بررسی اثر چگالی تراکم سنگدانه‌ها بر مشخصات مخلوط‌های بتن با کارایی بالا

چکیده

هدف این مطالعه، بررسی تاثیر چگالی تراکم خشک[1] سنگدانه‌ها بر روی مشخصات مکانیکی و دوام مخلوط‌های بتن با کارایی بالا[2] است. بدین منظور چهار نوع دانه‌بندی شامل منحنی ایده‌آل فولر-تامپسون[3] (F)، منحنی ایده‌آل اندریسن-اندرسن[4] (A) و حالت‌های اصلاح یافته‌ی آن‌ها، فانک[5] و دینگر[6]، (MA و MF) مورد بررسی قرار گرفتند. نتیجه‌ی چگالی خشک تراکم دانه‌بندی‌های سنگدانه به صورت A>F>MA>MF بود. اگر چه بر خلاف نتایج چگالی خشک تراکم منحنی MF نسبت به سایر دانه‌بندی‌ها در دوام و مشخصات مکانیکی بهتر بود. به علاوه، مخلوط با منحنی اندریسن-اندرسن (A) مقاومت‌های فشاری کم‌تر و قابلیت انتشار[7] بالاتری داشت. بنابراین نتایج نشان داد که چگالی تراکم سنگدانه‌های خشک نمی‌تواند شاخص چگالی تراکم بتن و به و در نتیجه دوام و مشخصات بتن با کارایی بالا باشد. علاوه بر این اختلافات بین مشخصات مخلوط در نسبت‌های آب به سیمان پایین‌تر و به ویژه نسبت آب به سیمان ۰/۳۱ مشهودتر بودند. به عنوان مثال اختلاف بین مقاومت فشاری مخلوط‌های بتن با کارایی بالا با منحنی‌های دانه‌بندی MF و A پس از ۲۸ روز حدود ۱۴ مگاپاسکال بود. این مطالعه بر روی مخلوط‌های بتن با مقاومت‌های فشاری بالاتر از ۱۱۰ مگاپاسکال انجام شده است.

۱-مقدمه

چگالی تراکم به صورت نسبت حجم جامد به کل حجم تعریف می‌شود. بهینه‌سازی چگال تراکم به معنی انتخاب درست اندازه و مقدار ذرات است [۱]. از آن‌جایی که سنگدانه‌ها ۶۰ تا ۸۰ درصد حجم بتن را تشکیل می‌دهند، بهینه‌سازی نسبت‌بندی سنگدانه یک معیار مهم در بهبود چگالی تراکم بتن خواهد بود. به عبارت دیگر، ذرات باید به صورتی انتخاب شوند تا ذرات کوچک‌تر بتوانند فضای خالی بین ذرات بزرگ‌تر را پر نمایند [۲]. علاوه بر آن، چگالی ترام سنگدانه و دانه‌بندی اثرات مهمی بر مشخصات بتن دارند [۵-۳].

1 Dry packing density
2 High Performance Concrete (HPC)
3 Fuller-Thompson
4 Andreasen-Andersen
5 Funk
6 Dinger
7 diffusivity

سنگدانه‌هایی با چگالی تراکم بالا، مقدار حفرات کم‌تری دارند که این امر سبب می‌شود مقدار چسب سیمان کم‌تری برای پر کردن فضاهای خالی نیاز باشد که مخلوط را اقتصادی تر می‌نماید. از این رو، افزایش چگالی تراکم به منظور تهیه‌ی مواد مرکب[1] مانند سرامیک[2] و بتن بسیار مهم است [۶].

گلاویند[3] و پدرسن[4] [۷] نشان داده‌اند که چگالی تراکم اثرات قابل‌توجهی بر بتن تازه و سخت شده دارند.

چگالی تراکم می‌تواند به صورت آزمایشگاهی و تئوری بررسی شود [۸]. اگر چه روش‌های تئوری چندین محدودیت در پیش‌بینی چگالی تراکم دارند [۹ و ۱۰]. استفاده از این روش‌ها دشوار است، برنامه‌های نرم‌افزاری باید توسعه یابند و فرضیات ایده‌آل‌سازی باید در نظر گرفته شوند. چندین دانه‌بندی سنگدانه به منظور افزایش چگالی تراکم بتن پیشنهاد شده است که از میان آن‌ها منحنی‌های دانه‌بندی فولر-تامپسون (F) و اندریسن-اندرسن (A) کاربرد گسترده‌ای در طرح اختلاط بتن پیدا کرده‌اند [۱۱]. دانه‌بندی‌های سنگدانه‌ی اشاره شده با استفاده از معادله‌ی (۱) توصیف می‌شوند.

$$p(d)=\left[\frac{d}{d_{max}}\right]^{q} \qquad (۱)$$

که در آن P خرده‌هایی که می‌توانند از الکی با قطر روزنه‌ی d عبور کنند؛ d_{max} حداکثر اندازه‌ی ذره‌ی سنگدانه‌ها و q برای منحنی‌های دانه‌بندی فولر-تامپسون و اندریسن-اندرسون به ترتیب دارای مقادیر ۰/۵ و ۰/۳۷ می‌باشد.

برای هر توزیع واقعی اندازه، یک محدوده‌ی پایین (d_{min}) باید در نظر گرفته شود. بنابراین در مقایسه با منحنی‌های ایده‌آل فولر-تامپسون و اندریسن-اندرسن، نیاز است تا کوچک‌ترین ابعاد ذرات نیز در کنار حداکثر اندازه‌ی آن‌ها در نظر گرفته شود. شکل اصلاح شده‌ی فانک و دینگر [۱۲] برای منحنی دانه‌بندی اشاره شده با استفاده از رابطه‌ی (۲) ارائه شده است.

$$p(d)=\frac{d^{q}-d_{min}{}^{q}}{d_{max}{}^{q}-d_{min}{}^{q}} \qquad (۲)$$

که در آن d_{min} برابر حداقل قطر ذره در منحنی دانه‌بندی است.

در سال‌های اخیر، به منظور دستیابی به چگالی تراکم بهینه، دانه‌بندی‌های مختلف سنگدانه مورد استفاده قرار گرفته است. یو[5] و دیگران از منحنی دانه‌بندی فانک و دینگر (معادله‌ی (۲)) با q=۰/۲۳ در بتن با کارایی فوق بالای مسلح شده با الیاف استفاده کردند. گزارش شده است که استفاده از منحنی دانه‌بندی فانک و دینگر

1 Composite materials
2 Ceramics
3 Glavind
4 Pedersen
5 Yu

می‌تواند یک اسکلت چگال از بتن با کارایی بسیار بالا را با استفاده از مقدار چسباننده[1]ی کم‌تر تولید کند [۱۳]. عبدالرحمن[2] و هیلرمیر[3] با استفاده از منحنی دانه‌بندی ایده‌آل فولر-تامپسون $[d/d_{max}]^{0.5}$، بتن با کارایی بالا با حداکثر مقاومت فشاری ۸۰ مگاپاسکال را تولید نمودند [۱۴]. جلال[4] و دیگران از منحنی دانه‌بندی رابطه‌ی (۱) با q=۰/۴۵ برای افزایش چگالی تراکم در بتن با کارایی بالا استفاده کردند [۱۵ و ۱۶].

بتن پلیمری با حداکثر مقاومت ۱۱۰ مگاپاسکال با استفاده از منحنی دانه‌بندی ایده‌آل فولر-تامپسون تولیده شده است [۱۷]. پرهیزکار[5] و دیگران [۱۸] به منظور افزایش دوام بتن با کارایی بالا تحت زوال اسیدی[6]، از منحنی دانه‌بندی فولر-تامپسون استفاده نمودند.

در برخی مطالعات، از منحنی‌های دانه‌بندی معادلات (۱) و (۲) به منظور تولید مواد مرکب سبک با مقاومت بهبود یافته در مقابل جداشدگی دانه‌ها[7] و نیز ویژگی‌های مهندسی بهتر استفاده شده است [۲۲-۱۹]. هم‌چنین پیشنهاد شده است که استفاده از منحنی‌های مناسب دانه‌بندی فانک و دینگر می‌تواند روانی[8] بتن خود متراکم را افزایش دهد [۲۳]. به منظور دستیابی به یک خمیر[9] بتن چگال متراکم با ویژگی‌های مکانیکی مناسب در بتن فوق سبک مسلح شده با الیاف، منحنی دانه‌بندی فانک و دیگنر با q=۰/۳۵ مورد استفاده قرار گرفته است [۲۴]. استفاده از منحنی دانه‌بندی فانک و دیگنر، چگالی تراکم سنگدانه‌ها و در نتیجه مقاومت فشاری بتن‌های با اسلامپ[10] صفر را افزایش داده است [۲۵ و ۲۶]. مدنی و دیگران [۲۷] از منحنی دانه‌بندی فانک و دیگنر با q=۰/۵ به منظور بررسی تاثیر ذرات فوق ریز بر مشخصات بتن استفاده کردند. در مخلوط‌های RCCP، معادله‌ی (۱) با مقدار ۰/۴۵ برای q پیشنهاد شده است [۲۸].

یو و دیگران [۲۹] از منحنی دانه‌بندی اصلاح شده‌ی اندریسن-اندرسن (دانه‌بندی فانک و دینگر با توان ۰/۳۷) برای طراحی خمیر بتن استفاده نمودند. آن‌ها با کاربرد مناسب این نوع منحنی دانه‌بندی به یک خمیر چگال دست یافتند که اثر چسبندگی و مقاومت قشاری و خمشی بالایی داشت. ونگ و دیگران [۳۰] اثر دانه‌بندی اندریسن-اندرسن را بر نفوذ کلر در بتن با کارایی فوق بالا بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که با استفاده از این منحنی، می‌توان بتنی با مقاومت بالا در برابر کلر به دست آورد. دانه‌بندی فولر-تامپسون به صورت گسترده توسط محققین برای توزیع اندازه‌ی ذرات مورد استفاده قرار گرفته است. گونزالز و دیگران [۳۱] مشخصات بتن با کارایی بالا تولید شده با سرامیک ریز بازیافتی و سنگدانه‌های مخلوط درشت را بررسی نمودند. آن‌ها گزارش کردند که منحنی فولر-تامپسون استفاده شده توانست منجر به مقادیر کم حجم خلل و فرج نفوذپذیر،

1 Binder
2 Abd-Elrahman
3 Hillemeier
4 Jalal
5 Parhizkar
6 Acid degradation
7 Segregation
8 Fluidity
9 Matrix
10 Slump

نفوذ یون کلر و جذب آب شود. هم‌چنین آن‌ها نشان دادند که مشخصات مکانیکی بیش‌تر از مقادیر بتن متداول است و مقاومت فشاری بتن پس از ۲۸ تا ۱۸۰ روز بالاتر نسبت به بتن متداول افزایش یافته است.

همانطور که نشان داده شد در سال‌های اخیر به منظور دستیابی به چگالی تراکم بالای مخلوط‌های بتن، دانه‌بندی‌های سنگدانه‌ی مختلفی استفاده و پیشنهاد شده است. اگر چه مشخص نیست که کدام منحنی دانه‌بندی، بیش‌ترین چگالی تراکم را در میان دیگ منحنی‌ها به منظور بهبود مشخصات بتن ایجاد می‌نماید. از طرفی دیگر، ارزیابی چگالی تراکم در حالت خشک، یک روش معمول است. هدف مطالعه‌ی موجود، بررسی اثر چگالی تراکم سنگدانه‌ها به عنوان ملاک تولید مخبوط‌های بتن با کارایی بالا می‌باشد. علاوه بر این، اختلافات بین اثرات دانه‌بندی‌های ایده‌آل گوناگون در مطالعات دیگر در نظر گرفته نشده است. در بیش‌تر مطالعات دیگر، یک منحنی ایده‌آل به منظور دستیابی به یک چگالی تراکم بالا استفاده شده است، در صورتی‌که مشخص نیست که کدام دانه‌بندی ایده‌آل می‌تواند عملکرد بهتری در بهبود دوام و مشخصات مکانیکی بتن با کارایی بالا داشته باشد.

در این تحقیق، انواع مختلف دانه‌بندی‌های سنگدانه با چگالی‌های تراکم مختلف شامل منحنی دانه‌بندی فولر-تامپسون (F)، منحنی دانه‌بندی اندریسن-اندرسن (A) و شکل‌های اصلاح شده‌ی آن‌ها (MA و MF) مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج می‌تواند در طراحی مخلوط‌های بتن با کارایی بالا کاربرد داشته باشد. در این مطالعه، به رابطه‌ی (۱) با توان ۰/۵، منحنی فولر و با توان ۰/۳۷، منحنی اندریسن گفته می‌شود. دانه‌بندی سنگدانه‌ی ارائه شده با رابطه‌ی (۲) با توان ۰/۵، منحنی فولر اصلاح شده و با توان ۰/۳۷، منحنی اندریسن اصلاح شده می‌باشد.

۲-دستور کار آزمایشگاهی

۲-۱-مشخصات مواد

در این مطالعه، از سیمان پرتلند I/42.5 مطابق با ASTM C150 [۳۲] در مخلوط‌های بتن استفاده شده است. دوده‌ی سیلیس[1] استفاده شده منطبق بر ASTM C1240 می‌باشد [۳۳] و از شرکت آلیاژی AZNA تامین شده است. همانند بررسی‌های مدنی و دیگران در سال ۲۰۱۲ [۳۴] و ۲۰۱۴ [۳۵]، به منظور استفاده از دوده‌ی سیلیس در مخلوط‌های بتن، این ماده با غلظت جرمی ۳۰ درصد با آب مخلوط و پس از آن با استفاده از یک مخلوط‌کن با برش بالا به مدت ۴ دقیقه پراکنده شده است. مشخصات شیمیایی و فیزیکی دوده‌ی سیلیکا و سیمان در جدول (۱) نشان داده شده است.

1 Silica fume

جدول ۱ مشخصات فیزیکی و ترکیبات شیمیایی سیمان و دوده‌ی سیلیس

مشخصات	سیمان	دوده‌ی سیلیس
سیلیس (SiO_2)	۲۱/۲	۹۲/۳
اکسید آهن (Fe_2O_3)	۳/۸	۱
آلومینا (Al_2O_3)	۴/۶	۱/۳
کلسیم اکسید (CaO)	۶۲	۱/۶
اکسید منیزیم (MgO)	۱/۴	۰/۹
سولفور تری اکسید (SO_3)	۲/۴۵	۰/۱۱
اکسید سدیم (Na_2O)	۰/۲۸	۰/۲۵
اکسید پتاسیم (K_2O)	۰/۵۹	۰/۷۹
تقلیل وزن حرارتی	۱/۰۲	۱/۵۳
مقدار رطوبت	۰/۳	۰/۲
مساحت سطح (m^2/g)	۰/۳۱۴	۲۱

سنگدانه‌ی ریز، ماسه‌ی سیلیس با حداکثر ابعاد ۴/۷۵ میلی‌متر، چگالی خشک سطح اشباع ۲۶۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۲/۰۳ درصد و سنگدانه‌ی درشت، قطعه سنگ سیلیسی با حداکثر اندازه‌ی ۱۹ میلی‌متر، چگالی خشک سطح اشباع ۲۶۳۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب ۰/۹ درصد بودند. از فوق روان کننده دارای اتر پلی‌کربکسیلیکی[1] به منظور رسیدن به روانی موردنظر در مخلوط‌ها استفاده شده است. هم‌چنین از پودر سیلیس به منظور تنظیم ابعاد ذرات ریز در دانه‌بندی‌های سنگدانه استفاده شده است. توزیع اندازه‌های پودر سیلیس، سیمان و دوده‌ی سیلیس با استفاده از طیف‌سنج لیزری انکساری[2] مطابق با شکل (۱) به دست آمده است.

۲-۲- طرح اختلاط و آماده‌سازی نمونه‌ها

مخلوط‌های بتن با استفاده از سه مقدار مختلف نسبت آب به سیمان ۰/۳۱، ۰/۳۸ و ۰/۴۵ آماده شدند. مقدار مواد سیمانی، سطح ثابت ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شد. ۱۲ مخلوط بدون دوده‌ی سیلیس و ۱۲ مخلوط با دوده‌ی سیلیس جایگزین ۶ درصد سطح سیمان طراحی شدند. مراحل تهیه‌ی مخلوط‌ها در این مطالعه به صورت زیر است:

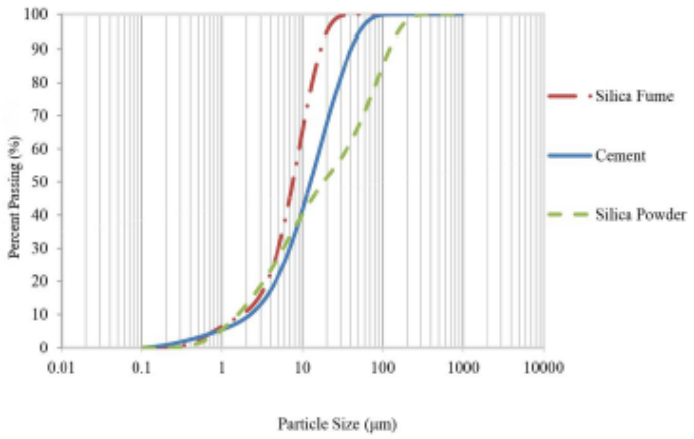
۱. مخلوط اجزای خشک در مخلوط‌کن به مدت ۱/۵ دقیقه

1 Polycarboxylic ether
2 Laser diffraction spectrometry

۲. افزودن دوغاب آب و دوده‌ی سیلیس به اجزای خشک

۳. هم زدن مخلوط به مدت ۲ دقیقه به همراه افزودن فوق روان‌کننده به منظور دستیابی به روانی مورد نظر

۴. ادامه‌ی هم‌زدن به مدت ۴ دقیقه‌ی دیگر



شکل ۱ توزیع‌های اندازه‌ی ذرات پودر سیلیس، دوده‌ی سیسلیس و سیمان

باید ذکر شود که مقدار آب در دوغاب دوده ی سیلیس به عنوان بخشی از آب اختلاط در نظر گرفته می‌شود. ویژگی‌های اختلاط در جدول (۲) ارائه شده است. برای تمام مخلوط‌ها، اسلامپ در محدوده‌ی ثابت ۲۰±۱۲۰میلی‌متر نگه داشته شده است. به منظور کمینه کردن تبخیر آب، تمام نمونه‌ها ۲۴ ساعت پس از قالب‌بندی[1]، پوشیده شدند. پس از باز کردن قالب‌ها[2]، نمونه‌ها با استفاده از آب دارای کلسیم هیدروکسید[3] اشباع تا زمان آزمایش در دمای ۲±۲۲ درجه‌ی سانتی‌گراد عمل‌آوری[4] شدند.

1 Casting
2 Demolding
3 Calcium Hydroxide (CH)
4 Curing

جدول ۲ نسبت‌های اختلاط مخلوط‌های بتن

اختلاط	سیمان (Kg/m^3)	دوده سیلیس (Kg/m^3)	پودر سیلیس (Kg/m^3)	سنگدانه ریز (Kg/m^3)	سنگدانه درشت (Kg/m^3)	آب (Kg/m^3)	فوق روان کننده (Kg/m^3)
MA-.37-.45	400	-	72	884	854	180	1.7
MF-.5-.45	400	-	36	774	994	180	1
A-.37-.45	400	-	272	847	697	180	3.1
F-.5-.45	400	-	145	732	946	180	2
MA-.37-.38	400	-	76	938	888	152	4.4
MF-.5-.38	400	-	37	882	1036	152	2.8
A-.37-.38	400	-	284	888	722	152	6.4
F-.5-.38	400	-	151	754	981	152	4
MA-.37-.31	400	-	78	966	923	124	8
MF-.5-.31	400	-	40	846	1079	124	4.8
A-.37-.31	400	-	295	924	750	124	12
F-.5-.31	400	-	157	786	1020	124	6.8
MA-.37-.45-SF	376	24	72	886	848	180	2.2
MF-.5-.45-SF	376	24	36	775	989	180	1.35
A-.37-.45-SF	376	24	272	846	688	180	3.7
F-.5-.45-SF	376	24	145	723	936	180	2.4
MA-.37-.38-SF	376	24	76	928	883	152	4.9
MF-.5-.38-SF	376	24	37	813	1030	152	3.5
A-.37-.38-SF	376	24	281	880	717	152	7.2
F-.5-.38-SF	376	24	149	747	974	152	5.3
MA-.37-.31-SF	376	24	78	957	918	124	9
MF-.5-.31-SF	376	24	40	846	1071	124	5.8
A-.37-.31-SF	376	24	295	922	746	124	13.1
F-.5-.31-SF	376	24	157	784	1014	124	7.6

۲-۳-روش‌های آزمایش

۲-۳-۱-چگالی تراکم

در این مطالعه، ابتدا سنگدانه‌ها با قرار دادن آن‌ها درون اون در دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۲۴ ساعت خشک و بر اساس دانه‌بندی‌های ایده‌آل سنگدانه، مخلوط شدند؛ پس از آن، سنگدانه‌ها درون یک محفظه‌ی فولادی ۴ لیتری ریخته و وزن شدند. در زمان دیگر، محفظه‌ی فولادی در دو لایه با سنگدانه‌های مخلوط شده پر شد و هر لایه روی میز لرزان قرار گرفته و به مدت ۳۰ ثانیه ویبره خورد. با دانستن جرم هر نوع از سنگدانه و حجم محفظه، مقدار فضای خالی و چگالی تراکم سنگدانه‌ها محاسبه شده است (روابط (۳) و (۴)) [۳۶].

$$void\ content\ (e) = V_C - \left((M_1/G_1) + (M_2/G_2) + (M_3/G_3) \right) / V_C \qquad (۳)$$

$$PF = 1 - void\text{-}content \qquad (۴)$$

که در آن V_c حجم محفظه، M_1، M_2 و M_3 جرم هر نوع از سنگدانه، G_1، G_2 و G_3 جرم‌های مخصوص انواع سنگدانه‌ی مربوط هستند.

همانطور که قبلا اشاره شد انواع مختلف دانه‌بندی‌های سنگدانه به طور گسترده در این مطالعه استفاده شده است. اگر چه هنوز مشخص نیست که کدام دانه‌بندی، چگالی تراکم و نیز مشخصات دوام بیش‌تری را دارد؛ از این رو این مطالعه اثر چگالی تراکم دانه‌بندی دانه‌بندی‌های سنگدانه بر مشخصات بت‌های با کارایی بالا بررسی شده است. برای این منظور، انواع مختلف منحنی‌های دانه‌بندی شامل فولر-تامپسون (F)، فولر-تامپسون اصلاح شده (MA)، اندریسن-اندرسن (A) و اندریسن-اندرسن اصلاح شده (MA) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. قابل‌توجه‌ترین اختلاف بین دانه‌بندی‌ها مختص ابعاد کم‌تر از ۱۵۰ میکرومتر است. برای نمونه مخلوط‌های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۸ و دانه‌بندی‌های سنگدانه‌ی A، F، MA، MF مقادیر پودر به ترتیب ۲۸۴، ۱۵۰، ۷۶ و ۳۷ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد. منحنی‌های اصلاح شده‌ی اندریسن-اندرسن و فولر-تامپسون (منحنی‌های فانک و دیگنر به ترتیب با توان‌های ۰/۳۷ و ۰/۵) مطابق رابطه‌ی (۲) به ذراتی ریزتر از ۷۵ میکرومتر در دانه‌بندی‌های خود نیاز ندارند؛ بنابراین بنابراین این امکان وجود دارد که سنگدانه‌های درشت‌تر بدون وجود پودر سنگ یا ماسه‌ی فوق ریز در مخلوط باشند. جدول (۳) دانه‌بندی‌های ایده‌آل بررسی شده در این تحقیق نشان داده شده‌اند.

جدول ۳ درصد عبوری سنگدانه‌ها در منحنی‌های دانه‌بندی

منحنی دانه‌بندی	اندازه الک								
	19	12.7	9.525	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
MA-0.37	100	84.1	74.1	54.0	38.3	26.3	17.2	9.9	4.3
MF-0.5	100	80.5	68.8	46.7	30.9	19.9	12.3	6.7	2.8
A-0.37	100	86.2	77.5	59.9	46.2	35.8	27.8	21.5	16.7
F-0.5	100	81.8	70.8	50.1	35.2	24.9	17.8	12.6	8.9

۲-۳-۲- مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در زمان‌های ۳، ۷، ۲۸، ۹۰ و ۳۶۵ روزه بر اساس BS EN 12390-3 مشخص می‌شوند [۳۷]. در هر کدام از زمان‌ها، چهار نمونه‌ی مکعبی با ابعاد ۱۰۰ میلی‌متری مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

۲-۳-۳- آزمایش سریع جابه‌جایی کلر (RCMT)

آزمایش سریع جابه‌جایی کلر[1] مطابق NT BUILD 492 [۳۸] در بتن با عمر ۲۸ و ۹۰ روزه انجام می‌گیرد. برای هر مخلوط، ۳ نمونه به منظور اندازه‌گیری مقاومت ویژه‌ی بتن در مقابل کلر آزمایش شده‌اند. در این روش، انتشار یون‌های کلر به داخل یک حلقه‌ی بتنی با ضخامت ۵۰ میلی‌متر با اعمال یک پتانسیل الکتریکی خارجی به مدت زمان مشخص، شتاب‌دار شده‌اند. در پایان آزمایش، عمق متوسط انتشار کلر با استفاده از دو

1 Rapid Chloride Migration Test (RCMT)

نیم کردن نمونه و اسپری کردن ۰/۱ جرم مولی نیترات نقره بر سطوح شکسته اندازه گیری می‌شود. ضریب جابه‌جایی کلر با استفاده از رابطه‌ی (۵) برآورد می‌شود [۳۸].

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)\times L}{(U-2)\times t}\times(X_d - 0.0238)\times\sqrt{\frac{(273+T)\times L\times X_d}{U-2}} \qquad (۵)$$

$$D_{nssm}: Non-steady-state\ migration\ coefficient,\ \times 10^{-12} m^2/s$$

U: مقدار مطلق ولتاژ اعمالی، ولت؛

T: مقدار مطلق دماهای ابتدایی و نهایی در محلول آند، درجه‌ی سانتی‌گراد؛

L: ضخامت نمونه‌ها، میلی‌متر؛

X_d: مقدار متوسط عمق‌های نفوذ، میلی‌متر؛

t.: مدت زمان آزمایش، ساعت

۲-۳-۴- حفرات نفوذپذیر

مقدار حفرات نفوذپذیر[۱] بر اساس ASTM C642 در بتن با عمر ۲۸ و ۹۰ روزه مشخص شده است. در این روش، نمونه‌های استوانه‌ای با ارتفاع ۵۰ و قطر ۱۰۰ میلی‌متر تا رسیدن به یک وزن ثابت در دمای ۱۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد در اون خشک شده‌اند. پس از آن نمونه‌ها تا زمان رسدن به یک وزن ثابت در آب غوطه‌ور شدند. مقدار حفرات نفوذپذیر به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$Permeable\ voids\ (\%) = \frac{g_2 - g_1}{g_2}\times 100 \qquad (۶)$$

$$g_1: Bulk\ density,\ dry = \left[\frac{A}{(C-D)}\right]\times\rho \qquad (۷)$$

$$g_2: Apparent\ density,\ dry = \left[\frac{A}{(A-D)}\right]\times\rho \qquad (۸)$$

A: جرم نمونه‌ی خشک شده در اون در هوا، گرم؛

C: جرم نمونه با سطح خشک در هوای آزاد پس از غوطه‌وری و جوشیدن، گرم

D: جرم ظاهری نمونه در آب پس از غوطه‌وری و جوشیدن، گرم

ρ : چگالی آب= ۱میلی‌گرم بر مترمکعب=۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب

[۱] Permeable voids

g_1.: چگالی بالک، در حالت خشک

g_2.: چگالی ظاهری

۲-۳-۵- چگالی خشک

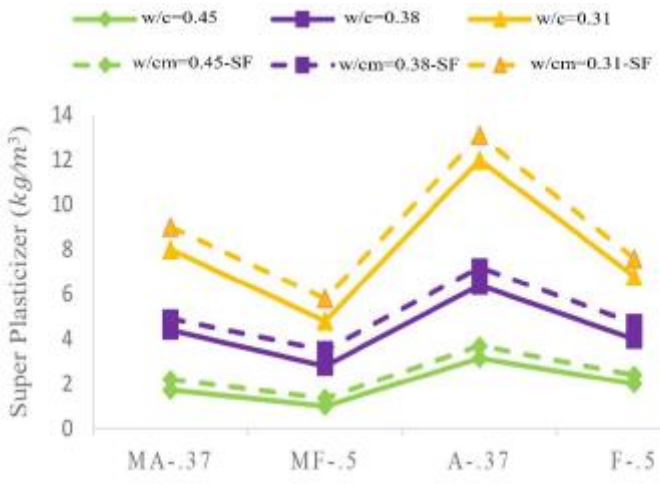
چگالی خشک مطابق با BS EN 12390-7 [۴۰] اندازه‌گیری شده است.

۳-نتایج و بررسی

۳-۱- آب موردنیاز مخلوط‌های بتن

مقادیر فوق‌روان‌کننده در مخلوط‌ها در شکل (۲) ارائه شده است. نتایج مشخص کردند که بتن‌هایی با منحنی‌های دانه‌بندی اصلاح شده به مقدار آب کم‌تری در مقایسه با شکل‌های اصلاح نشده نیتز داشتند. بنابراین به نظر می‌رسد منحنی‌های دانه‌بندی اصلاح شده ممکن است اقتصادی‌تر باشند. در نسبت‌های یکسان آب به سیمان، مخلوط‌هایی با منحنی دانه‌بندی اصلاح شده‌ی فولر-تامپسون کم‌ترین و مخلوط‌هایی با منحنی دانه‌بندی اندریسن بیش‌ترین مقدار فوق‌روان‌کننده را نیاز داشتند. برای مثال، برای اختلاط‌هایی با دوده‌ی سیلیکا و نسبت آب به سیمان ۰/۳۱، مخلوط با منحنی اندریسون حدود ۱۲۵ درصد فوق‌روان‌کننده‌ی بیش‌تری در مقایسه با مخلوط با منحنی اصلاح‌شده‌ی فولر داشت. اگر چه با افزایش نسبت آب به سیمان، اختلاف‌ها کاهش می‌یابد. این اتفاق می‌تواند به ابعاد ریزتر منحنی دانه‌بندی اندریسن در مقایسه با دانه‌بندی‌های دیگر سنگدانه نسبت داده شود. نتیجه‌ی زیر برای مقدار آب موردنیاز مخوط‌های بتن به دست آمده است:

$$A > F \sim MA > MF \qquad (۹)$$

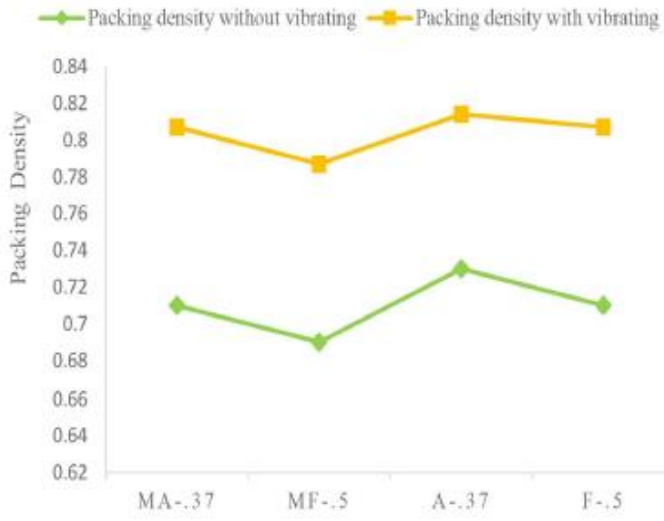


شکل ۲ مقایسه‌ی مقدار فوق‌روان‌کننده در نسبت‌های مختلف آب به سیمان

۳-۲- چگالی تراکم منحنی‌های دانه‌بندی سنگدانه‌های خشک

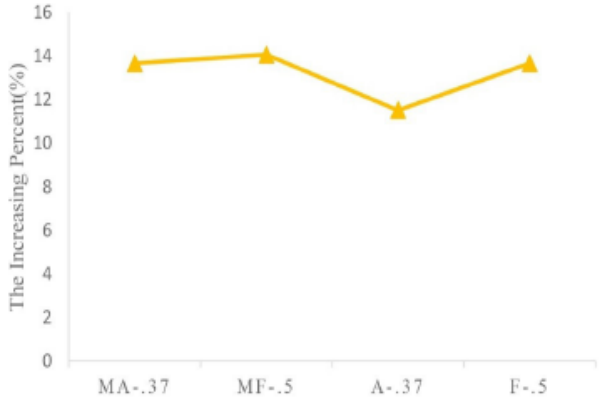
چگالی‌های تراکم دانه‌بندی‌های سنگدانه در شکل (۳) ارائه شده‌اند. همانطور که نشان داده شده است، مخلوط با سنگدانه‌های منحنی دانه‌بندی اندریسن بالاترین و منحنی دانه‌بندی اصلاح‌شده‌ی فولر-تامپسون، کم‌ترین مقدار چگالی تراکم را در میان منحنی‌های دانه‌بندی داشتند. منحنی دانه‌بندی اصلاح شده‌ی اندریسن و منحنی فولر مقادیر چگالی تراکم تقریبا یکسانی داشتند. نتیجه‌ی زیر برای حداکثر چگالی تراکم به دست آمده است:

$$A > F \sim MA > MF \qquad (۱۰)$$



شکل ۳ مقایسه‌ی چگالی تراکم در منحنی‌های دانه‌بندی مختلف

همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، ارتعاش مخلوط سنگدانه‌ها می‌تواند سبب افزایش ۲±۱۲ درصدی در چگالی تراکم تمام نمونه‌ها شود. اگرچه هم‌چنان روند مشابهی در رابطه‌ی (۷) مشاهده شده بود.

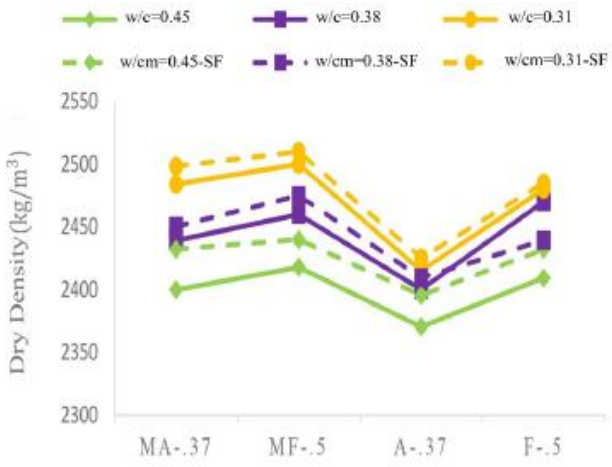


شکل ۴ بهبود سطح چگالی تراکم در مخلوط سنگدانه‌ی ویبره شده در مقایسه با سنگدانه‌های ویبره نشده

۳-۳- بررسی چگالی تراکم با در در نظر گرفتن چگالی خشک بتن سخت شده

همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، بر خلاف نتایج آزمایش چگالی تراکم سنگدانه‌ها، در نسبت آب به سیمان یکسان، مخلوط‌های بتن با منحنی اندریسن، پایین‌ترین و مخلوط‌های بتن با منحنی اصلاح‌شده‌ی فولر، بالاترین چگالی خشک را دارند. از آن‌جایی که چگالی خشک به صورت نسبت جرم جامد به حجم آن تعریف می‌شود؛ می‌توان نتیجه گرفت که در یک حجم ثابت، مخلوط‌هایی با منحنی اصلاح‌شده‌ی فولر، مقدار جامد بیش‌تری دارند. از این رو، منحنی اصلاح‌شده‌ی فولر باید چگالی‌های تراکم بالاتری را تولید کند. نتیجه‌ی چگالی تراکم مخلوط‌ها به صورت زیر نشان داده شده است:

$$MF > F \sim MA > A \qquad (۱۱)$$



شکل ۵ مقایسه‌ی بین چگالی‌های خشک مخلوط‌های بتن با کارایی بالا

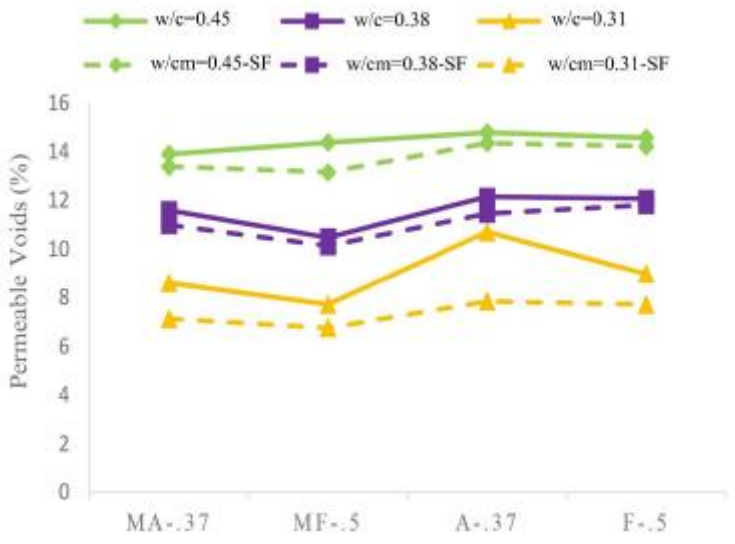
تعیین چگالی تراکم سنگدانه‌ها در حالت خشک، یک روش گسترده‌ی استفاده شده در مطالعات است [۳۶، ۴۱، ۴۲]. لازم است این موضوع در نظر گرفته شود که در ترکیب با خمیر سیمان، مقدار رطوبت و سطح تراکم سنگدانه‌ها تغییر می‌یابند؛ از ان رو چگالی تراکم با مقدار به دست آمده در حالت خشک متفاوت است. در نتیجه اختلافات بین نتیجه‌ی چگالی‌های تراکم به دست آمده در این بخش با نتایج قسمت قبل می‌تواند به دلیل تاثیر خمیر سیمان بر تراکم سنگدانه‌ها باشد. بایستی ذکر شود که کاهش نسبت آب به سیمان، و استفاده از دوده‌ی سیلیس منجر به افزایش مقادیر چگالی تراکم شده است.

۳-۴- حفرات نفوذپذیر

همانطور که در شکل (۶) نشان داده شده است، مخلوط‌هایی با دانه‌بندی اصلاح شده‌ی فولر-تامپسون، کم‌ترین حفرات نفوذپذیر را داشتند. عدم تطابق بین چگالی تراکم سنگدانه و حفرات نفوذپذیر بتن نشان می‌دهد که نتیجه‌گیری در مورد چگالی تراکم بتن با در نظر گرفتن چگالی تراکم سنگدانه‌های خشک، روش قابل اطمینانی نیست. مطابق با شکل (۶)، مخلوط‌هایی با منحنی دانه‌بندی اندریسن، بیش‌ترین حفرات نفوذپذیر را داشتند

و در نتیجه باید کم‌ترین چگالی تراکم را در میان سایر مخلوط‌ها داشته باشند. کم‌ترین مقدار حفرات نفوذپذیر معمولا به مخلوط‌هایی با منحنی دانه‌بندی اصلاح شده‌ی فولر-تامپسون مربوط بود. نتیجه‌زیر برای حفرات نفوذپذیر مخلوط‌ها به دست آمده است:

$$MF > F \sim MA > A \qquad (۱۲)$$



شکل ۶ حفرات نفوذپذیر مخلوط‌های بتن

استفاده از دوده‌ی سیلیس، حفرات نفوذپذیر را کاهش می‌دهد اما به اندازه‌ی نسبت آب به سیمان اثرگذار نیست. از طرفی دیگر، اثر دوده‌ی سیلیس بر کاهش حفرات نفوذپذیر به اندازه ی اثر آن در کاهش نفوذپذیری کلر قابل توجه نیست. دلیل این امر را می‌توان در اثر دوده‌ی سیلیس در تولید یک ساختار پیچاپیش متخلخل دانست. چندین مطالعه ی تحقیقاتی نشان داده‌اند که دوده‌ی سیلیس نمی‌تواند حجم تخلخل را کاهش دهد [۴۳].

۳-۵- مقاومت فشاری

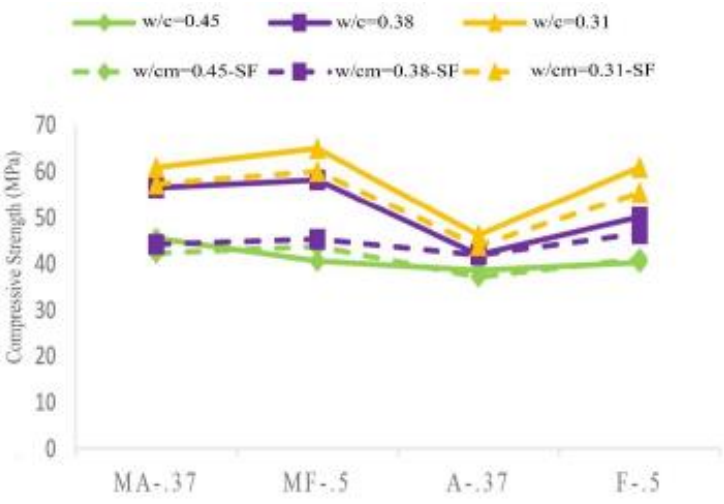
نتایج میانگین مقاومت‌های فشاری در مدت زمان ۳ تا ۳۶۵ روز در شکل (۷) ارائه شده‌اند. مطابق این شکل، در سه روز، مخلوط‌هایی با دانه‌بندی اندریسن کم‌ترین مقاومت فشاری را در میان مخلوط‌های دیگر داشت. دانه‌بندی های دیگر مقاومت فشاری تقریبا یکسانی داشتند، اگر چه در برخی موارد یک افزایش اندک در مقاومت فشاری در دانه‌بندی سنگدانه ی اصلاح‌شده‌ی فولر مشاهده شده است. با افزایش نسبت آب به سیمان، به خصوص در نسبت آب به سیمان برابر ۰/۴۵، اثر دانه‌بندی اندریسن در کاهش مقاومت فشاری از بین رفت و مقاومت‌های مشابهی در مقایسه با مخلوط‌های دیگر به دست آمد. روند زیر می‌تواند برای اثر دانه‌بندی‌های سنگدانه بر مقاومت‌های فشاری در سه روز در نظر گرفته شود.

$$MF \geq F \sim MA > A \quad (۱۳)$$

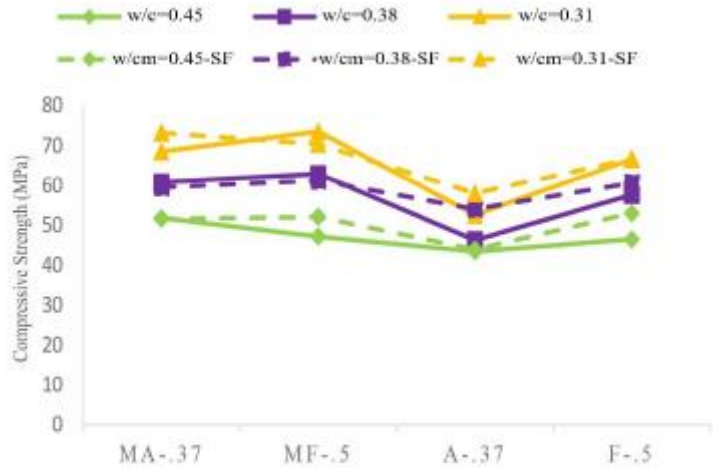
روند مشابهی با مقاومت فشاری به دست آمده در سه روز، در طول عمرهای بیش‌تر بتن نیز مشاهده شد و منحنی دانه‌بندی اندریسن، کم‌ترین مقاومت فشاری را در مقایسه با سایر دانه‌بندی‌ها در نسبت پایین آب به سیمان داشت. نتایج این بخش مطابقت مناسبی با نتایج به دست آمده از بخش ۳,۳ در مورد تاثیر دانه‌بندی سنگدانه بر چگالی تراکم بتن‌ها داشت. به عبارت دیگر، مخلوط‌هایی با دانه‌بندی اندریسن که کم‌ترین مقدار چگالی خشک (چگالی تراکم)، مقاومت‌های فشاری کم‌تری داشتند. لازم به ذکر است که منحنی اندریسن، بالاترین چگالی تراکم سنگدانه‌ها را داشت.

در مدت زمان‌هاب ۳ و ۸ روزه، مقاومت‌های فشاری مخلوط‌ها حتی با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵، بالاتر از به ترتیب بالاتر از ۴۰ و ۴۵ مگاپاسکال بودند. هم‌چنین، مقاومت‌های فشاری مخلوط‌های بتن با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱، مقاومتی بیش‌تر ۶۰ مگاپاسکال داشته‌اند. با افزایش عمر، مقاومت‌های فشاری افزایش یافته‌اند. بعد از ۳۶۵ روز، مخلوط‌هایی با منحنی دانه‌بندی اندریسن در نسبت آب به سیمام ۰/۴۵، کم‌ترین مقاومت فشاری را داشتند که برابر با ۶۰ مگاپاسکال بود. از این لحاظ، مخلوط‌های بتن بر اساس ACI 363-10 [۴۴] در محدوده‌ی بتن با کارایی بالا (پر مقاومت) قرار گرفتند. در ۳۶۵ روز، با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱، حداقل مقاومت فشاری بتن‌های دارای دوده‌ی سیلیس با دانه‌بندی اندریسون حدود ۸۲ مگاپاسکال و بیش‌ترین مقاومت برای مخلوط با دانه‌بندی اصلاح‌شده‌ی فولر حدود ۱۱۱ مگاپاسکال بودند. به عبارت دیگر، مخلوط با پایین‌ترین چگالی تراکم خشک سنگدانه‌ها (MF) در مقایسه با بیش‌ترین چگالی تراکم خشک سنگدانه‌ها (A) حدود ۳۰ درصد در مقاومت فشاری در نسبت‌های پایین آب به سیمان بهتر بودند.

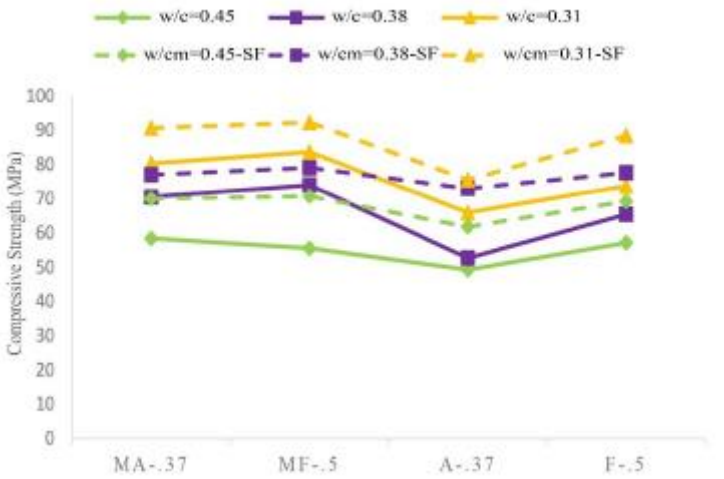
جایگزینی سیمان با دوده‌ی سیسلیس، اثر مثبتی بر مقاومت فشاری ۳ روزه نداشت و مقاومت‌های کم‌تری به دست آمدند. این اتفاق نی‌تواند به دلیل واکنش‌پذیری پوزولانی پایین دوده‌ی سیلیس در زمان کم و مقدار کم سیمان است. در زمان‌های طولانی‌تر، سرعت بیش‌تری از واکنش‌پذیری پوزولانی دوده‌ی سیسلیس به دست آمد که منجر به مقاومت‌های فشاری بالاتر در مقایسه با مخلوط‌های ساده در زمان‌های ۲۸ و ۳۶۵ روزه شد.



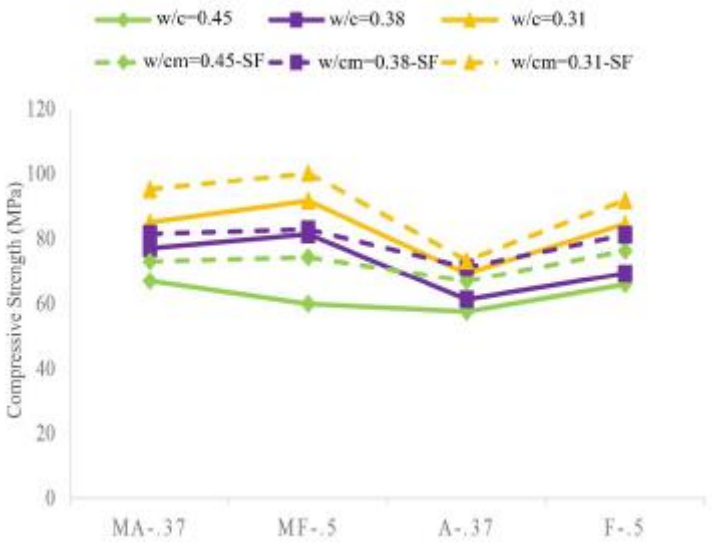
شکل ۷ نتایج آزمایش مقاومت فشاری در ۳ روز



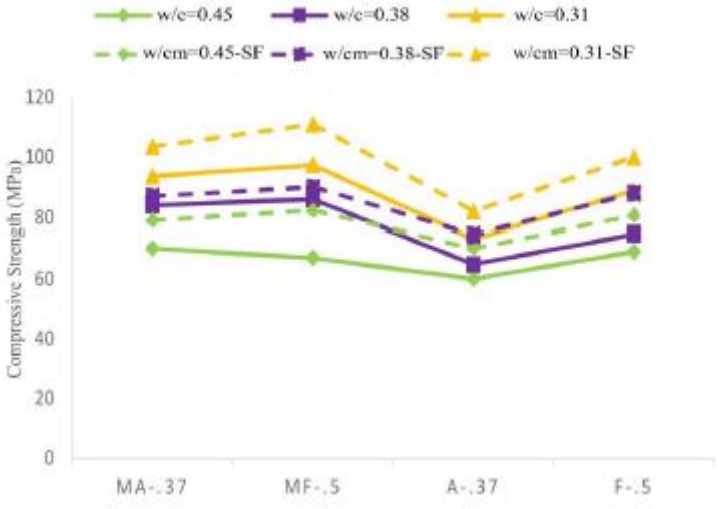
شکل ۸ نتایج آزمایش مقاومت فشاری در ۷ روز



شکل ۹ نتایج آزمایش مقاومت فشاری در ۲۸ روز



شکل ۱۰ نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن پس از ۹۰ روز



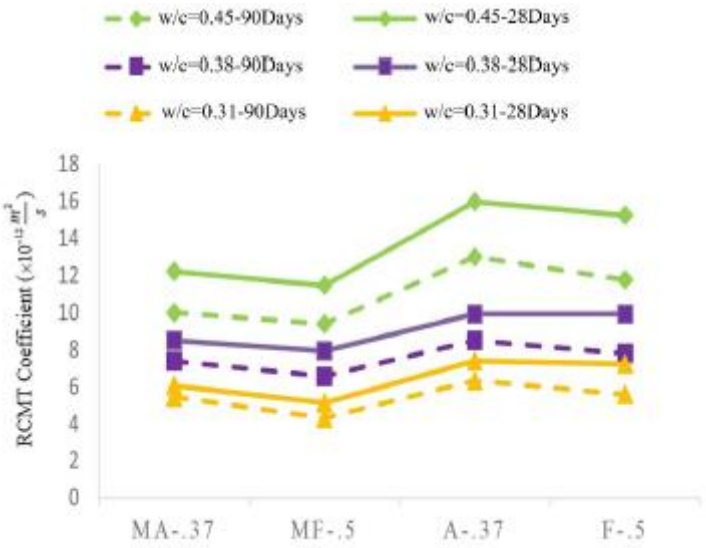
شکل ۱۱ نتایج آزمایش مقاومت فشاری بتن پس از ۳۶۵ روز

۳-۶-آزمایش سریع جابه‌جایی کلر (RCMT)

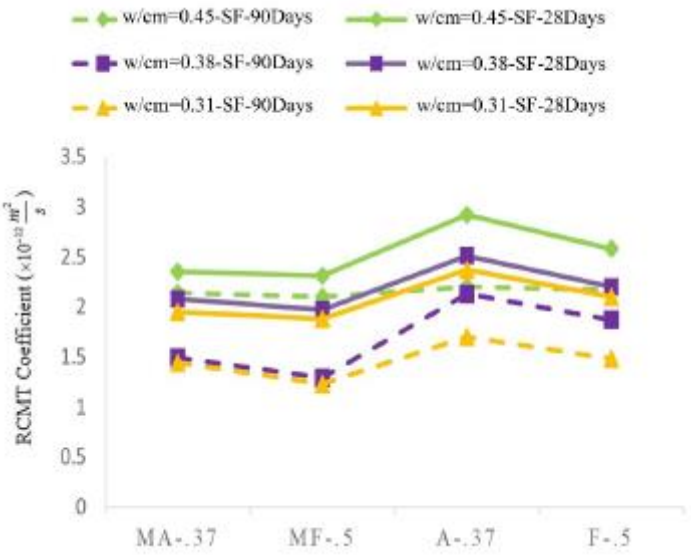
نتایج میانگین RCMT، در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل‌ها مشخص است، چگالی تراکم خشک سنگدانه‌ها نشان‌گر نمونه‌های مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون‌های کلر نمی‌باشد. بیش‌ترین ضرایب RCMT، در مخلوط‌هایی با دانه‌بندی اندریسن مشاهده شد که کم‌ترین چگالی تراکم خشک سنگدانه‌ها را داشت و کم‌ترین نشر کلر برای دانه‌بندی اصلاح شده‌ی فولر سنگدانه به دست آمده است. اختلافات بین دانه‌بندی‌ها با افزایش نسبت آب به سیمان کاهش یافت. نتایج این بخش تطابق مناسبی یل نتایج چگالی خشک دارد. نتیجه‌ی زیر برای مقدار مقاومت مخلوط‌ها در برابر کلر به دست آمده است:

$$MF \geq MA > F > A \qquad (۱۴)$$

استفاده از دوده‌ی سیلیس موجب کاهش قابل‌توجه در ضریب RCMT شد. این اثر عمدتا به دلیل واکنش‌پذیری پوزولانیک بالای این ماده است که خلل و فرج باریک در مخلوط سیمان را می بندد [۴۳]. این کاهش در نسبت آب به سیمان بالاتر آشکارتر است و تاثیر زیادی بر افزایش دوام مخلوط‌ها دارد. کاهش نسبت آب به سیمان سبب کاهش قابل توجه در ضریب RCMT در تمام نمونه‌ها می‌گردد. به منظور افزایش دوام، استفاده از دوده‌ی سیلیس تاثیر بسیار زیادی در مقایسه با تغییر دانه‌بندی‌های سنگدانه یا کاهش نسبت آب به سیمان دارد.



شکل ۱۲ ضرایب RCMT مخلوط‌های بتن بدون دوده‌ی سیلیس



شکل ۱۳ ضرایب RCMT مخلوط‌های بتن شامل دوده‌ی سیلیس

۴-نتیجه‌گیری

این مقاله، طرح اختلاط و ارزیابی خصوصیات بتن‌های با کارایی بالا (پر مقاومت) (HPC) را ارائه می‌کند. طراحی مخلوط‌های بتن با هدف دست‌یابی به یک مخلوط سیمانی متراکم چگال با به کار گرفتن ۴ دانه‌بندی سنگدانه مختلف بود. نتایج زیر از این مطالعه به دست آمده‌اند:

- نتایج نشان داد که مخلوط‌هایی با دانه‌بندی‌های ایده‌آل F، MF و MA از نظر مشخصات مکانیکی و دوام از منحنی دانه‌بندی اندریسن بهتر بودند. اگرچه، این موضوع باید ذکر شود که دانه‌بندی A مقادیر قابل‌توجهی از ذرات ریزتر از ۷۵ میکرومتر دارد. در این تحقیق، وجود ذرات بسیار ریز در سیمان و دوده‌ی سیلیس در نظر گرفته نشده‌اند. در حقیقت، مقدار زیاد ذرات ریزتر از ۷۵ میکرومتر تاثیر عکس بر چگالی تراکم مخلوط داشت. باید بین مقادیر ذرات در محدوده‌ی فوق ریز و سنگدانه‌های بزرگ سازگاری وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، مخلوط با منحنی دانه‌بندی، مشخصات بهتری با مواد سیمانی کم‌تر دارد. بنابراین، مطالعات بعدی باید به منظور تعیین سطح بهینه‌ی مواد سیمانی برای دانه‌بندی‌های ایده‌آل انجام شود.
- مخلوط‌هایی با نسبت‌های پایین آب به سیمان و با دوده‌ی سیلیس، چگالی خشک بالاتری داشتند که نشان می‌دهد که این مخلوط‌ها چگالی‌های تراکم بالاتری دارند. بنابراین، مشخصات مکانیکی و دوام افزایش‌یافته‌ی این مخلوط‌ها اغلب به چگالی تراکم بالاتر آن‌ها به خصوص برای نسبت‌های پایین آب به سیمان مرتبط است. علاوه بر بیش‌ترین چگالی تراکم مخلوط‌ها با دوده‌ی سیلیس، این ماده ویژگی‌های ریزساختاری ترکیبات سیمان را نیز با توجه به ایجاد یک ریزساختار همگن و پیچاپیچ بهبود می‌بخشند.
- چگالی تراکم سنگدانه ها در حالت خشک نشان‌دهنده‌ی ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن نبود که ممکن است منجر به نتایج اشتباه گردد. برای مثال نتایج چگالی خشک سنگدانه‌ها نشان می‌دهد که دانه‌بندی سنگدانه‌ی اندریسن باید چگالی تراکم بالاتری در مقایه با دانه‌بندی اصلاح شده‌ی فولر داشته باشد، در حالی که نتایج نشان داد که در نسبت آب به سیمان ۰/۳۱، مخلوط با دانه‌بندی اندریسن حدود ۳۰ درصد مقاومت کم‌تری در مقایسه با مخلوط با دانه‌بندی اصلاح شده‌ی فولر دارد.
- ارتباطی بین نتایج چگالی تراکم سنگدانه‌های خشک و مشخصات مکانیکی و دوام بتن مشاهده نشده است.
- بر خلاف نتایج به دست آمده در مورد چگالی تراکم سنگدانه‌های خشک، مخلوط‌های بتنی با منحنی دانه‌بندی فولر-تامپسون (F) بیش‌ترین چگالی خشک (چگالی تراکم) را داشت و در نتیجه ویژگی‌های مکانیکی و دوام بیش‌تری در مقایسه با اختلاط‌های مشابه با دانه‌بندی‌های مختلف داشت.
- اختلافات بین دانه‌بندی‌های سنگدانه در مخلوط‌هایی با نسبت آب به سیمان کم‌تر به ویژه نسبتی برابر با ۰/۳۱ آشکارتر بود و در نسبت آب به سیمان بالا، این اختلاف‌ها از بین رفت.

- با استفاده از دانه‌بندی‌های ایده‌آل سنگدانه، بتن‌هایی با کارایی بالا با مقاومت‌هایی بیش‌تر از ۱۰۰ مگاپاسکال به دست آمد.
- مخلوط‌هایی با دانه‌بندی اصلاح شده‌ی سنگدانه‌ی اندریسن (MA) در مقایسه با دانه‌بندی اندریسن (A) بهتر بودند.
- مخلوط‌هایی با دانه‌بندی اصلاح شده‌ی سنگدانه‌ی فولر-تامپسون (MF)، عملکرد نسبی بهتری در افزایش دوام و مشخصات مکانیکی در مقایسه با منحنی‌های دانه‌بندی دیگر داشتند.
- استفاده از دوده‌ی سیلیس سبب کاهش قابل‌توجه در ضریب جابه‌جایی سریع کلر شد. افزایش مقاومت در برابر نفوذ کلر در بتن با عمر ۲۸ تا ۹۰ روزه برای مخلوط‌های شامل دوده‌ی سیلیس قابل‌توجه بود از جمله این که عملکرد مخلوط با نسبت آب به سیمان ۰/۴۵ با عمر ۹۰ روزه مشابه عملکرد مخلوط‌های مشابه با نسبت آب به سیمان ۰/۳۱ با عمر ۲۸ روزه بود.
- دوده‌ی سیلیس منجر به کاهش مقاومت در عمرهای کم بتن شد، در حال که در عمرهای ۲۸ تا ۹۰ روزه، افزایش مقاومت‌های فشاری مشاهده شد.