



بررسی خصوصیات مکانیکی بتن های متراکم ساخته شده با میکروسیلیس و نانوسیلیس

محسن جوکار^۱، حمید رحمانی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد عمران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲- استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

¹ E.mail: jokar.mohsen@gmail.com

² E.mail: rahmany237@gmail.com

خلاصه:

امروزه متراکم ساختن مصالح جهت دستیابی به بتن پرمقاومت، مورد توجه اکثر محققین می باشد. جهت این امر، توزیع اندازه ذرات سیمان، نقش مهمی را در متراکم سازی مصالح چسبنده ایجاد می کند. در این تحقیق از توزیع ایده آل اندازه ذرات بتن با ترکیب سنگدانه ها (با دانه بندی بهینه) و پودر فوق العاده ریز کوارتز به عنوان فیلر سیمان استفاده شده است. بر اساس مقدار بهینه سیمان، مقدار بهینه فیلر فوق العاده ریز و دانه بندی بهینه سنگدانه ها که از منحنی توزیع ایده آل ذرات بتن قابل استخراج می باشد، نمونه های بتنی با بکارگیری میکروسیلیس و نانوسیلیس در طرح اختلاطهای مختلف ساخته شد. پس از عمل آوری، نمونه ها تحت آزمایشهای مقاومت فشاری و درصد جذب آب قرار گرفته و نتایج ثبت شدند. نتایج حاکی از ساخت بتن هایی با مقاومت فشاری فوق العاده بالا با استفاده از حداقل سیمان می باشد. در این تحقیق، مقاومت نمونه های با ابعاد ۱۵ سانتیمتر، با ۳۲۵ کیلوگرم مواد سیمانی حاوی میکروسیلیس، برابر با ۷۵۱ (Kg/cm²) بدست آمد که در مقایسه با بتن های معمولی از مقاومت فشاری بسیار بالایی برخوردار می باشد. همچنین جذب آب (۲۴ ساعته) این نمونه برابر ۰/۵۴ درصد بدست آمد که حاکی از تخلخل بسیار پایین نسبت به بتن های معمولی می باشد.

کلمات کلیدی: فیلر فوق العاده ریز، منحنی دانه بندی ایده آل، بتن متراکم، میکروسیلیس، نانوسیلیس

۱. مقدمه

امروزه بتن یکی از پرمصرف ترین و بادوام ترین مصالح ساختمانی است. مقرون به صرفه بودن، وجود منابع فراوان مواد متشکل، سازگاری با محیط و مقاومت مطلوب از دلایل مصرف روزافزون این ماده می باشد. بتن از دو فاز مختلف یعنی سیمان هیدراته شده (فاز ملات) و دانه های سنگی (فاز سنگدانه) تشکیل شده است. فصل مشترک بین این دو فاز که به ناحیه انتقال بتن موسوم است، به قدری دارای اهمیت است که می توان این فاز را به عنوان فاز سوم بتن معرفی کرد. با توجه به اینکه سنگدانه ها حدود ۶۰ تا ۹۰ درصد حجم بتن را تشکیل می دهند [۱]، انتخاب مناسب نوع سنگدانه و دانه بندی آن، بر روی خواص اصلی بتن از قبیل: مقاومت، نفوذپذیری، دوام و کارایی بتن تأثیر گذار خواهد بود. جهت دستیابی به بتنی با تراکم بالا و نفوذپذیری کم، بایستی عوامل مختلف از جمله: دانه بندی سنگدانه ها، میزان مصرف سیمان و دیگر افزودنی ها و مصالح مورد استفاده به طور کامل مورد آزمایش قرار گیرند و مقدار بهینه استفاده از هر کدام مشخص گردد.

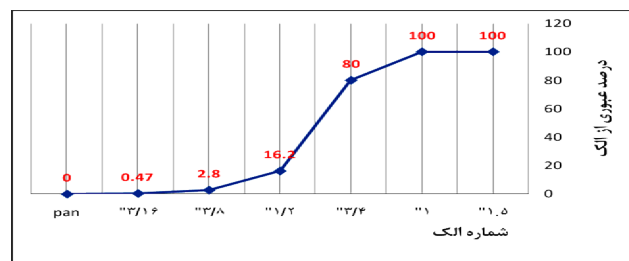
در این تحقیق، ابتدا به بررسی برخی ویژگیهای مصالح بکار رفته در بتن متراکم پرداخته و سپس تأثیر دو نوع مواد جایگزین سیمان را بر روی خواص بتن مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. در این راستا با توجه به تحقیقات انجام شده در سال ۱۹۰۷ توسط Fuller & Thompson [۲] در



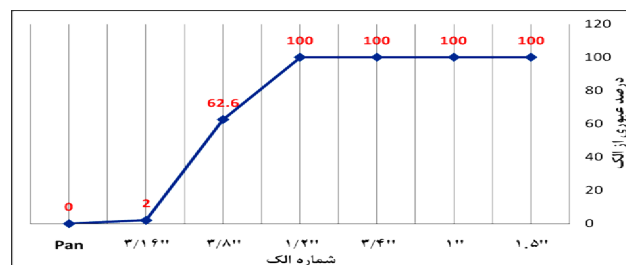
خصوص دانه بندی مصالح سنگی، دانه بندی به گونه ای اصلاح گردیده که ضمن حفظ کارآیی ملات و یا بتن، دوام آن در مقابل عوامل شیمیایی مهاجم افزایش می یابد. در صورتی که سنگدانه ها به نحوی دانه بندی شوند که دانسیته بتن حداکثر گردد، می توان میزان خمیر مصرفی در بتن را کاهش داد. با کاهش خمیر سیمان مصرفی، انقباض و خزش نیز کاهش خواهد یافت. در تحقیقی که توسط F.Lange و همکاران در سال ۱۹۹۷ صورت گرفته است [۳]، نشان داده شده است که برای دست یافتن به بنتی متراکم باید دانسیته خشک مخلوط به حداکثر برسد. در این تحقیق جهت دستیابی به تراکم بالا در بتن، از دانه بندی ایده آل ذرات بتن استفاده گردید که این دانه بندی ایده آل در تحقیق قبلی مؤلفین بصورت کامل ارائه شده است [۴].

۲. مصالح مصرفی

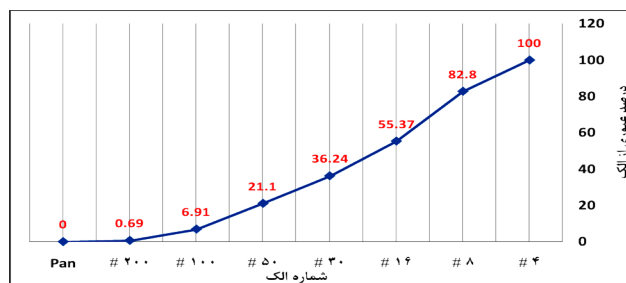
با توجه به وجود سه نوع شن و ماسه مورد نیاز در کارخانجات سنگ شکن حومه شهر یاسوج، این سه نوع مصالح که عبارت بودند از شن بادامی، شن نخودی و ماسه شسته مورد استفاده قرار گرفتند. از آنجا که دانه بندی ماسه شسته، فاقد ذرات ریز می باشد، از ماسه ای به نام ماسه ریخته گری با حداکثر ابعاد ۱۸۰ میکرون جهت ایجاد دانه بندی ایده آل استفاده گردید. از سیمان یاسوج تیپ دو (۲) به عنوان ماده چسبنده و از پودر کوارتز نیز به عنوان فیلر سیمان در این تحقیق استفاده شد. منحنی دانه بندی سنگدانه ها در شکلهای ۱ تا ۴ نشان داده شده است.



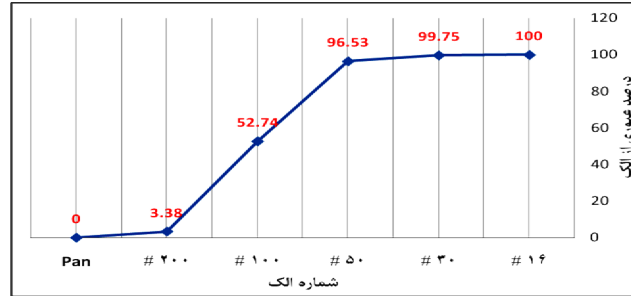
شکل ۱: منحنی دانه بندی شن بادامی



شکل ۲: منحنی دانه بندی شن نخودی



شکل ۳: منحنی دانه بندی ماسه شسته



شکل ۴: منحنی دانه بندی ماسه ریخته گری

همچنین از فوق روان کننده Pema استفاده شد که بر پایه کربوکسیلات بوده و دارای وزن مخصوص 1.15 g/cm^3 می باشد. سایر مشخصات مصالح از جمله وزن مخصوص و درصد جذب آب در جدول شماره (۱) ارائه شده است.

جدول ۱: وزن مخصوص و درصد جذب آب مصالح مورد استفاده

پودر کوارتز	سیمان	ماسه ریخته گری	ماسه شسته	شن نخودی	شن بادامی	نوع مصالح
2720.72	3100	2571.4	2669.7	2674	2674.8	وزن مخصوص (کیلوگرم بر مترمکعب)
-	-	4	2.69	1.46	1.054	درصد جذب آب

جهت ساخت بتن با مقاومت بالا نیز از میکروسیلیس و نانوسیلیس استفاده گردید که مشخصات آنها به ترتیب در جداول (۲) و (۳) ارائه شده است.

جدول ۲: مشخصات میکروسیلیس

وزن مخصوص (Kg/m ³)	ساختار	شکل ذرات	اندازه ذرات (μm)	سطح ویژه (m ² /Kg)
2200-2300	آمورف	کروی	<1	15000 - 30000

جدول ۳: مشخصات نانوسیلیس

وزن مخصوص (Kg/m ³)	PH	ویسکوزیته (cPS)	درصد ذرات جامد
1400	9.5	< 15	50

۳. منحنی دانه بندی بینه سنگدانه ها

با توجه به منحنی دانه بندی هر یک از سنگدانه ها و درصد عبوری مصالح از هر الک، ترکیب سنگدانه ها به نحوی انتخاب گردید تا ترکیب حاصل دارای کمترین خلل و فرج و بیشترین تراکم ممکن باشد. برای این کار، از منحنی دانه بندی ایده آل فولر (Fuller) استفاده شد. با در نظر گرفتن حداکثر بعد سنگدانه ها برابر 25 میلیمتر و حداقل بعد دانه ها برابر 0.075 میلیمتر و عدد $n = 0.5$ ، بر اساس رابطه فولر (رابطه شماره ۱)، درصد عبوری ایده آلی برای هر الک قابل دستیابی می باشد که بیانگر منحنی دانه بندی ایده آل می باشد.

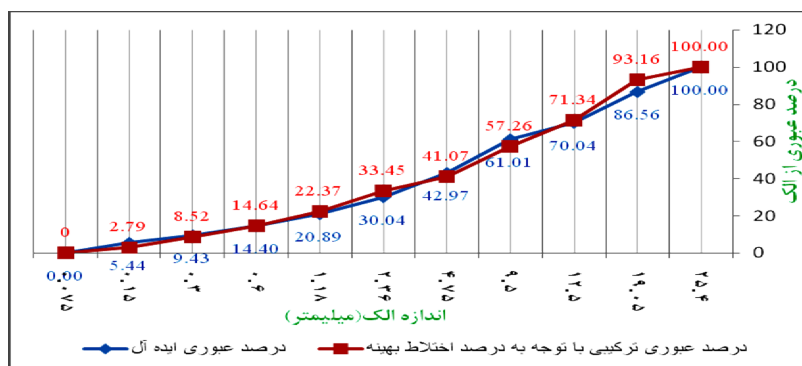
$$Y_i = 100 * [(x_i - x_0)/(x_{max} - x_0)]^n \quad (1)$$



که در رابطه فوق، Y_i : درصد عبوری ایده آل متناظر با X_i یا اندازه الک مورد نظر (میلیمتر)، X_0 : کوچکترین بعد دانه ها (میلیمتر)، X_{max} : بزرگترین بعد دانه ها (میلیمتر) و n : ضریب توزیع که در این تحقیق برابر با 0.5 در نظر گرفته شده است [۱].

جهت یافتن درصد بهینه ترکیب سنگدانه، تابع هدف بهینه یابی گردید. تابع هدف، نزدیکی منحنی دانه بندی ایجاد شده (با استفاده از ترکیب سنگدانه ها) و منحنی دانه بندی ایده آل فولر را نشان می دهد. جزئیات بهینه یابی و دستیابی به درصد اختلاط سنگدانه در تحقیق اخیر توسط مؤلفین [۴] ارائه شده است. بر اساس تحقیق مذکور جهت دستیابی به حداقل میزان خطای تابع هدف، درصدهای اختلاط بهینه زیر حاصل شد:

درصد شن بادامی = 34.1 % درصد شن نخودی = 25.8 % درصد ماسه = 38.4 % درصد ماسه ریخته گری = 1.7 %
 بر اساس درصدهای بهینه بدست آمده، درصد عبوری ترکیب ۴ مصالح، محاسبه شده و نمودار حاصل در شکل (۵) در کنار منحنی ایده آل فولر ترسیم شده است که شکل مذکور بیانگر دستیابی به دانه بندی نسبتاً ایده آل می باشد.



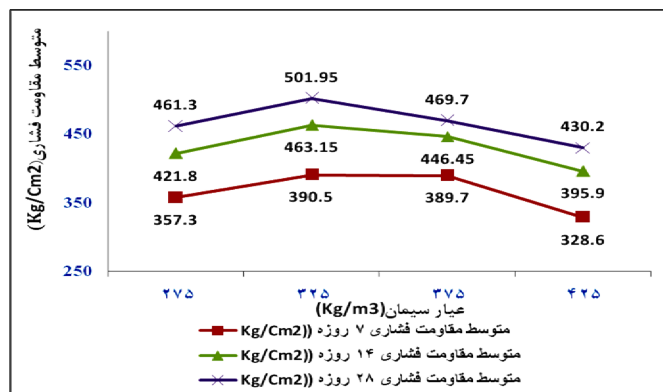
شکل ۵: مقایسه "درصد عبوری ایده آل" و "درصد عبوری ترکیبی ۴ نوع سنگدانه (درصدهای اختلاط بهینه)"

۴. طرحهای اختلاط، نحوه ساخت و آزمایش بتن ها

۱.۴. مقدمه

با توجه به اینکه دانه بندی سیمان به نحوی است که ذرات ریزتر را دارا نمی باشد، استفاده از فیلر با قطر کوچکتر از میانگین قطر دانه های سیمان جهت بالا بردن دانسیته خشک لازم به نظر می رسد، چرا که اولاً ذرات ریز، اثر پرکنندگی داشته و تخلخل را کاهش می دهند، ثانیاً توزیع حفرات مناسبتر خواهد شد [۵ و ۶]. لذا در این تحقیق به منظور پر کردن فضاهای خالی موجود میان ذرات سیمان از پودر کوارتز بعنوان فیلر استفاده شد. نحوه بدست آوردن میزان بهینه فیلر در تحقیق [۴] توسط مؤلفین ارائه شده است که میزان بهینه ۲۵ درصد وزن سیمان بدست آمده است.

میزان بهینه سیمان نیز از طریق ساخت نمونه های مکعبی بتنی با میزان سیمانهای متفاوت و استفاده از منحنی ایده آل سنگدانه هابدست آمد. تحقیقات قبلی حاکی از وجود میزان سیمان بهینه به اندازه ۳۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب می باشد که با توجه به اهمیت امر، در شکل (۶) نمودار تغییرات مقاومت فشاری ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه بتن های شاهد نسبت به میزان سیمان ارائه شده است [۴]. نسبت آب به سیمان بر اساس تحقیقات Hillemeier [۷] و رحمانی [۱] برابر ۰/۴۲ انتخاب گردید.



شکل ۶: نمودار متوسط مقاومت‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نمونه بتنی نسبت به میزان سیمان [۴]

۲.۴. طرح اختلاط‌های مورد استفاده در این تحقیق

با ترکیب دانه بندی ایده آل سنگدانه ها(که در بخش ۴ بدست آمد) و دانه بندی ایده آل مصالح چسبنده که در بخش ۵-۱ ارائه گردید می توان به دانه بندی ایده آل مصالح بتن دست یافت که این کار بصورت حجمی صورت می گیرد. در این تحقیق با بکارگیری شش طرح اختلاط مختلف که نانوسیلیس، میکروسیلیس و فیلر بصورت جداگانه و ترکیبی در آنها شرکت دارند، نمونه‌هایی بتنی برای تعیین مقاومت فشاری و درصد جذب آب ساخته شد که نتایج در بخش‌های بعد تشریح می شوند. البته با توجه به استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس در بتن های مورد آزمایش در این تحقیق، بر طبق آزمایشات و تحقیقات صورت گرفته توسط محققین مختلف در این زمینه، مقدار ۱۰ درصد برای جایگزینی میکروسیلیس [۸ و ۹ و ۱۰] و مقدار ۲ درصد برای جایگزینی نانوسیلیس [۱۱] انتخاب شد.

طرح اختلاط‌های مورد نظر در این تحقیق عبارتند از:

- ۱ - مخلوط شاهد (کنترل) حاوی سیمان $C_1 = C$
- ۲ - مخلوط سیمان و فیلر $C_2 = C + F$
- ۳ - مخلوط سیمان، فیلر و میکروسیلیس $C_3 = C + F + 10\%(S.F.)$
- ۴ - مخلوط سیمان، فیلر و نانوسیلیس $C_4 = C + F + 2\%(n.S.)$
- ۵ - مخلوط سیمان، فیلر، میکروسیلیس و نانوسیلیس $C_5 = C + F + 2\%(n.S.) + 8\%(S.F.)$
- ۶ - مخلوط سیمان، فیلر، میکروسیلیس و نانوسیلیس $C_6 = C + F + 1\%(n.S.) + 9\%(S.F.)$

در طرح‌های مذکور؛ C: سیمان، F: فیلر، S.F.: میکروسیلیس و n.S.: نانوسیلیس می‌باشند. در جدول شماره(۴) طرح اختلاط‌های تحت بررسی در این تحقیق، با رعایت دانه بندی ایده آل سنگدانه ها و مصالح چسبنده ارائه شده است. قابل ذکر است که به علت ایفای نقش پرکنندگی، در صورت استفاده از میکروسیلیس و نانوسیلیس، از حجم فیلر مصرفی، به همان میزان کاسته شده است. همچنین به علت اینکه نانوسیلیس، بصورت محلول در آب می باشد به میزان این آب از آب اختلاط کسر شد.

جدول (۴): طرح اختلاط بتن های تحت بررسی (Kg/m3)

شماره طرح	W/C	سیمان	پودر کوارتز	میکروسیلیس	نانوسیلیس (خالص)	شن بادامی	شن نخودی	ماسه	ماسه ریخته گری	فوق روان کننده (%)	اسلامپ (Cm)
C1	0.42	325	0	0	0	691.005	522.659	776.659	33.117	0.51	10-12
C2	0.42	325	81.250	0	0	663.768	502.055	746.043	31.813	0.59	10-12
C3	0.42	292.5	41.951	32.5	0	673.330	509.288	756.791	32.270	0.749	10-12
C4	0.42	318.5	68.618	0	6.5	665.680	503.502	748.193	31.903	0.81	10-12
C5	0.42	292.5	37.179	26	6.5	683.870	517.260	768.638	32.775	0.9	10-12
C6	0.42	292.5	39.565	29.250	3.25	673.330	509.288	756.791	32.270	0.84	10-12



۳.۴. نحوه ساخت بتن ها

پس از توزین سنگدانه ها، در صورتی که در طرح اختلاط، فیلر و یا میکروسیلیس موجود باشد ابتدا فیلر و یا میکروسیلیس با مقداری از آب اختلاط، مخلوط شده و بصورت لجن درمی آید. برای ترکیب مصالح، ابتدا شن و ماسه در جام دستگاه مخلوط کن ریخته شده و پس از اضافه کردن مقداری از آب اختلاط، مخلوط می شوند. سپس سیمان نیز به همراه باقیمانده آب به مخلوط اضافه شده و پس از اختلاط به میزان کافی، لجن فیلر، لجن میکروسیلیس و یا نانوسیلیس به مخلوط اضافه می گردند. جهت دستیابی به اسلامپ ثابت (۱۲-۱۰ سانتی متر) از فوق روان کننده به میزان مورد نیاز استفاده گردید.

۴.۴. آزمایش های مورد استفاده در این تحقیق

۴.۴.۱. آزمایش تعیین مقاومت فشاری

جهت این امر، نمونه هایی مکعبی بتنی به ابعاد ۱۵ سانتیمتر به تعداد طرح اختلاطها (و برای هر طرح اختلاط، ۴ نمونه) ساخته شده و نمونه ها پس از ساخت، با آب عمل آوری شدند. در سنین ۷ و ۲۸ روز پس از عمل آوری، ۲ نمونه برای هر طرح اختلاط، از آب خارج شده و در حالت اشباع با سطح خشک بر اساس استاندارد BS:1881-116 تحت آزمایش فشاری قرار گرفته [۱۲] و نتایج ثبت شدند.

۴.۴.۲. آزمایش تعیین درصد جذب آب نمونه ها

برای هر طرح اختلاط تعداد ۲ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتیمتر ساخته و نمونه ها پس از ساخت، در آب عمل آوری شدند. سپس آزمایش مذکور در سن ۲۸ روز به این شرح انجام گرفت که: در سن مذکور، نمونه های مربوط به هر طرح اختلاط، از آب خارج شده و در آون با دمای ۶۰ درجه سانتیگراد، به مدت ۳ روز (تا ثابت شدن وزن نمونه ها) قرار گرفتند. پس از خشک شدن نمونه ها در این مدت، نمونه ها از آون بیرون آورده شده و داخل آب قرار داده شدند. پس از گذشت ۰/۵ و ۲۴ ساعت از قرارگیری در آب، نمونه ها از آب خارج شده و وزن آنها اندازه گیری و ثبت شد. درصد جذب آب نمونه ها مطابق رابطه (۲) محاسبه گردید:

$$\text{Water Absorption} = 100 * (W_2 - W_1) / W_1 \quad (2)$$

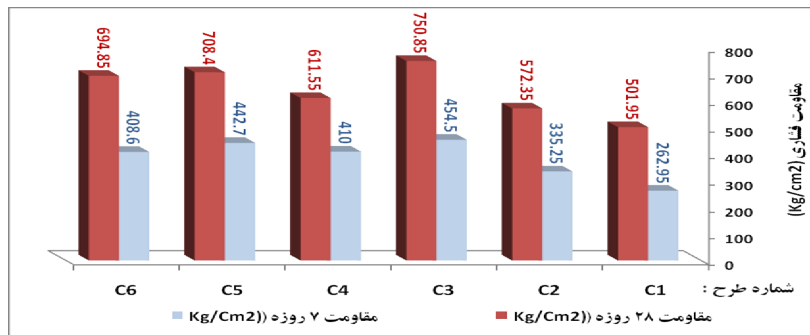
که؛ W_1 : وزن اولیه پس از بیرون آوردن نمونه از آون و W_2 : وزن آن پس از قرارگیری در آب می باشد.

۵. نتایج آزمایشها

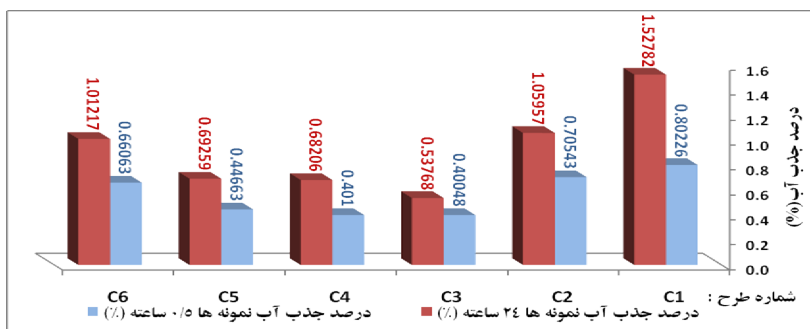
متوسط نتایج مربوط به مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه و همچنین درصد جذب آب نمونه ها پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب در جدول (۵) و شکل های (۷) و (۸) ارائه شده است.

جدول ۵: مقادیر متوسط مقاومت فشاری و درصد جذب آب نمونه ها (۲۸ روز عمل آوری شده)

شماره طرح	مقاومت ۷ روزه (Kg/Cm2)	مقاومت ۲۸ روزه (Kg/Cm2)	درصد جذب آب نمونه ها 0.5 ساعته (%)	درصد جذب آب نمونه ها 24 ساعته (%)
C1	262.95	501.95	0.80226	1.52782
C2	335.25	572.35	0.70543	1.05957
C3	454.5	750.85	0.40048	0.53768
C4	410	611.55	0.40100	0.68206
C5	442.7	708.4	0.44663	0.69259
C6	408.6	694.85	0.66063	1.01217



شکل ۷: مقایسه مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه نمونه ها (Kg/cm3)



شکل ۸: مقایسه درصد جذب آب نمونه های ۲۸ روز عمل آوری شده، پس از 0.5 و 24 ساعت (%)

چنانچه در جدول شماره ۵ و شکل‌های ۷ و ۸ دیده می شود، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه طرح اختلاط C3 یا مخلوط حاوی فیلر و میکروسیلیس از سایر طرحها بیشتر شده است که می تواند به سبب فعالیت پوزولانی بالای میکروسیلیس باشد. با استفاده از میکروسیلیس، بتنی با مقاومت فشاری بالا و جذب آب پائین ساخته شد. در این تحقیق مقاومت نمونه های با ابعاد ۱۵ سانتیمتر، با ۳۲۵ کیلوگرم مواد سیمانی حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس، برابر با ۷۵۱ (Kg/cm2) بدست آمده که در مقایسه با بتن های معمولی از مقاومت فشاری بسیار بالایی برخوردار می باشد.

با ترکیب میکروسیلیس و نانو سیلیس نیز می توان بتن هایی با مقاومت فشاری بالا و جذب آب پایین ساخت. طرح C5 و C6 بخاطر داشتن میکروسیلیس و نانو سیلیس به صورت توأم از مقاومت بالایی برخوردار می باشند. مخلوط C4 یا مخلوط حاوی ۲ درصد نانو سیلیس نیز نسبت به مخلوط C1 و C2 از مقاومت فشاری نسبتاً بالایی برخوردار می باشد که بیانگر فعالیت پوزولانی نانو سیلیس می باشد.

در مورد درصد جذب آب نیز طرح اختلاط C3 یا مخلوط حاوی فیلر و میکروسیلیس و طرح اختلاط C4 یا مخلوط حاوی فیلر و نانو سیلیس کمترین میزان جذب آب را از خود نشان دادند که با نتایج مقاومت فشاری نیز مطابقت دارد. حداکثر میزان درصد جذب آب نمونه های ساخته شده با میکروسیلیس و یا نانو سیلیس، به میزان 1.01217 درصد بدست آمد که در مقایسه با بتن های معمولی نسبتاً پایین می باشد و این بیانگر عملکرد مناسب این بتن ها است.

۶. نتیجه گیری

بر اساس آزمایشهای انجام شده و بحث های صورت گرفته، نتایج زیر قابل ذکر می باشد:

- ۱- با استفاده از حداقل سیمان نیز می توان بتن هایی با مقاومت فشاری فوق العاده بالا ساخت. با استفاده از دانه بندی ایده ال سنگدانه ها و ۳۲۵ کیلوگرم سیمان در متر مکعب، بدون بکارگیری هرگونه فیلر و پوزولان، مقاومت فشاری حدود ۵۰۲ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بدست آمد.
- ۲- در این تحقیق، استفاده از فیلر سیمان (پودر کوارتز) جهت دستیابی به دانه بندی ایده آل مواد سیمانی، مقاومت فشاری نمونه ها نسبت به بتن متراکم (طرح C1) را در حدود ۱۶ درصد افزایش داده و درصد جذب آب نمونه ها را در حدود ۳۱ درصد کاهش داده است.



- ۳- بکارگیری ۱۰ درصد میکروسیلیس، مقاومت فشاری نمونه ها را حدود ۳۱ درصد نسبت به بتن متراکم (نمونه های طرح C2) افزایش داد. همچنین جذب آب (۲۴ ساعته) این نمونه برابر ۰/۵۴ درصد بدست آمد که حاکی از تخلخل بسیار پایین نسبت به بتن های معمولی می باشد.
- ۴- استفاده از ۲ درصد نانوسیلیس، می تواند مقاومت فشاری را (نسبت به نمونه های طرح C2) در کوتاه مدت حدود ۲۲ درصد و در طولانی مدت، حدود ۷ درصد افزایش داده و همچنین جذب آب را حدود ۳۹ درصد، کاهش دهد.
- ۵- بهترین ترکیب میکروسیلیس و نانوسیلیس برای ۸ درصد میکروسیلیس و ۲ درصد نانوسیلیس بدست آمد که مقاومت فشاری بتنی با این ویژگی به حدود ۷۰۸ کیلوگرم بر سانتیمتر مربع رسید که مقاومت بالا به حساب می آید. جذب آب این طرح هم نسبت به طرح C2 حدود ۳۵ درصد کاهش را نشان داد.
- ۶- با ترکیب ۹ درصد میکروسیلیس و ۱ درصد نانوسیلیس نیز بتنی با مقاومت فشاری بالا (حدود ۶۹۵ کیلوگرم بر مترمکعب) ساخته شد که جذب آب نسبتاً پائینی داشت (حدود ۱/۰۱۲۱۷ درصد).

۷. منابع و مراجع

- ۱- رحمانی، حمید (۱۳۸۷). ارائه طرح اختلاط بتن های مقاوم در برابر تهاجم اسیدسولفوریک. پایان نامه دکتری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، تهران: ایران.
- 2- Fuller, W. B. and Thompson, S. E., "The Laws of Proportioning Concrete." *ASCE J. Transport*, 59, pp. 67-143.
- 3- Lange, F., Morel H. and Rudert V. (1997). "Dense Packing of Cement paste and Resulting Consequences on Mortar properties." *Cement and Concrete Research.*, Vol. 27, No. 10, pp 1481-1488.
- ۴- جوکار، م.، رحمانی، ح.، پروین نیا، م.، " دانه بندی بهینه بتن متراکم " ، مقاله ارائه شده برای اولین کنفرانس بین المللی بتن های ناتراوا و مخازن ذخیره آب شرب، گیلان، ایران، بهمن ۱۳۸۹.
- 5- Rahmani, H., Ramazanianpour, A. A., "Effect of Binary Cement Replacement Materials on Sulfuric Acid Resistance of Dense Concretes.", *Magazine of concrete research*, Vol. 60, No. 2, March 2008, pp. 145-155.
- 6- Q.Niu , " Effect of Superfine Slag Powder on Cement Properties " , *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, 2002, pp. 615-621.
- 7- Hillemeier, B. H. A. (2001)."High Performance Concrete Specialized for Acid Resistance." *First International Conference on Concrete & Development.*, 30April-2May, Tehran, Iran.
- 8- S.A. Khedr, M.N. Abou-Zeid, "Characteristics of silica-fume concrete.", *J. Mater. Civ. Eng. ASCE* 6(3) (1994) 357-375.
- 9- Jianyong, L., Pei, T., "Effect of slag and silica fume on mechanical properties of high strength concrete.", *Cement and Concrete Research*, 27(1997) 833-7.
- 10- I ., Tu`rkmen, "Influence of different curing conditions on the physical and mechanical properties of concretes with admixtures of silica fume and blast furnace slag.", *Materials Letters* 57 (2003) 4560-4569.
- 11- K.L. Lin et al., "Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash.", *cement mortar Journal of Environmental Management* 88 (2008), pp. 708-714.
- 12- British Standards Institution. Testing Concrete, (1983). "Method for Determination of Compressive Strength of Concrete Cubes." BSI, London, BS 1881- 116.