بررسی ویژگی‌های مکانیکی پوشش بتنی کانال‌های آبیاری حاوی خاکستر پوستهٔ شلتوک در محیط‌های سولفاته

جهانگیر عابدی کوپایی و محمدعلی فتحی[۱]

چکیده

پوسته شلتوک از جمله مواد زاید کشاورزی است که سالیانه حدود ۱۰۰ میلیون تن در جهان و ۰/۵ میلیون تن در ایران تولید می‌شود. به علت مسائل زیست محیطی ناشی از دفع این مواد، تلاش‌هایی در مورد کاربرد آنها در صنایع به عمل آمده است. صنایع تولید بتن و مصالح سیمانی از جمله این صنایع است، که می‌تواند مقادیر عظیمی از این مواد را مصرف کند. در این پژوهش امکان استفاده از خاکستر پوستهٔ شلتوک به جای بخشی از سیمان پوشش کانال‌های آبیاری و افزایش مقاومت و دوام آن در محیط‌های سولفاته، و مقایسه آن با بتن کنترل بررسی شده است. به منظور تهیه خاکستر پوستهٔ شلتوک مورد نیاز، کوره‌ای از ورق‌های گالوانیزه طراحی و ساخته شد، و در نهایت خاکستر پوستهٔ شلتوک با فعالیت پوزولانی بسیار زیاد، تهیه گردید. به منظور آزمایش مقاومت فشاری و کششی و دوام بتن پس از دوره‌های ۷، ۲۸، ۶۰، ۹۰ و ۱۸۰ روزه، در سه نوع شرایط محیطی متفاوت متشکل از آب حاوی چهار درصد سولفات منیزیم، سولفات سدیم و سولفات کلسیم، ۴۰۵ نمونه بتن مکعبی و استوانه‌ای برای سه نوع بتن (بتن کنترل و بتن حاوی ۲۰ و ۳۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک) ساخته شد.

نتایج آزمایش روی نمونه‌های مکعبی با ابعاد ۷۰ میلی‌متر و نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۵۰/۸ و ارتفاع ۱۰۱/۶ میلی‌متر،که تا سن ۱۸۰ روزگی داخل محلول‌های مختلف نگهداری شد، نشان می‌دهد که در نمونه‌های بتن با درصدهای مختلف پوسته شلتوک جای‌گزین، در مقایسه با نمونه‌های کنترل، روند کسب مقاومت فشاری، کششی و دوام بتن در محیط‌های سولفاته شیب تندتری دارد. درصد بهینه خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین ۲۰ درصد وزنی سیمان است.

واژه‌های کلیدی: *پوشش بتنی کانال‌های آبیاری، خاکستر پوسته شلتوک (RHA)، پوزولان‌ها*

---

۱. به ترتیب استادیار و دانشجوی سابق کارشناسی ارشد آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]

مقدمه

وجود نمک‌ها در خاک، آب‌های زیرزمینی و آب آبیاری، همواره خطر آسیب‌پذیری و اسفنجی شدن بتن را به دنبال دارد. از جمله این نمک‌ها سولفات‌های کلسیم (گچ)، منیزیم و سدیم می‌باشند، که وجود آنها در خاک‌های مناطق خشک و نیمه خشک، صدمات جبران‌ناپذیری به کانال‌های آبیاری با پوشش بتنی وارد می‌سازد. از سویی، رشد روزافزون جمعیت و افزایش نیازهای مختلف انسان سبب شده است که تولید ضایعات صنعتی و کشاورزی افزونی یافته و تجمع این مواد در محیط زیست سبب آلودگی شود. هرچند بهترین راه حل برای کاهش آلودگی سعی در کاهش میزان تولید ضایعات است، ولی استفاده از ضایعات در صنعت نیز راه حلی عملی است که در کشور ما به پژوهش و تجربه نیاز دارد. به سخن دیگر، با وجود این که در ایران منابع غنی وجود دارد، ولی گسترش صنایع و صنعتی شدن ایجاب می‌کند که برای کاهش مشکلات آینده، پژوهش‌های جامعی روی مصرف ضایعات کشاورزی، معدنی و صنعتی صورت گیرد (۱ و ۲).

استفاده از مواد پوزولانی (Pozzolanic admixtures) به صورت طبیعی و مصنوعی در سیمان، که خاکستر پوسته شلتوک (Rice husk ash, RHA) نیز در این گروه است، نه تنها می‌تواند بهای تمام شده بتن را کاهش دهد، بلکه می‌تواند موجب دوام بتن در محیط‌های مخرب گردد. پوزولان یک ماده طبیعی یا مصنوعی حاوی سیلیس فعال است، و طی فرایندهایی باعث بهبود بیشتر ویژگی‌های مهندسی بتن می‌گردد، که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از (٦ و ١٣): کاهش آب انداختگی (Bleeding) و جدایی (Segregation) بتن تازه، کاهش دمای هیدراتاسیون سیمان، افزایش خزش (Creep)، کاهش تخلخل و نفوذپذیری و افزایش دوام بتن‌های سخت شده، مقاومت در برابر ترک‌های حرارتی، مقاومت در برابر اثر سولفات‌ها و انبساط در اثر پدیده ترکیب اکسیدهای قلیایی و مواد سنگی. پوزولان‌ها براساس منشأ، و بر مبنای تولیدشان به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

الف) پوزولان‌های طبیعی (Natural pozzolans)

پوزولان‌های طبیعی شامل خاک‌های دیاتومه، اپالین، چرت‌ها، شیل‌ها، توف‌ها و خاکسترهای آتشفشانی هستند.

ب) پوزولان‌های مصنوعی یا صنعتی (Artificial pozzolans)

منشأ اصلی مواد صنعتی تأسیسات تولید انرژی هستند که از زغال سنگ به عنوان سوخت استفاده می‌کنند. هم‌چنین، کوره‌های ذوب فلزات تولید شمش آهن، فولاد، مس، نیکل، سرب، سیلیس و آلیاژهای آهن و سیلیس نیز از منابع اصلی مواد صنعتی می‌باشند. خاکستر پوسته شلتوک نیز جزو پوزولان‌های مصنوعی به شمار می‌آید.

مواد زاید کشاورزی متشکل از مواد آلی، همچون سلولز، لیگنین، الیاف، مقدار کمی پروتئین خام و چربی، و مواد معدنی مانند سیلیس، اکسید آلومینیم و اکسید آهن هستند. این پس‌ماندها به صورتی که هستند نمی‌توانند به عنوان مواد جای‌گزین سیمان استفاده شوند، بلکه خاکستر به دست آمده از سوزاندن آنها باید به کار گرفته شود (٦، ١٣ و ١٩). پوسته شلتوک یکی از مواد زاید کشاورزی است که به مقدار بسیاری تولید می‌گردد. در برخی مناطق از آن به عنوان سوخت استفاده می‌شود، و در برخی دیگر دفع آن موجب آلودگی می‌گردد. اگر پوسته شلتوک تحت شرایط کنترل شده سوزانده شود، خاکستر حاصل دارای خواص پوزولانی زیاد و جای‌گزینی مناسب برای سیمان خواهد بود، و اگر در شرایط کنترل نشده سوزانده شود خاکستر حاصل، که قسمت اعظم آن اکسید سیلیسیم است به فرم کریستالی در می‌آید، که دارای فعالیت کمی است.

در سال ۱۹۷۳، مهتا (۱۷) در آمریکا نخستین مقاله خود را در مورد استفاده از پوسته شلتوک منتشر کرد. پژوهش‌های او به دلیل این که جزو نخستین پژوهش‌های دقیق در باره عوامل مؤثر در سوزاندن پوسته و تأثیر آن در فعالیت خاکستر است، از نظر عملی ارزش فراوانی دارد. مهتا در آن زمان کوره‌ای با بستر روان (Fluidized bed) به منظور ایجاد سیستمی برای استفاده از پوسته شلتوک به عنوان سوخت، و نیز تولید خاکستر فعال

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]

طراحی کرد. پیت (۲۰) بر اساس پژوهش‌های مهتا، با سوزاندن پوسته شلتوک تحت دمای کنترل شده، خاکستری با فعالیت پوزولانی بسیار زیاد تولید کرد. گزارش مالهوترا (۱۵) نشان می‌دهد که از سوزاندن ۱۰۰۰ کیلوگرم پوسته شلتوک، به طور میانگین ۲۰۰ کیلوگرم خاکستر به دست می‌آید، و چنانچه این سوزاندن در دمای ۵۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد، خاکستری با فعالیت پوزولانی زیاد تولید خواهد شد.

بینا و همکاران (۱) نقش خاکستر پوسته شلتوک را به عنوان یک پوزولان در ساخت قطعات ساختمانی سبک بررسی کردند (۱). نتایج این بررسی نشان می‌دهد که استفاده از خاکستر پوسته شلتوک اثر مطلوبی بر خواص مکانیکی و مهندسی بتن دارد. رمضانیان‌پور و همکاران (٦) مصارف پوسته شلتوک و خاکستر آن را در صنعت ساختمان بررسی کردند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از مخلوط پوسته شلتوک و آهک با نسبت وزنی مساوی می‌توان نوعی ماده چسباننده هیدرولیکی شبیه سیمان پرتلند تولید کرد.

اثر خاکستر پوسته شلتوک بر خواص فیزیکی و مکانیکی بتن معمولی و غلتکی را روانشادی (۷) بررسی کرده است. نتایج پژوهش وی نشان می‌دهد درصد بهینه جای‌گزینی خاکستر پوسته شلتوک به جای سیمان پرتلند معمولی با معیار مقاومت فشاری بیشتر در بتن معمولی و در بتن غلتکی به ترتیب ۲۰ و ۳۰ درصد است. ژانگ و مالهوترا (۲۲) در پژوهشی روی نمونه‌های بتن حاوی خاکستر پوسته شلتوک، گزارش نموده‌اند که مقاومت فشاری این نمونه‌ها نسبت به بتن کنترل تا سن ۷۳۰ روز بیشتر است. هم‌چنین، آنها اظهار نموده‌اند که نمونه‌های بتن حاوی خاکستر پوسته شلتوک مقاومت بسیار خوبی در برابر نفوذ یون کلرید از خود نشان داده‌اند.

کاجورن چیپونگام و استوارت (١٤) دریافتند که بتن حاوی پوسته شلتوک باعث کاهش دمای هیدراتاسیون سیمان می‌شود. اسمیت (۲۱) گزارش نموده است که سیمان حاوی خاکستر پوسته شلتوک مقاومت شیمیایی بهتری نسبت به سیمان پرتلند دارد. بنابراین، از این نوع سیمان می‌توان در کف سازی کارخانجات صنعتی، جایی که مصالح باید در برابر اسیدها مقاوم باشند، استفاده نمود. وی هم‌چنین کاهش دمای هیدراتاسیون سیمان حاوی خاکستر پوسته شلتوک را نسبت به سیمان پرتلند، در جایی که بتن‌ریزی‌های حجیم باید انجام داد، از مزایای این نوع سیمان ذکر کرده است.

پژوهش‌ها و بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که کاربرد مواد پوزولانی دوام بتن را بهبود می‌بخشد، و به ویژه آن را در برابر حملات شیمیایی مقاوم می‌سازد. خاکستر پوسته شلتوک نیز از این بابت حایز اهمیت است. مهتا (۱۸) در پژوهش خود نشان داده است که بتن و ملات ساخته شده با سیمان دارای خاکستر پوسته شلتوک، در مقایسه با بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی و دیگر سیمان‌های پوزولانی، مقاومت بیشتری در محیط اسیدی دارد. برای نشان دادن عملکرد مناسب خاکستر پوسته شلتوک در محیط‌های خورنده، نمونه استوانه‌ای شکل بتنی ساخته شده با مخلوط ۳۵ درصد خاکستر پوسته شلتوک و ٦٥ درصد سیمان پرتلند نوع ASTM(II)، به مدت ۱۵۰ ساعت در محلول اسیدی (۵ درصد اسید سولفوریک یا اسید کلریدریک) قرار داده شد. در محلول اسید کلریدریک، نمونه سیمان پرتلند کنترل ۳۵ درصد، و نمونه دارای خاکستر پوسته شلتوک ۸ درصد افت وزن داشته است. این افت‌ها در محلول اسید سولفوریک به ترتیب ۲۷ و ۱۳ درصد بوده است.

احتمال دارد که دوام سیمان‌های پرتلند دارای خاکستر پوسته شلتوک به علت ساختار فیزیکی سیمان‌های هیدراته و کاهش در مقدار هیدروکسید کلسیم باشد. مان‌موهان و مهتا (١٦) نشان داده‌اند که افزودن خاکستر پوسته شلتوک به سیمان پرتلند، باعث مسدود شدن ریزه سوراخ‌ها و یا تبدیل آنها به ریزه سوراخ‌های کوچک‌تر با نفوذپذیری کمتر می‌شود.

در پژوهش حاضر برخی از ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های آزمایشگاهی بتن حاوی خاکستر پوسته شلتوک بحث و بررسی شده است. ویژگی‌های مورد بررسی عبارت‌اند از مقاومت فشاری و کششی و دوام نمونه‌های بتنی در محیط‌های سولفاته

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]

(سولفات منیزیم، سولفات سدیم و سولفات کلسیم).

مواد و روش‌ها

برای اجرای این پژوهش، پس از تهیه مصالح و تعیین مشخصات مورد نیاز، طرح اختلاط بتن به روش آئین نامه ACI۲۱۱، و با در نظر گرفتن ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری (۸) به دست آمد، و بر این اساس نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شد. برای بررسی ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌های آزمایشگاهی، سه تیمار بتن آزمایش گردید. بتن یکی از تیمارها بدون خاکستر پوسته شلتوک، به عنوان بتن کنترل، و بتن دو تیمار بعدی با کاهش مقدار سیمان به ۸۰ و ۷۰ درصد وزن سیمان بتن کنترل، و جای‌گزین کردن خاکستر پوسته شلتوک به میزان ۲۰ و ۳۰ درصد به جای سیمان حذف شده به شرح جدول ۱ ساخته شد. هر کدام از تیمارها در سه تکرار اجرا شد.

بر پایهٔ ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی (۸)، نوع سیمان مورد استفاده برای تهیه بتن، بجز در مواردی که در دفترچه مشخصات فنی خصوصی به نحو دیگری تصریح شده است، باید از نوع سیمان پرتلند معمولی باشد. بنابراین، سیمان مصرفی در این پژوهش از نوع سیمان پرتلند معمولی انتخاب گردید. چگالی این نوع سیمان ۳/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

مصالح سنگی به دو دسته دانه‌های درشت یا شن (Coarse aggregates/gravel) و ماسه (Sand) تقسیم می‌شود، و در مجموع حدود ٦٦٪ تا ۷۵٪ حجم بتن را اشغال می‌کند (۸). مرز اندازه شن و ماسه، الک استاندارد شماره ٤ است، که اندازه سوراخ آن ٤/٧٦ میلی‌متر است. دانه‌های عبوری از الک شماره ٤ ماسه، و دانه‌های مانده روی این الک شن هستند. به سخن دیگر، دانه‌های ریزتر از ٤/٧٦ میلی‌متر و تا حداقل ۰/۵۱ میلی‌متر ماسه، و بزرگ‌تر از ٤/٧٦ میلی‌متر و تا حداکثر ۳۸/۱ میلی‌متر را شن می‌نامند (۱۱). شن و ماسه مصرف شده در این طرح از نوع شن و ماسه شکسته است، که از کارخانه سرند شرکت آب و فاضلاب اصفهان تهیه شد، و آزمایش‌های مربوط به تعیین منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه روی آنها انجام گرفت. شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب منحنی دانه‌بندی درشت‌دانه و ریزدانه را در مقایسه با محدوده مجاز شناخته شده توسط استاندارد ۲۳ ASTM-C نشان می‌دهند.

در این پژوهش، برای تهیه خاکستر مورد نیاز، پس از بررسی‌های گوناگون، اقدام به طراحی و ساخت کوره گردید. کوره گازی طراحی شده متشکل از یک محفظه فولادی به طول و عرض ۸۰ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر است. به منظور تأمین اکسیژن مورد نیاز برای سوختن پوسته شلتوک و زدوده شدن دی اکسید کربن محیط از اطراف ذرات، یک شبکه توری فولادی به فاصله ۳۰ سانتی‌متر از پایه کوره، و دو دریچه به ابعاد ۲۰۰ × ۱۰۰ میلی‌متر مربع در دو طرف کوره تعبیه گردید. پوسته شلتوک وارد کوره شد و خاکستر حاصل پس از دو ساعت سوختن در دمای ٥٥٠-٦٠٠ درجه سانتی‌گراد از طریق دریچه‌ای که در کف کوره قرار دارد، خارج گردید. درجه حرارت کوره به وسیلهٔ ترموکوپل و از طریق شکاف کوچکی که در دو طرف کوره ایجاد شده است، به طور مستمر تحت کنترل قرار گرفت. به منظور اطمینان از کیفیت و ترکیبات تشکیل دهنده خاکستر تولید شده، مقداری از پوسته شلتوک و خاکستر تولید شده از آن با آزمایش‌های میکروسکوپ الکترونی و پراش‌سنجی پرتو ایکس (X radiation diffractometry) تجزیه و تحلیل گردید، که نتایج مربوط به این آزمایش‌ها در شکل ۳ و جدول ۲ آمده است.

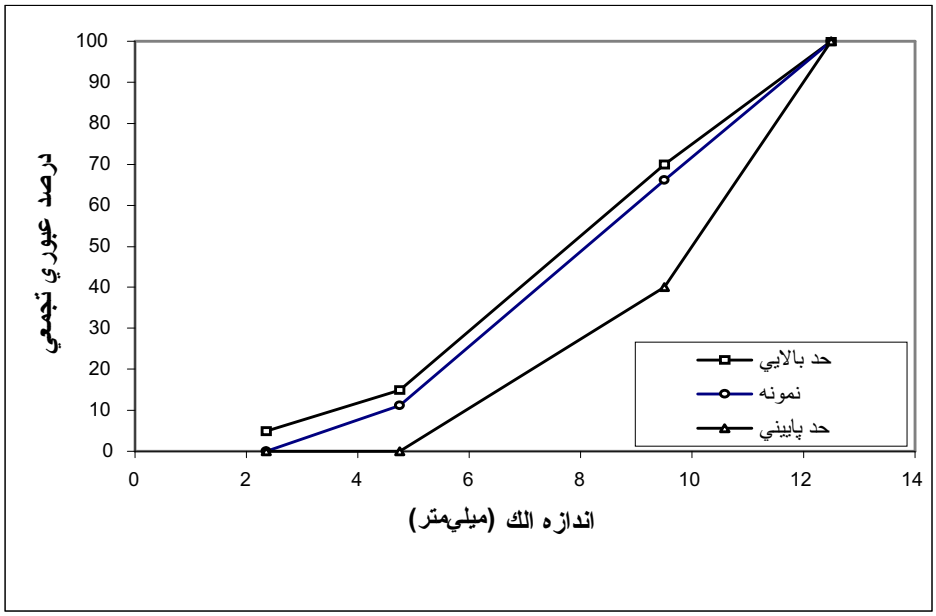
برابر استاندارد ٦١٨ ASTM-C، مجموع درصد وزنی اکسیژن و سیلیسیم نباید کمتر از ۷۰ درصد باشد. با توجه به جدول ۲ ملاحظه می‌گردد که خاکستر پوسته شلتوک تولید شده با مشخصات استاندارد هم‌خوانی دارد. نتایج حاصل از آزمایش پراش‌سنجی پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی روی خاکستر تهیه شده، نشان می‌دهد که سیلیسیم و اکسیژن، عناصر غالب در ساختار خاکستر تولید شده می‌باشند. مقدار بسیار جزئی (در حدود پنج درصد) از سیلیس و کلرید پتاسیم به

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

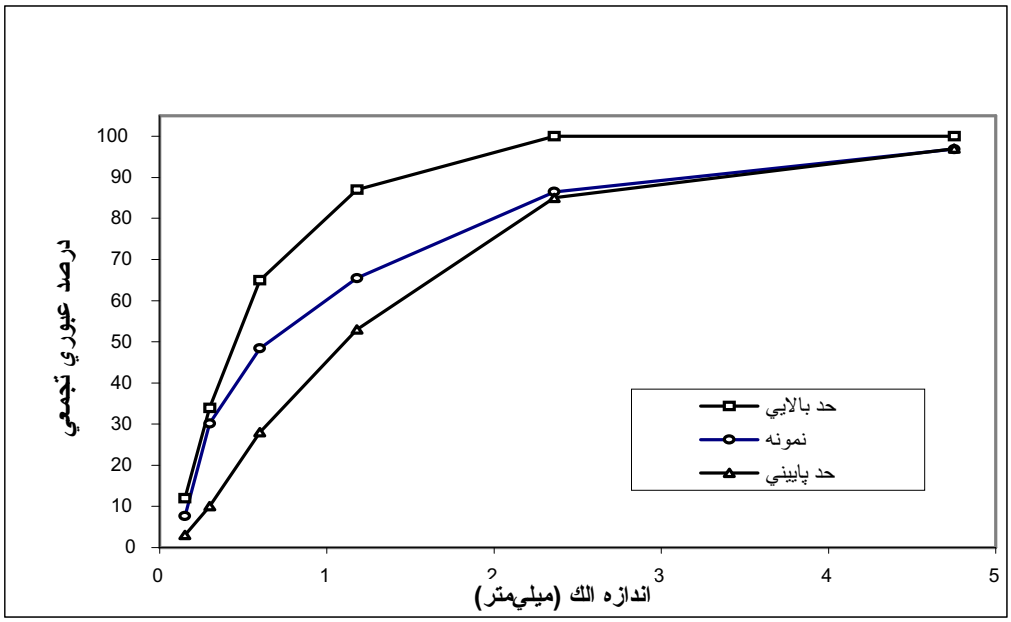
[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]

جدول ۱. ویژگی‌های بتن‌های ساخته شده

ویژگی / شماره	۱	۲	۳
علامت اختصاری	A	B	C
حجم سیمان نسبت به بتن کنترل (٪)	۱۰۰	۸۰	۷۰
میزان خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین	۰	۲۰	۳۰



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح درشت‌دانه



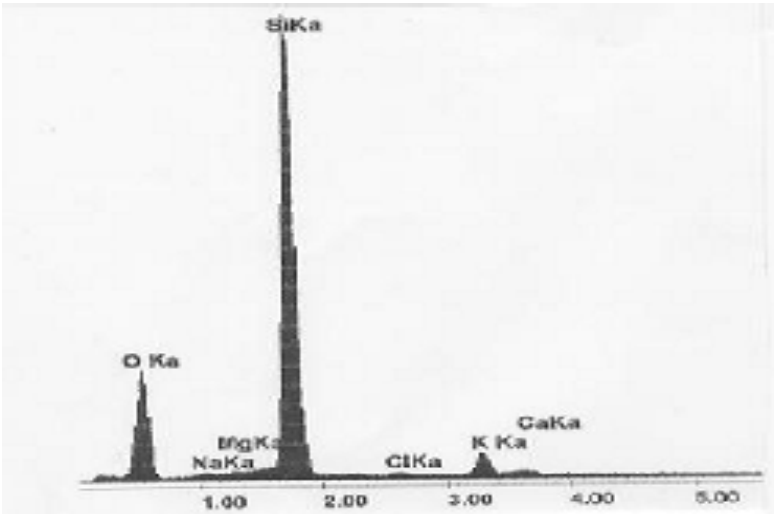
شکل ۲. منحنی دانه‌بندی مصالح ریزدانه

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]

جدول ۲. نتایج تجزیه خاکستر پوسته شلتوک به وسیلهٔ میکروسکوپ الکترونی

عناصر تشکیل دهنده	درصد وزنی	درصد اتمی
اکسیژن	۳٤/٦٦۱	٤۸/۸۰٤
سدیم	۰/۷۱۰	۰/٦۹٦
منیزیم	۰/۵۲۷	۰/٤۸۹
سیلیسیم	۵۷/۷۷۵	٤٦/۳٤۰
کلر	۰/٦۲٦	۰/۳۹۸
کلسیم	۰/۷٦۸	۰/٤۳۲
پتاسیم	٤/۹۳۲	۲/۸٤۱
کل	۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰



شکل ۳. نقطهٔ اوج مربوط به خاکستر پوستهٔ شلتوک، استخراج شده به وسیلهٔ میکروسکوپ الکترونی

صورت بلوری، و بقیه سیلیس موجود در خاکستر (بیش از ۸۵ درصد) به صورت غیر بلوری و بی‌شکل، ترکیب خاکستر تولید شده را تشکیل می‌دهند، که نشان دهنده مرغوبیت و زیاد بودن فعالیت پوزولانی این خاکستر است. برای افزایش نرمی ذرات، سطح مخصوص و در نتیجه افزایش فعالیت پوزولانی، لازم است که خاکستر تا رسیدن به حد مطلوب نرمی و سطح مخصوص، آسیاب گردد. این عمل به کمک گلوله‌های فولادی (آسیاب لوس آنجلس) و در مدت یک ساعت انجام گردید. پس از آسیاب کردن، تمامی خاکستر حاصل از الک ۰/۷۵ میلی‌متر گذرانده شد.

با در نظر گرفتن کارایی و اسلامپ ۵-۷/۵ سانتی‌متر، مقدار آب و در نهایت طرح اختلاط نهایی برای کلیه تیمارها پس از تصحیحات لازم به صورت کامل در جدول ۳ آمده است (۵، ۹، ۱۰ و ۱۱) .

برای بررسی مقاومت فشاری و کششی و افت وزن نمونه‌های آزمایشگاهی نگهداری شده در داخل آب و محلول سولفات، ٤۰۵ نمونه با استفاده از قالب‌های مکعبی به ابعاد ۷۰ میلی‌متر و قالب‌های استوانه‌ای به قطر ۵۰/۸ و ارتفاع ۱۰۱/٦ میلی‌متر در شرایط آزمایشگاهی ساخته شد.

از کل نمونه‌ها، ۲۷۰ نمونه بتن ساخته شده از سه تیمار، در

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]

جدول ۳. طرح اختلاط بتن تیمارهای مختلف با کارایی ثابت برای حجم واحد بتن (بر حسب کیلوگرم)

مصالح / تیمار	سیمان	آب	شن	ماسه	خاکستر پوسته شلتوک
A	۳۰۰	۱۹۲	۷۸۸/۵	۱۰۶٤/۸	—
B	۲٤۰	۲۲۲	۷۸۸/۵	۱۰۶٤/۸	٦۰
C	۲۱۰	۲۳۷	۷۸۸/۵	۱۰۶٤/۸	۹۰

جدول ٤. مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی برای کل تیمارهای بتن

مشخصات / تیمار	شمار کل بتن	شمار نمونه‌های داخل محلول سولفات					
		سولفات منیزیم		سولفات سدیم		سولفات کلسیم	
		مکعبی	استوانه‌ای	مکعبی	استوانه‌ای	مکعبی	استوانه‌ای
A	۱۳۵	۳۰	۱۵	۳۰	۱۵	۳۰	۱۵
B	۱۳۵	۳۰	۱۵	۳۰	۱۵	۳۰	۱۵
C	۱۳۵	۳۰	۱۵	۳۰	۱۵	۳۰	۱۵
جمع کل	٤۰۵	۹۰	٤۵	۹۰	٤۵	۹۰	٤۵

داخل محلول چهار درصد سولفات کلسیم، منیزیم و سدیم قرار گرفت، و آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی برای کلیه تیمارها پس از ۷، ۲۸، ٦۰، ۹۰ و ۱۸۰ روز انجام گردید. برای تعیین تغییرات وزنی نمونه‌های ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین، ۱۳۵ نمونه مکعبی از سه تیمار A، B و C (٤۵ نمونه مکعبی از هر تیمار) به منظور نگهداری در محیط‌های سولفاته ساخته شد. نخست نمونه‌ها به مدت ۱٤ روز به منظور عمل‌آوری در داخل حوضچه آب با دمای ۲±۲۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری گردید. پس از ۱٤ روز، بلافاصله بعد از خارج کردن نمونه‌ها از داخل آب، سفیدک و جرم‌های سطح رویی تمامی نمونه‌ها به دقت تمیز شد و به وسیلهٔ ترازوی دقیق آزمایشگاهی، تک تک نمونه‌ها توزین و سپس در داخل محلول‌های چهار درصد سولفات قرار داده شدند. پس از ۱۸۰ روز، بلافاصله بعد از خارج کردن از محلول‌های سولفات، دوباره سفیدک و جرم سطحی نمونه‌ها تمیز شده و وزن گردیدند. در جدول ٤ مشخصات نمونه‌های آزمایشگاهی برای کل تیمارهای بتن آورده شده است.

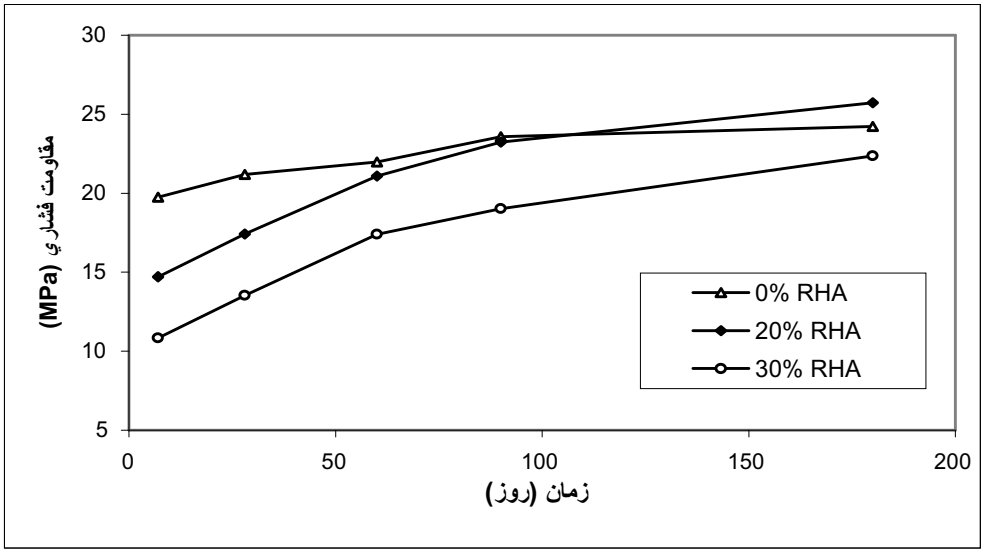
در این پژوهش به منظور ثابت نگاه داشتن pH محیط سولفات‌دار، پس از گذشت یک و دو ماه از قرارگیری نمونه‌ها در داخل محلول‌های سولفات، محلول سولفات دوباره تعویض گردید. پس از تهیه محلول چهار درصد سولفات جدید، مجدداً نمونه‌های بتن در داخل محلول سولفات قرار داده شدند (۳، ٤ و ۱۲).

نتایج و بحث

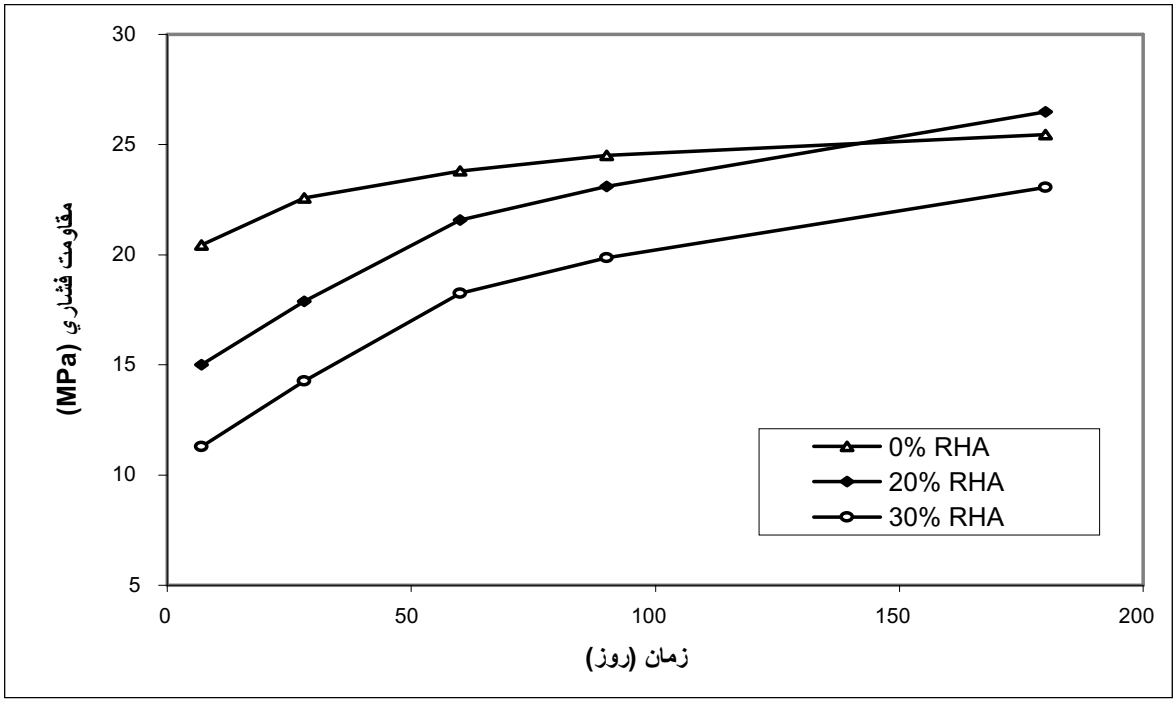
با توجه به شکل‌های ٤، ۵ و ٦ مشاهده می‌گردد که مقاومت فشاری نمونه‌ها در هر سه محیط سولفات با زمان افزایش می‌یابد، و این افزایش در نمونه‌های دارای خاکستر پوسته شلتوک بیش از بتن کنترل می‌باشد. هم‌چنین، نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که روند افت مقاومت در هر سه محیط سولفاتی در بتن کنترل (بدون خاکستر پوسته شلتوک) بیش از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]



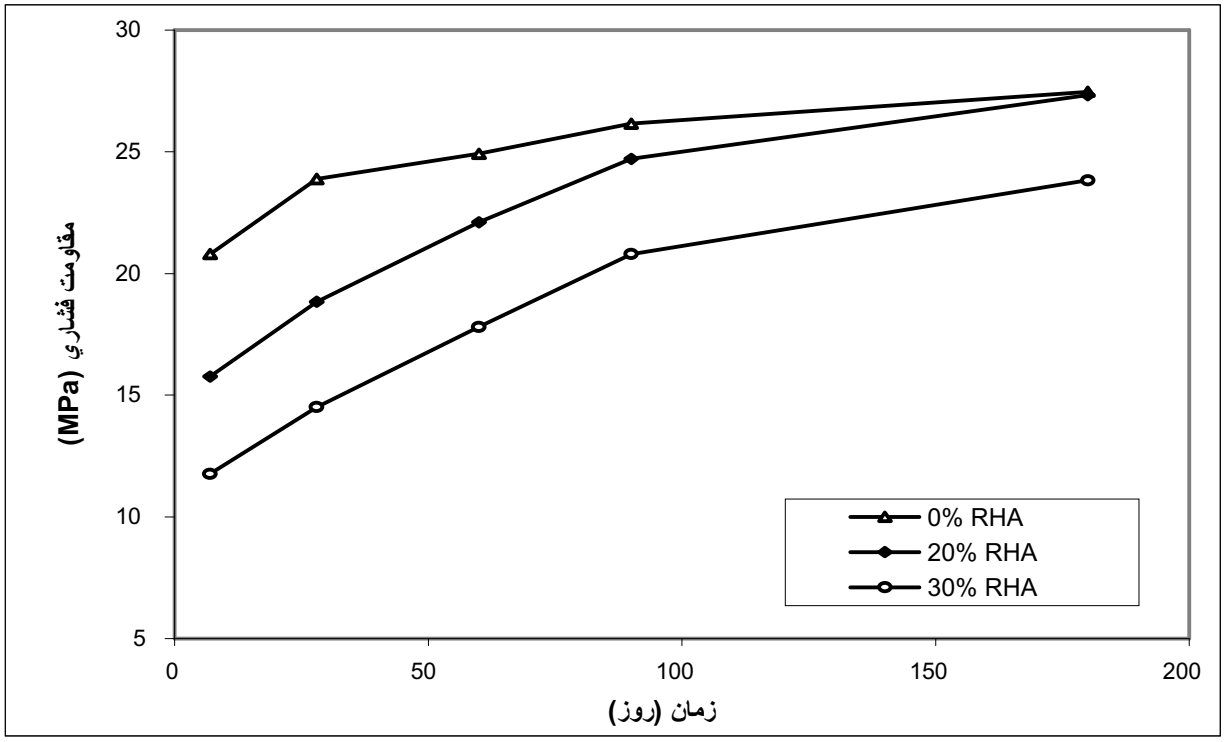
شکل ٤. تأثیر زمان بر روند مقاومت فشاری بتن ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین در محلول سولفات منیزیم



شکل ۵. تأثیر زمان بر روند مقاومت فشاری بتن ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین در محلول سولفات سدیم

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]



شکل ٦. تأثیر زمان بر روند مقاومت فشاری بتن ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین در محلول سولفات کلسیم

بتن‌هایی است که در ترکیبات آن‌ها از خاکستر پوسته شلتوک استفاده شده است. کمترین افت مقاومت فشاری متعلق به نمونه‌های بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک می‌باشد. میزان تأثیر سولفات منیزیم بر افت مقاومت فشاری تمامی نمونه‌ها به ترتیب بیشتر از میزان تأثیر سولفات سدیم و سولفات کلسیم است. با توجه به بالا بودن نسبت آب به سیمان (W/C) تیمارهای B و C نسبت به تیمار کنترل، قاعدتاً انتظار می‌رود که مقاومت فشاری این دو کمتر از بتن کنترل باشد، که وجود خاکستر پوسته شلتوک سبب آن شده، و بالا بودن نسبت آب به سیمان باعث افزایش کارایی تیمارهای B و C شده است، که بیانگر فعالیت پوزولانی در بتن حاوی خاکستر پوسته شلتوک با گذشت زمان می‌باشد.

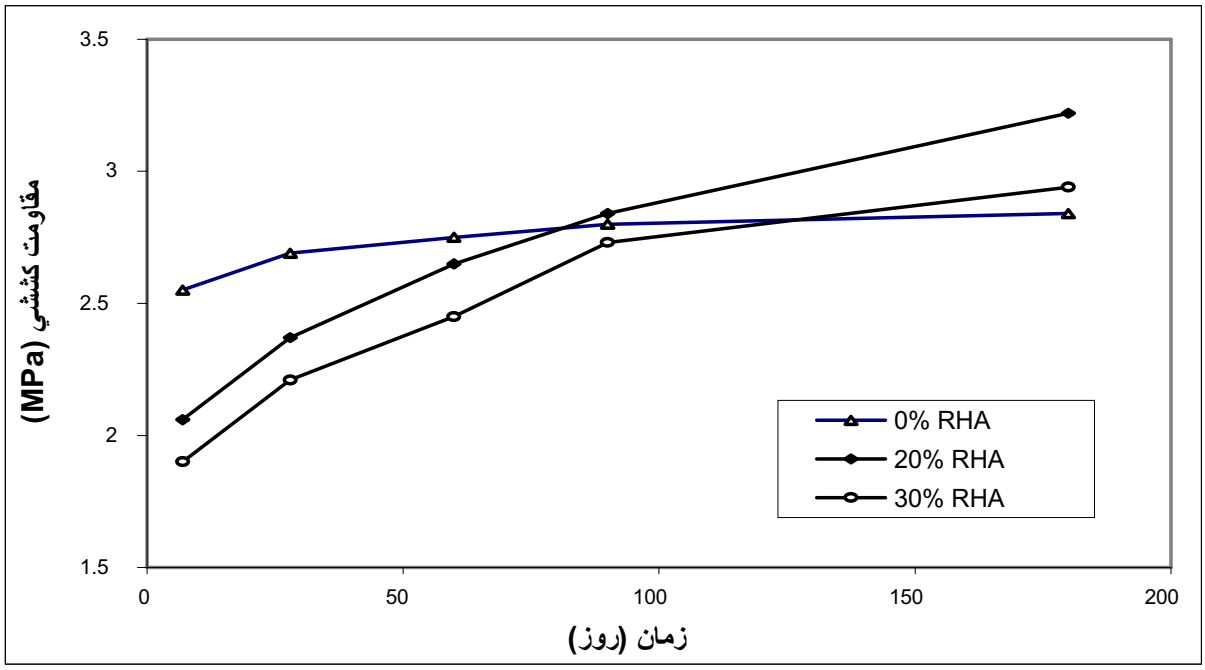
با توجه به شکل‌های ۷، ۸ و ۹ مشاهده می‌شود که روند کسب مقاومت کششی (شیب خط) نیز همانند روند مقاومت فشاری، در بتن‌های ساخته شده با خاکستر شلتوک جای‌گزین، در هر سه محیط سولفاتی، شدیدتر از بتن کنترل است. میزان کسب مقاومت کششی بتن‌های حاوی خاکستر پوسته شلتوک در سنین پایین، کمتر از مقاومت کششی بتن کنترل است، ولی در سنین بالاتر به علت انجام واکنش‌های پوزولانی خاکستر پوسته شلتوک، روند کسب مقاومت کششی افزایش می‌یابد، و در سن ۱۸۰ روز، بیشترین مقاومت کششی به بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک تعلق دارد. علت این امر وجود واکنش‌های پوزولانی شدید در این نوع بتن‌ها است.

نتایج حاصل از آزمایش افت وزن نمونه‌ها برای هر بتن در سن ۸۰ ۱روزه در جدول ۵ آمده است.

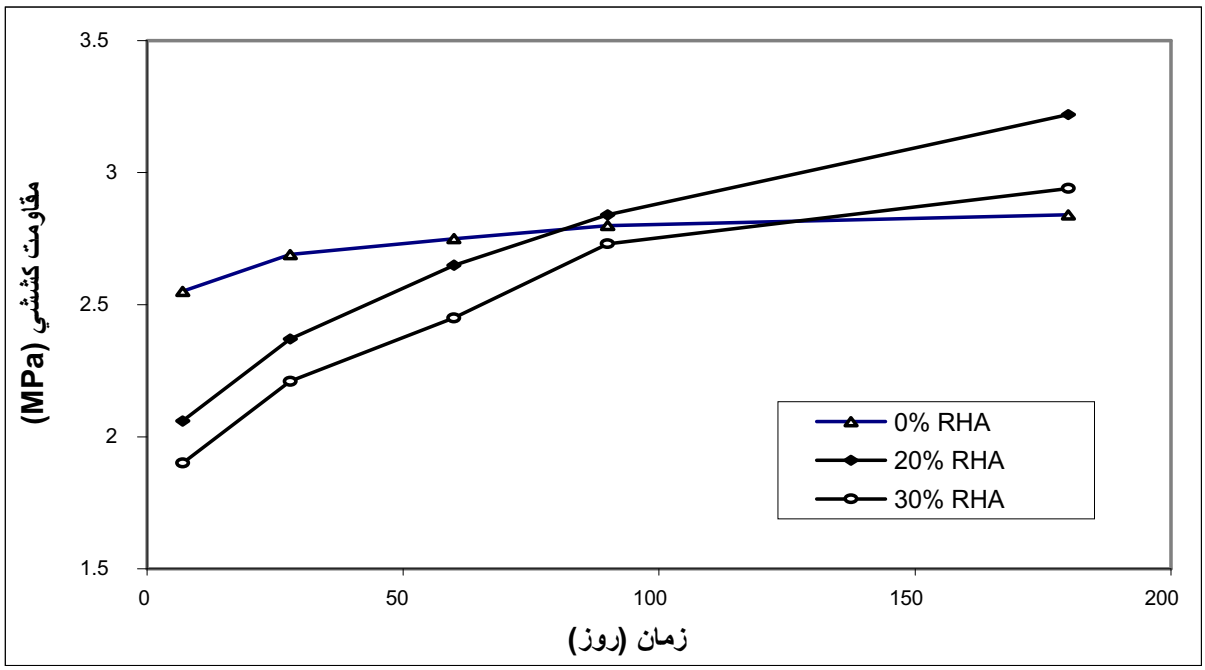
با توجه به نتایج به دست آمده ملاحظه می‌گردد که در هر سه محیط سولفاتی، بتن کنترل بیش از سایر بتن‌هایی که در آن‌ها از خاکستر پوسته شلتوک استفاده شده، کاهش وزن پیدا کرده است. به طوری که در هر سه محیط سولفات، بتن کنترل کاهش وزنی در حدود سه برابر بتن B (با ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک) و ۲/٤ برابر بتن C (با ۳۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک) دارد. کاهش وزن بتن‌های حاوی پوسته شلتوک در

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]



شکل ۷. تأثیر زمان بر روند مقاومت کششی بتن ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین در محلول سولفات منیزیم



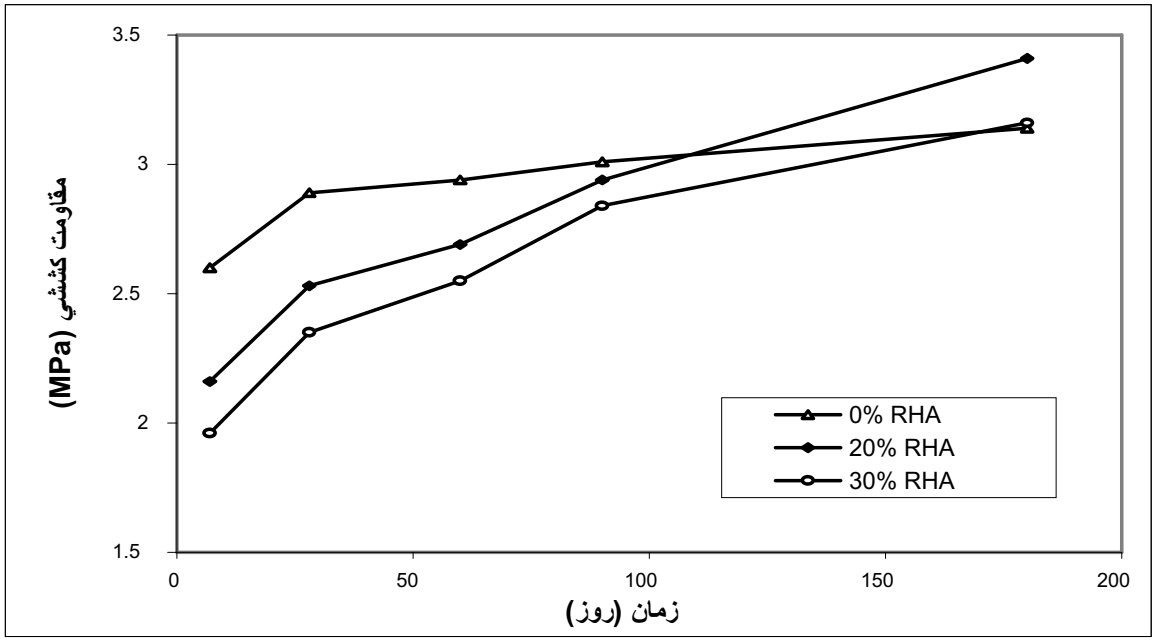
شکل ۸. تأثیر زمان بر روند مقاومت کششی بتن ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین در محلول سولفات سدیم

محیط‌های سولفاته نسبت به بتن کنترل بـه معنـی کـاهش نفـوذ سولفات‌ها به داخل بتن است. این موضوع می‌تواند ناشی از کـم شدن سوراخ‌های ریز بتن حاوی خاکستر پوسـته شـلتوک، و یـا تبدیل آنها به سوراخ‌های ریز کوچک‌تـر بـا نفـوذپذیـری کمـتر باشد.

با استفاده از نرم افزار SPSS، آزمون آنـالیـز واریانس یـک

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]



شکل ۹. تأثیر زمان بر روند مقاومت کششی بتن ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین در محلول سولفات کلسیم

جدول ۵. کاهش وزن بتن‌های ساخته شده با درصدهای مختلف خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین در محلول‌های سولفات

بتن	درصد خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین	کاهش وزن[1] (گرم)		
		سولفات منیزیم	سولفات سدیم	سولفات کلسیم
		۱۸۰ روزه	۱۸۰ روزه	۱۸۰ روزه
A	۰	۴۳ [a]	۳۱ [a]	۱۷ [a]
B	۲۰	۱۴ [b]	۱۰ [b]	۵ [b]
C	۳۰	۱۸ [c]	۱۳ [c]	۷ [bc]

۱. میانگین سه تکرار

میانگین‌هایی که به ترتیب در هر ستون در یک حرف مشترک هستند بر اساس آزمون LSD در سطح یک درصد معنی‌دار نیستند.

طرفه برای بررسی وجود و تعیین محل تفاوت آماری نمونه‌ها انجام گرفت. محل وجود تفاوت از طریق تحلیل Post Hoc با اجرای آزمون LSD (Least significant difference)، با استفاده از میانگین‌های نمونه‌ها برای مقایسات مکرر مشخص شد. نتایج نشان می‌دهد که در سن ۱۸۰ روز و در محیط سولفات منیزیم، اختلاف مقاومت فشاری بین بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک و بتن کنترل معنی‌دار است ($P<0/01$). هم‌چنین، اختلاف مقاومت فشاری بین بتن حاوی ۲۰ درصد و بتن حاوی ۳۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک نیز معنی‌دار است.

چنین وضعیتی در محیط سولفات سدیم نیز صادق است. در محیط سولفات کلسیم در سن مذکور، اختلاف مقاومت فشاری بین بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک و بتن کنترل معنی‌دار نیست، ولی اختلاف مقاومت فشاری بین بتن حاوی ۲۰ درصد و بتن حاوی ۳۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک معنی‌دار است ($P< 0/01$).

در سن ۱۸۰ روز و در محیط‌های سولفات منیزیم و سولفات سدیم، اختلاف مقاومت کششی بین بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک و بتن کنترل معنی‌دار است

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]

(P<۰/۰۱). در سن مذکور و در محیط سولفات کلسیم، اختلاف مقاومت کششی بین بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک و بتن کنترل معنی‌دار نیست (P> ۰/۰۱).

در سن ۱۸۰ روز و در سه محیط سولفات منیزیم، سدیم و کلسیم، اختلاف بین افت وزن بتن حاوی ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک و بتن کنترل در سطح ۹۹ درصد اطمینان (P<۰/۰۱) معنی‌دار است. در این سن و در دو محیط سولفات منیزیم و سدیم، اختلاف بین افت وزن بتن حاوی ۲۰ درصد و بتن حاوی ۳۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک معنی‌دار است (P<۰/۰۱). ولی در محیط سولفات کلسیم این اختلاف معنی‌دار نیست.

بدین ترتیب، با توجه به نتایج چنین بر می‌آید که خاکستر پوسته شلتوک نقش مهمی در کاهش نفوذپذیری بتن دارد. چون پس از سخت شدن سیمان پرتلند حفره‌هایی به جای می‌ماند، محصولات واکنش‌های پوزولانی خاکستر پوسته شلتوک باعث پر شدن حفره‌ها و یا کاهش ابعاد آنها خواهند شد؛ در نتیجه باعث بهبود دوام بتن در برابر حمله سولفات‌ها و کاهش افت وزن در بتن‌های حاوی خاکستر پوسته شلتوک می‌گردد. هم‌چنین، نتایج نشان می‌دهد که تأثیر منفی سولفات‌ها بر دوام نمونه‌های بتن به ترتیب مربوط به سولفات منیزیم، سولفات سدیم و سولفات کلسیم می‌شود. علت این است که سولفات منیزیم افزون بر تأثیر بر هیدروکسید کلسیم و هیدروآلومینات کلسیم، بر سایر ترکیبات هیدراته نیز تأثیر می‌گذارد و باعث ترک خوردن و ریزش از گوشه‌ها و لبه‌های بتن می‌شود، ولی سولفات‌های سدیم و کلسیم به ترتیب با تأثیر بر دو (هیدروکسید کلسیم و هیدروآلومینات کلسیم) و یک عامل فوق (هیدروآلومینات کلسیم) موجب خرابی کمتر بتن می‌گردند.

نتیجه‌گیری

۱. آزمایش‌های به عمل آمده روی خاکستر پوسته شلتوک نشان می‌دهد که در حدود ۸۵-۹۰ درصد ترکیبات آن را اکسید سیلیسیم غیر بلوری تشکیل می‌دهد. این موضوع به خوبی فعالیت زیاد پوزولانی خاکستر پوسته شلتوک را در مقایسه با سایر پوزولان‌ها نشان می‌دهد.

۲. مقاومت فشاری و کششی نمونه‌های بتن نگهداری شده در محیط‌های سولفاتی، با گذشت زمان افزایش می‌یابد. هم‌چنین، در محیط‌های سولفاتی، افزایش مقاومت در نمونه‌های بتن حاوی خاکستر پوسته شلتوک در درازمدت بیشتر از نمونه‌های بتن کنترل است.

۳. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی و دوام بتن در محیط‌های سولفاتی، مزیت استفاده از خاکستر پوسته شلتوک را به عنوان ماده پوزولانی به خوبی آشکار می‌سازد. به طوری که، نتایج نشان می‌دهد که در هر سه محیط سولفاتی مورد آزمایش، بتن کنترل در سن ۱۸۰ روزه، حدود سه برابر بتن با ۲۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک و ۲/٤ برابر بتن با ۳۰ درصد خاکستر پوسته شلتوک، افت وزن پیدا می‌کند.

٤. خاکستر پوسته شلتوک نقش مهمی در کاهش نفوذپذیری بتن دارد. با توجه به این که پس از سخت شدن سیمان پرتلند حفره‌هایی بر جای می‌ماند، بنابراین محصولات واکنش‌های پوزولانی خاکستر پوسته شلتوک باعث پر شدن حفره‌ها و یا کاهش ابعاد آنها خواهد شد، و در نتیجه باعث بهبود دوام بتن در برابر حمله سولفات‌ها می‌گردد.

۵. درصد بهینه جای‌گزینی خاکستر پوسته شلتوک به جای سیمان پرتلند معمولی با معیار مقاومت فشاری و کششی ۱۸۰ روزه و دوام در برابر حمله سولفات‌ها، ۲۰ درصد می‌باشد.

٦. ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن حاوی خاکستر پوسته شلتوک جای‌گزین تا ۳۰ درصد نشان می‌دهد که از این نوع بتن می‌توان در بسیاری از کارهای عمرانی، از جمله پوشش بتنی کانال‌های آبیاری که در محیط‌های سولفاته قرار دارند، استفاده کرد.

۷. میزان تأثیر سولفات منیزیم بر افت مقاومت فشاری و کششی و نیز کاهش وزن بتن به ترتیب بیشتر از

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]

سولفات‌های سدیم و کلسیم است.

۸. با توجه به نتایج به دست آمده از این پژوهش، می‌توان از خاکستر پوسته شلتوک به عنوان یک روش دفع مؤثر این پس‌ماند کشاورزی در صنعت بتن استفاده کرد.

سپاسگزاری

از سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان اصفهان، دانشکده کشاورزی و دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان، که امکانات مالی و اجرایی این پژوهش را فراهم ساختند، سپاسگزاری می‌گردد.

منابع مورد استفاده

۱. بینا، ق.، ح. رحیمی و ع. ا. رمضانیان‌پور. ۱۳۷۹. نقش خاکستر پوسته برنج در ساخت قطعات ساختمانی سبک، لوح فشردهٔ مجموعه مقالات سومین کنفرانس بین‌المللی بتن، ۱۲-۱٤ اردیبهشت ۱۳۷۹، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

۲. جعفرپور، ف. ۱۳۷٦. *ساخت سیمان بنایی با پوسته برنج*. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۵۱، تهران.

۳. رمضانیان‌پور، ع. ا. *بررسی خواص مهندسی و پایایی بتن‌های ساخته شده با سرباره آهن‌گدازی ذوب آهن اصفهان و مقایسه با بتن کنترل*. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، تهران.

٤. رمضانیان‌پور، ع. ا. ۱۳۷٦. *دوام بتن و نقش سیمان‌های پوزولانی*. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۷٤، تهران.

۵. رمضانیان‌پور، ع. ، ا . ۱۳۷۷. *طرح اختلاط بتن*. مرکز انتشارات دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران.

٦. رمضانیان‌پور، ع. ا.، ف. جعفرپور و م. ح. ماجدی اردکانی. ۱۳۷٤. *بررسی تحقیقات انجام شده بر روی مصارف پوسته برنج و خاکستر آن در صنعت ساختمان*. مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، نشریه شماره ۲۱۸، تهران.

۷. روانشادی، ج. ۱۳۷۲. بررسی اثرات خاکستر پوسته برنج بر خواص مکانیکی و فیزیکی بتن معمولی و غلطکی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تهران.

۸. سازمان برنامه و بودجه. ۱۳۷۳. *ضوابط و معیارهای فنی شبکه‌های آبیاری و زه‌کشی: مشخصات فنی و عمومی*. نشریه شماره ۱۰۸، تهران.

۹. سامع، س. ۱۳۷۷. *کیفیت و طرح اختلاط بتن*. مرکز انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد دانشگاه صنعتی اصفهان.

۱۰. شاه نظری، م. ۱۳۷٤. *دستورالعمل‌های آزمایشگاهی بتن*. انتشارات پرهام، تهران.

۱۱. مستوفی نژاد، د. ۱۳۷٤. *تکنولوژی و طرح اختلاط بتن*. دفتر فنی یزد.

12. Al-Amoudi, O. S. B., M. Maslehuddin and M. M. Saadi. 1995. Effect of magnesium sulfate and sodium sulfate on the durability performance of plain and blended cements. ACI Materials J. 92(1): 15-24.

13. Cook, D. J. 1986. Rice husk ash. Cement Replacement Materials 3(4): 120-131.

14. Kajorncheappunngam, S. and D. F. Stewart. 1992. Rice husk ash in roller compacted concrete. Concrete Internat. 14(4): 38-44.

15. Malhotra, V. M. 1992. Fly ash, slag, silica fume, and rice husk ash in concrete. Concrete Internat. 15(4): 23-28.

16. Manmohan, D. and P. K. Mehta. 1981. Influence of pozzolanic, slag, and chemical admixtures on pore size distribution and permeability of hardened cement pastes. Cement, Concrete, and Aggregates 3(1): 3-67.

17. Mehta, P. K. 1973. Siliceous ashes and hydraulic cements prepared thereform. Belgium Patent 802909, U.S. Patent 4105459.

18. Mehta, P. K. 1992. Rice husk ash, a unique supplementary cementing material. Proceeding of the International Symposium on Advances in Concrete Technology, Athens, Greece.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]

19. Ramazanianpour, A. A. 1987. Properties and durability of pozzolanic cement mortars and concretes. Ph.D. Thesis, Dept. of Civil Eng. The Univ. of Leeds, UK.
20. Pitt, N. 1976. Process for preparation of siliceous ashes. U.S. Patent 3959007.
21. Smith, R. 1984. Rice Husk Ash Cement: Progress in Development and Application. A Report on Site Visits to India, Nepal and Pakistan. Intermed. Technol. Publ. Ltd., 45 p.
22. Zhang, M. H. and V. M. Malhotra. 1996. High-performance concrete incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. ACI Material J., Title No. 93-M72, PP. 629-636.

[Downloaded from iutjournals.iut.ac.ir on 2026-06-06]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1382.7.2.2.8]