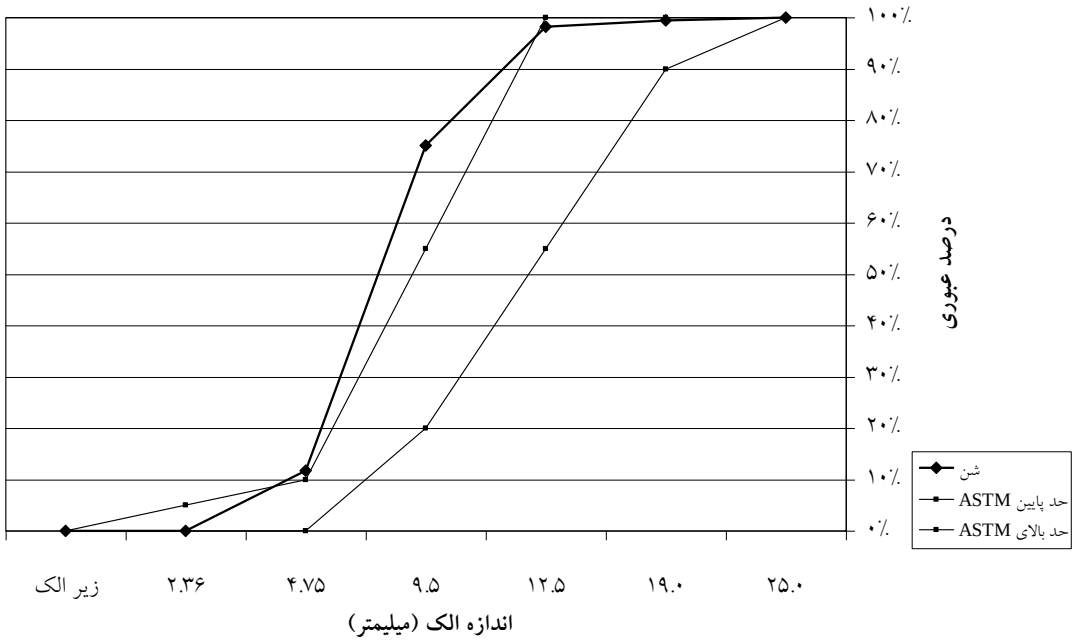
مشخصات سیمان و افزودنی های معدنی مصرفی در جدول (۱) ارائه شده است.

- **فوق روان کننده**

فوق روان کننده مورد استفاده بر پایه پلی کربوکسیلاتی و تولید کارخانجات داخل کشور بوده است.

- **اصلاح کننده لزجت**

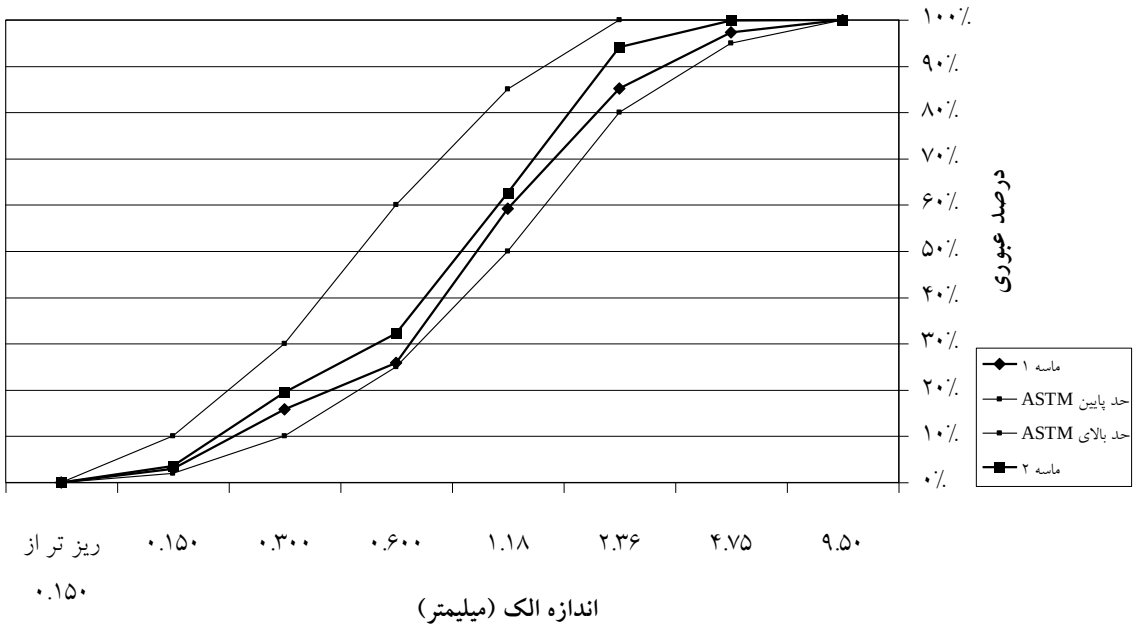
ماده اصلاح کننده لزجت که جهت ساخت مخلوطها استفاده شده نیز از کارخانجات داخل کشور تامین شده است. این ماده از هیدراتهای کربن فرآوری شده تهیه شده است.



شکل (۱) : منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های درشت

جدول (۱) : مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان و افزودنی های معدنی مصرفی

شرح	درصد وزنی عناصر									نرمی با آزمایش بلین (مترمربع در کیلوگرم)	جرم حجمی دانه ای (کیلوگرم بر متر مکعب)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	SO_3	C_3S	C_2S	C_3A		
سیمان ۴۲۵-۱	۲۱/۷۰	۴/۵۱	۳/۱۹	۳/۷۶	۶۲/۶۱	۱/۸۷	۴۹/۷۰	۲۴/۷۰	۶/۵۰	۲۹۲/۱	۳۱۵۰
میکروسیلیس	۹۴/۰	۱/۰	۰/۱	۰/۶	۱/۰	۱/۲	--	--	--	۲۴۶۲/۳	۲۲۰۰
خاکستر بادی	۵۱/۰	۳۰/۰	۳/۵	۱/۸	۷/۰	۰/۳	--	--	--	۳۲۱/۸	۲۰۸۰
پومیس	۶۴/۰	۱۸/۳	۳/۷	۱/۶	۴/۳	۰/۴	--	--	--	۳۱۲/۳	۲۶۲۰



شکل (۲) : منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های ریز

۳-۲- نسبت هاي اختلاط

در این مطالعه ۲۵ مخلوط بتنی ساخته شده است. مشخصات نسبت‌های اجزاء مخلوطهای مختلف درجدول (۲) ارائه شده است. گفتنی است که این مخلوطها با توجه به روش پیشنهادی این مقاله طراحی شده است.

۳-۳- روش ساخت مخلوط‌ها

برای ساخت مخلوط‌ها ابتدا شن و ماسه خشک به همراه یک سوم آب اختلاط در داخل مخلوط کن ریخته شده سپس مخلوط کن روشن شده است. بعد از آن سیمان و باقیمانده آب اختلاط و در پایان، افزودنی‌های فوق روان کننده و اصلاح کننده لزجت به مخلوط اضافه شده است. به منظور افزایش بازدهی فرایند اختلاط، در آغاز افزودنی‌های شیمیایی با مقداری از آب بتن مخلوط شده و سپس به مخلوط اضافه شده است. مخلوط حاصل پس از افزودن آخرین جزء به مدت سه دقیقه مخلوط شده و سپس به مدت سه دقیقه فرایند متوقف شده است. در آخر نیز مخلوط حاصل به مدت دو دقیقه دیگر مخلوط شده و بدین ترتیب بتن مورد نظر حاصل شده است.

در این مقاله روش خاصی جهت تعیین نسبت‌های اجزای مخلوط‌های بتن استفاده شده است که اینک به مراحل آن اشاره می‌گردد.

- **مراحل پنجگانه روش طرح اختلاط**

گام اول- تعیین نسبت سنگدانه‌های مختلف برای دستیابی به بیشترین جرم حجمی انباشته

برای تعیین این مقدار از تئوری دانسیته انباشته سنگدانه‌ها F.de Larrard [۸] استفاده شده است. در این باره، اشاره به دو نکته لازم است:

الف- با توجه به اینکه در بتن خود متراکم نسبت شن به کل سنگدانه نمی‌تواند بیش از ۵۵٪ باشد[۲]، این درصد به مقدار یاد شده محدود شده است.

ب- از آنجا که برای تامین خواص رئولوژی بتن خود متراکم خمیر سیمان بیشتری نسبت به بتن معمولی مورد نیاز است، ممکن است حداقل حجم خمیر سیمان لازم در ترکیبی از سنگدانه ها که حتی دارای حداکثر دانسیته انباشته سنگدانه ها نیست مورد نیاز باشد. به همین دلیل نقاط نزدیک به میزان بهینه نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

برای تعیین دانسیته انباشته متراکم از روابط (۱) و (۲) استفاده می‌گردد[۶]:

$$\gamma = \min(\gamma_i) \qquad (۱)$$

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{۱ - \sum_{j=۱}^{i-۱}[۱ - \beta_i + bij\beta_i(۱ - ۱/\beta_j)]yj - \sum_{j=i+۱}^{n}[۱ - a_{ij}\beta_i/\beta_j]yj} \qquad (۲)$$

β_i = نسبت جرم حجمی انباشته سنگدانه i به جرم حجمی دانه‌ای آن

bij = ضریب اثر دیوار

aij = ضریب اثر لق شدن

y_j = حجم سنگدانه j در ترکیب کل سنگدانه‌ها

لازم است مدل بر اساس آزمایشات کالیبره شده و ضرایب aij و bij تعیین شوند. در صورتی که این کار انجام نشود به عنوان پیشنهاد می‌توان از روابط (۳) و (٤) برای تعیین aij و bij استفاده نمود [٥]

$$a_{ij} = \sqrt{1-(1-dj/di)^{1.02}} \quad (۳)$$

$$b_{ij} = 1-(1-di/dj)^{1.50} \quad (٤)$$

که در آن di و dj به ترتیب قطر سنگدانه درشت و ریز می‌باشند.

گام دوم- تعیین قطر متوسط سنگدانه

در این پژوهش به منظور تعیین اثر دانه بندی سنگدانه ها در خواص حرکتی بتن، بجای استفاده از معیاری نظیر درصد شن به کل سنگدانه از شاخصی بنام قطر متوسط سنگدانه‌ها استفاده شده است. این معیارعبارت از قطر وزنی متوسط کلیه سنگدانه های استفاده شده در بتن می‌باشد. معیار یاد شده از رابطه (٥) محاسبه می‌شود.

$$D_{av} = \sum_{i=1}^{n} \frac{M_i(D_i + D_{i-1})}{2} \quad (٥)$$

که در آن M_i درصد وزنی مانده روی الک i ام و D_i و D_{i-1} به ترتیب اندازه چشمه الکی که M_i درصد سنگدانه‌ها روی آن باقی مانده و الک بالاتر از آن می‌باشد.

منحنی دانسیته انباشته ترکیبهای مختلف سنگدانه ها بر اساس قطر متوسط سنگدانه در شکل (۳) ارائه شده است.

گام سوم- تعیین نسبت آب به مواد سیمانی و مقادیر افزودنی‌ها

در این مرحله نسبت آب به مواد سیمانی بر اساس مقاومت مورد نظر و منحنی‌های ACI۲۱۱ تعیین می شود. در صورت استفاده از مواد پوزولانی معدنی، درصد مواد پوزولانی به مواد سیمانی نیز در این مرحله با توجه به مطالعات مشابه تعیین می‌شود. مقادیر افزودنی‌های فوق روان کننده و اصلاح کننده لزجت نیز با توجه به سفارش سازنده آن مشخص می‌گردد.

گام چهارم- ساخت مخلوط آزمایشی

در این مرحله حجم حداقل خمیر سیمان لازم بر اساس نوع افزودنی معدنی مصرفی از شکل (٤) مشخص می‌شود. حال با مشخص بودن نسبت هر یک از سنگدانه ها به کل آن، نسبت آب به مواد سیمانی، حجم خمیر سیمان لازم، حجم کل سنگدانه و به عبارتی مقدار هر یک از اجزای مخلوط محاسبه می‌شوند. پس از این مرحله مخلوط آزمایشی ساخته می‌شود. پس از طی فرایند اختلاط، خواص بتن تازه (قابلیت پر کردن، قابلیت عبور و پایداری) آزمایش می‌شود. در صورت برآورده نشدن خواص مطلوب بتن تازه، حجم خمیر سیمان مطابق راهنمایی دستورالعمل PCI [۹] اصلاح می‌شود. این کار تا دستیابی به مخلوط مناسب از نظر خواص بتن تازه ادامه می‌یابد.

گام پنجم- تعیین جرم حجمی بتن تازه

پس از رسیدن به مخلوط مطلوب، جرم حجمی بتن تازه تعیین و با مقادیر محاسباتی آن یکسان سازی می‌گردد.

۳-٤- عمل آوري نمونه‌ها

نمونه ها پس از ٢٤ ساعت قالب برداری شده و سپس تا سن ۲۸ روز در حوضچه عمل آوری قرار گرفته است.

۳-٥- شرح آزمایش‌ها

آزمایش‌های صورت گرفته شامل آزمایشهای بتن تازه و سخت شده می‌باشد.

در قسمت آزمایش بتن سخت شده مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه استوانه‌ای استاندارد مورد آزمایش قرار گرفته است.

در قسمت آزمایشهای بتن تازه، آزمایشهای جریان اسلامپ، زمان تخلیه قیف V و جعبه L مطابق دستورالعمل PCI [۹] انجام گرفته است.

٤- نتایج آزمایش و تفسیر نتایج

نتایج آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده روی مخلوطهای مختلف درجدول (۳) و شکل (٤) آمده است.

از شکل (٤) مشخص می‌شود که در اغلب موارد ($۳/٥mm \le D_{av} \le ٤/٦mm$) حجم خمیر سیمان لازم جهت دستیابی به بتن خود متراکم با جریان اسلامپ ٦٥٠ میلیمتر در بتن بدون افزودنی معدنی کمتر از ۳٥۰ لیتر می‌باشد. همچنین متوسط مقدار خمیر سیمان لازم در محدوده یاد شده برابر ۳۲٥ لیتر است. در حالی که در سایر روش‌های طرح اختلاط مقدار متوسط خمیر سیمان مصرفی بیش از ۳٦۰ لیتر در یک متر مکعب بتن بوده است. همچنین از شکل (٥) ملاحظه می شود هر چه قطر متوسط سنگدانه ها افزایش یابد، مقدار خمیر سیمان لازم، جهت افزایش روانی مخلوط بتن کاهش می‌یابد. به برای نمونه برای افزایش روانی مخلوط بتن از جریان اسلامپ ٦٥٠ میلیمتر به ۷٥۰ میلیمتر، خمیر سیمان مورد نیاز در قطر

متوسط سنگدانه برابر ۳/۳ mm و ٤/٦ mm به ترتیب معادل ٦٥ و ۲۱ لیتر می‌باشد.

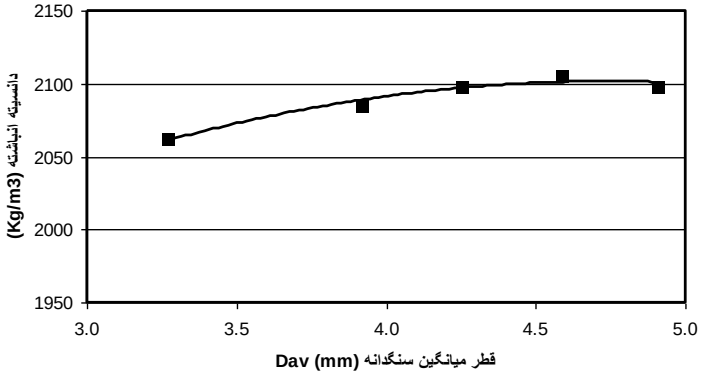
نکته دیگر اینکه کمترین حجم خمیر سیمان برای دستیابی به بتن خود متراکم در مخلوط‌هایی است که قطر متوسط سنگدانه آن به میزان ۳/۹ mm باشد.

همچنین از مقایسه شکل (۳) و شکل (٤) مشخص می‌شود برخلاف اینکه بیشترین جرم حجمی انباشته سنگدانه‌ها در این تحقیق، در قطر متوسط سنگدانه‌های ٤/٦ میلیمتر ایجاد شده است ولی خمیر سیمان مصرفی، در این ترکیبها نسبت به اغلب ترکیبهای دیگر بیشتر بوده است.

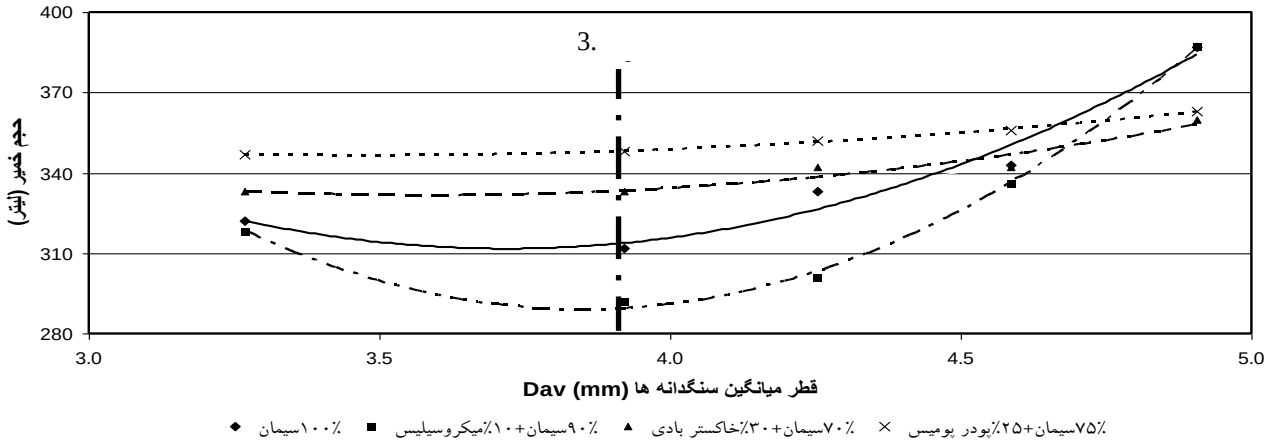
از شکل (٤) مشخص می‌شود که در قطرهای متوسط سنگدانه یکسان، حداقل حجم خمیر سیمان لازم جهت دستیابی به روانی ثابت، به مقدار زیادی وابسته به ترکیب خمیر سیمان است.

همچنین از این نمودار مشخص می‌شود که حساسیت ترکیبات مختلف پوزولانی خمیر سیمان، به تغییر قطر متوسط سنگدانه متفاوت است. برای نمونه حساسیت خمیر سیمان بدون پوزولان و یا حاوی میکروسیلیس به تغییر نسبتهای سنگدانه ریز و درشت بیش از خمیر سیمان حاوی خاکستر بادی و یا پودر پومیس می‌باشد.

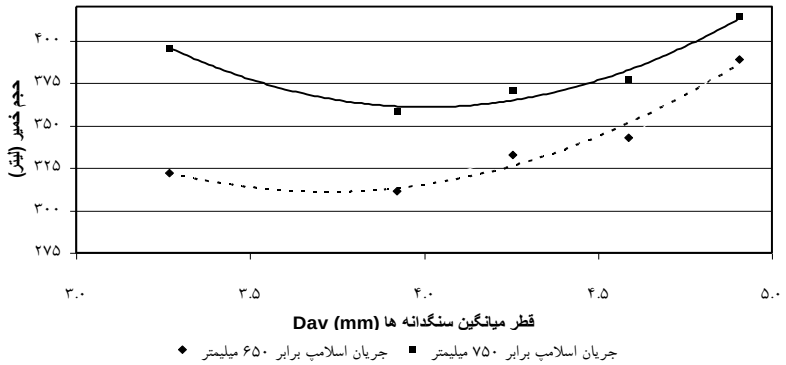
نتایج مقاومت فشاری و کششی نشان می‌دهد کاهش حجم خمیر سیمان در بتن خود متراکم، موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی شده است. این خاصیت در تمامی بتن‌های حاوی پوزولان و یا بدون آن به روشنی دیده می‌شود. به همین دلیل انتخاب مقادیر مناسب از سنگدانه های ریز و درشت چه از لحاظ مقاومت فشاری و کششی و چه از لحاظ خواص بتن تازه نقش مهمی در مقدار مصرف سیمان در بتن خود متراکم دارد.



شکل (۳) : دانسیته انباشته ترکیبهای مختلف سنگدانه



شکل (٤) : خمیر سیمان لازم در مخلوط‌های مختلف جهت دستیابی به بتن خود متراکم با جریان اسلامپ ٦٥٠ میلیمتر



شکل (۵) : حداقل حجم خمیر سیمان لازم در مخلوط‌های مختلف بدون افزودنی معدنی

جدول (۲) : نسبت‌های اجزای مخلوط‌های بتنی

معرف مخلوط	شن (کیلوگرم بر متر مکعب)	ماسه ۱ (کیلوگرم بر متر مکعب)	ماسه ۲ (کیلوگرم بر متر مکعب)	سیمان (کیلوگرم بر متر مکعب)	میکرو سیلیس (کیلوگرم بر متر مکعب)	خاکستر بادی (کیلوگرم بر متر مکعب)	پومیس (کیلوگرم بر متر مکعب)	آب (کیلوگرم بر متر مکعب)	فوق روان کننده (لیتر بر متر مکعب)	اصلاح کننده لزجت (لیتر بر متر مکعب)
CM-۱	۸۵۰	۵۴۱	۱۵۵	۴۸۴	___	___	___	۱۹۴	۲/۳۰	۳/۸۹
CM-۲	۸۲۵	۶۶۱	۱۶۵	۴۲۴	___	___	___	۱۶۹	۲/۳۵	۳/۳۹
CM-۳	۷۵۵	۶۷۱	۲۵۲	۴۰۹	___	___	___	۱۶۴	۲/۵۵	۳/۷۷
CM-۴	۶۹۳	۶۹۳	۳۴۶	۳۸۱	___	___	___	۱۵۲	۲/۳۶	۳/۴۰
CM-۵	۵۰۹	۷۶۴	۴۲۵	۳۹۵	___	___	___	۱۵۸	۲/۴۶	۳/۶۵
CM-۶	۸۲۴	۵۲۴	۱۵۰	۵۱۳	___	___	___	۲۰۵	۲/۵۰	۴/۱۲
CM-۷	۷۸۷	۶۳۰	۱۵۷	۴۶۷	___	___	___	۱۸۷	۲/۵۹	۳/۷۴
CM-۸	۷۱۵	۶۳۶	۲۳۹	۴۵۷	___	___	___	۱۸۳	۲/۸۴	۴/۲۱
CM-۹	۶۴۶	۶۴۶	۳۲۳	۴۳۶	___	___	___	۱۷۴	۲/۷۱	۳/۹۰
CM-۱۰	۴۶۰	۶۹۰	۳۸۳	۴۸۳	___	___	___	۱۹۳	۳/۰۱	۴/۴۶
CS-۱	۸۵۰	۵۴۱	۱۵۴	۴۴۹	۵۰	___	___	۱۹۹	۲/۹۹	۴/۴۳
CS-۲	۸۳۷	۶۶۹	۱۶۷	۳۷۱	۴۱	___	___	۱۶۵	۲/۴۷	۳/۷۱
CS-۳	۷۹۱	۷۰۳	۲۶۴	۳۲۶	۳۶	___	___	۱۴۵	۲/۱۸	۳/۲۲
CS-۴	۷۱۱	۷۱۱	۳۵۶	۳۱۳	۳۵	___	___	۱۳۹	۲/۰۹	۳/۰۹
CS-۵	۵۱۳	۷۶۹	۴۲۷	۳۴۹	۳۹	___	___	۱۵۵	۲/۴۰	۴/۱۹
CF-۱	۸۸۸	۵۶۵	۱۶۱	۲۹۲	___	۱۲۵	___	۱۶۷	۲/۵۱	۳/۷۱
CF-۲	۸۲۹	۶۶۳	۱۶۶	۲۷۶	___	۱۱۸	___	۱۵۸	۲/۳۶	۳/۵۰
CF-۳	۷۴۵	۶۶۲	۲۴۸	۲۷۶	___	۱۱۸	___	۱۵۸	۲/۳۶	۳/۵۰
CF-۴	۶۷۱	۶۷۱	۳۳۵	۲۶۸	___	۱۱۵	___	۱۵۳	۲/۳۰	۳/۴۱
CF-۵	۵۰۲	۷۵۳	۴۱۸	۲۶۸	___	۱۱۵	___	۱۵۳	۲/۳۰	۳/۴۱
CP-۱	۸۸۴	۵۶۲	۱۶۱	۳۳۲	___	___	۱۱۰	۱۷۷	۲/۲۱	۳/۹۳
CP-۲	۸۱۱	۶۴۹	۱۶۲	۳۲۵	___	___	۱۰۷	۱۷۳	۲/۱۷	۳/۸۵
CP-۳	۷۳۴	۶۵۲	۲۴۵	۳۲۰	___	___	۱۰۶	۱۷۰	۲/۱۳	۳/۷۸
CP-۴	۶۵۵	۶۵۵	۳۲۸	۳۱۶	___	___	۱۰۵	۱۶۸	۲/۱۱	۳/۷۴
CP-۵	۴۹۱	۷۳۶	۴۰۹	۳۱۶	___	___	۱۰۵	۱۶۸	۲/۱۰	۳/۷۳

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های به دست آمده در این تحقیق مواردی را می‌توان نتیجه گرفت که عبارتند از:

- با استفاده از روش طرح اختلاط ارائه شده می‌توان متوسط مصرف خمیر سیمان را در بتن خود متراکم به ۳۲۵ لیتر در یک متر مکعب بتن کاهش داد.

جدول (۳) : نتایج آزمایش‌های انجام شده روی مخلوطهای بتن

معرف مخلوط	حجم خمیر (لیتر بر متر مکعب)	جریان اسلامپ (میلیمتر)	زمان تخلیه قیفV (ثانیه)	نسبت ارتفاع در جعبه L	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (مگا پاسکال)	مقاومت کششی ۲۸ روزه (مگا پاسکال)
CM-۱	۳۸۷	۶۵۰	۱۵	۰/۷۷	۳۹/۰	۳/۷
CM-۲	۳۴۳	۶۵۰	۱۸	۰/۷۴	۴۰/۵	۳/۸
CM-۳	۳۳۳	۶۵۰	۲۲	۰/۷۲	۴۲/۴	۴/۰
CM-۴	۳۱۲	۶۵۰	۲۳	۰/۶۸	۴۶/۵	۴/۴
CM-۵	۳۲۲	۶۵۰	۲۶	۰/۶۲	۴۳/۶	۴/۱
CM-۶	۴۰۸	۷۵۰	۳	۰/۸۵	۳۵/۵	۳/۴
CM-۷	۳۷۴	۷۵۰	۳	۰/۸۳	۳۴/۳	۳/۳
CM-۸	۳۶۸	۷۵۰	۴	۰/۷۹	۳۵/۰	۳/۳
CM-۹	۳۵۲	۷۵۰	۶	۰/۷۲	۳۷/۲	۳/۵
CM-۱۰	۳۸۷	۷۵۰	۸	۰/۶۶	۳۲/۳	۳/۱
CS-۱	۳۸۷	۶۵۰	۱۲	۰/۷۸	۴۴/۲	۴/۳
CS-۲	۳۳۶	۶۵۰	۱۴	۰/۷۶	۴۵/۴	۴/۴
CS-۳	۳۰۱	۶۵۰	۱۸	۰/۷۲	۴۶/۹	۴/۶
CS-۴	۲۹۲	۶۵۰	۲۰	۰/۷۰	۵۲/۳	۵/۱
CS-۵	۳۱۸	۶۵۰	۲۲	۰/۶۸	۴۹/۶	۴/۸
CF-۱	۳۶۰	۶۵۰	۱۳	۰/۷۸	۳۷/۱	۳/۵
CF-۲	۳۴۲	۶۵۰	۱۶	۰/۷۶	۳۸/۲	۳/۷
CF-۳	۳۴۲	۶۵۰	۱۹	۰/۷۵	۴۰/۶	۳/۸
CF-۴	۳۳۳	۶۵۰	۲۲	۰/۷۴	۴۳/۵	۴/۲
CF-۵	۳۳۳	۶۵۰	۲۵	۰/۷۱	۴۱/۱	۳/۹
CP-۱	۳۶۳	۶۵۰	۱۲	۰/۸۰	۳۳/۲	۳/۳
CP-۲	۳۵۶	۶۵۰	۱۳	۰/۷۸	۳۴/۴	۳/۴
CP-۳	۳۵۲	۶۵۰	۱۶	۰/۷۶	۳۷/۳	۳/۶
CP-۴	۳۴۸	۶۵۰	۱۸	۰/۷۳	۳۸/۸	۴/۰
CP-۵	۳۴۷	۶۵۰	۲۰	۰/۶۹	۳۶/۴	۳/۶

– قطر متوسط سنگدانه‌ها برای رسیدن به حداقل حجم خمیر سیمان لازم در این تحقیق برابر ۳/۹ میلیمتر بوده است.

– حداقل مقدار خمیر سیمان لازم در بتن خود متراکم ممکن است در ترکیبی از سنگدانه‌ها مورد نیاز باشد که بیشترین جرم حجمی انباشته سنگدانه ها را نداشته باشد.

– حداقل حجم خمیر سیمان لازم جهت دستیابی به بتن خود متراکم با روانی ثابت، به مقدار زیادی وابسته به ترکیب خمیر سیمان است.

۶- مراجع و منابع

[۱] Chao-Lung Hwang; Meng-Feng Hung; "*Durability design and performance of self-consolidating lightweight concrete*", construction and building materials, 2005.

[۲] H.Okamura; K.Mackawa; K.Ozawa; "*High performance concrete*", Gihoudou Pub., Tokyo, 1993.

[۳] Nan Su; Kung-Chung Hsu; His-Wen Chai; "*A Simple mix design method for self-compacting concrete*", cement and concrete research 31 (2001) 1799-1807.

[۴] Collepardi.M; Valente.M; *"Durable, Shrinkage-Free and Colourable Self-Compacting Concrete"*, Proceeding of the 2nd International fib Congress, June 5-8,2006- Naples, Italy.

[۵] Van Khanh Bui and Denis Montgomery; "*Mixture Proportioning Method for Self-Consolidating High Performance Concrete with Minimum Paste Volume*", 1st International Rilem Symposium on Scc 1999.

[۶] M.Sonebi, *"Medium Strength Self-Compacting Concrete Containing Fly Ash: Modelling Using Factorial Experimental Plans"*, Cement and Concrete Research-2004.

[۷] M.Lachemi, K.M.A.Hossain, V.Lambros, N.Bouzoubaa, *"Development of Cost-Effective Self-Consolidating Concrete Incorporating Fly Ash, Slag Cement, or Viscosity-Modifying Admixture"*, ACI Materials Journal/Sep-Oct 2003.

[۸] F.de Larrard; "*Concrete Mixture Proportioning a Scientific Approach*", E & FN spon.

[۹] Precast/Prestressed Concrete Institute, (PCI); "*Interim Guidelines for the use of Self-Consolidating Concrete*", Chicago, USA, 2003.