

بررسی تاثیر سنگدانه‌های سبک و روش عمل‌آوری بر خواص بتن‌های سیمان - سرباره‌ای

غلامعباس بهرامی نیا^۱، سیدفتح اله ساجدی^{۲*}، فریدون مقدس نژاد^۳

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

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

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

* f_sajedi@yahoo.com

چکیده

یکی از روش‌های بهینه تولید سیمان و بتن، جایگزینی بخشی از سیمان با مواد افزودنی ارزان است. پوزولان‌های طبیعی و مصنوعی، نمونه‌هایی از این مواد هستند. این پوزولان‌ها به کاهش مصرف سیمان، انرژی و تولید گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند. همچنین، خواص مکانیکی و دوام بتن را بهبود می‌بخشند. در این تحقیق، یازده طرح اختلاط شامل یک طرح مرجع و ده طرح بتن سیمان - سرباره‌ای ساخته شدند. در ده طرح، پودر سرباره کارخانه فولاد اهواز به جای ۴۰٪ وزنی سیمان استفاده شد. در پنج طرح، به جای بخشی از سنگدانه‌های طبیعی، از سبکدانه اسکوریا و در پنج طرح دیگر از لیکا بهره‌برداری شد. این دو نوع سبکدانه با دو روش عمل‌آوری شامل آب شرب و دمای آزمایشگاه استفاده شدند. در انجام آزمایش‌ها، از نمونه‌های مکعبی و منشوری استاندارد استفاده شد. سبکدانه‌های اسکوریا و لیکا به میزان ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ با سنگدانه‌های طبیعی (نخودی و بادامی) جایگزین شدند. از فوق روان‌کننده اصلاح‌شده نسل سوم و کاهش‌دهنده شدید آب بر پایه پلی‌کربوکسیلات استفاده شد. برای تعیین خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام، آزمایش‌های اسلامپ، وزن مخصوص بتن، مقاومت فشاری، مقاومت کششی غیرمستقیم، مقاومت الکتریکی، جذب آب حجمی و عمق نفوذ آب انجام شدند. نتایج نشان داد از بین طرح‌ها، استفاده از ۴۰٪ سرباره با ترکیب سنگدانه‌های ۴۰٪ اسکوریا و ۴۰٪ لیکا به صورت مجزا با افزایش ۶٪ مقاومت فشاری نسبت به نمونه مرجع، بیشترین اثر را بر خواص بتن داشته است. بنابراین این طرح مخلوط، به عنوان طرح بهینه معرفی می‌گردد.

کلمات کلیدی:

بتن سیمان - سرباره‌ای، اسکوریا، لیکا، عمل‌آوری، سنگدانه طبیعی

بتن یکی از مصالح اصلی در ساخت سازه‌های مهندسی است [۱]. خواص فیزیکی و مکانیکی بتن، همراه با سهولت تولید، بتن را به پرمصرف‌ترین ماده در صنعت ساخت و ساز تبدیل کرده است. بتن پس از شکل‌گیری در قالب، به سرعت خواص مکانیکی مناسبی پیدا می‌کند [۲]. همواره بتن به عنوان اصلی‌ترین مصالح در ساخت و سازها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. بتن ترکیبی شگفت‌انگیز و در البته گران‌قیمت است و همواره تلاش بر این بوده که با تغییر مواد و مصالح تشکیل دهنده آن، کیفیت حفظ و قیمت نیز کاهش یابد [۳]. مفتی و همکاران [۴] در مقاله‌ای بررسی کردند که چگونه می‌توان ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ از سیمان را با پودر اسکوریا جایگزین کرد. این کار برای کنترل واکنش‌های قلیایی سیلیسی بود. آن‌ها انبساط ملات منشوری را اندازه‌گیری کردند. نتایج نشان داد که با افزایش میزان جایگزینی، انبساط آزمونه‌ها کاهش یافت. با این حال، تنها طرح حاوی ۴۰٪ اسکوریا توانست انبساط را مطابق با الزامات آیین‌نامه کنترل کند. مجدی و همکاران [۵] در تحقیقی ظرفیت مقاومتی یکی از سبکدانه‌های طبیعی ایران، یعنی اسکوریا و پومیس، را بررسی کردند. نتایج نشان داد که اسکوریا نسبت به پومیس ظرفیت مقاومتی بالاتری دارد و می‌تواند در ساخت بتن سبکدانه سازه‌ای استفاده شود. شکرچی‌زاده و همکاران [۶] نشان دادند که اسکوریا بیشتر شبیه سنگدانه‌های طبیعی در روند کسب مقاومت است. آن‌ها به مقایسه مقاومت فشاری بتن سبک حاوی سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا پرداختند. نتایج نشان داد که چگالی میانگین مقاومت فشاری بتن حاوی لیکا کمی بالاتر از بتن حاوی اسکوریا است. نادری و بنیادی [۷] در تحقیقی سه طرح بتن سبکدانه مصنوعی لیکا را بررسی کردند. این تحقیق شامل ۶۰ نمونه مکعبی بود که آزمایش‌های مقاومت فشاری و لنگر پیچشی بر روی آن‌ها انجام شد. برای تعیین مقاومت فشاری، از روش جک فشاری و یک روش جدید به نام روش پیچش استفاده شد. این روش خرابی جزئی دارد. صدرممتازی و همکاران [۸] نشان دادند که بتن با ۶۰ درصد سنگدانه اسکوریا، بهترین مقاومت فشاری را دارد. این نمونه حدود ۶۳/۷ مگاپاسکال مقاومت فشاری داشت، که ۸۵ درصد بیشتر از نمونه شاهد بود. همچنین، بتن حاوی ۴۰ درصد سنگدانه اسکوریا،

بالاترین مقاومت کششی ۳/۸ و خمشی ۶/۷ مگاپاسکال را نشان داد و مقاومت خمشی آن نیز بیشتر از نمونه شاهد بود. رضائی‌زاده دربند [۹] به بررسی خواص مکانیکی بتن‌های سبک با لیکا، اسکوریا و پرلیت پرداخت. نتایج نشان داد که افزایش دما، مقاومت فشاری بتن را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. در تحقیقی دیگر [۱۰] خواص مکانیکی و جذب آب بتن سبک ساخته شده با سنگدانه لیکا و اسکوریا را بررسی کرد. نتایج نشان داد که این بتن دارای نرخ جذب آب بالا و مقاومت فشاری مناسبی نسبت به نمونه مرجع است. پورحسین پریزاد [۱۱] در پژوهشی نشان داد که ساخت بتن خودتراکم سبک با دانه‌های اسکوریای ایران با مقاومت سازه‌ای ممکن است. اما، کسب وزن مخصوص‌های پایین‌تر با حفظ خواص خودتراکمی بتن دشوار است. وزن مخصوص بالای اسکوریا، مصرف فیلر و مصالح ریزدانه را افزایش می‌دهد. این امر دستیابی به بتن‌هایی با وزن مخصوص کمتر از ۱۸۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب را مشکل می‌کند. شهرامی و همکاران [۱۲] نشان دادند که استفاده از سبکدانه اسکوریا، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن را به حدود ۸۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع می‌رساند. ولی وزن مخصوص این بتن به دلیل وزن اسکوریا، از محدوده مجاز بتن‌های سبک سازه‌ای بیشتر می‌رود. در مقابل، استفاده از سبکدانه لیکا، مقاومت حدود ۳۷۳ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع و وزن مخصوص مجاز را به همراه دارد. قوش و همکاران [۱۳] عملکرد سنگدانه ریز آجر نسوز بازیافتی را بررسی کردند. آن‌ها ۱۰ تا ۴۰ درصد سنگدانه ریز طبیعی را با آجر نسوز بازیافتی و سیمان سرباره پرتلند ترکیب کردند. این کار نوید تولید بتن پایدار برای کاربردهای مختلف در شرایط دمایی بالا را می‌دهد. مهدی و همکاران [۱۴] به بررسی برخی از خواص بتن سبک پایدار بر پایه اپوکسی، اسکوریا و زغال چوب پرداختند. نتایج نشان داد که مقاومت فشاری، چگالی ظاهری و جذب آب نمونه (اپوکسی با اسکوریا ریز و اسکوریا درشت) با نسبت ۱ به ۲ و ۴ درصد وزنی بهترین عملکرد را دارد. نویل [۱۵] در پژوهشی، خواص بتن سبک حاصل از جایگزینی تدریجی سنگدانه‌های درشت با اسکوریا را مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که

2 Gong et al.

3 Neville.

بتن حاوی اسکوریا دارای مقاومت فشاری کافی و چگالی مناسبی برای استفاده در سازه‌های سبک است. با این حال، در مقایسه با بتن معمولی، ضریب ارتجاعی آن کمتر بوده و از نفوذپذیری و جذب سطحی آب اولیه بیشتری برخوردار است.

دگفا و تیکو^۴ [۱۶] تأثیر جایگزینی ماسه با اسکوریا را در درصدهای مختلف بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزایش میزان اسکوریا باعث کاهش روانی و مقاومت فشاری بتن می‌شود، اما در برخی موارد بهبود خواص حرارتی بتن را نیز به دنبال دارد. ژنسل و همکاران^۵ [۱۷] در مطالعه‌ای جامع، اثر اسکوریا را بر خواص نظیر مقاومت فشاری، کششی، چگالی و تخلخل بتن سبک مورد بررسی قرار دادند. یافته‌ها حاکی از آن داشت که افزایش محتوای ریزدانه‌ها می‌تواند منجر به کاهش مقاومت‌های مکانیکی شود، ولی با کنترل دقیق نسبت آب به سیمان، امکان بهبود این خواص وجود دارد. بهرامی و قاسمی^{۱۸} [۱۸] خواص فیزیکی و مکانیکی بتن سبک حاوی لیکا را تحلیل کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که بتن لیکا با چگالی پایین‌تر و مقاومت فشاری قابل قبول، می‌تواند در کاهش بار مرده سازه و بهبود عملکرد حرارتی ساختمان‌ها مؤثر باشد. ووچک و گریبوسکا^۶ [۱۹] در مطالعه‌ای دیگر، عملکرد مکانیکی بتن ساخته‌شده با جایگزینی کامل سنگدانه‌های درشت با لیکا را بررسی کردند. نتایج نشان داد که افزودن میکروسیلیس به ترکیب بتن لیکا می‌تواند خواص مکانیکی آن، به‌ویژه مقاومت کششی، را به طور محسوسی افزایش دهد.

در این تحقیق، طبق نتایج آزمایش XRF^۷، درصد اکسید آهن در سرباره کارخانه فولاد اهواز ۴۳٪ است. این مقدار بسیار بالا است و با سرباره‌های معمول در دنیا متفاوت است. هدف اصلی این تحقیق بررسی تأثیرات این نوع سرباره بر خواص رئولوژی، مکانیکی و دوام بتن است. تا کنون، مقاله‌ای درباره ترکیب سرباره فولاد با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا وجود نداشته است. این پژوهش در ادامه تحقیق قبلی ساجدی و بهرامی‌نیا^{۲۰} [۲۰] و تحقیقات مشابه [۱۹-۱۵] در باره تأثیر سرباره بر خواص بتن سیمان - سرباره‌ای انجام شده است. براساس نتایج آن تحقیقات، استفاده از مصالح متخلخل طبیعی مانند سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا که آب را به خوبی جذب و حفظ می‌کنند، انتخاب شده است. هدف این انتخاب دستیابی به بتن با عمل‌آوری داخلی

مناسب است. در این تحقیق، ده طرح اختلاط با ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به‌صورت پودر شده به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی استفاده شد. هم‌چنین، ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا به‌صورت مجزا به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه (نخودی و بادامی) در ساخت بتن‌ها به کار رفتند. نمونه‌های ساخته‌شده از طرح‌ها در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه در دو محیط آب شرب و دمای آزمایشگاه عمل‌آوری شده و تحت آزمایش‌های لازم قرار گرفتند. این آزمایش‌ها شامل اسلامپ، وزن مخصوص، مقاومت فشاری، کشش غیر مستقیم، مقاومت الکتریکی، جذب آب حجمی و عمق نفوذ آب بودند. نتایج این آزمایش‌ها بررسی و تحلیل گردید.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مواد و مصالح مصرفی

۲-۱-۱- سیمان مصرفی

سیمان مورد استفاده در ایران معمولاً پرتلند نوع ۲ است. ویژگی اصلی آن، مقاومت در برابر سولفات‌ها و نمک‌هاست. زمان‌گیرش این سیمان مشابه سیمان معمولی (نوع ۱) است. چون بسیاری از کارخانه‌های سیمان در ایران این نوع را تولید می‌کنند، در این تحقیق از آن استفاده شده است. سیمان این تحقیق از کارخانه سیمان کارون تأمین شد. چگالی آن ۳/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و سطح ویژه (بلین) آن ۲۹۲۲ گرم بر سانتی‌متر است. این سیمان تحت شرایط مناسب دپو و نگهداری شد و الزامات استاندارد ۳۸۹ ایران [۲۱]، و ASTM C150 [۲۲] را دارد. ترکیبات شیمیایی این سیمان از آنالیز به‌دست آمده است. این آنالیز در آزمایشگاه متالوژی رازی انجام و نتایج آن در جدول ۱ آورده شده است.

۲-۱-۲- سرباره کارخانه فولاد اهواز

سرباره فولادی این تحقیق از کارخانه فولاد اهواز به‌عنوان سنگدانه تهیه شد. سپس، به روش گندله یا پلت به پودر تبدیل گردید. این پودر دارای توده ویژه وزن مخصوص ۲/۵۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است و در شرایط مطلوب نگهداری شد. ترکیبات شیمیایی این سرباره با استفاده از آزمایش طیف‌نگاری فلوئورسانس اشعه ایکس مشخص شد که در جدول ۱ نشان داده شده است. جدول ۲ مقایسه‌ای از انواع سرباره‌های فولادی رایج در دنیا و سرباره فولاد اهواز را ارائه می‌دهد. در این جدول، درصد اکسید آهن در سرباره کارخانه فولاد اهواز ۴۳٪ ذکر شده

4 Degfa & Tiku

5 Gencel et al.

6 Wójcik & Grzybowski

7 X-ray fluorescence

است. این مقدار بسیار بالا است و تفاوت قابل ملاحظه‌ای با سرباره‌های متداول دنیا دارد.

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

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

مشخصات	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
سیمان نوع ۲ کارون	۲۵/۵۳	۳/۷۶	۰/۰۸	۲/۷۲	۵۶/۸۷	۰/۱۳	۱/۲۷	۰/۳۴	۱/۲۷
سرباره کارخانه فولاد اهواز	۲۱/۱	۵/۷	۰/۴۸	۴۳/۰	۱۹/۵	۱/۳	۸/۳	-	۰/۱۷

جدول ۲- نتایج آزمایش XRF انجام شده روی سرباره فولاد در تحقیقات (%)

Table 2- Results of XRF testing performed on steel slag in research (%)

مرجع	کشور	Mno	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂
Collins & sanjayan(2001)	استرالیا	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۴	۰/۳۹	۰/۳۴	۶/۱۳	۳۹/۴۳	۰/۲۹	۱۳/۹۱	۳۵/۰۴
Shi(1992)	کانادا	---	۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۱۴/۶۰	۳۴/۷۰	۰/۶۰	۹/۹۰	۳۵/۳۰
Gjorv(1989)	فنلاند	۰/۸۵	۰/۹۰	۱/۱۰	---	---	۸/۰۰	۴۱/۰۰	۱/۳۰	۹/۰۰	۳۶/۰۰
Sato et al (1986)	ژاپن	۰/۴۲	۱/۶۵	۱/۰۰	۰/۳۸	۰/۲۶	۶/۸۰	۴۱/۸۰	۰/۳۰	۱۲/۹۰	۳۵/۴۰
Gjorv(1989)	نروژ	۱/۲۵	۲/۰۰	۰/۶۰	---	---	۷/۵۰	۳۶/۵۰	۲۰/۳۰	۱۳/۵۰	۳۵/۰۰
Byfors et al (1989)	سوئد	۰/۹۸	۰/۷۲	۱/۱۶	---	۰/۹۸	۱۰/۰۳	۳۹/۷۰	۱/۱۰	۹/۴۰	۳۵/۳۰
Hogan & Rose (1986)	امریکا	---	۰/۳۹	۱/۱۶	۰/۵۰	۰/۲۴	۱۰/۳۰	۴۲/۸۷	۱/۰۲	۷/۱۲	۳۴/۹۰
Osborne & Singh (1995)	اوکراین	۰/۲۵	۰/۷۷	۰/۴۸	۰/۴۰	۰/۲۶	۸/۲۱	۴۱/۶۰	۱/۱۷	۱۱/۳۰	۳۴/۲۰
متالورژی رازی	ایران (اهواز)	۰/۲۹	۱/۳	۰/۰۶	۰/۱۷	---	۸/۳	۱۹/۵	۴۳/۰	۵/۷	۲۰/۱

۱-۲-۴- لیکا

سنگدانه سازه‌ای لیکا استفاده شده در تحقیق به صورت یکجا از شرکت لیکا واقع در استان مرکزی، شهرستان زرندیه، با وزن مخصوص ۱/۱۲ گرم بر سانتی متر مکعب تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد، ترکیبات شیمیایی این سنگدانه که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس می‌باشد، در جدول ۳ نشان داده شده است. آزمایش دانه‌بندی، طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ [۲۳]، انجام شد و منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق سنگدانه اسکوریا به صورت نخودی و بادامی براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ استفاده شده است.

۱-۲-۳- اسکوریا

سنگدانه سازه‌ای اسکوریا استفاده شده در تحقیق به صورت یکجا از معدن قروه کردستان، با وزن مخصوص ۱/۵۴۲ گرم بر سانتی متر مکعب تهیه و در شرایط مطلوب دپو و نگهداری شد، ترکیبات شیمیایی این سنگدانه که حاصل آزمایش طیف‌نگاری فلورسانس اشعه ایکس می‌باشد، در جدول ۳ نشان داده شده است. آزمایش دانه‌بندی، طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ [۲۳]، انجام شد و منحنی دانه‌بندی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این تحقیق سنگدانه اسکوریا به صورت نخودی و بادامی براساس استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ استفاده شده است.

جدول ۳- نتایج آزمایش XRF انجام شده روی سنگدانه مصرفی در تحقیق (%)

Table 3- Results of XRF testing performed on aggregate used in the research (%)

مشخصات	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O
اسکوریا	۵۰/۷۸	۱۰/۵۹	۱/۵۴	۷/۸۸	۸/۵۱	۱/۸۲	۵/۱۶	۳/۵۹	۳/۱۷
لیکا	۶۶/۰۵	۱۶/۵۷	۰/۲۱	۷/۱۰	۲/۴۶	۰/۷۸	۱/۹۹	۰/۶۹	۲/۲۶

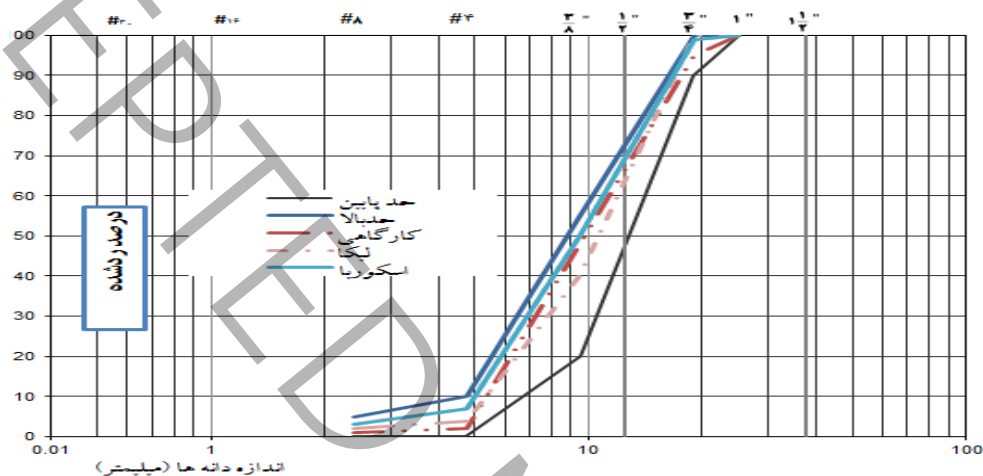
۱-۲-۵- سنگدانه های مصرفی

پرداخت سطح بتن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین، دانه‌بندی سنگدانه‌ها در تعیین نسبت مواد تشکیل‌دهنده مخلوط بتن اهمیت زیادی دارد [۲۴]. در این تحقیق، شن مصرفی نوع

دانه‌بندی سنگدانه‌ها نقش مهمی در کارایی بتن دارد. کارایی بر جاشدگی و آب انداختن بتن تأثیر دارد و نحوه بتن‌ریزی و

ظاهری نیز به ترتیب ۲/۶۱ و ۲/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب تعیین شد. همچنین، جذب آب آن‌ها ۰/۷۱ و ۰/۹۱ محاسبه گردید. شکل ۱ دانه‌بندی شن‌های استفاده شده در تحقیق را نشان می‌دهد. در شکل ۱ حد بالا و حد پایین به منظور محدوده استاندارد دانه بندی طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ می باشد.

شکسته طبق استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۴۰ از معادن شهرستان اندیمشک در استان خوزستان تهیه شد. حداکثر اندازه اسمی آن ۱۹/۵ و ۱۲/۵ میلی‌متر (شن نخودی) است. ویژگی‌های سنگدانه‌های بتن استاندارد ملی ایران به شماره ۳۰۲ [۲۵] انجام شد. وزن مخصوص اشباع با سطح خشک برای شن‌های بادامی ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و برای شن نخودی ۲/۶۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. وزن مخصوص

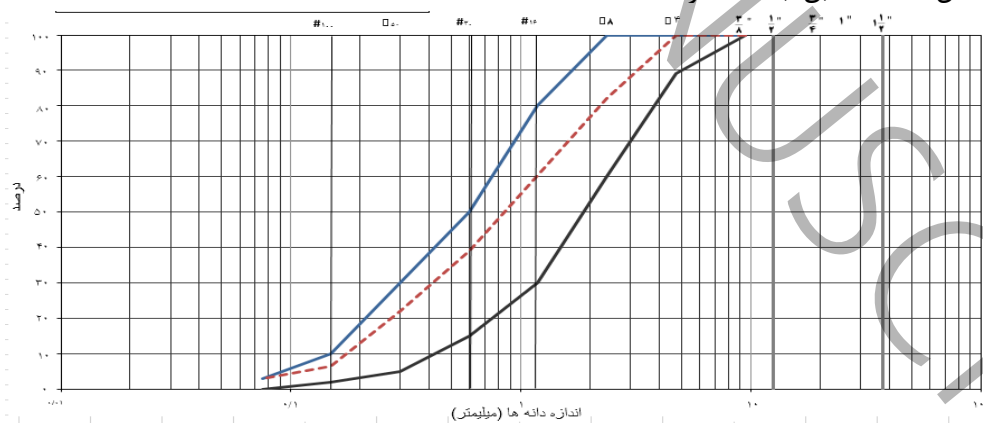


شکل ۱: منحنی دانه‌بندی مخلوط شن درشت‌دانه و ریزدانه مصرفی
Figure 1: Grading curve of the coarse and fine sand mixture used

C127 می‌باشد. این سنگدانه از محل تأمین ماسه مصرفی از معادن شهرستان شوشتر در استان خوزستان تهیه شد. در شکل ۲ دانه‌بندی ماسه استفاده‌شده در تحقیق ارائه شده است.

۲-۱-۶- ریزدانه‌های مصرفی (ماسه)

ریزدانه‌های مصرفی در این تحقیق ماسه شکسته و شسته شده با وزن مخصوص ۲/۶۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب، مطابق با استاندارد ASTM C128 [۲۶] بوده و میزان ضریب نرمی ۳/۲۱ و جذب آب آن ۱/۶ (مطابق با استاندارد ASTM



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی ماسه طبیعی تحقیق
Figure 2- Natural sand grading curve of the research

۲-۱-۷- فوق روان‌کننده

کاهش‌دهنده شدید آب برپایه پلی کربو کسيلات محصول

در این تحقیق فوق روان‌کننده با نام تجاری Flowcem R900 که یک فوق روان‌کننده اصلاح‌شده از نسل سوم و

شرکت دوروچم خاورمیانه^۸ تهیه گردید. مشخصات فنی این
فوق روان کننده در جدول ۴ ارائه شده است. ضمناً آب این فوق
روان کننده به عنوان بخشی از آب لحاظ شده است.

جدول ۴: مشخصات فنی فوق روان کننده مصرفی در تحقیق

Table 4: Technical specifications of the superplasticizer used in the research

ظاهر	وزن مخصوص (g.cm ³)	کلرید محلول در آب (m.g)	قلیائیت mEq/L	pH	یون کلر
قهوه‌ای	۱/۰۶	۰/۰۰۳۵	۰/۰۳۲	۳/۹۶	ندارد

۲-۱-۸- آب

محیط‌های آب عمل‌آوری شدند. مشخصات آب شرب در جدول ۵ ارائه شده است.

برای ساخت و عمل‌آوری طرح‌های اختلاط از آب شرب اهواز استفاده گردید. نمونه‌ها پس از ساخت و قالب‌گیری در

جدول ۵: مشخصات آب شرب اهواز مصرفی در تحقیق

Table 5: Chemical characteristics of Ahvaz drinking water used in the study

عنصر	CaCO ₃	SO ₄ ²⁻	Cr ⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
mg/lit	۳۶۰۰۰	۳۸۴	۴۱۶	۲۲	<۱	۸۰۰۰	۲۹۰۰
pH آب مصرفی ۷/۱۳ می‌باشد.							

۲-۲- طرح اختلاط‌های تحقیق

S، بیانگر سرباره است، ۴۰٪ میزان وزنی سرباره در طرح‌ها، Sc معرف سبکدانه اسکوریا و Le معرف سنگدانه لیکا هستند. عدد بعد از هر حرف نشان‌دهنده درصد استفاده از آن مصالح به‌عنوان جایگزین است. به عنوان مثال، S40Sc30 به این معنی است که بتن دارای ۴۰٪ سرباره و ۳۰٪ سنگدانه اسکوریا است. RC به معنی بتن مرجع است. جزئیات طرح‌های اختلاط نهایی تحقیق در جدول ۶ ارائه شده است.

در این تحقیق، یازده طرح اختلاط بر اساس آیین‌نامه بتن ایران (آبا) بررسی شدند [۲۷]. سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا در نسبت‌های ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ به‌عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی استفاده شده‌اند. همچنین، ۴۰٪ سرباره فولاد اهواز به‌عنوان جایگزین سیمان به کار رفته است. روش نام‌گذاری طرح‌های اختلاط به این صورت است:

جدول ۶: جزئیات طرح اختلاط‌های تحقیق (kg/m³)

Table 6: Details of the research mixture design (kg/m³)

ردیف	نام طرح	کد طرح	وزن مصالح					نسبت آب به سیمان
			شن بادی	شن نخودی	ماسه	لیکا	اسکوریا	آب (Lit) / فوق روان کننده (Lit)
۱	بتن مرجع	RC	۳۳/۲	۳۸/۳	۹۴/۸	۰	۰	۱۱/۶۲
۲	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۳۰٪ اسکوریا	S40Sc30	۲۳/۷	۲۷/۹۱	۹۴/۸	۰	۱۹/۸۹	۱۸/۲
۳	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۴۰٪ اسکوریا	S40Sc40	۱۹/۳	۲۳/۶	۹۴/۸	۰	۲۸/۶	۱۸/۲
۴	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۵۰٪ اسکوریا	S40Sc50	۱۶/۱	۱۹/۷	۹۴/۸	۰	۳۵/۷	۱۸/۲
۵	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۶۰٪ اسکوریا	S40Sc60	۱۲/۸	۱۵/۸	۹۴/۸	۰	۴۲/۹	۱۸/۴
۶	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۷۰٪ اسکوریا	S40Sc70	۹/۶۵	۱۱/۸	۹۴/۸	۰	۵۰/۰۵	۱۸/۴

									۷۰٪ اسکوریا	
۰/۴۱	۰/۳۲	۱۸/۲	۰	۲۱/۸	۹۴/۸	۲۹/۲	۲۸	S40Le30	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۳۰٪ لیکا	۷
۰/۴۱	۰/۳۵	۱۸/۲	۰	۲۹	۹۴/۸	۲۵/۱	۲۴	S40Le40	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۴۰٪ لیکا	۸
۰/۴۱	۰/۳۵	۱۸/۲	۰	۳۶/۳	۹۴/۸	۲۰/۹	۲۰	S40Le50	بتن با ۴۰ درصد سرباره و ۵۰ درصد لیکا	۹
۰/۴۲	۰/۳۹	۱۸/۴	۰	۴۳/۶	۹۴/۸	۱۶/۷	۱۶	S40Le60	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۶۰٪ لیکا	۱۰
۰/۴۲	۰/۳۹	۱۸/۴	۰	۵۰/۸	۹۴/۸	۱۲/۵	۱۲	S40Le70	بتن با ۴۰٪ سرباره و ۷۰٪ لیکا	۱۱
*سرباره فولاد استفاده شده در این طرح اختلاط ۱۷/۶ kg/m ³ است؛ *سیمان استفاده شده در این طرح اختلاط ۲۶/۴ kg/m ³ است.										

۲-۱- آماده سازی نمونه‌ها

تمام موارد ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی در آزمایشگاه طبق استاندارد ASTM C192 [۲۸] انجام گردید. قبل از ریختن مصالح به مخلوط‌کن، جداره آن کمی مرطوب شد تا رطوبت سنگدانه‌ها تغییر نکند. برای آماده‌سازی مخلوط، ابتدا ماسه به همراه سیمان و سرباره در مخلوط‌کن ریخته شد و به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. سپس نصف آب و فوق روان‌کننده اضافه شد. آب باقیمانده به آرامی افزوده و سپس به مدت ۶ دقیقه دیگر اختلاط ادامه یافت. پس از آماده شدن مخلوط‌ها، نمونه‌گیری از بتن طبق استاندارد ASTM C172 [۲۹] انجام شد. در این راستا ابتدا سطوح داخلی قالب‌ها (مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ و استوانه‌ای ۳۰×۱۵ سانتی‌متری) به‌وسیله روغن مخصوص به‌اندازه کافی چرب شدند تا پس از سخت شدن بتن، نمونه‌ها به راحتی از قالب جدا گردند. سپس بتن در قالب‌های مکعبی و استوانه‌ای در سه لایه ریخته شد و هر لایه توسط کوبش مخصوص به تعداد ۲۵ ضربه کوبیده شد و پس از کوبش

هر لایه، سطح نمونه‌ها با استفاده از خط‌کش صاف و سپس در زیر یک پوشش مرطوب در شرایط ۹۰٪ رطوبت، به مدت ۲±۲۴ ساعت قرار داده شدند و پس از ۲۴ ساعت نمونه‌ها از قالب خارج و تا زمان آزمایش به حوضچه عمل‌آوری با دمای ثابت حدود ۲۳ درجه سانتی‌گراد منتقل گردیدند. برای یکسان‌سازی شرایط عمل‌آوری، نمونه‌ها در کوتاه‌ترین بازه زمانی ممکن ساخته شدند. در خصوص عمل‌آوری نمونه‌ها شرایط استاندارد ASTM C511 [۳۰] رعایت شد. در شکل ۳ مصالح متخلخل شامل سنگدانه‌های لیکا و اسکوریا و سرباره پودر شده فولاد و همچنین در شکل ۴ عمل‌آوری نمونه‌های تحقیق در حوضچه آب شرب و دمای آزمایشگاهی نشان داده می‌شود. عمل‌آوری نمونه در دمای آزمایشگاهی به این منظور است که نمونه بعد از ساخت در دمای ثابت ۲۳ درجه سانتی‌گراد بدون هیچ ارتباطی با آب نگهداری شده است. در این تحقیق سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا جایگزین بخشی از سنگدانه‌های طبیعی (نخودی و بادامی) در محدوده وزنی ٪ (۷۰~۳۰) شده است.



(ج) سرباره پودر شده

(ب) اسکوریا

(الف) لیکا

شکل ۳- مصالح متخلخل

Figure 3 - Porous materials



الف: عمل آوری در دمای آزمایشگاهی ب: عمل آوری با آب شرب

شکل ۴: عمل آوری نمونه‌ها

Figure 4: Sample curing

۲-۲-۲- معرفی آزمایش

برای سنجش روانی بتن‌های تازه از آزمایش اسلامپ بر اساس استاندارد ASTM C143 [۳۱] استفاده شد. این آزمایش برای اندازه‌گیری مخلوط در حالت تازه به کار می‌رود. پس از آماده شدن مخلوط‌های بتنی، اقدام به نمونه‌گیری از آن‌ها مطابق استاندارد ASTM C172 برای تعیین وزن مخصوص بتن تازه براساس استاندارد ۳۲۰۳-۶ "موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران (سازمان ملی استاندارد ایران)" منطبق بر استاندارد ASTM C138 [۳۲] استفاده شده است. جهت آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های مکعبی استاندارد پس از عمل آوری با آب شرب، به مدت ۲۸ و ۹۱ روزه مطابق استاندارد ASTM C511، از حوضچه خارج شدند و آزمایش تعیین مقاومت فشاری، با جک هیدرولیکی بتن‌شکن، با سرعت بارگذاری ۱۳۵۰ کیلوگرم بر ثانیه، براساس استاندارد BS1888 [۳۳] بر روی نمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک انجام پذیرفت، هر طرح میانگین اختلاط در هر سن دارای نمونه

$$T = (2p) / \pi LD \quad (۱)$$

(در رابطه (۱)، T: بیانگر مقاومت کششی به روش دونیم‌شدن برحسب کیلوگرم بر سانتیمترمربع، P: حداکثر بار اعمال شده برحسب کیلوگرم، L: طول نمونه برحسب سانتی‌متر و D: قطر نمونه برحسب سانتی‌متر می‌باشند).

آزمایش مقاومت الکتریکی بر روی (نمونه‌های مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵) انجام می‌گیرد؛ ابتدا سطوح بالا و پایین نمونه مکعبی، آغشته به یک‌لایه نازک از خمیر سیمان غلیظ می‌گردند، سپس نمونه را میان الکترود مسی دستگاه قرار داده و در خاتمه پس از گذشت ۱۰ ثانیه زمان، عدد مقاومت کل (R) از دستگاه قرائت می‌شود. حال با توجه به مشخص بودن

(مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری) می‌باشد، نتایج نهایی میانگین 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 شد. آزمایش مقاومت کششی دونیم شدن از نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد ۳۰×۱۵ سانتی‌متری پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب، مطابق استاندارد ASTM C511 از حوضچه خارج شدند و آزمایش مقاومت کششی دونیم‌شدن، با استفاده از جک هیدرولیکی بتن‌شکن، با سرعت بارگذاری ۰/۹۴ کیلونیوتن بر ثانیه، بر اساس استاندارد ASTM C496 [۳۴] بر روی نمونه‌ها در حالت اشباع با سطح خشک انجام پذیرفت. در محاسبه مقاومت کششی دونیم‌شدن از هر طرح ۳ نمونه تهیه شد و سپس از شکست آن‌ها میانگین مقاومت نمونه‌ها برای مقدار P موجود در رابطه (۱) استفاده شد.

طول نمونه میان دو الکترود که قابل‌اندازه‌گیری است و نیز مساحت میانگین سطوح نمونه که بر روی الکترودها قرار گرفته (A)، از رابطه (۲) مقاومت الکتریکی ویژه (یا به اختصار مقاومت الکتریکی) ملات تعیین می‌شود.

$$\rho = (R \times A) / L \quad (۲)$$

(در رابطه (۲)، ρ : مقاومت الکتریکی برحسب اهم بر متر، R: مقاومت کل قرائت شده از دستگاه برحسب اهم، A: مساحت نمونه مرتبط با الکترودهای مسی برحسب مترمربع، L: طول نمونه میان دو الکترود برحسب متر [۳۵].

در این پژوهش آزمایش جذب آب حجمی از استاندارد BS1881 استفاده شده است که نمونه‌های مغزه‌گیری شده با

۳- تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۳-۱- اسلامپ

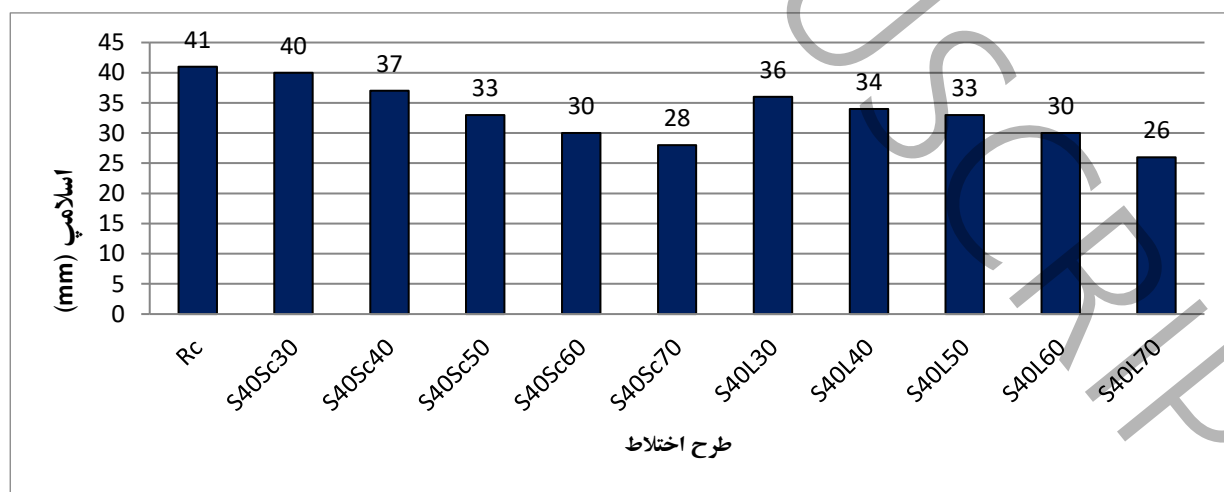
آزمایش اسلامپ، کارایی بتن را اندازه‌گیری نمی‌کند، اما می‌تواند روانی بتن را توصیف کند. این آزمایش برای بررسی تغییرات یکنواختی مخلوط بتن با نسبت‌های مشخص بسیار مفید است. در شکل ۵، تاثیر بالای جذب آب سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا دیده می‌شود. این امر باعث افزایش روانی یا اسلامپ بتن شده است. نکته قابل توجه، تاثیر ۴۰٪ سرباره فولاد است که بخشی از سیمان را با ترکیب سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا جایگزین می‌کند. وجود سرباره فولاد باعث افت ناگهانی نشده است، حتی با اینکه ۷۰٪ سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا جایگزین سنگدانه طبیعی شده‌اند. اما کاهش زیادی نسبت به نمونه مرجع مشاهده نمی‌شود. در بررسی نتایج، نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ افزودن سنگدانه اسکوریا با ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب ۱۰٪ و ۵٪ کاهش اسلامپ نسبت به طرح مرجع نشان می‌دهند. همچنین، ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا با ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به ترتیب ۲۵٪ و ۱۵٪ کاهش اسلامپ دارند. طرح ۷۰٪ سبکدانه اسکوریا با ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز، بیشترین اسلامپ را به میزان ۴۱٫۶٪ نسبت به طرح مرجع نشان می‌دهد. همچنین، سنگدانه‌های اسکوریا در بتن روانی بیشتری نسبت به سنگدانه‌های لیکا دارند. با افزایش درصد سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا به جای سنگدانه‌های طبیعی، میزان اسلامپ افزایش یافته است.

قطر ۷/۵ و ارتفاع ۷/۵ سانتی متر پس از قرارگیری در کوره به مدت ۷۲ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد آب نمونه‌ها در این مدت زمان تعیین می‌شود. همچنین در استاندارد ASTM C642 [۳۶] 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. نمونه‌ها پس از حرارت و خنک‌سازی، به مدت ۳۰ دقیقه در داخل آب قرار داده شدند. پس از این مدت، نمونه‌ها از آب خارج و سطح خارجی آنها با حوله بدون پرز خشک و توزین شدند. (W2) در خاتمه درصد جذب آب (WA) هر نمونه مطابق رابطه (۳) تعیین شد.

$$W_A = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (3)$$

(در رابطه (۳)، W1 و W2 برحسب گرم می‌باشند).

آزمایش 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 دست‌یافت. در روش مذکور براساس استاندارد DIN1048 [۳۷] نمونه مکعبی ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی‌متری تحت فشار ثابت ۷ اتمسفر قرار می‌گیرند. طبق استاندارد سطحی از نمونه که با فشار بر آن اثر می‌کند، با پرس سیمی کمی زبر می‌شود. پس از گذشت ۷۲ ساعت، نمونه‌ها به دونیم تقسیم‌شده و مقدار نفوذ آب با کولیس اندازه‌گیری می‌شود.



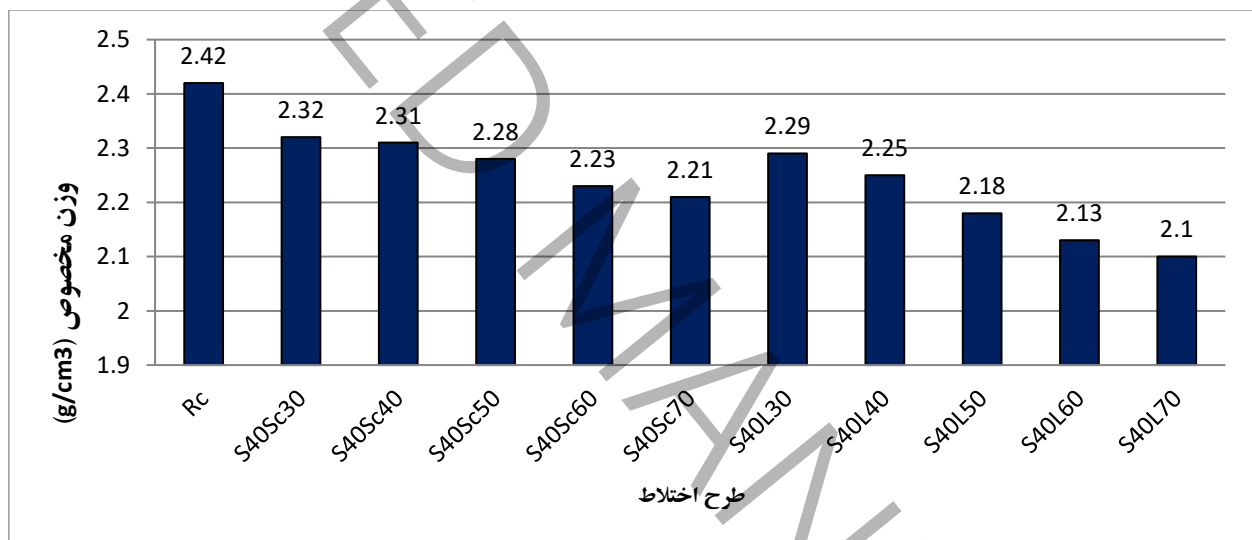
شکل ۵: اسلامپ طرح اختلاط‌ها در تحقیق

Figure 5: Slump of the mixing design in the research

۳-۲- وزن مخصوص بتن تازه

وزن مخصوص بیشتر سنگدانه‌های بتن معمولی بین ۲۴۰۰ تا ۲۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب است. بنابراین، چگالی بتن ساخته‌شده با سنگدانه‌های طبیعی معمولی بین ۲۲۰۰ تا ۲۶۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب قرار دارد. این بدان معناست که وزن مرده قطعات بتنی معمولاً زیاد است و بخش بزرگی از بار سازه را تشکیل می‌دهد. نتایج وزن مخصوص بتن تازه طرح‌های اختلاط، همان‌طور که در شکل ۶ آمده، نشان می‌دهد که وزن مخصوص بتن مرجع بیشترین مقدار را دارد. با توجه به اینکه ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در نمونه‌ها به کار رفته، تأثیر سرباره فولاد باعث نزدیکی وزن نمونه‌ها به نمونه مرجع می‌شود. در این حالت، بتن با وزن کمتر از ۲۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب

مشاهده نمی‌شود. در بررسی نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و ۳۰٪ سنگدانه لیکا، بیشترین وزن مخصوص به ترتیب ۲/۳۲، ۲/۳۱ و ۲/۲۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. در مقابل، نمونه‌های حاوی ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب کمترین وزن مخصوص را با ۲/۱۳ و ۲/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب دارند. به‌طور کلی، افزایش درصد سنگدانه‌های سبک، به‌ویژه لیکا با تخلخل بالاتر نسبت به اسکوریا، موجب افت قابل توجه روانی بتن تازه می‌شود. این موضوع در مقالات متعددی همچون [۱۵] نیز تأیید شده است، که اشاره دارند به اینکه جذب بالای آب و بافت سطحی زبر این نوع مصالح، منجر به افت جریان‌پذیری مخلوط بتن می‌شود.



شکل ۶: وزن مخصوص طرح‌های اختلاط در تحقیق

Figure 6: Specific gravity of mixing designs in the study

۳-۳-۱- مقاومت فشاری عمل‌آوری شده در آب شرب

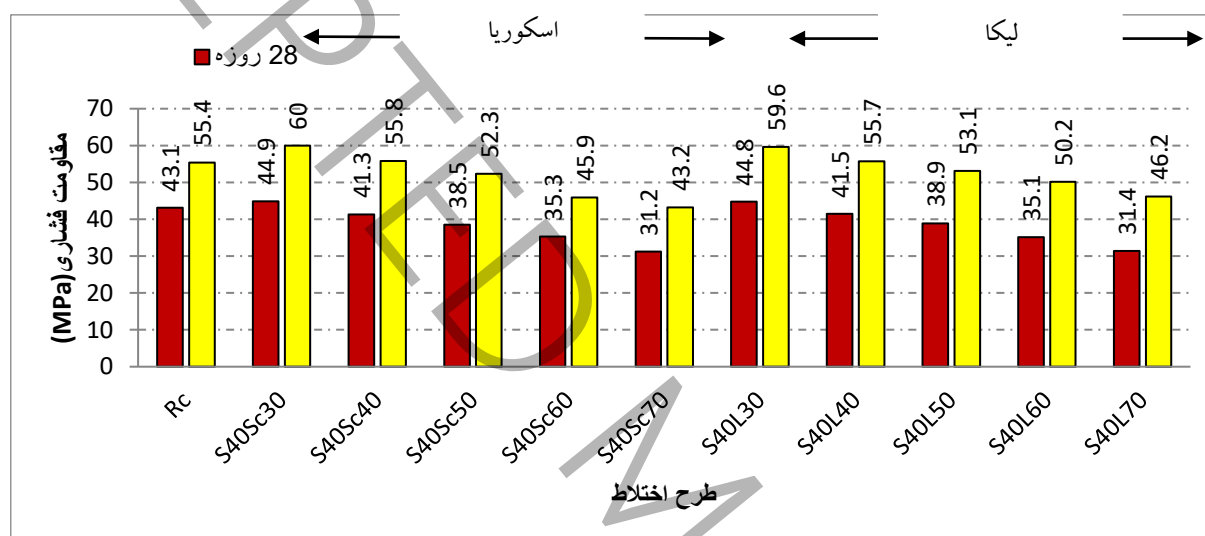
در شکل ۷، نتایج مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه با آب شرب نشان داده شده است. تأثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا به عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی در روزهای اولیه گیرش، در مقایسه با بتن مرجع پایین است. اما با گذشت زمان، مقاومت نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک می‌شود. نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه مرجع دارند. همچنین، نمونه‌های حاوی سنگدانه اسکوریا در محیط عمل‌آوری در حوضچه آب شرب، مقاومت نسبی

۳-۳-۲- آزمایش مقاومت فشاری

افزایش بیشتر مقاومت فشاری با رعایت نکات اقتصادی و حفظ وزن مخصوص بتن خشک در محدوده بتن‌های سبک عملاً مقدور نیست. افزایش مقاومت فشاری به نمونه‌های حاوی اسکوریا و لیکا در این تحقیق نسبت به تحقیقات گذشته در ایران به دلیل تفاوت نوع عمل‌آوری در دو محیط مختلف استفاده از پوزولان طبیعی سرباره فولاد اهواز به عنوان جایگزین مناسب برای سیمان همچنین اثر بخشی نوع طرح اختلاط مناسب جهت ساخت نمونه‌های بتنی می‌باشد. نتایج مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه می‌باشد.

بهتری نسبت به نمونه‌های سنگدانه لیکا نشان می‌دهند. در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روزه، به ترتیب ۵۵/۸ و ۵۵/۴ دست آمده است. این در حالی است که نمونه مرجع ۵۵/۴ مگاپاسکال می‌باشد. مقاومت فشاری نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا، با کاهش کمی نسبت به نمونه‌های اسکوریا به ترتیب ۵۹/۶ و ۵۵/۷ مگاپاسکال است. همچنین، مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۴۵/۹، ۴۳/۲ و ۴۳/۳ مگاپاسکال به دست آمده است. این در حالی است که نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۵۳/۱، ۵۰/۲ و ۴۶/۲ مگاپاسکال هستند. یکی از دلایل تاثیر دیر هنگام سرباره، می‌تواند میزان بالای آهن موجود در نمونه سرباره فولاد باشد. طبق جدول ۱، مقدار آهن بیش از ۴۳٪ دی‌اکسید سیلیکون به میزان ۲۱٪ است که باعث کندی بهبود خواص مکانیکی می‌شود.

در سن ۹۱ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روزه، به ترتیب ۵۵/۸ و ۵۵/۴ دست آمده است. این در حالی است که نمونه مرجع ۵۵/۴ مگاپاسکال می‌باشد. مقاومت فشاری نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا، با کاهش کمی نسبت به نمونه‌های اسکوریا به ترتیب ۵۹/۶ و ۵۵/۷ مگاپاسکال است. همچنین، مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۴۵/۹، ۴۳/۲ و ۴۳/۳ مگاپاسکال به دست آمده است. این در حالی است که نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۵۳/۱، ۵۰/۲ و ۴۶/۲ مگاپاسکال هستند. یکی از دلایل تاثیر دیر هنگام سرباره، می‌تواند میزان بالای آهن موجود در نمونه سرباره فولاد باشد. طبق جدول ۱، مقدار آهن بیش از ۴۳٪ دی‌اکسید سیلیکون به میزان ۲۱٪ است که باعث کندی بهبود خواص مکانیکی می‌شود.



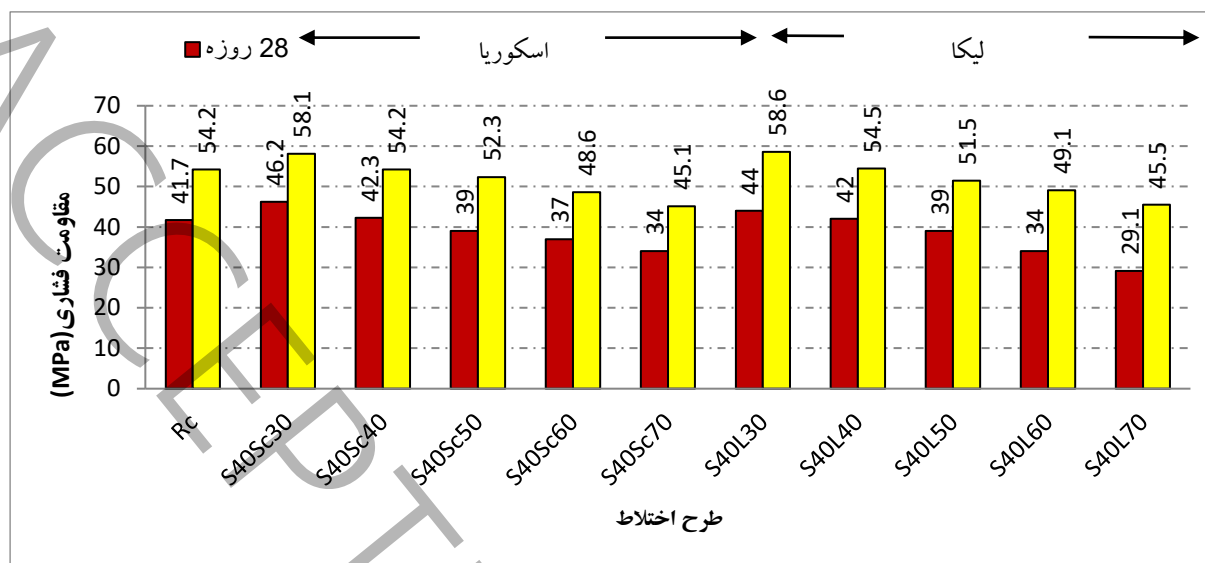
شکل ۷: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها عمل‌آوری شده با آب شرب

Figure 7: Compressive strength results of samples cured with drinking water

در سن ۹۱ روزه، مقاومت فشاری نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۵۴/۲ و ۵۸/۱ مگاپاسکال به دست آمد. در حالی که مقاومت فشاری نمونه مرجع ۵۴/۱ مگاپاسکال بود. نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا نیز با اندکی افزایش، ۵۸/۴ و ۵۴/۵ مگاپاسکال ثبت شدند. مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۵۲/۳، ۴۸/۶ و ۴۵/۱ مگاپاسکال است. در مقابل، مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۵۱/۱، ۴۹/۱ و ۴۵/۵ مگاپاسکال به دست آمد.

۳-۲- مقاومت فشاری در دمای آزمایشگاهی

شکل ۸ نتایج مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه در شرایط دمای آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تاثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا به عنوان جایگزین سنگدانه طبیعی در روزهای اولیه گیرش، در مقایسه با بتن مرجع، کم بود. اما با گذشت زمان، مقاومت نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک شد. نسبت نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ حاوی سنگدانه اسکوریا و لیکا از نمونه مرجع بیشتر بود. همچنین در بررسی نتایج، نمونه‌های حاوی سنگدانه لیکا که در دمای آزمایشگاهی عمل‌آوری شدند، نسبت به نمونه‌های با سنگدانه اسکوریا، مقاومت نسبی بهتری داشتند.



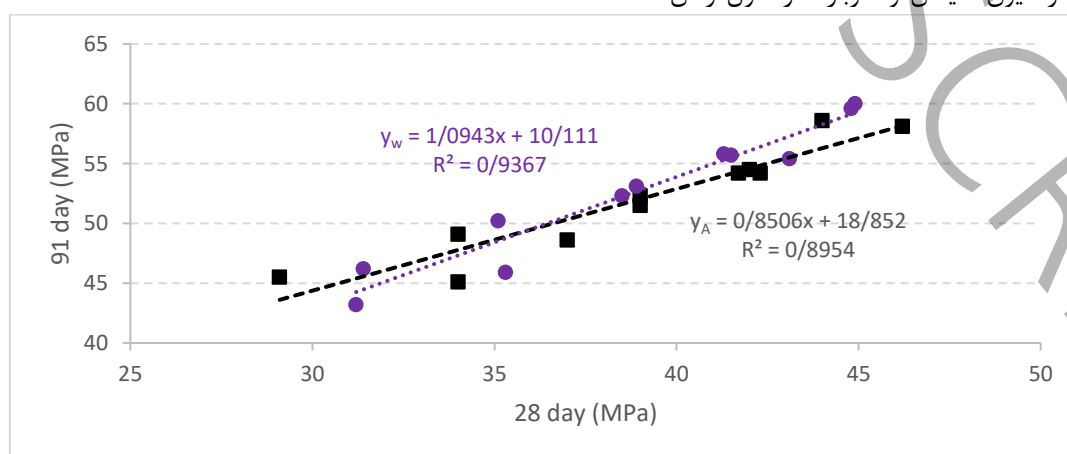
شکل ۸: نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها عمل‌آوری شده دمای آزمایشگاهی

Figure 8: Compressive strength results of laboratory temperature cured samples

۳-۳-۳- تحلیل نتایج مقاومت فشاری

قابل پیش‌بینی بود که استفاده از سرباره کارخانه فولاد اهواز به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان و استفاده از اسکوریا و لیکا به‌عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌ها، خواص مکانیکی را کاهش دهد. نکته‌ای که برای همه نمونه‌ها وجود دارد، این است که تاثیر عمده سرباره در سنین بالا خود را نشان می‌دهد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در سن ۹۱ روزه نسبت به نمونه مرجع، افزایش مقاومت را به همراه دارد. هرچند مقدار افزایش ۶٪ ناچیز به نظر می‌رسد، اما نشان‌دهنده اثر مثبت سرباره فولاد با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا بر مقاومت فشاری تا سن ۹۱ روز است. دلیل احتمالی این افزایش کم، پیشرفت بیشتر واکنش‌های هیدراسیون سیمان و سرباره در طول زمان است.

یکی از دلایل تاثیر دیر هنگام سرباره، میزان اکسید آهن بالای موجود در آن است که بیش از ۴۳٪ می‌باشد. در شکل ۹، نتایج مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه فقط برای نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب و دمای آزمایشگاه نشان داده شده است. تاثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا با ۴۰٪ سرباره فولاد اهواز در روزهای اولیه گیرش، نسبت به بتن مرجع پایین‌تر بوده است. اما با گذشت زمان، مقاومت نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک شده و نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ حاوی سنگدانه اسکوریا و لیکا، مقاومت بیشتری نسبت به نمونه مرجع نشان داده‌اند. نتایج این تحقیق می‌تواند با تحقیق مومنی و قویدل [۳۸] مقایسه شود که نشان داد، نمونه‌های حاوی سنگدانه لیکا، عملکرد بهتری در آزمون‌های مکانیکی دارند.



شکل ۹: رابطه بین مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا

Figure 9: Relationship between compressive strength at 28 and 91 days of slag cement concretes with scoria and Leca aggregates

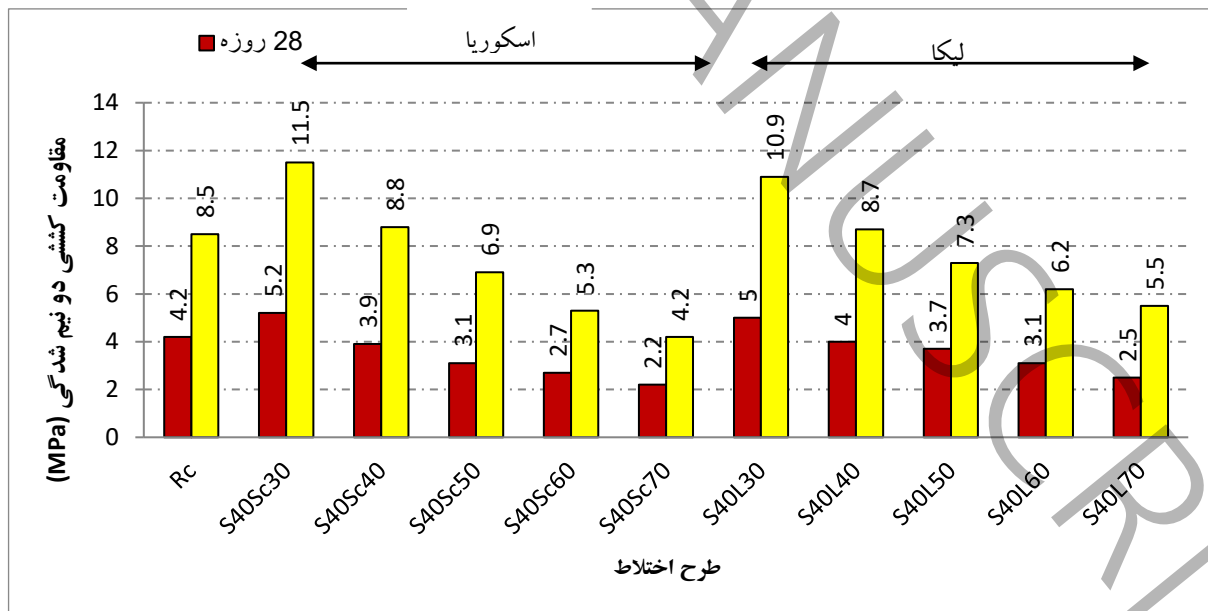
۳-۴-۱- مقاومت کششی دونیم‌شدن عمل‌آوری شده آب شرب

در شکل ۱۰، نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن آب شرب در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه نمایش داده شده است. سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا تأثیر کمتری بر مقاومت کششی در روزهای اولیه دارند. اما با گذشت زمان، مقاومت کششی این نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک می‌شود. نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا حتی از نمونه مرجع نیز بالاتر می‌روند. همچنین، نمونه‌های با سنگدانه اسکوریا نسبت به نمونه‌های سنگدانه لیکا مقاومت کششی بهتری دارند. در سن ۹۱ روزه، مقاومت کششی نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ اسکوریا به ترتیب ۱۱/۵ و ۸/۸ مگاپاسکال دارد. در مقابل، نمونه مرجع ۸/۸ مگاپاسکال دارد. نکته دیگر این است که نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا، با کاهش جزئی، ۱۰/۹ و ۸/۷ مگاپاسکال را نشان می‌دهند. همچنین، مقاومت کششی نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۶/۹، ۵/۳ و ۴/۲ مگاپاسکال است. در حالی که برای سنگدانه لیکا، این مقادیر به ترتیب ۷/۳، ۶/۲ و ۵/۵ مگاپاسکال به دست آمده است.

با توجه به رابطه واقع در شکل ۹ دامنه تغییرات خطای موجود مقاومت فشاری عمل‌آوری شده با آب شرب در سن ۹۱ روزه برحسب سن ۲۸ روزه در محدوده ۶/۶۱۶٪ تا ۶/۱۸۶٪ اشاره دارد که در مقایسه با محیط آزمایشگاهی محدوده آن ۴/۱۶۶ تا ۵/۱۲۵ می‌باشد. مشهود است که می‌توان با دقت قابل‌قبول، مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه برحسب ۲۸ روزه را پیش‌بینی نمود. از نتایج بالا چنین استنباط می‌گردد که یک رابطه خطی بین ضریب تعیین عمل‌آوری شده با آب شرب ۰/۹۳۶۷ و ضریب تعیین در محیط دمای آزمایشگاهی ۰/۸۹۵۴ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه برقرار می‌باشد.

۳-۴-۲- مقاومت کششی دونیم‌شدن

این آزمایش به منظور تعیین مقاومت کششی تک محوری غیرمستقیم یک نمونه سنگ می‌باشد که تحت عنوان تست برزیلی معروف است. در واقع یک تنش کششی بر سنگ اعمال شده و تنش دیگری که مقدار آن حداکثر سه برابر تنش اصلی کششی، به صورت فشاری اعمال می‌گردد. در این صورت در تنش کششی تک محوری شکست کششی حاصل می‌شود.



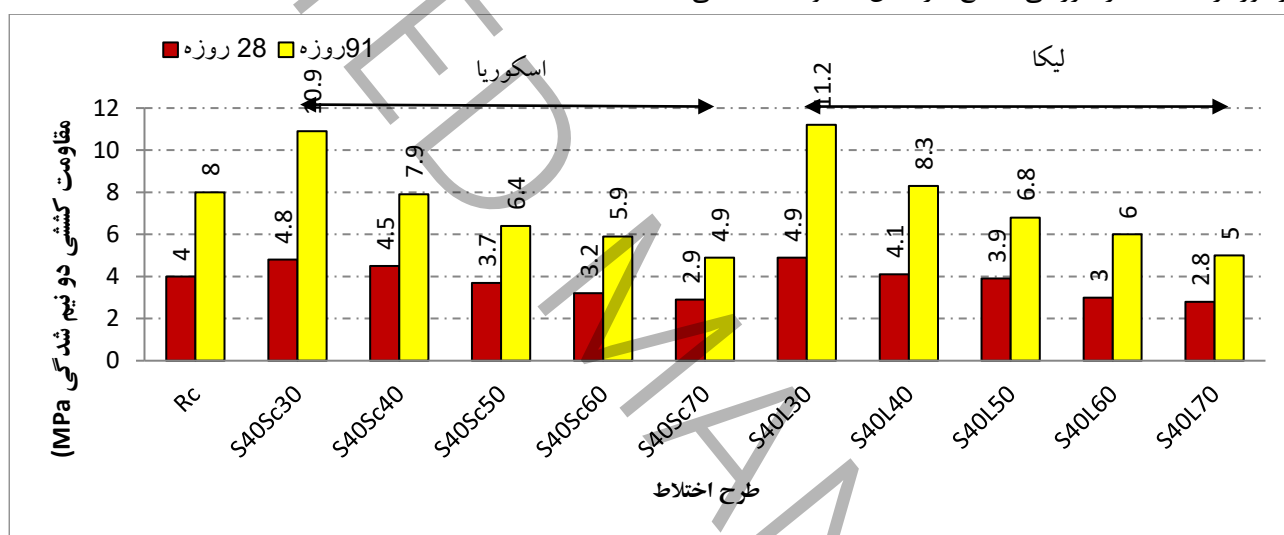
شکل ۱۰: نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدگی نمونه‌ها عمل‌آوری شده در حوضچه آب شرب

Figure 10: Results of the halving tensile strength of samples cured in a drinking water pond

۳-۴-۲- مقاومت کششی دونیم‌شدن در دمای آزمایشگاهی

شکل ۱۱ نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه در شرایط دمای آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تاثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا جایگزین سنگدانه طبیعی در مقاومت کششی دونیم‌شدن در روزهای اولیه گیرش در مقایسه با بتن مرجع در حد پایین قرار داشته ولی با گذشت زمان مقاومت نمونه‌ها به بتن مرجع نزدیک و نسبت نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ حاوی سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا بیشتر از نمونه مرجع شده است. همچنین در بررسی نتایج تحقیق برخلاف عمل‌آوری در محیط آب شرب نمونه‌های حاوی سنگدانه لیکا نسبت به نمونه‌های سنگدانه اسکوریا از مقاومت نسبی بهتری برخوردار است. در بررسی نتایج آزمایش مقاومت کششی

دونیم‌شدن نمونه‌های ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روزه ۱۰/۹ و ۷/۹۵ مگاپاسکال بدست آمده است درحالی‌که مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه مرجع ۸ مگاپاسکال می‌باشد، اما مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا با اندکی افزایش نسبت به نمونه‌های دارای سنگدانه اسکوریا، ۱۱/۳ و ۸/۳ مگاپاسکال بدست آمده است. مقاومت فشاری نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا جایگزین سنگدانه طبیعی به ترتیب ۶/۴، ۵/۹ و ۴/۹ مگاپاسکال می‌باشد در حالی‌که مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌های ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا جایگزین سنگدانه طبیعی به ترتیب ۶/۸، ۶ و ۵ مگاپاسکال بدست آمده است.



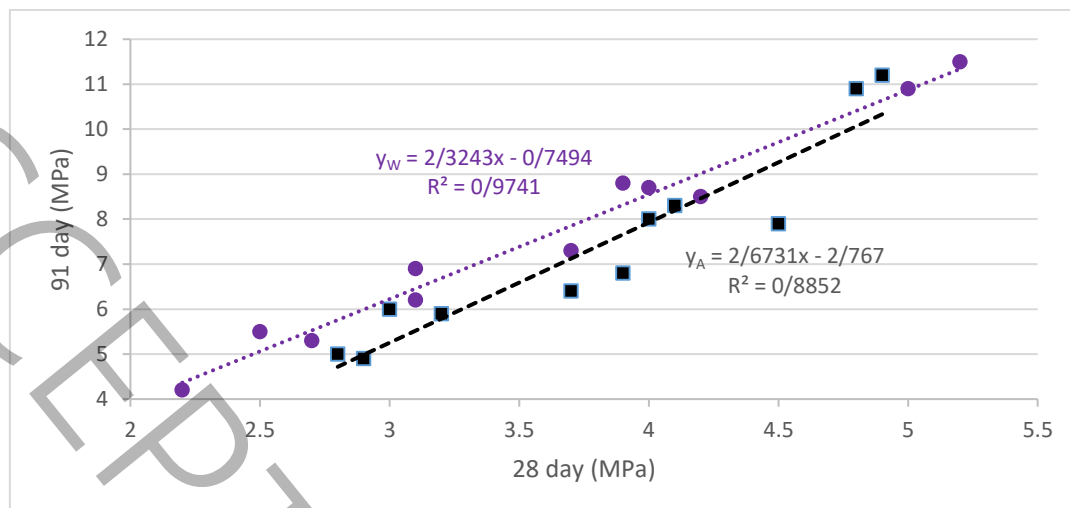
شکل ۱۱: نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی

Figure 11: Results of the split tensile strength of samples cured at laboratory temperature

۳-۳-۳- تحلیل نتایج مقاومت کششی دونیم‌شدن

وجود سرباره به‌عنوان جایگزین سیمان و سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا در سنین پایین، باعث کاهش خواص مکانیکی می‌شود. در بررسی نمونه‌ها، مشخص است که ترکیب ۴۰٪ سرباره فولادی و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در سن ۹۱ روزه، نسبت به نمونه مرجع، افزایش مقاومت خمشی دارد. این افزایش ممکن است به پیشرفت واکنش‌های هیدراسیون بین سیمان و سرباره در طول زمان مربوط باشد. نتایج نشان داد که با افزایش جایگزینی سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا با سنگدانه طبیعی حاوی ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز، مقاومت کششی دو نیم‌شدن نمونه‌ها در سنین پایین نسبت به نمونه مرجع کاهش یافت. اما

با گذشت ۹۱ روزه، این مقاومت نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته است. تاثیر جایگزینی سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا با سنگدانه طبیعی حاوی ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز، در سن ۹۱ روزه، به میزان ۳۰٪ و ۴۰٪ افزایش مقاومت کششی دونیم‌شدن همراه است. علت این امر پیشرفت بیشتر واکنش‌های هیدراسیون سیمان و سرباره در طول زمان است. نتایج این پژوهش را می‌توان با تحقیق خانزاده و همکاران [۳۹] مقایسه کرد. مقاومت کششی غیرمستقیم بتن‌های سبکدانه پرعیار حاوی لیکا، در واقع به طور متوسط حدود ۱۱٪ مقاومت فشاری استوانه‌ای با ۳۱ مگاپاسکال بود.



شکل ۱۲: رابطه بین مقاومت‌های کششی دونیم‌شدن در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای با سنگدانه اسکوریا و لیکا
Figure 12: Relationship between the split tensile strengths at 28 and 91 days of slag cement concretes with scoria and Leca aggregates

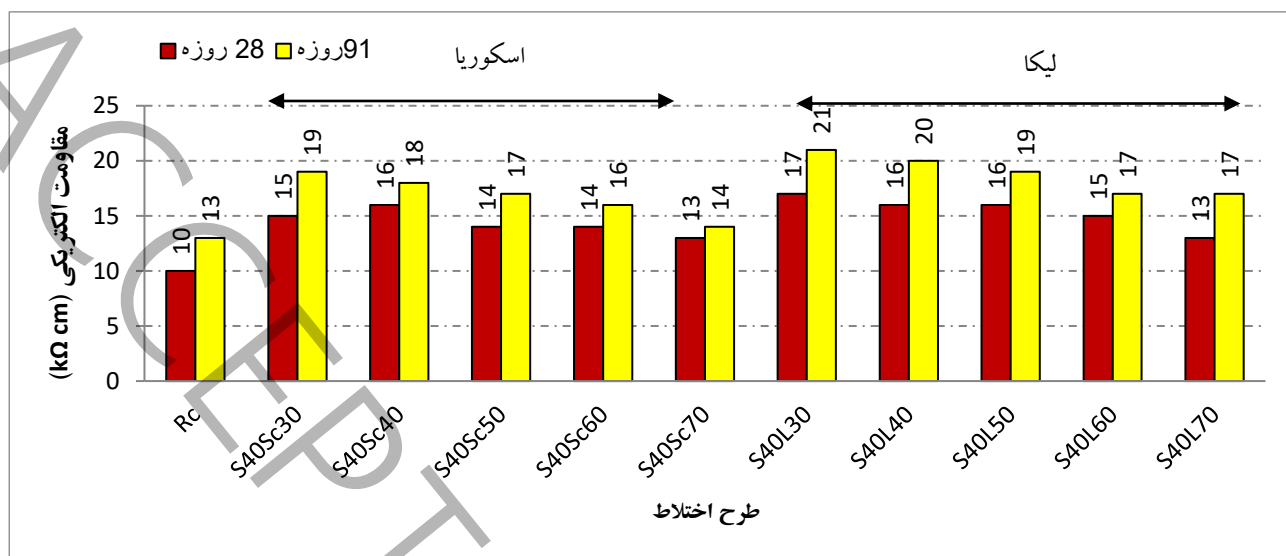
۳-۵-۱- مقاومت الکتریکی عمل‌آوری شده آب شرب

نتایج مقاومت الکتریکی در شکل ۱۳ نشان می‌دهد که ۴۰٪ سرباره آهنگدازی با سنگدانه اسکوریا عمل‌آوری شده با آب شرب، باعث کاهش مقاومت الکتریکی نسبت به سبکدانه لیکا شده است. سرباره به عنوان یک پوزولان در ماتریس بتن عمل می‌کند و با مصرف کریستال‌های کلسیم - هیدروکسید، غلظت یون‌های OH در محلول منفذی را کاهش می‌دهد. این موضوع منجر به افت رسانایی الکتریکی محلول منفذی بتن می‌شود [۴۰]. در شکل ۱۳، نمونه‌های دارای سنگدانه اسکوریا نسبت به سنگدانه لیکا مقاومت الکتریکی کمتری دارند و با افزایش سن نمونه‌ها، این مقدار بیشتر می‌شود. همچنین، نتایج شکل ۱۲ نشان می‌دهد که نمونه مرجع کمترین مقدار مقاومت الکتریکی را دارد. در سن ۹۱ روزه، نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۱۹ و ۱۸ کیلو اهم و ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۱۷، ۱۶ و ۱۴ کیلو اهم مقاومت الکتریکی بیشتری را نشان می‌دهد. همچنین، با افزایش درصد جایگزینی سنگدانه اسکوریا، مقاومت الکتریکی عمل‌آوری شده با آب شرب کاهش می‌یابد. در نمونه‌های دارای سنگدانه لیکا، به دلیل سبکی این سنگدانه نسبت به اسکوریا، مقاومت الکتریکی بیشتر از نمونه مرجع است. نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه لیکا در سن ۹۱ روزه به ترتیب ۲۱ و ۲۰ کیلو اهم مقاومت الکتریکی دارند. با افزایش مقدار جایگزینی در بتن، این مقدار کمی کاهش می‌یابد.

نمودار همبستگی سن ۲۸ روزه و سن ۹۱ روزه در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. این مقایسه شامل نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب و دمای آزمایشگاه است. مقاومت کششی دونیم‌شدن در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای با سنگدانه اسکوریا و لیکا با نمودار رگرسیون نشان داده شده است. بر اساس شکل ۱۱، دامنه تغییرات خطای مقاومت کششی دونیم‌شدن در حوضچه آب شرب در سن ۹۱ روزه نسبت به سن ۲۸ روزه بین ۷/۹۷۵٪ تا ۷/۵۴۱٪ است. در دمای محیط آزمایشگاهی، این دامنه بین ۱۲/۶۱۸- تا ۱۲/۲۳۹ می‌باشد. این نشان می‌دهد که می‌توان با دقت قابل‌قبولی، مقاومت کششی دونیم‌شدن در سن ۹۱ روزه را بر اساس سن ۲۸ روزه پیش‌بینی کرد. از نتایج به‌دست آمده، یک رابطه خطی بین ضریب تعیین در حوضچه آب شرب (۰/۹۷۴۱) و دمای محیط آزمایشگاهی (۰/۸۸۵۲) در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه وجود دارد.

۳-۵-۲- آزمایش مقاومت الکتریکی

دوام بالا در مخلوط‌های سیمانی نشان‌دهنده کیفیت بهتر آن‌ها در شرایط مختلف است. با افزایش دوام این مخلوط‌ها، می‌توان انتظار طول عمر بیشتری برای سازه بتنی داشت. مقاومت الکتریکی یک ماده به عنوان معیاری برای مقاومت در برابر خوردگی فلزات مدفون در آن مطرح می‌شود. این مقاومت با نفوذپذیری بتن در برابر یون کلر ارتباط مستقیم دارد. به همین دلیل، آزمایش سنجش مقاومت ویژه الکتریکی بتن به خاطر سرعت بالا و غیر مخرب بودنش، مورد توجه قرار گرفته است.



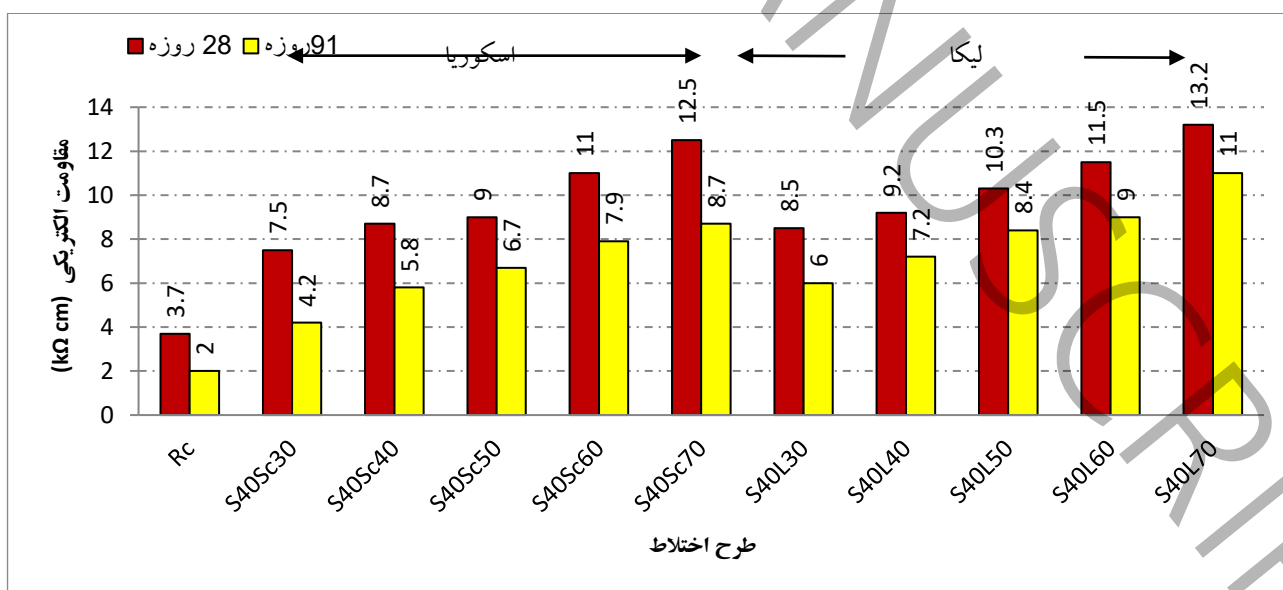
شکل ۱۳: نتایج مقاومت الکتریکی نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب

Figure 13: Electrical resistance results of samples cured in drinking water

۳-۵-۲- مقاومت الکتریکی عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاه

نشان‌دهنده تاثیر آب در حفره‌های بین سنگدانه‌ها است. با گذشت زمان، مقاومت الکتریکی نمونه‌ها افزایش می‌یابد. در سن ۹۱ روزه، نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا به ترتیب ۷۹، ۸۴، ۹۱، ۹۱ و ۹۷ کیلو اهم در سانتی‌متر مقاومت الکتریکی دارند. در همین سن، نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۶۳، ۷۱، ۷۸، ۸۶ و ۹۸ کیلو اهم در سانتی‌متر مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد.

شکل ۱۴ نتایج مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه در دمای آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تاثیر سبکدانه اسکوریا بر مقاومت الکتریکی با افزایش درصد جایگزینی، نسبت به نمونه مرجع افزایش یافته، همچنین نمونه‌های ساخته‌شده با سنگدانه لیکا در مقایسه با سنگدانه اسکوریا مقاومت کمتری دارد. در شکل ۱۴، نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی مقاومت الکتریکی بیشتری را نشان می‌دهد. این



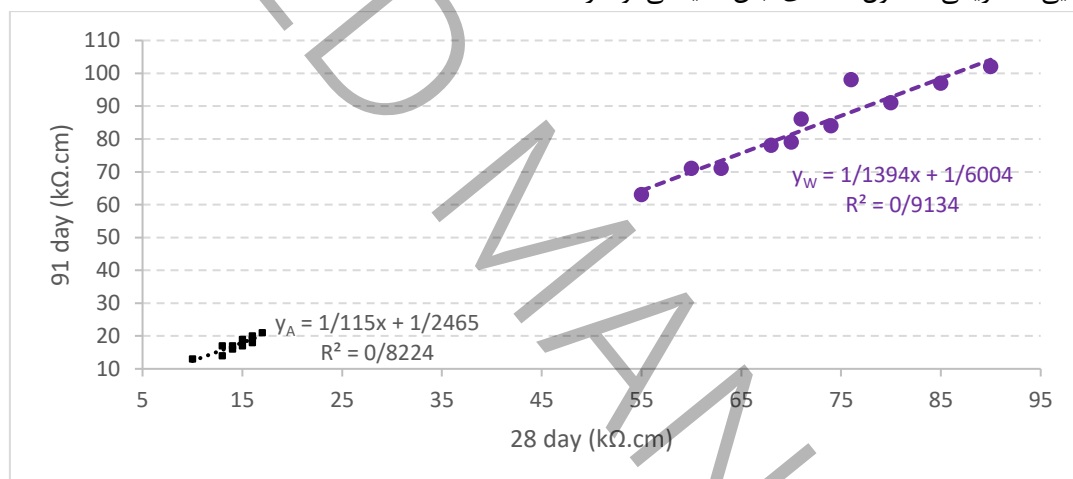
شکل ۱۴- نتایج مقاومت الکتریکی نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاه

Figure 14 - Electrical resistance results of samples cured at laboratory temperature

۳-۵-۳- تحلیل نتایج مقاومت الکتریکی

نهایت افزایش مقاومت الکتریکی ماتریس می‌شود. این افزایش مقاومت به کاهش نرخ خوردگی میلگردهای فولادی که در زیر لایه بتن قرار دارند، کمک می‌کند. عملکرد پوزولانی در سنین اولیه ضعیف است و لذا این مواد تاثیر زیادی بر بهبود مقاومت الکتریکی در سن ۲۸ روزه ندارد. با افزایش درصد جایگزینی سرباره با سیمان، مقدار سیمان که عامل اصلی مقاومت و چسبندگی است، کاهش می‌یابد. این افزایش تخلخل می‌تواند رسانایی ماتریس را بالا ببرد و مقاومت الکتریکی آن را کاهش دهد. با بررسی نتایج شکل ۱۴، مشخص می‌شود که تاثیر سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا افزایش مقاومت الکتریکی را به همراه دارد.

نتایج آزمون مقاومت الکتریکی نشان می‌دهد که نمونه‌های حاوی سنگدانه اسکوریا و لیکا افزایش مقاومت را تجربه کرده‌اند. وجود سرباره سبب پر شدن فضای بین مصالح سنگی می‌شود. این موضوع نتوانسته است مقاومت الکتریکی نمونه‌های حاوی سرباره و سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا را نسبت به نمونه مرجع کاهش دهد. به طور کلی، مقاومت الکتریکی نمونه‌های سیمانی به ابعاد و توزیع تخلخل در ریزساختار این مصالح و رسانایی محلول منفذی در حفرات ماتریس بستگی دارد. سرباره فولاد به عنوان یک پوزولان و سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا به عنوان اسکلت بتن درون ماتریس قرار می‌گیرند. این مواد با مصرف بلورهای هیدروکسید کلسیم، غلظت یون‌های OH در محلول منفذی را کاهش می‌دهند [۳۶]. این امر منجر به کاهش رسانایی الکتریکی محلول منفذی بتن سیمانی و در



شکل ۱۵: رابطه بین مقاومت‌های الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای دارای سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا

Figure 15: Relationship between electrical resistivities at 28 and 91 days of slag cement concretes containing Scoria and Leca aggregates

تعیین عمل‌آوری شده با آب شرب ۰/۸۲۲۴ و ضریب تعیین در دمای آزمایشگاهی ۰/۹۱۳۴ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه برقرار است.

۳-۶- آزمایش جذب آب حجمی

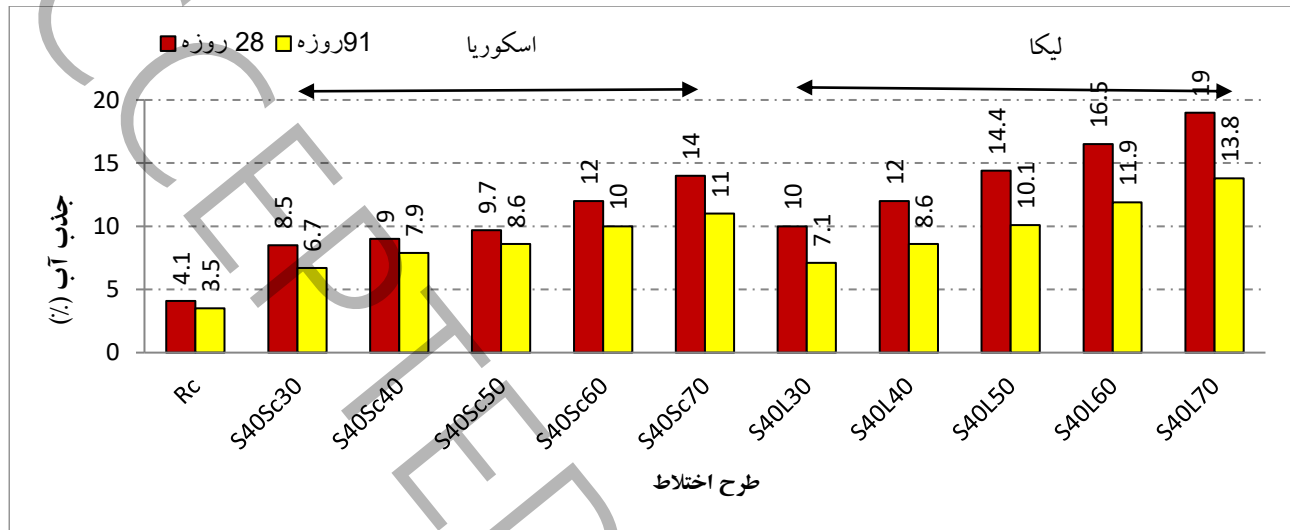
۳-۶-۱- جذب آب عمل‌آوری شده با آب شرب

در بررسی نتایج جذب آب در شکل ۱۶، مشاهده می‌شود که با افزایش سنگدانه‌های اسکوریا، جذب آب افزایش یافته است. اما با گذشت زمان، این مقدار کاهش نشان می‌دهد. همچنین، جذب آب نمونه‌های ساخته شده با سنگدانه لیکا بیشتر از نمونه‌های اسکوریا است. نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روز به ترتیب ۶/۷٪،

نمودار همبستگی میان سن ۲۸ روزه و سن ۹۱ روزه نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب و دمای آزمایشگاه در شکل ۱۵ ارائه شده است. مقاومت الکتریکی در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا، نمودار رگرسیون را نشان می‌دهد. تغییرات خطای موجود در مقاومت الکتریکی عمل‌آوری شده با آب شرب در سن ۹۱ روزه نسبت به سن ۲۸ روزه، در محدوده ۱۱/۴۵۳٪ تا ۸/۸۸۸٪ است. در دمای آزمایشگاهی، این تغییرات در سن ۹۱ روزه در محدوده ۱۰/۰۰۵ تا ۳/۳۵۵ قرار دارد. به وضوح می‌توان با دقت قابل قبولی، مقاومت الکتریکی در سن ۹۱ روزه را با توجه به سن ۲۸ روزه پیش‌بینی کرد. همچنین، یک رابطه خطی از ضریب

دارد. بنابراین، استفاده از ۴۰٪ سرباره کارخانه فولاد اهواز به جای سیمان در نمونه‌های لیکا، جذب آب را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

۷/۹٪، ۸/۶٪، ۱۰٪ و ۱۱٪ جذب آب را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۷/۱٪، ۸/۷٪، ۱۰/۱٪، ۱۱/۹٪ و ۱۳/۸٪ جذب آب

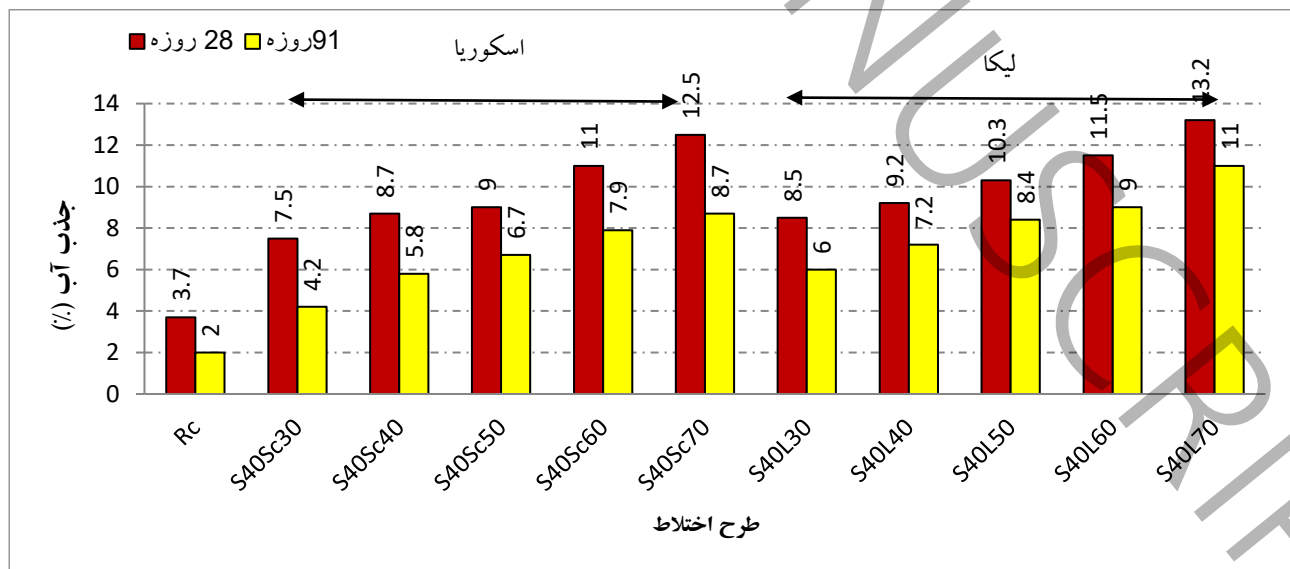


شکل ۱۶: نتایج جذب آب نمونه‌ها عمل‌آوری شده با آب شرب

Figure 16: Water absorption results of samples cured with drinking water

۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روز به ترتیب ۴/۲٪، ۵/۸٪، ۶/۷٪، ۷/۹٪ و ۸/۷٪ جذب آب را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه‌های لیکا به ترتیب ۶٪، ۷٪، ۷/۲٪، ۸/۴٪ و ۹٪ جذب آب دارد.

۳-۶-۲- جذب آب عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی در شکل ۱۷، با افزایش سنگدانه‌های اسکوریا، جذب آب افزایش می‌یابد. نمونه‌های ساخته شده با لیکا نسبت به نمونه‌های اسکوریا جذب آب بیشتری دارد. همچنین، استفاده از ۷۰٪ سنگدانه لیکا و ۴۰٪ سرباره در محیط آزمایشگاهی، جذب آب را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد. نمونه‌های حاوی ۳۰٪



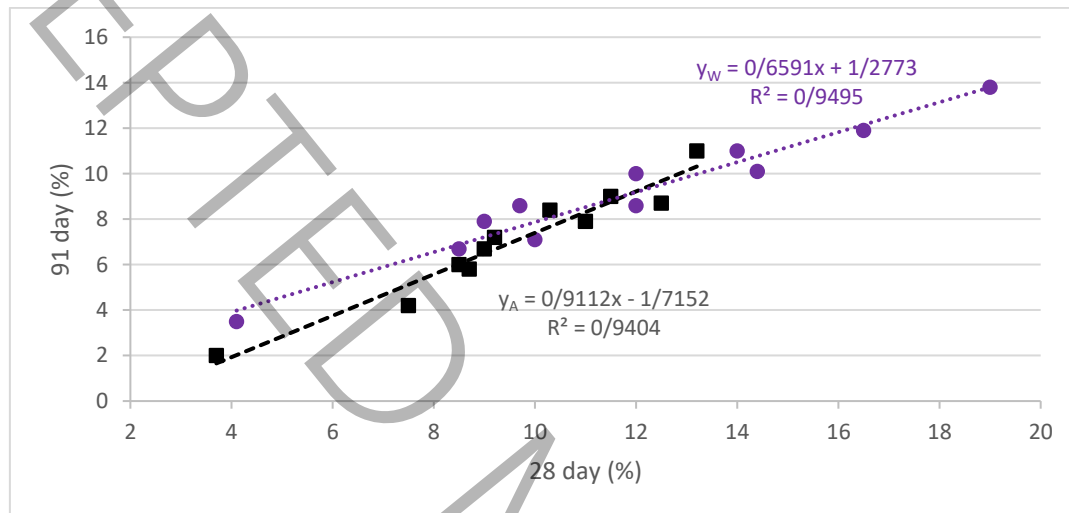
شکل ۱۷- نتایج جذب آب نمونه‌های عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی

Figure 17 - Water absorption results of samples cured at laboratory temperature

۳-۶-۳- تحلیل نتایج جذب آب

آزمون جذب آب نمونه‌های بتن سیمانی نشان می‌دهد که این مصالح قابلیت جلوگیری از نفوذ آب و مایعات را دارند. افزایش جذب شده نشان‌دهنده ضعف ماتریس در جلوگیری از نفوذ است که به تخلخل بالای بتن اشاره دارد. در مقایسه، نمونه‌های لیکا و ۴۰٪ سرباره نسبت به نمونه مرجع جذب آب بیشتری دارد. همچنین، سرباره بر نفوذپذیری نمونه‌ها تأثیر دارد و باعث

بهبود ساختار تخلخل می‌شود. سنگدانه‌های متخلخل نیز جذب آب بالایی دارد و نمونه‌هایی با درصد بالای این سنگدانه‌ها، جذب آب بیشتری دارد. نتایج این پژوهش را می‌توان با تحقیق رضانی‌دربند [۴۱] درباره خواص مکانیکی و جذب آب بتن سبک مقایسه کرد. نتایج نشان‌دهنده نرخ جذب آب بالای این بتن‌ها است.



شکل ۱۸: رابطه بین جذب آب در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای دارای سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا
Figure 18: Relationship between water absorption at 28 and 91 days of slag cement concretes containing scoria and Leca aggregates

شکستن نمونه‌ها، می‌توان به معیاری برای نفوذپذیری بتن دست یافت. نفوذ آب به داخل بتن می‌تواند به خوردگی و ترک خوردن آن منجر شود. بنابراین، نفوذ آب نقش مهمی در سازه‌های بتنی ایفا می‌کند.

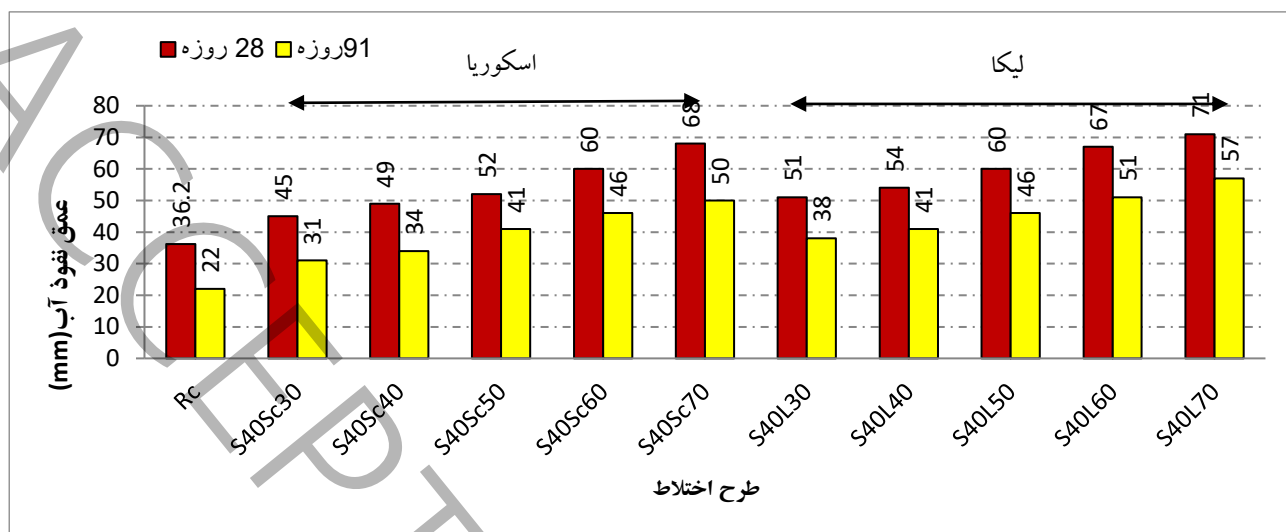
۳-۷-۱- عمق نفوذ آب عمل‌آوری شده آب شرب

نتایج عمق نفوذ آب عمل‌آوری شده با آب شرب در شکل ۱۹ نشان می‌دهد که با افزایش میزان سنگدانه‌های اسکوریا، عمق نفوذ آب افزایش می‌یابد. اما با گذشت زمان، این مقدار کاهش می‌یابد. نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روزه به ترتیب ۳۱، ۳۴، ۴۱، ۴۶ و ۵۰ میلی‌متر عمق نفوذ آب را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۳۸، ۴۱، ۴۶، ۵۱ و ۵۷ میلی‌متر عمق نفوذ آب را دارد. همچنین، عمق نفوذ آب نمونه‌های لیکا بیشتر از نمونه‌های اسکوریا است.

نمودار همبستگی میان دو عامل سن ۲۸ روزه و سن ۹۱ در شکل ۱۸ نشان داده شده است. این نمودار مقاومت فشاری به جذب آب در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای با سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا را نمایش می‌دهد. تغییرات خطای جذب آب عمل‌آوری شده با آب شرب در سن ۹۱ روزه برحسب سن ۲۸ روزه بین ۸/۵۱۸٪ تا ۱۴/۵۶۱٪ است. در دمای محیط آزمایشگاهی، این مقدار بین ۱۰/۱۲۹ تا ۱۱/۸۵۵ می‌باشد. با دقت قابل قبول، می‌توان جذب آب در سن ۹۱ روزه را بر اساس سن ۲۸ روزه پیش‌بینی کرد. همچنین، رابطه خطی با ضریب تعیین در آب شرب ۰/۹۴۹۵ و در دمای محیط ۰/۹۴۰۴ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه برقرار است.

۳-۷-۲- آزمایش نفوذپذیری آب

نفوذپذیری معمولاً با محاسبه مقدار آب تحت فشار در یک دوره ۷۲ ساعته تعیین می‌شود. با اندازه‌گیری عمق نفوذ آب پس از

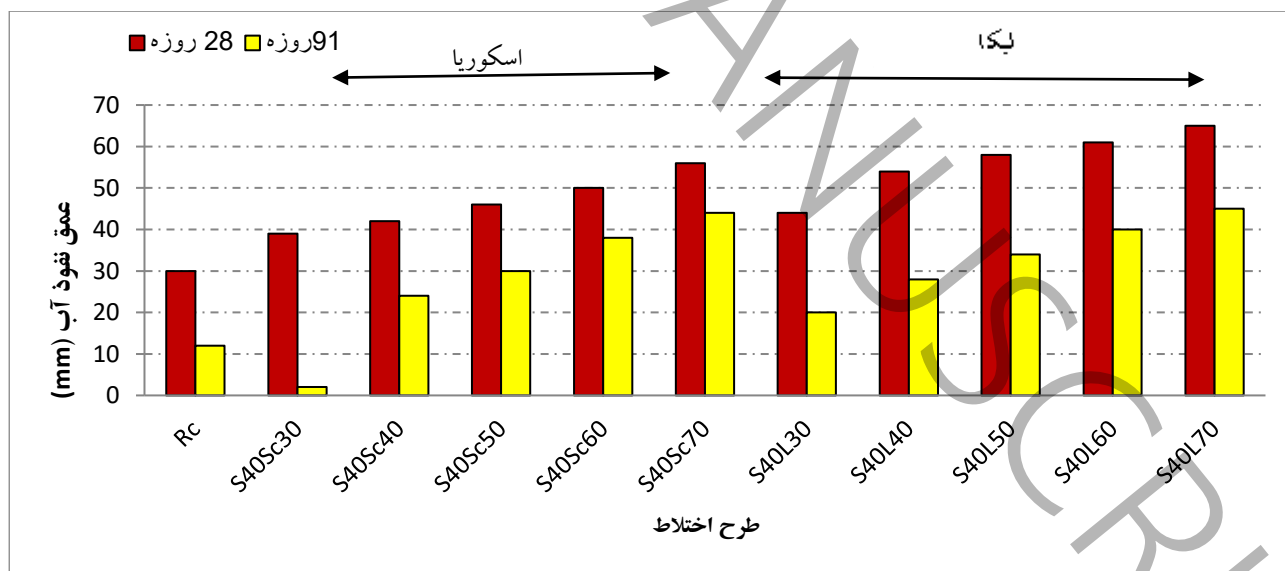


شکل ۱۹: نتایج عمق نفوذ نمونه‌ها عمل‌آوری شده با آب شرب
Figure 19: Penetration depth results of samples cured with drinking water

است. نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا در سن ۹۱ روزه به ترتیب ۲۰، ۲۴، ۳۰، ۳۸ و ۴۴ میلی‌متر عمق نفوذ آب را نشان می‌دهد. در حالی که نمونه‌های حاوی ۳۰٪، ۴۰٪، ۵۰٪، ۶۰٪ و ۷۰٪ سنگدانه لیکا به ترتیب ۲۰، ۲۸، ۳۴، ۴۰ و ۴۵ میلی‌متر عمق نفوذ آب را دارند.

۳-۷-۲- عمق نفوذ آب در دمای آزمایشگاهی

در شکل ۲۰، نتایج عمق نفوذ آب عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی نشان می‌دهد که با افزایش میزان سنگدانه اسکوریا، عمق نفوذ آب افزایش می‌یابد. عمق نفوذ آب نمونه‌های لیکا در این شرایط نیز بیشتر از نمونه‌های اسکوریا



شکل ۲۰: نتایج عمق نفوذ نمونه‌ها عمل‌آوری شده در دمای آزمایشگاهی
Figure 20: Penetration depth results of samples cured at laboratory temperature

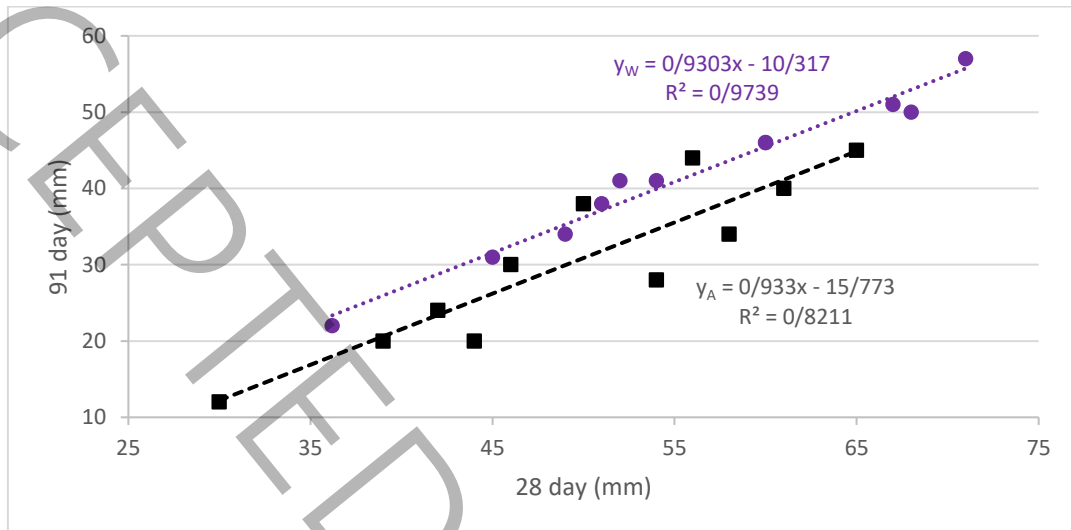
مقایسه‌ای هستند. نتایج این تحقیق نشان داد که عمق نفوذ در نمونه‌های عمل‌آوری شده با آب شرب در نمونه‌های لیکا بیشتر از نمونه‌های اسکوریا است، در حالی که نمونه‌های عمل‌آوری

۳-۷-۳- تحلیل نتایج عمق نفوذ آب

آزمایش عمق نفوذپذیری آب بتن یک آزمایش استاندارد نیست. نتایج روش‌های متداول تعیین نفوذپذیری عمدتاً کیفی و

شده در دمای آزمایشگاهی اسکوریا نسبت به لیکا عمق نفوذ آب کمتری نشان داد. نتایج این پژوهش را می‌توان با پژوهش نادری و همکاران [۴۲] تحت عنوان روشی دقیق برای تعیین نفوذپذیری آب در بتن و مصالح ساختمانی مقایسه کرد. با

افزایش میزان سنگدانه‌های متخلخل، عمق نفوذپذیری آب نیز افزایش می‌یابد. نمونه ساخته شده با ۷۰٪ سنگدانه لیکا در محیط آب شرب، بیشترین عمق نفوذ آب را نشان داده است.



شکل ۲۱: رابطه بین عمق نفوذ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای دارای سنگدانه‌های اسکوریا و لیکا
Figure 21: Relationship between penetration depth at 28 and 91 days of slag cement concretes containing Scoria and Leca aggregates

سنگدانه‌های طبیعی اسکوریا و لیکا ساخته شدند. آزمایش‌های مختلف خواص مکانیکی و دوام بر روی نمونه‌های بتن در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه انجام شدند. نتایج کلیدی حاصل از تحقیق به شرح زیر است:

- نمونه‌ای که شامل ۷۰٪ سنگدانه اسکوریا و ۴۰٪ سرباره فولاد اهواز بود، بیشترین میزان اسلامپ را در بین طرح‌ها نشان داد. این موضوع بیانگر روانی مطلوب مخلوط در شرایط یادشده است که می‌تواند به توزیع مناسب‌تر مواد در قالب و سهولت اجرا منجر شود.
- بیشترین وزن مخصوص بتن مربوط به نمونه‌هایی با ۳۰٪ سنگدانه اسکوریا و ۳۰٪ لیکا بود. این ترکیب نشان می‌دهد که حضور همزمان دو نوع سنگدانه سبک می‌تواند توازن مناسبی بین سبکی و چگالی ایجاد کند.
- نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا که در آب شرب عمل‌آوری شده‌اند، بالاترین مقاومت فشاری در سن ۹۱ روزه را نشان دادند. این امر بیانگر تأثیر مثبت عمل‌آوری مناسب و انتخاب درصد بهینه جایگزینی بر فرآیند هیدراسیون و توسعه مقاومت می‌باشد.

نمودار همبستگی میان دو عامل سن ۲۸ روزه و سن ۹۱ در شکل ۲۱ ارائه شده است. این نمودار مقاومت فشاری به عمق نفوذ آب در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه بتن‌های سیمان سرباره‌ای را نشان می‌دهد. دامنه تغییرات خطای نفوذ آب عمل‌آوری شده با آب شرب در سن ۹۱ روزه بین ۷/۱۷۴٪ تا ۶/۸۸۱٪ است. در دمای محیط آزمایشگاهی، این مقدار بین ۱۸/۸۴۴ تا ۱۸/۳۹۵ می‌باشد. این نتایج امکان پیش‌بینی دقیق جذب آب در سن ۹۱ روزه بر اساس سن ۲۸ روزه را فراهم می‌کند. همچنین، رابطه خطی بین ضریب تعیین در حوضچه آب شرب ۰/۹۷۳۹ و در دمای محیط ۰/۸۲۱۱ در سنین ۲۸ و ۹۱ روزه برقرار است.

۴- جمع بندی و نتیجه گیری

این پژوهش در ادامه تحقیق ساجدی و بهرامی‌نیا [۲۰] انجام شده است، که به بررسی تأثیر سرباره کارخانه فولاد اهواز بر خواص بتن‌های سیمان - سرباره‌ای می‌پردازد. در این تحقیق، ۴۰٪ سرباره شرکت فولاد اهواز به عنوان ترکیب بهینه در نظر گرفته شده است.

هدف، توسعه بتن‌های سازگار با محیط زیست است. این بتن‌ها با استفاده از پوزولان سرباره تولیدی در شرکت فولاد اهواز و

- نتایج مقاومت کششی (شکست دونیم‌شدگی) حاکی از آن است که نمونه‌های حاوی ۳۰٪ و ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا که در آب شرب عمل‌آوری شده‌اند، در سن ۹۱ روزه دارای بالاترین مقاومت کششی نسبت به طرح مرجع هستند. این موضوع، نشان‌دهنده تأثیر مثبت دانه‌بندی مناسب و عمل‌آوری مرطوب بر مقاومت کششی بتن است.
- نمونه‌های عمل‌آوری شده در آب شرب با ترکیب ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در سن ۹۱ روزه، کمترین میزان جذب آب را داشتند. این ترکیب به عنوان طرح بهینه از منظر نفوذپذیری و دوام شناسایی شد.

مراجع

- [1] Sajedi, S.F.; Darash, F. 2019, 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. Vol. 50(6), pp. 1155-1176
- [2] Emam Ali, E.; Al-Tersawy S., 2012 "Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self-compacting concrete", Construction and Building Materials, Vol. 35, pp. 785-791.
- [3] Luhar, S; Cheng, TW; Nicolaides, D; Luhar, I; Panias, D; Sakkas K. 2019, Valorisation of glass waste for development of Geopolymer composites–Mechanical properties and rheological characteristics: A review. Construction and Building Materials. Vol. 220, pp. 547-564.
- [4] Moufti, M.; Sabtan, R.; El-Mahdy, A.A; Shehata O., 2000, Assessment of the industrial utilization of Scoria materials in central Harrat Rahat, Saudi Arabia, Engineering Geology, Vol. 57, pp. 155–162.
- [۵] مجدی، ع؛ شکرچی زاده، م؛ جعفری، ا؛ علی لیبر، ن، ۱۳۹۰، "بررسی ظرفیت مقاومتی سبکدانه اسکوریا به منظور کاربرد در بتن سبکدانه سازه‌ای"، اولین کنفرانس ملی بتن سبک، تهران.
- [۶] شکرچی زاده، م؛ علی لیبر، ن؛ جلیلی، م، ۱۳۹۰، "راهنمای ساخت بتن سبکدانه سازه‌ای"، انتشارات علم و ادب با همکاری انستیتو مصالح ساختمانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، چاپ اول.

- بررسی عمق نفوذ آب تحت شرایط عمل‌آوری در آب شرب و دمای محیط نشان داد که نمونه حاوی ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و لیکا در سن ۹۱ روزه به ترتیب دارای عمق نفوذ ۳۴ و ۴۱ میلی‌متر بودند. کاهش عمق نفوذ نشان‌دهنده ساختار متراکم‌تر و نفوذپذیری کمتر این ترکیب است.
- در نهایت، جایگزینی همزمان ۴۰٪ سنگدانه اسکوریا و ۴۰٪ سنگدانه لیکا به جای ۴۰٪ سرباره فولاد اهواز منجر به بهبود مناسب و مورد توجه خواص مکانیکی در سن ۹۱ روزه شد. این ترکیب به عنوان طرح بهینه نهایی از منظر عملکرد مقاومتی و دوام بتن در این تحقیق پیشنهاد می‌شود.

- [۷] نادری، م؛ بنیادی، ع، ۱۳۹۰، "بتن سبک ساخته شده با لیکا و مقایسه آن با بتن معمولی از لحاظ مقاومت فشاری به روش پیچش و جک فشاری"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان.
- [۸] صدرممتازی، ع؛ هوشمند دیارجانی؛ کهنی، ر، ۱۳۹۹، "بررسی مشخصات مکانیکی و دوام در برابر محیط اسیدی بتن سبک ژئوپلیمری بر پایه سرباره حاوی سبکدانه اسکوریا"، دوازدهمین کنفرانس ملی بتن، تهران.
- [۹] رضانی زاده دربند، م، ۱۴۰۲، "بررسی خواص مکانیکی بتن سبک سازه‌ای ساخته شده با سبکدانه های لیکا، اسکوریا و پرلیت تحت تاثیر دما"، هشتمین کنفرانس بین المللی مهندسی عمران، سازه و زلزله، تهران
- [۱۰] رضانی زاده دربند، مهدی، ۱۴۰۱، "بررسی خواص مکانیکی و جذب آب بتن سبک سازه ای ساخته شده با سنگدانه لیکا و اسکوریا"، اولین رویداد مدیریت بحران ایران قوی، تهران.
- [۱۱] پورحسین پریزاد، سبحان، ۱۴۰۲، "طراحی طرح اختلاط بتن سبک خودتراکم حاوی سبکدانه اسکوریا"، بیست و دومین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست، شیروان
- [۱۲] شهرامی، ش، شکیباپور، ا، توکلی، ع، ۱۳۹۶، "بررسی و مقایسه تاثیر استفاده از سبکدانه لیکا و سبکدانه اسکوریا بر روی مقاومت بتن سبک"، نهمین کنفرانس ملی بتن، قرچک.
- [13] Gong, R, Qi,Y, Lian, G, Gao ,X, Yao ,F, Srinivasan, V, Liu,Y, Liu, B, Dong, X, 2024, Developing poplar wood into a green structure-decoration integrated material for prefabricated wooden building application, Journal of Building Engineering, Vol 90.

[۲۷] آئین نامه بتن ایران (آبا)، دفتر امور فنی و تدوین معیارها، نشریه شماره ۱۲۰، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، چاپ سوم، سال ۱۳۸۱.

[28] Kohistani A, S, Singh, K, A Review-Utilization of Plastic waste and Alccofine in Self-Compacting Concrete, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). (2018), vol. 04, pp 1565-1568

[29] ASTM C172, "Testing fresh concrete in the field", (2017).

[30] British Standards Institution, BS 1881, Part 2, Methods of testing fresh concrete, London, BSI, (1970).

[31] ASTM C143, "Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete", (2017).

[32] ASTM C138, "Método de Ensayo Normalizado de Densidad (Peso Unitario), Rendimiento, y Contenido de Aire (Gravimétrico) Del Concretot", (2017).

[33] British Standards Institution, BS 1881, Part 2, Methods of testing fresh concrete, London, BSI, (1970).

[34] ASTM C496-96, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", (1996).

[35] ACI 222 R-01, 222R-01: Protection of Metals in Concrete against Corrosion, (2010).

[36] Mazloom, M, Ramezaniapour, A, Brooks, J, J, 2004 "Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete", Cement & Concrete Composites, vol. 26, pp. 347-357.

[37] DIN 1991) 5-1048), "Testing concrete; testing of hardened concrete (specimens prepared in mould)", Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany

[۳۸] مومنی، ک، و قویدل، ر. (۱۳۹۹). بررسی رسانایی هیدرولیکی و گرفتگی بتن های نفوذپذیر سبک حاوی لیکا و اسکوریا. مهندسی عمران (فنی و مهندسی مدرس)، شماره ۲۰ (۳)، صص ۱۶۱-۱۷۴.

[۳۹] خانزادی، م، چاله کایی، ع، احمدی، ر، ۱۳۸۹، ساخت بتن سبکدانه پرمقاومت حاوی اسکوریا و لیکا، دومین کنفرانس ملی بتن ایران، تهران.

[۴۰] حسن زاده، م، کرمی، ع، ملکی، م، حسن زاده، ف، ۱۳۹۰، "بررسی برخی از خصوصیات ملات حاوی سرباره های ذوب آهن اصفهان"، سومین کنفرانس ملی بتن ایران.

[41] ASTM C511, "Standard Specification for Seamless Stainless Steel Mechanical Tubing", (2018).

[14] Mahdi, Z, Obaidi, H, Abdul Rahman, E, 2024, Study of some properties of sustainable lightweight concrete-based on epoxy, scoria and charcoal, AIP Conference Proceedings, Vol 3105, Issue 1.

[15] Neville A, M, 2004, Properties of volcanic scoria-based lightweight concrete. Mag Concr Res. Vol 56(2), pp111-120.

[16] Degefa A, Tiku S. 2019, Suitability of scoria as fine aggregate and its effect on the properties of concrete. Sustainability. Vol 11(17), pp4647.

[17] Gencil O, Brostow W, Ozel C, Filiz M. 2017, Effect of scoria aggregate on various specific aspects of lightweight concrete. Int J Concr Struct Mater. Vol 11, pp 345-359.

[18] Bahrami A, Ghasemi M. 2024, Physical and Mechanical Properties of Lightweight Expanded Clay Aggregate Concrete. Buildings. Vol 14(6), pp1871.

[19] Wójcik M, Grzybowska K. 2021, Mechanical properties of lightweight expanded clay aggregate (LECA) concrete. Ann Warsaw Univ Life Sci-SGGW, Land Reclam. Vol 53(4), pp 339-349.

[۲۰] ساجدی، س ف، بهرامی نیا، غ ع. ۱۴۰۲، بررسی آزمایشگاهی

تاثیر سرباره کارخانه فولاد اهواز برخواص بتن های سیمان- سرباره ای. تحقیقات بتن شماره ۱۶، صص ۷۹-۹۳.

[۲۱] رمضانپور، ع، ۱۳۶۹، "نقش مواد افزودنی در تکنولوژی بتن"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.

[22] ASTM C150, "Standard Specification for Portland Cement", (2004).

[۲۳] استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۴۰، ۱۳۸۳، ماسه مرجع مورد مصرف در تعیین مقاومت خمشی و فشاری سیمان، ویژگی ها و روش آزمون.

[۲۴] مستوفی نژاد، د، نظری منفرد، ح، ۱۳۸۵، "افزودن سرباره و پودر سنگ آهک به بتن جهت افزایش دوام در محیط سولفاتی"، پژوهشنامه حمل و نقل، سال سوم، شماره دوم.

[۲۵] استاندارد ملی ایران شماره ۳۰۲، ۱۳۹۴، استاندارد ویژگی های سنگدانه های بتن

[26] ASTM C128, "Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate", (2012).

Cement & Concrete Composites, vol. 32, pp. 134-141.

[42] Ahmadi, B, Shekarchi, M, 2010"Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material",

Investigating the effect of light aggregate and curing methods on the properties of cement-slag concretes

Gholam Abbas Bahraminia^a, Seyed Fathollah Sajedi^{b1}, Fereidoon Moghadas Nejad^c

^a Department of Civil Engineering, Qeshm Branch, Islamic Azad University, Qeshm, Iran

^b Department of Civil Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

^c Department of Civil and Environmental Engineering, AUT (Tehran Polytechnic), Tehran, Iran.

ABSTRACT

One of the optimal methods for producing cement and concrete is to replace part of the cement with cheap additives. These pozzolans help reduce cement consumption, energy, and greenhouse gas emissions. They also improve the mechanical properties and durability of concrete. In this study, 11 mixing designs were made, including a reference and 10 cement-slag concrete designs. Slag powder from the Ahvaz Steel Plant was used instead of 40% cement (by weight). In five designs, scoria lightweight aggregate was used instead of part of the natural aggregate, and in the other five designs, Leca was used. These two types of lightweight aggregate were used with two curing methods with drinking water and laboratory temperature. Standard cubic and prismatic samples were used for the tests. In the mixing design, scoria and Leca lightweight aggregates were replaced by 30%, 40%, 50%, 60% and 70% with natural aggregates (pea and almond). Also, a third-generation modified superplasticizer and a polycarboxylate-based extreme water reducer were used. To determine the rheological, mechanical and durability properties, slump tests, concrete specific gravity, compressive strength, indirect tensile strength, electrical resistance, volumetric water absorption and water penetration depth were performed. The results showed that using 40% steel slag with a combination of scoria and Leca aggregates in concrete production has positive results. At the age of 91 days, the compressive strength of cement-slag concrete should not be less than the same strength as the reference concrete. Therefore, 40% replacement of slag with scoria and Leca aggregates can be considered optimal.

KEY WORDS:

Cement- slag concrete, Scoria, Leca, Curing, Natural aggregates

¹ Corresponding Author: Email: fa.sajedi@iau.ac.ir; sajedi.ac@gmail.com