

طرح مخلوط بتن فوق توانمند به روش مدل اندریاسن اصلاح شده

پیمان خدابنده^{۱*}، محمد شکرچی زاده^۲، علیرضا رفیعی^۳، فاضل آذر همایون^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران

۲- عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی عمران و سرپرست انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

۳- دکتری سازه با تخصص بتن فوق توانمند (UHPC) و همکار انستیتو مصالح ساختمانی دانشگاه تهران

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، مهندسی عمران، دانشکده فنی دانشگاه تهران

p.khodabandeh^{۱*}@ut.ac.ir

چکیده

ظهور بتن فوق توانمند یک پیشرفت جدید در عرصه تکنولوژی بتن می باشد. بتن فوق توانمند بتنی است با مقاومت و دوام فوق العاده زیاد به همراه خاصیت شکل پذیری برگرفته از الیاف موجود در آن، بهترین گزینه برای ساخت و ساز المان هایی است که تحت شرایط بارگذاری شدید مکانیکی یا محیطی مهاجم قرار دارند، می باشد. اما نبود آیین نامه مدون طرح اختلاط و هزینه تمام شده زیاد آن به دلیل الیاف، عیار سیمان زیاد و همچنین استفاده از سنگ دانه هایی با کیفیت بالا، مانع از فراگیر شدن این بتن شده است. در این مقاله قصد بر ارائه کم هزینه ترین، کم آلاینده ترین و سریع ترین روش طرح مخلوط بتن فوق توانمند (در عین حال بهینه)، بر اساس مفهوم چگالی تراکمی (که اساس ساخت بتن فوق توانمند است) می باشد. یکی از مدل هایی که بر اساس چگالی تراکمی بیشینه پایه ریزی شده است، مدل اندریاسن اصلاح شده می باشد. بر اساس این مدل، طرح مخلوط بتن فوق توانمند، به گونه ای به دست می آید که فضای خالی بین ذرات تا حد امکان با ذرات کوچک تر (نه صرفاً خمیر سیمان) پر بشود. در این پژوهش با استفاده از این مدل چگالی تراکمی ۳۶۰ طرح مخلوط مورد بررسی قرار گرفت و از بین آن ها، متراکم ترین طرح مخلوط برگزیده شد. طرح مخلوط بتن فوق توانمند به دست آمده بر اساس مدل اندریاسن اصلاح شده، شامل ۶۳۰ کیلوگرم بر مترمکعب سیمان با ۲۵ درصد میکروسیلیس جایگذاری شده، به همراه نسبت حجمی ۲ برابر سنگ دانه به سیمان، پودر سیلیس برابر با ۲۰ درصد مواد سیمانی، همچنین نسبت آب به مواد سیمانی ۰,۱۷، امکان دستیابی به مقاومت فشاری ۱۶۳ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۹,۲۶ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۱۶,۴ مگاپاسکال را فراهم نمود.

کلمات کلیدی: طرح مخلوط، بتن فوق توانمند، بهینه، اندریاسن اصلاح شده، چگالی تراکمی

Mix Design of Ultra High Performance Concrete in Modified Andreasen and Andersen model

Payman Khodabandeh¹, Mohammad Shekarchi², Alireza Rafiee³
Fazel Azar Homayun⁴

1- M.S student Engineering, School of Civil Engineering University of Tehran, Tehran, Iran

2- Full Professor and Director of Construction Materials Institute, School of Civil Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

3- Phd of structural Engineering specialized in UHPC, expert at Construction Materials Institute of Tehran University

4- M.S student Engineering, School of Civil Engineering University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

The emergence of ultra high performance concrete is a new breakthrough in the field of concrete technology. Ultra high performance concrete is an extremely strong and durable concrete with the ductility feature because of fibers in its body. This type of concrete is the best choice for elements that are under extreme mechanical and environmental loading condition. However the absence of a codified Regulations of mix design, high cost of production due to fibers and high grade of cement and also use of high quality aggregates, has prevented the prevalence of this type of concrete. The goal of this paper is to present the least expensive and at the same time, the most efficient, the least pollutant and the fastest method of mix design, based on packing density (base of ultra high performance concrete production). One of the models that are based on max packing density is Modified Andreasen and Andersen model. Based on this model, the mix design of ultra high performance concrete is derived in a way that the space between aggregates got filled with the smaller ones (not just the cement paste). In this study, ۳۶۰ design mix has evaluated and then the most dense one has chosen from them. The chosen mix design based on Modified Andreasen and Andersen model including ۶۳۰ kg/m^۳ cement with ۲۵ percent of replaced Micro silica and with aggregate to cement volume ratio of 2, Silica powder equals to 20 percent of Cementitious materials and also w/c ratio of 0.17, could result in compressive strength of ۱۵۳ MPa, tensile strength of ۹,۲۶ MPa and bending strength of ۱۵,۴ MPa.

Keywords:

Mix Design, Ultra High Performance Concrete, UHPC, Modified Andreasen and Andersen model

۱- مقدمه

از نقطه نظر پیشرفت علم بتن، می توان بتن فوق توانمند یا UHPC^۱ را جز آخرین ابتکارات این عرصه محسوب کرد. بر اساس توصیه انجمن مهندسين عمران فرانسه، بتن فوق توانمند، ماده ای است با بدنه سیمانی با مقاومت فشاری ۱۵۰ تا ۲۵۰ مگاپاسکال، همچنین برای دارا بودن رفتار شکل پذیر باید حاوی مقدار کافی الیاف باشد، می تواند همراه با یا بدون آرماتور به کار رود. از تفاوت این نوع بتن با بتن های رایج می توان به مقاومت و دوام فوق العاده بالای آن به دلیل نفوذناپذیری یا نفوذپذیری بسیار پایین آن در مقایسه با بتن های عادی، اشاره کرد، همین عامل این نوع بتن را برای مصارفی که نیاز به مقاومت یا دوام بالا در شرایط شدید محیطی دارد، ایده آل می کند. از تفاوت های طرح مخلوط این نوع بتن با بتن های قبلی می توان به افزایش یکنواختی ساختار بتن (اغلب) با حذف درشت دانه ها، عیار بالای سیمان، دارا بودن میکروسیلیس و ریزدانه های سخت، کاهش نسبت آب به مواد سیمانی تا محدوده ۰٫۱۵، افزودن فوق روان کننده برای تأمین کارایی لازم و همچنین اضافه نمودن الیاف فولادی برای جذب انرژی بالا و تأمین رفتار شکل پذیر لازم، اشاره کرد.

مقاومت فشاری بالا و دوام فوق العاده بالای بتن فوق توانمند، مرهون ۴ اصل زیر می باشد:

۱- نسبت آب به مواد سیمانی بسیار پایین آن، در محدوده ۰٫۱۵ تا ۰٫۲، وزن سیمان، منجر به تشکیل ماتریس بسیار متراکم و محکم همراه با حداقل فضای مویینه و به دنبال آن، حداقل توانایی نفوذ گازها و مایعات مضر به داخل بتن می شود.

۲- چگالی تراکمی بیشینه، به خصوص کاربرد دانه های ریز در ماتریس خمیر، منجر به کاهش نیاز به آب برای تأمین روانی بتن تازه و به دنبال آن، منجر به افزایش مقاومت فشاری می شود.

۳- استفاده از افزودنی فوق روان کننده در مقادیر بالا برای تأمین کارایی بتن فوق توانمند.

۴- استفاده از الیاف فولادی یا ... برای افزایش مقاومت کششی، خمشی، برشی و تأمین شکل پذیری لازم.

از نقطه نظر علم مواد، خصوصیات کلی بتن، توسط مشخصه های ریزساختار آن تعیین می شود. از همین رو مقاومت مکانیکی بالا و دوام فوق العاده آن مرهون ریزساختار فوق العاده متراکم آن می باشد. شاخص ترین اختلاف بین بتن فوق توانمند در مقایسه با سایر بتن ها، عدم وجود فضای مویینه و تخلخل فوق العاده پایین آن می باشد. همین عامل، دلیلی بر مقاومت فوق العاده بالای بتن فوق توانمند در مقابل نفوذ یون کلر، کرناسیون و حملات انجماد و ذوب می باشد. با توجه پژوهش های انجام گرفته، روش های متعددی برای ارائه طرح مخلوط بتن فوق توانمند وجود دارد که ساختار کلی آن ها همگی بر اساس دستیابی به چگالی تراکمی بیشینه می باشد. چگالی تراکمی در یک ماده تشکیل شده از ذرات کوچک تر، به نسبت حجم ذرات جامد به حجم کل، اطلاق می گردد. چگالی تراکمی در بتن از اهمیت قابل توجهی برخوردار است و با بررسی و بهینه کردن آن می توان خصوصیات بتن از قبیل روانی، مقاومت و دوام را بهبود بخشید [۱]. همچنین مطالعات نشان داده است که مقاومت بالا، روانی مناسب و جداشدگی حداقل، مرهون دستیابی به چگالی تراکمی بیشینه (یا تخلخل کمینه) می باشد [۲]. به علاوه از دیگر مزیت های اصل چگالی تراکمی بیشینه می توان به کاهش مصرف سیمان، کاهش جمع شدگی خود خشک شدگی و خزش به میزان قابل توجهی اشاره کرد (به دلیل کاهش خمیر سیمان) [۳].

البته شایان ذکر است که با کاهش نسبت آب به سیمان، مادامی که چگالی تراکمی بهبود نیافته، نمی توان انتظار آن چنانی از افزایش مقاومت آن داشت [۴]. دلیل آن، این است که با کاهش نسبت آب به سیمان، روانی و کارایی مخلوط هم پایین می آید، همین عامل منجر به افزایش هوای به دام افتاده در داخل بتن شده، و در نتیجه مانع از افزایش مقاومت بتن می شود [۵].

با توجه به پژوهش های وایل^۲، مسئله ای که در تأمین مقاومت و دوام بتن تأثیر غالب دارد، دستیابی به چینی است که کمترین فضای خالی را شامل بشود، ایشان حتی نشان دادند که با رعایت این اصل، حتی با سنگ دانه های ۱۶ میلی متری هم می توان بتن فوق توانمند ساخت. از این رو، بر اساس مصالح محلی و با داشتن فقط دانه بندی آن، می توان با انواع پوزولان ها و مواد پودری، بتن های با مقاومت بسیار بالا ساخت [۵].

چگالی تراکمی بیشینه طرح مخلوط، با بهینه سازی دانه بندی سنگ دانه ها، یا روش های تحلیلی^۴ و یا مدل های المان مجزا^۵ به دست می آید [۶].

^۱ Ultra High Performance Concrete

^۲ Wille

^۳ Optimization

^۴ Analytical methods

^۵ DCMs or Discrete Element Models

ایده بهبود خواص بتن به وسیله بهینه سازی دانه بندی سنگ دانه ها، برای اولین بار توسط فرت^۱ [۷] ارائه گردید. برای بهینه سازی دانه بندی، مخلوط سنگ دانه ها در مقابل منحنی دانه بندی مشخصی (معیار) مقایسه می شود. اولین منحنی دانه بندی معیار، توسط فولر و تامسون ارائه گردید [۸] و کماکان از آن برای پیشبرد برخی طرح اختلاط ها استفاده می شود. این منحنی از رابطه ۱ پیروی می شود:

$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{max}}\right)^q \quad (۱)$$

P عبارت است از درصد رد شده از الک با باز شدگی D و Dmax عبارت است از بزرگ ترین ذره مخلوط همچنین q عبارت است از مدول توزیع که عددی بین ۰ و ۱ بوده (فولر و تامسون q را برابر با ۰٫۵ گرفتند) و معرف نسبت بین ریزدانه ها و درشت دانه ترها می باشد. اندریاسن و اندرسن^۲ [A&A] [۹] مطالعات گسترده ای بر روی مدل فولر و تامسون انجام دادند و مدل های چگالی تراکمی نیمه تجربی از دانه بندی پیوسته ارائه کردند. PSDs^۳ که طبق همان رابطه فولر و تامسون تعریف می شود، اما مقدار q را عددی بین ۰٫۳۳ و ۰٫۵ گرفتند. همچنین آن ها دریافتند که بهینه ترین تراکم به ازای q برابر با ۰٫۳۷ به دست می آید. از این رو منحنی PSD با $q=0.37$ به منحنی A&A معروف می باشد. البته گفتنی است که، اگر درشت دانه ها به صورت گوشه دار باشد، برای دستیابی به ایده آل ترین منحنی، از q کوچک تری استفاده می کنند، به عبارت دیگر، q کوچک تر منجر به افزایش ریزدانه ها برای پر کردن فضای درشت دانه ها در طرح مخلوط می شود. با این وجود، مقدار بهینه q در آزمایشگاه و بر اساس مشخصه های ذرات، به دست می آید. اما با این وجود، این مدل از ارائه بهترین چگالی تراکمی برای دانه های ریزتر از ۲۵۰ میکرومتر که در بتن های SCC^۴، HPC^۵ و UHPC به وفور به کار می رود، عاجز است [۱۰].

فانک و دینگر [۱۱] اعلام کردند که هر طرح مخلوطی، دارای کوچک ترین اندازه ذرات می باشد، بدین ترتیب اقدام به اصلاح مدل A&A نمودند. بدین ترتیب مدل جدیدی به نام مدل اصلاح شده ی A&A^۶ که شامل کوچک ترین اندازه دانه طرح مخلوط می باشد، وارد ادبیات فنی شد و از رابطه ۲ پیروی می کند:

$$p(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{max}^q - D_{min}^q} \quad (۲)$$

Dmin عبارت است از اندازه کوچک ترین دانه به کار رفته در طرح مخلوط و سایر پارامترها همان پارامترهای مربوط به رابطه قبلی می باشد. برای انتخاب طرح مخلوط بهینه که معرف پرچگالی ترین حالت تراکمی نیز باشد، باید به یک توازن بین طرح مخلوط میکس و طرح مخلوط معیار رسید، از این رو از الگوریتم بهینه سازی بر اساس روش حداقل مربعات LSM که در رابطه 3 آورده شده، بهره برده می شود. اختلاف بین منحنی معیار و منحنی طرح میکس که با مجموع مربعات تفاضل به ازای هر اندازه مشخص دانه برای طرح معیار و طرح میکس یا به اصطلاح RSS بیان می شود، باید کمینه شود. بدین صورت طرح میکسی که کمترین RSS را داشته باشد به عنوان طرح مخلوط بهینه برگزیده می شود.

$$RSS = \sum_{i=1}^n [P_{mix}(D_i^{i+1}) - P_{tar}(D_i^{i+1})]^2 \quad (۳)$$

محققان برای دستیابی به بهینه ترین چگالی تراکمی برای هم بتن های خود تراکم SCC و هم بتن های فوق توانمند (و یا هر نوع بتنی که نسبت ریزدانه ای بالایی داشته باشد) از منحنی A&A اصلاح شده، استفاده می کنند [۱۰، ۱۵-۱۲]

شکل 1 مقایسه ای برای منحنی مدل فولر و تامسون، A&A و A&A اصلاح شده در یک نمودار، می باشد. گفتنی است از $q=0.25$ برای A&A اصلاح شده استفاده شده است.

^۱ Feret

^۲ Andreasen and Andersen

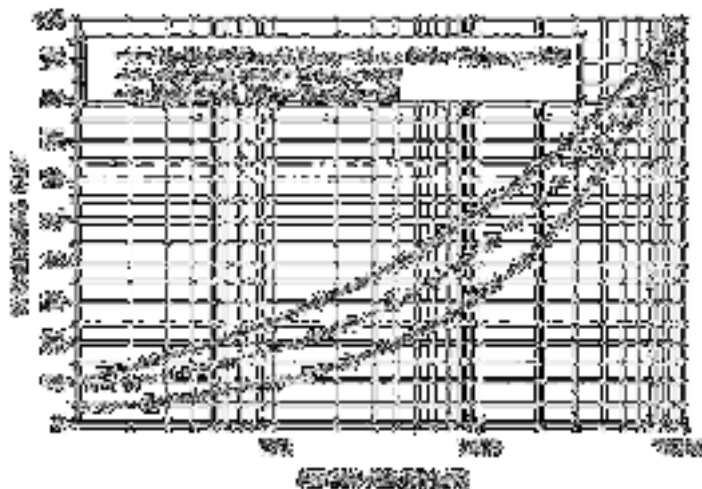
^۳ Particle Size Distributions

^۴ Self consolidating concrete

^۵ High performance concrete

^۶ Modified Andreasen and Andersen model

^۷ the Least Squares Method



شکل ۱ مدل فولر، A&A و A&A اصلاح شده

۲- برنامه آزمایشگاهی

در ابتدا لازم به ذکر این نکته می باشد که برنامه آزمایشگاهی به همراه تمام عملیات طرح مخلوط، میکس، عمل آوری، آزمایشات مکانیکی و... در آزمایشگاه مصالح ساختمانی دانشگاه تهران صورت گرفته است. ابتدا مشخصات و دانه بندی مصالح ذکر می شود سپس مدل به کاررفته به طور تفصیل بیان می گردد.

۲-۱ مصالح مصرفی

۲-۱-۱ سیمان

سیمان از نوع ۱-۵۲۵ تولید کارخانه سیمان شهرکرد، با مقاومت فشاری ملات استاندارد ۵۰,۴ مگاپاسکال بوده و منحنی دانه بندی آن در شکل ۲ نشان داده شده است: (لازم به ذکر این مسئله می باشد که دانه بندی سیمان در یکی از کارخانه های تولید کننده سیمان اطراف شهر تهران انجام گرفته است)

۲-۱-۲ سنگ دانه

در این پژوهش از دو نوع ماسه سلیسی تهیه شده از شرکت آریناپلیمر، با سیلیس بالای ۹۰ درصد با وزن مخصوص ۲,۴ کیلوگرم و درصد جذب آب به ترتیب ۱,۶۸ و ۱,۸۷ درصد استفاده شده است.

۲-۱-۳ میکروسیلیس

مطابق نتایج مطالعات انجام رفته در گذشته میکروسیلیس تولید صنایع فرو آلیاژ ایران (ازنا) به سبب خلوص بیشتر، خواص بهتری در بتن فوق توانمند ایجاد می‌کند. درصد سیلیس برابر با ۹۱٪ و وزن مخصوص ۲٫۲ گرم بر سانتی متر مکعب بوده و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۲ نشان داده شده است: (لازم به ذکر این مسئله می‌باشد که دانه‌بندی میکروسیلیس در یکی از کارخانه‌های تولید کننده سیمان اطراف شهر تهران انجام گرفته است)

۲-۱-۴ پودر سیلیس

پودر سیلیس به عنوان فیلر در تولید بتن فوق توانمند نقش مهمی دارد. پودر سیلیس حاضر تهیه شده از شرکت آریناپلیمر با درصد سیلیس بالای ۹۰ درصد بوده و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۲ آمده است: (لازم به ذکر این مسئله می‌باشد که دانه‌بندی پودر سیلیس در یکی از کارخانه‌های تولید کننده سیمان اطراف شهر تهران انجام گرفته است)

۲-۱-۵ الیاف

الیاف مورد استفاده در بتن فوق توانمند کوتاه و مستقیم و نرم از فولاد پرمقاومت ساخته می‌شوند. در این پژوهش از الیاف فولادی وارداتی از شرکت STRATEC آلمان استفاده شده است. مشخصات این نوع الیاف در جداول ۱ و ۲ آمده است:

جدول ۱ - مشخصات فیزیکی الیاف

مشخصات فیزیکی الیاف	طول (mm)	عرض (mm)	نسبت طول به قطر
	۱۳	۰٫۱۷	۷۴

جدول ۲ - مشخصات مکانیکی الیاف

مشخصات مکانیکی الیاف	مدول الاستیسیته (GPa)	مقاومت کششی (MPa)	وزن مخصوص (g/cm^3)
	۲۰۰	۲۰۰۰	۷٫۸۵

۲-۱-۶ افزودنی روان کننده

با توجه به نسبت آب به سیمان بسیار پایین بتن فوق توانمند، استفاده از فوق روان کننده ضروری می‌باشد. در این پژوهش از فوق روان کننده ساخت شرکت شیمی ساختمان بانام تجاری P۱۰N بر پایه پلی کربکسیلات‌اتر با وزن مخصوص ۱٫۱ گرم بر سانتی متر مکعب که حدود ۶۰ درصد آن را آب تشکیل می‌دهد، استفاده شده است. با توجه به تماسی که بعدها با کارشناس شرکت مربوطه گرفته شد، اذعان کردند که بیشتر از ۲ درصد افزودنی، بر مخلوط اثر سوء خواهد گذاشت. از همین رو بعدها مقدار ۲ درصد مواد سیمانی، حد مجاز افزودنی در این طرح مخلوط به شمار آمد.

۲-۲ طرح اختلاط بر اساس مدل اندریاسن اصلاح شده

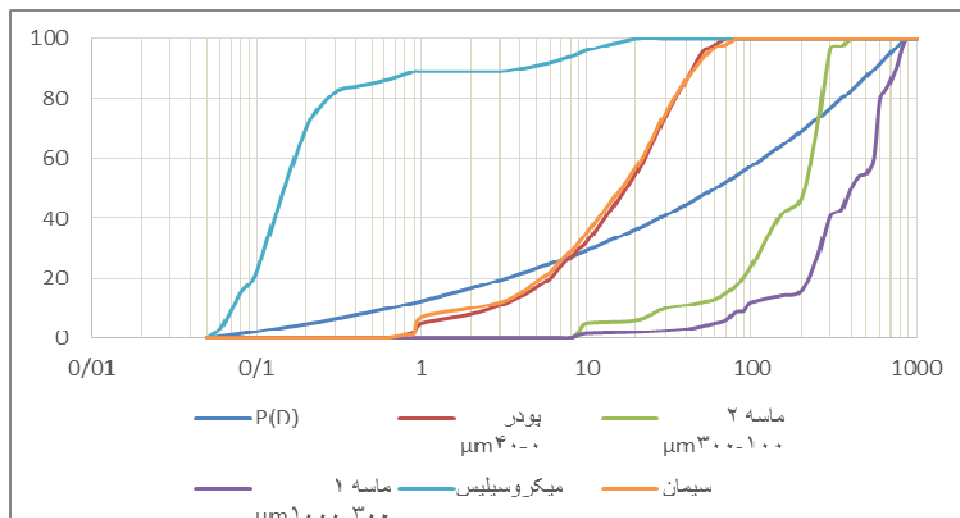
مدل A&A اصلاح شده قصد دارد به گونه‌ای مقدار هر یک از مصالح را تعیین کند که طرح نهایی در متراکم‌ترین حالت خود بر اساس مصالح موجود، تشکیل شود. برای این کار ۳۶۰ طرح مخلوط بر اساس عیار سیمان، درصد میکروسیلیس، درصد پودر سیلیس، ماسه ۱ و ماسه ۲ را تشکیل داده و RSS هر یک از آن‌ها را محاسبه کرده و در نهایت طرحی که کمترین RSS یا به عبارت دیگر، طرحی که شبیه‌ترین منحنی را به منحنی A&A اصلاح شده دارد را انتخاب و بعد از یکسری اصلاحات جزئی مثل تنظیم مقدار روان‌کننده، آزمایش مقاومت فشاری و خمشی و کششی بر روی آن انجام شد.

قبل از توضیح مفصل روش، ذکر چند نکته در اینجا ضروری می‌باشد:

- طرح مخلوط به روش حجمی محاسبه شده است.

- در مورد مدول توزیع (q) گفتنی است که برای مدول فولر برابر با ۰٫۵، برای مدل A&A برابر با ۰٫۳۷ و برای A&A اصلاح شده کمتر از این مقادیر می‌باشد. پروورز در سال ۲۰۰۸ نشان داد که برای رسیدن به طرح بهینه باید q بین ۰ و ۰٫۲۸ باشد [۱۶، ۱۷].

از همین رو پژوهش حاضر با تمرکز بر روی $q=0.22$ و $q=0.25$ انجام گرفته است. محاسبات و آزمایشات نشان داده شده در ادامه، بر پایه $q=0.22$ می‌باشد. ابتدا با توجه به رابطه ۲، $P(D)$ محاسبه و دانه‌بندی معیار یا هدف به دست آورده شد. نحوه توزیع اندازه ذرات یا به تعبیری، دانه‌بندی طرح معیار در کنار منحنی دانه‌بندی سایر مصالح در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ماسه ۱، ماسه ۲، پودر سیلیس، سیمان و میکروسیلیس در کنار منحنی $P(D)$

در جدول ۳ و ۴، ۳۶۰ طرح مخلوط هر کدام بر اساس متغیرهای نشان داده شده است. برای تسهیل در دسته‌بندی ۳۶۰ طرح، مواد پودری شامل سیمان و میکروسیلیس و پودر سیلیس در جدول ۳ با ترکیب‌های ۲۴ گانه و ماسه‌ها در جدول ۴ با نسبت‌های ۱۵ گانه آورده شده است.

جدول ۳- ترکیب سیمان، میکروسیلیس، پودر سیلیس و افزودنی

ترکیب	وزن سیمان	درصد میکروسیلیس نسبت به مواد سیمانی	وزن میکروسیلیس	مواد سیمانی	درصد پودر سیلیس نسبت به مواد سیمانی	وزن پودر سیلیس	w/b	آب کل	افزودنی
۱	۸۵۰	۲۰	۲۱۳	۱۰۶۳	۲۰	۲۱۳	۰,۱۷	۱۸۰,۷۱	۳۲
۲	۸۵۰	۲۰	۲۱۳	۱۰۶۳	۲۵	۲۶۶	۰,۱۷	۱۸۰,۷۱	۳۲
۳	۸۵۰	۲۵	۲۸۳	۱۱۳۳	۲۰	۲۲۷	۰,۱۷	۱۹۲,۶۱	۳۲
۴	۸۵۰	۲۵	۲۸۳	۱۱۳۳	۲۵	۲۸۳	۰,۱۷	۱۹۲,۶۱	۳۲
۵	۷۸۰	۲۰	۱۹۵	۹۷۵	۲۰	۱۹۵	۰,۱۷	۱۶۵,۷۵	۳۲
۶	۷۸۰	۲۰	۱۹۵	۹۷۵	۲۵	۲۴۴	۰,۱۷	۱۶۵,۷۵	۳۲
۷	۷۸۰	۲۵	۲۶۰	۱۰۴۰	۲۰	۲۰۸	۰,۱۷	۱۷۶,۸	۳۲
۸	۷۸۰	۲۵	۲۶۰	۱۰۴۰	۲۵	۲۶۰	۰,۱۷	۱۷۶,۸	۳۲
۹	۷۰۰	۲۰	۱۷۵	۸۷۵	۲۰	۱۷۵	۰,۱۷	۱۴۸,۷۵	۳۲
۱۰	۷۰۰	۲۰	۱۷۵	۸۷۵	۲۵	۲۱۹	۰,۱۷	۱۴۸,۷۵	۳۲
۱۱	۷۰۰	۲۵	۲۳۳	۹۳۳	۲۰	۱۸۷	۰,۱۷	۱۵۸,۶۱	۳۲
۱۲	۷۰۰	۲۵	۲۳۳	۹۳۳	۲۵	۲۳۳	۰,۱۷	۱۵۸,۶۱	۳۲
۱۳	۶۳۰	۲۰	۱۵۸	۷۸۸	۲۰	۱۵۸	۰,۱۷	۱۳۳,۹۶	۳۲
۱۴	۶۳۰	۲۰	۱۵۸	۷۸۸	۲۵	۱۹۷	۰,۱۷	۱۳۳,۹۶	۳۲
۱۵	۶۳۰	۲۵	۲۱۰	۸۴۰	۲۰	۱۶۸	۰,۱۷	۱۴۲,۸	۳۲
۱۶	۶۳۰	۲۵	۲۱۰	۸۴۰	۲۵	۲۱۰	۰,۱۷	۱۴۲,۸	۳۲
۱۷	۵۶۰	۲۰	۱۴۰	۷۰۰	۲۰	۱۴۰	۰,۱۷	۱۱۹	۳۲
۱۸	۵۶۰	۲۰	۱۴۰	۷۰۰	۲۵	۱۷۵	۰,۱۷	۱۱۹	۳۲
۱۹	۵۶۰	۲۵	۱۸۷	۷۴۷	۲۰	۱۴۹	۰,۱۷	۱۲۶,۹۹	۳۲
۲۰	۵۶۰	۲۵	۱۸۷	۷۴۷	۲۵	۱۸۷	۰,۱۷	۱۲۶,۹۹	۳۲
۲۱	۵۰۰	۲۰	۱۲۵	۶۲۵	۲۰	۱۲۵	۰,۱۷	۱۰۶,۲۵	۳۲
۲۲	۵۰۰	۲۰	۱۲۵	۶۲۵	۲۵	۱۵۶	۰,۱۷	۱۰۶,۲۵	۳۲
۲۳	۵۰۰	۲۵	۱۶۷	۶۶۷	۲۰	۱۳۳	۰,۱۷	۱۱۳,۳۹	۳۲
۲۴	۵۰۰	۲۵	۱۶۷	۶۶۷	۲۵	۱۶۷	۰,۱۷	۱۱۳,۳۹	۳۲

جدول ۴- نسبت ماسه نوع ۱ و ۲

شماره	نسبت های ماسه	
	ماسه ۱	ماسه ۲
۱	۰,۹	۰,۱
۲	۰,۸۵	۰,۱۵
۳	۰,۸	۰,۲
۴	۰,۷۵	۰,۲۵
۵	۰,۷	۰,۳
۶	۰,۶۵	۰,۳۵
۷	۰,۶	۰,۴
۸	۰,۵۵	۰,۴۵
۹	۰,۵	۰,۵
۱۰	۰,۴۵	۰,۵۵
۱۱	۰,۴	۰,۶
۱۲	۰,۳۵	۰,۶۵
۱۳	۰,۳	۰,۷
۱۴	۰,۲۵	۰,۷۵
۱۵	۰,۲	۰,۸

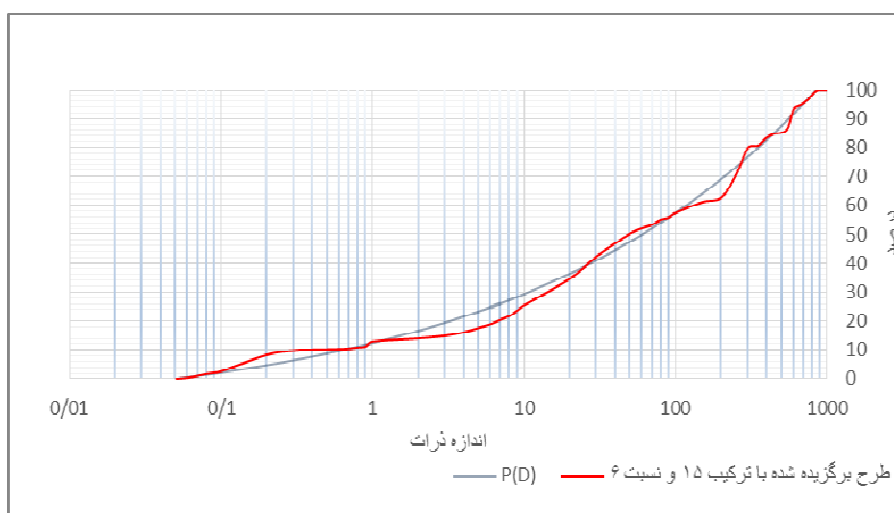
RSS برای همه ۳۶۰ طرح محاسبه و ۱۰ طرحی که کمترین RSS را نتیجه داده بودند، در جدول ۵ نشان داده شده است:

جدول ۵- نتایج بهینه ۱۰ طرح برتر، بر اساس RSS آن ها از میان ۳۶۰ طرح مخلوط

ردیف	RSS	ترکیب	نسبت
۱	۳۵۳	۱۵	۶
۲	۳۵۸	۱۵	۷
۳	۳۷۲	۱۵	۵
۴	۳۸۷	۱۵	۸
۵	۳۹۶	۱۶	۵
۶	۴۰۱	۱۶	۴
۷	۴۱۳	۱۶	۶
۸	۴۱۷	۱۵	۴
۹	۴۲۷	۱۶	۳
۱۰	۴۴۲	۱۵	۹

ملاحظه می شود که ترکیب ۱۵ که طرح مخلوط سیمان و میکروسیلیس و پودر سیلیس یکسانی دارند، بهینه ترین ترکیب را از میان ۲۴ ترکیب و نسبت ۶ که معرف نسبت بین دو نوع ماسه می باشد، بهترین تراکم ماسه ای را از میان ۱۵ نسبت، در کنار یکدیگر تشکیل داده اند. بنابراین ترکیب ۱۵ و نسبت ۶ به عنوان طرح بهینه اولیه طبق مدل A&A اصلاح شده، انتخاب می شود.

اگر مقایسه‌ای بین منحنی دانه‌بندی معیار (A&A اصلاح شده) و منحنی طرح انتخاب شده انجام شود، به صورت شکل ۲ خواهد بود، همان طور که ملاحظه می‌شود، شبیه‌ترین طرح اختلاط از بین ۳۶۰ طرح به طرح معیار یا P(D)، طرح ترکیب ۱۵ با نسبت ۶ می‌باشد.



شکل ۲ منحنی دانه‌بندی معیار و طرح برگزیده شامل ترکیب ۱۵ و نسبت ۶

۲-۳ طرح مخلوط نهایی

طرح مخلوط بهینه اولیه با ترکیب ۱۵ و نسبت ۶، در جدول ۶ آمده است.

جدول ۶- طرح مخلوط بهینه اولیه با ترکیب ۱۵ و نسبت

الیاف %	افزودنی روان کننده $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	$\frac{w}{b}$	ماسه ۲ $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	ماسه ۱ $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	مواد سیمانی $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	پودر سیلیس $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	درصد پودر سیلیس نسبت به مواد سیمانی %	میکروسیلیس $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	درصد میکروسیلیس نسبت به مواد سیمانی %	سیمان $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$
۱	۳۲	۰,۱۷	۳۴۳,۰۵	۶۳۷,۱	۸۴۰	۱۶۸	۲۰	۳۱۰	۲۵	۶۳۰

در زیر مراحل میکس بتن فوق توانمند با توجه به پژوهش‌های صورت گرفته توسط وایل آورده شده است [۵]

- ۱- میکس خشک سنگ‌دانه و میکروسیلیس به مدت ۵ دقیقه
- ۲- اضافه کردن سیمان و سایر مواد سیمانی و میکس به مدت ۵ دقیقه دیگر
- ۳- اضافه کردن مخلوط کل آب و یک سوم روان کننده، در طول مدت ۱ دقیقه
- ۴- اضافه کردن دو سوم روان کننده به مخلوط در طول مدت ۱ دقیقه
- ۵- افزایش سرعت میکس
- ۶- اضافه کردن الیاف (در صورت لازم)

۷- ادامه میکس تا رسیدن به روانی بهینه

روانی بتن فوق توانمند طبق روش ASTM C1437 اندازه گیری شد، بدین صورت که با استفاده از میز روانی، جام و میله کوبنده، ملات اختلاط شده در ۲ مرحله داخل جام ریخته می شود و در هر مرحله با استفاده از میله کوبنده ۲۰ ضربه جهت تراکم به ملات زده می شود. بعد از گذشت ۱ دقیقه، جام را بالا کشیده و با دسته میز روانی طی ۱۵ ثانیه ۲۵ ضربه زده می شود. قطر دایره پخش ملات را در ۴ قسمت با استفاده از کولیس اندازه گیری کرده و میانگین این اعداد به عنوان روانی ملات معرفی می شود.

ارزیابی طرح اولیه بر اساس مقاومت فشاری صورت گرفت، بدین صورت که ۳ عدد قالب مکعبی ۱۰ سانتی متری با طرح اولیه، پر و به مدت ۵۰ ثانیه بر روی میز ویبره تحت ارتعاش قرار گرفت، پس از ۲ روز از قالب جدا و ۳ روز در حوضچه آب داغ ۸۷ درجه قرار گرفت، سپس از حوضچه در آورده و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت. مقاومت فشاری میانگین برابر با ۱۳۶٫۴ مگاپاسکال به دست آمد. بار دیگر همین عملیات بر روی همین طرح اما این بار با میزان افزودنی ۲٫۵ و ۲ درصد مواد سیمانی تکرار شد، مقاومت فشاری میانگین به دست آمده به ترتیب برابر با ۱۴۱ و ۱۵۱ مگاپاسکال شد. یعنی کاهش درصد روان کننده از ۳٫۸ به ۲ درصد مواد سیمانی، منجر به افزایش ۱۴ مگاپاسکالی مقاومت فشاری بتن گردید. جهت اطمینان از نتایج مدل اندریاسن اصلاح شده، آزمایش مقاومت فشاری بر روی همان طرح ها اما هر کدام به طور مجزا با ۲۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس و سیمان با عیار ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب انجام گرفت و همگی مقاومت پایین تری را نتیجه دادند. همچنین بر اساس مدل A&A اصلاح شده برای $q=0.25$ دوباره تراکم ۳۶۰ طرح تحت بررسی صورت گرفت و طرح برگزیده شده آن، تحت آزمایش فشاری قرار گرفت و مقاومت ۱۱۵ مگاپاسکال را نتیجه داد. (نتایج مقاومت فشاری طرح مخلوط اولیه به دست آمده بر اساس مدل A&A اصلاح شده و تغییرات صورت گرفته هر کدام در جدول ۷ آمده است).

جدول ۷- نتایج مقاومت فشاری نمونه ها بر اساس تغییری که داشته اند

شماره طرح	مدول توزیع	نوع تغییر	مقاومت فشاری میانگین MPa	وزن مخصوص $(\frac{kg}{m^3})$	روانی mm
۱	۰٫۲۲	بدون تغییر	۱۳۶	۲۳۸۷	۱۶۴
۲	۰٫۲۲	کاهش افزودنی به ۲٫۵ درصد	۱۴۱	۲۴۰۱	۱۵۳
۳	۰٫۲۲	کاهش افزودنی به ۲ درصد	۱۵۱	۲۴۱۷	۱۳۵
۴	۰٫۲۲	کاهش میکروسیلیس به ۲۰ درصد	۱۲۶	۲۴۰۹	۱۶۰
۵	۰٫۲۲	کاهش میکروسیلیس به ۱۵ درصد	۱۱۲	۲۴۰۴	۱۵۴
۶	۰٫۲۲	عیار سیمان ۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	۱۳۲	۲۴۵۰	۱۶۲
۷	۰٫۲۵	بدون تغییر	۱۱۵	۲۳۹۶	۱۵۵

جهت اطمینان، دوباره آزمایش مقاومت فشاری بر روی طرح اصلاح شده با ۲ درصد افزودنی روان کننده تکرار شد و مقاومت فشاری ۱۵۰ مگاپاسکال به دست آمد. بنابراین با توجه به نتایج آزمایش مقاومت فشاری، همین طرح را به عنوان طرح بتن فوق توانمند انتخاب و آزمایشات بیشتر بر روی آن انجام گرفت.

۴-۲ ساخت نمونه ها و عمل آوری

هدف انجام آزمایش های مقاومت فشاری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه، مقاومت کششی ۱۴ و ۲۸ روزه و مقاومت خمشی ۲۸ روزه می باشد. باید از قبل قالب های مربوطه آماده شده باشد، آزمون ها شامل ۹ عدد مکعبی مربعی ۱۰ سانتی، ۶ آزمون بریکت کششی ملات استاندارد و ۳ آزمون خمشی. پس از اتمام میکس، قالب های مکعبی مربعی و مستطیلی روغن کاری شده، جهت پر شدن بر روی میز ویبره قرار داده می شوند و به مدت ۵۰ ثانیه ویبره زده می شود. همچنین برای قالب بریکتی طبق استاندارد ASTM C190 بتن داخل قالب ریخته و با استفاده از انگشت شست ۱۲ ضربه جهت ایجاد تراکم کافی به آن زده می شود. پس از اتمام بتن ریزی همه آن ها به مدت دو روز در قالب ماندند. پس از قالب برداری به مدت ۲۶ روز در حوضچه عمل آوری آب با دمای ۲۳ درجه سانتی گراد نگهداری شدند. با اتمام دوره عمل آوری آن ها، همه آزمون ها جهت آزمایش های مقاومت فشاری، کششی و خمشی از آب خارج شدند.

۳- نتایج آزمایش

۳-۱ خواص بتن تازه

روانی بتن فوق توانمند طبق استاندارد ASTM C۱۴۳۷ برابر با ۱۳۵ میلی متر به دست آمد. این میزان روانی نشان از کارایی تقریباً متوسط طرح مخلوط دارد.

۳-۲ خواص بتن سخت

۳-۲-۱ مقاومت فشاری

مهم ترین آزمایش برای تعیین کیفیت بتن مثل مشخصات مکانیکی و دوامی، مقاومت فشاری می باشد. نتایج آزمایش مقاومت فشاری می تواند به عنوان پایه ای برای کنترل کیفیت بتن، نسبت های اختلاط، روش مخلوط کردن، ریختن بتن و اثرات افزودنی باشد. با توجه به پژوهش های انجام گرفته تأثیر ابعاد نمونه در مقاومت فشاری بتن فوق توانمند، ناچیز می باشد. گریبل نشان داده است که می توان از قالب مکعبی ۱۰ سانتی متری به جای قالب استوانه ای استاندارد (قطر ۱۰ سانتی متری) استفاده کرد [۱۹].

طبق استاندارد ASTM C۳۹ بر روی ۱۲ آزمونه مکعبی ۱۰ سانتی متری، آزمایش مقاومت فشاری ۷ و ۱۴ و ۲۸ روزه انجام گرفت. نتایج بر روی جدول ۸ قابل مشاهده است:

جدول ۸- مقاومت فشاری نمونه ها بر اساس سن بتن

سن نمونه	وزن مخصوص (kg/m^3)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت فشاری میانگین (MPa)
۷ روزه	۲۴۳۴	۱۱۲٫۹	۱۱۳٫۳
	۲۴۴۹	۱۱۵٫۱	
	۲۴۵۰	۱۱۱٫۹	
۱۴ روزه	۲۴۵۴	۱۲۲٫۹	۱۲۳٫۹
	۲۴۶۰	۱۲۹٫۵	
	۲۴۳۲	۱۱۹٫۴	
۲۸ روزه	۲۴۲۵	۱۵۶٫۲	۱۶۳
	۲۴۳۰	۱۶۴	
	۲۴۰۹	۱۶۹	

شایان ذکر است که شکست نمونه های بتنی با صدای انفجار همراه بوده اما به دلیل وجود الیاف هیچ گونه پرتاب تکه های شکسته شده دیده نشد. ملاحظه می شود که طرح بتن فوق توانمند ۷۰ درصد مقاومتش را طی ۷ روز و ۷۶ درصد آن را طی ۱۴ روز کسب می کند.

۳-۲-۲ مقاومت کششی

طبق استاندارد ASTM C۱۹۰ آزمایش کششی باید با سرعت 110 ± 2640 نیوتون بر دقیقه انجام گیرد. نتایج مقاومت کششی برای نمونه های ۱۴ روزه و ۲۸ روزه در جدول ۱۴ نشان داده شده است:

جدول ۱- مقاومت کششی نمونه‌ها بر اساس سن بتن

شماره آزمون	مقاومت کششی (MPa)	مقاومت کششی میانگین (MPa)
۱۴ روزه	۶,۵	۷,۷
	۹,۱	
	۷,۵	
۲۸ روزه	۸,۴۸	۹,۲۶
	۹,۸۳	
	۹,۴۸	

نحوه شکست نمونه کششی به گونه ای بود که بعد از رخداد اولین ترک، باز هم توانایی تحمل تنش کششی از خود نشان داد و تنش کششی بیشتر و بیشتر شد تا اینکه در مقاومت کششی به گسیختگی رسید. به‌طور متوسط می‌توان گفت که مقاومت کششی بتن فوق‌توانمند در حدود ۷ تا ۱۰ مگاپاسکال می‌باشد. برای طرح حاضر این عدد برابر با ۹,۲۶ مگاپاسکال می‌باشد، این در حالی است که ۸۳ درصد مقاومت کششی خود را ظرف ۱۴ روز اول بدست آورده است.

۳-۲-۳ مقاومت خمشی

با توجه به استاندارد ASTM C۲۹۳ نمونه‌های منشوری با مقطع ۱۰۰×۱۰۰×۵۰۰ میلی‌متر برای انجام آزمایش در نظر گرفته شد در این روش نمونه منشوری به طور افقی زیر جک روی دو تکیه گاه قرار می‌گیرد و بار در یک نقطه به وسط دهانه اعمال می‌شود تا نمونه گسیخته شود. مقاومت خمشی از رابطه ۴ بدست می‌آید:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (۴)$$

R بیانگر مدول گسیختگی بر حسب MPa، P حداکثر نیروی تحمل شده توسط نمونه بر حسب N، L طول دهانه، b میانگین عرض، d میانگین ارتفاع نمونه که همگی بر حسب mm می‌باشد.

نمونه های بتنی فوق توانمند پس از گسیختگی (اولین ترک) نیز توانایی تحمل بار تا گسیختگی نهایی را دارا می‌باشد. برای طرح مخلوط موردنظر مقاومت خمشی میانگین ۳ آزمون برابر با ۱۶,۴ مگاپاسکال آمد. این در حالی است که برای بتن های فوق توانمند به طور متوسط بین ۱۴ تا ۱۹ مگاپاسکال می‌باشد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای طرح مخلوط بتن فوق توانمند از مدل A&A اصلاح شده استفاده شد:

۱- ساخت بتن فوق توانمند فقط ترکیب سنگدانه و سیمان و میکروسیلیس کنار همدیگر نمی‌باشد، بلکه باید اصل چگالی تراکمی براساس چینش صحیح ذرات کنار یکدیگر و دانه‌بندی اصولی از بزرگترین تا ریزترین، در صدر الویت‌ها قرار بگیرد.

۲- صحت مدل A&A اصلاح شده برای طرح مخلوط بتن فوق توانمند با مصالح داخلی، در محدوده آزمایشات انجام گرفته مورد تائید قرار گرفت. ازاین‌رو با رعایت اصل چگالی تراکمی پیشینه، با داشتن دانه‌بندی مصالح محلی و انواع پوزولان ها و مواد پودری و عدم الزام به بعضی محدودیت‌های خاص از قبیل اندازه ذرات مصالح، می‌توان بتن‌هایی با مقاومت بسیار بالا ساخت. این امر که منجر به طرح اصولی و راحت بتن فوق توانمند می‌شود، مطلوب کارفرمایان و پیمانکاران بوده و به فراگیری بتن فوق توانمند کمک شایانی می‌کند.

۳- مقدار بهینه مدول توزیع در مدل A&A اصلاح شده برابر با ۰,۲۲ به دست آمد که مورد تائید پژوهش‌های قبلی می‌باشد [۱۸].

۴- استفاده از مدل A&A اصلاح شده برای طراحی بتن فوق توانمند منجر به صرفه جویی در زمان و هزینه شده و با کمترین نیاز به تست و خطای آزمایشگاهی انجام می گیرد.

۵- از نظر مقاومت مکانیکی، بتن فوق توانمند مورد نظر، در رده متوسط به بالای بتن های فوق توانمند حال حاضر قرار می گیرد و از نظر طرح مخلوط، با توجه به مزایای زیر جزء بتن های ایده ال حساب می شود:

- عیار سیمان بسیار پایین طرح مخلوط هم از لحاظ اقتصادی به صرفه تر است و هم از نظر آلودگی محیط زیستی و انتشار گاز کربن دی اکسید، آسیب کمتری نسبت به طرح های دیگر بتن فوق توانمند می رساند. ثانیاً موجب استفاده کمتر خمیر سیمان در بتن شده، بنابراین منجر به کاهش حرارت هیدراسیون و ریز ترک ها، کاهش جمع شدگی خود به خودی و خزش به میزان قابل توجهی می شود.

- مقدار بهینه افزودنی روان کننده، شامل ۲ درصد افزودنی روان کننده به دست آمد، که طبق پژوهش های وایل [۵] در محدوده بهینه قرار گرفته است.

۵- تقدیر و تشکر

از شرکت آرینا پلیمر، شیمی ساختمان و صنایع سیمان شهر کرد جهت همکاری در تأمین مصالح مورد نیاز، کمال تشکر و قدردانی را داریم.

۶- مراجع

[۱] Kwan A, Li L, Fung W. (۲۰۱۲). "Wet packing of blended fine and coarse aggregate". Materials and structures.; ۴۵(۶): ۸۱۷-۲۸.

[۲] RILEM T. CPC ۱۱,۳ (۱۹۸۴). "Absorption of water by concrete by immersion under vacuum",. RILEM Recommendation for the Testing and Use of Constructions Materials, E & FN SPON: London. ۱۹۹۴: ۳۶-۷.

[۳] Schmidt M, Fehling E. (۲۰۰۵). "Ultra-high-performance concrete: research, development and application in Europe". ACI Special publication.; ۲۲۸: ۵۱-۷۸.

[۴] Sohail MG, Wang B, Jain A, Kahraman R, Ozerkan NG, Gencturk B, et al. (۲۰۱۸). "Advancements in Concrete Mix Designs: High-Performance and Ultrahigh-Performance Concretes from ۱۹۷۰ to ۲۰۱۶". Journal of Materials in Civil Engineering.; ۳۰(۳).

[۵] Wille K, Naaman AE, Parra-Montesinos GJ. (2011). "Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding ۱۵۰ MPa (۲۲ ksi): A Simpler Way". ACI materials journal.; ۱۰۸(۱)

[۶] Fennis SA, Walraven JC. (۲۰۱۲). "Using particle packing technology for sustainable concrete mixture design". Heron, ۵۷ ۲. ۲۰۱۲.

[۷] Feret R. (۱۸۹۷). "Etude sur la constitution intime des mortiers hydrauliques". Bulletin de la Societe d'Encouragement pour l'Industrie Nationale.; ۹۶: ۱۵۹۱-۶۲5.

[۸] Fuller WB, Thompson SE. (۱۹۰۷). "The laws of proportioning concrete"..

[۹] Andreasen A. (۱۹۳۰). "Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)". Kolloid-Zeitschrift.; ۵۰(۳): ۲۱۷-۲۸.

[۱۰] Brouwers H, Radix H, editors. (۲۰۰۵). "Self-compacting concrete: the role of the particle size distribution". First International Symposium on Design, Performance and Use of SCC, Hunan, China;.

[۱۱] Funk JE, Dinger DR. (۲۰۱۳). "Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing": Springer Science & Business Media;.

- [۱۲] Hunger M. (۲۰۱۰). "An integral design concept for ecological self-compacting concrete"..
- [۱۳] Yu R, Spiesz P, Brouwers H. (۲۰۱۴). "Mix design and properties assessment of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC)". Cement and concrete research.; ۵۶:۲۹-۳۹.
- [۱۴] Van Tuan N, Ye G, Van Breugel K, Fraaij AL, Dai Bui D. (۲۰۱۱). "The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete". Construction and Building Materials.; ۲۵(۴):۲۰۳۰-۵.
- [۱۵] Yu R, Spiesz P, Brouwers H. (۲۰۱۵). "Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres". Construction and building materials.; ۷۹:۲۷۳-82.
- [۱۶] Brouwers HJH, Radix HJ. (۲۰۰۵). "Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study". Cement and Concrete Research. ۳۶-۲۱۱۶: (۱۱) ۳۵۰.
- [۱۷] Brouwers H. (۲۰۰۶). "Particle-size distribution and packing fraction of geometric random packings. Physical review" E.; ۷۴(۳): ۰۳۱۳۰۹.
- [۱۸] Silva AP, Pinto DG, Segadães AM, Devezas TC. (۲۰۱۰). "Designing particle sizing and packing for flowability and sintered mechanical strength". Journal of the European Ceramic Society.; ۳۰(۱۴): ۲۹۵۵-۶2.
- [۱۹] Graybeal B, Davis M. (۲۰۰۸). "Cylinder or cube: strength testing of ۸۰ to ۲۰۰ MPa (۱۱,۶ to ۲۹ ksi) ultra-high-performance fiber-reinforced concrete". ACI Materials Journal.; ۱۰۵(۶): ۶۰۳.
- [۲۰] Rafiee, Alireza. (۲۰۱۲). "Computer modeling and investigation on the steel corrosion in cracked ultra high performance concrete". kassel university press GmbH ;
- [۲۱] جعفری نژاد، س. (۱۳۹۶). "بررسی آزمایشگاهی مقاومت پیوستگی بین بتن معمولی و بتن فوق توانمند". پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه تهران.
- [۲۲] موسوی، م. (۱۳۸۸). "تاثیر مشخصات سنگدانه بر ویژگی های رئولوژیکی و مکانیکی بتن خودتراکم مورد کاربرد در سرریز سدهای بتنی". پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه تهران.
- [۲۳] حاجی اسمعیلی، ا. (۱۳۹۴). "بررسی آزمایشگاهی و عددی رفتار تیرهای ساخته شده از بتن فوق توانمند". پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه تهران.
- [۲۴] حسین پناهی، آ. (۱۳۹۶). "مطالعه تحلیلی و آزمایشگاهی طرح مخلوط بهینه بتن از طریق بهینه سازی ساختار جامد". پایان نامه مقطع کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه، دانشگاه تهران.