ارزیابی عملکرد مکانیکی بتن ژئوپلیمری پایه خاکستر بادی اصلاح‌شده

علمی – پژوهشی

مصطفی مهردادفر، دانشجوی دکترا، گروه مهندسی عمران، واحد بین المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، کیش، ایران
*بابک امین نژاد (نویسنده مسئول)، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران
وحید رستمی، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران
علیرضا لرک، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران
*نویسنده مسئول : babak.aminnejad@iau.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۱– پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۵
صفحه ۳۷۸-۳۶۱

چکیده

با توجه به نیاز روزافزون صنعت راه و روسازی به مصالح پایدار، بادوام و سازگار با محیط‌زیست، استفاده از بتن‌های ژئوپلیمری به‌عنوان جایگزینی مناسب برای بتن سیمانی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این پژوهش، تأثیر هم‌زمان سیستم لاتکس- سولفا آلومینا و الیاف شیشه مقاوم به قلیا بر خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی کلاس F مورد بررسی قرار گرفت. محلول فعال‌کننده قلیایی با غلظت ۱۴ مولار تهیه شد و نمونه‌ها با سه درصد لاتکس اکریلیک (۵، ۱۰ و ۱۵ درصد) و سه درصد الیاف شیشه (۰/۴، ۰/۶ و ۰/۸ درصد) ساخته شدندبه جهت اصلاح و بهبود مکانیکی-جمع شدگی در طرح های اختلاط نیز از پودر سولفات آلومنیوم نیز استفاده گردید . نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که مقاومت فشاری تا مقدار بهینه ۱۰ درصد لاتکس و ۰/۶ درصد الیاف افزایش یافته و بیشترین مقدار آن برابر با ۶۸/۸۰ مگاپاسکال به دست آمد. در مقابل، بیشترین مقاومت کششی (۷/۷۰ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۹/۵۷ مگاپاسکال) در نمونه حاوی ۱۵ درصد لاتکس و ۰/۸ درصد الیاف مشاهده شد. تحلیل نتایج نشان داد که سیستم اصلاحی لاتکس-سولفا آلومینا با تشکیل فیلم‌های پلیمری و بهبود پیوستگی ماتریس ژئوپلیمری، و الیاف شیشه با کنترل رشد ترک‌ها و افزایش ظرفیت انتقال تنش، موجب بهبود عملکرد مکانیکی بتن شده‌اند. همچنین مشخص شد که طرح اختلاط بهینه برای مقاومت فشاری با طرح اختلاط بهینه برای مقاومت کششی و خمشی متفاوت است؛ بنابراین انتخاب طرح اختلاط باید بر اساس شاخص‌های عملکردی مورد انتظار انجام گیرد. با توجه به مقاومت‌های مکانیکی مناسب و ظرفیت بالای کنترل ترک، بتن ژئوپلیمری اصلاح‌شده در این پژوهش می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در روسازی‌های بتنی، باندهای فرودگاهی و سایر زیرساخت‌های حمل‌ونقل باشد.

واژه‌های کلیدی: بتن ژئوپلیمری، خاکستر بادی، لاتکس اکریلیک، سولفا آلومینا الیاف شیشه مقاوم به قلیا

۱-مقدمه

شبکه‌های حمل‌ونقل جاده‌ای از مهم‌ترین زیرساخت‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی هر کشور محسوب می‌شوند و عملکرد مناسب آن‌ها نقش مستقیمی در کاهش هزینه‌های نگهداری، افزایش ایمنی و بهبود کیفیت حمل‌ونقل دارد. در سال‌های اخیر، افزایش حجم ترافیک، رشد بارهای محوری وسایل نقلیه سنگین و شرایط محیطی مخرب، موجب کاهش عمر بهره‌برداری روسازی‌های متداول شده است (Badkul et al, 2022). ازاین‌رو، توسعه مصالح نوین با مقاومت مکانیکی و دوام بیشتر، به یکی از مهم‌ترین محورهای پژوهش در مهندسی راه و روسازی تبدیل شده است. در میان انواع روسازی‌ها، روسازی‌های بتنی به دلیل ظرفیت باربری بالا، مقاومت مناسب در برابر تغییرشکل‌های دائمی، عمر بهره‌برداری طولانی، کاهش

هزینه‌های تعمیر و نگهداری و عملکرد مطلوب در شرایط آب‌وهوایی مختلف، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای بزرگراه‌ها، باند فرودگاه‌ها، پایانه‌های بار و مسیرهای پرتردد شناخته می‌شوند (Tahir et al, 2022). با این حال، تولید سیمان پرتلند به‌عنوان ماده اصلی بتن متداول، با مصرف بالای انرژی و انتشار قابل توجه دی‌اکسیدکربن همراه است و چالش‌های زیست‌محیطی متعددی را به دنبال دارد. در راستای توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی صنعت ساخت، بتن ژئوپلیمری به‌عنوان جایگزینی مناسب برای بتن سیمانی مورد توجه گسترده پژوهشگران قرار گرفته است. این نوع بتن با استفاده از مواد آلومینوسیلیکاتی نظیر خاکستر بادی و فعال‌کننده‌های قلیایی تولید می‌شود و علاوه بر کاهش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای، از مقاومت شیمیایی بالا، نفوذپذیری کم، پایداری حرارتی مناسب و دوام مطلوب در محیط‌های خورنده برخوردار است (Poltue et al, 2020). این ویژگی‌ها سبب شده است بتن ژئوپلیمری گزینه‌ای مناسب برای کاربرد در روسازی‌های بتنی، به‌ویژه در مسیرهای تحت بارگذاری سنگین و محیط‌های مهاجم نظیر مناطق ساحلی، صنعتی و دارای سولفات، محسوب شود. علاوه بر این، استفاده از خاکستر بادی به‌عنوان یکی از محصولات جانبی نیروگاه‌ها، ضمن کاهش مصرف سیمان، موجب بازیافت پسماندهای صنعتی و حرکت در جهت اقتصاد چرخشی می‌شود (Pratap et al, 2023). با وجود مزایای متعدد، بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی همچنان با چالش‌هایی نظیر رفتار نسبتاً ترد، مقاومت کششی و خمشی محدود، جمع‌شدگی خشک و حساسیت به شرایط عمل‌آوری روبه‌رو است. این محدودیت‌ها در روسازی‌های بتنی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند؛ زیرا این سازه‌ها به‌طور مداوم تحت بارهای تکراری ناشی از عبور وسایل نقلیه، تنش‌های ناشی از تغییرات دمایی و عوامل مخرب محیطی قرار دارند. ایجاد ریزترک‌ها و گسترش آن‌ها می‌تواند موجب کاهش دوام، افزایش نفوذ عوامل خورنده و در نهایت کاهش عمر بهره‌برداری روسازی شود(Sofri,et al, 2022). بنابراین، ارتقای مقاومت کششی، مقاومت خمشی، کنترل جمع‌شدگی و افزایش دوام بتن ژئوپلیمری از مهم‌ترین نیازهای توسعه این مصالح برای کاربردهای راهسازی به شمار می‌رود(Yue et al, 2022).

در سال‌های اخیر، پژوهشگران روش‌های مختلفی را برای بهبود عملکرد بتن ژئوپلیمری پیشنهاد کرده‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به اصلاح ساختار ماتریس با استفاده از پلیمرها، به‌کارگیری الیاف و بهینه‌سازی ترکیب محلول‌های فعال‌کننده قلیایی اشاره کرد(Horpibulsuk et al, 2017). اصلاح پلیمری با سیستم لاتکس–سولفا آلومینا می‌تواند با تشکیل فیلم‌های پلیمری در ساختار بتن، موجب کاهش تخلخل، بهبود جمع شدگی و پیوستگی در ریزساختار، افزایش مقاومت در برابر رشد ترک و کاهش نفوذپذیری شود. از سوی دیگر، استفاده از الیاف شیشه مقاوم به محیط قلیایی از طریق پل‌زنی ترک‌ها، انتقال مناسب تنش و افزایش جذب انرژی، موجب بهبود مقاومت کششی، مقاومت خمشی و رفتار پس از ترک‌خوردگی بتن می‌شود (Wongkvanklom et al, 2025). همچنین، غلظت محلول هیدروکسید سدیم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای فرآیند ژئوپلیمریزاسیون، تأثیر مستقیمی بر میزان تشکیل ژل‌های آلومینوسیلیکاتی، تراکم ریزساختار و در نتیجه خواص مکانیکی و دوام بتن دارد (Patil&Joshi, 2025). با وجود مطالعات متعدد درباره هر یک از این عوامل، بررسی هم‌زمان اثر متقابل ایجاد سیسمی اصلاحی حاوی لاتکس، سولفا آلومینا و الیاف بوده که هنوز مطالعات در این زمینه محدود است. با توجه به نیاز روزافزون به روسازی‌های بادوام، کم‌هزینه و سازگار با محیط زیست، توسعه بتن‌های ژئوپلیمری اصلاح‌شده می‌تواند نقش مهمی در افزایش عمر مفید راه‌ها، کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، افزایش مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، جمع‌شدگی و حملات سولفاتی ایفا کند (Chelluri et al, 2025). چنین ویژگی‌هایی، این نوع بتن را به گزینه‌ای مناسب برای اجرای روسازی‌های صلب، باندهای فرودگاهی، محوطه‌های صنعتی و سایر زیرساخت‌های حمل‌ونقل که تحت بارگذاری‌های سنگین و شرایط محیطی سخت قرار دارند، تبدیل می‌کند.

در سال‌های اخیر، توسعه بتن‌های ژئوپلیمری به‌عنوان جایگزینی پایدار برای بتن سیمانی، مورد توجه گسترده محققان قرار گرفته است. مطالعات جدید نشان می‌دهد که استفاده از مواد آلومینوسیلیکاتی نظیر خاکستر بادی، ضمن کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن، می‌تواند خواص مکانیکی و دوام بتن را نیز بهبود بخشد. مرور جامعی که توسط Meskhi و همکاران (2023) انجام شد، بیان می‌کند که مهم‌ترین چالش‌های بتن ژئوپلیمری همچنان شامل کنترل جمع‌شدگی، رفتار ترد، حساسیت به شرایط عمل‌آوری و دستیابی به دوام بلندمدت در محیط‌های خورنده

است. ازاین‌رو، استفاده از اصلاح‌کننده‌های پلیمری، الیاف و بهینه‌سازی محلول‌های فعال‌کننده به‌عنوان مهم‌ترین راهکارهای پژوهشی آینده معرفی شده‌اند. با گسترش کاربرد بتن ژئوپلیمری در زیرساخت‌های حمل‌ونقل، توجه ویژه‌ای به استفاده از این بتن در روسازی‌های صلب معطوف شده است. Shakor و همکاران (2023) با بررسی کاربرد بتن ژئوپلیمری در روکش‌های نازک بتنی، گزارش کردند که این بتن علاوه بر کاهش اثرات زیست‌محیطی، مقاومت خمشی و ظرفیت باربری مناسبی برای روسازی‌های جاده‌ای فراهم می‌کند. نتایج این مطالعه نشان داد که افزایش غلظت محلول قلیایی و بهینه‌سازی نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم، موجب افزایش مقاومت فشاری و خمشی شده و امکان استفاده از بتن ژئوپلیمری در پروژه‌های روسازی را فراهم می‌سازد. از سوی دیگر، بررسی عملکرد بتن ژئوپلیمری در شرایط واقعی بهره‌برداری نیز مورد توجه قرار گرفته است. مطالعه Kantarcı و همکاران (۲۰۲۳) نشان داد که مقاومت در برابر اسید بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی، میکروسلیس و نانوسیلیس، حتی با قرارگیری در شرایط محیطی خورنده، بخش عمده‌ای از خواص مکانیکی خود را حفظ کرده و دوام مناسبی در برابر عوامل محیطی از خود نشان می‌دهد. همچنین مشخص شد که تراکم ریزساختار، میزان تخلخل و نسبت Si/Al از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر عملکرد بلندمدت این بتن هستند. در زمینه کاربرد بتن ژئوپلیمری در روسازی، پژوهش‌های مروری اخیر نیز روند رو به رشد استفاده از این مصالح را تأیید کرده‌اند. Nanda و Priya (2024) بیان کردند که ژئوپلیمرها علاوه بر کاربرد در بتن، در تثبیت لایه‌های روسازی، زیراساس و بستر راه نیز عملکرد مناسبی داشته و می‌توانند ضمن کاهش مصرف سیمان، دوام و پایداری محیط‌زیستی پروژه‌های راهسازی را افزایش دهند. این پژوهش بر ضرورت توسعه بتن‌های ژئوپلیمری با مقاومت بالا برای کاربرد در روسازی‌های تحت بارگذاری سنگین تأکید کرده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های ارتقای عملکرد بتن ژئوپلیمری، استفاده از الیاف است. در این زمینه، Sharma و همکاران (2024) با مرور جامع رفتار انواع الیاف در بتن ژئوپلیمری گزارش کردند که الیاف شیشه مقاوم به قلیا به دلیل مقاومت مناسب در محیط‌های قلیایی، موجب افزایش مقاومت کششی، مقاومت خمشی، جذب انرژی و کنترل گسترش ریزترک‌ها می‌شوند. این پژوهش همچنین بیان می‌کند که عملکرد الیاف وابستگی زیادی به کیفیت پیوند بین الیاف و ماتریس ژئوپلیمری و مقدار مصرف آن‌ها دارد و استفاده بیش از حد از الیاف ممکن است موجب کاهش کارایی بتن و ایجاد نواحی ضعیف شود. Khasawneh (2025) در یک مقاله مروری جامع بیان کرد که بتن ژئوپلیمری به دلیل مقاومت مکانیکی بالا، دوام مناسب و کاهش قابل توجه انتشارCO_2، ظرفیت بالایی برای استفاده در پروژه‌های زیرساختی و روسازی‌های بتنی دارد. این مطالعه همچنین تأکید می‌کند که بهینه‌سازی نوع پیش‌ماده، فعال‌کننده قلیایی و افزودنی‌ها، شرط اصلی توسعه کاربردهای صنعتی بتن ژئوپلیمری است. در مطالعه ای دیگر (۲۰۲۵) نشان داد که استفاده از خاکستر بادی، سرباره، الیاف و افزودنی‌های شیمیایی می‌تواند به تشکیل ریزساختار متراکم‌تر، افزایش مقاومت فشاری و دوام بیشتر بتن ژئوپلیمری منجر شود. نویسندگان بر نقش اثرات هم‌افزای الیاف و افزودنی‌ها در توسعه بتن‌های ژئوپلیمری پرمقاومت تأکید کرده‌اند. Kumar و همکاران (2026) در یک مرور نظام‌مند درباره ژئوپلیمرهای تک‌جزئی مبتنی بر خاکستر بادی گزارش کردند که غلظت و نوع فعال‌کننده قلیایی، به همراه افزودنی‌ها، تأثیر مستقیمی بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، جمع‌شدگی و دوام دارد. این پژوهش همچنین بیان می‌کند که هنوز درباره اثر هم‌زمان فعال‌کننده‌ها و اصلاح‌کننده‌های پلیمری مطالعات محدودی وجود دارد. Nagayama و Ikotun (2026) با مرور آخرین پیشرفت‌های بتن ژئوپلیمری نشان دادند که این مصالح قادرند انتشار کربن را تا حدود ۷۰ درصد نسبت به بتن سیمانی کاهش دهند و در صورت بهینه‌سازی ریزساختار، مقاومت‌های بیش از ۶۰ مگاپاسکال و دوام مطلوبی در محیط‌های خورنده ارائه دهند. با این حال، کنترل ترک، جمع‌شدگی و طراحی اختلاط همچنان از چالش‌های اصلی محسوب می‌شود. Haddaji و همکاران (2026)در مطالعه ای با تمرکز بر کاربردهای روسازی، مکانیزم‌های تخریب کامپوزیت‌های ژئوپلیمری در برابر حمله سولفات، کلرید، محیط‌های اسیدی و دماهای بالا را بررسی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که کاهش نفوذپذیری و کنترل ریزترک‌ها از مهم‌ترین عوامل افزایش دوام روسازی‌های ژئوپلیمری هستند و استفاده از الیاف و اصلاح‌کننده‌های مناسب می‌تواند عملکرد بلندمدت این مصالح را بهبود دهد. Sathe و همکاران (2026) در یک مطالعه آزمایشگاهی نشان دادند که

استفاده از الیاف در بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی باعث افزایش مقاومت کششی و خمشی، کنترل انتشار ترک‌ها و بهبود دوام می‌شود، هرچند افزایش بیش از حد مقدار الیاف موجب کاهش کارایی مخلوط خواهد شد.

در کنار استفاده از الیاف، اصلاح پلیمری نیز به‌عنوان یکی از روش‌های مؤثر در افزایش دوام بتن ژئوپلیمری معرفی شده است. مطالعات جدید نشان داده‌اند که افزودن لاتکس اکریلیکی و سولفا آلومینا باعث کاهش نفوذپذیری، افزایش چسبندگی، بهبود مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و افزایش دوام بتن در محیط‌های خورنده می‌شود (Mailyan et al, 2025). با این حال، اغلب مطالعات موجود تنها به بررسی اثر مستقل پلیمر یا الیاف پرداخته‌اند و اطلاعات محدودی درباره اثر همزمان این دو اصلاح‌کننده در بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی ارائه شده است. عامل مهم دیگر در عملکرد بتن ژئوپلیمری، غلظت محلول فعال‌کننده قلیایی است. مرور مطالعات اخیر نشان می‌دهد که افزایش مولاریته هیدروکسید سدیم موجب تسریع فرآیند ژئوپلیمریزاسیون، افزایش تشکیل ژل‌های آلومینوسیلیکاتی، کاهش تخلخل و در نتیجه بهبود مقاومت مکانیکی و دوام بتن می‌شود(Zhang et al, 2023).

با این وجود، مقدار بهینه مولاریته به نوع پیش‌ماده، شرایط عمل‌آوری و حضور سایر افزودنی‌ها وابسته بوده و هنوز اجماع کاملی در این زمینه وجود ندارد. در مجموع، بررسی مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اگرچه تحقیقات متعددی درباره اثر الیاف، پلیمرها یا غلظت محلول قلیایی بر بتن ژئوپلیمری انجام شده است، اما مطالعات اندکی به بررسی اثر سیستم سولفا آلومینا–لاتکس و الیاف شیشه مقاوم به قلیا بر خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی، با رویکرد کاربرد در روسازی‌ها، پرداخته‌اند. ازاین‌رو، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ تحقیقاتی، به بررسی همزمان این دو عامل و تعیین ترکیب بهینه برای دستیابی به بتن ژئوپلیمری با مقاومت مکانیکی و دوام بالا جهت استفاده در روسازی‌های بتنی می‌پردازد. بر این اساس، هدف از پژوهش حاضر بررسی اثر درصد لاتکس اکریلیک و مقدار الیاف شیشه مقاوم به قلیا بر خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمری مبتنی بر خاکستر بادی است. در این مطالعه، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، جمع‌شدگی خشک شدن، مقاومت سایشی و مقاومت در برابر حمله سولفات مورد ارزیابی قرار گرفته و مناسب‌ترین ترکیب برای دستیابی به بتن ژئوپلیمری با عملکرد مطلوب در کاربردهای روسازی بتنی معرفی می‌شود.

۲–مواد و روش‌ها

۲–۱– معرفی مصالح

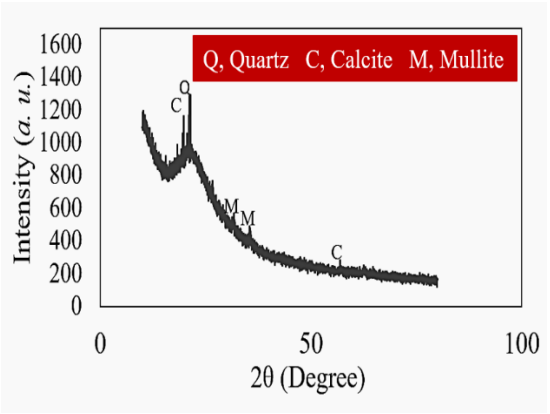
جهت تهیه و توسعه بتن ژئوپلیمری از آلومینوسیلیکات خاکستربادی (شکل ۱)، محلول‌های قلیایی هیدروکسید سدیم، آب شیشه (سیلیکات سدیم)، شن، ماسه و الیاف شیشه ضدقلیا استفاده گردید. مواد آلومینوسیلیکات‌های پوزولانی استفاده شده برای تولید بتن پایدار اصلاح شده ژئوپلیمری، از الیاف شیشه ساخت کارخانه سپاهان و خاکستربادی کلاس F از کارخانه صنایع فروآلیاژ ایران استفاده گردیده است.



شکل ۱. خاکستر بادی مصرفی در این مطالعه

شکل (۲) الگوی پراش پرتو ایکس **(XRD)** خاکستر بادی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مهم‌ترین ویژگی این الگو، وجود یک هاله پهن در محدوده تقریبی ۱۵ تا ۳۵ درجه **(2θ)** است که بیانگر غالب بودن فاز آمورف در ساختار خاکستر بادی است. این فاز آمورف عمدتاً از آلومینوسیلیکات‌های شیشه‌ای تشکیل شده و بخش اصلی مواد واکنش‌پذیر در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون را تشکیل می‌دهد. وجود این هاله نشان می‌دهد که بخش عمده سیلیس و آلومینای موجود در خاکستر بادی به صورت

غیرکریستالی بوده و در محیط قلیایی به‌راحتی حل شده و در تشکیل ژل‌های ژئوپلیمری شرکت می‌کنند؛ بنابراین انتظار می‌رود این خاکستر بادی از فعالیت پوزولانی و ژئوپلیمری مناسبی برخوردار باشد.



شکل ۲. ارزیابی الگوی پراش پرتو ایکس خاکستربادی

علاوه بر فاز آمورف، چندین قله بلوری نیز در الگوی **XRD** مشاهده می‌شود. شاخص‌ترین قله مربوط به کوارتز **(Quartz)** در حدود **$2\theta \approx 26.6°$** است که بیانگر حضور سیلیس بلوری در خاکستر بادی می‌باشد. کوارتز معمولاً از کانی‌های اولیه زغال‌سنگ منشأ گرفته و در دماهای احتراق نیروگاه تغییر فاز نمی‌دهد. این فاز از نظر شیمیایی نسبتاً پایدار بوده و نقش مستقیمی در واکنش ژئوپلیمریزاسیون ندارد، اما به‌عنوان یک پرکننده معدنی می‌تواند در بهبود تراکم ریزساختار و افزایش مقاومت مکانیکی نقش غیرمستقیم ایفا کند. قله‌های مشخص‌شده با **M** مربوط به فاز مولایت **(Mullite)** هستند که در حدود ۲۵ تا ۳۵ درجه مشاهده می‌شوند. مولایت از مهم‌ترین محصولات حاصل از احتراق زغال‌سنگ بوده و دارای ساختار بلوری بسیار پایدار است. این فاز نیز فعالیت ژئوپلیمری محدودی دارد، اما حضور آن بیانگر پایداری حرارتی مناسب خاکستر بادی بوده و می‌تواند تا حدی بر سختی و مقاومت نهایی ماتریس ژئوپلیمری تأثیرگذار باشد. در خاکسترهای بادی کلاس **F**، حضور هم‌زمان کوارتز و مولایت در کنار فاز آمورف، یک ویژگی متداول محسوب می‌شود. در الگوی پراش، قله‌هایی با شدت کمتر مربوط به کلسیت **(Calcite)** نیز مشاهده می‌شود که احتمالاً ناشی از وجود مقدار محدودی کربنات کلسیم در خاکستر بادی یا جذب دی‌اکسیدکربن طی فرآیند ذخیره‌سازی و حمل نمونه است. با توجه به شدت پایین این قله‌ها، سهم کلسیت در ترکیب معدنی خاکستر بادی ناچیز بوده و انتظار نمی‌رود تأثیر قابل توجهی بر فرآیند ژئوپلیمریزاسیون داشته باشد جدول (۱) مقادیر ترکیب شیمیایی مناسب خاکستر بادی را گزارش نموده است.

جدول ۲. مشخصات شیمیایی خاکستربادی

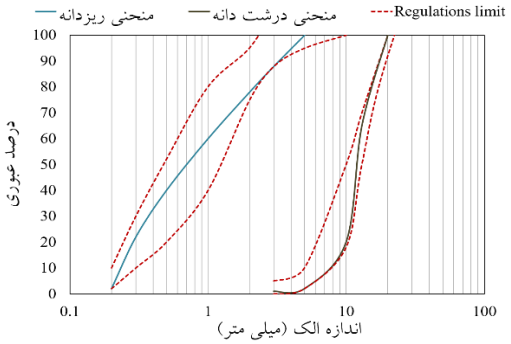
Component	(%)
SiO_2	61.3
Al_2O_3	28.8
Fe_2O_3	4.98
CaO	1.05
MgO	0.63
SO_3	0.13
Loss of ignition (LOI)	0.7

همچنین، محلول‌های قلیایی استفاده شده که در شکل (۳) نمایش داده شده است محلول هیدروکسید سدیم و سیلیکات سدیم می‌باشد. محلول سیلیکات سدیم به شکل ژل، شامل ۵۴/۱ درصد آب، ۳۲/۵ درصد SiO_2 و ۱۳/۴ درصد Na_2O تهیه شده است که در شکل (۳) نشان داده شده است. محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ۱۴ مولار تولید شده است. لازم به ذکر است که NaOH به صورت پرک با خلوص ۹۸ درصد در آب تهیه شده است. لازم به ذکر است که برای تهیه محلول NaOH، ۲۴ ساعت قبل از انجام آزمایش می‌بایست آب و NaOH جامد ترکیب شوند تا پس از فرآیند گرمازایی به دمای محیط بازگردند. همچنین در جهت بهبود ویژگی‌های ترمیمی از شکل (۳) مصالح پلیمری-قلیایی مصرفی در این تحقیق را نشان داده است. همچنین جهت اصلاح بتن ژئوپلیمری از چسب لاتکس و پودر سولفات آلومینیوم از برند استرامیکس استفاده شده است.



شکل۳. نمایش مصالح پلیمری-قلیایی

شن و ماسه معدنی مورد استفاده از معادن اطراف شهر آمل، تهیه شده است. دانه بندی ماسه‌ها در آزمایشگاه انجام شده که شرح این دانه‌بندی شن و ماسه در شکل (٤) ارائه شده است. چگالی برای مصالح ریزدانه ۳/۲ گرم بر سانتی متر مکعب بدست آمد.



شکل ٤. نمودار دانه بندی مصالح سنگی

به‌منظور ارائه یک شاخص کمی از توزیع اندازه ذرات، مدول نرمی ریزدانه نیز بر اساس درصدهای تجمعی مانده روی الک‌های استاندارد محاسبه شد. بر اساس قرائت منحنی دانه‌بندی، درصدهای عبوری تقریبی برای الک‌های ٤/٧٥، ٢/٣٦، ١,١٨، ٠/٦٠، ٠/٣٠و ٠/١٥ میلی‌متر به‌ترتیب حدود ١٠٠، ٩٢، ٧٤، ٥٤، ٣٠ و ٧ درصد برآورد شد. بر این اساس، مدول نرمی ریزدانه حدود ٢/٤٣ به دست آمد.

مقدار به‌دست‌آمده بیانگر سهم نسبتاً قابل توجه ذرات ریز در مصالح مورد استفاده است. این ویژگی از دیدگاه طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری اهمیت دارد، زیرا دانه‌بندی ریزدانه از طریق تغییر فضای خالی بین ذرات، سطح ویژه سنگدانه و میزان خمیر مورد نیاز می‌تواند بر کارایی و قابلیت تراکم بتن تازه اثرگذار باشد. همچنین، در سیستم حاضر که از لاتکس–سولفا و الیاف شیشه استفاده شده است، اثر دانه‌بندی باید در کنار افزایش ویسکوزیته فاز خمیری و محدودشدن حرکت ذرات در اثر حضور الیاف مورد توجه قرار گیرد. از منظر کاربرد در روسازی‌های بتنی، توزیع مناسب ذرات ریزدانه می‌تواند به پرشدن بهتر فضاهای بین سنگدانه‌ها، کاهش نواحی با تخلخل بالا و ایجاد ساختار متراکم‌تر کمک کند. با این حال، افزایش سهم ذرات ریز در صورت عدم تأمین خمیر کافی می‌تواند موجب افزایش تقاضای خمیر و کاهش کارایی شود. ازاین‌رو، مدول نرمی در کنار منحنی کامل دانه‌بندی، یکی از پارامترهای مهم برای تفسیر رفتار بتن تازه و کیفیت تراکم نهایی مخلوط محسوب می‌شود. استاندارد ASTM C33 نیز کنترل دانه‌بندی و مدول نرمی را در ارزیابی ریزدانه‌های مورد استفاده در بتن مورد توجه قرار می‌دهد.

۲-۲- طرح اختلاط

در این مطالعه آزمایشگاهی، طرح اختلاط با مصالح پوزولانی با هدف ارزیابی و اصلاح بتن ژئوپلیمری پایدار با رویکرد الیاف شیشه وچسب لاتکس مورد بررسی بوده است. در این مطالعه، ٠، ٠/٤، ٠/٦ و ٠/٨ درصد وزن حجمی الیاف شیشه و ٠–١٥ درصد لاتکس در مولاریته ١٤ تهیه گردیده است. جدول (٢) طرح اختلاط این تحقیق را نشان داده است. برای فعال‌سازی فرآیند ژئوپلیمریزاسیون، از محلول قلیایی متشکل از هیدروکسید سدیم (NaOH) و سیلیکات سدیم (Na_2SiO_3) استفاده شد. محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ١٤ مولار تهیه گردید. در تمامی طرح‌های اختلاط، مقدار خاکستر بادی برابر ٥٠٠ کیلوگرم بر متر مکعب در نظر گرفته شد و برای فعال‌سازی آن از ١٠٠ کیلوگرم محلول هیدروکسید سدیم با غلظت ١٤ مولار و ١٥٠ کیلوگرم محلول سیلیکات سدیم استفاده شد. بر این اساس، نسبت جرمی مجموع محلول فعال‌کننده قلیایی به خاکستر بادی برابر ٠/٥ و نسبت جرمی محلول سیلیکات سدیم به محلول هیدروکسید سدیم برابر ١/٥ بود. این نسبت‌ها در تمام طرح‌های اختلاط ثابت نگه داشته شدند تا اثر تغییرات مقدار لاتکس و الیاف شیشه در شرایط فعال‌سازی یکسان بررسی شود. ضمن اینکه در این بتن به جهت اصلاح خواص مکانیکی–جمع شدگی به میزان ٦ درصد وزن خاکستر نیز از پودر سولفات آلومینیوم نیز استفاده گردیده است.

جدول٤. طرح اختلاط بتن ژئوپلیمری (کیلوگرم برمتر مکعب)

Mixture Code	خاکستربادی	درشت دانه	ریزدانه	سدیم هیدروکسید محلول	سدیم سیلیکات	سولفا آلومینا	لاتکس (%)	الیاف شیشه ضدقلیا (%)	فوق روان کننده
GPC-Ctrl	500	930	620	100	150	30	0	0	1
GPC5L0.4Gl	500	930	620	100	150	30	5	0.4	1
GPC10L0.4Gl	500	930	620	100	150	30	10	0.4	1
GPC15L0.4Gl	500	930	620	100	150	30	15	0.4	1
GPC5L0.6Gl	500	930	620	100	150	30	5	0.6	1
GPC10L0.6Gl	500	930	620	100	150	30	10	0.6	1
GPC15L0.6Gl	500	930	620	100	150	30	15	0.6	1
GPC5L0.8Gl	500	930	620	100	150	30	5	0.8	1
GPC10L0.8Gl	500	930	620	100	150	30	10	0.8	1
GPC15L0.8Gl	500	930	620	100	150	30	15	0.8	1

برای این منظور، مقدار مورد نیاز از پرک‌های هیدروکسید سدیم با خلوص ۹۸ درصد در آب مقطر حل شد تا محلولی با غلظت نهایی ١٤ مول بر لیتر حاصل شود. به‌دلیل گرمازایی زیاد فرآیند انحلال، محلول پس از آماده‌سازی به مدت ٢٤ ساعت در دمای محیط نگهداری شد تا دمای آن به حالت پایدار برسد و سپس در ساخت مخلوط‌های ژئوپلیمری مورد استفاده قرار گرفت با توجه به جرم مولی هیدروکسید سدیم (g/mol٤٠)، برای تهیه یک لیتر محلول ١٤ مولار، ٥٦٠ گرم هیدروکسید سدیم در آب حل شد و پس از انحلال کامل، حجم محلول به یک لیتر رسانده شد. استفاده از محلول ١٤ مولار با هدف ایجاد محیط قلیایی مناسب جهت انحلال ترکیبات سیلیسی و آلومینایی موجود در خاکستر بادی و تسریع تشکیل ژل‌های آلومینوسیلیکاتی (N-A-S-H) انجام گرفت. پس از رسیدن محلول هیدروکسید سدیم به دمای محیط، محلول سیلیکات سدیم به آن افزوده شد و محلول فعال‌کننده قلیایی تهیه گردید. نسبت سیلیکات سدیم به هیدروکسید سدیم مطابق طرح اختلاط پژوهش ثابت نگه داشته شد. سپس محلول فعال‌کننده با خاکستر بادی مخلوط شد و پس از افزودن سنگدانه‌های ریز و درشت، لاتکس، سولفا آلومینا و الیاف شیشه مقاوم به قلیا عملیات اختلاط تا دستیابی به مخلوطی یکنواخت ادامه یافت. در نهایت، بتن تازه در قالب‌های استاندارد ریخته شده، متراکم گردید و مطابق برنامه عمل‌آوری در شرایط دمایی آزمایشگاه، نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌های مکانیکی و دوام نگهداری شدند.



شکل٥. نمونه‌های ساخته شده در این تحقیق

۳-بحث و نتایج

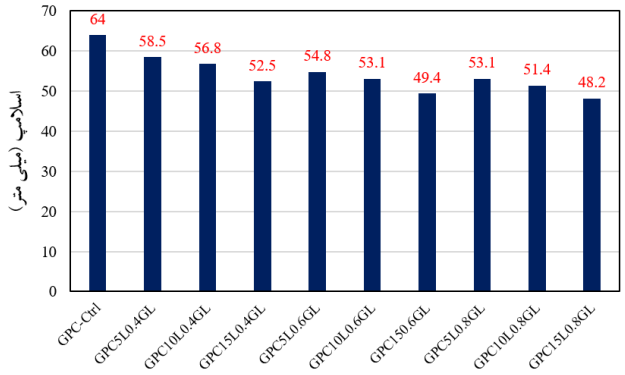
۳-۱- اسلامپ

کارایی بتن تازه یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی قابلیت اختلاط، تراکم، انتقال و اجرای بتن ژئوپلیمری در کاربردهای روسازی است. با توجه به افزایش مقدار الیاف شیشه و لاتکس اکریلیک در طرح‌های اختلاط مورد مطالعه، روند تغییرات اسلامپ به‌صورت تحلیل آزمایشگاهی اندازه گیری شده است. بر اساس ارزیابی، اسلامپ نمونه شاهد حدود ٦٤ میلی‌متر در نظر گرفته شده و با افزایش مقدار الیاف شیشه کاهش می‌یابد. در سطح ۵ درصد لاتکس، افزایش الیاف از ۰/٤ به ۰/٦ و ۰/۸

درصد، اسلامپ را به‌ترتیب از حدود ۵۸/۵ به ۵٤/۸ و ۵۳/۱ میلی‌متر کاهش می‌دهد. همانطور که در شکل (٦) نشان داده شده است، روند مشابهی در سطوح بالاتر لاتکس مشاهده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که در ترکیب حاوی ۱۵ درصد لاتکس، اسلامپ از حدود ۵۲/۵ میلی‌متر در ۰/٤ درصد الیاف به حدود ٤۹/٤ و ٤۸/۲ میلی‌متر در مقادیر ۰/٦ و ۰/۸ درصد الیاف کاهش می‌یابد .کاهش کارایی با افزایش مقدار الیاف را می‌توان به افزایش سطح تماس مؤثر الیاف با خمیر خاکستر–سولفا، افزایش اصطکاک داخلی و محدودشدن حرکت نسبی ذرات نسبت داد. الیاف شیشه درون مخلوط یک شبکه نسبتاً پیوسته ایجاد می‌کنند که حرکت آزاد سنگدانه‌ها و خمیر را محدود کرده و در نتیجه، مقاومت مخلوط در برابر جریان افزایش می‌یابد.

از سوی دیگر، افزایش مقدار لاتکس نیز می‌تواند از طریق تغییر ویسکوزیته فاز خمیر و افزایش پیوستگی آن بر رفتار رئولوژیکی مخلوط اثرگذار باشد. در سامانه حاضر، این اثر در ترکیب با الیاف شیشه اهمیت بیشتری پیدا می‌کند؛ زیرا همزمان با افزایش فاز پلیمری، مقدار الیاف نیز افزایش یافته و شبکه داخلی مقاوم‌تری در برابر جریان ایجاد می‌شود. بنابراین، کمترین کارایی برآوردشده مربوط به طرح حاوی ۱۵ درصد لاتکس و ۰/۸ درصد الیاف است.

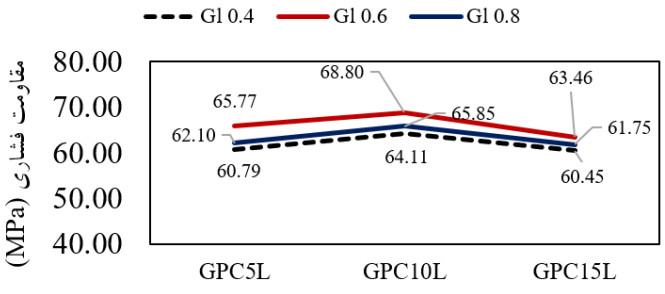
این روند با نتایج مقاومت فشاری پژوهش حاضر نیز قابل تفسیر است. مقاومت فشاری در مقدار ۰/٦درصد الیاف به بیشترین مقدار خود می‌رسد، در حالی که افزایش الیاف تا ۰/۸درصد موجب کاهش نسبی مقاومت می‌شود. بنابراین می‌توان استنباط کرد که افزایش مقدار الیاف تا یک سطح مشخص، به دلیل بهبود انتقال تنش و کنترل ریزترک‌ها سودمند است، اما افزایش بیش از حد آن می‌تواند با کاهش کارایی، دشوارترشدن تراکم و افزایش احتمال تشکیل نواحی غیریکنواخت، اثرات نامطلوبی بر تراکم نهایی ماتریس داشته باشد. در مطالعات پیشین نیز افزایش مقدار الیاف شیشه با کاهش کارایی و افزایش احتمال هم‌پوشانی و تجمع الیاف مرتبط دانسته شده است. بر این اساس، سطح ۰/٦ درصد الیاف شیشه را می‌توان از نظر ایجاد تعادل میان کارایی بتن تازه و عملکرد مکانیکی، سطح میانی مناسبی در طرح‌های مورد مطالعه دانست.



شکل ٦. نتایج ازمایش اسلامپ

۳–۲– مقاومت فشاری

شکل (۷) نتایج مقاومت فشاری اثر هم افزایی لاتکس و الیاف شیشه ضد قلیا در نمونه‌های مکعبی ۱۰ در ۱۰ بتن ژئوپلیمری را در مولاریته ثابت ۱٤ مولار نشان می‌دهد. مطابق نتایج، هر دو پارامتر مقدار لاتکس و درصد الیاف شیشه بر مقاومت فشاری بتن ژئوپلیمری تأثیر قابل توجهی داشته‌اند، به‌گونه‌ای که افزایش مقدار لاتکس تا یک حد بهینه موجب بهبود مقاومت فشاری شده، اما افزایش بیشتر آن باعث کاهش مقاومت گردیده است. در نمونه‌های حاوی ۰/٤ درصد الیاف شیشه، مقاومت فشاری از ٦۰/۷۹ مگاپاسکال در نمونه GPC5L به ٦٤/۱۱ مگاپاسکال در نمونه GPC10L افزایش یافت که بیانگر رشد حدود ۵/٤٦ درصدی است. با افزایش مقدار لاتکس به ۱۵ درصد، مقاومت فشاری به ٦۰/٤۵ مگاپاسکال کاهش یافت که نسبت به نمونه حاوی ۱۰ درصد لاتکس، حدود ۵/۷۱ درصد افت را نشان می‌دهد.

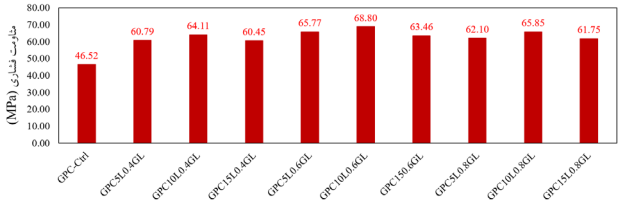


شکل ۷. نتایج اثر هم افزایی در نمونه‌های اصلاح شده لاتکس–سولفا–الیاف

روند مشابهی در نمونه‌های دارای ۰/٦ درصد الیاف شیشه نیز مشاهده شد. مقاومت فشاری از ٦۵/۷۷ مگاپاسکال در نمونه حاوی ۵ درصد لاتکس به ٦۸/۸ مگاپاسکال در نمونه دارای ۱۰ درصد لاتکس افزایش یافت و سپس با افزایش لاتکس به ۱۵ درصد، به ٦۳/٤٦ مگاپاسکال کاهش پیدا کرد. در این گروه، نمونه GPC10L بیشترین مقاومت فشاری را در میان تمامی نمونه‌های مورد بررسی به دست آورد. برای نمونه‌های حاوی ۰/۸ درصد الیاف شیشه نیز مقاومت فشاری از ٦۲/۱۰ به ٦۵/۸۵ مگاپاسکال افزایش یافت و سپس در نمونه دارای ۱۵ درصد لاتکس به ٦۱/۷۵ مگاپاسکال کاهش پیدا کرد. این نتایج نشان می‌دهد که صرف‌نظر از مقدار الیاف، استفاده از ۱۰ درصد لاتکس اکریلیک شرایط بهینه‌ای را برای افزایش مقاومت فشاری فراهم کرده است.

بهبود مقاومت فشاری در حضور ۱۰ درصد لاتکس را می‌توان به تشکیل فیلم‌های پلیمری در حفرات و نواحی بین ذرات نسبت داد. این فیلم‌ها موجب بهبود پیوستگی بین محصولات ژئوپلیمری و سنگدانه‌ها، کاهش تخلخل، افزایش تراکم ریزساختار و کاهش تمرکز تنش در فصل مشترک خمیر و سنگدانه می‌شوند. علاوه بر این، حضور لاتکس باعث بهبود چسبندگی بین الیاف شیشه و ماتریس ژئوپلیمری شده و انتقال تنش را مؤثرتر می‌کند؛ در نتیجه مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در مقابل، کاهش مقاومت فشاری در نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد لاتکس را می‌توان به افزایش سهم فاز لاتکس–سولفا نسبت به فاز معدنی نسبت داد. در مقادیر بالای لاتکس، بخشی از فضای ماتریس توسط پلیمر اشغال شده و تشکیل کامل شبکه آلومینوسیلیکاتی کاهش می‌یابد. همچنین افزایش مقدار پلیمر می‌تواند موجب افزایش هوای محبوس، ایجاد نواحی با سختی کمتر و کاهش تراکم ریزساختار شود که در نهایت افت مقاومت فشاری را به دنبال دارد. از سوی دیگر، نتایج نشان می‌دهد که افزایش مقدار الیاف شیشه از ۰/٤ درصد به ۰/٦ درصد موجب افزایش مقاومت فشاری در تمامی سطوح لاتکس شده است. این رفتار ناشی از نقش الیاف در مهار تشکیل و گسترش ریزترک‌ها، توزیع مجدد تنش‌ها و افزایش یکپارچگی ماتریس ژئوپلیمری در سطوح خاکستر–سولفا آلومینا است. با این حال، افزایش مقدار الیاف به ۰/۸ درصد سبب کاهش نسبی مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه‌های حاوی ۰/٦ درصد الیاف شده است.

در مجموع با توجه به شکل (۸)، نتایج ۲۸ روزه نشان می‌دهد که اثر هم‌زمان ۱۰ درصد لاتکس اکریلیک و ۰/٦ درصد الیاف شیشه مقاوم به قلیا، بهترین عملکرد را از نظر مقاومت فشاری ایجاد کرده است .این ترکیب با ایجاد تعادل میان تراکم ریزساختار، بهبود پیوستگی ماتریس ژئوپلیمری و کنترل ریزترک‌ها، توانسته است بیشترین مقاومت فشاری (٦۸/۸۰ مگاپاسکال) را در بین نمونه‌های مورد مطالعه فراهم کند. این نتیجه بیانگر آن است که استفاده از مقادیر بهینه لاتکس–سولفا و الیاف می‌تواند عملکرد بتن ژئوپلیمری را برای کاربردهایی نظیر روسازی‌های بتنی، باندهای فرودگاهی و سایر زیرساخت‌های حمل‌ونقل که نیازمند مقاومت فشاری و دوام بالا هستند، به طور قابل توجهی بهبود بخشد.



شکل ۸. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه

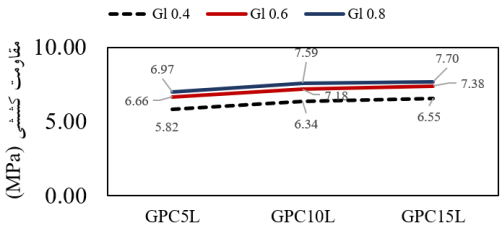
افزایش مقاومت فشاری در مخلوط‌های اصلاح‌شده را نمی‌توان صرفاً به تشکیل فیلم پلیمری لاتکس نسبت داد، بلکه این رفتار احتمالاً حاصل برهم‌کنش چند سازوکار همزمان است. تشکیل فیلم پلیمری می‌تواند پیوستگی خمیر ژئوپلیمری با سنگدانه و الیاف را بهبود داده و بخشی از منافذ و ناپیوستگی‌های موجود در ماتریس را محدود کند. در کنار این اثر، حضور ذرات ریز خاکستر بادی و محصولات واکنش ژئوپلیمریزاسیون می‌تواند با بهبود آرایش ذرات و کاهش فضای خالی، به تراکم بیشتر ساختار کمک کند. همچنین افزایش مقدار کنترل‌شده الیاف شیشه می‌تواند با محدود کردن رشد ریزترک‌ها و افزایش یکپارچگی ماتریس، ظرفیت تحمل بار را افزایش دهد. بنابراین، مقاومت نهایی حاصل از ترکیب لاتکس–سولفا و لیاف باید نتیجه هم‌افزایی میان تراکم فیزیکی ساختار، اصلاح ناحیه انتقالی، پیوستگی پلیمری و عملکرد مسلح‌کنندگی الیاف تلقی شود.

۳-۳- مقاومت کششی

شکل (۹) نتایج مقاومت کششی آزمایش دو نیم شدن نمونه های استوانه ای ۱۵ در ۳۰ مخلوط های اصلاح شده مبتنی بر سیستم لاتکس–الیاف را نشان می‌دهد. مطابق نتایج، هر دو عامل درصد لاتکس و مقدار الیاف شیشه تأثیر مثبتی بر مقاومت کششی بتن

ژئوپلیمری داشته‌اند، به‌گونه‌ای که با افزایش مقدار هر یک از این پارامترها، مقاومت کششی روندی افزایشی از خود نشان داده است. برخلاف رفتار مشاهده‌شده در مقاومت فشاری، در مقاومت کششی هیچ‌گونه افت عملکرد در اثر افزایش لاتکس تا ۱۵ درصد مشاهده نشد که بیانگر تفاوت مکانیزم‌های مؤثر بر گسیختگی کششی و فشاری در بتن ژئوپلیمری اصلاح‌شده است. در نمونه‌های حاوی ۰/٤ درصد الیاف شیشه، مقاومت کششی از ۵/۸۲ مگاپاسکال در نمونه GPC5L به ٦/۳٤ مگاپاسکال در نمونه GPC10L افزایش یافت و در ادامه با افزایش لاتکس به ۱۵ درصد به ٦/۵۵ مگاپاسکال رسید. این روند بیانگر افزایش حدود ۱۲/۵ درصدی مقاومت کششی نسبت به نمونه اولیه است.

در نمونه‌های دارای ۰/٦ درصد الیاف شیشه نیز مقاومت کششی از ٦/٦٦ به ۷/۱۸ و سپس به ۷/۳۸ مگاپاسکال افزایش یافت. همچنین در نمونه‌های حاوی ۰/۸ درصد الیاف شیشه، مقاومت کششی از ٦/۹۷ به ۷/۵۹ و در نهایت به ۷/۷۰ مگاپاسکال رسید که بالاترین مقدار مقاومت کششی در میان تمامی طرح‌های اختلاط مورد بررسی محسوب می‌شود.



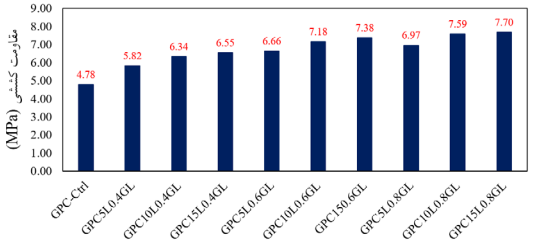
شکل ۹. بررسی مقاومت کششی سیستم لاتکس–سولفا–الیاف

افزایش مقاومت کششی با افزایش مقدار لاتکس را می‌توان به نقش پلیمر در اصلاح ریزساختار ماتریس ژئوپلیمری نسبت داد. لاتکس اکریلیک پس از سخت‌شدن بتن، با تشکیل فیلم‌های پلیمری پیوسته در منافذ و نواحی انتقالی، موجب افزایش چسبندگی بین محصولات ژئوپلیمری و سنگدانه‌ها شده و مقاومت فصل مشترک ITZ را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این، ماهیت نسبتاً انعطاف‌پذیر پلیمر باعث کاهش تمرکز تنش در اطراف ریزترک‌ها شده و انرژی بیشتری برای آغاز و گسترش ترک مورد نیاز خواهد بود. ازاین‌رو، برخلاف مقاومت فشاری که به سختی و تراکم ماتریس وابسته است، مقاومت کششی از حضور فاز پلیمری سود بیشتری می‌برد. از سوی دیگر، افزایش مقدار الیاف شیشه مقاوم به قلیا موجب بهبود مستمر مقاومت کششی شده است. دلیل اصلی این رفتار، مکانیزم پل‌زنی ترک توسط الیاف است. در مرحله تشکیل ریزترک‌ها، الیاف مانع از بازشدگی سریع ترک شده و تنش‌های کششی را از یک سوی ترک به سوی دیگر منتقل می‌کنند. این انتقال تنش باعث تأخیر در ناپایداری ترک، افزایش ظرفیت تحمل بار و در نهایت افزایش مقاومت کششی بتن می‌شود. همچنین توزیع مناسب الیاف در ماتریس ژئوپلیمری موجب افزایش جذب انرژی و کاهش سرعت انتشار ترک‌ها شده است. نکته قابل توجه آن است که افزایش مقدار الیاف از ۰/٦ به ۰/۸ درصد، اگرچه در مقاومت فشاری با کاهش نسبی همراه بود، اما در مقاومت کششی همچنان موجب بهبود عملکرد شد. این تفاوت بیانگر آن است که حتی در صورت کاهش جزئی تراکم ماتریس ناشی از افزایش مقدار الیاف، اثر مثبت پل‌زنی الیاف بر رفتار کششی بر اثرات منفی احتمالی ناشی از کاهش کارایی مخلوط غلبه کرده است. به عبارت دیگر، در بارگذاری کششی، عملکرد الیاف به‌عنوان عناصر انتقال‌دهنده تنش اهمیت بیشتری نسبت به افزایش جزئی تخلخل دارد. همچنین، اثر هم‌زمان سیستم لاتکس–سولفا و الیاف را می‌توان ناشی از ایجاد یک مکانیزم هم‌افزا دانست. حضور لاتکس موجب بهبود پیوند بین سطح الیاف شیشه و ماتریس ژئوپلیمری شده و ظرفیت انتقال تنش در فصل مشترک را افزایش می‌دهد.

در نتیجه، الیاف پیش از خارج‌شدن از ماتریس، قادر به تحمل تنش‌های بیشتری بوده و انرژی بیشتری را طی فرآیند گسیختگی جذب می‌کنند. این هم‌افزایی سبب شده است که نمونه‌های دارای مقادیر بیشتر لاتکس و الیاف، بالاترین مقاومت کششی را از خود نشان دهند. از دیدگاه مهندسی راه و روسازی، مقاومت کششی یکی از مهم‌ترین شاخص‌های عملکرد روسازی‌های بتنی محسوب می‌شود؛ زیرا بخش عمده ترک‌های ناشی از بارگذاری ترافیکی، تنش‌های حرارتی و جمع‌شدگی، در اثر تنش‌های کششی ایجاد می‌شوند. افزایش مقاومت کششی بتن ژئوپلیمری موجب تأخیر در تشکیل ترک‌های اولیه، کاهش سرعت گسترش ریزترک‌ها و افزایش مقاومت در برابر خستگی ناشی از بارگذاری‌های تکراری خواهد شد. این موضوع به‌ویژه در روسازی‌های صلب، باندهای فرودگاهی، محوطه‌های صنعتی و مسیرهای پرتردد که به‌طور مداوم تحت بارهای سنگین قرار دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

بر اساس نتایج شکل (۱۰) ترکیب ۱۵ درصد لاتکس اکریلیک و ۰/۸ درصد الیاف شیشه مقاوم به قلیا با دستیابی به مقاومت

کششی ۷/۷۰ مگاپاسکال، بهترین عملکرد را در میان طرح‌های اختلاط مورد بررسی نشان داد. این نتیجه بیانگر آن است که اصلاح همزمان ماتریس ژئوپلیمری با لاتکس و الیاف شیشه می‌تواند ظرفیت تحمل تنش‌های کششی و مقاومت در برابر ترک‌خوردگی را به‌طور قابل توجهی افزایش داده و زمینه استفاده از این بتن را در روسازی‌های بتنی با عمر بهره‌برداری طولانی‌تر و هزینه نگهداری کمتر فراهم سازد.



شکل ۱۰. ارزیابی کلی مقاومت کششی ۲۸ روزه نمونه های ژئوپلیمر

۳-٤- بررسی چالش تعیین طرح اختلاط بهینه برای مقاومت‌های فشاری و کششی

یکی از مهم‌ترین یافته‌های این پژوهش، تفاوت در ترکیب بهینه برای دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری و مقاومت کششی است. نتایج نشان داد که بیشترین مقاومت فشاری ٦٨/٨٠ در نمونه حاوی ۱۰ درصد لاتکس اکریلیک و ۰/٦ درصد الیاف شیشه حاصل شد، در حالی که بیشترین مقاومت کششی ۷/۷۰ مربوط به نمونه دارای ۱۵ درصد لاتکس و ۰/۸ درصد الیاف شیشه بود. این تفاوت بیانگر آن است که مکانیزم‌های مؤثر بر مقاومت فشاری و کششی در بتن ژئوپلیمری اصلاح‌شده یکسان نیستند و افزایش یک پارامتر لزوماً موجب بهبود هم‌زمان تمامی خواص مکانیکی نمی‌شود.

از دیدگاه ریزساختاری، مقاومت فشاری بیش از هر عامل دیگری به میزان تراکم ماتریس ژئوپلیمری، کاهش تخلخل و تشکیل کامل ژل‌های آلومینوسیلیکاتی وابسته است. ازاین‌رو، افزایش بیش از حد مقدار لاتکس یا الیاف می‌تواند با کاهش تراکم ماتریس، ایجاد حفرات ریز، افزایش هوای محبوس یا کاهش سهم فاز معدنی، موجب افت مقاومت فشاری شود. در مقابل، مقاومت کششی بیش از آنکه تحت تأثیر سختی ماتریس قرار گیرد، به توانایی بتن در کنترل آغاز و گسترش ترک وابسته است. تشکیل فیلم‌های پلیمری ناشی از لاتکس و مکانیزم پل‌زنی الیاف، ظرفیت جذب انرژی و انتقال تنش را افزایش داده و حتی در شرایطی که مقاومت فشاری اندکی کاهش می‌یابد، می‌توانند مقاومت کششی را همچنان بهبود بخشند.

این یافته، یکی از چالش‌های اساسی در طراحی بتن‌های ژئوپلیمری چندجزئی را آشکار می‌سازد؛ به‌گونه‌ای که طرح اختلاط بهینه تابع شاخص عملکرد مورد انتظار است و نمی‌توان تنها بر اساس بیشترین مقاومت فشاری، بهترین طرح اختلاط را انتخاب کرد .در بسیاری از پروژه‌های عمرانی، به‌ویژه در طراحی روسازی‌های بتنی، تمرکز صرف بر مقاومت فشاری می‌تواند منجر به انتخاب طرحی شود که در برابر ترک‌خوردگی و بارگذاری‌های تکراری عملکرد مطلوبی ندارد.

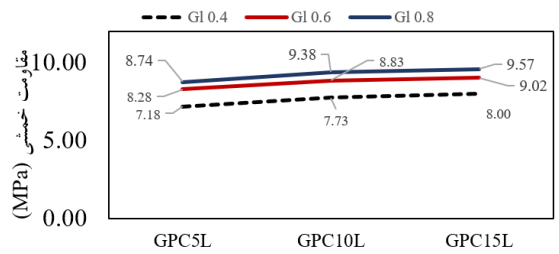
در مهندسی راه و روسازی، خرابی روسازی‌های بتنی غالباً از ایجاد ترک‌های کششی ناشی از بارهای ترافیکی، تنش‌های حرارتی، جمع‌شدگی و خستگی آغاز می‌شود. بنابراین، مقاومت کششی، مقاومت خمشی و رفتار پس از ترک‌خوردگی در بسیاری از موارد تأثیر بیشتری بر عمر بهره‌برداری روسازی نسبت به مقاومت فشاری دارند. به همین دلیل، انتخاب طرح اختلاط باید بر مبنای عملکرد انجام شود؛ به‌گونه‌ای که میان مقاومت فشاری، مقاومت کششی، دوام و قابلیت کنترل ترک تعادل برقرار گردد. بر این اساس، اگر هدف، ساخت اعضای سازه‌ای تحت بارهای عمدتاً فشاری باشد، طرح اختلاط حاوی ۱۰ درصد لاتکس و ۰/٦ درصد الیاف شیشه می‌تواند گزینه مناسب‌تری باشد. اما در کاربردهایی نظیر روسازی‌های بتنی، باندهای فرودگاهی، دال‌های صنعتی و سایر سازه‌های در معرض بارگذاری‌های تکراری که مقاومت در برابر ترک‌خوردگی و خستگی از اهمیت بیشتری برخوردار است، استفاده از مقادیر بیشتر لاتکس و الیاف، با وجود کاهش جزئی مقاومت فشاری، می‌تواند عملکرد بلندمدت مطلوب‌تری را فراهم آورد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تعیین طرح اختلاط بهینه در بتن ژئوپلیمری نباید بر اساس یک شاخص مکانیکی منفرد انجام شود، بلکه لازم است مجموعه‌ای از شاخص‌های عملکردی شامل مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مقاومت خمشی، دوام و رفتار ترک‌خوردگی به‌صورت هم‌زمان مورد ارزیابی قرار گیرد .این رویکرد، به‌ویژه در پروژه‌های زیرساختی و روسازی، می‌تواند به طراحی بتن‌هایی با عمر بهره‌برداری بیشتر، کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش قابلیت اطمینان سازه منجر شود.

۳-۵- مقاومت خمشی

شکل (۱۱) نتایج مقاومت خمشی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری حاوی مقادیر مختلف لاتکس اکریلیک و الیاف شیشه مقاوم به قلیا را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر آن است که افزایش مقدار لاتکس و درصد الیاف شیشه، هر دو موجب بهبود مقاومت خمشی بتن ژئوپلیمری شده‌اند. با این حال، میزان تأثیر این دو عامل یکسان نبوده و نقش الیاف در افزایش مقاومت خمشی محسوس‌تر از لاتکس است. این نمودار از نظر علمی یکی از مهم‌ترین نتایج این تحقیق بوده است؛ زیرا مقاومت خمشی مهم‌ترین معیار طراحی روسازی‌های بتنی است. برخلاف بتن‌های سازه‌ای که مقاومت فشاری شاخص اصلی محسوب می‌شود، در طراحی روسازی‌های بتنی، ظرفیت تحمل تنش‌های خمشی ناشی از بار چرخ وسایل نقلیه تعیین‌کننده عملکرد و عمر بهره‌برداری روسازی است. بنابراین، در تحلیل این نتایج بهتر است علاوه بر بررسی مکانیزم‌های ریزساختاری، ارتباط مستقیم آن با عملکرد روسازی نیز بیان شود.

در نمونه‌های حاوی ۰/٤ درصد الیاف شیشه، مقاومت خمشی از ۷/۱۸ مگاپاسکال در نمونه GPC5L به ۷/۷۳ مگاپاسکال در نمونه GPC10L افزایش یافت و در ادامه با افزایش لاتکس به ۱۵ درصد، به ۸ مگاپاسکال رسید. این نتایج نشان می‌دهد که افزایش لاتکس از ۵ به ۱۵ درصد موجب افزایش حدود ۰/۸۲ مگاپاسکال و افزایش نسبی ۱۱/٤۲ درصد مقاومت خمشی شده است. در نمونه‌های دارای ۰/٦ درصد الیاف شیشه نیز مقاومت خمشی از ۸/۲۸ به ۸/۸۳ و سپس به ۹/۰۲ مگاپاسکال افزایش یافت. همچنین در نمونه‌های حاوی ۰/۸درصد الیاف شیشه، مقاومت خمشی از ۸/۷٤ به ۹/۳۸ و در نهایت به ۹/۵۷ مگاپاسکال رسید که بیشترین مقدار مقاومت خمشی در بین تمامی طرح‌های اختلاط مورد بررسی است.



شکل ۱۱. نتایج مقامت خمشی اثر اصلاحی سیستم الیاف-سولفا-لاتکس در بتن ژئوپلیمر

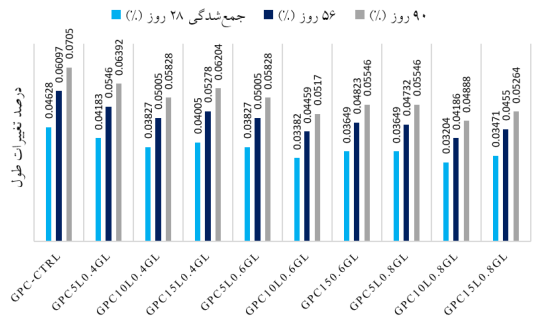
برخلاف نتایج مقاومت فشاری که در مقادیر بالاتر لاتکس کاهش نسبی مشاهده شد، مقاومت خمشی در تمامی طرح‌های اختلاط روندی افزایشی از خود نشان داد. این رفتار را می‌توان به تفاوت مکانیزم شکست در بارگذاری خمشی نسبت داد. در آزمون خمش، گسیختگی نمونه عمدتاً از ایجاد و گسترش ترک‌های کششی در ناحیه تحتانی تیر آغاز می‌شود؛ بنابراین، عواملی که توانایی کنترل انتشار ترک را افزایش دهند، تأثیر قابل توجهی بر مقاومت خمشی خواهند داشت.

افزایش مقاومت خمشی در اثر حضور لاتکس اکریلیک را می‌توان به تشکیل فیلم‌های پلیمری در ساختار ماتریس ژئوپلیمری نسبت داد. این فیلم‌ها علاوه بر کاهش تخلخل و افزایش تراکم ریزساختار، موجب بهبود پیوند بین خمیر ژئوپلیمری و سنگدانه‌ها شده و مقاومت ITZ را افزایش می‌دهند. از سوی دیگر، ماهیت نسبتاً انعطاف‌پذیر پلیمر باعث توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های خمشی و کاهش تمرکز تنش در اطراف ریزترک‌ها می‌شود. در نتیجه، انرژی بیشتری برای گسترش ترک مورد نیاز بوده و ظرفیت تحمل بار خمشی افزایش می‌یابد. تأثیر الیاف شیشه مقاوم به قلیا بر مقاومت خمشی حتی چشمگیرتر از لاتکس است. در هنگام اعمال بار خمشی، ریزترک‌های ایجادشده در ناحیه کششی توسط الیاف پل‌زنی شده و انتقال تنش از طریق الیاف ادامه می‌یابد. این مکانیزم از بازشدگی سریع ترک جلوگیری کرده و موجب افزایش بار گسیختگی، بهبود شکل‌پذیری و افزایش ظرفیت جذب انرژی می‌شود. افزایش مقاومت خمشی از ۸/۰۰ مگاپاسکال در نمونه دارای ۰/٤ درصد الیاف به ۹/۵۷ مگاپاسکال در نمونه حاوی ۰/۸ درصد الیاف و ۱۵ درصد لاتکس، بیانگر افزایش حدود ۱۹/٦۳ درصدی ظرفیت خمشی است که نقش مؤثر الیاف در بهبود رفتار خمشی بتن ژئوپلیمری را نشان می‌دهد. همچنین نتایج حاکی از وجود اثر هم‌افزایی بین سیستم لاتکس-سولفا و الیاف شیشه است. لاتکس و سولفا آلومینا با افزایش چسبندگی بین سطح الیاف و ماتریس ژئوپلیمری، مقاومت بیرون‌کشیدگی الیاف را افزایش داده و امکان انتقال مؤثرتر تنش را فراهم می‌کند. در مقابل، الیاف با کنترل گسترش ترک‌ها، از تمرکز تنش در نواحی ضعیف جلوگیری کرده و شرایط مناسبی برای عملکرد مؤثر فیلم‌های پلیمری ایجاد می‌کنند. این تعامل باعث شده است که نمونه‌های دارای مقادیر بیشتر لاتکس و الیاف، بهترین عملکرد خمشی را نشان دهند.

از دیدگاه مهندسی راه و روسازی، مقاومت خمشی مهم‌ترین شاخص مکانیکی در طراحی روسازی‌های بتنی به شمار می‌رود؛ زیرا بارهای ناشی از عبور وسایل نقلیه موجب ایجاد تنش‌های کششی خمشی در زیر دال بتنی می‌شوند. هرچه مقاومت خمشی بتن بیشتر باشد، احتمال تشکیل ترک‌های ناشی از بارگذاری تکراری کاهش یافته و مقاومت روسازی در برابر خستگی افزایش می‌یابد. علاوه بر این، افزایش مقاومت خمشی موجب کاهش احتمال لب‌پریدگی لبه دال‌ها، ترک‌های عرضی و شکست‌های ناشی از بارهای سنگین شده و در نتیجه عمر بهره‌برداری روسازی افزایش می‌یابد. بر اساس نتایج این پژوهش، نمونه حاوی ۱۵ درصد لاتکس اکریلیک و ۰/۸ درصد الیاف شیشه مقاوم به قلیا با دستیابی به مقاومت خمشی ۹/۵۷ مگاپاسکال، بهترین عملکرد را در میان تمامی طرح‌های اختلاط نشان داد. این مقدار مقاومت خمشی، در کنار مقاومت فشاری و کششی مناسب، نشان می‌دهد که اصلاح هم‌زمان بتن ژئوپلیمری با سیستم اصلاح کنندگی لاتکس–سولفا و الیاف شیشه می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای تولید بتن‌های ژئوپلیمری مورد استفاده در روسازی‌های صلب، باندهای فرودگاهی، محوطه‌های صنعتی و سایر زیرساخت‌های حمل‌ونقل باشد؛ زیرا این کاربردها نیازمند مصالحی با مقاومت بالا در برابر تنش‌های خمشی، ترک‌خوردگی و بارگذاری‌های تکراری هستند.

۳-۶- جمع شدگی ناشی از خشک شدن

با توجه به نقش جمع‌شدگی در ایجاد تنش‌های داخلی، ترک‌های ناشی از تغییرات حجمی و کاهش دوام روسازی‌های بتنی، اثر همزمان لاتکس اکریلیک و الیاف شیشه بر جمع‌شدگی خشک‌شدن بتن ژئوپلیمری نیز مورد بررسی تحلیلی قرار گرفت. مقادیر ارائه‌شده در این بخش، بر مبنای روندهای بررسی شده در مطالعه آزمایشگاهی مربوط به بتن‌های ژئوپلیمری پایه خاکستر بادی و بتن‌های اصلاح شده سیستم لاتکس–سولفا و الیاف در سه سن ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل ۱۲. نتایج جمع شدگی طرح‌های اختلاط

بر اساس نتایج، جمع‌شدگی خشک‌شدن در تمام طرح‌های اختلاط با گذشت زمان افزایش می‌یابد، لیکن نرخ افزایش آن پس از سنین اولیه کاهش پیدا می‌کند. این رفتار را می‌توان به خروج تدریجی رطوبت از شبکه موئینه و کاهش آب قابل تبخیر در ساختار ژئوپلیمری نسبت داد. در بتن‌های ژئوپلیمری، ویژگی‌های جمع‌شدگی به عواملی نظیر غلظت فعال‌کننده، ساختار منافذ، میزان آب آزاد و درجه پیشرفت ژئوپلیمریزاسیون وابسته است. مطالعات پیشین نیز جمع‌شدگی خشک‌شدن نسبتاً پایین بتن‌های ژئوپلیمری پایه خاکستر بادی را گزارش کرده‌اند؛ به‌عنوان نمونه، برای برخی سامانه‌های خاکستر بادی/سرباره، مقدار جمع‌شدگی در سن شش‌ماه در حدود ۰/۱درصد گزارش شده است.

در نمونه شاهد، مقدار برآوردشده جمع‌شدگی از حدود ۰/۰٤٦ درصد در ۲۸ روز به ۰/۰۷۰۵۰ درصد در ۹۰ روز افزایش می‌یابد. با افزودن لاتکس اکریلیک، مقدار جمع‌شدگی در مقایسه با نمونه شاهد کاهش نشان می‌دهد؛ به‌گونه‌ای که در ترکیب حاوی ۱۰ درصد لاتکس و ۰/٤درصد الیاف، مقدار جمع‌شدگی ۹۰روزه حدود ۰/۰۵۰ درصد محاسبه شده است. این کاهش را می‌توان به تشکیل فاز پلیمری پیوسته‌تر در اطراف ذرات و اصلاح ساختار منافذ نسبت داد. حضور لاتکس می‌تواند پیوستگی ماتریس را افزایش داده و بخشی از منافذ و مسیرهای پیوسته انتقال رطوبت را محدود کند؛ در نتیجه، تغییرات حجمی ناشی از خشک‌شدن می‌تواند کاهش یابد.

اثر الیاف شیشه نیز در کاهش جمع‌شدگی قابل توجه است. در سطح ۱۰ درصد لاتکس، افزایش مقدار الیاف از ۰/٤ به ۰/٦و سپس ۰/۸ درصد، جمع‌شدگی ۹۰روزه را به‌ترتیب از حدود ۰/۰۵۸۲۸ به ۰/۰۵۱۷۰ و ۰/۰٤۸۸۸ درصد کاهش می‌دهد. این روند را می‌توان به نقش مهاری الیاف در برابر تغییر شکل ماتریس

نسبت داد. الیاف شیشه با ایجاد یک شبکه تقویت‌کننده درون خمیر ژئوپلیمری، تغییر شکل آزاد ماتریس را محدود کرده و موجب توزیع یکنواخت‌تر تنش‌های ناشی از خشک‌شدن می‌شوند. نتایج مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که استفاده از الیاف شیشه می‌تواند جمع‌شدگی خشک‌شدن ملات‌های ژئوپلیمری پایه خاکستر بادی را کاهش دهد.

در مجموع نتایج شکل ۱۲ نشان می‌دهد که جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن در تمامی طرح‌های اختلاط با افزایش سن نمونه‌ها روند افزایشی دارد. در نمونه شاهد، مقدار جمع‌شدگی از ۰/۰٤٦۲۸ در سن ۲۸ روز به ۰/۰٦۰۹۷ در ٥٦ روز و ۰/۰۷۰٥۰ در ۹۰ روز افزایش یافت. در مقابل، افزودن لاتکس اکریلیک و الیاف شیشه موجب کاهش مقادیر جمع‌شدگی نسبت به نمونه شاهد شد. در میان طرح‌های اصلاح‌شده، نمونه GPC10L0.8Gl با مقدار جمع‌شدگی ۰/۰٤۸۸۸ درصد در سن ۹۰ روز، کمترین مقدار را نشان داد. همچنین، نمونه‌های GPC10L0.6Gl و GPC15L0.6Gl به‌ترتیب با مقادیر ۰/۰٥۱۷۰ و ۰/۰٥٥٤٦ در جایگاه‌های بعدی قرار گرفتند. این نتایج نشان می‌دهد که اثر لاتکس و الیاف بر کنترل جمع‌شدگی تابع برهم‌کنش میان مقدار پلیمر و درصد الیاف بوده و افزایش این دو پارامتر لزوماً به کاهش خطی جمع‌شدگی منجر نمی‌شود.

۳-۷- مقاومت باقی مانده در محیط سولفاته

به‌منظور بررسی تحلیلی رفتار بتن‌های ژئوپلیمری اصلاح‌شده در محیط سولفاتی ٥٪، شاخص حفظ مقاومت فشاری به‌عنوان نسبت مقاومت فشاری پس از قرارگیری در محیط سولفات به مقاومت اولیه در نظر گرفته شد. در این بخش، مقادیر مقاومت پس از ۱۲۰ روز قرارگیری در محلول ٥ درصد سولفات سدیم بررسی شده اند. نتایج شکل (۱۳) نشان می‌دهد که تمامی طرح‌های اصلاح‌شده می‌توانند پس از قرارگیری در محیط سولفاتی بخش عمده‌ای از مقاومت اولیه خود را حفظ کنند. مقدار حفظ مقاومت فشاری برای طرح‌های مختلف در محدوده تقریبی ۹٤ تا ۹۷ درصد قرار گرفته است. این رفتار با عملکرد مناسب گزارش‌شده برای ژئوپلیمرهای پایه خاکستر بادی در محیط سولفات سدیم سازگار است. در یک مطالعه آزمایشگاهی، نمونه‌های ژئوپلیمری پایه خاکستر بادی پس از ۱۲۰ روز قرارگیری در محلول ٥ درصد Na_2SO_4 افزایش جرم محدودی نشان دادند و عملکرد مناسب آنها به پایداری ژل آلومینوسیلیکاتی و مقدار پایین CaO نسبت داده شد.

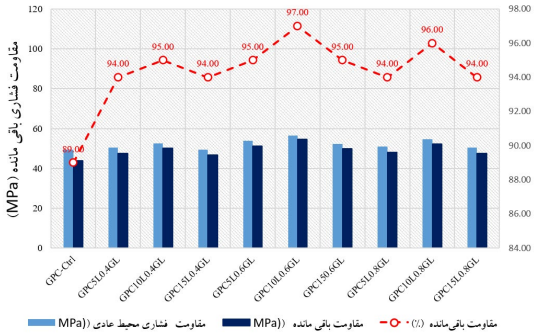
در میان طرح‌های مورد مطالعه، ترکیب GPC10L0.6Gl، که در مقاومت فشاری اولیه نمونه‌های اختصاص‌یافته به آزمون سولفات بیشترین مقاومت فشاری برابر با ٥٦/۳۹ مگاپاسکال را نشان داده است، بالاترین میزان حفظ مقاومت معادل حدود ۹۷ درصد، را داراست. بر این اساس، مقاومت فشاری باقی‌مانده این طرح حدود ٥٤/۷ مگاپاسکال برآورد می‌شود. این رفتار را می‌توان ناشی از اثر همزمان مقدار بهینه لاتکس و الیاف دانست. وجود ۱۰ درصد لاتکس می‌تواند با اصلاح پیوستگی ماتریس و کاهش مسیرهای پیوسته نفوذ، ساختار نسبتاً متراکم‌تری ایجاد کند؛ در حالی که ۰/٦ درصد الیاف شیشه با محدودکردن گسترش ریزترک‌ها، می‌تواند به حفظ یکپارچگی ساختار در برابر محیط مهاجم کمک کند.

در سطح ۰/٤ درصد الیاف، افزایش لاتکس از ٥ به ۱۰ درصد موجب افزایش حفظ مقاومت از حدود ۹٤ به ۹٥/٥ درصد می‌شود، در حالی که افزایش لاتکس تا ۱٥ درصد این شاخص را تنها اندکی کاهش داده و به حدود ۹٤/٥ درصد می‌رساند. همین الگو در سطح ۰/٦ درصد الیاف نیز مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که میزان حفظ مقاومت برای مقادیر ٥، ۱۰ و ۱٥ درصد لاتکس به‌ترتیب حدود ۹٥، ۹۷ و ۹٥/٥ درصد بوده است. بنابراین، افزایش لاتکس تا سطح میانی می‌تواند اثر مطلوب‌تری داشته باشد، در حالی که افزایش بیشتر آن الزاماً بهبود متناسب مقاومت سولفاتی را به دنبال ندارد.

در سطح ۰/۸ درصد الیاف نیز مقدار حفظ مقاومت برای ٥، ۱۰ و ۱٥ درصد لاتکس به‌ترتیب حدود ۹٤، ۹٦ و ۹٤/٥ درصد اندازه گیری شده است. این روند نشان می‌دهد که افزایش الیاف از ۰/٦ به ۰/۸ درصد الزاماً موجب بهبود مقاومت در محیط سولفاتی نمی‌شود. کاهش کارایی مخلوط و افزایش احتمال ایجاد نواحی غیریکنواخت یا حفرات ناشی از پراکنش نامناسب الیاف می‌تواند بخشی از مزیت ناشی از نقش پل‌زنی الیاف را خنثی کند.

از دیدگاه سازوکار تخریب، مقاومت مناسب ژئوپلیمر پایه خاکستر بادی در برابر سولفات را می‌توان به ماهیت کم‌کلسیم سیستم، تشکیل ژل آلومینوسیلیکاتی نسبتاً پایدار و محدودبودن محصولات انبساطی مرتبط دانست. مطالعات پیشین نیز عملکرد مناسب ژئوپلیمرهای پایه خاکستر بادی و الیاف شیشه را در محلول سولفات سدیم گزارش کرده‌اند و پایداری ژل آلومینوسیلیکاتی و مقدار پایین CaO را از عوامل مؤثر در این رفتار معرفی کرده‌اند. همچنین گزارش شده است که حضور

الیاف می‌تواند با محدودکردن مسیرهای ورود یون‌ها و ایجاد عملکرد پل‌زنی در ماتریس، به پایداری ساختار در محیط‌های مهاجم کمک کند. در مجموع، تحلیل حاضر نشان می‌دهد که ترکیب ۱۰ درصد لاتکس اکریلیک و ۰/۶ درصد الیاف شیشه، علاوه بر دستیابی به بالاترین مقاومت فشاری اولیه در پژوهش حاضر، از نظر مقاومت فشاری باقی‌مانده در محیط سولفاتی نیز رفتار پیش‌بینی‌شده مطلوبی دارد.



شکل۱۳. نتایج مقاومت فشاری باقی مانده در محیط سولفاتی

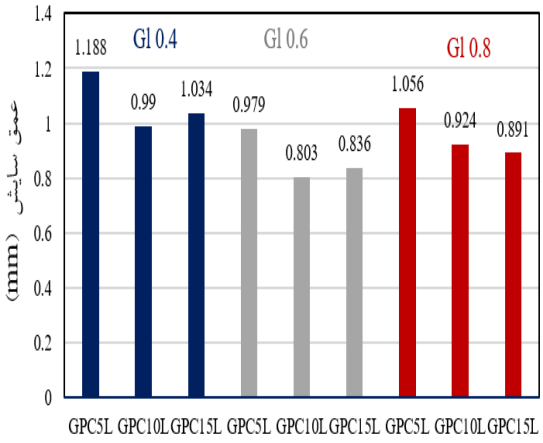
۳-۸- مقاومت سایشی

نتایج آزمون مقاومت سایشی نمونه‌های بتن ژئوپلیمری در شکل (۱٤) ارائه شده است. برخلاف تفسیر صرفاً مبتنی بر مقاومت فشاری، نتایج این آزمون بیانگر رفتار مستقیم سطح بتن در برابر اعمال مکانیکی و جداشدگی تدریجی ذرات است. ازاین‌رو، تغییرات عمق یا مقدار سایش باید در ارتباط با مجموعه‌ای از ویژگی‌های ساختاری و مکانیکی بتن، شامل تراکم ماتریس، میزان تخلخل، کیفیت ناحیه انتقالی خمیر-سنگدانه، پیوستگی سطحی و نقش الیاف در کنترل ریزترک‌ها تفسیر شود.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تغییر همزمان مقدار لاتکس اکریلیک و الیاف شیشه، رفتار سایشی بتن را به‌طور محسوسی تحت تأثیر قرار داده است. در سطح پایین‌تر لاتکس، به دلیل اصلاح محدودتر ساختار خمیر و احتمال باقی‌ماندن نواحی ضعیف‌تر در ماتریس، مقاومت سطحی در برابر جداشدگی ذرات محدودتر است. افزایش مقدار لاتکس تا سطح میانی موجب بهبود پیوستگی ماتریس و کاهش نواحی آسیب‌پذیر می‌شود. تشکیل فاز پلیمری در ساختار خمیر می‌تواند اتصال میان ذرات و ناحیه انتقالی را تقویت کرده و در نتیجه، مقاومت سطح در برابر اعمال مکانیکی و جداشدگی ذرات را افزایش دهد.

با افزایش مقدار الیاف شیشه از ۰/٤ به ۰/٦ درصد، بهبود عملکرد سایشی را می‌توان به نقش الیاف در کنترل ریزترک‌های سطحی و افزایش انسجام لایه نزدیک به سطح نسبت داد. الیاف شیشه با ایجاد سازوکار پل‌زنی در مسیر ترک، از بازشدن و گسترش ریزترک‌ها جلوگیری کرده و انرژی اعمال‌شده را در حجم بیشتری از ماتریس توزیع می‌کنند. این سازوکار در شرایط سایش اهمیت دارد، زیرا تخریب سطحی بتن تنها تابع سختی اولیه آن نیست، بلکه توانایی ساختار برای جلوگیری از جداشدگی تدریجی ذرات نیز در آن نقش دارد. در این میان، ترکیب حاوی ۱۰ درصد لاتکس و ۰/٦ درصد الیاف شیشه، که در پژوهش حاضر بیشترین مقاومت فشاری برابر با ٦۸/۸۰ مگاپاسکال را نیز نشان داده است، از نظر ساختاری می‌تواند بیانگر تعادل مناسب میان تراکم ماتریس، پیوستگی فاز پلیمری و عملکرد الیاف باشد. بااین‌حال، این همزمانی نباید به‌صورت یک رابطه علّی ساده میان مقاومت فشاری و مقاومت سایشی تفسیر شود؛ بلکه مقاومت فشاری در اینجا به‌عنوان یکی از شاخص‌های مرتبط با انسجام و تراکم ماتریس در کنار سایر عوامل مؤثر بر سایش در نظر گرفته می‌شود. افزایش مقدار الیاف به ۰/۸ درصد نیز الزاماً موجب بهبود متناسب مقاومت سایشی نمی‌شود. اگرچه افزایش الیاف می‌تواند ظرفیت پل‌زنی و کنترل ترک را افزایش دهد، مقدار بالاتر الیاف ممکن است کارایی بتن تازه را کاهش داده و پراکنش یکنواخت آنها را دشوارتر کند. در چنین شرایطی، ایجاد نواحی با تراکم کمتر یا تجمع موضعی الیاف می‌تواند پیوستگی ماتریس را در برخی نقاط کاهش دهد. بنابراین، اثر الیاف بر سایش دارای یک روند کاملاً خطی نیست و به کیفیت پراکنش، تراکم و پیوستگی نهایی ساختار نیز وابسته است. کمترین عمق سایش برابر ۰/۸۰۳ میلی‌متر مربوط به GPC10L0.6Gl بوده است.

همچنین، مقایسه رفتار سایشی با سایر نتایج مکانیکی نشان می‌دهد که مقاومت کششی و خمشی نیز در تفسیر عملکرد سطحی اهمیت دارند. این موضوع به‌ویژه برای بتن روسازی مهم است، زیرا بارگذاری‌های تکراری ناشی از عبور وسایل نقلیه می‌توانند موجب ایجاد و توسعه ریزترک‌های سطحی شوند و در نهایت جداشدگی ذرات را تسریع کنند. در نتیجه، ترکیبی که علاوه بر تراکم مناسب، از پیوستگی کششی و توانایی کنترل ریزترک برخوردار باشد، می‌تواند رفتار سایشی پایدارتر و یکنواخت‌تری نشان دهد. در مجموع، نتایج آزمون سایش نشان می‌دهد که عملکرد سایشی بتن ژئوپلیمری اصلاح شده با سیتم لاتکس-سولفا و الیاف مورد مطالعه حاصل اثر همزمان اصلاح ماتریس توسط لاتکس اکریلیک و تقویت ساختار توسط الیاف شیشه است. بنابراین، تفسیر رفتار سایشی صرفاً بر اساس مقاومت فشاری کافی نیست و باید تعامل میان تراکم و تخلخل ماتریس، کیفیت ناحیه انتقالی، پیوستگی سطح، کنترل ریزترک‌ها و پراکنش الیاف نیز در نظر گرفته شود.



شکل ۱۴. نتایج مقاومت سایشی نمونه های ژئوپلیمر اصلاح شده

٤-نتیجه گیری

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان موارد زیر را به‌عنوان مهم‌ترین دستاوردها بیان کرد:

-افزودن لاتکس اکریلیک موجب بهبود خواص مکانیکی بتن ژئوپلیمری شد، به‌گونه‌ای که مقاومت فشاری تا مقدار بهینه ۱۰ درصد لاتکس افزایش یافت. بیشترین مقاومت فشاری برابر ٦٨/٨ مگاپاسکال در نمونه حاوی ۱۰ درصد لاتکس و ۰/٦ درصد الیاف شیشه به دست آمد. افزایش بیشتر لاتکس باعث کاهش نسبی مقاومت فشاری شد که ناشی از افزایش سهم فاز پلیمری و کاهش سختی ماتریس ژئوپلیمری است.

-مقاومت کششی و مقاومت خمشی با افزایش هم‌زمان مقدار لاتکس و الیاف شیشه روندی افزایشی نشان دادند. بیشترین مقاومت و مقاومت خمشی در نمونه حاوی ۱۵ درصد لاتکس و ۰/۸ درصد الیاف شیشه حاصل شد که نشان‌دهنده نقش مؤثر لاتکس در بهبود چسبندگی ماتریس و عملکرد پل‌زنی الیاف در کنترل رشد ترک‌ها است.

-نتایج این پژوهش نشان داد که طرح اختلاط بهینه برای دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری با طرح اختلاط بهینه برای مقاومت کششی و خمشی یکسان نیست. این موضوع بیانگر آن است که طراحی بتن ژئوپلیمری باید بر اساس عملکرد مورد انتظار سازه انجام شود و انتخاب طرح اختلاط صرفاً بر مبنای مقاومت فشاری نمی‌تواند معیار مناسبی باشد.

-از دیدگاه مهندسی راه و روسازی، مقاومت‌های کششی و خمشی بالا نقش مهمی در کاهش ترک‌خوردگی، افزایش مقاومت در برابر خستگی و بهبود عملکرد روسازی‌های بتنی تحت بارگذاری‌های تکراری ایفا می‌کنند. همچنین مقاومت فشاری مناسب موجب افزایش ظرفیت باربری و مقاومت در برابر خردشدگی سطح روسازی می‌شود. بنابراین اصلاح بتن ژئوپلیمری با لاتکس اکریلیک و الیاف شیشه می‌تواند موجب افزایش دوام، کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش عمر بهره‌برداری روسازی‌های بتنی شود.

-با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، طرح اختلاط حاوی ۱۰ درصد لاتکس و ۰/٦ درصد الیاف شیشه به‌عنوان گزینه مناسب برای کاربردهایی که نیازمند حداکثر مقاومت فشاری هستند، پیشنهاد می‌شود. در مقابل، برای روسازی‌های بتنی، باندهای فرودگاهی و سایر زیرساخت‌های حمل‌ونقل که مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، خستگی و تنش‌های خمشی اهمیت بیشتری دارد، طرح اختلاط حاوی ۱۵ درصد لاتکس و ۸/۰ درصد الیاف شیشه می‌تواند گزینه مناسب‌تری باشد.

در نهایت، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده هم‌زمان از سیستم لاتکس اکریلیک و سولفا آلومینا مبتنی بر تسلیح با الیاف شیشه مقاوم به قلیا، ضمن افزایش مقاومت‌های مکانیکی، قابلیت توسعه بتن‌های ژئوپلیمری با عملکرد بالا را برای کاربرد در پروژه‌های راه و روسازی فراهم می‌کند و می‌تواند به کاهش مصرف سیمان پرتلند، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و توسعه زیرساخت‌های پایدار کمک کند.

۵-مراجع

-Badkul, A., Paswan, R., Singh, S. K., & Tegar, J. P. (2022). A comprehensive study on the performance of alkali activated fly ash/GGBFS geopolymer concrete pavement. *Road Materials and Pavement Design,* 23(8), 1815-1835.

-Chelluri, S., Hossiney, N., Chandra, S., Bekoe, P., & Tia, M. (2025). A Review of the Performance Properties of Geopolymer Pavement-Quality Concrete. *Construction Materials,* 5(3), 49.

-Haddaji, Y., Majdoubi, H., Tayeh, B., et al. (2026). Multi-Environmental Durability of Geopolymer Composites: Mechanisms of Degradation and Performance Enhancement. *International Journal of Pavement Research and Technology.*

-Horpibulsuk, S., Hoy, M., Witchayaphong, P., Rachan, R., & Arulrajah, A. (2017, November). Recycled asphalt pavement–fly ash geopolymer as a sustainable stabilized pavement material. In IOP conference series: materials science and engineering, Vol. 273, No. 1, 012005. *IOP Publishing.*

-Khasawneh, M. A. (2025). *Geopolymer Concrete in Construction Projects: A Review*. Discover Civil Engineering, 2, 124.

-Kumar, P., Gaurav, G., Kotoky, N., et al. (2026). A Critical Review and Analysis of Fly Ash-Based One-Part Geopolymer. *Innovative Infrastructure Solutions.*

-Meskhi, B., Beskopylny, A. N., Stel'makh, S. A., Shcherban', E. M., Mailyan, L. R., Shilov, A. A., & Özkılıç, Y. O. (2023). Analytical Review of Geopolymer Concrete: Retrospective and Current Issues. Materials, 16(10), 3792.
doi.org/10.3390/ma16103792

-Nanda, R. P., & Priya, N. (2024). Geopolymer as stabilising materials in pavement constructions: A review. *Cleaner Waste Systems,* 7, 100134.

Ngayakamo, B. H., & Ikotun, B. D. (2026). *Geopolymer Concrete for Sustainable Construction: Exploring Materials, Properties, Challenges and Future Prospects*. Discover Concrete and Cement.

-Patil, S., & Joshi, D. A. (2025). Design of highly workable geopolymer concrete for rigid pavement by experimental investigation. Innovative Infrastructure Solutions, 10(1), 7.

-Patil, S., Joshi, D. A., Menon, R., & Wadhwa, L. K. (2023). Environmental impact assessment of fly ash and GGBS based geopolymer concrete in road construction. In E3S web of conferences, Vol. 405, 03021. *EDP Sciences.*

-Poltue, T., Suddeepong, A., Horpibulsuk, S., Samingthong, W., Arulrajah, A., & Rashid, A. S. A. (2020). Strength development of recycled concrete aggregate stabilized with fly ash-rice husk ash based geopolymer as pavement base material. *Road Materials and Pavement Design*, *21*(8), 2344-2355.

-Pratap, B., Mondal, S., & Rao, B. H. (2023). Development of geopolymer concrete using fly ash and phosphogypsum as a pavement composite material. *Materials Today: Proceedings*, *93*, 35-40.

-Rathnayaka, M., Karunasinghe, D., Gunasekara, C., Wijesundara, K., Lokuge, W., & Law, D. W. (2024). Machine learning approaches to predict compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete:
A comprehensive review. *Construction and Building Materials,* 419, 135519.

-Sathe, S., Wadki, V., Shekokar, S., Khungar, H., & Biswas, A. (2026). Exploring the Effectiveness of Hybrid Fiber–Reinforced Geopolymer Concrete. *Journal of Structural Design and Construction Practice.*

-Shakor, P., Hasan, S., Awuzie, B. O., Singh, A. K., Rauniyar, A., & Karakouzian, M. (2023). Evaluating the potential of geopolymer concrete as a sustainable alternative for thin white-topping pavement. *Frontiers in Materials,* 10, 1181474.
doi.org/10.3389/fmats.2023.1181474

-Sharma, U., Gupta, N., Bahrami, A., Özkılıç, Y. O., Verma, M., Berwal, P., & Islam, S. (2024). Behavior of Fibers in Geopolymer Concrete: A Comprehensive Review. *Buildings,* 14(1), 136.
doi.org/10.3390/buildings14010136

-Sofri, L. A., Abdullah, M. M. A. B., Sandu, A. V., Imjai, T., Vizureanu, P., Hasan, M. R. M., & Rahman, F. A. (2022). Mechanical performance of fly ash based geopolymer (FAG) as road base stabilizer. *Materials*, *15*(20), 7242.

-Tahir, M. F. M., Abdullah, M. M. A. B., Rahim, S. Z. A., Mohd Hasan, M. R., Sandu, A. V., Vizureanu, P., ... & Kadir, A. A. (2022). Mechanical and durability analysis of fly ash based geopolymer with various compositions for rigid pavement applications. *Materials,* 15(10), 3458.

-Tahir, M. F. M., Abdullah, M. M. A. B., Rahim, S. Z. A., Mohd Hasan, M. R., Sandu, A. V., Vizureanu, P., ... & Kadir, A. A. (2022). Mechanical and durability analysis of fly ash based geopolymer with various compositions for rigid pavement applications. *Materials*, *15*(10), 3458.

-Wongkvanklom, A., Posi, P., Wongsa, A., Zaetang, Y., & Yodsudjai, W. (2025). Enhanced strength reduced modulus high calcium FA geopolymer concrete containing recycled aggregate concrete and Portland cement. *Cleaner Waste Systems,* 100384.

-Yue, J., Nie, X., Wang, Z., Liu, J., & Huang, Y. (2022). Research on the pavement performance of slag/fly ash-based geopolymer-stabilized macadam. *Applied Sciences*, *12*(19), 10000.

-Zhang, X., et al. (2023). Characteristics of fly ash-based geopolymer concrete in the field for 4 years. *Construction and Building Materials,* 382, 131222

Evaluation of the Mechanical Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Modified Concrete

Mostafa Mehrdadfar, Department of Civil Engineering, KI.C., Islamic Azad University, Kish, Iran.

Babak Aminnejad, *Department of Civil Engineering, Ro.C., Islamic Azad University, Roudehen, Iran.*

Vahid Rostami, Department of Civil Engineering, Ha.C., Islamic Azad University, Hamedan, Iran.

Alireza Lork, Department of Civil Engineering, Ka.C., Islamic Azad University, Karaj, Iran.

E-mail: babak.aminnejad@iau.ac.ir

Received: May 2026- Accepted: September 2026

ABSTRACT

Given the growing demand within the road construction and pavement industry for sustainable, durable, and eco-friendly materials, the use of geopolymer concrete as a viable alternative to cement-based concrete has garnered significant research interest. This study investigates the combined effect of a latex-aluminum sulfate system and alkali-resistant glass fibers on the mechanical properties of Class F fly ash-based geopolymer concrete. An alkaline activator solution with a 14-molar concentration was prepared, and specimens were fabricated incorporating varying proportions of acrylic latex (5%, 10%, and 15%) and glass fibers (0.4%, 0.6%, and 0.8%). Aluminum sulfate powder was also included in the mix designs to enhance mechanical performance and mitigate shrinkage. Mechanical testing results indicated that compressive strength increased up to an optimal dosage of 10% latex and 0.6% glass fibers, reaching a peak value of 68.80 MPa. Conversely, the highest tensile strength (7.70 MPa) and flexural strength (9.57 MPa) were observed in specimens containing 15% latex and 0.8% glass fibers. Analysis of the results suggests that the latex-aluminum sulfate modification system improves the geopolymer matrix by forming polymer films and enhancing matrix cohesion, while the glass fibers contribute to improved mechanical performance by controlling crack propagation and increasing stress-transfer capacity. Furthermore, it was determined that the optimal mix design for compressive strength differs from that for tensile and flexural strength; therefore, the selection of a mix design should be based on the expected performance criteria. Given its favorable mechanical strength and high capacity for crack control, the modified geopolymer concrete developed in this study represents a suitable option for applications in concrete pavements, airport runways, and other transportation infrastructure.

Keywords: Geopolymer Concrete, Fly Ash, Acrylic Latex, Sulpha Aluminate, Alkali-Resistant Glass Fibers