

ارزیابی خواص بتن‌های خودتراکم حاوی سرباره کارخانه فولاد اهواز

سیدمحسن کالوندی^۱، سیدفتح اله ساجدی^{۲*}، فریدون مقدس‌نژاد^۳

^۱گروه عمران، واحد قشم، دانشگاه آزاد اسلامی، قشم، ایران

^۲گروه عمران، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

^۳دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

*Corresponding author, Email: sajedi.ac@gmail.com; fa.sajedi@iaau.ac.ir

چکیده

بتن خودتراکم، بتنی است که همزمان سه ویژگی، توانایی جریان تحت وزن خود، پر کردن فضای کامل قالب و ایجاد یک مخلوط چگال و نسبتاً همگن را بدون نیاز به عملیات تراکم را داشته باشد. سرباره کارخانه فولاد اهواز استفاده گردید. این سرباره در ترکیبات شیمیایی خود تفاوت قابل توجهی با سرباره‌های متداول در دنیا دارد و به همین دلیل، در ساخت بتن خودتراکم استفاده گردید. در ساخت نمونه‌ها ۲۵٪، ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ پودر سرباره، جایگزین بخشی از سیمان شد و نمونه‌ها در سنین ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روزه آزمایش شدند. آزمایش‌های مربوط به رئولوژی بتن شامل جریان اسلامپ، قیف V و جعبه L انجام شدند. مقاومت فشاری و آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی از خواص مکانیکی و آزمایش‌های مرتبط با دوام شامل مقاومت الکتریکی، عمق نفوذ آب و جذب حجمی آب انجام گردیدند. طبق آزمایش‌های انجام‌شده، درصد بهینه پودر مصرفی به میزان ۲۵٪ تعیین شد. آزمایش اسلامپ نمونه حاوی درصد بهینه پودر سرباره، افزایش ۱۴٪ را نسبت به نمونه مرجع نشان داد. در آزمایش مقاومت فشاری، نمونه‌های حاوی درصد بهینه پودر سرباره در سن ۱۲۰ روزه، نسبت به نمونه مرجع افزایش داشتند. بررسی نتایج عمق نفوذ آب و همین‌طور درصد جذب حجمی آب ۴٪ افزایش را نشان دادند. ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های حاوی درصد بهینه پودر سرباره به مقدار ۴/۸٪ نسبت به نمونه مرجع در سن ۱۲۰ روزه افزایش داشتند. بررسی نتایج عمق نفوذ آب و درصد جذب حجمی آب در نمونه‌های حاوی درصد بهینه پودر سرباره، به ترتیب به میزان ۱۲/۵٪ و ۱۶/۶٪ در سن ۱۲۰ روزه، کاهش نشان دادند.

واژه‌های کلیدی: بتن خودتراکم، سرباره کارخانه فولاد اهواز، رئولوژی، خواص مکانیکی، دوام

بتن خود تراکم یکی از انواع بتن با عملکرد بالا محسوب می‌شود که تقریباً سه دهه از عمر آن می‌گذرد و تحقیقات وسیعی در این سه دهه بر روی آن انجام گرفته است و در بسیاری از کشورها استفاده شده است. این بتن با استفاده از فوق روان کننده‌ها و مقدار پودر بیشتر و طرح اختلاط خاص، امکانات بدیهی را در اجرای سازه‌های بتنی به علت جریان پذیر بودن فراهم نموده است و مشکلات عدم تراکم مناسب در محل‌های با تراکم زیاد میلگردها از قبیل محل اتصال تیر و ستون را برطرف می‌نماید. این بتن بدون نیاز به هیچ لرزاننده‌ای تحت اثر وزن خود متراکم شده و از کارایی بالایی برخوردار است [۱]. مفهوم بتن خودتراکم اولین بار در سال ۱۹۸۶ با مسائله دوام در سازه‌های بتنی و اینکه علت اصلی ضعف این سازه‌ها در عدم کیفیت بتن اجرایی است، پیشنهاد شد [۲]. اولین بار نظریه بتن خود تراکم برای رفع محدودیت‌های بتن معمولی توسط اوکامورا^۱ در ژاپن مطرح گردید که نمونه اولیه این بتن، در سال ۱۹۸۸ در ژاپن و در دانشگاه توکیو با اسلامپ بیشتر از ۶۲۰ میلی‌متر ساخته شد [۳]. تحقیقاتی توسط تیکالسکای و همکاران^۲ برای بررسی خصوصیات مخلوط بتن دوجزئی و یا سه‌جزئی ساخته‌شده از سرباره و خاکستر بادی انجام گردید، نتایج آزمایش این تحقیق نشان می‌دهد که مقاومت فشاری مخلوط سه‌جزئی نسبت به مخلوط حاوی فقط خاکستر بادی افزایش می‌یابد [۴]. کاهش آلودگی صوتی ناشی از لرزاندن و فراهم کردن امکان بتن‌ریزی در شب در مناطق شهری، امکان ساخت سازه‌های بتنی ویژه مانند بتن‌ریزی در زیرآب از خواص مربوط به بتن خودتراکم هستند [۵]. آجوج و همکاران^۳ اثر پودر سنگ، سرباره آهنگدازی خیلی ریز و پوزولان های طبیعی و همچنین تأثیرات متقابل آنها را به همراه فوق روان کننده پلی کربوکسیلات را در خواص رئولوژی ملات بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزایش درصد فوق روان کننده استفاده‌شده بر پایه کربوکسیلات، باعث کاهش قابل قبولی در لزجت و تنش برشی ملات تازه می‌شود [۶]. تحقیقی توسط مستوفی نژاد و نظر منفرد در خصوص استفاده از ترکیب ۱۰٪ سرباره و ۱۵٪ پودر سنگ آهک جایگزین سیمان انجام شد و ضمن اقتصادی نمودن طرح اختلاط، سبب افزایش دوام بتن‌ها گردید. در این تحقیق به‌کارگیری جزییات چنین طرح اختلاطی برای ساخت بتن در مجاورت یون سولفات، عملکرد مناسبی از خود نشان داد [۷]. بریندا و همکاران^۴ در تحقیقی به بررسی مشخصات دوام و خوردگی بتن حاوی سرباره فولاد پرداختند، آنها مشاهده کردند که مقاومت فشاری و مقاومت دینیم شدن بتن‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع بیشتر شده است [۸]. تحقیقات انجام‌شده توسط راو و همکاران^۵ نشان می‌دهد، جایگزینی سرباره با بخشی از سیمان باعث افزایش سرعت امواج عبوری از نمونه‌های بتنی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه می‌شود. با توجه به نتایج تحقیق آنها جایگزینی ۴۰٪ سرباره به‌عنوان بخشی از سیمان بیشترین تأثیر مثبت را بر تراکم بتن دارد [۹]. فلین و همکاران^۶ در تحقیقی نشان دادند که در بتن‌های حاوی ۴۰٪ سرباره فولاد جایگزین سیمان، زمان گیرش در دمای ۲۷ درجه سانتی‌گراد حدود یک ساعت افزایش پیدا می‌کند. میزان مصرف سیمان پرتلند و نوع سیمان، عوامل مهمی در تنظیم زمان گیرش بتن‌های حاوی سرباره هستند. در صورتی که میزان جایگزینی سرباره بیشتر از ۲۵٪ وزنی سیمان باشد، باعث تأخیر در زمان گیرش بتن می‌شود [۱۰]. تحقیقات اوزیلدیریم^۷ نشان می‌دهد که افزودن ۵٪ تا ۱۰٪ میکروسیلیس به بتن‌های حاوی ۳۰٪ تا ۵۰٪ سرباره جایگزین سیمان باعث افزایش مقاومت ۷ روزه نمونه‌ها می‌شود. همچنین بیشترین فشاری ۷ و ۲۸ روزه در نمونه‌های ساخته‌شده در این تحقیق مربوط به طرح حاوی ۶۰٪ سیمان، ۳۳٪ سرباره و ۷٪ میکروسیلیس بود [۱۱]. تحقیقاتی توسط تیکالسکای و همکاران^۴ برای بررسی خصوصیات مخلوط بتن دوجزئی و یا سه‌جزئی ساخته‌شده از سرباره و خاکستر بادی انجام گردید، نتایج آزمایش این تحقیق نشان می‌دهد که مقاومت فشاری مخلوط سه‌جزئی نسبت به مخلوط حاوی فقط خاکستر بادی افزایش می‌یابد [۱۲]. تحقیقاتی که توسط سیواساندرا و همکاران^۵ انجام شد نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهند که استفاده از سرباره در بتن باعث کاهش حرارت هیدراسیون می‌شود، در مواردی که مشکل ترک‌خوردگی حرارتی در بتن وجود دارد استفاده از سرباره به دلیل اینکه سرعت هیدراسیون کمتری نسبت به سیمان پرتلند معمولی دارد و باعث می‌شود که دمای هیدراسیون آن کمتر شود، یک مزیت به حساب می‌آید برای اینکه دمای هیدراسیون مخلوط

¹ Okamura

² Tikalsky et al.

³ Ajoj et al.

⁴ Brindha et al.

⁵ Ozyildirim

⁶ Tikalsky et al.

⁷ Sivasundaram et al.

سیمان کاهش محسوسی داشته که لازم است که بیش از ۵۰٪ سرباره جایگزین سیمان شود [۱۳]. هوتن^۱ در تحقیقی درباره اثر سرباره کوره آهن گدازه جهت کنترل نفوذ سولفات‌ها در محیط‌های پر سولفات پرداخت، نتایج آزمایش‌های این تحقیق نشان می‌دهد که مقاومت بتن در برابر سولفات‌ها، با جایگزینی سرباره به جای بخشی از سیمان افزایش می‌یابد، که این مقدار بیش از نصف سرباره جایگزین سیمان است [۱۴]. همچنین هکال و همکاران^۲ در تحقیقی به بررسی مقاومت در برابر تهاجم سولفات‌ها به بتن حاوی ترکیب سرباره و پودر سنگ‌آهک در محلول ۱۰٪ سولفات منیزیم پرداختند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که خمیر حاوی ۴۰٪ سرباره دوام بیشتری نسبت به بتن معمولی دارد. از طرفی افزودن فقط ۵٪ پودر سنگ‌آهک در این محیط باعث افزایش مقاومت در برابر تهاجم سولفات‌ها می‌شود [۱۵]. تحقیقات انجام‌شده توسط راو و همکاران^۳ نشان می‌دهد، جایگزینی سرباره به جای بخشی از سیمان باعث افزایش سرعت امواج عبوری از نمونه‌های بتنی در هر دو سن ۲۸ روز و ۹۰ روز می‌شود. با توجه به نتایج این تحقیق جایگزینی ۴۰٪ سرباره به عنوان بخشی از سیمان بیشترین تأثیر مثبت را بر تراکم بتن دارد [۲۴]. خانی و همکاران در تحقیقی نشان دادند که استفاده از میکروسیلیس و پوزولان خاش موجب کاهش هدایت الکتریکی در نمونه‌های بتن خودتراکم نسبت به نمونه هایبتن شاهد گردیده است. همچنین افزایش درصد جایگزینی میکروسیلیس و پوزولان خاش به عنوان ماده جایگزین سیمان موجب بهبود رفتار مکانیکی، کاهش جریان عبوری در نمونه‌ها و افزایش دوام در بتن‌های خودتراکم گردیده است [۲۵]. حسینی پول و همکاران در تحقیقی جایگزینی ۴۵٪ پودر سرباره به لحاظ رئولوژی و خواص مکانیکی حالت بهینه می‌باشد. در گام بعدی با تثبیت مقدار بهینه پودر سرباره در جایگزینی ۴۵٪ سرباره به عنوان سنگدانه ریز (ماسه) در دو محدوده ۰-۳ میلی‌متر و ۳-۶ میلی‌متر با ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ جایگزین ماسه شدند. آزمایشات نشان دادند در جایگزینی ۳۰٪ خواص رئولوژی بتن خودتراکم بسیار مناسب و مقاومت فشاری و خمشی قابل قبولی دارد [۲۶]. همایون‌فر و قدوسیان در تحقیقی نشان دادن که مخلوط‌های حاوی میکروسیلیس و سرباره بیشترین چسبندگی و مخلوط‌های دارای رئولیت کمترین مقدار چسبندگی به بستر را به دست داده‌اند. همچنین مشخص شد که تنها نمونه‌ای که چسبندگی کمتر از نمونه بدون پوزولان داشته است نمونه دارای ۱۵٪ رئولیت می‌باشد [۲۷]. عبادی و همکاران در پژوهشی نشان دادن که ترکیب سرباره و میکروسیلیس به میزان ۴۵٪ سرباره و ۱۰٪ میکروسیلیس عملکرد بهتری را در رئولوژی، دوام و مقاومت داشت [۲۸]. رحمتی و همکاران در تحقیقی نشان دادن که کارایی بتن خودتراکم و آزمون‌های جریان اسلامپ، قیف وی شکل، بتن سخت شده و مقاومت مکانیکی و پارامترهای دوامی از جمله مقاومت الکتریکی، نفوذ تسریع شده یون کلر، جذب آب حجمی نیم و ۲۴ ساعته نشان می‌دهد که سرباره با ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ به همراه ۵٪ دوده سیلیسی از هر نظر بتن‌های موفقی بوده‌اند [۲۹]. میرزایی و همکاران در تحقیقی نشان دادند که جایگزینی پودر سرباره خوزستان به مقدار ۱۰٪ ریزدانه‌ها حالت بهینه خصوصیات تازه و سخت شده بتن خودتراکم می‌باشد و جایگزینی بیش از این درصد سبب کاهش زیادی در خصوصیات تازه و سخت شده می‌گردد [۳۰]. حسینی و جمعه در تحقیقی نشان دادند که بهترین نمونه انتخاب شد که با توجه به مصالح این آزمایش هنگام جایگزینی سیمان با ۴۵٪ سرباره و ۱۰٪ میکروسیلیس بهترین نتایج بدست آمد [۳۱]. ساجدی و هاشمی تحت عنوان بررسی آزمایشگاهی تأثیر سرباره کارخانه فولاد اهواز بر خواص ملات‌های سیمان-سرباره‌ای، که میزان ۳۰٪ سرباره فولاد کارخانه اهواز به عنوان طرح بهینه به دست آمده است [۳۲]، در خصوص نوآوری این تحقیق قابل ذکر است که طبق نتایج آزمایش XRF بر سرباره مصرفی (جدول ۱) مشهود است که درصد اکسید آهن موجود در سرباره کارخانه فولاد اهواز ۴۳٪ است، که بسیار بالا است و با سرباره‌های متداول دنیا تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد. از همین منظر نیز می‌توان به درصد سیلیس موجود در این سرباره نگریست. هدف اصلی انجام این تحقیق با استفاده از این نوع سرباره این است که تأثیرات این نوع سرباره متفاوت که تاکنون تحقیقات لازم در روی آن انجام نشده، بر خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام ملات‌های حاوی آن صورت پذیرد. در این تحقیق برای بررسی مقایسه خواص بتن خودتراکم با بتن معمولی، از پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز به جای بخشی از سیمان استفاده شد. سرباره مصرفی پودر شده به میزان ۲۵٪، ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ جایگزین سیمان شدند و خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه بررسی شدند. درصد بهینه سرباره جایگزین نیز تعیین شد.

1 Hooton

2 Hekal et al.

3 Rao et al.

۲- مواد و روش‌ها

۱-۲- مواد و مصالح مصرفی

۱-۱-۲- سیمان مصرفی

سیمان مصرفی این تحقیق از کارخانه سیمان تهران، با وزن مخصوص $3/01 \text{ g/cm}^3$ و سطح ویژه 2912 g/cm^2 تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد و الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران [۱۶] و استاندارد ASTM C150 را تامین نموده است [۱۷]. ترکیبات شیمیایی این سیمان که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس می‌باشد، در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۱-۲- سرباره کارخانه فولاد اهواز

سرباره فولادی مصرفی این تحقیق از کارخانه فولاد اهواز به صورت سنگدانه تهیه و سپس به روش گندله توسط کارخانه نرم‌کوبان ساوه تبدیل به پودر سرباره، با توده ویژه $2/56 \text{ g/cm}^3$ تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد. ترکیبات شیمیایی این سرباره که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس می‌باشد، در جدول ۱ داده شده است.

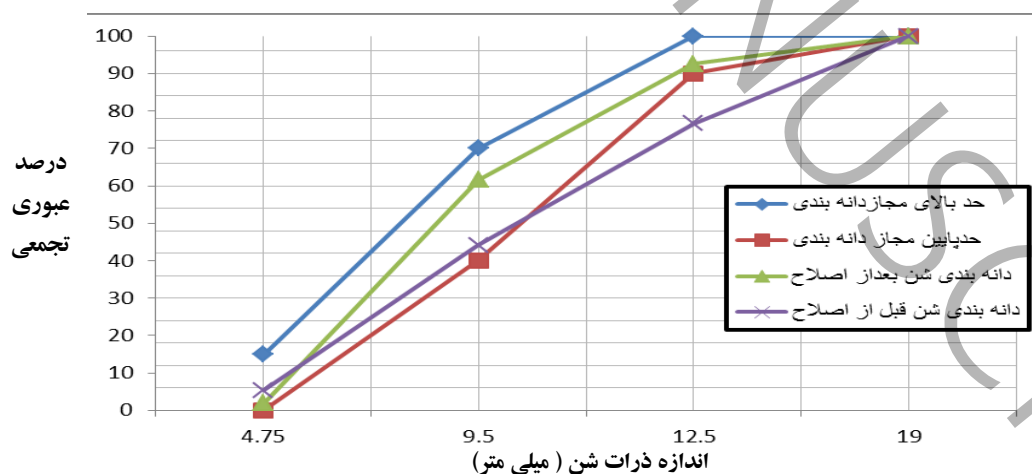
جدول ۱- نتایج آزمایش XRF انجام شده روی سیمان و سرباره مصرفی در تحقیق (%)

Table 1- Results of XRF tests performed on cement and slag used in the study (%)

K ₂ O	Na ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	SiO ₂	اکسیدها
۰/۶	۰/۴	۲/۴۷	۰/۶۵	۶۴/۱۲	۴	۰/۲۶۳	۵	۲۱/۵	سیمان نوع ۲ تهران
۰/۱۷	-	۸/۳	۱/۳	۱۹/۵	۴۳/۰	۰/۴۸	۵/۷	۲۱/۱	پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز

۳-۱-۳- شن مصرفی در تحقیق (درشت‌دانه)

دانه‌بندی سنگدانه‌ها عامل تعیین‌کننده‌ای در میزان کارایی مخلوط بتن است. کارایی به‌نوبه خود به مقدار آب و سیمان و سنگدانه‌های در مخلوط بستگی دارد و جداسازی و آب انداختن بتن را پایش می‌کند و بر نحوه بتن‌ریزی و پرداخت سطح بتن تأثیر دارد. بنابراین دانه‌بندی سنگدانه‌ها در تعیین نسبت مواد تشکیل‌دهنده مخلوط بتن اهمیت بسیار زیادی دارد [۱۸]. در این تحقیق شن مصرفی از نوع شکسته بوده که از معادن شهرستان اسلامشهر در استان تهران تهیه گردید و حداکثر اندازه‌های اسمی آن ۱۹/۵ و ۱۲/۵ میلی‌متر بوده است. آزمایش‌های وزن مخصوص و جذب آب مطابق استاندارد ASTM C127 شده است [۱۹]. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک شن‌های بادامی و نخودی به ترتیب ۲/۶۵ و ۲/۶۲ و وزن مخصوص ظاهری ۱/۶۱ و ۱/۶۲ گرم بر سانتی‌مترمکعب و هم‌چنین جذب آب آنها نیز ۰/۷۱ و ۰/۹۱ درصد تعیین گردید. در شکل ۱ منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های درشت مصرفی در تحقیق ارائه شده‌اند.

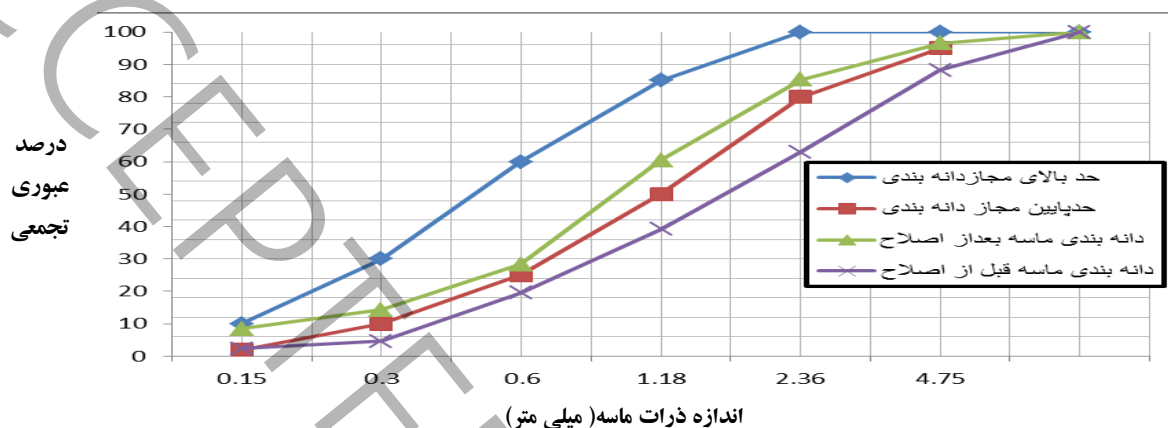


شکل ۱- منحنی دانه‌بندی مخلوط شن‌های درشت‌دانه و ریزدانه مصرفی در تحقیق

Figure 1- Granulation curve of coarse and fine gravel mixtures used in the research

۴-۱-۲- ماسه مصرفی (ریزدانه)

ریزدانه‌های مصرفی در این تحقیق ماسه شکسته و شسته شده با وزن $2/64 \text{ g/cm}^3$ مطابق با استاندارد ASTM C128 بوده و میزان ضریب نرمی $3/21$ و جذب آب آنها $1/64$ مطابق با استاندارد ASTM C127 می‌باشد. این سنگدانه‌ها از محل تأمین ماسه مصرفی از معادن شهرستان اسلامشهر در استان تهران تهیه شدند. در شکل ۲، منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در تحقیق ارائه شده است [۱۶].



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی در تحقیق

Figure 2- Grain size distribution curve of sand used in the research

۳-۱-۵- فوق روان کننده

در این تحقیق فوق روان کننده بانام تجاری Flowcem R900 که یک فوق روان کننده اصلاح شده از نسل سوم و کاهش دهنده شدید آب می‌باشد، از شرکت دورچم خاورمیانه^۵ تهیه و استفاده گردید. مشخصات فنی این فوق روان کننده در جدول ۲ ارائه شده است. ضمناً آب این فوق روان کننده به عنوان بخشی از آب اختلاط لحاظ شده است [۲۰].

جدول ۲- مشخصات فوق روان کننده مصرفی در تحقیق

Table 2- Characteristics of super-plasticizer used in the study

ظاهر	وزن مخصوص	کلرید محلول در آب	قلیائیت	pH	یون کلر
قهوه‌ای	۱/۰۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳۲	۳/۹۶	ندارد

۲-۱-۶- آب

از آب شرب شهر تهران به عنوان آب مصرفی در ساخت و عمل آوری نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق به صورت ثابت با نسبت آب به مواد سیمانی ۴۵٪ استفاده گردید. نمونه‌ها پس از ساخت و قالب‌گیری در آب عمل آوری شدند. مشخصات شیمیایی و فیزیکی آب شرب شهر تهران در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳- مشخصات شیمیایی و فیزیکی آب شرب تهران (mg/lit)

Table 3- Chemical and physical characteristics of Tehran drinking water (mg/lit)

درجه حرارت (C)	pH	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	سختی کل	کل املاح محلول	نسبت جذب سلیم	سدیم محلول (%)
۲۲	۷/۳۲	۳۳۵/۵	۹۸۳/۷۶	۱۳۸۹/۶	۱۸۶۳/۷	۱۸۱/۰۳	۸۷۴	۱۲۰۷	۳۶۹۳	۱۰/۹	۶۱/۱

۲- طرح اختلاط‌های تحقیق

برای ساخت نمونه‌های تحقیق ابتدا طرح‌هایی به صورت آزمون و خطا ساخته شد و آزمایش‌های بتن تازه بر روی آن‌ها انجام گرفت و نهایتاً با توجه به آزمایش‌های انجام شده، طرح اختلاط بتن مرجع انتخاب گردید و سپس با توجه به طرح اختلاط مرجع، بقیه طرح‌ها ساخته و آزمایش شدند، در تمام طرح اختلاط‌ها نسبت آب به مواد سیمانی ۴۵٪ به صورت ثابت لحاظ گردید. جایگزینی سرباره با بخشی از سیمان مصرفی با درصد‌های متفاوت، کاهش قابل ملاحظه برخی خواص مکانیکی را در پی داشته است. بنابراین پس از ساخت طرح مرجع، ۵ طرح اختلاط حاوی پودر سرباره با نسبت از سیمان ساخته شدند. روش نام‌گذاری طرح‌ها به این صورت است که SCC بیانگر بتن مرجع خودتراکم، S بیانگر سرباره و عدد پس از S بیانگر درصد سرباره جایگزین سیمان می‌باشد. به طور مثال SCCS25، به این معنی است که بتن خودتراکم حاوی ۲۵٪ سرباره جایگزین سیمان است. در جدول ۴ جزئیات طرح اختلاط‌های نهایی تحقیق ارائه شده است.

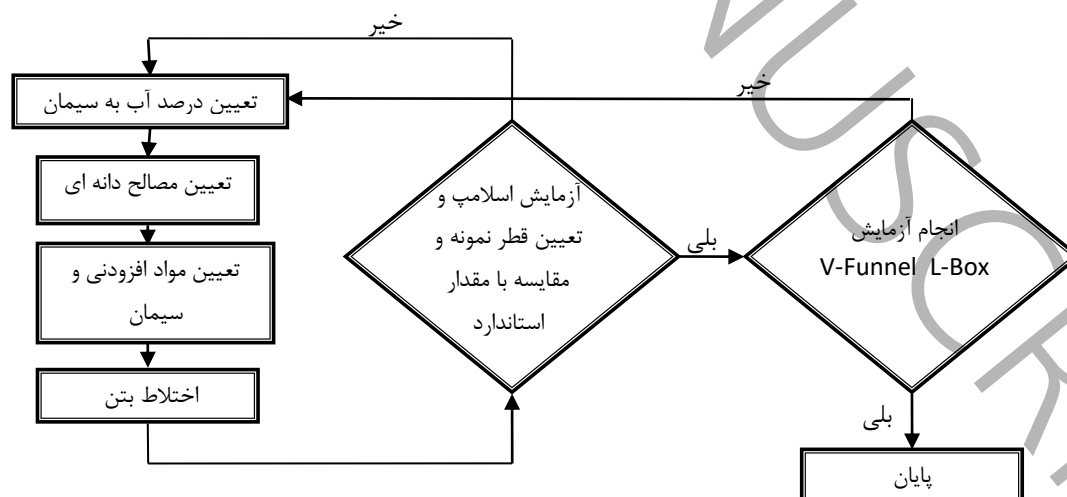
جدول ۴- جزئیات طرح‌های اختلاط بتن خودتراکم ساخته شده در تحقیق (Kg/m^3)

Table 4- Details of the design of self-compacting concrete mixtures made in the study (Kg/m^3)

نام طرح	شن بادی	شن نخودی	ماسه	آب (Lit)	سیمان	پودر سنگ	سرباره فولاد	فوق روان-کننده (Lit)
SCC	۳۳/۲	۳۸/۳	۹۴/۸	۲۶/۳	۴۰/۵	۱۸	۰	۰/۱۰۸
SCCS25	۳۳	۳۸	۹۴/۱	۲۶/۹	۳۰/۳۸	۱۸	۱۰/۱۲	۰/۱۲۰
SCCS35	۳۲/۹	۳۷/۸	۹۳/۷	۲۶/۹	۲۷/۳۳	۱۸	۱۴/۱۷	۰/۱۳۷
SCCS45	۳۲/۷	۳۷/۷	۹۳/۳	۲۷/۱	۲۳/۲۸	۱۸	۱۸/۲۲	۰/۱۶۵
SCCS50	۳۲/۶	۳۷/۵	۹۳	۲۷/۱	۲۱/۲۵	۱۸	۲۰/۲۵	۰/۱۸۶
SCCS60	۳۲/۵	۳۷/۴	۹۲/۶	۲۷/۱	۱۷/۲	۱۸	۲۴/۳	۰/۲۰۰

۳- روش‌ها و آزمایش‌ها

در انجام آزمایش‌ها نمونه‌های مکعبی استفاده شدند. آزمایش‌های رئولوژی شامل جریان اسلامپ، آزمایش جعبه L و آزمایش قیف V مطابق شکل ۴ هستند. آزمایش‌های خواص مکانیکی شامل مقاومت فشاری و تعیین ضریب ارتجاعی در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه بودند. آزمایش‌های دوام شامل جذب آب، مقاومت الکتریکی و عمق نفوذ آب در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه هستند. در شکل ۳ فرآیند ساخت طرح اختلاط‌های خودتراکم و در شکل ۵ آزمایش‌های رئولوژی شامل جریان اسلامپ، آزمایش جعبه L و آزمایش قیف V نشان داده شدند.



شکل ۳- فرآیند ساخت طرح اختلاط‌های بتن خودتراکم تحقیق

Figure 3- Process of making the research self-compacting concrete mix design



الف ب ج
شکل ۴: آزمایش‌های بتن خودتراکم؛ الف: جعبه L، ب: آزمایش قیف V، ج: میز جریان (اسلامپ)

Figure 4: Self-compacting concrete tests; A: L-box, B: V-funnel test, C: Flow table test

جدول ۵- نتایج آزمایش‌های بتن خودتراکم در حالت تازه

Table 5- Results of tests of self-compacting concrete in the fresh state

۴- ارائه نتایج آزمایش‌ها و تحلیل آنها

۴-۱- خواص رئولوژی بتن‌های خودتراکم

آزمایش قیف V (ثانیه)	آزمایش جعبه L (h2/h1)	آزمایش جریان اسلامپ T50cm (ثانیه)	آزمایش اسلامپ (mm)	نام طرح اختلاط	ردیف
۱۲-۶	۱-۰٫۸	۳-۰	۸۰-۶۵۰	حداقل - حداکثر	
۸/۹	۰/۸۱	۱/۷	۷۱۲	SCC	۱
۹/۳	۰/۸۶	۱/۹	۷۲۲	SCCS25	۲
۹/۸	۰/۸۹	۲	۷۳۰	SCCS35	۳
۱۰/۴	۰/۹۴	۲/۲۲	۷۵۰	SCCS45	۴
۱۰/۸	۰/۹۶	۲/۳	۷۵۶	SCCS50	۵
۱۱	۰/۹۹	۲/۴	۷۶۵	SCCS60	۳۶

نتایج آزمایش‌های بتن تازه بیانگر اثر معکوس سرباره کارخانه فولاد اهواز بر روی خواص رئولوژی است. زیرا سرباره فولاد دارای سطح مخصوص بالا و اصطکاک ذره‌ای قابل توجهی با سنگدانه‌ها دارد. مقدار جریان اسلامپ برای طرح مرجع ۷۱۲ میلی متر است در حالی نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد با افزایش ۱۴٪ نسبت به نمونه مرجع ۷۲۲ میلی متر می‌باشد، درحالی‌که نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد با افزایش ۶۹٪ نسبت به نمونه مرجع ۷۶۵ میلی متر بدست آمده است. بیشترین مقدار جریان اسلامپ را دارد. جریان اسلامپ در دستور کار EFNAPC برای بتن خود تراکم در محدوده ۶۵۰~۸۰۰ میلی متر ارائه شده است. زمان‌های جریان اسلامپ (T50cm) و قیف V با افزودن سرباره فولاد جایگزین بخشی از سیمان افزایش دارد، نسبت انسداد قابل قبولی در تمام نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع مشاهده شد. در آزمایش جعبه L برای ارزیابی رئولوژی بتن خودتراکم، ظرفیت حفظ پیوستگی جریان صورت

می‌گیرد معمولا، نتیجه این آمایش با نسبت h_2/h_1 که همان نسبت ارتفاعی بتن در انتهای جعبه به ابتدای آن است مشخص می‌گردد. مشاهده گردید، با افزایش درصد سرباره فولاد مصرفی به نمونه‌ها، نسبت h_2/h_1 افزایش می‌یابد، نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد مصرفی با افزایش ۶٪ نسبت به نمونه مرجع h_2/h_1 ۰/۸۱ می‌باشد، درحالی‌که نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد نسبت به نمونه مرجع h_2/h_1 ۰/۹۹ به دست آمده است.

۴-۲- تحلیل خواص مکانیکی بتن خودتراکم

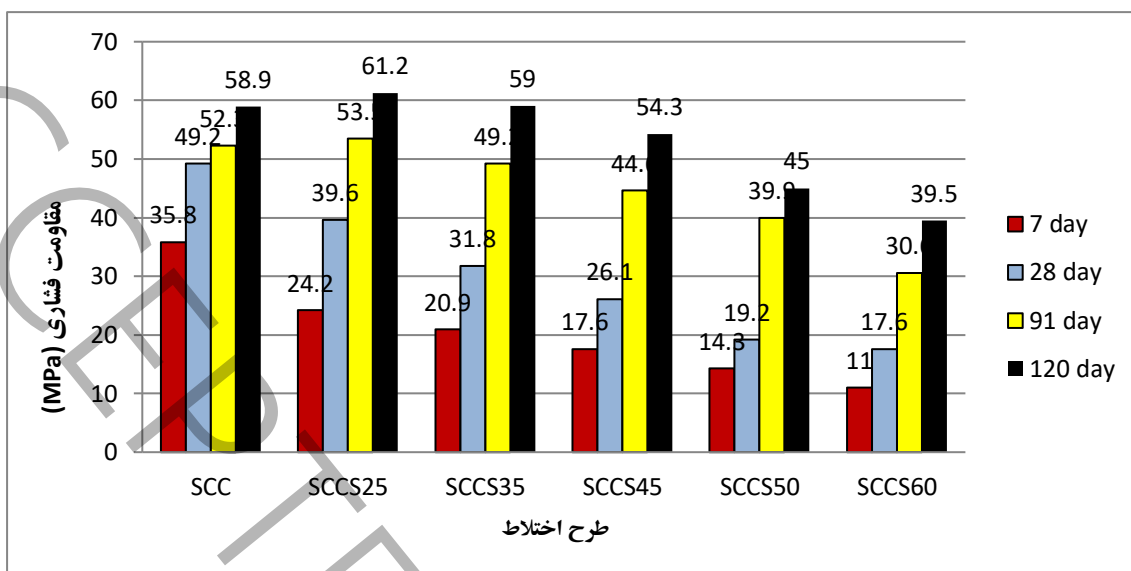
۴-۲-۱- نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نمونه‌های مکعبی استاندارد پس از عمل‌آوری در آب، به مدت ۲۸، ۵۶، ۹۱ و ۱۲۰ روز مطابق استاندارد ASTM C511، از حوضچه خارج و آزمایش تعیین مقاومت فشاری، با جک هیدرولیکی بتن شکن، با سرعت بارگذاری ۱۳۵۰ کیلوگرم بر ثانیه، بر اساس استاندارد BS1888 بر روی نمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک انجام پذیرفت [۲۱]، هر طرح اختلاط در هر سن دارای ۳ نمونه می‌باشد، نتایج نهایی میانگین سه نمونه در صورت عدم تجاوز از انحراف معیار ۱/۴ مگاپاسکال طبق استاندارد ASTM C192، بیانگر مقدار مقاومت فشاری می‌باشد، در غیر این صورت داده موردنظر حذف و میانگین دو مقاومت فشاری باقیمانده لحاظ می‌شود. میانگین مقاومت فشاری بتن برای نمونه‌های مرجع در سن ۷ روز مقدار ۳۵/۸ مگا پاسکال گردید و این مقاومت در ۲۸ روز به ۴۹/۲ مگا پاسکال رسید، نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری در جدول شماره ۴ نشان داده شده است. میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در ۹۱ روز به ۵۲/۳ رسید و مقاومت نمونه‌های شاهد در ۱۲۰ روز به مقدار ۵۸/۹ مگا پاسکال رسید. مقاومت فشاری بتن برای نمونه‌هایی حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد اهواز به‌عنوان جایگزین سیمان استفاده گردید، در مدت‌زمان ۷ روز مقدار ۲۴/۲ مگا پاسکال گردید و در ۲۸ روز به ۳۹/۶ مگاپاسکال رسید این مقاومت در ۹۱ روز به ۵۳/۵ مگاپاسکال و در ۱۲۰ روز به مقدار ۶۱/۲ مگا پاسکال رسید. مقاومت فشاری برای بتن‌های حاوی ۳۵٪ سرباره مصرفی جایگزین سیمان گردید به ترتیب به ۲۰/۹، ۳۱/۸، ۴۹/۲ مگاپاسکال و در ۱۲۰ روز به ۵۹ مگاپاسکال رسید. مقاومت فشاری نمونه‌های بتن حاوی ۴۵٪ سرباره فولاد جایگزین بخشی از سیمان در بتن، در مدت ۷ روز به ۱۷/۶ مگا پاسکال، در ۲۸ روز به ۲۶/۱ مگا پاسکال و در ۹۱ روز به ۴۴/۶ مگاپاسکال رسید و در ۱۲۰ روز به ۵۴/۳ مگاپاسکال رسید. مقاومت فشاری نمونه های بتن حاوی ۵۰٪ سرباره فولاد جایگزین بخشی از سیمان در بتن، به ترتیب به اعداد ۱۴/۳، ۱۹/۲، ۳۹/۹ و ۴۵ مگاپاسکال رسید که نتایج قابل ملاحظه‌ای بودند. مقاومت فشاری بتن‌های ساخته شده با ۶۰٪ سرباره جایگزین بخشی از سیمان در بتن، در مدت‌زمان ۷ روز ۱۱ مگاپاسکال و در ۲۸ روز به مقاومت ۱۷/۶ مگاپاسکال و در ۹۱ روز به ۳۰/۶ مگا پاسکال و در ۱۲۰ روز به مقاومت فشاری ۳۹/۵ مگاپاسکال رسید. نتایج مقاومت فشاری در سنین ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه در شکل ۵ ارائه شدند. تحلیل نتایج نشان می‌دهد، تاثیر سرباره کوره آهنگازی بر مقاومت فشاری در روزهای اولیه گیرش در مقایسه با بتن مرجع در حد پایین قرار داشته، ولی باگذشت زمان مقاومت نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک و نسبت نمونه‌های ۲۵٪ و ۳۵٪ حاوی سرباره فولاد اهواز بیشتر از نمونه مرجع شده است. مقدار بیش از ۴۵٪ سرباره در بتن باعث افت مقاومت فشاری شده است. اما تاثیر ۲۵٪ سرباره در سن ۹۱ روزه نسبت به نمونه مرجع موجب افزایش ۱۹٪ مقاومت فشاری گردیده است. همچنین در سن ۱۲۰ روزه مقاومت نمونه ۳۵٪ سرباره جایگزین سیمان به ۱/۶٪ رسیده و در ۲۵٪ سرباره جایگزین سیمان در سن ۱۲۰ روزه ۳/۹٪ افزایش را نشان می‌دهد. هرچند مقدار افزایش ۱/۶٪ ناچیز به نظر می‌رسد، اما از آنجایی‌که نشانگر این است که تا سن ۱۲۰ روز سرباره دارای اثر مثبت بر مقاومت فشاری می‌باشد، قابل ذکر است. بررسی نتایج بیانگر این است که بتن حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد مصرفی مقاومت فشاری بالاتر و اثر بهتری را نسبت به نمونه‌های دیگر نشان داد.

۴-۲-۲- تحلیل مقاومت فشاری

یکی از دلایل تاثیر دیر هنگام سرباره فولاد خوزستان می‌تواند میزان آهن زیاد موجود در نمونه سرباره تهیه شده از کارخانه فولاد اهواز باشد. در جدول شماره ۱ اشاره شد سرباره مصرفی بیش از ۴۳ درصد اکسید آهن دارد و همچنین دی اکسید سیلیکون به میزان ۲۱ درصد باعث روند کند بهبود خواص مکانیکی شده است در این تحقیق در سن ۹۱

روژه مقاومت نمونه ۲۵٪ سرباره جایگزین سیمان به عنوان طرح بهینه بدست آمده است، که در تحقیق حیدری و همکاران مقدار ۲۰٪ سرباره فولاد به عنوان طرح بهینه می توان با این تحقیق مقایسه نمود [۳۳].



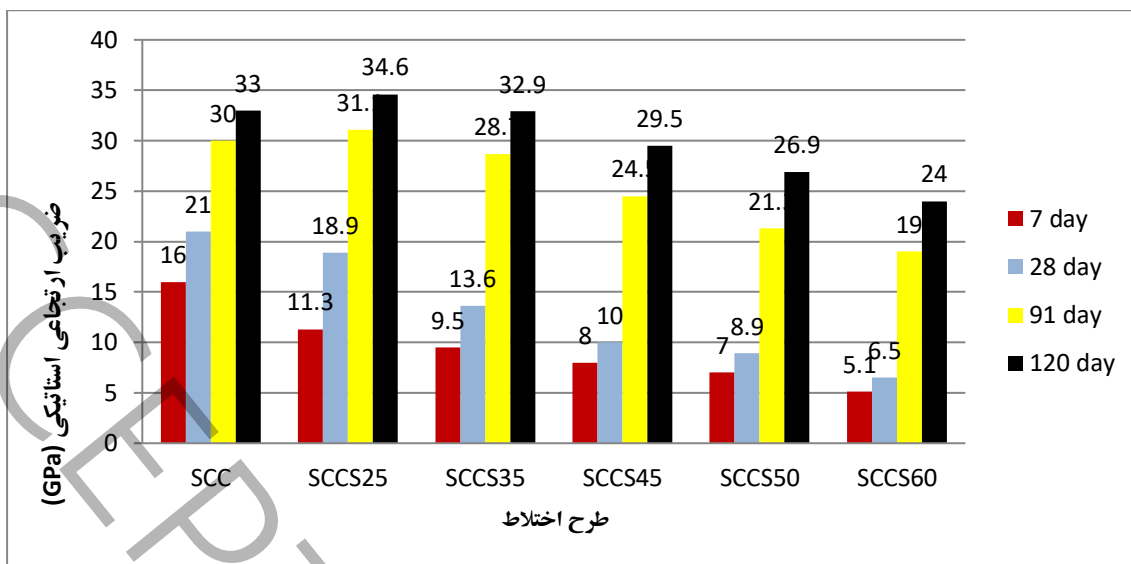
شکل ۵- نتایج مقاومت فشاری نمونه های طرح اختلاط های تحقیق در سنین مختلف
Figure ۵- Compressive strength results of samples taken from the research mix design at different ages

۴-۲-۳- تحلیل نتایج آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

ضریب ارتجاعی بتن، در تحلیل و طراحی سازه های بتنی دارای اهمیت ویژه ای می باشد. در اکثر پروژه های بزرگ و مهم ضریب ارتجاعی از جمله پارامترهای مهمی است که همیشه به عنوان اولین پارامتر طراحی مطرح است. ضریب ارتجاعی همانند مقاومت با توجه به نرخ بار وارده می تواند از نوع استاتیکی یا دینامیکی باشد. ضریب ارتجاعی دینامیکی بزرگ تر از نوع استاتیکی است ولی هرچه مقاومت بیشتر باشد این دو مقدار به هم نزدیک تر می باشند. نتایج ضریب ارتجاعی نشان می دهد در سن ۷ و ۲۸ روزه ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه های دارای سرباره فولاد نسبت به نمونه مرجع کاهش نشان می دهد. در شکل ۵ نشان داده شده است. نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد اهواز در سن ۷ و ۲۸ روزه به ترتیب ۲۹٪ و ۱۰٪ کاهش نسبت به نمونه مرجع نشان می دهد که در سنین فوق نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد اهواز به ترتیب ۶۸٪ و ۷۳٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش دارد. اما با گذشت زمان در سنین ۹۱ و ۱۲۰ روزه نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد اهواز نسبت به نمونه مرجع ۳٪ و ۵٪ افزایش نشان دارد اما نمونه های ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ نسبت به نمونه مرجع کاهش دارد. بررسی ها بیانگر این موضوع است که نمونه های حاوی ۲۵٪ سرباره مصرفی در سن ۱۲۰ روز بیشترین مقدار ضریب ارتجاعی استاتیکی را به میزان ۳۴/۶٪ نشان داد. که در مقایسه با نمونه های حاوی ۶۰٪ سرباره مصرفی، عدد قابل ملاحظه ای است.

۴-۲-۴- تحلیل آزمایش ضریب ارتجاعی استاتیکی

نتیجه تحقیقات میرزایی و همکاران نشان داد که سرباره در شرایط عمل آوری شده در محیط آزمایشگاهی از افت ضریب ارتجاعی کمتری نسبت به سایر نمونه ها برخوردار می باشند، که ذرات سرباره به شکل کامل تری هیدراته شده و خواص مکانیکی از جمله ضریب ارتجاعی بهبود یافته است [۳۵].



شکل ۶- نتایج ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق در سنین مختلف

Figure ۶- Static modulus of elasticity results of samples taken from the research mix design at different ages

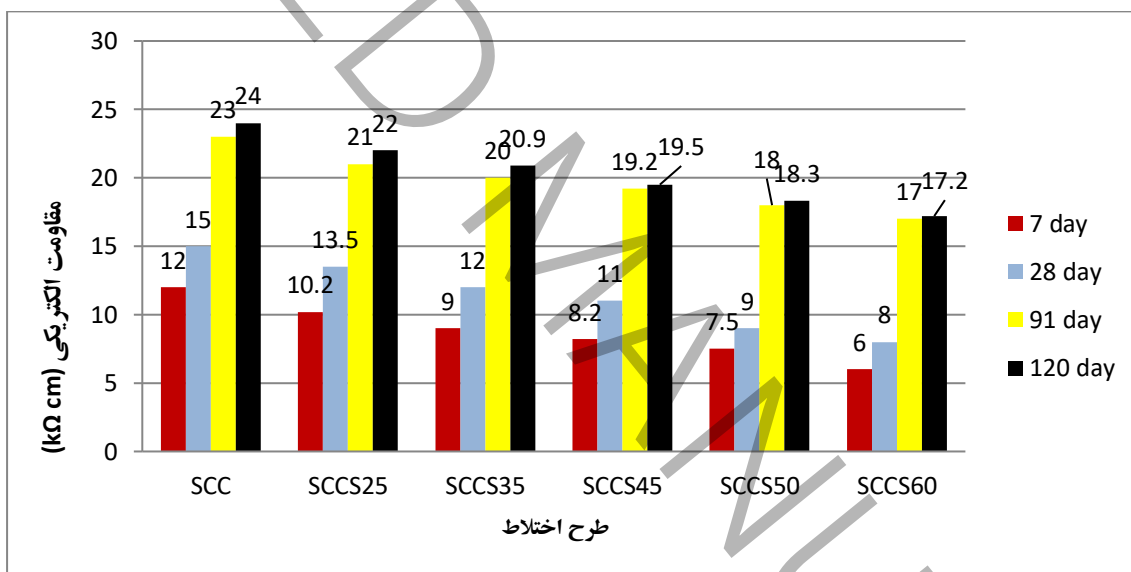
۳-۴- تحلیل آزمایش‌های دوام بتن خودتراکم

۳-۴-۱- نتایج آزمایش مقاومت الکتریکی

اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی طبق استاندارد ACI222 انجام گردید. این آزمایش با استفاده از دو صفحه مسی با برنجی که بر سطح آزمون بتنی اشباع از آب به کمک خمیر سیمان تازه می‌چسبد و مقاومت الکتریکی به کمک یک جریان متناوب با فرکانس مشخص به دست می‌آید، انجام شده است. با داشتن سطح بتن و فاصله بین دو صفحه فلزی، مقاومت ویژه الکتریکی آزمایش‌ها برحسب $k\Omega.cm$ تعیین می‌شود [۲۲]. مقاومت الکتریکی با نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر ارتباط مستقیم دارد. به همین دلیل مدتی است که آزمایش سنجش مقاومت ویژه الکتریکی بتن به دلیل سرعت بالا و غیر مخرب بودن مورد توجه قرار گرفته است. مقاومت الکتریکی در سن ۷ روزه برای نمونه مرجع، $k\Omega.cm$ ۱۲ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ حاوی سرباره شرکت فولاد خوزستان با کاهش ۱۵٪ به $k\Omega.cm$ ۱۰/۲ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با کاهش ۲۵٪ نسبت به نمونه مرجع به $k\Omega.cm$ ۹ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با کاهش ۳۱٪، ۳۷٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۸/۲، ۷/۵ و ۶ $k\Omega.cm$ رسیده است. نتایج مربوطه در شکل ۶ ارائه شده است. مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع، $k\Omega.cm$ ۱۵ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره شرکت فولاد خوزستان با کاهش ۱۰٪ به $k\Omega.cm$ ۱۳/۵ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه ۳۵٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۳۴٪ نسبت به نمونه مرجع به $k\Omega.cm$ ۱۲ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره آهنگدازی به ترتیب با کاهش ۲۶٪، ۴۰٪ و ۴۶٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۱، ۹ و ۸ $k\Omega.cm$ رسیده است. مقاومت الکتریکی در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع، $k\Omega.cm$ ۲۳ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره شرکت فولاد خوزستان با کاهش ۸٪ به $k\Omega.cm$ ۲۱ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه ۳۵٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۱۳٪ نسبت به نمونه مرجع به $k\Omega.cm$ ۲۰ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره آهنگدازی به ترتیب با کاهش ۱۶٪، ۲۱٪ و ۲۶٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۹/۲، ۱۸ و ۱۷ $k\Omega.cm$ رسیده است. مقاومت الکتریکی در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع، $k\Omega.cm$ ۲۴ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره شرکت فولاد خوزستان با کاهش ۸٪ به $k\Omega.cm$ ۲۲ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه ۳۵٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز با کاهش ۱۳٪ نسبت به نمونه مرجع به $k\Omega.cm$ ۲۰/۹ رسیده است. مقاومت الکتریکی نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره آهنگدازی به ترتیب با کاهش ۱۸٪، ۲۳٪ و ۲۸٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۹/۵، ۱۸/۳ و ۱۷/۲ $k\Omega.cm$ رسیده است.

۴-۳-۲- تحلیل آزمایش مقاومت الکتریکی

با بررسی نتایج مقاومت الکتریکی مشاهده می‌شود، تاثیر سرباره کوره آهنگدازی موجب کاهش مقاومت الکتریکی گردیده است. همچنین وجود سرباره باعث پر شدن فضای بین مصالح سنگی شده و این امر کاهش مقاومت الکتریکی نمونه‌های دارای سرباره نسبت به نمونه مرجع را در پی داشته است. از آنجاکه سرباره به‌عنوان یک پوزولان در درون ماتریس بتن قرار می‌گیرد، لذا با مصرف کریستال‌های کلسیم هیدروکسید سبب کاهش غلظت یون‌های OH در محلول منفذی می‌شود. همچنین این موضوع منجر به افت رسانایی الکتریکی محلول منفذی بتن می‌گردد [۲۳]. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده شد، عملکرد پوزولانی در سنین اولیه ضعیف می‌باشد و بر همین اساس سرباره شرکت فولاد اهواز تأثیر خاصی بر بهبود مقاومت الکتریکی در سن ۷ روزه ندارد. حال آنکه با افزایش درصد جایگزینی سیمان با سرباره یکی از عوامل اصلی مقاومت و چسبندگی ماتریس که همان سیمان است کاسته شده و در نتیجه این موضوع، افزایش تخلخل با افزایش میزان سرباره آهنگدازی می‌تواند منجر به افزایش رسانایی ماتریس شده و مقاومت الکتریکی آن را کاهش داد. اما نکته دیگری که در بررسی نتایج مقاومت الکتریکی از سنین ۹۱ و ۱۲۰ روزه خیلی نزدیک به هم می‌باشد. همچنین باگذشت زمان وجود سرباره آهنگدازی تأثیر زیادی در روند کاهش مقاومت الکتریکی ندارد. با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش با تحقیق عابدی و زندی نتایج نشان داد که مقاومت الکتریکی در نمونه‌های دارای سرباره در محدوده خوب قرار گرفته شده است، به عبارتی بهتر می‌توان گفت که احتمال خوردگی در نمونه‌های ساخته‌شده با سرباره در محیط آب مغناطیسی کاهش می‌یابد [۳۶].



شکل ۷- نتایج مقاومت الکتریکی نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق در سنین مختلف

Figure ۷- Electrical resistance results of samples taken from the research mix design at different ages

۴-۳-۲- تحلیل نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

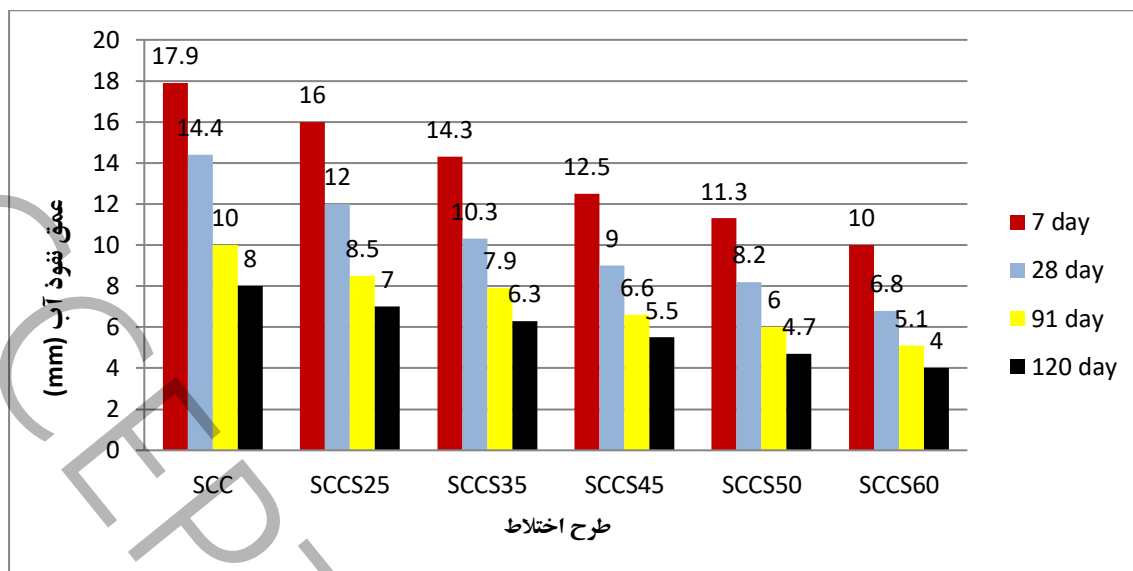
نفوذپذیری بتن معمولاً از طریق محاسبه مقدار آب تحت فشار که برای جریان یافتن به درون یک نمونه بتنی داخل می‌شود، در یک فاصله زمانی مشخص تعیین می‌شود. با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب پس از شکستن نمونه‌ها می‌توان به معیاری برای نفوذپذیری بتن دست یافت. در روش مذکور بر اساس آزمایش DIN1048 نمونه‌های مکعبی به بعد ۱۵ سانتیمتری تحت فشار ثابت ۷ اتمسفر قرار می‌گیرند. طبق استاندارد، سطحی از نمونه که با فشار بر آن اثر می‌کند، با برس سیمی کمی زبر می‌شود. پس از گذشت ۷۲ ساعت نمونه‌ها به دو نیم تقسیم شده و مقدار نفوذ آب با کولیس اندازه‌گیری می‌شود [۲۴]. عمق نفوذ آب در سن ۷ روزه برای نمونه مرجع ۱۷/۹ میلی‌متر است، در حالی که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۰٪ به ۱۶ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ۱۴/۳ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره

کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۰٪، ۳۶٪ و ۴۴٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۱۲/۵، ۱۱/۳ و ۱۰ میلی‌متر شده است.

عمق نفوذ آب در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع ۱۴/۴ میلی‌متر است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۶٪ به ۱۲ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۸٪ نسبت به نمونه مرجع به ۱۰/۳ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۷٪، ۴۳٪ و ۵۲٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۹، ۸/۲ و ۶/۸ میلی‌متر شده است. عمق نفوذ آب در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع ۱۰ میلی‌متر است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۵٪ به ۸/۵ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۱٪ نسبت به نمونه مرجع به ۷/۹ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۴٪، ۴٪ و ۴۹٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۶/۶، ۶ و ۵/۱ میلی‌متر شده است. عمق نفوذ آب در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع ۸ میلی‌متر است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۲٪ به ۷ میلی‌متر رسیده است. عمق نفوذ آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۱٪ نسبت به نمونه مرجع به ۶/۳ میلی‌متر رسیده است. همچنین عمق نفوذ آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۱٪، ۴۱٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۵/۵، ۴/۷ و ۴ میلی‌متر شده است. به‌طور کلی آزمایش عمق نفوذپذیری آب بتن یک آزمایش استاندارد نیست، از طرف دیگر نتایج حاصل از روش‌های متداول تعیین نفوذپذیری آب در بتن که در آزمایشگاه و روی آزمون‌های بتنی از قبل آماده‌شده انجام می‌پذیرد، عمدتاً کیفی و مقایسه‌ای می‌باشد. از این‌رو در سال ۲۰۱۱ توسط نادری، روشی با کاربردی گسترده و دقیق، جهت تعیین مقدار نفوذپذیری آب در بتن و دیگر مصالح ساختمانی ابداع گردید. این روش در تمامی شرایط کاملاً آزمایشگاهی، مخصوصاً در محل پروژه و در تمامی سطوح افقی، عمودی، سقفی و مورب به‌سادگی، با کمترین آموزش، بدون نیاز به مغزه‌گیری و تخریب سازه اصلی و ... قابل انجام می‌باشد و نتایج را به‌صورت کمی بیان می‌کند. همچنین این روش قادر است ترک‌های ریز و مویین بر روی سطح بتن حتی در محیط آزمایشگاه را نیز بررسی نماید [۳۷].

۴-۳-۳- تحلیل نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

نتایج عمق نفوذ در شکل ۷ نشان داد که با افزایش میزان سرباره کارخانه فولاد اهواز، عمق نفوذپذیری آب کاهش داشته است. نمونه ۶۰٪ حاوی سرباره کارخانه فولاد اهواز نسبت به بقیه نمونه‌های حاوی سرباره فولاد اهواز کمترین عمق نفوذ آب را نشان می‌دهد. اما نکته قابل‌توجه کاهش عمق نفوذ در سنین بالا نسبت به سنین پایین و همچنین کاهش نمونه‌های حاوی سرباره مصرفی نسبت به نمونه مرجع می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه با نتایج تحقیق زندی و عابدی نشان داد که نمونه ساخته‌شده با سرباره ذوب‌آهن به‌جای سیمان در محیط مغناطیسی باعث کاهش ۸۳٪ عمق نفوذ گردیده است [۳۶].



شکل ۸- نتایج عمق نفوذ آب نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق در سنین مختلف
Figure ۸- Water penetration depth results of samples taken from the research mix design at different ages

۴-۳-۴- نتایج آزمایش جذب حجمی آب

اندازه‌گیری جذب آب نمونه‌ها به دو روش انجام می‌شود. در روش استاندارد آزمایش BS1881 نمونه‌های $\Phi 75 \times 75$ پس از قرارگیری در کوره به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد و پس از خنک‌سازی، به مدت ۳۰ دقیقه در داخل آب قرار داده می‌شوند. پس از خروج نمونه‌ها و خشک کردن سطح آنها، جذب آب نمونه‌ها در این مدت‌زمان تعیین می‌شود. در روش استاندارد ASTM C642 جذب آب حجمی نسبت تفاضل وزن نمونه در حالت اشباع با سطح خشک و کاملاً خشک (در کوره ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۴۸ ساعت) به وزن نمونه خشک است که به درصد بیان می‌شود [۳۸]. درصد جذب آب (WA) هر نمونه مطابق رابطه (۱) تعیین می‌گردد.

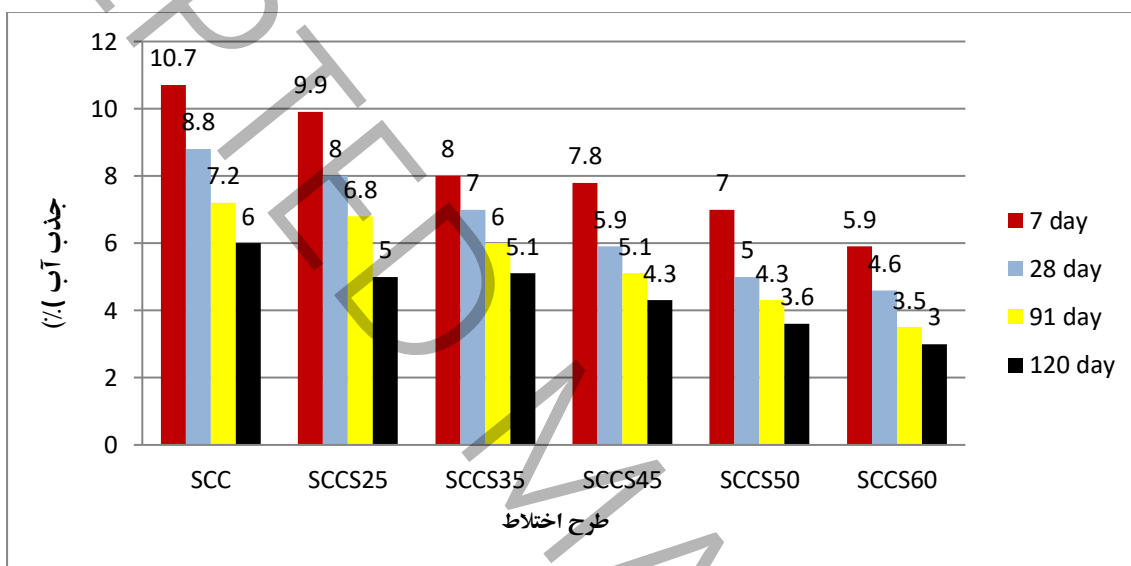
$$WA = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

در رابطه (۲)، W_1 و W_2 برحسب گرم است.

جذب آب در سن ۷ روزه برای نمونه مرجع ۱۰/۷٪ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۷٪ به ۹/۹٪ رسیده است. جذب آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۵٪ نسبت به نمونه مرجع به ۸٪ رسیده است. همچنین جذب آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۲۷٪، ۳۴٪ و ۴۴٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۷/۸٪، ۷٪ و ۵/۹٪ شده است. جذب آب در سن ۲۸ روزه برای نمونه مرجع ۸/۸٪ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۹٪ به ۸٪ رسیده است. جذب آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۲۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ۷٪ رسیده است. همچنین جذب آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۲٪، ۳۳٪ و ۴۳٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۵/۹٪، ۵٪ و ۴/۶٪ شده است. جذب آب در سن ۹۱ روزه برای نمونه مرجع ۷/۳٪ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۷٪ به ۵٪ رسیده است. جذب آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۱۶٪ نسبت به نمونه مرجع به ۶٪ رسیده است. همچنین جذب آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۳۵٪، ۴۵٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۳/۵٪، ۳٪ و ۲/۹٪ شده است. جذب آب در سن ۱۲۰ روزه برای نمونه مرجع ۶٪ است، درحالی‌که در نمونه ۲۵٪ سرباره با افزایش ۱۶٪ به ۵٪ رسیده است. جذب آب نمونه ۳۵٪ سرباره آهنگدازی با افزایش ۱۵٪ نسبت به نمونه مرجع به ۵/۱٪ رسیده است. همچنین جذب آب نمونه‌های ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۲۸٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۴/۳٪، ۴/۶٪ و ۳٪ شده است.

۴-۳-۵- تحلیل آزمایش جذب آب

آزمون جذب آب نمونه‌های بتن سیمانی، قابلیت جلوگیری از نفوذ آب و سایر مایعات را برای این مصالح نشان می‌دهد. بر همین اساس افزایش میزان آب جذب‌شده طی انجام این آزمون قابلیت ضعیف ماتریس در جلوگیری از نفوذ آب و سایر مایعات به آن و در نتیجه تخلخل بالای ماتریس بتن را مشخص می‌نماید. در مقایسه نمونه‌های جذب آب مشاهده می‌شود در نمونه‌های دارای سرباره کارخانه فولاد اهواز نسبت جذب آب با نمونه مرجع بیشتر می‌باشد. از تأثیر سرباره بر میزان نفوذپذیری نمونه‌های بتن سیمان می‌توان به عملکرد پوزولانی این مواد اشاره نمود که در نتیجه آن باعث تراکم بیشتر ماتریس و در نتیجه بهبود ساختار تخلخل می‌گردد، اما سرباره خود جذب آب بالایی دارد و به همین خاطر نمونه‌های دارای درصد سرباره فولاد، جذب آب بیشتری داشتند. با توجه به تحقیق عافیتی سلیم و همکاران مانند نتیجه گرفت که کاهش عیار سیمان و جایگزینی آن با درصد‌های مختلفی از سرباره باعث افزایش درصد جذب آب در بتن می‌گردد [۳۴].



شکل ۹- نتایج جذب آب نمونه‌های طرح اختلاط‌های تحقیق در سنین مختلف

Figure 9- Water absorption results of samples taken from the research mix design at different ages

۵- نتایج

در این تحقیق برای توسعه ساخت بتن‌های خودتراکم حاوی سرباره دوست‌دار محیط‌زیست، پوزولان سرباره مصرفی که به روش مکانیکی فعال گردیده است، استفاده شده است و آزمایش‌های تعیین خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام، در سنین مختلف ۷، ۲۸، ۹۱ و ۱۲۰ روزه انجام شده است. نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

- آزمایش جریان اسلامپ نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد، افزایش ۱۴٪ را نسبت به نمونه مرجع نشان داد. در آزمایش جریان اسلامپ نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد، افزایش ۶۹٪ نسبت به نمونه مرجع مشاهده گردید.
- زمان‌های جریان اسلامپ (T50cm) و قیف V با افزودن سرباره مصرفی به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان، افزایش را نشان داد. نسبت انسداد قابل قبولی در تمام نمونه‌های حاوی سرباره نسبت به نمونه مرجع مشاهده شد.
- آزمایش جعبه L نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد، h_2/h_1 عدد ۸۶٪ را نشان داد، که نسبت به نمونه مرجع، که h_2/h_1 عدد ۰/۸۱ می‌باشد، میزان افزایشی است، به‌علاوه نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد نسبت به نمونه مرجع h_2/h_1 ۰/۹۹ بدست آمده است.
- نتایج نشان داد که ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های حاوی درصد بهینه سرباره به مقدار ۴/۸ درصد نسبت به نمونه مرجع در سن ۱۲۰ روز افزایش داشته است.
- بررسی نتایج عمق نفوذ آب و هم‌پس‌طور درصد جذب آب در نمونه‌های حاوی درصد بهینه سرباره، به ترتیب به میزان ۱۰/۶ درصد و ۲۵/۲ درصد در سن ۱۲۰ روزه کاهش نشان دادند.
- وجود سرباره در سنین ۷ و ۲۸ روزه اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر خواص مکانیکی نمونه نداشته است، اما در سن ۹۱ روزه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره نزدیک به نمونه مرجع شده است و در سن ۱۲۰ روز افزایش یافته است.
- نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره در سن ۱۲۰ روز، نسبت به نمونه مرجع افزایش مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. این میزان افزایش به مقدار ۳/۹٪ بوده است. هرچند مقدار افزایش، کم به نظر می‌رسد، اما از آنجایی که نشانگر این است که تا سن ۱۲۰ روز سرباره دارای اثر مثبت بر مقاومت می‌باشد، قابل‌ذکر است.
- به‌صورت کلی در سنین ۷ و ۲۸ روز، ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه‌های حاوی سرباره فولاد نسبت به نمونه مرجع کاهش نشان دادند. نتایج ضریب ارتجاعی استاتیکی نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره فولاد اهواز در سنین ۹۱ و ۱۲۰ روز به نمونه مرجع ۳٪ و ۵٪ افزایش نشان داد، اما نمونه‌های ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ نسبت به نمونه مرجع، کاهش داشتند.
- مقاومت الکتریکی در نمونه‌های حاوی ۲۵٪ سرباره مصرفی و در سن ۱۲۰ روز، کاهش ۸٪ نشان داد. نمونه‌های ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره آهنگدازی به ترتیب با کاهش ۱۳٪، ۱۸٪، ۲۳٪ و ۲۸٪ نسبت به نمونه مرجع رسیده است. نتایج مقاومت الکتریکی از سنین ۹۱ و ۱۲۰ روزه خیلی نزدیک به هم می‌باشد. همچنین باگذشت زمان وجود سرباره آهنگدازی تأثیر زیادی در روند کاهش مقاومت الکتریکی ندارد.
- با افزایش میزان سرباره، عمق نفوذپذیری آب کاهش داشته است. نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز نسبت به بقیه نمونه‌های حاوی سرباره فولاد اهواز کمترین عمق نفوذ آب را نشان داد.
- آزمایش عمق نفوذ آب در سن ۱۲۰ روز، برای نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره ۱۲/۵٪ افزایش دارد. عمق نفوذ آب نمونه‌های ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب با افزایش ۲۱٪، ۳۱٪، ۴۱٪ و ۵۰٪ نسبت به نمونه مرجع نشان داد.
- آزمایش جذب آب در سن ۱۲۰ روز، نمونه حاوی ۲۵٪ سرباره ۱۶/۶٪ افزایش دارد. جذب آب نمونه‌های حاوی ۳۵٪، ۴۵٪، ۵۰٪ و ۶۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب ۱۵٪، ۲۸٪، ۴۰٪ و ۵۰٪ افزایش دارد و نسبت به نمونه مرجع به ترتیب ۴/۳٪، ۳/۶٪ و ۳٪ را نشان داد.
- با جایگزینی ۲۵٪ و ۳۵٪ پودر شده سرباره کارخانه فولاد اهواز به جای بخشی از سیمان مصرفی در بتن بهبود خواص مکانیکی در سنین ۱۲۰ روزه حاصل گردید.

- با بررسی نتایج مقاومت الکتریکی مشاهده شد که تاثیر سرباره کوره آهنگدازی موجب کاهش مقاومت الکتریکی گردیده است. وجود سرباره باعث پر شدن فضای بین مصالح سنگی شده و این امر کاهش مقاومت الکتریکی نمونه‌های دارای سرباره نسبت به نمونه مرجع را در پی داشته است.
- با افزایش میزان سرباره کارخانه فولاد اهواز، عمق نفوذپذیری آب کاهش داشته است. نمونه حاوی ۶۰٪ سرباره فولاد نسبت به بقیه نمونه‌های حاوی سرباره مصرفی کمترین عمق نفوذ آب را نشان دادند. نکته قابل توجه کاهش عمق نفوذ در سنین بالا نسبت به سنین پایین و همچنین کاهش در نمونه‌های حاوی سرباره مصرفی نسبت به نمونه مرجع می‌باشد.

مراجع

- [1] E.P. Koehler, Aggregates in self-consolidating concrete, The University of Texas at Austin, 2007.
- [2] H. Okamura, Self-compacting high-performance concrete, Concrete international, 19(7) (1997) 50-54.
- [3] H. Okamura, M. Ouchi, Self-compacting concrete, Journal of advanced concrete technology, 1(1) (2003) 5-15.
- [4] F. Ghaffari-Moghaddam, Investigation of the effect of nanomaterials on the properties of self-compacting concrete, in: Second Nanotechnology Student Conference, Isfahan, 2007.
- [5] G. De Schutter, P.J. Bartos, P. Domone, J. Gibbs, Self-compacting concrete, Whittles Publishing Caithness, 2008.
- [6] A.K. Shirzadi Javid, B. Rahmati, A New Method of Mix Design for Self-Consolidating Concrete Based on Compressive Strength, Concrete Research, 6(1) (2013) 87-102.
- [7] D. Mostofinejad, D. of Civil Engineering, Adding Slag and Limestone Powder to Concrete to Increase the Durability of Concrete in Sulfate Environment, Journal of Transportation Research, 3(2) (2006).
- [8] D. Brindha, T. Baskaran, S. Nagan, Assessment of corrosion and durability characteristics of copper slag admixed concrete, International journal of civil and structural engineering, 1(2) (2010) 192.
- [9] S.K. Rao, P. Sravana, T.C. Rao, Experimental studies in Ultrasonic Pulse Velocity of roller compacted concrete pavement containing fly ash and M-sand, International Journal of Pavement Research and Technology, 9(4) (2016) 289-301.
- [10] R.T. Flynn, T.J. Grisinger, B. Mather, R. Hooton, G. Dewey, M. Luther, M. Thomas, Slag Cement in Concrete and Mortar, American Concrete Institute: Farmington Hills, MI, USA, (2003).
- [11] C. Ozyildirim, Laboratory investigation of low-permeability concretes containing slag and silica fume, Materials Journal, 91(2) (1994) 197-202.
- [12] P. Tikalsky, V. Schafer, K. Wang, B. Scheetz, T. Rupnow, A. St Clair, M. Siddiqi, S. Marquez, Development of Performance Properties of Ternary Mixtures: Phase I Final Report, United States. Federal Highway Administration, 2007.
- [13] V. Sivasundaram, V. Malhotra, Properties of concrete incorporating low quantity of cement and high volumes of ground granulated slag, Materials Journal, 89(6) (1992) 554-563.
- [14] R.D. Hooton, J.J. Emery, Sulfate resistance of a Canadian slag cement, Materials Journal, 87(6) (1990) 547-555.
- [15] E.E. Hekal, E. Kishar, H. Mostafa, Magnesium sulfate attack on hardened blended cement pastes under different circumstances, Cement and Concrete Research, 32(9) (2002) 1421-1427.
- [16] I.N.S. Organization, Cement - Determination of Compressive and Flexural Strength, in: Iranian National Standard No. 393, Iranian Standards and Industrial Research Institute, 2009.
- [17] S. Sajedi, F. Darash, Experimental Study of Workability and Mechanical Properties of Concrete Containing Powder Glass and Mineral Waste Glass with Separate and Simultaneous Applications, Amirkabir Journal of Civil Engineering, 50(6) (2019) 1155-1176.

- [18] M. Pattengil, T. Shutt, Use of ground glass as a pozzolan; Albuquerque symposiums on Utilization of Waste Glass in Secondary Products, Albuquerque, New Mexico, USA, (1973).
- [19] A.S. C127, Test method for specific gravity and absorption of coarse aggregate, in, ASTM International West Conshohocken, PA, 2001.
- [20] B. Ahmadi, M. Shekarchi, Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material, *Cement and Concrete Composites*, 32(2) (2010) 134-141.
- [21] B.S.I. . "Methods of testing fresh concrete.", (1970).
- [22] C.o.M.i.C. ACI Committee 222, Protection of metals in concrete against corrosion, in, American Concrete Institute, 2001.
- [23] M. Mazloom, A. Ramezaniapour, J. Brooks, Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cement and concrete composites*, 26(4) (2004) 347-357.
- [24] A. Standard, ASTM C172/C172M-17: Standard practice for sampling freshly mixed concrete, in, 2017.
- [25] A. Khani, Shafaei, J, Tadayin, M, Sajjadi Attar, S, M, Investigation of self-compacting concretes containing microsilica and slag pozzolan with durability approach by electrical conductivity test, in: 9th National Conference on Modern Materials and Structures in Engineering, 2022.
- [26] S.A. Hosseini-Pool, Ghasemzadeh Mousavinejad, S. H, Combined effects of three types of granulation of blast furnace slag and electric arc furnace slag on mechanical strength and durability of self-compacting concrete, in: 10th National Conference on Civil Engineering, Architecture and Sustainable Urban Development of Iran, 2022.
- [27] S.M. Homayounfar, Ghodousian, A, Study of adhesion of repair fibrous self-compacting concrete containing microsilica, zeolite and slag pozzolans to old concrete using slant-shear method, in: 2nd International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Development, Environment and Horizons of Islamic Art in the Second Step of the Revolution Declaration, Tabriz, 2022.
- [28] P. Ebadi, Khaki, V., Badrloo, S., Hosseini Mianposhte, M., High durability and strength in lightweight self-compacting concrete with slag, microsilica and light pozzolanic sand, in: 2nd International Congress of Civil Engineering, Architecture, Building Materials and Environment, 2022.
- [29] A. Rahmati, Saki, V., Lak, M., Shayesteh Nam, H., Investigation and study on blended cements containing slag and its activation with silica fume with different percentages in self-compacting concrete and its effect on mechanical properties, durability and performance of fresh and hardened concrete, in: 20th Concrete Day Conference and 14th National Concrete Conference, Tehran, 2022.
- [30] M. Mirzaie Aliabadi, m. hamednezhad, a. dadpour, Experimental study of Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing coarse and fine electric arc furnace slag aggregate, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 1) (2021) 86-110.
- [31] M. Hosseini, Juma, N., Design and investigation of rheology and durability of self-compacting lightweight concrete containing two or more mixtures of slag, fly ash and microsilica, in: Second National Conference on Concrete Durability, Tehran, 2021.
- [32] S.F. Sajedi, S.H. Hashemi, Experimental study of the effect of slag of Ahvaz Steel Plant on the properties of cement-slag mortars, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(9) (2022) 3557-3580.
- [33] A. Heydari, Taheri Sarteshnezi, M., Investigation of the effect of blast furnace and converter slag from Isfahan Iron and Steel Works on the compressive strength of high-strength self-compacting concrete, in: 8th National Civil Engineering Congress, Babol, 2014.

- [34] J. Afiti Salim, Razm Ara, P., Saeedi Jam, S., Effect of slag replacement on the properties of self-compacting concrete containing recycled coarse aggregates, *Concrete Research*, (Issue 11(2)) (2018) pp. 105-116.
- [35] y. zandi, m. abedi, Evaluation of the effect of magnetic water on the durability of Concrete made of cast iron slag, *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(7) (2021) 195-213.
- [36] A. Standard, ASTM A511, Standard Specification for Seamless Stainless Steel Mechanical Tubing, in, ASTM International, 2018.
- [37] A. Standard, C128-12, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, ASTM International, West Conshohocken, PA, (2012).
-