

بررسی تاثیر ژئولیت، میکروسیلیس، سرباره و پودر سنگ آهک بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم

محمدحسین خزعلی^۱، علیرضا نیکخواه^۲، داوود رحیمی^۳

۱- مدیر مرکز تحقیقات بتن، گروه تخصصی شهید رجایی

۲- کارشناس ارشد مرکز تحقیقات بتن، گروه تخصصی شهید رجایی

۳- کارشناس مرکز تحقیقات بتن، گروه تخصصی شهید رجایی

چکیده

یکی از انواع بتن که ظهور آن به چندین دهه قبل بازمی‌گردد بتن خودتراکم است. این نوع بتن با ویژگی‌های خاص خود، امکانات جدیدی را در اختیار مهندسين قرار داده، که با استفاده از آن‌ها می‌توان بر مشکلات ناشی از عدم تراکم مناسب در سازه‌های بتنی، از جمله کاهش عمر مفید و دوام سازه‌ها فائق آمد. امروزه به دلیل مزایای فراوان بتن خودتراکم (بتنی با کارایی و روانی بالا که تحت اثر وزن خود و بدون تراکم میان سازه و فضای پرتراکم آرماتور عبور می‌نماید) کاربرد آن به‌طور روزافزون به‌ویژه در سازه‌های بتنی ویژه، توسعه بسیار زیاد داشته است. در این تحقیق تاثیر استفاده از مواد پودری جایگزین سیمان بر خواص مکانیکی بتن خودتراکم در راستای کاهش مصرف سیمان و آلاینده‌گی حاصل از تولید آن مورد نظر قرار گرفته است. انواع بتن‌های حاوی مواد پودری مختلف در مشخصه‌های کارایی و مقاومتی رفتار متفاوتی دارند. در این پژوهش مواد جایگزین سیمان مورد استفاده شامل سرباره کوره آهنگدازی، پوزولان طبیعی ژئولیت و میکروسیلیس (دوده سیلیسی) می‌باشد. و یک طرح مخلوط نیز با مواد پودری خنثی پودر سنگ کربنات کلسیم و یک طرح نیز تنها با استفاده از سیمان به عنوان طرح شاهد ساخته شده است. نمونه‌ها در شرایط محیطی مطابق با شرایط استاندارد درون آب عمل‌آوری شده و سپس جهت انجام آزمون‌های مقاومت فشاری، مقاومت خمشی (مدول گسیختگی)، مقاومت کششی دو نیم شدن و مدول ارتجاعی بتن مورد استفاده قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: بتن خودتراکم، خواص مکانیکی، ژئولیت، سرباره، میکروسیلیس، پودر سنگ

۱. مقدمه

در دهه ۸۰ میلادی در ژاپن و با تحقیقاتی برای تولید بتن با کارایی بالا، بتن خودتراکم توسط اوکامورا معرفی شد و استفاده از آن در جهان به سرعت افزایش یافت و تحقیقات گسترده‌ای برای تکمیل شناسایی آن انجام شد. اوکامورا و اوچی در سال ۱۹۹۸ بتن خودتراکم را بتنی معرفی می‌کنند که می‌تواند در رده بتن با کارایی و مقاومت بالا (بتن توانمند) قرار گیرد [۱]. بتن خودتراکم قادر است بدون نیاز به لرزاندن خارجی، در مکان‌هایی با حجم بالای آرماتور بدون جداسازی و آب انداختن جریان پیدا نموده، قالب را پر نماید، و فضای اطراف آرماتورها را در برگیرد. در مطالعات پیشنهاد شده است، برای تولید بتن خودتراکم با پایداری و قابلیت تراکم مطلوب، علاوه بر استفاده از افزودنی‌های شیمیایی، می‌توان میزان پودر را افزایش و همچنین حجم درشت‌دانه را کاهش داد [۲].

در بتن خودتراکم، فوق روان‌کننده و مواد پودری برای بدست آوردن کارایی بالا و گرانروی مناسب و عدم جداسازی مهم است. برخی راهکارها برای نسبت‌های مخلوط بتن خودتراکم از قبیل کاهش نسبت سنگدانه به مواد سیمانی، افزایش مقدار خمیری سیمان با نسبت آب به سیمان مشخص، کنترل بزرگترین اندازه سنگدانه درشت و مقدار کلی آن و استفاده از مخلوط-هایی با کارایی مختلف پیشنهاد شده است [۳]. در این میان با توجه به اینکه سیمان و فوق‌روان‌کننده (SP) باعث افزایش هزینه‌ها شده، ولی ترکیبات معدنی مانند پوزولان طبیعی زئولیت، پودر سرباره خرده شده (GGBS) یا پودرسنگ آهک (LSP) ویسکوزیته بتن را افزایش می‌دهد، بدون آنکه هزینه زیادی داشته باشد، می‌توان کمینه کردن مقدار سیمان و فوق‌روان‌کننده را از راه‌های بهینه‌سازی اقتصادی دانست. افزودن مواد پودری در برخی موارد نیاز به فوق‌روان‌کننده را کاهش و در بعضی موارد افزایش می‌دهد. امکان جداسازی، خصوصا در حضور موانع با فواصل نزدیک وجود دارد، که با افزودنی‌های مذکور می‌توان آن را کنترل کرد. با توجه به قیمت و نحوه تولید سیمان که باعث تولید گازهای مضر برای محیط زیست می‌شود، تولید بتن با سیمان کمتر، هم هزینه‌ها را کاهش می‌دهد و هم به حفظ محیط زیست کمک می‌کند.

از آنجا که نوع و مقدار اجزای بتن خودتراکم متفاوت از بتن معمولی است، انتظار می‌رود خواص مکانیکی آن مانند مقاومت فشاری با بتن معمولی تفاوت داشته باشد. معمولا حجم خمیر در بتن خودتراکم بیشتر و مقدار سنگدانه آن کمتر از بتن معمولی است. استفاده از پودرهای متفاوت مانند پوزولان زئولیت، سرباره و پودرسنگ در ساخت بتن خودتراکم، همچنین استفاده از فوق‌روان‌کننده قوی و مواد افزودنی اصلاح‌کننده ویسکوزیته، در ساختار و ریزساختار این بتن تغییر عمده‌ای نسبت به بتن معمولی ایجاد می‌کند. این تغییر تاثیر مهمی در خواص مکانیکی و تغییر شکل‌ها ایجاد می‌کند. در این پژوهش با نگاهی به تفاوت ساختار بتن خودتراکم و بتن معمولی، انواع خواص مکانیکی بررسی شده است.

یکی از خواص مهم بتن سخت شده، مقاومت فشاری آن است. با توجه به طرح مخلوط بتن، مشخصه‌های سنگدانه و کیفیت عمل‌آوری، مقاومت فشاری بتن را می‌توان بطور چشمگیری افزایش داد. در طراحی اعضای سازه‌ای فرض می‌شود که بتن تنش‌های فشاری تحمل می‌کند و نه تنش‌های کششی را، بنابراین مقاومت فشاری معیار کیفیت بتن قرار گرفته است. سایر تنش‌های بتن درصدی از مقاومت فشاری آن است که به سادگی از آزمایش‌ها بدست می‌آید. نمونه‌هایی که برای تعیین مقاومت فشاری به کار می‌رود استوانه‌ای یا مکعبی هستند. ابعاد نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متر تا ۲۰۰ میلی‌متر و نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر است. معمولا بتن خودتراکم با نسبت کم آب به مواد سیمانی ساخته می‌شود، بنابراین ممکن است مقاومت آن بیشتر از بتن معمولی باشد. مواد مصرفی دیگر مانند نسبت ماسه به کل سنگدانه، پرکننده‌ها، مواد سیمانی و ترکیب مواد شیمیایی بر مقاومت فشاری بتن اثر گذارند.

از آنجایی که بتن یک مصالح ترد است، تنش کششی زیاد را نمی‌تواند تحمل کند. مقاومت کششی بتن از خواص بسیار مهم آن است و تاثیر قابل توجهی در مسائل ترک‌خوردگی، برش و پیچش دارد. آزمایش کششی مستقیم برای پیش‌بینی مقاومت بتن در اثر خروج از مرکزیت کوچک دستگاه و تمرکز تنش در محل گیرها قابل اعتماد نیست. روش دیگر، آزمایش غیر مستقیم

شکاف استوانه‌ای به قطر ۱۵۰ میلی‌متر و ارتفاع ۳۰۰ میلی‌متر در اثر نیروی فشاری وارده است. وقتی که مقاومت کششی بتن فرا رسید نمونه از وسط به دو نیم شکافته می‌شود.

مقاومت خمشی حداکثر تنش کششی ناشی از خمش در بتن است. بارگذاری باعث خمش در نتیجه ایجاد تنش‌های فشاری و کششی در بتن می‌گردد. مقاومت بتن در مقابل تنش‌های کششی به وجود آمده ناشی از خمش را مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی بتن می‌نامند. با توجه به اینکه تنش‌های خمشی سریعتر از تنش‌های فشاری به مقاومت حادی کششی بتن نزدیک می‌شوند، در طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مقاومت خمشی تابع آب به سیمان، حجم سنگدانه درشت، کیفیت وجه مشترک سنگدانه و خمیر سیمان است. احتمال دارد با مخلوط مشابه، مقاومت خمشی بتن خودتراکم بیشتر از بتن معمولی باشد [۴].

۲. برنامه آزمایشگاهی

۲.۱.۲. مشخصات مصالح مصرفی

۲.۱.۲.۱. سیمان

در ساخت بتنی با نفوذپذیری کم و دوام بالا، نوع و مقدار سیمان مصرفی یکی از عوامل مهم و تاثیر گذار در کیفیت بتن محسوب می‌گردد. سیمان مصرفی مورد استفاده در مخلوط‌ها از نوع ۴۲۵-۱ می‌باشد.

نتایج آزمایش‌های مختلف از جمله مقاومت فشاری ملات استاندارد سیمان مصرفی در سنین مختلف و دیگر مشخصات در جدول‌های شماره ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مقاومت فشاری و خمشی ملات سیمان (استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۳)

سن آزمایش (روز)	2	3	7	28
مقاومت فشاری (kg/cm^2)	215	275	400	520
مقاومت خمشی (kg/cm^2)	48	50	71	79

جدول ۲- غلظت نرمال، زمان گیرش و نرمی سیمان (استاندارد ملی ایران به شماره ۳۹۰، ۳۹۲ و ۱۱۸۹۵)

غلظت نرمال (%)	زمان گیرش اولیه (Min)	زمان گیرش نهایی (Min)	نرمی سیمان (Cm^2/gr)
0.23	165	265	3100

۲.۱.۲.۲. مواد پودری

در این پژوهش از انواع مواد پودری فعال و خنثی استفاده شده است. این مواد پودری در گروه‌های پوزولان طبیعی مانند زئولیت، پوزولان مصنوعی مانند میکروسیلیس، مواد شبه‌سیمانی مانند سرباره آهن‌گذاری و مواد خنثی مانند پودر سنگ‌آهک تقسیم‌بندی می‌شوند. انواع مواد پودری مصرفی در این پژوهش در ادامه توضیح داده می‌شود.

میکروسیلیس: میکروسیلیس که با نام دوده سیلیسی نیز شناخته می‌شود. در تهیه آلیاژهای فروسیلیس، از احیا سیلیس توسط کربن، مقداری بخار SiO_2 تشکیل می‌گردد که پس از اکسیده شدن، پودر بسیار نرمی را تشکیل می‌دهد که دوده-سیلیس نامیده می‌شود. محدوده اندازه‌ی ذرات این پودر بین ۵۰۰-۱۰۰ nm است و سطح مخصوصی در حدود $200000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ دارد. این محصول بیش از ۹۰ درصد سیلیس فعال دارد. میکروسیلیس مصرفی از کارخانه فروسیلیس کاشان تهیه شده است. مشخصات میکروسیلیس مورد استفاده در جدول ۳ نشان داده شده است.

پوزولان زئولیت: زئولیت یک کانی متبلور با ترکیبی از سیلیکات آلومینیوم هیدراته از عناصر قلیایی و قلیایی خاکی می‌باشد. در نیم قرن اخیر با بهره‌گیری از روش‌ها و ابزار پیشرفته در مطالعات کانی شناسی، نظیر XRD و میکروسکوپ الکترونی، شناسایی و بررسی تعداد زیادی از کانی‌های متبلور بسیار ریز (Cryptocrystalline) زئولیت میسر گردیده است. تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهد که این ماده به‌طور مؤثری سبب بهبود خواص بتن در محیط‌های گزندبار مانند محیط‌های اسیدی، سولفاتی و کلریدی می‌شود. پودر زئولیت در این پژوهش از معدن افتر سمنان تهیه شده است. این ماده پس از آسیاب بصورت پودر شده، آماده استفاده گردید. میزان ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون (عبوری از الک شماره ۲۰۰) به عنوان معیاری از میزان آسیاب در نظر گرفته شد. درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ پودر زئولیت مصرفی ۷۰ درصد می‌باشد. چگالی و آنالیز شیمی به روش تر انجام شده بر روی پودر زئولیت در جدول شماره ۳ ارائه شده است.

سرباره آهنگدازی: در تولید چدن، که آهن خام نیز نامیده می‌شود، اگر روبراه به آرامی در هوا خنک شود، مواد متشکله شیمیایی معمولاً به شکل میللیت متبلور خواهند بود که در دمای معمولی با آب واکنش انجام نمی‌دهد. سرباره آهنگدازی مورد استفاده در این پژوهش از خط سوم ذوب آهن اصفهان تهیه شده است. مهمترین ویژگی این خط خنک‌سازی سریع سرباره آهنگدازی به کمک جت آب می‌باشد. این سرد شدن یکباره به فعال شدن بهتر و واکنش‌زایی سرباره آهنگدازی کمک می‌کند. دانه‌های سرباره آهنگدازی باید آسیاب شود و حداقل نرمی برابر سیمان داشته باشد. جهت فعالیت بهتر و افزایش سطح ذرات، سرباره آهنگدازی مصرفی در این پژوهش به میزان بیش از سیمان‌های متداول آسیاب شده است، و نرمی آن به ۴۵۰۰ سانتی-مترمربع بر گرم رسیده است. در جدول شماره ۳ چگالی و آنالیز شیمی به روش تر انجام شده روی این سرباره آهنگدازی ارائه شده است.

پودر سنگ آهک: پودر سنگ آهک به‌وسیله خاصیت پرنکنندگی خود می‌تواند تاثیر چشمگیری در کاهش نفوذپذیری بتن داشته باشد. این پودر جایگزین ماسه می‌باشد و جنس آن کربنات کلسیم با خلوص ۹۰ درصد می‌باشد. این ماده دارای ۴۰ درصد مانده روی الک ۷۵ میکرون می‌باشد. پودر سنگ آهک جایگزین ۸ درصد مصالح سنگی ریزدانه منظور گردیده است. مشخصات پودر سنگ مصرفی در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات مواد مکمل سیمانی

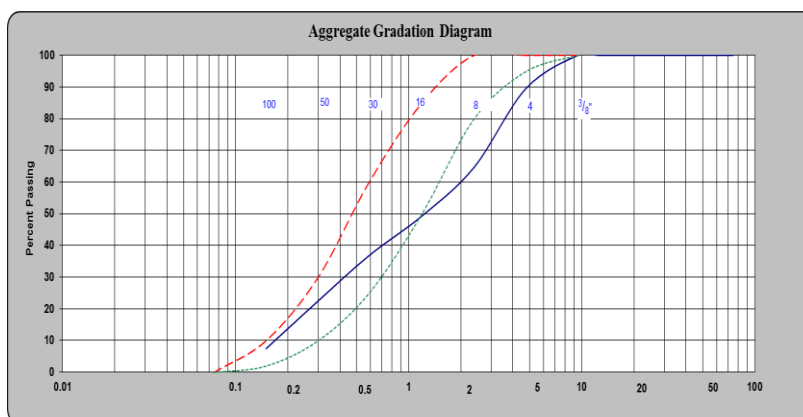
TiO ₂ %	MnO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	So ₃ %	MgO%	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	SiO ₂ %	چگالی (Kg/m ³)	ماده پودری
--	--	0.31	0.38	2.63	1.63	0.81	0.86	2.27	90.33	2212	میکروسیلیس
--	--	1.93	0.63	0.14	1.15	12.45	0.66	3.61	69.78	2190	پوزولان زئولیت
1.25	1.24	0.52	0.75	0.37	6.86	12.48	1.10	39.12	37.35	2900	سرباره آهنگدازی
0.002	0.002	0.10	0.03	--	0.30	0.05	0.13	55.58	0.09	2710	پودر سنگ

۳.۱.۲. مصالح سنگی

یکی از عوامل مهم برای دست یابی به مخلوط خودتراکم مورد نظر استفاده از سنگدانه با دانه بندی مناسب می باشد. به گونه ای که کوچکترین تغییر در نمودار دانه بندی می تواند باعث تغییر اساسی در خواص بتن تازه و سخت شده شود. در این پژوهش از سه نوع مصالح سنگی شن بادامی، شن نخودی و ماسه استفاده شده است. انتخاب مصالح مناسب جهت ساخت بتن خودتراکم با انجام آزمایش های متعدد بر روی انواع مصالح انجام شده است و در نهایت مصالح سنگی از معدنی در شهریار که از نوع رودخانه ای و دارای مرغوبیتی مناسب بود انتخاب گردید.

۱.۳.۱.۲. ماسه

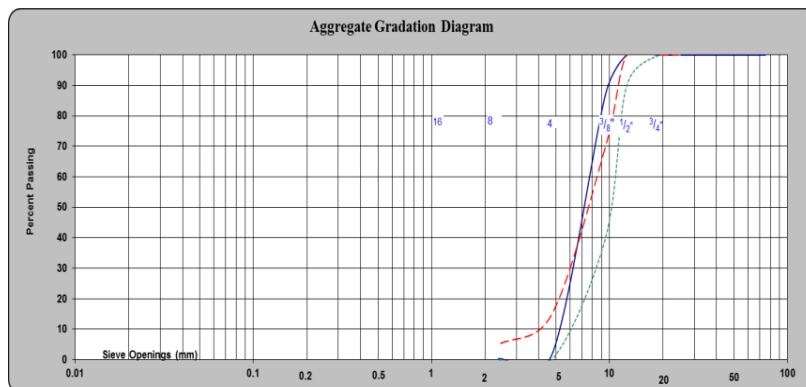
ماسه مورد استفاده در این طرح مخلوطها از نوع طبیعی و در اندازه ۰-۶ میلیمتر می باشد. وزن مخصوص این ماسه برابر ۲۵۶۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن ۳/۳ درصد می باشد. مدول نرمی ماسه ۳/۵ بوده که بر اساس استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ برای تولید بتن مناسب است. در شکل شماره ۱ نمودار دانه بندی ماسه نشان داده شده است.



شکل ۱. نمودار دانه بندی ماسه

۲.۳.۱.۲. شن نخودی

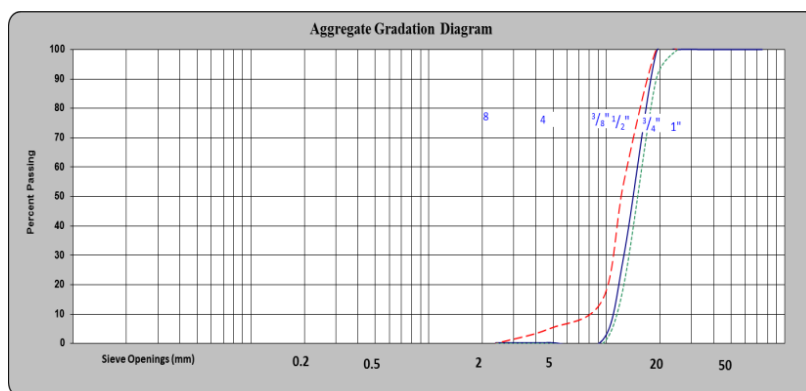
برای رسیدن به دانه بندی یکنواخت و مناسب از یک نوع شن نخودی با اندازه ۱۲-۶ میلیمتر و به علت تامین خواص بتن تازه در رنج کاملاً طبیعی انتخاب گردیده است. وزن مخصوص این شن برابر ۲۵۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن ۲/۱۷ درصد می باشد. نمودار دانه بندی شن نخودی در شکل شماره ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. نمودار دانه بندی نخودی

۳.۳.۱.۲. شن بادامی

با توجه به اهمیت کسب روانی مورد نیاز بدون ایجاد جداشدگی اجزای بتن، استفاده از شن بادامی با حداکثر اندازه اسمی ۱۹ میلیمتر بهترین گزینه می‌باشد. شن مورد استفاده با حداکثر ۶۰ درصد شکستگی علاوه بر نداشتن تاثیر منفی بر روی کسب مقاومت فشاری بتن، کمک زیادی به تامین خواص بتن تازه می‌نماید. وزن مخصوص این شن برابر ۲۵۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جذب آب آن برابر ۱/۷۷ درصد می‌باشد. نمودار دانه‌بندی شن بادامی در شکل شماره ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نمودار دانه بندی بادامی

۲.۲. طراحی مخلوط‌های آزمایشگاهی

جهت تامین لزجت و ویسکوزیته پلاستیک بتن خودتراکم استفاده از مواد پودری امری رایج است. از ویژگی‌های مثبت استفاده از این مواد پودری بهبود خواص بتن تازه و سخت‌شده می‌باشد. از این رو طرح مخلوط‌های آزمایشی بسیار زیادی جهت دستیابی به درصد جایگزینی مناسب هر یک از مواد پودری در مرکز تحقیقات بتن شهید رجایی ساخته شده است. درصد جایگزینی بهینه به گونه‌ایست که مصرف کمتر از آن اثر چشمگیری در بهبود مشخصات بتن ندارد و استفاده بیشتر از آن میزان اثرات منفی در کارایی و خواص بتن سخت شده خواهد داشت. پس از تعیین درصد جایگزینی بهینه هر یک از مواد پودری، طرح مخلوط نهایی جهت اجرا در چندین پروژه مهم شهری توسط مجموعه شهید رجایی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این پروژه‌ها می‌توان به بتن‌های خودتراکم حاوی پودرسنگ آهک در پروژه بزرگراه طبقاتی شهید صدر تهران، سرباره آهنگدازی در پروژه پل‌های شهید بابایی قزوین، پوزولان زئولیت در پروژه پل جهتی شهید صیاد تهران، نام برد. جایگزینی در تمامی طرح مخلوط‌ها بر اساس

مقدار کل مواد سیمانی ۵۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب بوده است. جهت رسیدن به کارآیی برابر در جریان اسلامپ ۷۰ سانتی متر از مواد فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر استفاده شده است. مشخصات طرح مخلوطها در جدول شماره ۴ ارائه شده است. در ساخت مخلوطها از یک پن میکسر استفاده شده است.

جدول ۴. مشخصات مخلوطهای آزمایشگاهی

ردیف	کد مخلوط	نوع ماده پودری	درصد جایگزینی مواد پودری	سیمان (Kg/m ³)	ماده پودری (Kg/m ³)	W/C+P	افزونی (Kg/m ³)	(SSD)ماسه (Kg/m ³)	(SSD)شن (Kg/m ³)	اسلامپ فلو (cm)
1	SC-01	---- (شاهد)	0	500	--	0.36	3.6	990	660	69
2	SC-02	میکروسیلیس	10	450	50	0.35	8	986	660	68
4	SC-03	پوزولان زئولیت	15	425	75	0.40	5	1005	565	71
6	SC-04	سرباره آهنگدازی	30	350	150	0.35	3	965	700	71
7	SC-05	پودرسنگ	*8	430	80	0.38	3.44	1002	665	70

* پودرسنگ به مقدار ۸ درصد جایگزین مصالح سنگی ریزدانه شده است.

۳. نتایج و تفسیر

۱.۳. آزمون جریان اسلامپ

آزمایش جریان اسلامپ روشی برای پایش روانی و کارآیی بتن خودتراکم تازه می باشد. ساخت بتن خودتراکم با سنگدانه درشت بزرگتر از ۲۵ میلی متر از لحاظ قابلیت جریان پذیری و جدانشدگی بسیار سخت است، از این رو استاندارد ملی ایران به شماره ۱۱۲۷۰ جریان اسلامپ را برای بتن خودتراکم با سنگدانه های کوچکتر از ۲۵ میلی متر توصیه می کند. نرخ پخش شدگی بتن به گرانروی آن بستگی دارد. در این آزمایش قطر جریان پخش شده بتن روی میز را اندازه گیری کرده و گزارش می کنند. جریان اسلامپ بتن های خودتراکم مورد استفاده در این پژوهش در محدوده ۷۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است. در شکل شماره ۴ جریان اسلامپ یک نمونه بتن نشان داده شده است.

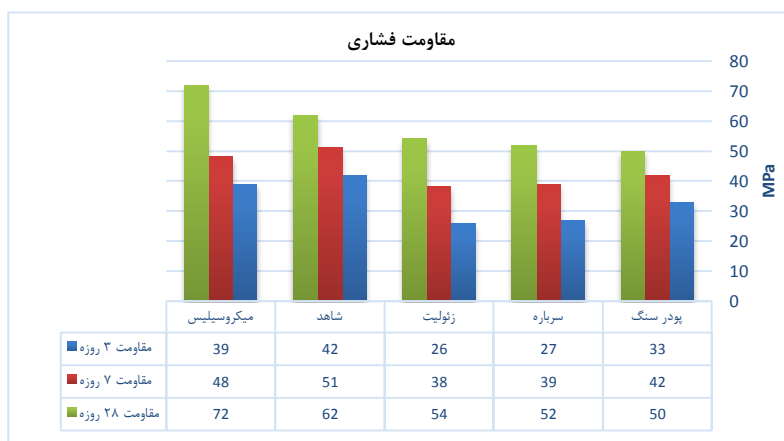


شکل ۴. جریان اسلامپ

۲.۳. مقاومت فشاری

بتن خودتراکم با نسبت آب به سیمان مشابه بتن معمولی می تواند مقدار مقاومت فشاری بالاتری کسب کند، زیرا منطقه انتقالی بین سنگدانه و خمیر از کیفیت بالاتری برخوردار است. آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه های مکعبی ۱۰×۱۰ سانتی متر طبق استاندارد ملی ایران انجام گردیده است [۵]. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۳، ۷ و ۲۸ روز در

شکل شماره ۵ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می شود تمامی بتن ها در محدوده رده مقاومتی C40 و بالاتر است. این طرح مخلوطها در دسته بتن های توانمند خودتراکم قرار گرفته است. در سنین اولیه طرح شاهد که بدون مواد پودری می باشد بیشترین مقاومت فشاری کسب کرده است. در سن ۲۸ روز با پیشرفت فرآیند واکنش مواد پودری بتن حاوی میکروسیلیس بیشترین مقدار مقاومت بدست آورده است. پس از آن بتن حاوی زئولیت، سرباره و پودرسنگ رشد مقاومتی مطلوبی از خود نشان داده اند. با توجه به اینکه استفاده از این پودرها در طرح مخلوط شاهد تاثیر منفی قابل توجهی در مقاومت فشاری کسب شده ایجاد نکرده، می توان گفت ایجاد تراکم بیشتر خمیر و عمل کردن پودر به عنوان محل هسته زایی برای واکنش زودرس محصولات هیدراتاسیون کمک قابل توجهی به رشد مقاومت بتن کرده است.



شکل ۵. مقاومت فشاری طرح مخلوطها

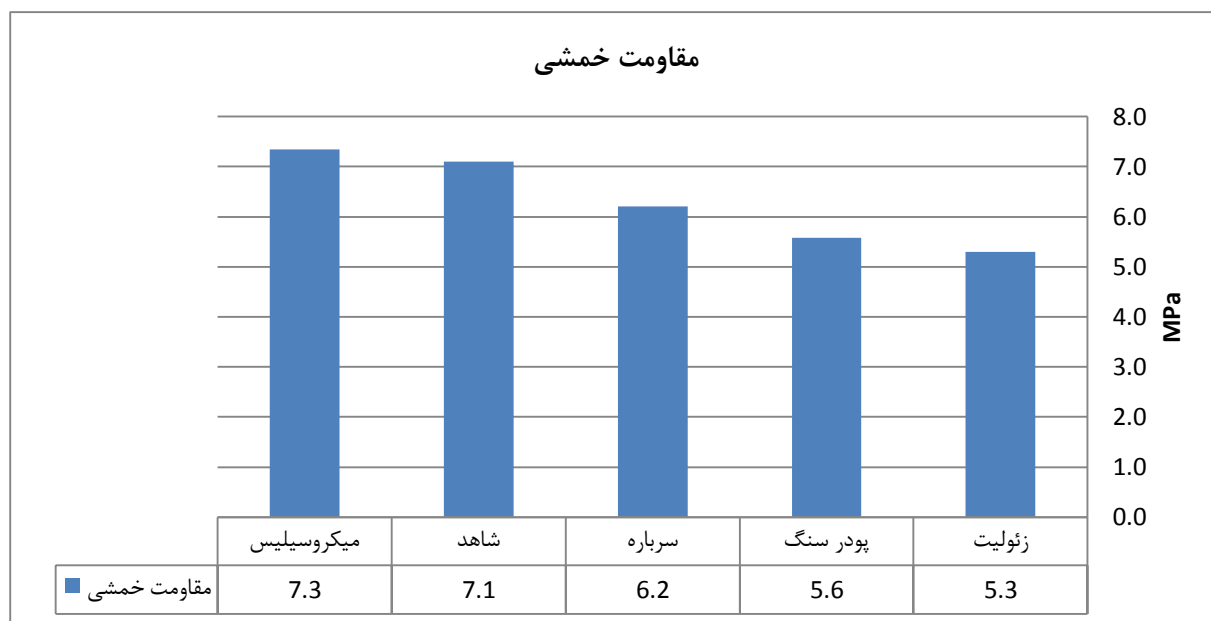
۳.۳. مقاومت خمشی

مقاومت خمشی طبق استاندارد ملی ایران بر روی نمونه های تیر به ابعاد $15 \times 15 \times 60$ سانتی متر در سن ۲۸ روز انجام شده است [۶]. نحوه انجام آزمون در شکل شماره ۶ و نتایج حاصل از مقاومت خمشی در شکل شماره ۷ نشان داده شده است. بیشترین مقاومت خمشی را بتن حاوی میکروسیلیس و کمترین را بتن حاوی زئولیت کسب کرده اند. مقاومت خمشی بیشتر تحت تاثیر سنگدانه بتن است اما به نظر می رسد واکنش زایی بسیار شدید میکروسیلیس، با هیدروکسید کلسیم تولید شده در اثر هیدراته شدن سیمان و بهبود چسبانندگی ذرات سنگدانه به یکدیگر موجب شده تا مقاومت بتن تحت خمش بسیار افزایش یابد. همچنین یک اثر فیزیکی دیگر میکروسیلیس جای گرفتن ذرات آن در نزدیکی ذرات سنگدانه، یعنی در فصل مشترک سنگدانه و خمیر سیمان می باشد، که از این جهت افزایش مقاومت کششی بتن تحت خمش را بسیار زیاد نشان داده است.

بتن حاوی سرباره و پودرسنگ آهک نیز بدلیل ایجاد ریزساختار متراکم تر از خمیر سیمان سخت شده کمک بسیار خوبی در حفظ مقاومت خمشی بتن کرده است. بدلیل آنکه هیدراته شدن اولیه سرباره خیلی کند است انتظار می رود با گذشت زمان و در سنین بالاتر از ۲۸ روز مقاومت بتن حاوی سرباره رشد خوبی داشته و مقدار نهایی آن از نمونه شاهد بیشتر شود. با توجه به روند کسب مقاومت خمشی مخلوط های بتنی که مشابه نمودار مقاومت فشاری است، می توان گفت روابط مستقیمی که در بتن معمولی بین این مقادیر برقرار است در بتن خودتراکم نیز می تواند با اندکی تغییر حاکم شود.



شکل ۶. آزمایش شکست تیر خمشی

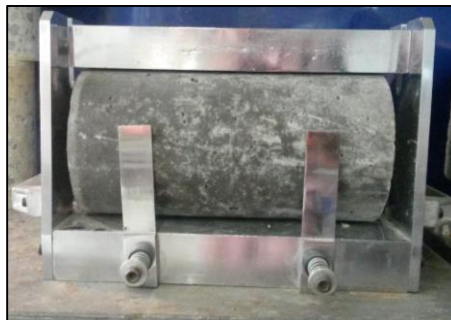


شکل ۷. نتایج آزمایش تیر خمشی

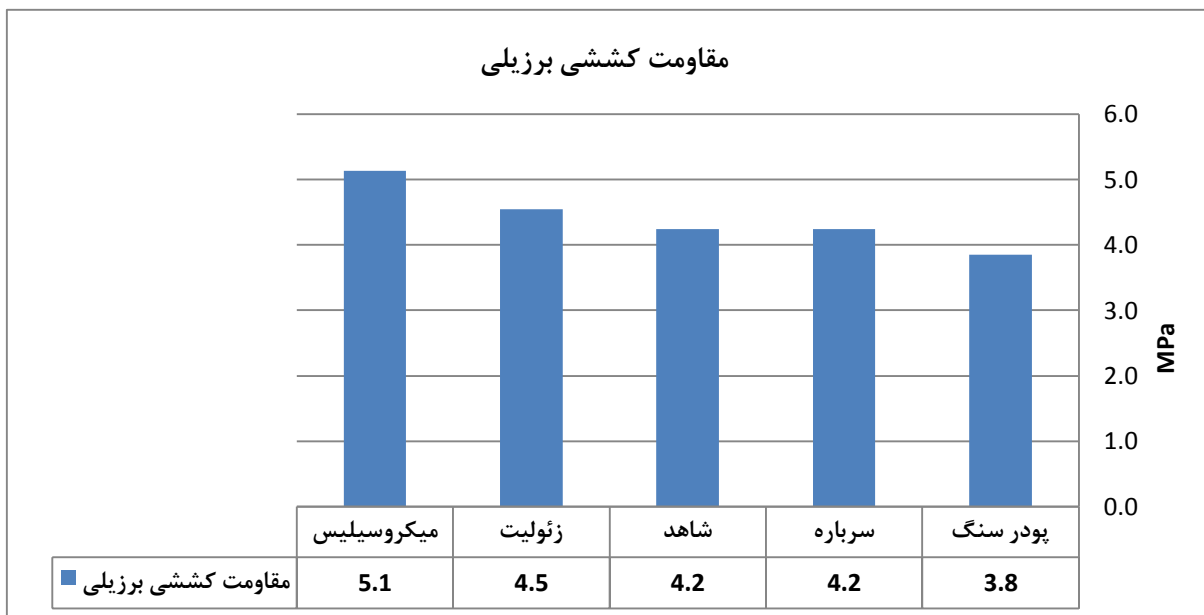
۳.۲. مقاومت شکافتی دو نیم شدن (برزیلی)

به دلیل مشکلات ناشی از اندازه‌گیری مقاومت کششی بتن بطور مستقیم از آزمایش جایگزین دو نیم شدن شکافتی استفاده می‌شود. تعیین مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن برای طراحی اعضای سازه‌ای بتنی در حالت بهینه کاربرد دارد تا مقاومت برشی بتن ارزیابی شده و طول گیرایی میلگرد داخل بتن تعیین شود. در حالت کلی، مقاومت کششی بتن به روش دو نیم کردن، بزرگ‌تر از مقاومت کششی مستقیم و کوچکتر از مقاومت کششی در حالت خمش است. در این پژوهش آزمایش روی آزمون‌های استوانه‌ای 15×30 در سن ۲۸ روز انجام گردیده است [۷]. محفظه فرارگیری نمونه جهت آزمایش در شکل شماره ۸ و نتایج حاصل از آن در شکل شماره ۹ نشان داده شده است. مشابه نتایج حاصل از شکست تیر خمشی میکروسیلیس بیشترین

مقاومت کششی دوتیم شدن را از خود نشان داده است. سهم میکروسیلیس در مقاومت اولیه از طریق اصلاح فشردگی می‌باشد، یعنی عمل نمودن به عنوان پرکننده و اصلاح منطقه فصل مشترک با سنگدانه‌ها است. همچنین پیوستگی خمیر سیمان هیدراته با سنگدانه‌ها، به ویژه با ذرات درشت‌تر با حضور میکروسیلیس بهبود چشمگیری می‌یابد. از آنجایی که مقاومت کششی بتن بسیار کمتر از مقاومت در فشار است این اثرات میکروسیلیس در بالابردن مقاومت بتن در برابر کشش بسیار کمک کننده است. دیگر مواد سیمانی همچون زئولیت و سرباره نیز با ایجاد چسبندگی مناسب در فصل مشترک سنگدانه و خمیر نه تنها کاهش مقاومت کششی را در پی نداشته، بلکه در مورد پودر زئولیت افزایش مقاومت نیز مشاهده شده است.



شکل ۸. محفظه شکست نمونه برزیلی



شکل ۹. نتایج آزمایش مقاومت کششی

۴. نتیجه گیری

- ۱- در اکثر موارد استفاده از مواد پودری کاهش کارآیی بتن همراه دارد که در این صورت استفاده از مواد فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلاتی از نظر فنی و اقتصادی مناسب می باشد.
- ۲- میکروسیلیس بیشترین رشد مقاومت فشاری در ۲۸ روز و پودرسنگ کمترین رشد مقاومت داشته است.
- ۳- با توجه به سهم سیمان در خمیر طرح مخلوط شاهد، و آثار منفی ناشی از جمع شدگی و ترک خوردن آن، با استفاده از تمامی مواد پودری و باقی ماندن این مخلوطها در همان رده بتن شاهد، از این پدیده مخرب کاسته خواهد شد.
- ۴- در سنین اولیه بیشترین رشد مقاومت را بتن طرح مخلوط شاهد نشان داده است. ولی با گذشت زمان این فرایند رشد مقاومت در بتن های حاوی مواد پودری بیشتر نمایان شده است.
- ۵- در بحث مقاومت خمشی بیشترین مقاومت را مخلوط حاوی میکروسیلیس و کمترین را بتن حاوی زئولیت با اختلاف بسیار کم نسبت به عملکرد پودر سنگ کسب کرده اند.
- ۶- مقاومت کششی آزمون برزیلی مخلوطها نیز روندی مشابه مقاومت کششی حاصل از آزمون خمش داشته است. با تحلیل نتایج می توان گفت در بتن خودتراکم همبستگی خوبی میان این دو برقرار است که با انجام یکی می توان دیگری را پیش بینی کرد.
- ۷- به دلیل یکسان بودن ماهیت دو آزمون خمشی و برزیلی، به نظر می رسد ایجاد چسبندگی مناسب در فصل مشترک سنگدانه و خمیر فوق العاده موجب افزایش مقاومت بتن در برابر کشش می شود. مثلا میکروسیلیس یا سرباره در ایجاد چسبندگی بسیار خوب عمل کرده و نه تنها کاهش مقاومتی به دنبال نداشته بلکه در افزایش آن نیز تاثیر مطلوبی گذاشته است.

مراجع

- [1] A. N. Alqadi, K. N. B. Mustapha, S. Naganathan, and Q. N. Al-Kadi, "Development of self-compacting concrete using contrast constant factorial design," Journal of King Saud University-Engineering Sciences, vol. 25, pp. 105-112, 2013.
- [2] P. J. Bartos and M. Grauers, "Self-compacting concrete," Concrete, vol. 33, pp. 9-13, 1999.
- [3] Aggrawal, P., Siddique, R., Aggrawal, Y., Gupta, S.M., "Self- Compacting Concrete- Procedure for Mix Design", Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, ISSN 1583- 1078, p. 15-24, 2008.
- [4] Neville AM. Tecnología del concreto. Mexico: Limusa; 1988.

[۵] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، "آزمایش مقاومت فشاری بتن"، ایران ۱۳۹۰

[۶] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، "آزمایش مقاومت خمشی بتن (بارگذاری تیر در یک سوم دهانه)"، ایران ۱۳۹۴

[۷] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، "آزمایش مقاومت شکافتی دو نیم شدن بتن"، ایران ۱۳۹۴

[۸] موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، "آزمایش تعیین مدول ارتجاعی بتن در فشار"، ایران ۱۳۹۳

- [9] ACI building code 318-08. Building code requirements for structural concrete and commentary. US: American Concrete Institute; 2008