

بررسی تاثیر سرباره ذوب آهن و پوزولان طبیعی ژئولیت بر خواص مکانیکی بتن غلتکی روسازی

محمد حسین خزعلی^۱، علیرضا نیکخواه^{۲*}، موسی کلهری^۳

^۱مدیر مرکز تحقیقات بتن، گروه تخصصی شهید رجایی

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

^۳دانشجوی دکتری عمران مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چکیده:

روسازی‌های بتن غلتکی روسازی مستحکم، متراکم و با دوام هستند. این ویژگی‌ها در کنار افزایش سرعت ساخت و کاهش هزینه‌ها این نوع روسازی‌ها را به عنوان یک گزینه مناسب جایگزین آسفالت برای پارکینگ‌ها، انبارها، اسکله‌ها، بنادر، مناطق ویژه‌ی نظامی، خیابان‌ها و بزرگراه‌ها مطرح می‌کند. بتن غلتکی خواص مقاومتی و اجزای تشکیل دهنده‌ای تقریباً مشابه با بتن متعارف دارد. سنگدانه‌هایی با دانه‌بندی مناسب، مواد سیمانی و آب، در عین حال نسبت‌های مخلوط آن متفاوت می‌باشد. مخلوط‌های بتن غلتکی باید به اندازه‌ای خشک باشند که بعد از عملیات بتن‌ریزی قادر به تحمل وزن یک غلتک لرزان بوده و از طرفی به اندازه‌ای روان باشد که توزیع یکنواخت خمیر سیمان را تضمین نماید. بر این اساس معیار حجم خمیر بهینه شاخصی برای رسیدن به طرح مخلوط مناسب می‌تواند مطرح گردد. از طرفی با توجه به تحقیقات پیشین، وجود مواد پوزولانی و شبه-سیمانی در بتن‌های متعارف سبب افزایش و بهبود دوام بتن گردیده است. در این مطالعه با استفاده از روش طرح مخلوط حجم خمیر بهینه در محدوده مقدار کل مواد سیمانی ۲۷۵ تا ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰,۲۸ تا ۰,۴۴، مخلوط‌های آزمایشی ساخته شده است. طرح‌های مخلوط دارای حجم خمیر بهینه که کارآیی آنها بر اساس آزمون وی بی در محدوده استاندارد قرار دارد، انتخاب شده است. در گام بعدی مخلوط‌های دارای حجم خمیر بهینه با جایگزینی ماده شبه سیمانی سرباره ذوب آهن اصفهان و پوزولان طبیعی ژئولیت افتر سمنان، خواص مکانیکی نظیر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، و مقاومت کششی برزلی در مقایسه با بتن شاهد مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که استفاده از مواد جایگزین سیمان نه تنها تاثیر منفی در کاهش مشخصات مکانیکی نسبت به بتن شاهد را نشان نمی‌دهند، بلکه عملکرد خوب این مواد، بتنی با خواص مقاومت مکانیکی مطلوب را حاصل نموده است.

واژگان کلیدی: بتن غلتکی روسازی، روش حجم خمیر بهینه، خواص مکانیکی بتن، سرباره ذوب آهن، پوزولان طبیعی ژئولیت

۱- مقدمه

بتن غلتکی بتنی نسبتاً جدید در ایران است که درسدسازی و اخیراً در روسازی‌های بتنی مورد استفاده قرار گرفته است. این گونه کاربردهای اولیه بتن غلتکی در بسیاری از کشورها قبل از جنگ جهانی اول نیز رایج بوده است. مهندسين كانادایی در ایالت British Columbia در سال ۱۹۷۰ به منظور ایجاد لایه‌های اساس با کیفیت بالاتر کاربرد سنگدانه با مقدار بالاتری از سیمان را آغاز کردند [۱]. گام بعدی در نظر گرفتن روسازی بتن غلتکی به عنوان روسازی کامل و بدون نیاز به لایه روکش بود. اولین کاربرد روسازی بتن غلتکی بدین شکل در ساخت محوطه‌ای برای کارخانجات چوب و الوار با بارگذاری سنگین در ونکوور در سال ۱۹۷۰ بوده است. عملکرد روسازی بتن غلتکی در این محوطه که تحت بارگذاری سنگین و همچنین سایش شدید بود بسیار موفقیت آمیز، به نحوی که از آن زمان بتن غلتکی برای ساخت روسازی محوطه‌های صنعتی کاربرد وسیعی در کانادا داشته است [۱،۲].

روسازی‌های بتن غلتکی روسازی مستحکم، متراکم و با دوام هستند. این ویژگی‌ها در کنار افزایش سرعت ساخت و کاهش هزینه‌های این نوع روسازی‌ها را به عنوان یک گزینه‌ی مناسب برای پارکینگ‌ها، انبارها، اسکله‌ها، بندر، مناطق ویژه‌ی نظامی، خیابان‌ها و بزرگراه‌ها مطرح می‌کند. در فرایند تولید و ساخت بتن غلتکی روسازی از ابعاد مختلف روسازی‌های بتنی معمولی شامل مواد و مصالح و نیز برخی روش‌های اجرایی مربوط به روسازی‌های آسفالتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با وجود اینکه تراکم روسازی‌های بتن غلتکی طی فرایندی مشابه با روسازی‌های آسفالتی صورت گرفته و دانه بندی سنگدانه‌ها نیز در این دو نوع روسازی نسبتاً مشابه است، با این حال مواد و مصالح و عملکرد سازه‌ای بتن غلتکی به روسازی‌های بتنی معمولی نزدیک‌تر است. در صورت استفاده از سنگدانه‌هایی با دانه بندی مناسب، مقادیر بهینه سیمان و آب و اعمال تراکم کافی، روسازی‌های بتن غلتکی می‌تواند دارای خواص مقاومتی مشابه با بتن معمول بوده و نفوذپذیری بسیار کمی نیز داشته باشد [۲]. مخلوط‌های بتن غلتکی باید به اندازه‌ای خشک باشند که بعد از عملیات بتن ریزی قادر به تحمل وزن یک غلتک لرزان بوده و از طرفی به اندازه‌ای روان باشد که توزیع یکنواخت خمیر سیمان را تضمین نماید. تعیین اصولی نسبت‌های اختلاط برای تامین میزان خمیر مورد نیاز برای پوشاندن اطراف سنگدانه‌ها و پرکردن حفرات مخلوط متراکم شده امری ضروری است. پوشاندن شدن سطح سنگدانه‌ها توسط خمیر برای دستیابی به یک روسازی مقاوم و با دوام و برای اطمینان از انتقال بار از طریق قفل و بست سنگدانه‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است [۱،۳]. در شکل ۱ کاربرد روسازی بتن غلتکی در موارد مختلف نشان داده شده است.



شکل ۱- کاربردهای مختلف روبه‌های بتن غلتکی

مهم‌ترین ملاحظات در طرح مخلوط بتن غلتکی روسازی تامین مشخصه‌های مکانیکی مورد نیاز طرح می‌باشد. علاوه بر این با توجه به ویژگی خاص بتن غلتکی (خشکی مخلوط) تامین کارایی کافی جهت امکان اجرا و تراکم مناسب روسازی و کاهش امکان جداسازی، همواره از مهم‌ترین نکات مورد توجه در بهینه سازی طرح مخلوط بتن غلتکی می‌باشد. روش‌های تعیین طرح مخلوط

بتن غلتکی عمدتاً بر اساس روش‌های تجربی بوده که با سعی و خطا همراه می‌باشند [۴،۵]. از این رو تحقیقات آزمایشگاهی روی پارامترهای سازنده مخلوط بتنی و عوامل موثر بر مقاومتی آن مورد نیاز می‌باشد.

همانند دیگر روسازی‌های بتنی، مصالح سیمانی یکی از اجزا اصلی در ساخت روسازی بتن غلتکی می‌باشد. با توجه به آلودگی ناشی از تولید سیمان و انتشار زیاد گاز دی‌اکسید کربن استفاده از پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی به‌عنوان مصالح سیمانی مکمل و جایگزین بخشی از سیمان مصرفی اهمیت خاصی پیدا کرده، و تعداد تحقیقات انجام شده در این زمینه روز به روز در حال افزایش می‌باشد [۲]. استفاده از این مصالح ضمن کاهش مصرف سیمان که سبب صرفه جویی در هزینه‌ها و حفظ محیط زیست می‌شود، خواص مکانیکی و طول عمر بتن را نیز بهبود می‌بخشد. استفاده از مواد شبه‌سیمانی مثل سرباره ذوب آهن و یا پوزولان طبیعی ژئولیت می‌تواند مشخصه‌های مقاومتی و دوام بتن غلتکی را در حد خوبی بهبود بخشد. به‌عنوان مثال استفاده از سرباره ذوب‌آهن در مخلوط‌های بتنی بر روی کیفیت بتن و افزایش دوام آن در محیط‌های خورنده تأثیر می‌گذارد و پوزولان طبیعی ژئولیت، برای ارتقا کیفی روسازی‌های بتن غلتکی مناسب می‌باشند. در این پژوهش تأثیر پوزولان طبیعی ژئولیت و ماده شبه سیمانی سرباره ذوب‌آهن بر روی کارایی بتن تازه و خواص مکانیکی بتن سخت شده مورد بررسی قرار گرفته است.

ژئولیت 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 کانی‌شناسی، نظیر XRD و میکروسکوپ الکترونی، شناسایی و بررسی تعداد زیادی از کانی‌های متبلور بسیار ریز (Cryptocrystalline) ژئولیت میسر گردیده است. مشخصات فنی سیمان ژئولیتی نیز توسط سازمان ملی استاندارد با شماره ۱۶۴۸۱ در سال ۱۳۹۲ در کشور تدوین، و منتشر شده است.

سرباره ذوب‌آهن یکی از محصولات جانبی کارخانه ذوب آهن است که اگر به آن آب اضافه شود واکنشی صورت نمی‌گیرد. این ماده شبه‌سیمانی بر خلاف پوزولان‌ها که با هیدروکسید کلسیم حاصل از آگیری سیمان واکنش نشان می‌دهند و آنرا به مصرف می‌رسانند، از هیدروکسید کلسیم فقط به‌عنوان کاتالیزور استفاده می‌کنند و در حضور آب واکنشی شبه سیمان دارند با این تفاوت که هیدروکسید کلسیم تولید نمی‌شود. ۹۵ درصد وزنی سرباره ذوب‌آهن از اکسیدهای سیلیس، آلومینیوم، کلسیم و منیزیم تشکیل شده و بقیه آن شامل گوگرد، اکسیدهای آهن و منگنز است. برای دستیابی به الزامات دوام و مقاومت، استفاده از مواد مکمل سیمانی مورد نظر پژوهشگران بوده است. در مطالعات گذشته بهبود مشخصه‌های دوامی بتن در صورت استفاده از مواد مکمل سیمانی گزارش شده است. در این پژوهش به بررسی تأثیر استفاده از این مواد بر روی کارایی بتن تازه و خواص مکانیکی بتن غلتکی سخت شده می‌پردازیم.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح مصرفی

۲-۱-۱ سیمان

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

نتایج آزمایش‌های مختلف از جمله مقاومت فشاری ملات 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 (EN ISO 679)

سن آزمایش (روز)	1	3	7	28
مقاومت فشاری (kg/cm^2)	242	253	384	496
مقاومت خمشی (kg/cm^2)	48	50	71	79

جدول ۲- غلظت نرمال و زمان گیرش و نرمی سیمان (ASTM C 204, ASTM C 187-98, ASTM C191)

غلظت نرمال	زمان گیرش اولیه (Min)	زمان گیرش نهایی (Min)	نرمی سیمان (Cm ² /gr)
0.22	115	235	3100

۲-۱-۲- مواد جایگزین سیمان

پوزولان طبیعی زئولیت مصرف شده در این پژوهش از معدن افتر سمنان استخراج، و پس از آسیاب بصورت پودر شده آماده استفاده گردید. میزان ذرات کوچکتر از ۷۵ میکرون (عبوری از الک شماره ۲۰۰) به عنوان میعاری از میزان آسیاب در نظر گرفته شد. درصد عبوری از الک ۲۰۰ پودر زئولیت مصرفی ۷۰ درصد می باشد. چگالی و آنالیز شیمی به روش تر انجام شده بر روی پودر زئولیت در جدول شماره ۳ آمده است.

جدول ۳- مشخصات زئولیت

مشخصه	چگالی (Kg/m ³)	Na ₂ O%	K ₂ O%	So ₃ %	Mgo%	CaO%	Fe ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %	SiO ₂ %	LOI
زئولیت	2200	3.49	1.11	0.16	0.97	1.61	0.81	11.2	67.55	1.45

سرباره مورد استفاده در این پژوهش از خط سوم ذوب آهن اصفهان تهیه شده است. مهمترین ویژگی این خط خنک سازی سریع سرباره به کمک جت آب می باشد. این سرد شدن یکباره به فعال بودن بهتر و واکنش زایی سرباره کمک می کند. دانه های سرباره باید آسیاب شود و حداقل نرمی برابر سیمان داشته باشد. جهت فعالیت بهتر و افزایش سطح ذرات، سرباره مصرفی در این پژوهش به میزان بیش از سیمان های متداول آسیاب شده است، و نرمی آن به ۴۵۰۰ سانتی مترمکعب بر گرم رسیده است. در جدول شماره ۴ چگالی و آنالیز شیمی به روش تر انجام شده روی این سرباره ارائه شده است.

جدول ۴- مشخصات سرباره ذوب آهن

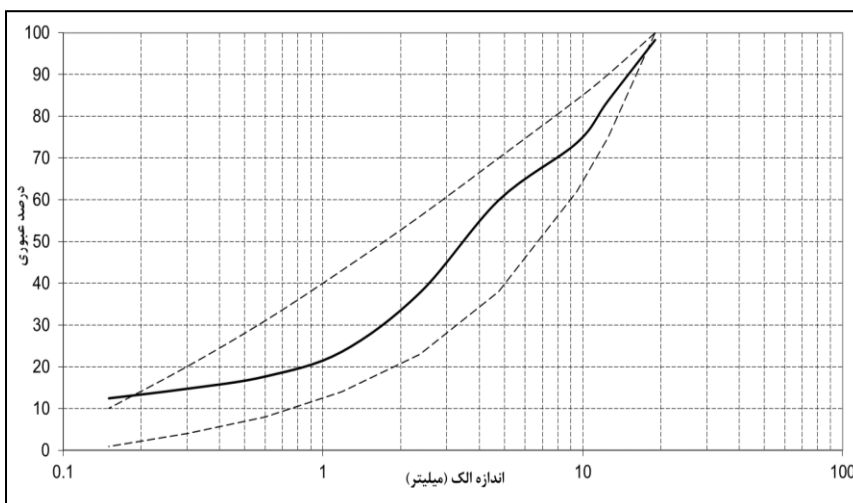
مشخصه	چگالی (Kg/m ³)	Na ₂ O%	K ₂ O%	So ₃ %	Mgo%	CaO%	Fe ₂ O ₃ %	Al ₂ O ₃ %	Mno%	TiO ₂ %	SiO ₂ %
سرباره	2900	0.56	0.95	2.04	7.00	39.38	0.48	11.48	1.24	1.25	36.35

۳-۱-۲- مصالح سنگی

سنگدانه های استفاده شده در این مطالعه شامل ماسه کوهی شکسته پر فیلر و شن شکسته با حداکثر اندازه ۱۹ میلی متر می باشد، که مشخصات این مصالح در جدول شماره ۵ قابل مشاهده است. درصد ترکیب شن و ماسه پس از ساخت مخلوط های آزمایشی در مقدار بهینه ۶۵ درصد ماسه و ۳۵ درصد شن بدست آمده است. منحنی دانه بندی ترکیبی استفاده شده در شکل شماره ۲ ارائه شده است.

جدول ۵- مشخصات مصالح سنگی

نوع مصالح سنگی	وزن مخصوص SSD (ton/m ³)	درصد جذب آب	مدول نرمی %
ماسه	۲,۵۵	۴,۱	۳,۴۷
شن	۲,۶۶	۰,۹۶	----



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی مخلوط سنگدانه مصرفی

۲-۲- روش آزمون، ساخت مخلوط‌ها و نمونه سازی

در این پژوهش ابتدا تعداد ۸ طرح مخلوط بدون استفاده از مواد جایگزین سیمان با مقدار سیمان متغییر از ۲۷۵ تا ۳۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و آب به سیمان از ۰,۲۸ تا ۰,۴۴ ساخته شده است. در کلیه طرح‌های مخلوط مقدار هوای غیرعمدی ۲ درصد در نظر گرفته شده است. در گام بعدی با جایگزینی دو ماده شبه سیمانی سرباره ذوب آهن اصفهان و پوزولان طبیعی ژئولیت سمنان در این ۸ طرح، مشخصات کارایی مخلوط بتن غلتکی بر اساس آزمایش زمان وی بی بررسی شده است. با توجه به تاثیر مستقیم این جایگزینی با سیمان بر روی کارایی بتن برخی از طرح‌ها پس از ساخت، کارایی لازم را کسب ننموده و غیر قابل قبول تلقی می‌گردد. سپس مخلوط‌های دارای کارایی مناسب جهت انجام آزمون‌های مکانیکی نمونه‌گیری شده و تحت عمل آوری مرطوب مطابق استاندارد قرار گرفته است. مخلوط‌های آزمایشگاهی در جدول شماره ۶ ارائه شده است.

آزمون وی بی مطابق با روش استاندارد [۵] ASTM C1170 انجام شده است. بتن درون قالب ریخته شده، و تحت وزنه سربار ۲۲,۵ کیلوگرم، زمان بالا آمدن شیره بتن اندازه‌گیری می‌شود. در صورتی که این زمان طبق استاندارد [۶] ACI (325 10R) در بازه ۳۰ تا ۴۰ ثانیه نباشد، با افزودن مواد فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات زمان وی بی بتن، در محدوده زمانی ۲۰ تا ۴۰ ثانیه قرار داده شده است. در شکل شماره ۳ دستگاه میز وی بی و چکش نمونه‌گیری استاندارد نشان داده شده است.



شکل ۳- دستگاه آزمون وی بی و چکش نمونه‌گیری استاندارد

برای نمونه سازی قالب‌های استوانه‌ای جهت انجام آزمون مقاومت فشاری و مقاومت کشش برزیلی مخلوط‌های بتن غلتکی از روش [۶] ASTM C1435 استفاده شده است. در این روش از یک چکش استاندارد ۱۰ کیلوگرمی با تعداد ضربه ۲۰۰۰ دور در دقیقه برای تراکم بتن در چهار لایه استفاده شده است. هر لایه حداکثر در مدت زمان ۲۰ ثانیه متراکم شده است. پس از آماده سازی، نمونه‌ها با پوشش مرطوب به مدت ۲۴ ساعت پوشیده شده‌اند تا از تبخیر سطحی آنها جلوگیری شود، سپس در حوضچه بتن حاوی آب آهک اشباع شده تا زمان انجام آزمایش نگهداری گردیده است. آزمون‌های مقاومت فشاری در سن ۲۸ و ۹۰ روز و کششی شکافتی برزیلی (شکل شماره ۴) در سن ۹۰ روز روی نمونه‌های بتنی مطابق با استاندارد [۷] ASTM C39 و [۸] ASTM C496 انجام گرفته است.



شکل ۴- محفظه آزمون کشش برزیلی

آزمون مقاومت خمشی بر روی تیرهای با ابعاد ۶۰*۱۵*۱۵ سانتی‌متر طبق استاندارد [۹] ASTM C78 در سن ۹۰ روز انجام شده است. برای اختلاط بتن‌های غلتکی در این مطالعه از یک دستگاه مخلوط کن تابه‌ای استفاده شده است. نحوه اختلاط شامل دو دقیقه اختلاط خشک مصالح، افزودن آب به مخلوط در حال اختلاط در یک بازه زمانی ۳۰ ثانیه و ادامه اختلاط به مدت ۳ دقیقه بوده است. در شکل شماره ۵ محفظه تیر خمشی و نحوه بارگذاری آن نشان داده شده است. در شکل شماره ۵ محفظه آزمون کشش برزیلی و خمش سه نقطه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۵- محفظه آزمون مقاومت خمشی بتن (با استفاده از تیر ساده با بارگذاری در نقاط یک سوم)

جدول ۶- مشخصات طرح مخلوطها

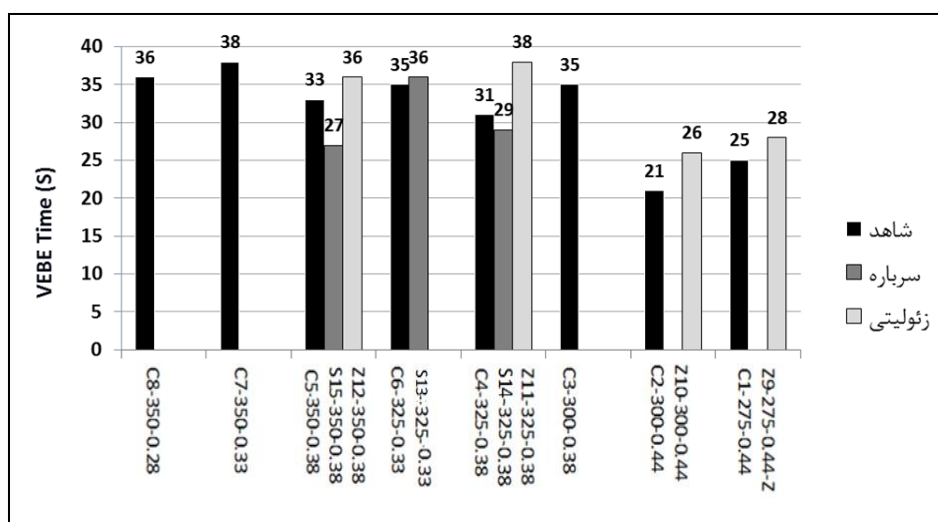
ردیف	کد مخلوط	کل مواد سیمانی (Kg/m ³)	سیمان (Kg/m ³)	ماده جایگزین (Kg/m ³)	W/C+P	مقدار و نوع مواد جایگزین سیمان %	آب (Kg/m ³)	ماسه (Kg/m ³)	شن (Kg/m ³)	فوق روان کننده (درصد وزن مواد سیمانی)
1	C1-275-0.44	275	275	--	0.44	--	121	1298	698	--
2	C2-300-0.44	300	300	--	0.44	--	132	1266	681	--
3	C3-300-0.38	300	300	--	0.38	--	114	1296	698	--
4	C4-325-0.38	325	325	--	0.38	--	123	1267	682	--
5	C5-350-0.38	350	350	--	0.38	--	133	1238	666	--
6	C6-325-0.33	325	325	--	0.33	--	107	1294	696	0.75
7	C7-350-0.33	350	350	--	0.33	--	115	1267	682	0.5
8	C8-350-0.28	350	350	--	0.28	--	98	1296	698	0.8
9	Z9-275-0.44	275	248	28	0.44	15-ژئولیت	121	1288	693	--
10	Z10-300-0.44	300	270	30	0.44	15-ژئولیت	132	1255	676	--
11	Z11-325-0.38	325	293	33	0.38	15-ژئولیت	123	1255	676	0.8
12	Z12-350-0.38	350	315	35	0.38	15-ژئولیت	133	1225	659	--
13	S13-325-0.33	325	228	98	0.33	30-سرباره	107	1292	695	0.6
14	S14-325-0.38	325	228	98	0.38	30-سرباره	123	1264	681	--
15	S15-350-0.38	350	245	105	0.38	30-سرباره	133	1235	665	--

۳- نتایج

۳-۱- زمان وی بی

آزمون وی بی، ده دقیقه پس از ساخت مخلوطها در آزمایشگاه، با استفاده از دستگاه میز وی بی اندازه گیری شده است. زمان وی بی هر مخلوط بیانگر کارایی و قابلیت تراکم پذیری آن می باشد. مخلوطهای دارای زمان وی بی در بازه ۲۰ تا ۴۰ ثانیه از نظر برخی مراجع قابل قبول می باشد [۳]. در این پژوهش ابتدا هشت طرح مخلوط شاهد ساخته شده و بر اساس آزمون زمان وی بی از نظر کارایی و قابلیت غلتک زنی مورد ارزیابی قرار گرفته است. لازم به ذکر است که در مخلوطهایی با زمان وی بی بالا و خارج از بازه مورد نظر تا اندازه ای که طرح از حالت اقتصادی خارج نشود، فوق روان کننده جهت افزایش کارایی استفاده شده است. نتایج آزمون وی بی که در شکل شماره ۶ ارائه شده است، نشان دهنده کارایی مناسب و زمان وی بی در محدوده استاندارد این هشت طرح شاهد می باشد. در گام بعدی با جایگزین نمودن پوزولان ژئولیت و ماده شبه سیمانی سرباره ذوب آهن در تمامی طرحهای شاهد آزمون وی بی انجام شده است. از طرح مخلوطهایی که با مصرف فوق روان کننده بسیار زیاد همراه بوده، نمونه گیری جهت آزمونهای مکانیکی انجام نشده است. در مجموع از هشت طرح شاهد، ۴ طرح دارای قابلیت جایگزینی ژئولیت و ۳ طرح نیز قابلیت جایگزینی سرباره را داشته اند.

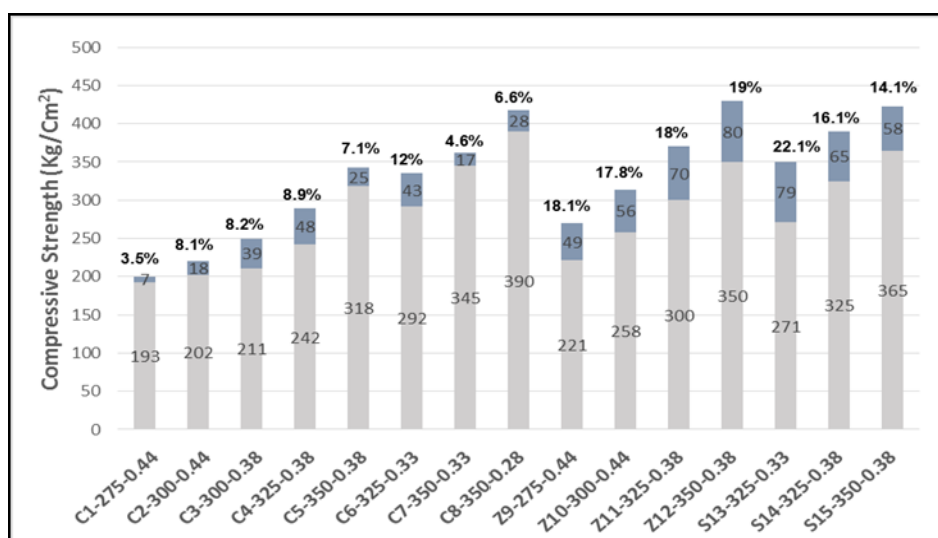
چنانچه مشاهده می گردد در مخلوطهای شاهد دارای حجم خمیر برابر (C1, C3, C6, C8)، برای رسیدن به زمان وی بی ثابت نیاز به مصرف فوق روان کننده بوده است. در طرح مخلوطهای مشترک (C4, S14, Z11) و (C5, S13, Z12)، مخلوط حاوی ژئولیت افزایش زمان وی بی نسبت به نمونه متناظر شاهد نشان می دهد. از طرفی استفاده از سرباره در این طرحها موجب کاهش مصرف روان کننده و کاهش زمان وی بی نسبت به مخلوط متناظر شاهد گردیده است.



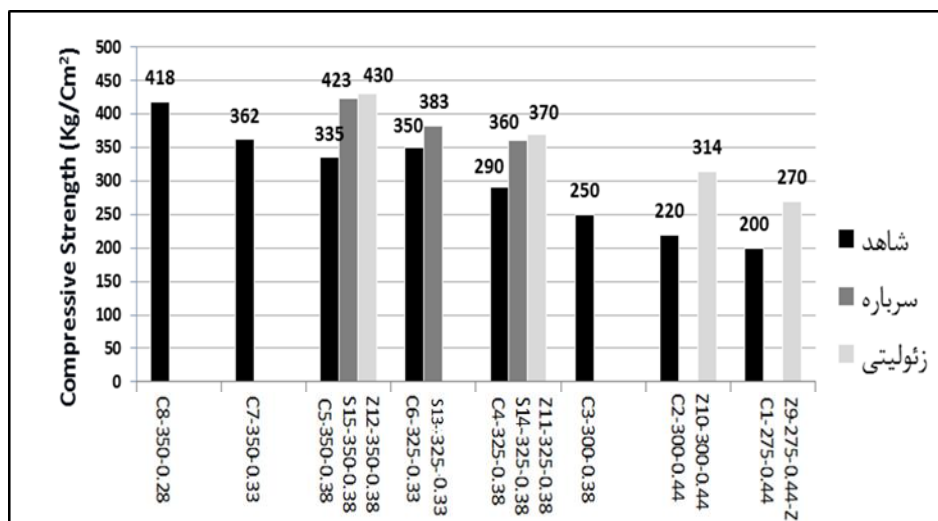
شکل ۶- زمان وی بی مخلوط‌های بتن غلتکی

۲-۳- مقاومت فشاری

آزمایش تعیین مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 طبق استاندارد [۷] ASTM C39 انجام گردیده است. نتایج آزمایش مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روز در شکل شماره ۷ بصورت نمودار تجمعی و در شکل شماره ۸ بصورت نمودار ترکیبی نشان داده شده است. درصد رشد مقاومت فشاری از سن ۲۸ تا ۹۰ روز روی نمودار شکل ۷ ارائه شده است. براساس این نتایج میانگین رشد مقاومت فشاری در نمونه‌های شاهد از سن ۲۸ تا ۹۰ روز تقریباً ۳،۷ درصد بوده است. از طرفی رشد مقاومت فشاری از سن ۲۸ تا ۹۰ روز در مخلوط‌های حاوی پوزولان ژئولیت مقدار ۱۸،۱ درصد و مخلوط‌های حاوی سرباره ۱۷،۴ درصد می‌باشد. در نمودار شکل شماره ۸ میزان رشد مقاومت نهایی در سن ۹۰ روز مخلوط‌های حاوی ژئولیت و سرباره در مقایسه با نمونه شاهد خود افزایش محسوسی را نشان می‌دهد. طرح مخلوط با شماره Z10-300-0.44 بیانگر ۲۸ درصد رشد مقاومت فشاری و طرح مخلوط با شماره Z12-350-0.38 مقدار ۲۴ درصد رشد را نشان می‌دهد. بیشترین رشد مخلوط‌های سرباره‌ای در سن ۹۰ روز نسبت به نمونه شاهد متناظر در طرح مخلوط S15-350-0.38 به مقدار ۲۶ درصد و کمترین مقدار رشد در طرح مخلوط S13-325-0.33 به مقدار ۱۰ درصد قابل مشاهده می‌باشد.



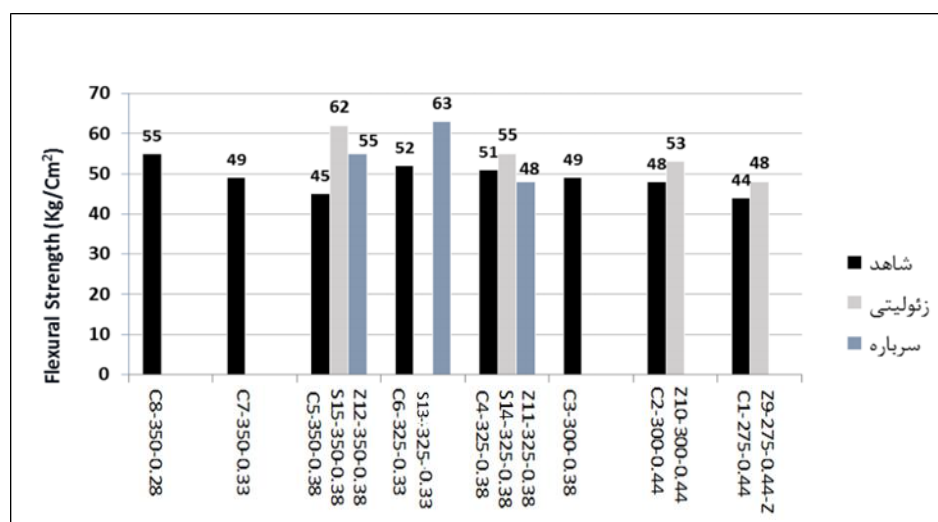
شکل ۷- نمودار تجمعی مقاومت فشاری سن ۲۸ و ۹۰ روز (درصد رشد مقاومت روی هر نمودار)



شکل ۸- نمودار مقاومت فشاری سن ۹۰ روز (ترکیبی شاهد و جایگزینی)

۳-۳- مقاومت خمشی

مقاومت خمشی طبق استاندارد [۹] ASTM C78 بر روی نمونه‌های تیر به ابعاد $15 \times 15 \times 60$ سانتی‌متر انجام شده است. نتایج حاصل از مقاومت خمشی در شکل شماره ۹ بصورت نمودار ترکیبی نشان داده شده است. در کلیه مخلوط‌های حاوی زئولیت افزایش مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد متناظر خود مشاهده می‌شود. همچنین در این ۴ طرح با افزایش مقدار مواد سیمانی، در نسبت آب به سیمان یکسان بالا رفتن مقدار مقاومت خمشی محسوس است. در مخلوط‌های سرپاره‌ای نیز مقاومت خمشی نهایی در سن ۹۰ روز عدد بالاتری در مقایسه با نمونه شاهد متناظر دارد. ولی در طرح مخلوط‌های مشابه از نظر نسبت آب به سیمان و مقدار مواد سیمانی، طرح مخلوط حاوی زئولیت مقاومت خمشی بالاتری کسب کرده است.

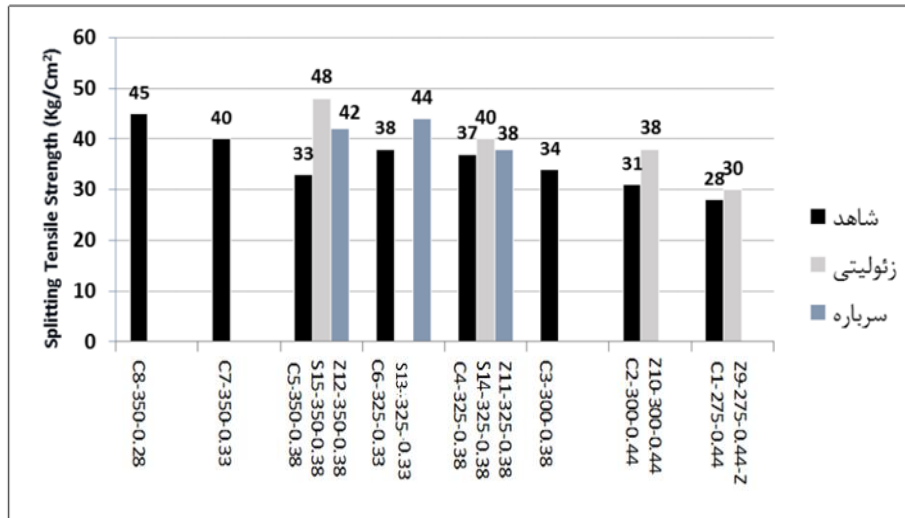


شکل ۹- نمودار مقاومت خمشی سن ۹۰ روز

۴-۳- مقاومت کششی شکافتی (برزیلی)

این آزمایش به منظور تعیین مقاومت کششی تک محوری غیرمستقیم یک نمونه بتن می‌باشد که تحت عنوان آزمون برزیلی معروف است. آزمایش روی نمونه‌های استوانه‌ای 15×30 در سن ۹۰ روز طبق استاندارد [۸] ASTM C496 انجام گردیده است. نتایج حاصل از آن در نمودار میله‌ای شکل شماره ۱۰ ارائه شده است. در طرح مخلوط‌های شاهد با افزایش نسبت آب به سیمان،

در میزان مواد سیمانی ثابت کاهش مقاومت کششی برزیلی مشاهده می‌گردد. مخلوط‌های حاوی پوزولان زئولیت و سرباره ذوب آهن در مقایسه با نمونه شاهد متناظر افزایش چشمگیری نشان می‌دهد، که این روند مشابه رفتار در مقاومت خمشی می‌باشد. تمامی نتایج کارآیی بتن تازه و خواص مکانیکی بتن سخت شده در جدول شماره ۷ ارائه شده است.



شکل ۱۰- نمودار مقاومت کششی برزیلی ۹۰ روزه

جدول ۷- نتایج زمان وی بی و مقاومت مکانیکی مخلوط‌های بتن غلتکی

ردیف	کد مخلوط	زمان وی بی (s)	مقاومت فشاری ۲۸ روز (Kg/cm ³)	مقاومت فشاری ۹۰ روز (Kg/cm ³)	مقاومت خمشی ۹۰ روز (Kg/cm ³)	مقاومت کششی برزیلی ۹۰ روز (Kg/cm ³)
1	C1-275-0.44	25	193	200	44	28
2	C2-300-0.44	21	202	220	48	31
3	C3-300-0.38	35	211	250	49	34
4	C4-325-0.38	31	242	290	51	37
5	C5-325-0.33	35	325	350	52	38
6	C6-350-0.38	33	292	335	45	33
7	C7-350-0.33	38	345	362	49	40
8	C8-350-0.28	36	390	418	55	45
9	Z9-275-0.44	28	221	270	48	30
10	Z10-300-0.44	26	258	314	53	38
11	Z11-325-0.38	38	300	370	55	40
12	Z12-350-0.38	36	350	430	62	48
13	S13-325-0.33	36	271	360	48	38
14	S14-325-0.38	29	318	383	63	44
15	S15-350-0.38	27	365	423	55	42

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

- در خصوص کارآیی بتن غلتکی همانطور که در نتایج آزمایش‌های کارآیی زمان وی بی قابل مشاهده است، در صورت استفاده از مواد جایگزین سیمان، سرباره با مقدار جایگزینی ۳۰٪ وزنی سیمان در تمامی موارد با کاهش زمان وی بی روبه رو هستیم. این کاهش زمان هر چند کم می‌باشد ولی بیانگر افزایش کارآیی بتن غلتکی با استفاده از سرباره می‌باشد، که با توجه به شکل ذرات سرباره آسیاب شده این بهبود کارآیی قابل توجه می‌باشد. در نقطه مقابل استفاده از مواد پوزولانی طبیعی زئولیت با جایگزینی ۱۵٪ نسبت به بتن شاهد متناظر در تمامی طرح‌ها افزایش زمان وی بی را نشان می‌دهد. این کاهش کارآیی در بتن غلتکی نسبت به شاهد با نیاز آبی این پوزولان طبیعی توجه پذیر است.
- در نمونه‌های شاهد رشد مقاومت فشاری از سن ۲۸ تا ۹۰ روز در نمونه‌های شاهد میانگین ۸٫۳ درصد دارد. از طرفی در مخلوط‌های حاوی زئولیت رشد مقاومت فشاری میانگین ۱۸٫۵ درصد، و حاوی سرباره ۱۷٫۱ درصد را نشان می‌دهد. این مطلب بیانگر رشد مقاومت فشاری بیش از دو برابر بتن‌های دارای ماده جایگزین، نسبت به نمونه شاهد متناظر می‌باشد. میزان رشد مقاومت مخلوط‌های زئولیتی و سرباره‌ای تا اندازه‌ای است که مقاومت نهایی آنها از نمونه‌های شاهد نیز بیشتر شده است. افزایش مقاومت فشاری نشان می‌دهد که استفاده از این دو ماده جایگزین نه تنها تاثیر منفی بر خواص مکانیکی نداشته است بلکه موجب رشد مناسب مقاومت فشاری در طول زمان شده است.
- افزایش مقاومت فشاری نهایی ۹۰ روزه طرح مخلوط‌های حاوی پوزولان زئولیت و سرباره ذوب آهن با درصد جایگزینی متفاوت، بسیار نزدیک به یکدیگر بدست آمده است. این مطلب نشان دهنده آن است که فعالیت پوزولانی ۱۵ درصد جایگزینی سیمان با زئولیت برابر با جایگزینی ۳۰ درصد سیمان با سرباره می‌باشد. این مسئله در تحقیقات پیشین نگارندگان در مورد جایگزینی زئولیت و سرباره در بتن‌های خودتراکم نیز مشاهده گردیده بود.

- مراجع

- 1 -ACI American Concrete Institute Committee 325., State of the Art Report on Roller Compacted Concrete Pavements. ACI 325.10R,2001.
- 2-PCA.Portland Cement Association, Guide For Roller Compacted Concrete for Pavements,2010.
- 4 -Pigeon M, Marchand J. Design and Construction of Roller Compacted Concrete Pavements in Quebec, research report GCS-93-06, Department of Civil Engineering, University Laval, Quebec, Canada,1995.
۴. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، (۱۳۹۲)، "دستورالعمل اجرایی و کنترل کیفی روسازی‌های بتن غلتکی"، انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
- 5 -U.S. Army corps of engineers, Guide for Roller Compacted Concrete for Pavements, unifide facilities criteria, including Change 2009.
- 6 -ASTM C 1435., Standard Practice for Molding Roller Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, American Society of Testing Materials; 2008.
- 7 -ASTM C 39., Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens ,Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, American Society of Testing Materials; 2008.
- 8 -ASTM C 496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens ,Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, American Society of Testing Materials; 2008.

9 –ASTM C 78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) ,Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia,USA,American Society of Testing Materials;2008.