

بررسی آزمایشگاهی تأثیر محیط‌های شور بر رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای

تثبیت شده با رزین پلیمری در بستر روسازی

مقاله علمی - پژوهشی

امیرعلی رفیعی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

سیدمحمدحسین حسینی منش، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

*محمد مهدی خبیری (نویسنده مسئول)، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mkhabiri@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱ - پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۱

صفحه ۱۸-۱

چکیده

تأثیر نمک و شوری بر عملکرد رزین پلیمری در تثبیت ماسه روان، حوزه‌ای حیاتی در تحقیقات مهندسی ژئوتکنیک، به‌ویژه در کاربردهای روسازی است. ماسه روان، که با توزیع اندازه ذرات بین ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر و دسایت به روانگرایی شناخته می‌شود، چالش‌های قابل توجهی برای تثبیت ایجاد می‌کند. این پژوهش با استفاده از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری (مطابق استاندارد ASTM D2166)، به بررسی آزمایشگاهی اثرات غلظت‌های مختلف نمک (۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪) بر ماسه روان تثبیت شده با درصدهای متفاوت رزین آکرلیک (۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪) می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح شوری، رابطه‌ای معکوس و نامطلوب با خواص مکانیکی نمونه‌های تثبیت شده دارد. در محیط عاری از نمک (۰٪)، افزایش پلیمر از ۵٪ به ۱۰٪، مقاومت فشاری را به طور چشمگیری از ۳/۱۶ به ۶/۹۰ مگاپاسکال افزایش داد. در مقابل، در محیط با ۲۰٪ نمک، مقاومت فشاری به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و در غلظت ۵٪ پلیمر به ۲/۰۴ مگاپاسکال رسید. مدول الاستیسیته (E_{50}) نیز الگوی مشابهی را نشان داد؛ به طوری که افزایش درصدهای پلیمر در هر سطح شوری ثابت، منجر به افزایش سختی شد (مثلاً در ۰٪ نمک، از ۹۸/۰۵ به ۲۳۶/۸۶ مگاپاسکال)، اما افزایش غلظت نمک در یک درصد پلیمر ثابت، باعث افت محسوس سختی گردید. انرژی شکست نیز در محیط بدون نمک با افزایش پلیمر (از ۰/۰۴۴۲۰ به ۰/۰۹۴۰۸) افزایش یافت، در حالی که در غلظت ۲۰٪ نمک، مقادیر انرژی کاهش یافت و در ۵٪ پلیمر به ۰/۰۴۱۸۸ رسید. افزون بر این، مدل‌سازی آماری (RSM) با ضریب تعیین ۹۹٪ ($R^2 \approx 0.99$) دقت بالای پیش‌بینی نتایج را تأیید کرد. همچنین تحلیل «نسبت چقرمگی به سختی» نشان داد که محیط شور با ایجاد فشار اسمزی و اختلال در پیوندهای عرضی، رفتار مصالح را ترد و شکننده کرده و عمر خستگی روسازی را کاهش می‌دهد. این پژوهش بر ضرورت توجه دقیق به اثرات زیان‌بار سطح شوری بالا بر یکپارچگی سازه‌ای، سختی و جذب انرژی خاک‌های تثبیت شده با پلیمر در راهبردهای بهسازی خاک تأکید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: روسازی، تثبیت ماسه روان، اثرات شوری، رزین پلیمری، بهسازی خاک

۱- مقدمه

خاک به رطوبت و تغییر حجم است (Ayorloo et al., 2012; Firoozi et al., 2017). سیمان پرتلند با واکنش هیدراتاسیون در خاک، پیوندهای سخت و سیمانی بین دانه‌ها ایجاد می‌کند و خاک ماسه‌ای را به یک توده شبه‌بتنی با مقاومت فشاری و دوام بیشتر تبدیل می‌نماید (Rollings et al., 2012; Firoozi et al., 2017).

بهسازی خاک‌های ماسه‌ای سست در لایه زیرین روسازی راه‌ها از طریق تثبیت شیمیایی امری رایج برای بهبود عملکرد مکانیکی و دوام بستر است. افزودن موادی مانند سیمان، آهک یا قیر به خاک موجب اصلاح خواص ژئوتکنیکی آن می‌شود. هدف اصلی تثبیت، افزایش مقاومت باربری و کاهش حساسیت

توجهی بالا برد (Rajabi & Ghasemi, 2025). مطالعات نشان داده‌اند که افزودن رزین‌هایی نظیر اپوکسی و اکریلیک به ماسه، سبب بهبود مقاومت و مدول الاستیسیته آن می‌گردد (Payne, 1966; Rajabi & Ghasemi, 2025). برای مثال، در یک پژوهش تزریق امولسیون پلیمر وینیل-اکریلیک در ماسه بادی موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری تک‌محوری و سختی مخلوط شد؛ به طوری که پلیمر با ایجاد پیوندهای پایدار بین دانه‌های ماسه، از گسیختگی زودرس نمونه جلوگیری کرد (Rajabi & Ghasemi, 2025). هم‌چنین گزارش شده است که برخی پلیمرهای مایع پس از اختلاط با ماسه در دمای محیط طی چند روز سخت شده و مقاومت UCS مخلوط را تا مرتبه مگاپاسکال ارتقا می‌دهند (Zhu et al., 2019). به علاوه، استفاده از رزین‌های پلیمری می‌تواند نفوذپذیری خاک را کاهش داده و آن را در برابر فرسایش آبی مقاوم‌تر سازد. در مجموع، تحقیقات انجام‌شده حاکی از اثربخشی چشمگیر تثبیت‌کننده‌های پلیمری در بهبود خصوصیات مقاومتی و تغییر شکلی خاک‌های ماسه‌ای است؛ هرچند که این مواد هزینه اولیه بالاتری نسبت به افزودنی‌های سنتی دارند، اما به دلیل نیاز به مقدار کم و نیز دوام بالقوه بیشتر، به‌عنوان راهکاری نوین و سازگار با محیط‌زیست مطرح شده‌اند (Rajabi & Ghasemi, 2025). وجود املاح محلول (مانند کلرید سدیم، سولفات منیزیم و سایر نمک‌ها) در آب زیرزمینی یا خاک منطقه می‌تواند رفتار و دوام خاک تثبیت‌شده را تحت تأثیر قرار دهد. محیط‌های ساحلی و خاک‌های شور حاوی یون‌هایی هستند که ممکن است با ماده تثبیت‌کننده واکنش داده یا در منافذ رسوب کنند. مطالعات نشان داده‌اند که حضور یون سولفات در خاک یک چالش جدی برای تثبیت با سیمان یا آهک است، زیرا واکنش سولفات با هیدرات‌های سیمان موجب تشکیل کریستال‌های اترینگایت و سایر محصولات انبساطی می‌شود که به تدریج باعث تورم و تخریب ساختار تثبیت شده خواهد شد. برای نمونه، در یک پروژه راه روستایی گزارش شده است که نفوذ سولفات از آب زیرزمینی به لایه پایه تثبیت‌شده با سیمان طی چند ماه موجب ایجاد تورم‌های موضعی و ترک در روسازی شد؛ آزمایش‌ها حضور مقادیر قابل توجه اترینگایت را در مخلوط سیمان-خاک تأیید کردند که عامل ایجاد تورم‌های عرضی در راه بوده است. این پدیده موسوم به حمله سولفاتی اگرچه نسبتاً نادر

(1999). آهک عمدتاً برای خاک‌های رسی به کار می‌رود و از طریق واکنش‌های پوزولانی و تبادل یونی باعث لخته‌شدن رس‌ها، کاهش خاصیت خمیری و نشست‌پذیری، و بهبود کارایی و پایداری حجمی خاک می‌شود. در خاک‌های ماسه‌ای، آهک در صورت وجود مقدار کم رس یا سیلت می‌تواند با تشکیل محصولات سیمانی مقاومت را کمی افزایش دهد. قیر (امولسیون آسفالتی) نیز به‌عنوان یک ماده آلی چسبنده برای تثبیت استفاده می‌شود؛ مکانیزم اصلی قیر، پوشش دادن دانه‌های خاک و آب‌گریز کردن آن‌هاست که منجر به کاهش حساسیت رطوبتی و افزایش پایداری لایه‌های ماسه‌ای می‌شود. به عنوان مثال، در روش ماسه-قیر ذرات ماسه با یک لایه نازک قیر اندود شده و به یکدیگر می‌چسبند و مصالح شبه‌آسفالتی با مقاومت و انعطاف‌پذیری مناسب حاصل می‌گردد. بنابراین روش‌های سنتی تثبیت (سیمان، آهک، قیر و ترکیبات آن‌ها) بسته به نوع خاک و شرایط پروژه می‌توانند مشکلات ناشی از ضعف مقاومت یا زیادبودن تغییرشکل‌پذیری خاک بسته‌تر را برطرف کنند (Ahmadullah & Chrysochoou, 2024; Coelho et al., 2024; Hosseini Manesh et al., 2025). در سال‌های اخیر، به دلیل برخی محدودیت‌ها و اثرات زیست‌محیطی مواد سنتی (مثلاً انتشار CO₂ ناشی از مصرف زیاد سیمان)، پلیمرها به‌عنوان دسته جدیدی از تثبیت‌کننده‌های خاک مورد توجه قرار گرفته‌اند. رزین‌های پلیمری مختلفی مانند اپوکسی، پلی‌اکریلیک (آکریلات‌ها)، پلی‌یورتان، پلی‌وینیل استات و اوره‌فرمالدهید در پژوهش‌ها برای تثبیت ماسه به کار رفته‌اند (Rajabi & Ghasemi, 2025). مکانیزم عملکرد این مواد عمدتاً فیزیکی-شیمیایی است؛ به این صورت که پلیمر پس از اختلاط با خاک و سخت شدن (کیورینگ)، به شکل یک غشای چسبنده در پیرامون دانه‌ها عمل کرده و آنها را به یکدیگر می‌چسباند (Payne, 1966; Rajabi & Ghasemi, 2025). در واقع، برخلاف سیمان و آهک که با واکنش‌های شیمیایی درون ماتریس خاک محصولات جدید (ژل سیمان، سیلیکات کلسیم آبدار و ...) تشکیل می‌دهند، رزین پلیمری بیشتر نقش چسباننده‌ی ذرات را ایفا می‌کند و یک شبکه پلیمری مستحکم در خلل و فرج خاک به وجود می‌آورد (Payne, 1966). این سازوکار باعث افزایش چشمگیر مقاومت برشی و فشاری خاک‌های ماسه‌ای سست می‌شود؛ به طوری که حتی با درصدهای کم پلیمر (معمولاً ۲٪ تا ۵٪ وزن خاک) می‌توان مقاومت فشاری محصورنشده را به طور قابل

بخش عمده‌ای از مقاومت کسب‌شده‌ی اولیه‌ی خود را حفظ کردند (حدود ۰.۵۷٪ بهبود مقاومت با پلیمر نسبت به حالت اولیه گزارش شد). مشاهدات میکروسکوپی (SEM) نیز تشکیل غشای پلیمری در اطراف دانه‌ها و پرشدن خلل و فرج خاک شور را تأیید کرده است که مانع رشد بلورهای نمک در فضاها ی خالی و در نتیجه کاهش تخریب ساختار می‌شود (Zhu et al., 2019). البته باید توجه داشت که هرچند پلیمرها تأثیر منفی نمک را بر مقاومت تا حدی مهار می‌کنند، اما تحت چرخه‌های متعدد تر و خشک یا یخبندان نیز ممکن است افت مقاومت تدریجی مشاهده شود (Wang et al., 2023). از این رو برخی پژوهشگران ترکیب پلیمر با سایر مواد (مانند خاکستر بادی، سرباره یا نانومواد) را برای بهبود بیشتر دوام در محیط‌های خورنده پیشنهاد کرده‌اند (Li et al., 2023; Rajabi & Ghasemi, 2025). به طور خلاصه، مرور پیشینه نشان می‌دهد رزین‌های پلیمری به علت سازوکار چسبندگی منحصربه‌فردشان، توانایی قابل توجهی در بهبود مقاومت و پایداری ماسه دارند و در محیط‌های شور عملکرد بهتری نسبت به تثبیت‌کننده‌های مبتنی بر سیمان از خود نشان می‌دهند. با این حال، ارزیابی دقیق تأثیر درازمدت شوری (به‌ویژه با حضور یون‌های مهاجم مانند سولفات‌ها) بر دوام خاک‌های تثبیت شده با پلیمر نیازمند تحقیقات بیشتر و آزمون‌های چرخه‌ای تروخشک و یخبندان در شرایط کنترل شده آزمایشگاهی و میدانی است. این موضوع به‌ویژه برای بستر روسازی در مناطق ساحلی و خشک اهمیت دارد که تمرکز پژوهش حاضر نیز بر همین مسئله است.

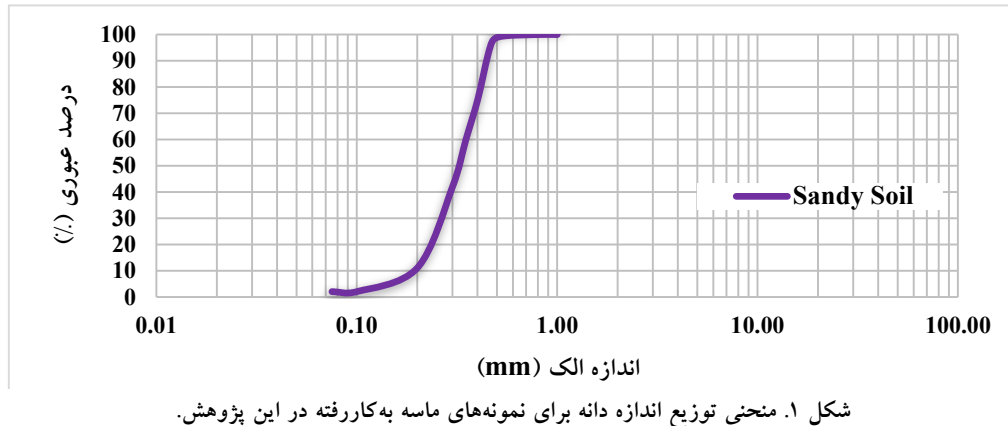
۲- مواد و روش

هسته اصلی این پژوهش شامل آزمایش‌های تک‌محوری بود که در تعیین نیروی حداکثری موردنیاز برای ایجاد گسیختگی در نمونه‌های ماسه روان تثبیت‌شده و همچنین انرژی مرتبط با لحظه شکست نقش اساسی دارند. این آزمایش‌ها با دقت و مطابق با استاندارد های بین‌المللی، به‌ویژه ASTM D2166 برای آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری، انجام گرفتند. این استاندارد چارچوب اجرایی لازم برای تضمین دقت و قابلیت اطمینان نتایج آزمایشگاهی را مشخص می‌کند. مواد مورد استفاده در این آزمایش عمدتاً شامل ماسه روان با دقت انتخاب شده بود که به دلیل محتوای بالای ذرات ریز ماسه

است، اما در صورت وقوع می‌تواند به خرابی زودرس تثبیت منجر شود (Rollings et al., 1999). به همین دلیل تو صیه می‌شود در خاک‌های دارای سولفات بالا (مانند برخی خاک‌های گچی یا مناطق شور) از تثبیت‌کننده‌های جایگزین بدون پایه آهکی استفاده شود. از سوی دیگر، یون‌های کلرید (مثلاً از نمک دریا یا نمک‌های ضدیخ) معمولاً واکنش شیمیایی مخربی با سیمان نشان نمی‌دهند، هرچند ممکن است خوردگی فولاد مدفون را تشدید کنند. حتی پژوهش‌ها حاکی از آن است که مقدار معینی کلرید سدیم (NaCl) می‌تواند خصوصیات تراکم‌پذیری و مقاومت CBR خاک را بهبود بخشد؛ به عنوان مثال، در یک مطالعه آزمایشگاهی افزودن NaCl به آب اختلاط خاک ماسه‌ای، باعث افزایش چگالی خشک ماکزیمم و کاهش رطوبت بهینه شد و مقاومت CBR نمونه‌های تثبیت‌نشده و سیمان‌تزیق‌شده را به طور محسوسه بالا برده است (Baldovino et al., 2025; Puppala et al., 2018). بنابراین حضور املاح کلریدی در حد کم می‌تواند با کاهش ضخامت لایه آب دوگانه ذرات ریز، منجر به تراکم بهتر و مقاومت بیشتر خاک گردد. با این حال، در غلظت‌های بالاتر نمک، پدیده‌هایی چون شوروارگی (تبلور نمک در منافذ طی خشک شدن) می‌تواند ساختار خاک را تضعیف کند. به‌خصوص در چرخه‌های متوالی تر و خشک شدن در محیط‌های شور، کریستالیزاسیون و انحلال مکرر نمک‌ها تنش‌هایی در ریزساختار خاک ایجاد می‌کند که ممکن است پیوندهای خاک-سیمان یا خاک-پلیمر را تخریب کند. از این رو، پایداری مصالح تثبیت‌شده در برابر چرخه‌های رطوبتی در محیط‌های نمکی یکی از محورهای پژوهشی مهم است (Baldovino et al., 2024; He et al., 2025). مطالعات اخیر پیرامون کاربرد پلیمرها در خاک‌های شور نشان می‌دهد این مواد می‌توانند عملکرد نسبتاً مناسبی در چنین محیط‌هایی داشته باشند. برای مثال، Zhu و همکاران (۲۰۱۹) با به‌کارگیری یک پلیمر محلول در آب برای تثبیت خاک رسی-ماسه‌ای ساحلی دریافتند که افزودن فقط ۱/۵٪ پلیمر، مقاومت فشاری محصورنشده نمونه‌ی شور را بیش از ۵۰٪ افزایش داده و پایداری آن را در برابر یک چرخه‌تر و خشک نسبت به حالت تثبیت‌نشده به مراتب بهبود بخشیده است. در واقع، نمونه‌های بدون تثبیت پس از یک سیکل تر و خشک کاملاً فروپاشی شده و مقاومت خود را از دست دادند، در حالی که نمونه‌های تثبیت شده با رزین پلیمری

داشت؛ این ویژگی ترکیب دانه بندی یکنواختی را تضمین می کرد که برای یکپارچگی نمونه های آزمایش حیاتی است (شکل ۱).

و حساسیت آن به روانگرایی تحت تنش شناخته می شود. ماسه روان مورد استفاده، از بستر یک رودخانه محلی برداشت شد و توزیع اندازه ذرات آن در بازه ۰/۱ میلی متر تا ۰/۵ میلی متر قرار



شکل ۱. منحنی توزیع اندازه دانه برای نمونه های ماسه به کاررفته در این پژوهش.

که موجب افزایش شفافیت رنگ و جذابیت ظاهری می شود. این رزین ضمن حفظ انعطاف پذیری، چسبندگی و دوام بسیار خوبی ارائه می دهد و همین امر آن را برای کاربردهای گوناگون ایده آل می سازد. رزین آکرلیک پایه آب با وزن مولکولی بالا، خواص چسبندگی عالی و انعطاف پذیری استثنایی شناخته می شود که امکان تشکیل لایه های بادوام با مقاومت در برابر آب و پایداری در برابر اشعه فرابنفش را فراهم می کند. ماهیت آبدوست آن موجب نفوذ مؤثر در بستر می شود. هنگامی که برای تثبیت ماسه روان به کار گرفته شود، این رزین می تواند موجب افزایش چسبندگی و کاهش روانی گردد و بدین ترتیب یکپارچگی سازه ای را بهبود بخشد و فرسایش در مناطق آسیب پذیر را به حداقل برساند. افزون بر این، به دلیل غیر سمی بودن و سازگاری با محیط زیست، گزینه ای مطلوب محسوب می شود زیرا نسبت به نمونه های پایه حلال، ترکیبات آلی فرار (VOCs) بسیار کمتری دارد (Giosuè et al., 2017). در جدول ۱، ویژگی های ساختاری تثبیت کننده ارائه شده است.

رزین پلیمری به کاررفته در این پژوهش، که به طور خاص برای تثبیت خاک طراحی شده بود، یک رزین آکرلیک تجاری در دسترس بود که به دلیل ویژگی های گیرش سریع و استحکام چسبندگی استثنایی شناخته می شود. شایان ذکر است که فرمولاسیون این رزین پلیمری شامل افزودنی های متنوعی برای ارتقای عملکرد در محیط های شور بوده و از این رو، آن را به ویژه برای این مطالعه مناسب ساخته است. آزمایش های انجام شده نه تنها مقاومت فشاری را اندازه گیری کردند، بلکه قابلیت جذب انرژی در مخلوط های ماسه روان-رزین را نیز ارزیابی نمودند و بدین ترتیب دیدگاه های ارزشمندی در خصوص مقاومت سازه ای آن ها تحت شرایط بارگذاری مشابه کاربرد های روسازی راه فراهم آوردند. رابطه پیچیده میان سطوح شوری و عملکرد پلیمر با دقت مورد تحلیل قرار گرفت و داده های ارزشمندی برای پیشبرد حوزه تثبیت خاک، به ویژه در مناطقی که ماسه روان چالش های مهندسی قابل توجهی ایجاد می کند، ارائه شد. از طریق آزمایش های نظام مند و پایبندی به استانداردهای موجود، این پژوهش در پی آن است که به توسعه راهکارهای نوآورانه و قابل اعتمادتر برای ساخت راه در شرایط خاک های ناپایدار کمک نماید. رزین آکرلیک پایه آب دارای ظاهری نیمه شفاف با سطحی صاف و براق است

جدول ۱. مشخصات تثبیت کننده

ویژگی	توضیحات
ترکیب شیمیایی	امولسیون پلیمر آکرلیک
pH	معمولاً ۷-۹
ویسکوزیته	ویسکوزیته کم تا متوسط
چگالی	۱-۱/۲ گرم بر سانتی متر مکعب
حلالیت	محلول در آب
پایداری حرارتی	پایداری مناسب تا دمای ۲۰۰ °C

دشت کویر که در مرکز ایران واقع شده است، به چشم انداز کویری منحصر به فرد خود شناخته می شود که با تلماسه های جابه جاشونده و ناهمواری های خشک مشخص می گردد. ماسه روان در شمال شرقی شهر یزد نمونه ای چشمگیر از توانایی طبیعت در شکل دهی به مناظر پیچیده از طریق ترکیبی از فرایندهای زمین شناختی و تأثیرات اقلیمی است. این محیط نه تنها به عنوان یک اکو سیستم حیاتی عمل می کند، بلکه به مثابه بستری برای بروز بیان فرهنگی و فعالیت اقتصادی نیز به شمار می آید. درک ویژگی های آن به قدردانی عمیق تر از این محیط

شکننده و در عین حال دل انگیز می انجامد و بر اهمیت رویه های پایدار برای حفظ چنین شگفتی های طبیعی منحصر به فرد برای نسل های آینده تأکید می کند. ویژگی های فیزیکی ماسه روان معمولاً شامل توزیع اندازه دانه، چگالی، میزان رطوبت و خصوصیات تراکم پذیری است. این ویژگی ها رفتار ماسه را از نظر پایداری، نفوذ پذیری و مکانیک کلی تحت تأثیر قرار می دهند. جدول ۲، ویژگی های فیزیکی ضروری یافت شده در ماسه روان این منطقه را خلاصه می کند.

جدول ۲. مشخصات ماسه

ویژگی فیزیکی	مقدار/توضیح
توزیع اندازه دانه	عمدتاً ماسه ریز تا متوسط (۰/۱-۰/۵ میلی متر)
چگالی ذره ای	۲/۶۵ گرم بر سانتی متر مکعب
چگالی حجمی	۱/۵ گرم بر سانتی متر مکعب (بسته به میزان تراکم متغیر است)
مقدار رطوبت	میانگین ۴٪-۲ (دارای نوسان فصلی)
تخلخل	۳۰-۳۵٪
شکل دانه	نیمه گوشه دار تا گوشه دار
رنگ	خاکی روشن تا قهوه ای مایل به زرد
چسبندگی	ناچیز

مقاومت برشی ماسه به طور بنیادی توسط دو پارامتر کلیدی تعیین می شود: زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) و مقاومت چسبندگی (C). زاویه اصطکاک داخلی که معمولاً در بازه ۲۸ تا ۳۵ درجه قرار دارد، نقش مهمی در مقابله با نیروهای برشی ایفا می کند و بازتاب دهنده اصطکاک میان دانه ای است که در درون ماتریس ماسه ایجاد می شود. در مقابل، مقاومت چسبندگی (C) در ماسه خشک عملاً ناچیز است و این امر نشان می دهد که استحکام این ماده عمدتاً متکی بر اصطکاک است نه چسبندگی. بیشینه چگالی خشک (MDD) ماسه حدود ۱/۶ گرم بر سانتی متر مکعب است، در حالی که رطوبت بهینه (OMC) معمولاً در حدود ۵ تا ۷٪ قرار دارد و بر تراکم پذیری و پایداری

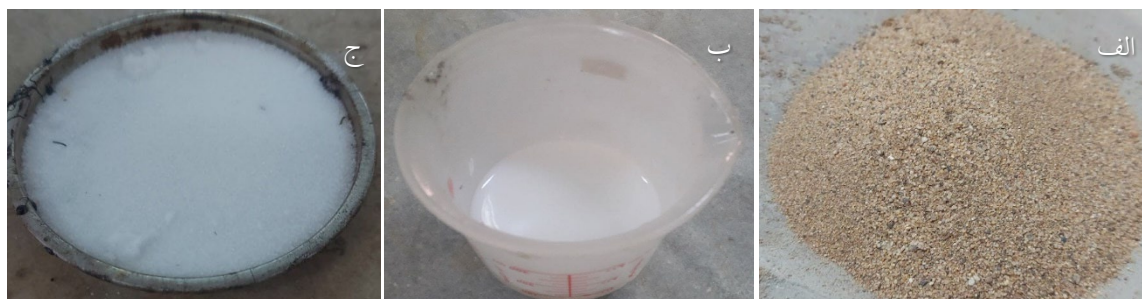
خاک های ماسه ای تأثیر می گذارد. افزون بر این، نفوذ پذیری ماسه که در بازه 10^{-3} تا 10^{-5} متر بر ثانیه قرار دارد، به طور قابل توجهی تحت تأثیر اندازه دانه و تراکم بستگی است و بر ویژگی های زهکشی و فیلتراسیون که در کاربردهای مهندسی ژئوتکنیک حیاتی اند اثر می گذارد. ترکیب شیمیایی ماسه روان در تعیین میزان تناسب آن برای کاربردهای مختلف و درک رفتار آن در محیط های گوناگون نقش حیاتی دارد. ویژگی های شیمیایی ماسه ها در شمال شرقی یزد شامل کانی شناسی و ترکیب عنصری است. جدول ۳ که در ادامه ارائه شده است، اجزای اصلی شیمیایی یافت شده در ماسه روان این منطقه را نشان می دهد.

جدول ۳. ترکیب شیمیایی ماسه

درصد وزنی (%)	جزء شیمیایی
۸۵-۹۰	سیلیکا (SiO_2)
۵-۷	آلومینا (Al_2O_3)
۲-۴	اکسید آهن (Fe_2O_3)
۱-۳	اکسید کلسیم (CaO)
۰/۵-۲	اکسید منیزیم (MgO)
۰/۵-۱/۵	اکسید سدیم (Na_2O)
۰/۱-۰/۵	اکسید پتاسیم (K_2O)

شرایط محیطی حاکم تعدیل شوند. بنابراین، انجام آزمایش‌های جامع برای دستیابی به عملکرد بهینه در کاربردهای مختلف ضروری است؛ امری که در نهایت به افزایش پایداری و ایمنی در فعالیت‌های عمرانی منجر می‌شود. بررسی اثرات مخرب آب شور بر تثبیت خاک ماسه روان با استفاده از رزین‌های پلیمری پایه آب مستلزم رویکردی جامع و روش شناختی است که هم آزمایش‌های آزمایشگاهی و هم آزمایش‌های میدانی را در برگیرد. طرح آزمایش شامل برداشت نمونه‌های خاک ماسه روان از مکان‌های مختلف و سپس آماده‌سازی نمونه‌های آزمایشی خواهد بود که در آن‌ها غلظت‌های متفاوتی از آب شور، به‌ویژه محلول‌های NaCl در محدوده ۰٪ تا ۲۰٪/۱ شیب، به کار گرفته می‌شوند. این نمونه‌ها سپس با دوزهای از پیش تعیین‌شده‌ای از رزین پلیمری تیمار شده و تحت آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) قرار خواهد گرفت تا تغییرات در ویژگی‌های مکانیکی و یکپارچگی ساختاری خاک کمی‌سازی شود. در نهایت، درکی جامع از برهم‌کنش میان محیط آب شور، بسترهای ماسه روان و روش‌های تثبیت پلیمری به‌کاررفته به دست آید. مواد و شرایط آزمایشی شامل ماسه، محلول نمکی برای ایجاد محیط شور و رزین اکریلیک به‌عنوان تثبیت‌کننده در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. شکل ۳ مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها، ایجاد شرایط محیط شور و دستگاه آزمون مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. برای شفاف‌سازی مراحل کار، فلوجارت شکل ۴ ورودی‌ها، تهیه‌ی نمونه‌های مکعبی [۵۰×۵۰×۵۰ میلی‌متر]، شرایطدهی شور و آزمون مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) را نشان می‌دهد.

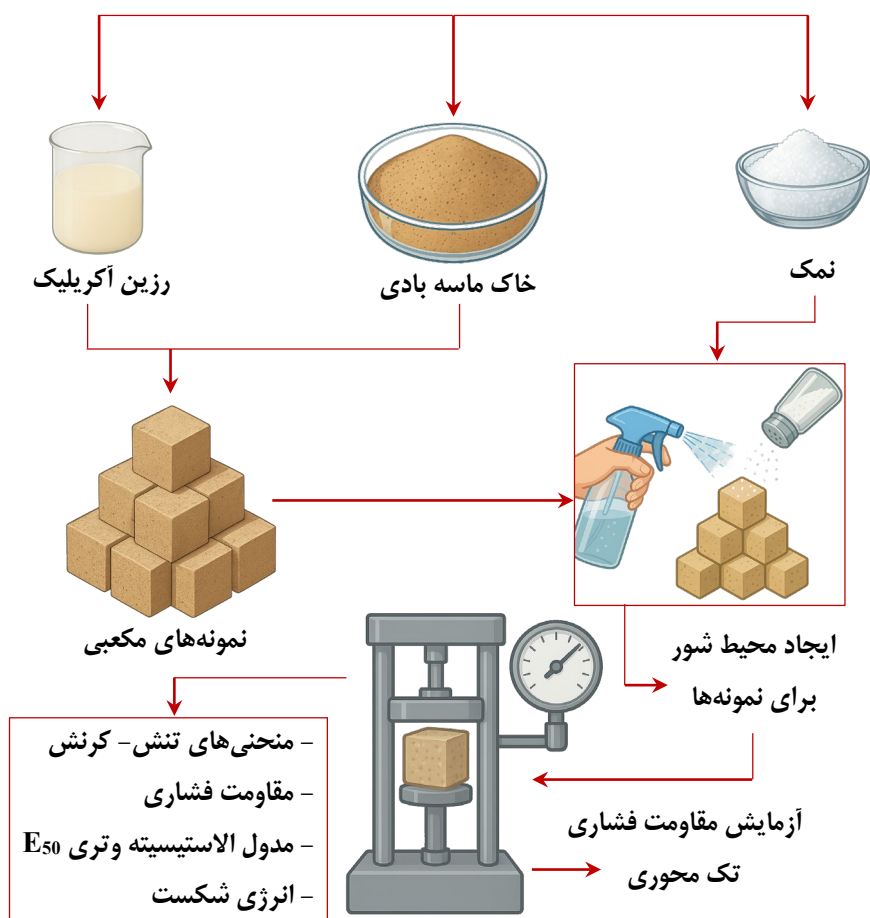
امولسیون‌های قیری، رزین‌ها و مواد پلیمری در بهبود ویژگی‌های چسبندگی ماسه روان نقش محوری دارند؛ ماسه‌ای که چالش‌های منحصر به فردی را در پروژه‌های عمرانی و مهندسی عمران ایجاد می‌کند. غلظت امولسیون قیر معمولاً در محدوده ۲٪ تا ۱۰٪ وزنی مورد استفاده قرار می‌گیرد که متناسب با ویسکوزیته و استحکام پیوند مورد نیاز برای کاربرد انتخاب می‌شود. به‌طور هم‌زمان، چسب‌های اصلاح‌شده پلیمری عموماً شامل ۵٪ تا ۱۵٪ رزین هستند که چسبندگی قوی در شرایط خاک‌های سست را تضمین می‌کنند. این نسبت‌ها ثابت نیستند و ممکن است بر اساس نیازهای خاص پروژه و همچنین



شکل ۲. الف) ماسه به‌کاررفته در پژوهش ب) رزین اکریلیک به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک ج) ایجاد محیط شور با نمک



شکل ۳. الف) نمونه‌های ساخته شده در قالب ب) ایجاد شرایط محیط شور ج) دستگاه تعیین مقاومت فشاری



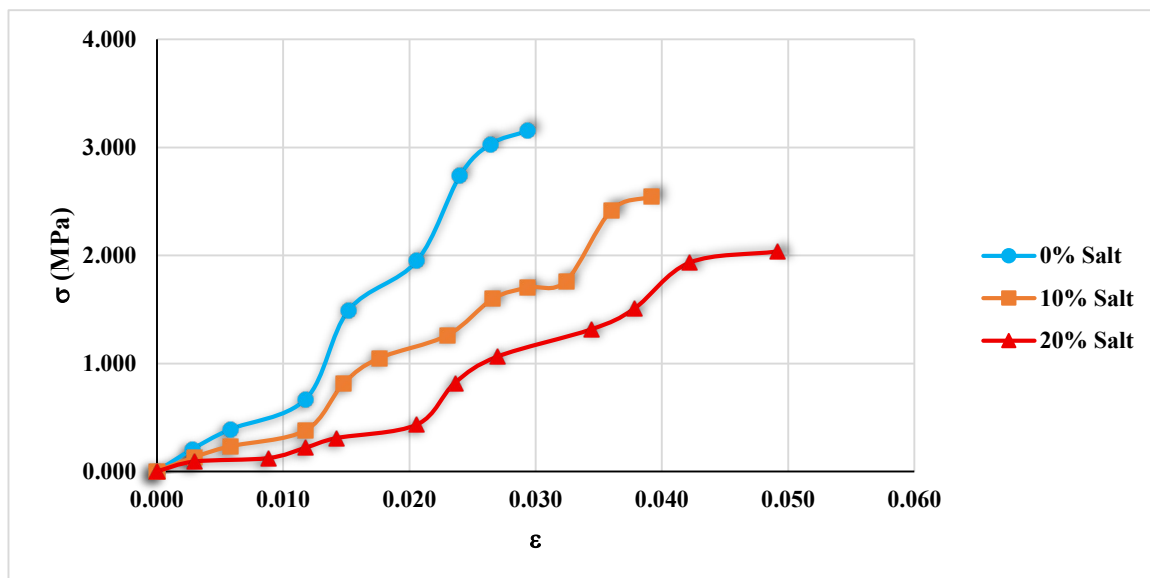
شکل ۴. روند آزمایش از تهیه نمونه تا آزمون UCS و استخراج شاخص‌ها

۳- نتایج و بحث

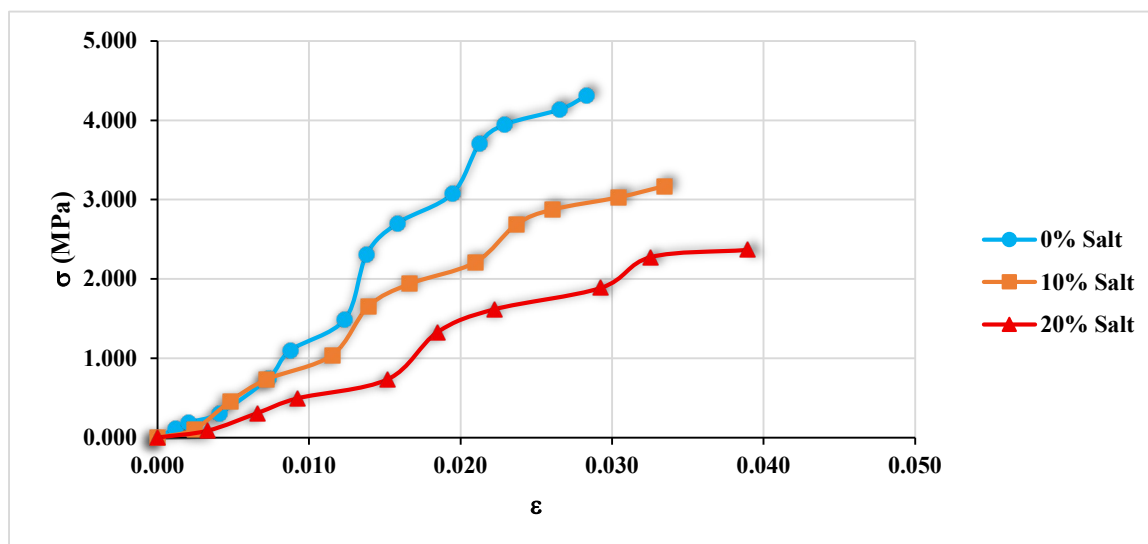
۳-۱- تحلیل مقاومت فشاری و کرنش در شکست

تحلیل آزمایشگاهی در خصوص تأثیر غلظت‌های مختلف نمک بر عملکرد مکانیکی رزین‌های پلیمری مورد استفاده در تثبیت ماسه سست، الگوهای معناداری را در ارتباط با مقاومت فشاری نسبت به میزان پلیمر و سطح شوری آشکار می‌سازد. به‌طور مشخص، در غلظت ۰٪ نمک، افزایش میزان پلیمر از ۵٪ به ۱۰٪ منجر به بهبود چشمگیر مقاومت فشاری شد، به‌طوری‌که مقادیر اندازه‌گیری‌شده از ۳/۱۶ MPa به ۶/۹۰ MPa افزایش یافت. این همبستگی نشان‌دهنده رابطه‌ای قوی میان افزایش غلظت پلیمر و ارتقای یکپارچگی سازه‌ای است و کارایی رزین‌های پلیمری را در بهبود پایداری ماتریس‌های ماسه‌ای تحت شرایط غیرشور برجسته می‌سازد. در مقابل، افزودن غلظت ۲۰٪ نمک اثرات نامطلوبی بر مقاومت فشاری نشان داد؛ به‌گونه‌ای که مقادیر در غلظت ۵٪ پلیمر به ۲/۰۴ مگاپاسکال کاهش یافت. این افت، اثرات منفی شوری بالا بر کارایی پلیمر را برجسته می‌کند. پدیده‌های مشاهده‌شده را می‌توان به برهم‌کنش‌های چندبعدی نسبت داد: از نظر مکانیکی، نمک ممکن است یکپارچگی زنجیره‌های پلیمری را مختل کرده و منجر به کاهش ظرفیت باربری گردد؛ از نظر فیزیکی، محیط شور موجب تورم در پلیمرها شده و به افزایش کرنش منجر می‌شود، همان‌طور که افزایش کرنش در شکست از ۰/۲۹ به ۰/۴۹ با افزایش غلظت نمک نشان داده است؛ و از نظر شیمیایی، برهم‌کنش میان یون‌های نمک و ساختارهای مولکولی پلیمر می‌تواند چگالی پیوندهای عرضی را کاهش داده و در نتیجه پایداری کلی ماده را به خطر اندازد. یکی از پدیده‌های فیزیکی قابل توجه که هنگام افزودن نمک به رزین‌های پلیمری مشاهده شد، تغییر در رفتار تورمی آن‌ها است. در شرایط غیرشور، افزایش میزان پلیمر از ۵٪ به ۱۰٪ منجر به بهبود مقاومت فشاری از ۳/۱۶ به ۶/۹۰ مگاپاسکال گردید. با این حال، افزودن غلظت ۲۰٪ نمک موجب افزایش تغییرات هیدرولیکی درون ماتریس پلیمری شد. یون‌های نمک می‌توانند اختلاف فشار اسمزی ایجاد کنند که این امر به تورم زنجیره‌های پلیمری و در پی آن افزایش کرنش منجر می‌شود.

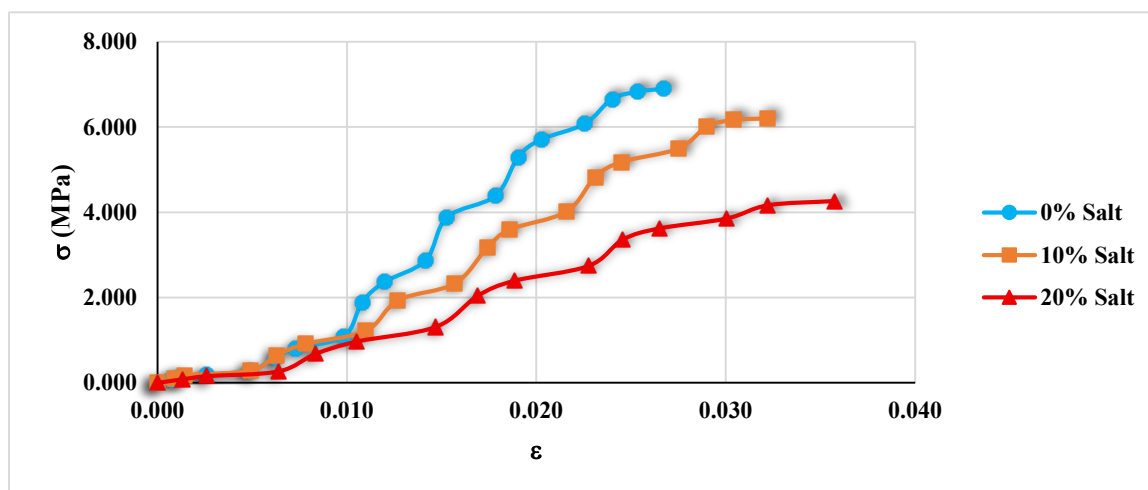
داده‌های آزمایشگاهی به‌طور آشکار افزایش کرنش در شکست از ۰/۲۹ به ۰/۴۹ با افزایش شوری را نشان می‌دهند، که دلالت بر آن دارد که پلیمرها در شرایط شور به دلیل انبساط بیشتر، تحت تنش بالاتری قرار می‌گیرند. با افزایش غلظت نمک، برهم‌کنش‌های یونی می‌توانند جریان محلول پلیمری را در حین اجرا مختل کنند و بدین ترتیب بر یکنواختی توزیع آن اثر بگذارند. این تغییر فیزیکی می‌تواند مستقیماً نیروهای بین‌دانه‌ای درون ماتریس ماسه را تحت تأثیر قرار داده و در نتیجه موجب عملکرد تثبیتی متغیر در غلظت‌های مختلف نمک گردد. غلظت‌های بالای نمک می‌توانند منجر به برهم‌کنش‌های یون-دوقطبی شوند که پایداری سازه‌ای لازم برای کاربردهای باربری را تضعیف می‌کنند. همان‌طور که در یافته‌های ما نشان داده شد، مقاومت فشاری از ۶/۹۰ MPa در غلظت ۱۰٪ پلیمر و ۲/۰۴ MPa در غلظت ۵٪ پلیمر و ۲۰٪ نمک کاهش یافت. این افت چشمگیر، آسیب‌پذیری مکانیکی ناشی از شوری بالا را آشکار می‌سازد که با فروپاشی ظرفیت باربری در چارچوب پلیمری همبستگی دارد. برهم‌کنش‌های کووالانسی که معمولاً به سختی و استحکام ماتریس پلیمری کمک می‌کنند، ممکن است کاهش یافته و در نتیجه گرایش به تغییر شکل تحت تنش افزایش یابد. این کاهش در پیوندهای عرضی با افت مشاهده‌شده در مقاومت فشاری در شرایط شوری بالا همسو است و اهمیت پیوندهای عرضی را برای حفظ یکپارچگی مکانیکی برجسته می‌سازد. به‌عنوان نمونه، کلرید سدیم (NaCl) در محلول به یون‌های Na^+ و Cl^- تفکیک می‌شود که می‌توانند بر تعادل یونی درون زنجیره‌های پلیمری اثر بگذارند. در نتیجه، توانایی پلیمر در حفظ پیکربندی ساختاری خود تضعیف شده و به ماده‌ای ضعیف‌تر تبدیل می‌شود که قادر به تحمل بارهای اعمال‌شده نیست. واکنش‌های هیدرولیز ممکن است در محیط‌های شور کاتالیز شوند، به‌ویژه اگر پلیمر دارای گروه‌های عاملی حساس باشد. این واکنش‌ها می‌توانند به‌طور بیشتر ویژگی‌های مکانیکی و ساختاری سامانه پلیمری را تخریب کرده و کارایی کلی آن در تثبیت ماسه روان را کاهش دهند. شکل‌های ۵ تا ۷ منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌ها را نشان می‌دهد.



شکل ۵. منحنی تنش- کرنش برای نمونه‌های ماسه‌ای تثبیت شده با ۵٪ پلیمر



شکل ۶. منحنی تنش- کرنش برای نمونه‌های ماسه‌ای تثبیت شده با ۷.۵٪ پلیمر



شکل ۷. منحنی تنش- کرنش برای نمونه‌های ماسه‌ای تثبیت شده با ۱۰٪ پلیمر

و برهم کنش‌های میان آن‌ها را در تغییرپذیری کلی متغیر پاسخ داده‌ها، از نرم‌افزار Design-Expert استفاده گردید. جدول ۴ نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای مدل سطح پاسخ درجه دوم (Quadratic) را با بهره‌گیری از روش مجموع مربعات جزئی نوع سوم (Type III Partial Sum of Squares) ارائه می‌دهد. این جدول سهم عوامل گوناگون

به منظور انجام تحلیل‌های آماری پیشرفته و مدل‌سازی ریاضی

جدول ۴. تحلیل واریانس (ANOVA) برای مدل درجه دوم سطح پاسخ

منبع تغییرات (Source)	مجموع مربعات (Sum of Squares)	درجه آزادی (df)	میانگین مربعات (Mean Square)	مقدار F	مقدار P (احتمال بزرگ‌تر بودن از F)
مدل (Model)	۶۹/۳۰	۵	۱۳/۸۶	۴۰۲/۴۰	۰/۰۰۰۱ >
A-درصد نمک	۷/۵۷	۱	۷/۵۷	۲۱۹/۸۰	۰/۰۰۰۱ >
B-درصد پلیمر	۲/۲۳	۱	۲/۲۳	۶۴/۶۳	۰/۰۰۰۱ >
AB (تعامل دو فاکتور)	۱/۷۴	۱	۱/۷۴	۵۰/۵۱	۰/۰۰۰۱ >
A ² (جمله‌ی درجه دوم A)	۰/۱۱	۱	۰/۱۱	۳/۱۲	۰/۰۹۱۹ >
B ² (جمله‌ی درجه دوم B)	۴/۸۷	۱	۴/۸۷	۱۴۱/۳۱	۰/۰۰۰۱ >
باقیمانده (Residual)	۰/۷۲	۲۱	۰/۰۳۴		
عدم برازش (Lack of Fit)	۰/۷۲	۳	۰/۲۴		
خطای خالص (Pure Error)	۰/۰۰۰	۱۸	۰/۰۰۰		
مجموع کل (Cor Total)	۷۰/۰۲	۲۶			

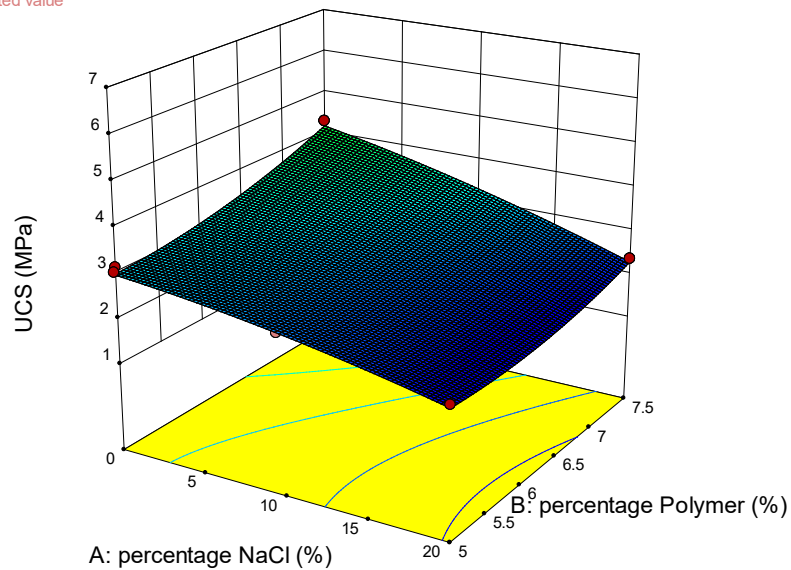
بر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) براساس درصد‌های نمک (A) و پلیمر (B) در ادامه به آن اشاره شده است.

$$UCS = 6.34 + 0.046A - 1.368B - 0.015AB - 0.0013A^2 + 0.144B^2 \quad (1)$$

شکل‌های ۸ و ۹ نمودارهای سه‌بعدی سطح پاسخ را که بر اساس معادله رگرسیون استخراج شده‌اند، نمایش می‌دهند. این نمودارها درک بصری دقیقی از تعامل میان متغیرهای مستقل (نمک و پلیمر) و پاسخ‌های مدل ارائه می‌دهند.

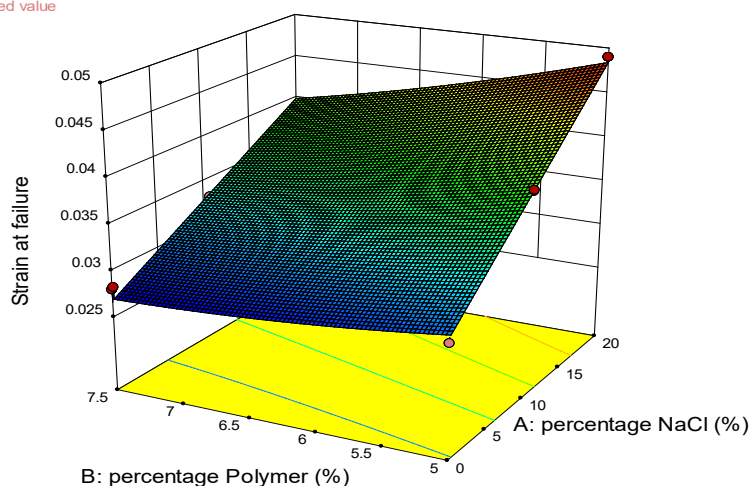
معادله نهایی به دست آمده (که بر حسب فاکتورهای واقعی بیان شده است)، از نظر آماری از استحکام بالایی برخوردار است. این مدل با داشتن انحراف معیار ۰/۱۹ و میانگین ۳/۸۸، ضریب تعیین (R²) برابر با ۰/۹۸۹۷ را ارائه می‌دهد که حاکی از قدرت تبیین بسیار بالای آن است. همچنین، ضریب تعیین اصلاح شده (Adjusted R²) برابر با ۰/۹۸۷۲ و ضریب تعیین پیش‌بینی (Predicted R²) معادل ۰/۹۸۳۵ است که دقت مدل را بیش‌ازپیش تأیید می‌کند. در صد ضریب تغییرات (C.V.) برابر با ۴/۷۸ و آماره PRESS معادل ۱/۱۵ می‌باشد که نشان‌دهنده اعتبار پیش‌بینی مناسب مدل است. رابطه ریاضی حاکم

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 UCS (MPa)
 ● Design points above predicted value
 ○ Design points below predicted value
 6.902
 2.037
 X1 = A: percentage NaCl
 X2 = B: percentage Polymer



شکل ۸. نمودار رویه پاسخ سه‌بعدی (3D Surface Plot) که اثر متقابل درصد نمک و درصد پلیمر را بر مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS) نشان می‌دهد.

Design-Expert® Software
 Factor Coding: Actual
 Strain at failure
 ● Design points above predicted value
 ○ Design points below predicted value
 0.049
 0.027
 X1 = A: percentage NaCl
 X2 = B: percentage Polymer



شکل ۹. نمودار رویه پاسخ سه‌بعدی تغییرات « کرنش در لحظه شکست » نسبت به تغییرات درصد نمک و پلیمر

محدود است. در شکل ۹، رفتار متفاوتی برای کرنش مشاهده می‌شود. شیب صعودی صفحه پاسخ به سمت درصدهای بالای نمک نشان می‌دهد که حضور نمک باعث افزایش شکل‌پذیری یا تورم در نمونه‌ها شده و کرنش نهایی را افزایش می‌دهد. این تطابق میان نمودارهای آماری و نتایج آزمایشگاهی، صحت مدل ریاضی ارائه شده را تأیید می‌کند.»

همان‌طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، شیب تند منحنی در راستای محور نمک (A) بیانگر تأثیر مخرب و شدید شوری بر مقاومت فشاری است؛ به طوری که با حرکت از ناحیه بدون نمک به سمت غلظت ۲۰ درصد، مقاومت از ناحیه قرمز (مقادیر بالا) به سرعت به ناحیه آبی (مقادیر پایین) تنزل می‌یابد. در مقابل، افزایش درصد پلیمر (B) به ملایمت باعث بهبود مقاومت می‌شود، اما توانایی آن در جبران افت ناشی از نمک

۲-۳- مدول الاستیسیته

جدول ۵. مقادیر مدول الاستیسیته برای نمونه‌های تثبیت شده

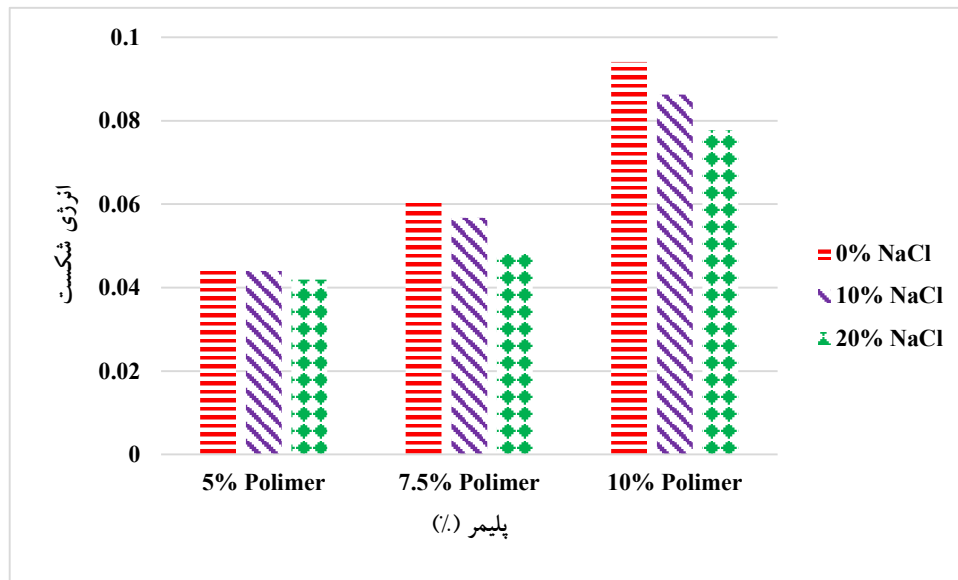
مدول الاستیسیته (MPa) E ₅₀	ترکیب و شرایط محیطی نمونه‌ها	
	نمک (%)	پلیمر (%)
۹۸/۰۵	۰	۵
۵۵/۷۱	۱۰	
۳۸/۷۹	۲۰	
۱۵۸/۲۷	۰	۷/۵
۱۱۵/۱۳	۱۰	
۶۸/۵۴	۲۰	
۲۳۶/۸۶	۰	۱۰
۱۸۳/۲۶	۱۰	
۱۲۱/۶۶	۲۰	

۳-۳- تحلیل انرژی شکست

بررسی انرژی شکست در ارتباط با ترکیب و شرایط محیطی نمونه‌های مورد مطالعه، تعامل قابل توجهی میان درصد نمک و غلظت پلیمر را آشکار می‌سازد که برای درک پایداری و عملکرد مواد پلیمری تحت شرایط متغیر حیاتی است. داده‌ها نشان می‌دهند که با افزایش درصد نمک، افزایش محسوس در مقادیر انرژی شکست مشاهده می‌شود که به‌ویژه در غلظت‌های ۷/۵٪ و ۱۰٪ پلیمر آشکارتر است. برای نمونه، در شرایط بدون نمک (۰٪)، انرژی شکست از ۰/۰۴۴۲۰ در غلظت ۵٪ پلیمر به ۰/۰۹۴۰۸ در غلظت ۱۰٪ پلیمر افزایش می‌یابد که همبستگی مستقیم میان محتوای پلیمر و انرژی خروجی را نشان می‌دهد. روندهای مشابهی در غلظت‌های دیگر نمک نیز مشاهده می‌شوند، با این تفاوت که در نمونه‌های حاوی ۲۰٪ نمک کاهش چشمگیری در مقادیر انرژی شکست به ثبت رسیده است؛ به طوری که انرژی شکست در غلظت ۵٪ پلیمر به ۰/۰۴۱۸۸ می‌رسد و در غلظت‌های بالاتر به تدریج افزایش می‌یابد، اما همچنان در مقایسه با نمونه‌های فاقد نمک مقادیر کمتری نشان می‌دهد. این رابطه ظریف اهمیت بهینه‌سازی فرمولاسیون‌های پلیمری در محیط‌های شور خاص را آشکار می‌سازد و در نهایت به توسعه موادی با دوام و کارایی بالاتر که متناسب با شرایط محیطی سخت طراحی شده‌اند، کمک می‌کند. مطابق شکل ۸، انرژی گسیختگی با افزایش درصد پلیمر از ۵٪ به ۱۰٪ افزایش می‌یابد، در حالی که با افزایش شوری از ۰٪ به ۲۰٪ کاهش پیدا می‌کند.

مدول الاستیسیته خاک با نماد E، شیب بخش الاستیک منحنی تنش-کرنش است و نشان می‌دهد خاک تا چه اندازه در برابر تغییر شکل مقاومت دارد. اگر این شیب در ابتدای منحنی سنجیده شود به آن مدول الاستیسیته اولیه (E₀) می‌گویند؛ اما چون منحنی تنش-کرنش معمولاً کاملاً خطی نیست، در عمل از مدول الاستیسیته وتری در ۵۰ درصد مقاومت نهایی (E₅₀) استفاده می‌شود. برای محاسبه E₅₀، خطی از مبدأ مختصات تا نقطه متناظر با ۵۰ درصد مقاومت نهایی رسم می‌شود و شیب این خط به عنوان مدول وتری در نظر گرفته می‌گردد. تعیین مدول الاستیسیته خاک به طور کلی از سه مسیر انجام می‌شود: آزمایشگاهی، صحرایی و تجربی. در روش آزمایشگاهی با آزمون‌هایی مانند تحکیم، مقاومت فشاری تک‌محوری، برش مستقیم و سه‌محوری، پارامترهای لازم برای برآورد سختی استخراج می‌شود. در روش‌های صحرایی نیز آزمون‌هایی مانند بارگذاری صفحه‌ای، پرسومتر و دیلاتومتر تخت به کار می‌رود. روش‌های تجربی و همبستگی‌های موجود میان نتایج این آزمون‌ها نیز برای تخمین مدول الاستیسیته مورد استفاده قرار می‌گیرند (Duncan & Chang, 1970; Surarak et al., 2012). در این تحقیق، از نتایج آزمایش مقاومت فشاری تک‌محوری برای تعیین مدول الاستیسیته وتری خاک تثبیت شده استفاده شده است.

بر مبنای نتایج مدول الاستیسیته وتری (E₅₀) برای نمونه‌های دارای ۱۰٪ رزین پلیمری، افزایش شوری محیط نمکی موجب افت محسوس سختی مؤثر شده است: در ۰٪ نمک مقدار E₅₀ برابر با حدود ۲۳۷ مگاپاسکال، در ۱۰٪ نمک حدود ۱۸۳ مگاپاسکال و در ۲۰٪ نمک حدود ۱۲۲ مگاپاسکال به دست آمد. بنابراین با گذار از ۰٪ به ۱۰٪ نمک، سختی حدود ۲۳ درصد کاهش یافته و از ۱۰٪ به ۲۰٪ کاهش بیشتری در حدود ۳۴ درصد رخ داده است؛ افت تجمعی از ۰٪ تا ۲۰٪ نیز نزدیک به ۴۹ درصد است. این روند نشان می‌دهد شوری، به‌ویژه در سطوح بالاتر، با تضعیف پیوندهای رزین-دانه و افزایش لغزش بین ذرات، پاسخ غیرخطی خاک را زودتر فعال کرده و شیب خط مبدأ تا نیمه مقاومت فشاری را کم می‌کند؛ در نتیجه برای شرایط بهره‌برداری روسازی، محیط‌های شور سختی کاری مؤثر لایه ماسه تثبیت‌شده را به‌طور قابل توجهی کاهش می‌دهند و باید در طراحی و انتخاب درصد رزین یا راهکارهای مقابله با نمک (مانند زهکشی و کنترل نفوذ نمک) لحاظ شوند.



شکل ۱۰. انرژی شکست نمونه‌های ماسه‌ای تثبیت شده با پلیمر در شرایط محیطی نمک با غلظت‌های مختلف

را تغییر دهد. یون‌های سدیم (Na^+) می‌توانند در پیوندهای هیدروژنی و برهم‌کنش‌های یونی که انعطاف‌پذیری و تحرک زنجیره پلیمری را تسهیل می‌کنند، تداخل ایجاد کنند. در نتیجه، با افزایش غلظت نمک، کارایی شبکه پلیمری تضعیف شده و به تغییراتی در استحکام و پایداری مکانیکی آن منجر می‌شود. برهم‌کنش آب-نمک را می‌توان به‌طور شیمیایی با بررسی تفکیک NaCl در آب نشان داد؛ یون‌های تفکیک‌شده می‌توانند با کاهش چسبندگی بین مولکول‌های پلیمر و ذرات خاک، انسجام میان آن‌ها را مختل کنند، چسبندگی میان‌سطحی که برای تثبیت مؤثر حیاتی است. این اختلال در نهایت به افزایش جذب انرژی در طول اعمال بار منجر شده و به بروز شکست انرژی کمک می‌کند. از دیدگاه مکانیک خاک، حضور نمک تأثیر قابل‌توجهی بر رفتار ذرات خاک در ماسه روان دارد. افزایش غلظت نمک لایه دوگانه الکتریکی پیرامون ذرات خاک را تغییر داده و موجب افزایش تجمع ذرات می‌شود. این تجمع می‌تواند به کاهش فضای خالی (تخلخل) و در نتیجه تغییر در توزیع تنش درون ماتریس خاک منجر شود. با استفاده از اصل تنش مؤثر، این بیان را می‌توان مطابق با معادله (۳) ارائه نمود.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3)$$

که در آن، σ' تنش مؤثر، σ تنش کل، و u فشار آب منفذی است که می‌تواند در شرایط با شوری بالا به دلیل کاهش

از دیدگاه فیزیکی، افزودن نمک به مخلوط‌های رزین-پلیمر بر ویسکوزیته و ویژگی‌های جریان مواد تأثیر می‌گذارد. نمک، که عمدتاً شامل کلرید سدیم (NaCl) است، می‌تواند بر انحلال و پراکندگی زنجیره‌های پلیمری درون ماتریس رزین اثر بگذارد. این پدیده با اصل کاهش برشی (Shear Thinning) مشخص می‌شود، جایی که افزایش محتوای نمک مقاومت در برابر جریان را به دلیل افزایش برهم‌کنش‌های یونی میان یون‌های نمک و مولکول‌های پلیمر تشدید می‌کند. با افزایش ویسکوزیته، پلیمرها ممکن است نتوانند به‌طور کامل ذرات خاک را پوشش دهند و این امر منجر به تثبیت ناکارآمد و در نتیجه افزایش انرژی شکست در هنگام اعمال تنش می‌شود. نمایش ریاضی این رابطه در مدل بینگهام (Bingham Model) برای تنش تسلیم بیان شده است که در معادله (۲) این تنش تسلیم (τ) را توصیف می‌کند.

$$\tau = \tau_0 + \eta \times \dot{\gamma} \quad (2)$$

که در آن، τ_0 بیانگر تنش تسلیم، η ویسکوزیته پلاستیک، و $\dot{\gamma}$ نرخ برش است. با افزایش غلظت نمک، مقدار η به دلیل افزایش برهم‌کنش‌ها بیشتر می‌شود و این امر نیروی بالاتری را برای آغاز جریان الزامی می‌سازد و در نتیجه، انرژی شکست بیشتری ایجاد می‌گردد. از دیدگاه شیمیایی، حضور محلول‌های شور می‌تواند پیوندهای شیمیایی موجود در رزین‌های پلیمری

زهکشی افزایش یابد. در چنین شرایطی، انرژی جذب شده سامانه در طول بارگذاری مکانیکی افزایش یافته و در نهایت به نرخ بالاتر شکست انرژی منجر می شود، زیرا ساختار خاک نسبت به تنش های تغییر شکل زا آسیب پذیرتر می گردد. یک مطالعه مقایسه ای که توسط پژوهشگران انجام شده است، این یافته ها را تأیید می کند و نشان می دهد که سطوح بالای شوری موجب تضعیف ویژگی های چسبندگی میان خاک و پلیمر می شود. این کاهش در چسبندگی منجر به کاهش پایداری و افزایش اتلاف انرژی می گردد. چنین نتایجی بیش از پیش مشاهدات ارائه شده در این مقاله را در خصوص اثرات زیان بار نمک بر عملکرد رزین های پلیمری در تثبیت ماسه روان تقویت می کند.

۳-۴- تحلیل پارامتر نسبت چقرمگی به سختی و ارتباط با عملکرد روسازی

نسبت چقرمگی به سختی یک شاخص ترکیبی کارآمد است که رفتار واقعی مصالح تحت بارگذاری را با دقتی فراتر از معیارهای سنتی، نظیر مقاومت فشاری تک محوری، تبیین می کند. این شاخص به طور مستقیم توانایی مصالح را در ایجاد توازن میان سختی (مقاومت در برابر تغییر شکل) و چقرمگی (ظرفیت جذب انرژی پیش از شکست) به صورت کمی ارزیابی می نماید. در طراحی روسازی، مصالحی که از نسبت چقرمگی به سختی بالاتری برخوردارند، عملکرد مطلوب تری دارند؛ چرا که قادر به توزیع مؤثر تنش های دینامیکی ناشی از بار ترافیک و کاهش تمرکز تنش می باشند. این ویژگی مستقیماً منجر به افزایش عمر خستگی و کاهش پتانسیل ترک خوردگی در لایه تثبیت شده می گردد. در مقابل، مقادیر پایین این نسبت، هشداردهنده رفتار ترد (شکونده) و احتمال وقوع گسیختگی ناگهانی تحت بارهای ضربه ای است. بنابراین، اگرچه پارامترهای مقاومت فشاری (UCS)، مدول الاستیسیته (E₅₀) و انرژی شکست به صورت مجزا حائز اهمیت هستند، اما تحلیل هم زمان آن ها در قالب این شاخص ترکیبی، بینش عمیق تری از رفتار مکانیکی و دوام خاک تثبیت شده با پلیمر ارائه می دهد. نسبت چقرمگی به سختی از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$(4) \quad \frac{E_f}{E_{50}} \text{ (نسبت چقرمگی به سختی)}$$

این نسبت که از طریق رابطه فوق محاسبه می گردد، به عنوان یک شاخص تحلیلی برای ارزیابی هم زمان ماهیت ترد یا شکل پذیر مصالح پیشنهاد می شود. اگرچه ممکن است این پارامتر در منابع مقدماتی به وفور یافت نشود، اما یک معیار معتبر در تحلیل های مهندسی پیشرفته برای درک رفتار جامع مصالح به شمار می آید. به طور کلی، مقادیر پایین تر این نسبت بیانگر رفتار تردتر (سختی بالا همراه با جذب انرژی محدود) و مقادیر بالاتر نشان دهنده رفتار شکل پذیرتر (انعطاف پذیری و قابلیت جذب انرژی مطلوب) است. محاسبات مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که در محیط فاقد نمک (۰٪)، با افزایش مقدار پلیمر از ۵٪ به ۱۰٪، این نسبت از ۰/۰۰۰۴۵ به ۰/۰۰۰۳۹ کاهش می یابد. این روند نزولی حاکی از آن است که علی رغم افزایش چشمگیر هر دو پارامتر سختی و چقرمگی، نرخ رشد سختی بر افزایش انرژی شکست غلبه داشته و در نتیجه، رفتار مصالح به سمت حالت الاستیک تر اما شکننده تر متمایل شده است. در مقابل، تأثیر مخرب شوری به وضوح در تغییرات این شاخص مشهود است.

در نمونه های حاوی ۵٪ پلیمر، با افزایش غلظت نمک از ۰٪ به ۲۰٪، مقدار این نسبت از ۰/۰۰۰۴۵ با افتی محسوس به ۰/۰۰۰۳۴ می رسد. این کاهش قابل توجه بیانگر آن است که محیط شور نه تنها سختی مؤثر نمونه (E₅₀) را تضعیف می کند، بلکه تأثیر آن بر کاهش ظرفیت جذب انرژی به مراتب شدیدتر است. پیامد نهایی این پدیده، شکل گیری ساختاری با شکنندگی بسیار بالا است که در مواجهه با بارگذاری های خارجی، مستعد گسیختگی ناگهانی خواهد بود.

از منظر عملکرد روسازی، این یافته دارای اهمیت حیاتی است. لایه ای از بستر که رفتار بیش از حد ترد و شکننده از خود نشان می دهد (نسبت چقرمگی به سختی بسیار پایین)، قادر به توزیع مؤثر تنش های ناشی از بار چرخ و سایل نقلیه نبوده و در برابر بارهای تکراری (خستگی) و ضربه ای، به شدت آسیب پذیر خواهد بود. این تحلیل، یک توجه مکانیکی قوی برای افت عملکرد مشاهده شده در خاک های تثبیت شده در محیط های شور، فراتر از تکیه بر مقادیر مجزای مقاومت یا سختی، ارائه می نماید و بر ضرورت لحاظ کردن این روابط متقابل در طراحی بهینه بستر روسازی تأکید می ورزد. از دیدگاه مکانیزم مکانیکی، کاهش این نسبت تحت تأثیر شوری را می توان به اختلال در یکپارچگی شبکه پلیمری نسبت داد. یون های نمک با ایجاد

تعامل بین آن‌ها، تأثیر معناداری ($P < 0.0001$) بر مقاومت فشاری دارند. این مدل ریاضی می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد برای تخمین مقاومت در پروژه‌های عملیاتی بدون نیاز به آزمایش‌های مکرر مورد استفاده قرار گیرد.

- مدول الاستیسیته: تحلیل مدول الاستیسیته و تری (E_{50}) به‌عنوان شاخصی از سختی، نشان داد که در تمام درصدهای پلیمر (۵٪، ۷/۵٪ و ۱۰٪)، افزایش غلظت نمک از ۰٪ به ۲۰٪، منجر به کاهش پیوسته سختی نمونه‌ها شده است. در مقابل، در هر سطح شوری مشخص (۰٪، ۱۰٪ و ۲۰٪)، افزایش درصد پلیمر از ۵٪ به ۱۰٪ باعث افزایش مدول الاستیسیته و سختی نمونه‌ها گردید. به‌عنوان نمونه، در غلظت ۱۰٪ پلیمر، افزایش شوری از ۰٪ به ۲۰٪ باعث افت سختی حدوداً ۴۹ درصدی (از ۲۳۷ مگاپاسکال به ۱۲۲ مگاپاسکال) شد.

این یافته بر کاهش قابل توجه سختی مؤثر لایه تثبیت‌شده در محیط‌های شور تأکید دارد.

- انرژی شکست: نتایج انرژی شکست نیز روندی مشابه را تأیید کرد. افزایش درصد پلیمر (از ۵٪ به ۱۰٪) باعث افزایش انرژی شکست شد (به‌عنوان مثال در ۰٪ نمک، از ۰/۰۴۴۲۰ به ۰/۰۹۴۰۸). در مقابل، افزایش شوری محیط از ۰٪ به ۲۰٪، منجر به کاهش انرژی شکست گردید؛ به‌طوری‌که در غلظت ۲۰٪ نمک و ۵٪ پلیمر، این مقدار به ۰/۰۴۱۸۸ کاهش یافت.

- تحلیل شاخص «نسبت چقرمگی به سختی» نشان داد که محیط‌های شور باعث تغییر رفتار مصالح از حالت شکل‌پذیر به ترد و شکننده می‌شوند. نتایج حاکی از آن است که با افزایش شوری، این نسبت کاهش می‌یابد که بیانگر افت توانایی مصالح در توزیع تنش‌های دینامیکی و کاهش عمر خستگی روسازی است. بنابراین، در طراحی روسازی مناطق شور، تکیه صرف بر مقاومت فشاری کافی نیست و باید کاهش این نسبت به منظور جلوگیری از ترک‌خوردگی زودرس و گسیختگی ناگهانی مدنظر قرار گیرد.

- از دیدگاه ریزساختاری، افت عملکرد مشاهده شده در محیط‌های شور را می‌توان به پدیده‌هایی نظیر ایجاد فشار اسمزی و تورم زنجیره‌های پلیمری و همچنین کاهش چگالی پیوندهای عرضی به دلیل تداخل یون‌های نمک با ساختار پلیمر نسبت داد. این برهم‌کنش‌های شیمیایی مانع از تشکیل یک شبکه پلیمری منسجم و پیوسته در اطراف دانه ماسه شده و پایداری کلی سیستم خاک-پلیمر را کاهش می‌دهند.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که شوری بالا اثرات نامطلوبی بر یکپارچگی سازه‌ای، سختی و انرژی شکست ماسه روان تثبیت‌شده با رزین آکریلیک دارد. این نتایج بر ضرورت توجه دقیق به سطح شوری در راهبردهای تثبیت خاک با پلیمر در طراحی‌های روسازی تأکید می‌کند. برای پژوهش‌های آتی،

تداخل در پیوندهای هیدروژنی و عرضی میان زنجیره‌های پلیمر، مانع از شکل‌گیری یک ساختار پیوسته و منسجم می‌شوند. این پدیده نه تنها استحکام کلی (سختی) را تقلیل می‌دهد، بلکه توانایی شبکه پلیمری را برای تغییر شکل پلاستیک و جذب انرژی از طریق بازآرایی زنجیره‌ها (چقرمگی) به مراتب شدیدتر مختل می‌سازد. علاوه بر این، از جنبه فیزیکی، تبلور نمک در حفرات و فضاهای خالی خاک، با ایجاد تمرکز تنش‌های موضعی، به عنوان نقاط آغازین رشد ترک عمل کرده و رفتار شکننده مصالح را به شدت تشدید می‌نماید. نوآوری اصلی این تحلیل در آن است که شکست عملکردی در محیط‌های شور را صرفاً به کاهش کمی مقاومت نسبت نمی‌دهد؛ بلکه آن را ناشی از تغییر کیفی در مکانیزم گسیختگی و از دست رفتن هم‌زمان توازن میان سختی و شکل‌پذیری می‌داند. این یافته بر لزوم حیاتی بهینه‌سازی فرمولاسیون پلیمرها به منظور حفظ یک توازن مناسب بین این دو خاصیت کلیدی در مواجهه با محیط‌های خورنده تأکید می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش آزمایشگاهی، که به بررسی تأثیر محیط‌های شور بر رفتار مکانیکی خاک ماسه‌ای تثبیت‌شده با رزین پلیمری برای کاربردهای روسازی پرداخت، نشان‌دهنده یک تعامل پیچیده و عمدتاً نامطلوب میان افزایش سطح شوری و خواص مکانیکی خاک تثبیت‌شده است.

نتایج کلیدی این تحقیق به شرح زیر است:

- مقاومت فشاری: در محیط عاری از نمک (۰٪)، افزایش درصد پلیمر از ۵٪ به ۱۰٪ منجر به بهبود چشمگیر مقاومت فشاری (از ۳/۱۶ به ۶/۹۰ مگاپاسکال) گردید، که نشان‌دهنده کارایی بالای رزین در شرایط عادی است. با این حال، حضور نمک اثرات زیان‌باری داشت؛ به‌طوری‌که در غلظت ۲۰٪ نمک و ۵٪ پلیمر، مقاومت به ۲/۰۴ مگاپاسکال کاهش یافت. این افت می‌تواند ناشی از اختلال مکانیکی در زنجیره‌های پلیمری، تورم فیزیکی ناشی از محیط شور، و کاهش شیمیایی در چگالی پیوندهای عرضی باشد.

- علاوه بر تحلیل‌های مکانیکی، ارزیابی آماری با استفاده از روش سطح پاسخ (RSM) نشان داد که مدل درجه دوم پیشنهادی با ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۹۸۹۷، از دقت و قابلیت اطمینان بسیار بالایی برای پیش‌بینی رفتار خاک تثبیت‌شده برخوردار است. تحلیل واریانس (ANOVA) ثابت کرد که هر دو عامل غلظت نمک و درصد پلیمر و همچنین

shear strength properties of saline clay based on microscopic pore characteristics. *Environmental Earth Sciences*, 83(24), 682 .

-Hosseini Manesh, S. M. H., Khabiri, M. M., & Rafiei, A. (2025). Investigation of the effects of recycled concrete aggregates and emulsified asphalt on the improvement of sandy soil performance. *Waste Forum* (1), 79–93 .

-Li, J., Lin, H., Liu, J., & Fang, J. (2023). Macro-micro characteristics of geopolymer-stabilized saline soil in seasonal frozen soil region. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02496 .

-Payne, G. H. (1966). The effect of epoxy resins on the durability and unconfined compressive strength of an A-1B Soil .

-Puppala, A. J., Talluri, N., Congress, S. S. C., & Gaily, A. (2018). Ettringite induced heaving in stabilized high sulfate soils. *Innovative Infrastructure Solutions*, 3(1), 72 .

-Rajabi, A. M., & Ghasemi, F. (2025). The Effect of Polyester Resins on the compressive and shear strength of Clayey Sand Soil: An Experimental Study. *Civil Engineering Infrastructures Journal* .

-Rollings, R. S., Burkes, J. P., & Rollings, M. P. (1999). Sulfate attack on cement-stabilized sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 125(5), 364–372 .

-Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E & Guan, H. (2012). Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soft and stiff Bangkok clays. *Soils and Foundations*, 52(4), 682–697 .

-Wang, L., Yao, Y., Li, J., Liu, K., & Wu, F. (2023). A state-of-the-art review of organic polymer modifiers for slope eco-engineering. *Polymers*, 15(13), 2878 .

-Zhu, Y., Yu, X., Gao, L., Chen, J., & Cotugno, M. D. (2019). Unconfined Compressive Strength of Aqueous Polymer-Modified Saline Soil. *International Journal of Polymer Science* (1), 9137069 .

ارزیابی دوام بلندمدت نمونه‌ها تحت تنش‌های محیطی متغیر مانند چرخه‌های رطوبت و دما و همچنین بررسی اثرات انواع مختلف نمک‌ها بر بهسازی خاک بستر روسا می‌تواند بیش جامع‌تری ارائه دهد.

۵- مراجع

-Ahmadullah, T. & Chrysochoou, M. (2024).

Relationship between strength development and pozzolanic reactions in lime stabilized kaolinite. *International Journal of Geo-Engineering*, 15(1), 11 .

-Ayorloo, A. M., Mroueh, H., & Lancelot, L. (2012). Experimental investigation of cement treated sand behavior under triaxial test. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(1), 129–143 .

-Baldovino, J. A. Parra, J. D. T., & Nuñez de la Rosa, Y. E. (2025). Effects of Sodium Chloride in Soil Stabilization: Improving the Behavior of Clay Deposits in Northern Cartagena, Colombia. *Sustainability*, 17(19), 8715 .

-Coelho, L. M., Guimarães, A. C. R., Azevedo, A. R. G. d., & Monteiro, S. N. (2024). Sustainable reclaimed asphalt emulsified granular mixture for pavement base stabilization: Prediction of mechanical behavior based on repeated load triaxial tests. *Sustainability*, 16(13), 5335 .

-Duncan, J. M., & Chang, C. Y. (1970). Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of The Soil Mechanics And Foundations Division*, 96(5), 1629–1653 .

-Firoozi, A. A., Guney Olgun, C., Firoozi, A. A., & Baghini, M. S. (2017). Fundamentals of soil stabilization. *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 26 .

-Giosuè, C., Belli, A., Mobili, A., Citterio, B., Biavasco, F., Ruello, M. L., & Tittarelli, F. (2017). Improving the impact of commercial paint on indoor air quality by using highly porous fillers. *Buildings*, 7(4), 110 .

-He, M., Zhou, F., Wang, L., & Gao, F. (2024). Experimental study on Atterberg limits and

Experimental Study on the Mechanical Behavior of Polymer Resin Stabilized Sand under Saline Conditions for Pavement Applications

Amirali Rafiei, M.Sc., Student, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

Seyed Mohammad Hossein Hosseini Manesh, M.Sc., Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

Mohammad Mehdi Khabiri, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

E-mail: mkhabiri@yazd.ac.ir

Received: September 2025- Accepted: February 2026

ABSTRACT

The influence of salt and salinity on polymer resin performance in quicksand stabilization is a critical area of research in geotechnical engineering, particularly for pavement applications. Quicksand, characterized by its particle size distribution between 0.1 mm and 0.5 mm and its susceptibility to liquefaction, presents significant stabilization challenges. This study, using unconfined compressive strength tests (in accordance with ASTM D2166), experimentally investigates the effects of different salt concentrations (0%, 10%, and 20%) on quicksand stabilized with varying percentages of acrylic resin (5%, 7.5%, and 10%). Results indicate that increasing salinity levels have an inverse and detrimental relationship with the mechanical properties of the stabilized samples. In a salt-free environment (0%), increasing the polymer from 5% to 10% significantly raised the compressive strength from 3.16 MPa to 6.90 MPa. Conversely, in a 20% salt environment, the compressive strength decreased considerably, reaching 2.04 MPa at a 5% polymer concentration. The elastic modulus (E50) also demonstrated a similar pattern; increasing the polymer percentage at any constant salinity level led to increased stiffness (e.g., at 0% salt, from 98.05 MPa to 236.86 MPa), but increasing the salt concentration at a constant polymer percentage caused a noticeable drop in stiffness. Failure energy also increased with more polymer in the salt-free environment (from 0.04420 to 0.09408), whereas at 20% salt concentration, the energy values decreased, reaching 0.04188 at 5% polymer. Furthermore, statistical modeling using Response Surface Methodology (RSM) confirmed high prediction accuracy with a coefficient of determination of 99% ($R^2 \approx 0.99$). The analysis of the "Toughness-to-Stiffness Ratio" also revealed that saline environments, by inducing osmotic pressure and disrupting cross-links, render the material brittle and reduce pavement fatigue life. This research underscores the necessity for careful consideration of the detrimental effects of high salinity levels on the structural integrity, stiffness, and energy absorption of polymer-stabilized soils in soil improvement strategies.

Keywords: Pavement, Quicksand Stabilization, Salinity Effects, Polymer Resin, Soil Improvement