

# بررسی تأثیر کوپلیمر زیستی آکریلاتی بر دوام و مقاومت فشاری کف پوش ماسه‌ای تحت چرخه‌های محیطی

## مقاله علمی - پژوهشی

زهره غفوری فرد، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

مریم مختاری\*، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

محمد مهدی خبیری، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

سیدمهداد جلیلیان، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه یزد، یزد، ایران

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mokhtari@yazd.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷ - پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

صفحه ۱۳۴-۱۰۹

## چکیده

امروزه مشکلات محیط زیستی به یک معضل جهانی تبدیل شده است؛ از این جهت به کارگیری مصالح دوستدار محیط زیست همچون بلوک‌ها و کف‌پوش‌های خاکی در صنعت ساخت‌وساز اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. از این رو این پژوهش به بررسی اثرات تثبیت بلوک‌های خاکی ماسه‌بادی با استفاده از کوپلیمر آکریلاتی امولسیون، یک پلیمر دوستدار محیط زیست، بر دوام آن‌ها می‌پردازد. در این راستا، نمونه‌های بلوک خاکی با درصد‌های مختلف پلیمر (۵ تا ۲۰ درصد) تهیه شده و تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب، جذب مویستگی، چرخه تر و خشک، و چرخه ذوب و یخ قرار گرفتند. همچنین تأثیر دانه‌بندی‌های مختلف بر مقاومت فشاری این بلوک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزایش مقدار پلیمر منجر به افزایش مقاومت فشاری اولیه و کاهش افت مقاومت در طول آزمایش‌های دوام می‌گردد. به‌طور خاص، با افزایش پلیمر از ۵ به ۲۰ درصد، افت وزنی بلوک‌ها در اثر چرخه‌های تر و خشک و ذوب و یخ به ترتیب به یک‌دهم و یک‌هشتم کاهش یافت. تحلیل‌های آماری *t-test* نشان داد که افت مقاومت ناشی از چرخه‌های دوام، اگرچه وجود دارد، اما از نظر آماری قابل ملاحظه نیست. همچنین، افزایش پلیمر به‌طور چشمگیری جذب آب و مویستگی را کاهش داد. معادلات رگرسیونی ارائه شده، امکان پیش‌بینی پارامترهای دوام بلوک‌های پلیمری را با توجه به غلظت و درصد پلیمر فراهم می‌سازند. این پژوهش رابطه‌ای مستقیم بین درصد جذب آب و ضریب مویستگی با افت وزنی در اثر چرخه‌های دوام را مشخص نمود. این یافته‌ها نشان می‌دهند که استفاده از کوپلیمر آکریلاتی می‌تواند به‌طور مؤثری دوام بلوک‌های خاکی را در برابر عوامل محیطی افزایش دهد. همچنین نتایج نشانگر آن است که نوع دانه‌بندی تأثیر بسزایی بر مقاومت فشاری دارد؛ به‌طوری‌که با ریزتر شدن دانه‌بندی مقاومت فشاری بلوک‌ها حدود ۳ برابر افزایش یافته است.

واژه‌های کلیدی: کوپلیمر زیستی آکریلاتی، دوام بلوک‌های پلیمری، کف‌پوش دوستدار محیط زیست، چرخه‌های تر و خشک،

مقاومت فشاری

## ۱- مقدمه

است (Kalhori & Bagherpour, 2017; Seifan & Berenjian, 2019; Smit et al., 2021). این در حالی است که در دهه‌های اخیر ساخت‌وساز با خاک، جایگزین مصالح مدرن شده است؛ چراکه استفاده از خاک طبیعی مزایایی چون صرفه‌ی اقتصادی، مقبولیت اجتماعی، همسو بودن با اهداف

امروزه رشد جمعیت و افزایش شهرنشینی، منجر به توسعه زیرساخت‌های شهری همچون معابر شهری شده است و از طرفی دیگر به علت افزایش آلودگی محیط زیست، استفاده از مصالح دوستدار محیط زیست در مهندسی عمران اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است که صنعت راه‌سازی نیز از آن مستثنا نبوده

معماری مطرح‌اند بطوریکه طراحان آن را در رده‌های بالای مصالح قابل‌دسترس در بازار بین‌المللی جای می‌دهند (یثربی و اعظمی، ۱۳۹۴)

صادقیان و همکارانش در مطالعه‌ای در سال ۱۴۰۲ با اشاره به اینکه؛ امروزه یکی از معضلات ساخت‌وساز در ایران، ساختمان‌هایی هستند که با سازه‌های بتنی و فلزی ساخته شده و در کنار زوال محیط‌زیست، سبب پایین آمدن کیفیت زندگی مردم و ازدست‌رفته هویت معماری ایرانی گردیده‌اند؛ بلوک‌های خاکی را به‌عنوان جایگزین مناسبی برای این مصالح معرفی می‌کند (صادقیان و همکاران، ۱۴۰۳). کارگر و همکارانش نیز به بررسی خواص بلوک خاکی فشرده حاوی پسماندهای ریشه فرش و تثبیت‌شده با آهک پرداختند که نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی نشان می‌دهد که استفاده از آهک در بلوک خاک فشرده سبب افزایش مقاومت فشاری و خمشی بلوک می‌شود و به‌کارگیری ۰/۲ درصد الیاف (ریشه فرش) می‌تواند عملکرد بلوک خاک فشرده را بهبود بخشد (کارگر و همکاران، ۱۴۰۲). هانی و همکارانش در سال ۲۰۲۱ با بیان اینکه آلودگی محیط‌زیست یک نگرانی جهانی است، بنابراین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در طول فرایند تولید مصالح ساختمانی هدف اصلی بسیاری از تحقیقات اخیر است؛ به بررسی آجرهای خاکی فشرده سازگار با محیط‌زیست با استفاده از ضایعات کشاورزی و محصولات جانبی صنعتی به‌عنوان تثبیت‌کننده خاک برای به حداقل رساندن استفاده از سیمان پرداختند و یافتند که استفاده از خاکستر بادی فعال‌شده با قلیایی و سرباره کوره بلند دانه‌بندی شده به‌عنوان جایگزینی جزئی یا کامل سیمان برای تثبیت آجرهای خاک فشرده برای ساخت‌وساز پایدار مناسب است (Hany et al., 2021). همچنین ثنوشان و همکارانش به بررسی ویژگی‌های استحکام و دوام بلوک‌های خاکی تقویت‌شده با الیاف نارگیل پرداختند و یافتند که تقویت‌کننده الیاف نارگیل تنش پسماند، شکل‌پذیری و جذب انرژی بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده با سیمان را تا حد زیادی بهبود می‌بخشد (Thanushan et al., 2021). در مطالعه‌ای دیگر در سال ۲۰۲۱ مشخصات مهندسی بلوک‌های خاکی فشرده تثبیت‌شده با سیمان و خاکستر بادی توسط الهی و همکارانش مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش به‌منظور بررسی عملکرد بلوک‌های خاکی آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی، خمشی، سه محوری و دوام به‌کاربرده شد و نتایج بیانگر آن است

توسعه‌ی پایدار و دوستدار با زیست محیط بودن دارد (Paul, Islam, & Hossain, 2023). بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده، نمونه‌ای از ساخت‌وساز با خاک طبیعی است که در این روش از خاک‌های موجود محلی و تثبیت‌کننده‌ها، برای افزایش استحکام، استفاده می‌شود (Nagapan et al., 2017). امروزه بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده نیز به دلیل بهره‌وری انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمتر، در مقایسه آسفالت، بتن یا بلوک‌های سیمانی محبوبیت پیدا کرده‌اند (Asha (Valenzuela et al., 2024) Sapna & Anbalagan, 2023; Touré et al., 2017) از این رو این پژوهش باهدف بررسی دوام کف‌پوش‌های خاکی تثبیت‌شده با کوپلیمر دوستدار محیط‌زیست و همچنین تأثیر نوع دانه‌بندی بر عملکرد مقاومتی آن می‌پردازد.

## ۲- پیشینه تحقیق

مصالح دوستدار محیط‌زیست یکی از موضوعات مهم و پرطرفدار در حوزه ساختمان و معماری است که در سال‌های اخیر توجه زیادی به خود جلب کرده است؛ چراکه رشد جمعیت جهانی و گسترش شهرنشینی سبب افزایش نیاز به زیرساخت‌های شهری همچون راه‌ها و ساختمان‌ها شده است (Arab et al., 2021؛ منجم زاده و همکاران، ۱۳۹۷) و این در حالی است که صنعت ساخت‌وساز و اجرای طرح‌های عمرانی یک منبع عمده آلودگی محیط‌زیست شهری است (Petkar, 2014; Wieser et al., 2021). مصالح دوستدار محیط‌زیست را این‌گونه می‌توان تعریف کرد: مصالحی که از مواد کم‌خطرتری تولید می‌شوند، کمتر از منابع طبیعی استفاده می‌کنند، خصوصیات محیطی سبز دارند و پتانسیل بازیافت بیشتری نسبت به سایر مصالح دارند (اکرمی و علیپور، ۱۳۹۵). یکی از مصالح دوستدار با محیط‌زیست که محققین آن را به‌عنوان جایگزینی برای بلوک‌ها و کفپوش‌های سیمانی توصیه می‌کنند؛ بلوک‌های خاکی هستند (Asha Sapna & Anbalagan, 2023) که از مزایای آن می‌توان به هزینه پایین، سازگاری با محیط‌زیست، نفوذپذیری مناسب، زیبایی و طراحی متنوع و هماهنگی با فرهنگ ایرانی اشاره کرد (غفوری فرد، ۱۴۰۳)؛ بدین‌جهت مطالعات متعددی در این خصوص انجام شده است. به‌عنوان نمونه یثربی و اعظمی در پژوهشی به‌عنوان بهره‌گیری از تکنولوژی "بلوک‌های خاکی فشرده" در معماری در سال ۱۳۸۴ بیان می‌دارد که بلوک‌های خاکی فشرده به‌عنوان مصالح ساختمانی توانمند از بابت تکنیکی،

محتوای خاکستر پوسته بادام‌زمینی جایگزین شده است ۰٪، ۱۰٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪ است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که حتی اگر استحکام بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده با محتوای خاکستر پوسته بادام‌زمینی کاهش می‌یابد، عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشد، همچنین هزینه تولید کاهش و انتشار CO<sub>2</sub> را کاهش می‌یابد (Sathiparan et al., 2023). علاوه بر این پل و همکارانش در مطالعه‌ای با بیان اینکه بلوک خاکی تثبیت‌شده یک مصالح ساختمانی ایمن برای محیط‌زیست است که به‌عنوان جایگزینی پایدار برای مصالح ساختمانی سنتی شناخته می‌شود؛ به بررسی مناسب بودن خاکستر پوسته برنج و سیمان برای تولید بلوک خاکی پایدار پرداختند. در این پژوهش برای تشخیص ترکیب ایدئال تثبیت‌کننده‌ها، سه محتوای سیمان (۴٪، ۶٪، ۸٪ وزنی خاک خشک)، و پنج محتوای خاکستر پوسته برنج (۰٪، ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ در وزن خاک خشک) در نظر گرفته شد و نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری، کشش شکافت، خمش و دوام نشان داد که بلوک خاکی تثبیت‌شده با خاکستر پوسته برنج و سیمان عملکرد مناسبی به‌عنوان یک مصالح ساختمانی پایدار دارند (Paul, Islam, & Elahi, 2023).

همچنین میوگای و همکارانش با بیان اینکه روسازی‌های متداولی همچون آسفالت و بتن صدمات جبران‌ناپذیری به محیط‌زیست وارد می‌کند، استفاده از کف‌پوش تهیه‌شده با پلاستیک برای روسازی مسیرهای دوچرخه‌سواری و پیاده‌روها را پیشنهاد می‌دهند. بدین منظور ماسه و پلاستیک خردشده ذوب‌شده مخلوط شدند و مطابق استاندارد SANS 1058:2021 تحت آزمایش‌های میزان جذب آب، استحکام کششی و مقاومت در برابر سایش قرار گرفتند. نتایج بیانگر آن است که بلوک‌های روسازی تهیه‌شده با پلاستیک، الزامات استاندارد موردنظر را برآورده می‌کند؛ از این رو برای استفاده در ساخت معابر حمل‌ونقل غیر موتوری مناسب هستند (Muigai et al., 2021).

در پژوهش دیگری بلوک‌های سنگ‌فرش پایدار تهیه‌شده با پلاستیک ضایعاتی توسط کارisma موردبررسی قرار گرفت. بدین منظور بلوک‌هایی با اختلاط پلاستیک ضایعاتی و سنگ‌دانه در نسبت‌های مختلف تهیه شد و نتایج ارزیابی فیزیکی و مکانیکی نشان می‌دهد که این کف‌پوش‌ها عملکرد مناسبی را از جهت مقاومت فشاری و جذب آب دارا هستند و از آنجاکه در تهیه آن‌ها از سیمان استفاده‌نشده است، سازگار با محیط‌زیست نیز است (Karisma et al., 2023).

که افزودن ۱۰ تا ۳۰ درصد خاکستر بادی به همراه سیمان، عملکرد بلوک خاکی تثبیت‌شده را با مقادیر مختلف بسته به میزان سیمان مورد استفاده، بهبود می‌دهد (Elahi et al., 2021).

کومار و بارباتو نیز در سال ۲۰۲۲ در پژوهشی اثر الیاف باگاس نیشکر بر خواص بلوک‌های خاکی را مورد ارزیابی قرار دادند. بدین منظور آن‌ها نه ترکیب مختلف مخلوط خاک حاوی مقادیر مختلف الیاف باگاس نیشکر (۰٪، ۵٪، ۱۰٪ وزنی) و سیمان پرتلند نوع II (۰٪، ۶٪ و ۱۲٪ وزنی) را در نظر گرفتند و مقاومت خمشی، دوام و مقاومت فشاری خشک و تر بلوک‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند و یافتند که گنجاندن ۵٪ تا ۱۰٪ وزنی الیاف باگاس نیشکر در بلوک‌های تثبیت‌شده با ۱۲٪ وزنی سیمان می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی خواص مکانیکی بلوک‌های خاکی را بدون به خطر انداختن خواص دوام آن‌ها بهبود بخشد (Kumar & Barbato, 2022). همچنین لابیاد و همکارانش با بیان اینکه امروزه، محققان به استفاده از مواد خاکی در ساخت‌وساز معطوف شده‌اند، زیرا آن‌ها رسانایی حرارتی کمتری دارند و در نتیجه با کاهش انتشار گلخانه‌ای در ساختمان‌ها، محیط‌زیست را حفظ می‌کنند؛ به بررسی رفتار فیزیکی و مکانیکی بلوک‌های خاکی فشرده تثبیت‌شده با سیمان تقویت‌شده توسط الیاف سیزال پرداختند و دریافتند که اثر ترکیبی الیاف و سیمان باعث بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی بلوک خاکی می‌شود (Labiad et al., 2022).

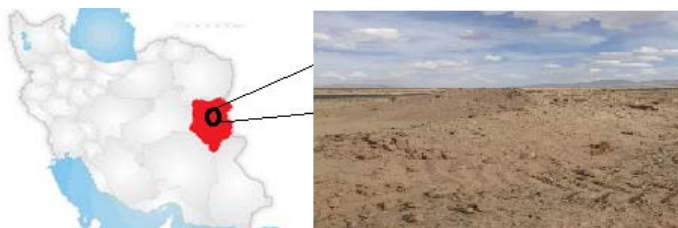
سالکین آیندا و شریفول اسلام در سال ۲۰۲۳ با اشاره به اینکه بلوک‌های خاکی مدت‌هاست که به‌عنوان یک جایگزین سازگار با محیط‌زیست برای بلوک‌های ساختمانی سنتی که به محیط‌زیست آسیب می‌رساند، شناخته‌شده است؛ به بررسی عملکرد بلوک خاکی تثبیت‌شده با پودر بتن ضایعاتی پرداختند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که بلوک‌های تثبیت‌شده با پودر بتن ضایعاتی عملکرد مناسبی از جهت مقاومت فشاری، خمشی، جذب آب، دوام و هدایت حرارتی دارند و می‌توانند به کاهش ضایعات ساخت‌وساز و تخریب کمک کند و در عین حال جایگزین پایدارتر برای بلوک‌های ساختمانی سنتی باشد (Aninda & Islam, 2023). در پژوهش دیگری در سال ۲۰۲۳ توسط ساتی پاران و همکارانش به‌منظور بررسی خواص بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده با استفاده از خاکستر پوسته بادام‌زمینی به‌عنوان جایگزین سیمان انجام شد. در این مطالعه درصد جرمی کل سیمان در بلوک خاکی تثبیت‌شده که با

### ۳- روش تحقیق

همان‌طور که اشاره شد هدف این پژوهش بررسی عملکرد دوام بلوک‌ها و کف‌پوش‌های خاکی تثبیت‌شده با پلیمر مصنوعی سازگار با محیط است. در این پژوهش، خاک ماسه‌ای با طبقه‌بندی SP به‌عنوان ماده اولیه انتخاب‌شده است. این نوع خاک از کویر لوت در استان خراسان جنوبی استخراج گردیده (شکل ۱) و دارای ویژگی‌های فیزیکی خاصی است. چگالی ویژه این خاک ۲/۶۷ کیلوگرم بر مترمکعب، ارزش ماسه‌ای آن ۴ درصد، ضریب یکنواختی برابر با ۲/۷ و ضریب انحنای نیز ۰/۸ است. درصد عبوری از الک شماره ۴ معادل ۱۰۰ درصد و درصد عبوری از الک شماره ۲۰۰ به ۱۰ درصد می‌رسد. از دیگر ویژگی‌های این خاک، مقدار پلاستیسیته است که برابر با صفر بوده و نشان‌دهنده غیرپلاستیک بودن آن است. این مشخصات نشان می‌دهد که این خاک اساساً مؤثر در فرایندهای مهندسی و محیط زیستی است و به‌خوبی برای مطالعه واکنش‌های شیمیایی و فیزیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

همان‌طور که اشاره شد مطالعات متعددی در خصوص بلوک‌های خاکی دوستدار محیط‌زیست پرداخته‌شده اما در هیچ پژوهشی به بررسی بلوک خاکی تثبیت‌شده با پلیمر مصنوعی دوستدار محیط‌زیست پرداخته نشده است و این در حالی است که امروزه پلیمرها به دلیل خواص بی‌ظیرشان جایگاه خود را در صنایع راه و ساختمان به‌خوبی پیدا کرده‌اند (Zahri & Zainorabidin, 2019)

از این‌رو هدف این پژوهش بررسی بلوک خاکی تثبیت‌شده با کوپلیمر آکریلاتی امولسیون، به عنوان یک پلیمر دوستدار محیط‌زیست، است. همچنین در ادامه، این پژوهش تأثیر نوع دانه‌بندی بر مقاومت فشاری بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده با پلیمر مورد بررسی قرار می‌دهد. بدین منظور نمونه‌هایی با درصد ثابت پلیمر، جنس یکسان مصالح و دانه‌بندی‌های مختلف تهیه شد و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این پژوهش از مدلسازی ریاضی و تحلیل آماری نیز بهره برده شد و لازم به ذکر است که پیشرفت‌های اخیر در زمینه مدلسازی ریاضی و تکنیک‌های تصویربرداری، امکان درک عمیق‌تر پدیده‌های حاکم بر تخریب مصالح در اثر سیکل‌های رطوبتی را فراهم کرده است و می‌تواند به توسعه مصالح ساختمانی بادوام‌تر و پایدارتر منجر شود.



شکل ۱. محل برداشت خاک ماسه‌بادی

پلیمری در فضای بین ذرات استوار است. کوپلیمر آکریلاتی امولسیون با دارا بودن گروه‌های عاملی قطبی، قادر به ایجاد برهمکنش‌های الکترواستاتیکی با سطح ذرات خاک است. این برهمکنش‌ها، منجر به جذب پلیمر بر روی سطح ذرات خاک و تشکیل یک پوشش نازک پلیمری می‌شود. پس از تبخیر آب موجود در امولسیون، زنجیره‌های پلیمری درهم‌تنیده شده و یک شبکه سه‌بعدی ایجاد می‌کنند. این شبکه پلیمری، ذرات خاک را به یکدیگر متصل کرده و مقاومت برشی و فشاری بلوک خاک ماسه‌ای را به‌طور قابل توجهی افزایش می‌دهد.

در این پژوهش به‌منظور تثبیت خاک ماسه برای ساخت بلوک خاکی از کوپلیمر استایرن-آکریلاتی دوستدار محیط‌زیست که دارای مونومرهای استایرن و آکریلات (مانند متیل آکریلات  $\text{CH}_2=\text{CHCOOCH}_3$ ) است که پیوند میان آن‌ها کووالانسی است و ساختاری به‌صورت زنجیره خطی با گروه‌هایی قطبی  $-\text{COO}$  دارد. از ویژگی‌های شیمیایی این نوع پلیمر می‌توان به دمای انتقال شیشه بین ۲۰ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، وزن مولکولی ۱۰۰۰۰۰ تا ۳۰۰۰۰۰ گرم بر مول و PH بین ۶ تا ۷ اشاره کرد. مکانیسم عمل تثبیت خاک با پلیمرها، بر پایه ایجاد پیوندهای بین ذرات خاک و تشکیل یک شبکه

بین آنها است. این امر، از ورود آب به داخل بلوک و تخریب ساختار آن در اثر یخ‌زدگی و ذوب شدن جلوگیری می‌کند. آزمایش چرخه ذوب و یخ، به منظور ارزیابی مقاومت بلوک‌ها در برابر تغییرات دمایی و رطوبتی انجام شده است. این آزمایش، شامل قرار دادن نمونه‌ها در معرض سیکل‌های متوالی انجماد و ذوب شدن است. بررسی میزان کاهش وزن و تغییر شکل نمونه‌ها پس از این سیکل‌ها، نشان‌دهنده میزان دوام آنها در برابر شرایط آب و هوایی سخت است. آزمایش چرخه تر و خشک نیز به منظور بررسی پایداری حجم و یکپارچگی بلوک‌ها در برابر تغییرات رطوبتی انجام شده است. این آزمایش، شامل قرار دادن نمونه‌ها در معرض سیکل‌های متوالی غوطه‌وری در آب و خشک شدن است. بررسی میزان تغییر حجم و ترک‌خوردگی نمونه‌ها پس از این سیکل‌ها، نشان‌دهنده پایداری آنها در برابر شرایط رطوبتی متغیر است. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها، می‌تواند به تعیین مقدار بهینه پلیمر برای تثبیت خاک ماسه‌بادی و تولید بلوک‌های خاکی بادوام و مقاوم در برابر شرایط محیطی مختلف کمک کند.

برای بررسی اثر مقدار پلیمر بر خواص بلوک‌های خاک ماسه‌ای، نمونه‌ها با مقادیر مختلف، به منظور بهینه‌سازی مقدار پلیمر مورد استفاده، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. غلظت‌های متفاوت (۱۰ و ۳۰ درصد) و مقادیر متفاوت امولسیون پلیمر (مطابق جدول ۱) نیز در فرآیند اختلاط و ساخت نمونه‌ها لحاظ شده است (شکل ۲). پس از تهیه نمونه‌ها و عمل‌آوری آنها به مدت ۱۴ روز، آزمایش‌های متعددی بر روی آنها انجام شده است. آزمایش مقاومت فشاری، به عنوان یک شاخص کلیدی از مقاومت مکانیکی بلوک‌ها، مورد استفاده قرار گرفته است. افزایش مقاومت فشاری با افزایش مقدار پلیمر، نشان‌دهنده بهبود چسبندگی و یکپارچگی ساختار بلوک است. با این حال، باید توجه داشت که افزایش بیش از حد مقدار پلیمر، ممکن است منجر به کاهش چسبندگی و ایجاد ترک در ساختار بلوک شود. بنابراین، تعیین مقدار بهینه پلیمر، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آزمایش جذب آب، به منظور ارزیابی میزان نفوذپذیری بلوک‌ها و پتانسیل تخریب آنها در اثر عوامل محیطی، انجام شده است. کاهش جذب آب با افزایش مقدار پلیمر، نشان‌دهنده ایجاد یک لایه محافظ بر روی سطح ذرات خاک و کاهش فضای خالی



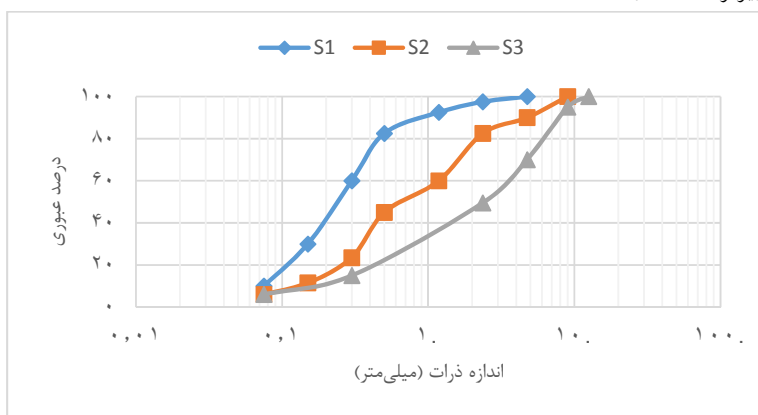
شکل ۲. نحوه ساخت نمونه

جدول ۱. مقادیر پلیمر مورد استفاده

مقدار پلیمر امولسیون بر حسب درصد وزنی خاک	غلظت (%)	میزان پلیمر خالص بر حسب درصد وزنی	نام نمونه
۵۰	۱۰	۵	AS-1
۳۳	۳۰	۱۰	AS-2
۵۰	۳۰	۱۵	AS-3
۷۰	۳۰	۲۰	AS-4

همچنین پارامترهای  $d_{30}$  و  $d_{60}$  که به کمک آن ضریب یکنواختی ( $C_u$ ) و ضریب انحنای ( $C_c$ ) محاسبه می‌شود، به ترتیب عبارتند از: اندازه دانه‌ای که ۳۰٪ و ۶۰٪ از دانه‌ها ریزتر هستند (Lambe & Whitman, 1991). علاوه بر این در جدول ۱ حداکثر اندازه اسمی ذرات خاک نیز ارائه شده که مطابق آن ماسه نوع S1 ریزدانه‌ترین و S3 درشت دانه‌ترین ماسه مورد استفاده است. همان‌طور که اشاره شد در این پژوهش برای تثبیت بلوک‌های خاکی از پلیمر استفاده شد و در این مرحله بلوک‌ها با ۱۰ درصد پلیمر خالص تثبیت شدند.

در ادامه این پژوهش تأثیر نوع دانه‌بندی بر مقاومت فشاری بلوک‌های خاکی تثبیت شده با پلیمر مورد بررسی قرار می‌دهد. بدین منظور نمونه‌هایی با درصد ثابت پلیمر، جنس یکسان مصالح و دانه‌بندی‌های مختلف مطابق شکل ۳ تهیه شد و تحت آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفت و نتایج با استفاده از نرم‌افزار Design-Expert مورد بررسی قرار گرفت. خاک مورد استفاده در این تحقیق شامل ماسه با جنس کوهی با سه دانه‌بندی متفاوت مطابق شکل ۳ است که پارامترهای مربوط به دانه‌بندی در جدول ۲ ارائه شده است. در جدول ۱ پارامترهایی همچون  $d_{10}$  که به اندازه مؤثر معروف است و بیانگر آن است که ۱۰٪ وزنی دانه‌ها از آن ریزتر هستند، ارائه شده است.



شکل ۳. دانه‌بندی ماسه‌های مورد بررسی

جدول ۲. پارامترهای دانه‌بندی ماسه‌های مورد بررسی

نوع ماسه	$d_{10}$	$d_{30}$	$d_{60}$	$C_u$	$C_c$	حداکثر اندازه اسمی
S1	۰،۰۷۵	۰،۱۵	۰،۳	۴	۱	۲،۳۶
S2	۰،۱۳	۰،۳۵	۱،۲	۹،۲۳۰۷۶۹	۰،۷۸۵۲۵۶	۴،۷۵
S3	۰،۱۹	۰،۸	۳،۵	۱۸،۴۲۱۰۵	۰،۹۶۲۴۰۶	۹

### ۳-۱- مقاومت فشاری

محاسبه است که می‌تواند معیاری برای تعیین تفکیک بلوک‌های مناسب برای کاربرد به‌عنوان کف‌پوش یا اجر باشد و هدف اصلی از انجام این آزمایش در این پژوهش تفکیک بلوک برای استفاده از آن‌ها به‌عنوان آجر و کف‌پوش و تعیین درصد بهینه برای ساخت کف‌پوش پلیمری است. لازم به ذکر است که حداقل مقاومت مورد نیاز کف‌پوش برای استفاده در پیاده‌روها  $\frac{N}{mm^2}$  ۱۵ و برای بلوک‌های غیر باربر  $\frac{N}{mm^2}$  ۳ است. علاوه بر این به‌منظور بررسی دوام بلوک‌های پلیمری مقاومت فشاری بلوک‌ها پس از چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ نیز مورد بررسی قرار گرفت. در رابطه ۱،  $\sigma$  حداکثر تنش فشاری قابل تحمل (KPa)، F حداکثر بار قابل تحمل (N) و A مساحت سطح نمونه (mm) است (Dabakuyo et al., 2022).

مقاومت فشاری، به‌عنوان یک روش بنیادی و محوری در تعیین خواص مکانیکی مصالح ساختمانی، به‌ویژه بلوک‌های خاکی ماسه‌ای تقویت شده با پلیمرهای دوستدار محیط‌زیست، جایگاه ویژه‌ای در تحقیقات مهندسی و ارزیابی عملکرد مصالح دارد (Zahra et al, 2021). انتخاب این آزمایش برای ارزیابی بلوک‌های خاکی ماسه‌ای مورد بحث، نه تنها مبتنی بر الزامات استاندارد BS EN 772 و سایر استانداردهای مرتبط است، بلکه بر پایه‌های استوار علمی، فنی و کاربردی متعددی استوار است که در ادامه به تشریح آن‌ها می‌پردازیم. در این پژوهش رو آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌هایی با ابعاد ۵۰×۵۰×۵۰ سانتی‌متر مطابق استاندارد BS EN 772 انجام شد (شکل ۴-الف). مقاومت فشاری بلوک‌ها که از رابطه ۱ قابل

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

ساختار فیزیکی بلوک، شامل عواملی مانند تخلخل، اندازه ذرات و توزیع آن‌ها، نقش مهمی در تعیین مقاومت فشاری آن ایفا می‌کند. آزمایش مقاومت فشاری، به‌طور غیرمستقیم، اطلاعاتی در مورد این ویژگی‌های فیزیکی ارائه می‌دهد. به‌عنوان مثال، بلوک‌هایی با تخلخل کمتر و توزیع یکنواخت‌تر ذرات، عموماً مقاومت فشاری بالاتری دارند. از سوی دیگر، آزمایش مقاومت فشاری پس از چرخه‌های تر و خشک و ذوب و یخ، می‌تواند نشان‌دهنده میزان نفوذپذیری بلوک در برابر آب و حساسیت آن به آسیب‌های ناشی از یخ‌زدگی باشد. در واقع، تغییرات در مقاومت فشاری پس‌از این چرخه‌ها، می‌تواند به‌عنوان شاخصی برای ارزیابی پایداری فیزیکی بلوک در برابر عوامل محیطی عمل کند. در سال‌های اخیر، تحقیقات گسترده‌ای در زمینه مدل‌سازی رفتاری مصالح تحت بارگذاری فشاری صورت گرفته است. این تحقیقات، منجر به توسعه مدل‌های ریاضی پیچیده‌تری شده است که می‌توانند رفتار غیرخطی مصالح را با دقت بیشتری پیش‌بینی کنند. یکی از این مدل‌ها، مدل آسیب پیوسته است که بر اساس مفهوم تجمع تدریجی آسیب در داخل ماده، قبل از رسیدن به نقطه شکست، عمل می‌کند. در این مدل، از یک متغیر آسیب برای نشان دادن میزان آسیب در یک نقطه از ماده استفاده می‌شود. این متغیر، از صفر (بدون آسیب) تا یک (شکست کامل) تغییر می‌کند. رابطه بین تنش و کرنش در این مدل، به‌صورت رابطه ۲ اصلاح می‌شود (Sarhat & Sherwood., 2014; Morel et al., 2007).

در این رابطه،  $\sigma$  تنش،  $\varepsilon$  کرنش،  $E$  مدول الاستیسیته و  $D$  متغیر آسیب است. متغیر آسیب، خود تابعی از کرنش، نرخ کرنش و سایر عوامل محیطی است. توسعه فرمولاسیون دقیقی برای محاسبه  $D$  در مورد بلوک‌های خاک ماسه‌ای تقویت‌شده با پلیمر، می‌تواند موضوع تحقیقات نوآورانه‌ای باشد.

$$\sigma = (1 - D) \times E \times \varepsilon$$

مقاومت فشاری، قابلیت یک ماده در تحمل بار اعمال‌شده بدون شکست یا تغییر شکل دائمی را نشان می‌دهد. در مورد بلوک‌های خاک ماسه‌ای، این ویژگی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این بلوک‌ها عموماً تحت بارهای فشاری ناشی از وزن سازه، ترافیک پیاده‌روها و سایر عوامل محیطی قرار می‌گیرند. آزمایش مقاومت فشاری، به مهندسان این امکان را می‌دهد تا حداکثر باری که بلوک می‌تواند تحمل کند را تعیین کرده و از این طریق، از پایداری و ایمنی سازه‌های ساخته‌شده با این بلوک‌ها اطمینان حاصل کنند. در واقع، نتایج این آزمایش، اطلاعات حیاتی برای طراحی سازه‌ها و انتخاب مواد مناسب را فراهم می‌آورد. به‌عنوان مثال، همان‌طور که در متن مقاله اشاره شده است، حداقل مقاومت فشاری موردنیاز برای کف‌پوش‌های پیاده‌رو و بلوک‌های غیر باربر، مقادیر مشخصی دارد که تنها از طریق انجام آزمایش مقاومت فشاری می‌توان از انطباق بلوک‌های تولیدی با این الزامات اطمینان حاصل کرد. حضور پلیمرهای دوستدار محیط‌زیست در ترکیب بلوک‌های خاک ماسه‌ای، تغییراتی در ساختار میکروسکوپی و پیوند ذرات خاک و ماسه ایجاد می‌کند. این تغییرات، به‌نوبه خود، بر مقاومت فشاری بلوک تأثیر می‌گذارند. آزمایش مقاومت فشاری، به‌عنوان یک ابزار غیرمستقیم، می‌تواند به بررسی تأثیر این افزودنی‌های پلیمری بر استحکام و دوام بلوک کمک کند. به‌عنوان مثال، اگر افزودن پلیمر، باعث ایجاد پیوندهای قوی‌تری بین ذرات شود، مقاومت فشاری بلوک افزایش می‌یابد. بررسی مقاومت فشاری بلوک‌ها پس از چرخه‌های تر و خشک و ذوب و یخ، می‌تواند نشان‌دهنده میزان پایداری پیوندهای ایجادشده توسط پلیمر در برابر عوامل محیطی باشد. به‌عبارت‌دیگر، این آزمایش، به ارزیابی پایداری شیمیایی و مکانیکی ماده در طول زمان کمک می‌کند (Abdullahi., 2005; Aubert et al., 2013).

(۲)

### ۳-۲- جذب آب

جذب‌شده گزارش شد (شکل ۴-ب). لازم به ذکر است که حداقل جذب آب برای کف‌پوش‌ها مطابق استاندارد BS EN 1338، ۶٪ و برای آجرهای غیر باربر مطابق ASTM C140، ۲۹۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. علاوه بر این جذب آب

در این پژوهش جذب آب بلوک‌های خاکی به دو روش موردبررسی قرار گرفت. در روش اول مطابق استاندارد ASTM C936 نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در آب خیس‌انده شدند و اختلاف وزن آن‌ها قبل و بعد خیس‌اندن به‌عنوان مقدار آب

۳-ج) و با استفاده از رابطه ۳ میزان جذب آب از طریق مویبگی محاسبه می‌گردد (Teixeira et al., 2020) که در آن C ضریب مویبگی ( $\text{gr}/(\text{min}^{0.5} \cdot \text{cm}^2)$ )،  $P_1$  وزن ثانویه ( $\text{gr}$ )،  $P_0$  وزن اولیه ( $\text{gr}$ )، S مساحت سطح ( $\text{cm}^2$ ) و t زمان ( $\text{min}$ ) است.

$$C = \frac{100 * (P_1 - P_0)}{S\sqrt{t}}$$

بلوک بیشتر باشد، احتمال خطر خرابی در مقابل چرخه‌های تر و خشک و ذوب و یخ نیز بیشتر خواهد بود (Sharma & Sharma., 2017).

این آزمایش برای ارزیابی میزان تأثیر پلیمر در بهبود مقاومت مصالح در برابر این سیکل‌ها و در نتیجه، افزایش دوام آن ضروری است. بدون انجام این آزمایش، نمی‌توان به‌طور قطعی در مورد کارایی پلیمر در محافظت از ساختار مصالح در برابر تخریب ناشی از نوسانات رطوبتی اظهار نظر کرد (Rigassi., 1986; Latha & Murugesan., 2024). وقتی بلوک خاک-ماسه ای در معرض آب قرار می‌گیرد، آب به داخل منافذ و ترک‌های موجود در ساختار آن نفوذ می‌کند. این نفوذ آب، علاوه بر اشغال فضاهای خالی، باعث افزایش حجم آب درون منافذ می‌شود. سپس، با قرار گرفتن بلوک در معرض حرارت (خشک شدن)، آب تبخیر شده و به تدریج از منافذ خارج می‌شود. این فرآیند تبخیر می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های کششی موضعی در دیواره‌های منافذ شود. سیکل‌های مکرر تر و خشک، این تنش‌های کششی را به‌طور مداوم اعمال کرده و باعث رشد و گسترش ترک‌ها می‌شود. این پدیده، که به خستگی در سطح میکروسکوپی شباهت دارد، در نهایت منجر به جدا شدن ذرات و کاهش مقاومت مکانیکی بلوک می‌گردد. به‌طور خاص، در بلوک‌های تثبیت شده با پلیمر، هدف اصلی استفاده از پلیمر، ایجاد پیوند قوی‌تر بین ذرات خاک و ماسه و کاهش اندازه و تعداد منافذ است. آزمایش چرخه تر و خشک به‌طور مستقیم میزان موفقیت پلیمر در دستیابی به این هدف و مقاومت در برابر تنش‌های ناشی از سیکل‌های رطوبتی را ارزیابی می‌کند. آب، به‌عنوان یک حلال قوی، می‌تواند باعث حل شدن برخی از اجزای تشکیل‌دهنده بلوک خاک-ماسه‌ای شود. به‌عنوان مثال، املاح موجود در خاک، در اثر تماس با آب حل شده و از ساختار

بلوک‌ها از طریق مویبگی نیز مطابق استاندارد XP P 13-901 به‌این ترتیب انجام شد که پس از توزین نمونه‌ها در حالت خشک، نمونه‌ها به مدت ۱۰ دقیقه در ظرفی که تا عمق ۵ میلی‌متر حاوی آب است گذاشته می‌شود و سپس مجدد توزین می‌گردد (شکل ۳)

لازم به ذکر است که انجام آزمایش جذب آب از طریق غوطه‌وری و مویبگی به دلیل آن است که جذب و نگهداشت آب بر مقاومت بلوک در برابر چرخه ذوب و یخ و چرخه خشک و تر مؤثر است؛ چراکه هرچه ظرفیت جذب و نگهداشت آب

### ۳-۳- چرخه مرطوب و خشک

به‌منظور بررسی تأثیر چرخه تر و خشک بر روی بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده، آزمایش چرخه مرطوب و خشک مطابق استاندارد ASTM D559 بر روی نمونه‌ها انجام شد. در این آزمایش ابتدا نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت داخل آب قرار می‌گیرند و سپس به مدت ۴۲ ساعت در گرمخانه‌ای با دمای ۷۱ درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرند. پس از ۱۲ چرخه تر و خشک افت وزنی نمونه‌ها محاسبه می‌گردد (شکل ۴-د). لازم به ذکر است مقدار افت وزنی محاسبه می‌گردد که این مقدار نباید بیش‌تر از ۱۴٪ وزنی نمونه باشد. آزمایش چرخه تر و خشک، که در مطالعه‌ی دوام بلوک‌های خاک-ماسه ای تثبیت‌شده با پلیمرهای دوستدار محیط‌زیست مورد استفاده قرار گرفته است، ابزاری حیاتی برای ارزیابی پایداری و عملکرد این مصالح ساختمانی در شرایط آب و هوایی متغیر و به‌ویژه محیط‌هایی با نوسانات رطوبتی شدید است. انتخاب این آزمایش، مطابق با استاندارد ASTM D559، ریشه در مجموعه‌ای از دلایل منطقی، مکانیکی، شیمیایی و فیزیکی دارد که در ادامه به‌تفصیل مورد بررسی قرار می‌گیرند. بتن و مصالح سیمانی و خاکی-سیمانی، به‌طور ذاتی در معرض فرسایش ناشی از سیکل‌های تر و خشک قرار دارند. این سیکل‌ها در طول عمر سازه‌ها به‌طور مداوم تکرار می‌شوند و پایداری و دوام مصالح را تحت تأثیر قرار می‌دهند. لذا، آزمایش چرخه تر و خشک به‌عنوان یک روش شبیه‌سازی تسریع‌شده از این پدیده، می‌تواند اطلاعات ارزشمندی در مورد عملکرد درازمدت مصالح ارائه دهد و امکان پیش‌بینی عمر مفید و نیاز به تعمیر و نگهداری را فراهم سازد. به‌طور خاص، در بلوک‌های خاک-ماسه‌ای تثبیت‌شده با پلیمر،

جدا شدن ذرات و ایجاد ترک شوند. همچنین، تفاوت در ضریب انبساط حرارتی بین ذرات خاک و ماسه و پلیمر تثبیت‌کننده می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های بیشتر در طول سیکل‌های حرارتی شود. آزمایش چرخه تر و خشک، با شبیه‌سازی این سیکل‌های حرارتی، میزان حساسیت بلوک به این پدیده‌ها را ارزیابی می‌کند. در زمینه مبانی علمی آزمایش چرخه تر و خشک، می‌توان به توسعه مدل‌های ریاضیاتی پیچیده‌تر برای پیش‌بینی رفتار مصالح در معرض سیکل‌های رطوبتی اشاره کرد. این مدل‌ها، که بر پایه مکانیک محیط‌های متخلخل و ترمودینامیک غیر تعادلی استوار هستند، می‌توانند با در نظر گرفتن پارامترهایی مانند توزیع اندازه منافذ، خواص فیزیکی و شیمیایی سیال درون منافذ و نرخ تبخیر، رفتار مصالح را با دقت بالاتری شبیه‌سازی کنند. می‌توان یک فرمول نوآورانه برای پیش‌بینی میزان افت وزنی ناشی از سیکل‌های تر و خشک برحسب پارامترهای ماده و محیط ارائه داد (Nshimiyimana et al., 2022) (رابطه ۴).

$$\Delta W = f(n, D_p, K, \alpha, E, \eta, T, RH)$$

$f$  یک تابع پیچیده که روابط بین پارامترها را مشخص می‌کند، این تابع می‌تواند بر اساس مدل‌های عددی و یا شبکه‌های عصبی مصنوعی تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که تعیین دقیق فرم تابع  $f$  نیازمند انجام آزمایش‌های گسترده و تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های آماری و یادگیری ماشین است.

از آنجا که بلوک‌های خاکی دارای مقاومت فشاری بیش از ۱۵ مگا پاسکال قابلیت استفاده به‌عنوان کف‌پوش را نیز دارند؛ آزمایش چرخه ذوب و یخ بر روی نمونه بهینه که دارای مقاومت فشاری بیش از ۱۵ مگا پاسکال است مطابق استاندارد BS EN 1338 انجام شد. مطابق این استاندارد همه سطوح نمونه به‌جز سطح آزمون، عایق‌بندی می‌شود (شکل ۴-ز) و سپس محلول ۳ درصد سدیم کلرید به ضخامت  $2 \pm 5$  میلی‌متر روی سطح نمونه ریخته می‌شود. سپس نمونه داخل محفظه‌ی یخبندان قرار می‌گیرد و اولین چرخه پس از قرار دادن نمونه داخل محفظه یخبندان، مطابق شکل ۵، آغاز می‌گردد. پس از ۲۸ چرخه، افت وزنی نمونه محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که کاهش وزن در اثر ۲۸ چرخه ذوب یخ نباید بیش‌تر از ۱ کیلوگرم بر مترمربع باشد (استاندارد ۲۰۱۸۵، ۱۳۹۴).

بلوک خارج می‌شوند. این فرآیند، که به‌عنوان شسته شدن شناخته می‌شود، باعث تضعیف ساختار و کاهش مقاومت آن می‌گردد. همچنین، آب می‌تواند باعث تسریع واکنش‌های شیمیایی نامطلوب در داخل بلوک شود؛ به‌عنوان مثال، در صورت وجود مواد آلی در خاک، رطوبت و حرارت می‌تواند باعث تجزیه این مواد و تولید گازهای مضر شود که این گازها نیز به‌نوبه خود باعث تخریب ساختار بلوک می‌شوند (Xu et al., 2022). پلیمر مورد استفاده در تثبیت خاک-ماسه، می‌تواند نقش مهمی در جلوگیری از شسته شدن املاح و کاهش سرعت واکنش‌های شیمیایی نامطلوب ایفا کند. آزمایش چرخه تر و خشک به‌طور مستقیم میزان تأثیر پلیمر در این زمینه را ارزیابی می‌کند. علاوه بر موارد ذکر شده، پدیده‌های فیزیکی دیگری نیز در تخریب بلوک خاک-ماسه‌ای در اثر سیکل‌های تر و خشک نقش دارند. به‌عنوان مثال، انبساط و انقباض حرارتی ذرات خاک و ماسه در اثر تغییر دما می‌تواند باعث ایجاد تنش‌های داخلی در بلوک شود. این تنش‌ها، به‌ویژه در سطوح تماس بین ذرات، می‌تواند باعث (۴)

که در آن:

$\Delta W$  افت وزنی نمونه پس از  $n$  سیکل تر و خشک،  $n$  تعداد سیکل‌های تر و خشک،  $p$  توزیع اندازه منافذ ماده،  $K$  ضریب نفوذپذیری آب در ماده،  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی ماده،  $E$  مدول الاستیسیته ماده،  $\eta$  ویسکوزیته آب،  $T$  دمای محیط خشک‌کردن،  $RH$  رطوبت نسبی محیط خشک‌کردن است.

### ۳-۴- چرخه ذوب و یخ

در این پژوهش مقاومت بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده با پلیمر نسبت به چرخه ذوب و یخ به دو صورت مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مقاومت بلوک‌ها نسبت به چرخه ذوب و یخ مطابق استاندارد ASTM C1262 به این صورت انجام شد که نمونه داخل ظرفی حاوی محلول سدیم کلرید ۳ درصد به عمق  $2 \pm 13$  میلی‌متر قرار می‌گیرد و ظرف در محفظه انجماد با دمای  $5 \pm 18$  - درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ الی ۵ ساعت قرار داده می‌شود تا محلول داخل ظرف کاملاً یخ بزند. سپس ظرف در محفظه ذوب با دمای  $5 \pm 24$  درجه سانتی‌گراد به مدت ۲/۵ الی ۹۶ ساعت قرار داده می‌شود تا محلول داخل ظرف کامل ذوب گردد (شکل ۴-و). پس از گذشت ۱۰ چرخه افت وزنی نمونه‌ها محاسبه می‌گردد. لازم به ذکر است که مقدار افت وزنی محاسبه می‌گردد نباید بیش‌تر از ۱٪ وزنی نمونه باشد. از طرفی

### ۳-۵- تحلیل آماری تأثیر پلیمر و نوع دانه‌بندی بر عملکرد بلوک پلیمری

دقیق‌تر دوام بلوک‌های پلیمری، معناداری اختلاف مقاومت فشاری قبل و بعد چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ با آزمون آماری  $t$  به کمک نرم‌افزار SPSS مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این به منظور تأثیر نوع دانه‌بندی بر مقاومت فشاری بلوک از نرم‌افزار Design-Expert استفاده شد و در این مرحله پارامترهای اندازه مؤثر، ضریب یکنواختی، ضریب انحنای و حداکثر اندازه اسمی ذرات خاک به‌عنوان پارامتر مستقل و بیانگر نوع دانه‌بندی و مقاومت فشاری بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده با پلیمر به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد.

در این پژوهش ابتدا به‌منظور بررسی تأثیر مقدار پلیمر بر دوام بلوک‌های پلیمری از روش سطح پاسخ و نرم‌افزار Design-Expert استفاده شد. Design-Expert یک نرم‌افزار است که یکی از قابلیت‌های آن ارائه رابطه میان متغیر مستقل و وابسته است. در این پژوهش ابتدا مقدار پلیمر امولسیون برحسب درصد وزنی خاک و غلظت پلیمر به‌عنوان متغیر مستقل و نتایج آزمایش‌ها شامل مقاومت فشاری پس از چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ، درصد جذب آب، ضریب مویبگی، افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد. همچنین به‌منظور بررسی هرچه



(ب)



(الف)



چرخه خشک چرخه تر

(د)



جذب آب از طریق مویبگی

(ج)

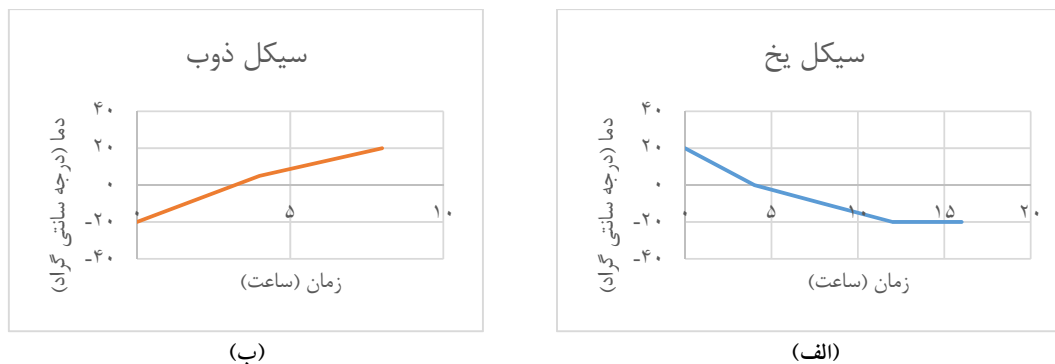


(ز)



(و)

شکل ۴. تصاویر الف-آزمایش مقاومت فشاری ب-آزمایش جذب آب ج-آزمایش مویبگی د-آزمایش چرخه تر و خشک و-آزمایش چرخه ذوب و یخ کفپوش ز-آزمایش چرخه ذوب و یخ آجر



شکل ۵. چرخه زمان-دما در آزمایش‌های دوام بلوک‌های پلیمری

#### ۴- نتایج آزمایش‌ها

در این قسمت به ارائه نتایج حاصل از آزمایش‌های شرح داده‌شده در قسمت قبل پرداخته‌شده است. این نتایج در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده

نام نمونه	مقاومت فشاری	میزان جذب آب (کیلوگرم بر مترمکعب)	درصد جذب آب	ضریب مویینگی	چرخه تر و خشک		چرخه ذوب و یخ	
					افت وزنی	مقاومت فشاری	افت وزنی	مقاومت فشاری
AS-1	۵/۵	۲۸۵،۰۰۲	۲۰،۲۵	۱۰،۴۴۳	۰،۹	۳،۹	۲،۵	۳،۰۳
AS-2	۹/۱	۲۰۲،۷۳	۱۵،۳۳	۱،۲۵۴	۰،۸	۶،۸	۰،۹۷	۵،۹۲
AS-3	۱۶/۵	۸۵،۴۷	۵،۶	۰،۹۶۲	۰،۵	۱۳،۲	۰،۵	۱۱،۵۵
AS-4	۱۷/۳	۶۹،۷۸	۴،۵۷	۰،۶۰۶	۰،۱	۱۴،۷	۰،۳	۱۳،۱۵

فشاری توسط پلیمر و نقش آن در کاهش عیوب و خلل و فرج در ساختار بلوک، ارائه دهد. در خصوص میزان و درصد جذب آب، نتایج نشان می‌دهند که با افزایش درصد پلیمر، میزان جذب آب به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. نمونه AS-1 با بیشترین میزان جذب آب (۲۸۵/۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب و ۲۰/۲۵ درصد) و نمونه AS-4 با کمترین میزان جذب آب (۶۹/۷۸ کیلوگرم بر مترمکعب و ۴/۵۷ درصد) به ترتیب، در دو انتهای طیف قرار دارند. کاهش جذب آب به‌واسطه حضور پلیمر، حائز اهمیت است زیرا آب جذب‌شده می‌تواند در اثر سیکل‌های ذوب و یخ منجر به تخریب ساختار بلوک، ایجاد ترک و گسیختگی و در نهایت کاهش دوام آن گردد. ضریب مویینگی که نشان‌دهنده سرعت جذب آب توسط بلوک در اثر پدیده مویینگی است، در تمامی نمونه‌ها کمتر از ۲۰ است که مطابق با استاندارد، این بلوک‌ها را در طبقه مویینگی کم قرار می‌دهد. این ویژگی، از منظر انتقال رطوبت از زمین به دیوار و ایجاد مشکلات ناشی از

با عنایت به نتایج آزمایش‌های مندرج در جدول ۳، اطلاعات جامعی را در خصوص مقاومت فشاری، میزان و درصد جذب آب، ضریب مویینگی و رفتار بلوک‌ها تحت شرایط سیکل‌های تر و خشک و ذوب و یخ، برای چهار نمونه مختلف AS-1، AS-2، AS-3، AS-4 با درصدهای متفاوت پلیمر دست‌یاب می‌شود که نمونه‌ها دارای تنوع قابل توجهی در این ویژگی هستند. نمونه AS-3 و AS-4 با مقاومت‌های فشاری ۱۶/۵ و ۱۷/۳ مگا پاسکال، عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های AS-1 (۵/۵ مگا پاسکال) و AS-2 (۹/۱ مگا پاسکال) نشان می‌دهند. این اختلاف در مقاومت فشاری می‌تواند ناشی از تفاوت در درصد پلیمر مورد استفاده در هر نمونه و نیز نحوه توزیع یکنواخت آن در بافت خاک ماسه باشد. بررسی دقیق‌تر ریزساختار این بلوک‌ها با استفاده از تکنیک‌های میکروسکوپی، می‌تواند اطلاعات بیشتری در خصوص مکانیسم تقویت مقاومت

که نسبت کاهش جرم بر سطح نمونه برابر ۰/۵۲ کیلوگرم بر مترمربع است که کمتر از ۱ کیلوگرم بر مترمربع بوده و این نمونه را برای استفاده به عنوان کفپوش مناسب می‌سازد (استاندارد ۲۰۱۸۵، ۱۳۹۴). این یافته، حاکی از آن است که استفاده از پلیمر دوستدار محیط‌زیست، می‌تواند به‌طور مؤثری دوام و عملکرد بلوک‌های خاک ماسه‌ای را بهبود بخشد و آن‌ها را برای کاربردهای مختلف ساختمانی، از جمله آجرهای باربر و کفپوش‌ها، مناسب سازد. لازم به ذکر است که بر اساس استاندارد BS EN 1338 نمونه‌های AS-3 و AS-4 الزامات لازم را به‌عنوان کفپوش معابر برآورده می‌کنند.

همچنین در جدول ۴ نتایج آزمایش مقاومت فشاری بلوک‌های تهیه‌شده با دانه‌بندی‌های مختلف ارائه‌شده است که مطابق آن‌که مطابق آن با ریزتر شدن دانه‌بندی در نتیجه کاهش خلل فرج در نمونه، مقاومت فشاری بلوک‌ها تا ۳ برابر افزایش یافته است.

رطوبت صعودی، یک مزیت تلقی می‌شود. با این حال، مقایسه دقیق‌تر ضرایب مویینگی مختلف نمونه‌ها نشان می‌دهد که نمونه AS-4 با کمترین ضریب مویینگی (۰/۶۰۶) بهترین عملکرد را در این زمینه دار است. ارزیابی دوام بلوک‌ها تحت شرایط سیکل‌های تر و خشک و ذوب و یخ، اطلاعات ارزشمندی را در خصوص پایداری ساختار آن‌ها در محیط‌های متغیر ارائه می‌دهد. در سیکل‌های تر و خشک، تمامی نمونه‌ها افت وزنی کمتر از حد مجاز برای آجرهای باربر را نشان می‌دهند. با این حال، در سیکل‌های ذوب و یخ، تنها نمونه AS-1 موفق به برآورده کردن الزامات مربوط به افت وزنی نمی‌شود. این امر نشان می‌دهد که درصد‌های بالاتر پلیمر ممکن است در برابر آسیب‌های ناشی از ذوب و یخ، محافظت بهتری ایجاد کنند. در نهایت، نمونه AS-3، به‌عنوان نمونه بهینه، با حداقل درصد پلیمر و مقاومت فشاری بیش از ۱۵ مگا پاسکال، برای کاربرد در کفپوش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش چرخه ذوب و یخ کفپوش نشان داد

جدول ۴. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بلوک‌ها با دانه‌بندی‌های مختلف

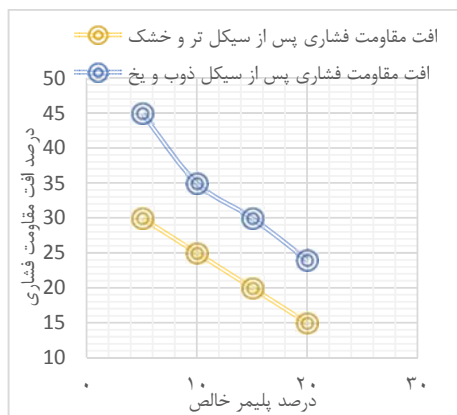
نوع دانه‌بندی	غلظت پلیمر (%)	مقدار امولسیون (درصد وزنی خاک خشک)	درصد پلیمر خالص	مقاومت فشاری (مگا پاسکال)
S1	۳۰	۵۰	۱۵٪	۱۹/۸۳
S2	۳۰	۵۰	۱۵٪	۹/۹
S3	۳۰	۵۰	۱۵٪	۶/۶

#### ۴-۱- تحلیل نتایج تأثیر میزان پلیمر بر عملکرد بلوک

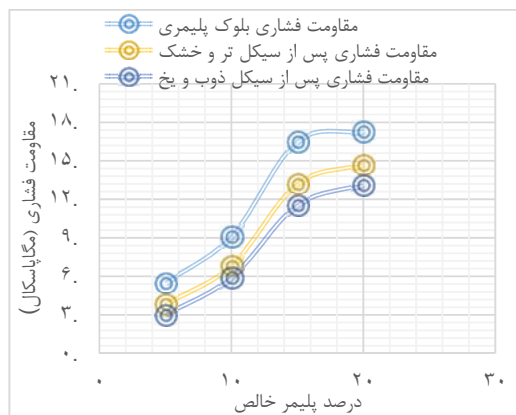
در این بخش به‌طور مفصل به بحث در نتایج حاصله از آزمایش‌های انجام‌شده که در بخش قبل ارائه‌شده است پرداخته می‌شود. در شکل ۶-الف تأثیر مقدار پلیمر خالص (مطابق جدول ۲) بر مقاومت فشاری بلوک‌های پلیمری نشان داده‌شده است که مطابق آن با افزایش میزان پلیمر مقاومت فشاری بلوک پلیمری افزایش می‌یابد؛ به‌طوری‌که افزایش پلیمر خالص از ۵ تا ۲۰ درصد سبب ۳/۱ برابر شدن مقاومت فشاری می‌شود؛ همچنین در شکل ۶-ب درصد افت مقاومت فشاری در اثر چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ نشان داده‌شده است که مطابق آن با افزایش میزان پلیمر، افت مقاومت کاهش یافته است؛ چراکه با افزایش مقدار پلیمر چسبندگی ذرات ماسه به یکدیگر بهتر صورت گرفته و این در حالی است که پلیمر مورد استفاده مقاومت مناسبی در برابر تغییرات دما و رطوبت دارد. همچنین در شکل ۶-ج و ۶-د تأثیر هم‌زمان مقدار امولسیون پلیمری و

غلظت پلیمر (مطابق جدول ۲) بر مقاومت فشاری بلوک‌ها پس از چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ ارائه‌شده است که این نمودار نیز بیانگر آن است که با افزایش مقدار امولسیون و غلظت پلیمر، مقاومت فشاری پس از چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ نیز افزایش می‌یابد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت با افزایش مقدار پلیمر، دوام بلوک‌ها نیز افزایش یافته است. همچنین در شکل ۷-الف تأثیر میزان پلیمر خالص بر درصد جذب آب و ضریب مویینگی نمایش داده‌شده است که مطابق با آن با افزایش مقدار پلیمر خالص، جذب آب و ضریب مویینگی کاهش می‌یابد؛ به‌طوری‌که با افزایش پلیمر خالص از ۵ تا ۲۰ درصد، درصد جذب آب یک‌پنجم برابر و ضریب مویینگی یک‌بیستم برابر می‌شود. همچنین در شکل ۷-ب و ۷-ج تأثیر هم‌زمان مقدار امولسیون پلیمری و غلظت پلیمر بر جذب آب و ضریب مویینگی بلوک‌ها ارائه‌شده است که این نمودار نیز بیانگر آن است

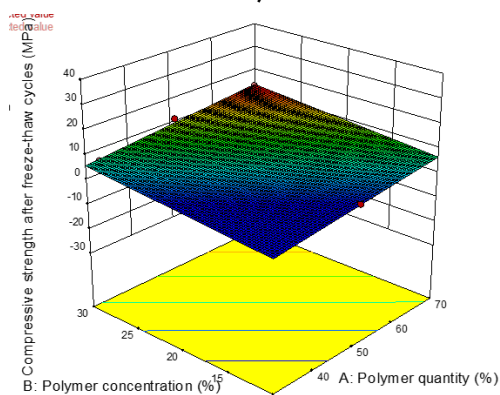
ترتیب یک‌دهم و یک‌هشتم برابر می‌شود. همچنین در شکل ۸-ب و ۸-ج تأثیر هم‌زمان مقدار امولسیون پلیمری و غلظت پلیمر بر افت وزنی بلوک پلیمری در اثر چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ بلوک‌ها ارائه شده است که این نمودار نیز بیانگر آن است که با افزایش مقدار امولسیون و غلظت پلیمر، افت وزنی کاهش و دوام بلوک‌ها افزایش می‌یابد.



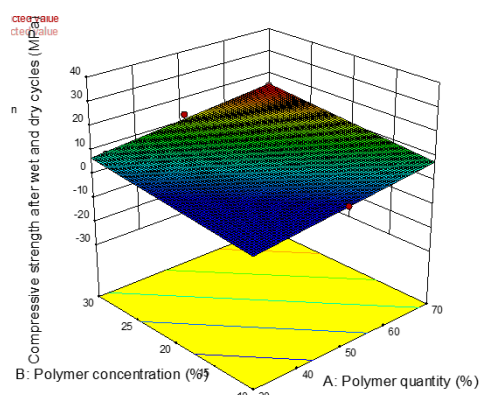
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶. الف نمودار تأثیر پلیمر خالص بر مقاومت فشاری بلوک پلیمری ب- درصد افت مقاومت فشاری در اثر چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ ج- نمودار تأثیر هم‌زمان مقدار پلیمر امولسیون و غلظت بر مقاومت فشاری بلوک پلیمری پس از چرخه ج- تر و خشک د- ذوب و یخ

مطابق نتایج با افزایش میزان پلیمر دوام بلوک‌های پلیمر و همچنین مقاومت فشاری بلوک‌ها افزایش و از طرفی میزان جذب آب و ضریب مویبندی آن کاهش می‌یابد؛ چراکه با افزایش ماده چسباننده و چسبندگی بهتر ملات بلوک، ذرات خاک ماسه بهتر به هم چسبیده و در نتیجه بلوکی مقاومت و دوام بالاتری را نتیجه می‌دهد. همچنین با افزایش میزان پلیمر در بلوک پلیمری، درصد

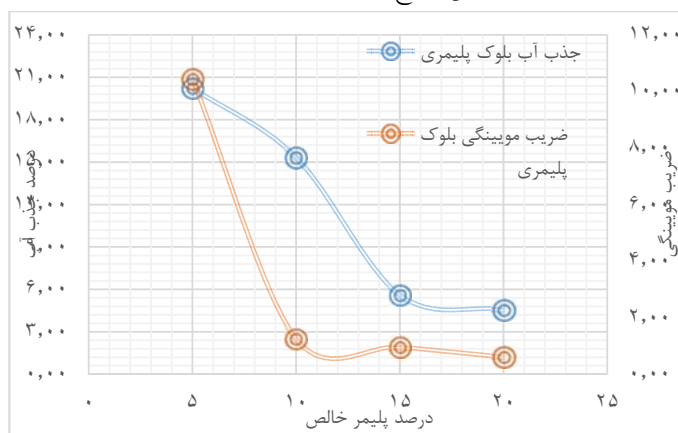
فضای خالی مخلوط کاهش یافته و در نتیجه درصد جذب آب و مویبندی کاهش می‌یابد. لازم به ذکر است که نتایج این پژوهش با نتایج پژوهش‌های پیشین نیز همخوانی دارد؛ به‌عنوان نمونه در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۹ استفاده از زباله‌های پلاستیکی بازیافتی به‌عنوان چسباننده پلیمری مصالح سنگی برای تهیه بلوک دوستدار محیط‌زیست مورد بررسی قرار گرفت. در این پژوهش

تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش ماده تثبیت‌کننده بلوک خاکی سبب افزایش دوام و مقاومت بلوک در برابر چرخه تر و خشک و ذوب و یخ می‌شود (Medvey & Dobszay, 2020) که با نتایج این پژوهش همسو است.

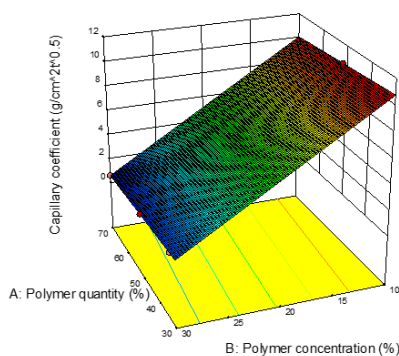
در جدول ۵ نیز روابط حاصل شده توسط نرم‌افزار Design-Expert ارائه شده است و از آنجایی که مقدار R-Squared نزدیک به یک است؛ به کمک آن می‌توان با داشتن مقادیر غلظت و درصد پلیمر امولسیون در محدوده مشخص شده، پارامترهایی همچون مقاومت فشاری پس از چرخه اثر چرخه‌های تر و خشک ذوب و یخ، جذب آب، ضریب مویینگی است. افت وزنی در اثر چرخه‌های تر و خشک و ذوب و یخ را با دقت خوبی تخمین زد. لازم به ذکر است که در روابط ارائه شده X مقدار پلیمر امولسیونی و Y غلظت پلیمر برحسب درصد است.

زباله‌های پلاستیکی پس از ذوب شدن با مقادیر مختلف سیمان به مصالح سنگی اضافه شد و مقاومت فشاری، تخلخل و جذب آب بلوک پس از ۷، ۱۴، ۲۱ روز عمل‌آوری و همچنین آزمایش جذب آب انجام شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد مقاومت فشاری بلوک‌های تهیه شده با زباله‌های پلاستیکی بازیافتی با افزایش مقدار چسباننده پلیمری تا ۱۷٪ افزایش می‌یابد و این در حالی است که تخلخل و جذب آب کاهش یافته است (Agyeman et al., 2019).

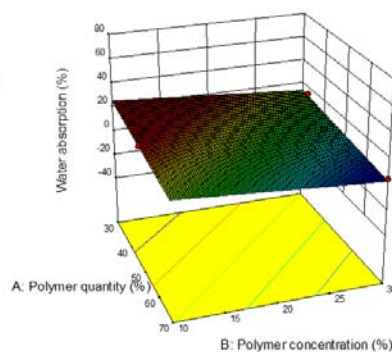
در مطالعه‌ای دیگر، تمپا و همکارانش در پژوهشی به بررسی جایگزینی ضایعات پلاستیک ذوب شده به عنوان چسباننده پلیمری با سیمان در تهیه بلوک به منظور ارائه کفپوش سازگار با محیط زیست بدون سیمان پرداختند و یافتند که مقاومت فشاری با افزایش مقدار پلاستیک افزایش و جذب آب کاهش می‌یابد. (Tempa et al., 2022). علاوه بر این نتایج



(الف)

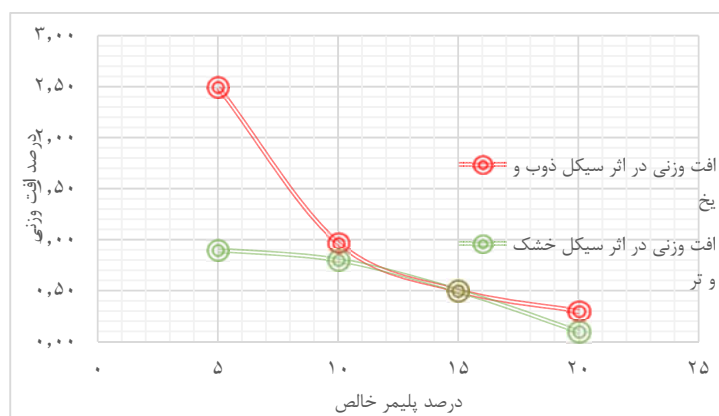


(ج)

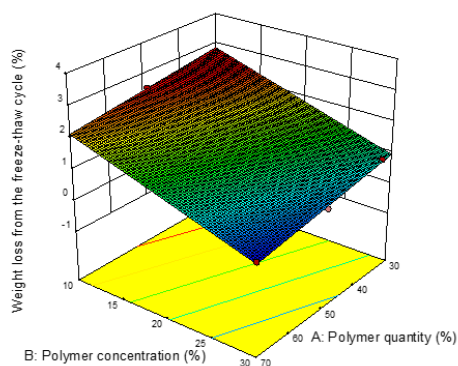


(ب)

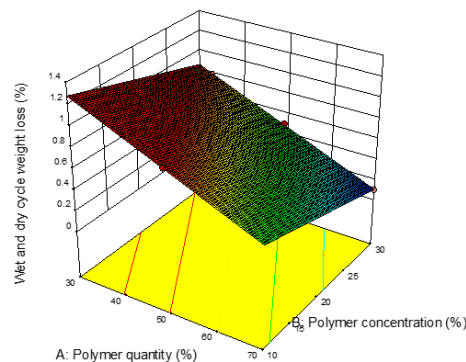
شکل ۷. الف- نمودار تأثیر پلیمر خالص بر درصد جذب آب و ضریب مویینگی بلوک پلیمری، نمودار تأثیر هم‌زمان مقدار پلیمر امولسیونی و غلظت بر ب- درصد جذب آب ج- ضریب مویینگی بلوک پلیمری



(الف)



(ج)



(ب)

شکل ۸ الف- نمودار تأثیر پلیمر خالص بر افت وزنی بلوک پلیمری در اثر چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ، نمودار تأثیر هم‌زمان مقدار پلیمر امولسیون و غلظت بر افت وزنی بلوک پلیمری در اثر ب- چرخه تر و خشک ج- چرخه ذوب و یخ

جدول ۵. روابط متغیرهای مستقل و وابسته

متغیر وابسته	رابطه	R-Squared
مقاومت فشاری پس از چرخه تر و خشک	$Compressive\ strength = -10.35674 + 0.20896x + 0.37589y$	۰/۹۳۶
مقاومت فشاری پس از چرخه ذوب و یخ	$Compressive\ strength = -10.07444 + 0.19212x + 0.34936y$	۰/۹۴۷
درصد جذب آب	$Water\ absorption = +40.16090 - 0.28373x - 0.57291y$	۰/۹۱۲۴
ضریب موینگی	$Capillary\ coefficient = +16.06208 - 0.017525x - 0.47425y$	۰/۹۹
افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک	$Wet\ and\ dry\ cycle\ weight\ loss = +2.05471 - 0.018950x - 0.020719y$	۰/۹۹۹۲
افت وزنی در اثر چرخه ذوب و یخ	$freeze-thaw\ cycle\ weight\ loss = +4.33965 - 0.017872x - 0.094606y$	۰/۹۹۴۱

قابل‌اعتماد بین متغیرهای مستقل (غلظت و درصد پلیمر) و متغیرهای وابسته (مقاومت فشاری پس از سیکل‌های تر و خشک و ذوب و یخ، درصد جذب آب، ضریب موینگی، و افت وزنی در اثر سیکل‌های تر و خشک و ذوب و یخ) وجود دارد. مقدار بالای ضریب تعیین (R-Squared) برای تمامی روابط، که در

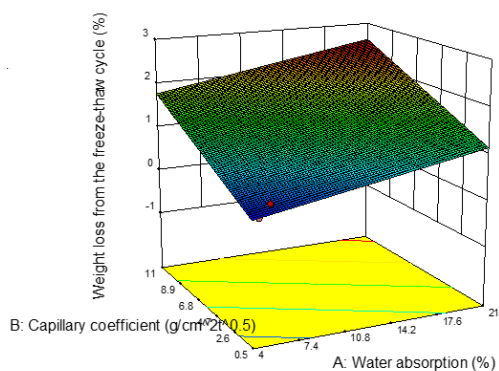
با استناد به نتایج مندرج در جدول ۵، می‌توان به یک تحلیل جامع و دقیقی از تأثیر پارامترهای غلظت و درصد پلیمر امولسیون بر ویژگی‌های مکانیکی و دوام بلوک‌های خاک ماسه‌ای پرداخت. روابط ارائه‌شده در این جدول، که حاصل تحلیل‌های نرم‌افزاری Design-Expert است، نشان می‌دهد که ارتباطی قوی و

بازه ۰۰۹۱۲۴ تا ۰۰۹۹۹۲ قرار دارد، گویای این است که مدل‌های رگرسیونی به‌خوبی قادر به تبیین و پیش‌بینی تغییرات متغیرهای وابسته بر اساس تغییرات غلظت و درصد پلیمر امولسیونی هستند. به‌طور خاص، روابط ارائه‌شده نشان می‌دهند که افزایش غلظت و درصد پلیمر امولسیونی، منجر به افزایش مقاومت فشاری بلوک‌ها پس از قرارگیری در معرض سیکل‌های تر و خشک و ذوب و یخ می‌شود. از دیدگاه مکانیکی، این پدیده را می‌توان به اثر چسبندگی و یکپارچه‌کنندگی پلیمر نسبت داد. پلیمر با نفوذ در فضای بین ذرات خاک و ماسه، یک شبکه پیوسته ایجاد می‌کند که مقاومت کششی و برشی بلوک را افزایش داده و از ایجاد ترک و گسیختگی در اثر تنش‌های ناشی از تغییر حجم ناشی از رطوبت و دما جلوگیری می‌کند. به‌عبارت‌دیگر، پلیمر به‌عنوان یک عامل تثبیت‌کننده عمل کرده و از جدا شدن ذرات خاک و ماسه در اثر تنش‌های خارجی جلوگیری می‌کند. در مقابل، افزایش غلظت و درصد پلیمر امولسیونی منجر به کاهش درصد جذب آب و ضریب مویینگی بلوک‌ها می‌شود که این امر را می‌توان به خاصیت آب‌گریزی پلیمر نسبت داد. پلیمر با پوشاندن سطح ذرات خاک و ماسه، از نفوذ آب به داخل بلوک جلوگیری کرده و در نتیجه، میزان جذب آب و سرعت حرکت آب در داخل بلوک را کاهش می‌دهد. کاهش جذب آب و ضریب مویینگی، به‌نوبه خود، منجر به افزایش دوام بلوک در برابر سیکل‌های تر و خشک و ذوب و یخ می‌شود؛ چراکه کاهش میزان آب جذب‌شده، از انبساط و انقباض ناشی از یخ‌زدگی آب داخل بلوک جلوگیری کرده و در نتیجه، از ایجاد ترک و خردشدگی بلوک جلوگیری می‌کند. همچنین، روابط ارائه‌شده نشان می‌دهند که افزایش غلظت و درصد پلیمر امولسیونی منجر به کاهش افت وزنی بلوک‌ها در اثر سیکل‌های تر و خشک و ذوب و یخ می‌شود. این پدیده نیز ناشی از اثر تثبیت‌کنندگی پلیمر و کاهش میزان آسیب ناشی از تغییر حجم ناشی از رطوبت و دما است. پلیمر با ایجاد یک شبکه پیوسته و چسبنده در داخل بلوک، از جدا شدن ذرات خاک و ماسه در اثر تنش‌های خارجی جلوگیری کرده و در نتیجه، از کاهش وزن بلوک جلوگیری می‌کند.

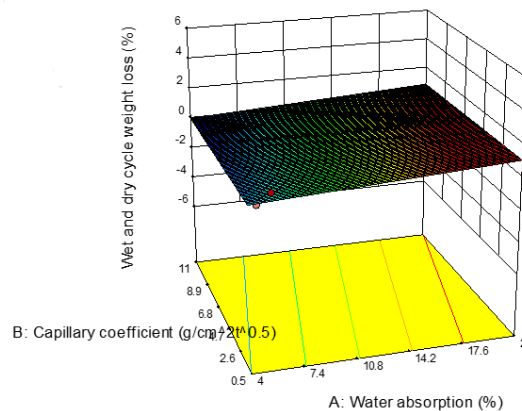
از دیدگاه آماری، اعتبار بالای مدل‌های رگرسیونی ( $R$ -Squared نزدیک به یک) نشان می‌دهد که این روابط می‌توانند به‌عنوان ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی رفتار بلوک‌های خاک ماسه‌ای تقویت‌شده با پلیمر در شرایط مختلف محیطی مورد استفاده قرار گیرند. این امر به مهندسان و طراحان این امکان را می‌دهد که با انتخاب مناسب غلظت و درصد پلیمر امولسیونی، بلوک‌هایی بادوام و مقاومت بالا تولید کنند که بتوانند در برابر شرایط سخت محیطی مقاومت کنند. علاوه بر این‌ها برای بررسی هرچه دقیق‌تر رابطه درصد جذب آب و ضریب مویینگی بادوام بلوک‌های پلیمری از نرم‌افزار Design-Expert استفاده شد؛ بدین ترتیب که پارامترهای جذب آب و مویینگی به‌عنوان متغیر مستقل و افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک و ذوب و یخ به‌عنوان متغیر وابسته در نظر گرفته شد که این روابط در جدول ۶ ارائه شده است. معادلات رگرسیونی ارائه‌شده در جدول ۶، نشان‌دهنده ماهیت کمی این روابط هستند و می‌توانند برای پیش‌بینی افت وزنی بلوک‌ها بر اساس مقادیر جذب آب و مویینگی مورد استفاده قرار گیرند. به‌طور مشخص، معادله مربوط به افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک نشان می‌دهد که تقریباً ۸۳/۸۳ درصد از تغییرات در افت وزنی ناشی از چرخه تر و خشک توسط مدل ارائه‌شده قابل توضیح است. این امر حاکی از قدرت بالای مدل در پیش‌بینی افت وزنی بر اساس مقادیر جذب آب و مویینگی است، اما با توجه به اینکه مقدار  $R$ -Squared کمتر از ۱ است، وجود سایر عوامل مؤثر بر دوام بلوک در چرخه‌های تر و خشک نیز قابل‌تصور است. ضریب مثبت  $(0/051167)$  مربوط به درصد جذب آب نشان می‌دهد که با افزایش جذب آب، افت وزنی نیز افزایش می‌یابد. در مقابل، ضریب منفی  $(0/016771)$  مربوط به ضریب مویینگی نشان می‌دهد که با افزایش مویینگی، افت وزنی کاهش می‌یابد. این تناقض ظاهری احتمالاً به دلیل پیچیدگی مکانیزم‌های تخریب در بلوک‌های خاک ماسه‌ای تقویت‌شده با پلیمر و تأثیر متقابل پارامترهای مختلف بر این مکانیزم‌ها است. به‌عنوان مثال، افزایش مویینگی می‌تواند در برخی شرایط باعث افزایش سرعت خروج آب از بلوک شده و در نتیجه، کاهش تنش‌های ناشی از انبساط و انقباض ناشی از رطوبت شود.

جدول ۶. روابط درصد جذب آب و ضریب مویینگی و دوام بلوک

متغیر وابسته	رابطه	R-Squared
افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک	Wet and dry cycle weight loss=+0.045346+0.051167x-0.016771y	۰/۸۳۸۳
افت وزنی در اثر چرخه ذوب و یخ	freeze-thaw cycle weight loss=+0.035479+0.049672x+0.13986y	۰/۹۹۸۳



(ب)



(الف)

شکل ۹. تأثیر هم‌زمان درصد جذب آب و ضریب مویینگی بر افت وزنی در اثر الف-چرخه تر و خشک ب- چرخه ذوب و یخ

در نتیجه، کاهش نفوذ آب به داخل بلوک و کاهش اثرات مخرب چرخه‌های تر و خشک و ذوب و یخ می‌شود (غفوری فرد، خبیری، ۱۴۰۱)

به منظور بررسی هرچه دقیق‌تر دوام بلوک‌های پلیمری از نرم‌افزار SPSS استفاده شد؛ بدین ترتیب که نتایج آزمایش مقاومت فشاری اولیه بلوک‌ها به عنوان گروه ۱ و مقاومت فشاری بلوک‌ها پس از چرخه‌های تر و خشک و ذوب و یخ به ترتیب گروه ۲ و گروه ۳ نام‌گذاری شد و از آنجا که داده‌ها مطابق جدول ۵ از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند؛ معناداری اختلاف مقاومت فشاری گروه‌های ۱ تا ۳ به کمک آزمون t مستقل مورد بررسی قرار گرفت که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. مطابق نتایج ارائه شده در جدول ۵، مقدار (Sig. (2-tailed) در هر دو مورد بیشتر از ۰.۰۰۵ است و بدین معناست که تفاوت قابل ملاحظه‌ای میان داده‌های گروه ۱ با گروه ۲ و همچنین گروه ۱ با گروه ۳ وجود ندارد؛ در واقع می‌توان گفت چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری بلوک نگذاشته و این بیانگر دوام مناسب این بلوک‌ها است. لازم به ذکر است که برای بررسی نرمال بودن توزیع داده‌ها از آزمون آماری کولموگورف-اسمیرنوف استفاده شد و چون مقدار sig برابر با ۰/۲ و بزرگ‌تر از ۰.۰۰۵ بود؛ بدین معناست که داده‌ها به‌طور نرمال توزیع شده‌اند.

معادله مربوط به افت وزنی در اثر چرخه ذوب و یخ که نشان‌دهنده برازش بسیار بالای مدل و توانایی آن در توضیح تقریباً تمامی تغییرات در افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ است. هر دو ضریب مربوط به درصد جذب آب (۰/۰۴۹۶۷۲) و ضریب مویینگی (۰/۱۳۹۸۶) مثبت هستند، که نشان می‌دهد با افزایش هر دو پارامتر، افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ افزایش می‌یابد. ضریب بزرگ‌تر مربوط به ضریب مویینگی (۰/۱۳۹۸۶) در مقایسه با درصد جذب آب (۰/۰۴۹۶۷۲) نشان می‌دهد که ضریب مویینگی تأثیر بیشتری بر افت وزنی ناشی از چرخه ذوب و یخ دارد. این امر منطقی به نظر می‌رسد، زیرا مویینگی بالا باعث نفوذ بیشتر آب به درون بلوک و در نتیجه، افزایش حجم یخ در داخل بلوک و اعمال فشار بیشتر به ساختار بلوک در هنگام یخ زدن می‌شود، که منجر به تخریب سریع‌تر بلوک می‌شود. شکل ۹ که نمودار دوبعدی تأثیر هم‌زمان درصد جذب آب و ضریب مویینگی بر افت وزنی را نمایش می‌دهد، این نتایج را به صورت تصویری تأیید می‌کند. مطابق این نمودار، کاهش درصد جذب آب و ضریب مویینگی منجر به افزایش دوام بلوک‌ها می‌شود. این پدیده به این دلیل است که درصد جذب آب و ضریب مویینگی به شدت تحت تأثیر درصد فضای خالی بلوک قرار دارند. کاهش این دو پارامتر به معنای کاهش درصد فضای خالی بلوک پلیمری در اثر افزایش مقدار پلیمر است. افزایش مقدار پلیمر باعث پر شدن فضاهای خالی بلوک و

جدول ۷. نتایج آزمون t

گروه‌های مورد بررسی	Sig. (2-tailed)
۱	۰/۵۸
۲	
۱	۰/۳۶
۳	

#### ۴-۲- پردازش تصویر میکروسکوپی

در ادامه برای بررسی شکل و شرایط سطح و پخش شدن پلیمر داخل خاک ماسه تصاویری در شرایط یکسان از نمونه AS-1 و AS-4 از سطح گسیخته شده توسط دوربین تلفن همراه در شرایط یکسان تهیه شد و تحت پردازش تصویر با استفاده از نرم‌افزار متلب قرار گرفت (شکل ۱۰).

ابتدا با مقایسه شکل ۱۰-الف و ۱۰-ب می‌توان این‌گونه گفت که در شکل ۱۰-الف ذرات خاک ماسه‌بادی به‌اندازه کافی دارای انسجام نیستند و این در حالی است که شکل ۱۰-ب نشان‌دهنده یکپارچگی و ایجاد پیوندی قوی میان ذرات خاک ماسه است. از طرفی با پردازش تصاویر پارامتری به‌عنوان میزان تخلخل سطحی برای بررسی میزان انسجام سطح گسیختگی نمونه‌ها با نرم‌افزار متلب حاصل شد که در شکل ۱۱ ارائه شده است. مطابق

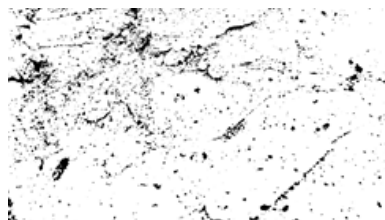
شکل ۱۱ می‌توان گفت که تخلخل سطحی نمونه AS-1 که کمترین مقدار پلیمر را دارد به نسبت نمونه AS-4 که بیشترین مقدار پلیمر را دارد، بیشتر است؛ به عبارتی دیگر انسجام و یکپارچگی نمونه AS-1 نسبت به AS-4 کمتر است. از این رو است که نمونه AS-4 از نظر دوام عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که این احتمال وجود دارد کیفیت عکس برای دیدن موارد خیلی ریز همانند تخلخل یا زبری کافی نباشد؛ از این رو پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات بعدی از روش‌های عکس‌برداری بهتری (مثل میکروسکوپ الکترونی یا میکروسکوپ نیروی اتمی (SEM) استفاده شود تا شکل سطح و پخش شدن پلیمر دقیق‌تر بررسی شود.



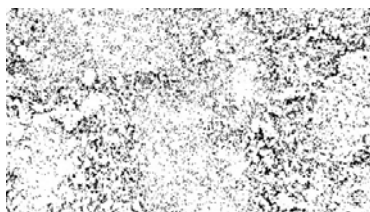
(ب)



(الف)

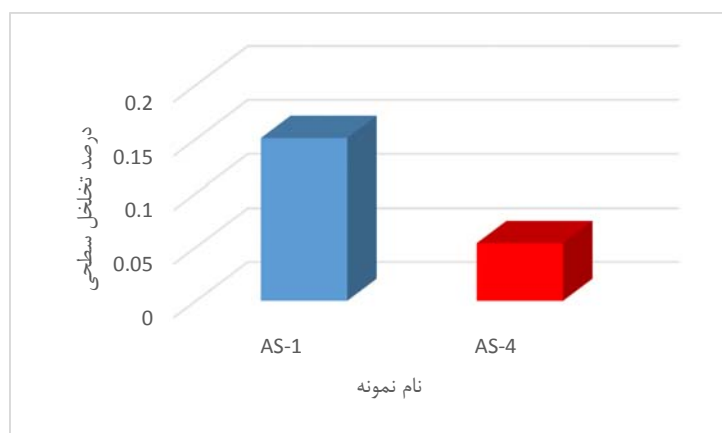


(د)



(ج)

شکل ۱۰. تصاویری از سطح گسیختگی الف-نمونه AS-1 ب-AS-4 پردازش تصاویر سطح گسیختگی ج- نمونه AS-1 د-AS-4



شکل ۱۱. نتایج پردازش تصویر با نرم‌افزار متلب

#### ۴-۳- بررسی تأثیر دانه‌بندی بر مقاومت فشاری بلوک خاکی

است که با ریزتر شدن دانه‌بندی به علت پیوستگی دانه‌بندی و کاهش خلل و فرج، مقاومت فشاری بلوک‌های خاکی تثبیت شده افزایش می‌یابد که با نتایج مطالعات گذشته نیز مطابقت دارد (مختاری و همکاران، ۱۴۰۳؛ فارسی و چوگونوی، ۱۴۰۰). در جدول ۸ رابطه‌ی بین پارامترهای مستقل و وابسته به صورت مجزا همراه بت ضریب تشخیص ( $R^2$ ) آن ارائه شده است. ضریب تشخیص ارائه شده در جدول ۸، قدرت توضیح دهندگی مدل را نشان می‌دهد؛ در واقع ضریب تعیین نشان می‌دهد که چند درصد از تغییرات متغیر وابسته توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود. این شاخص یکی از شاخص‌های برازش مدل است که قدرت پیش‌بینی متغیر وابسته بر اساس متغیرهای مستقل را نشان می‌دهد. مقدار این شاخص بین صفر تا یک است و اگر از ۰/۶ بیشتر باشد نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل تا حد زیادی توانسته‌اند تغییرات متغیر وابسته را تبیین کنند. تحلیل آماری و ANOVA مربوط به روابط ارائه شده در جدول ۹ ارائه شده است.

در ابتدا تأثیر تک‌تک پارامترهای مستقل به صورت مجزا بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفت و سپس تأثیر هم‌زمان این پارامترها بر متغیر وابسته ارزیابی شد. شکل ۱۲، رابطه‌ی بین پارامترهای دانه‌بندی بر مقاومت فشاری بلوک خاکی تثبیت شده را به صورت مجزا نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۲-الف با افزایش مقدار اندازه مؤثر دانه‌بندی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد؛ چراکه افزایش اندازه مؤثر به معنای درشت‌تر شدن دانه‌بندی است و به عبارتی درشت‌تر شدن دانه‌بندی باعث افزایش خلل فرج بلوک خاکی شده و کاهش مقاومت فشاری بلوک را در پی دارد. شکل ۱۲-ب بیانگر آن است که با افزایش ضریب یکنواختی، مقاومت فشاری کاهش یافته و به عبارتی بین مقاومت فشاری و ضریب یکنواختی رابطه عکس برقرار است. مطابق شکل ۱۲-ج با افزایش ضریب انحنای ابتدا مقاومت فشاری کاهش و سپس افزایش می‌یابد. شکل ۱۲-د نیز بیانگر آن است که با افزایش اندازه اسمی ذرات خاک و به عبارتی درشت‌دانه‌تر شدن خاک مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. به‌طور کلی نتایج بیانگر آن

جدول ۸. رابطه‌ی بین پارامترهای مستقل و وابسته به صورت مجزا

شماره رابطه	متغیر مستقل	$R^2$	رابطه
۱	اندازه مؤثر ( $d_{10}$ )	0.9992	$\text{Resistance} = +43.80870 - 399.96992 * d_{10} + 1.077, 16293 * d_{10}^2$
۲	ضریب یکنواختی ( $C_u$ )	0.8161	$\text{Resistance} = +21.10754 - 0.84658 * C_u$
۳	ضریب انحنای ( $C_c$ )	۰,۹۵۰۳	$\text{Resistance} = -3974.89692 + 14380.59309 * C_c - 17203.46134 * C_c^2 + 6816.59480 * C_c^3$
۴	حداکثر اندازه اسمی	۰,۹۹۹۲	$\text{Resistance} = +35.24237 - 7.70166 * n + 0.50336 * n^2$

رابطه خطی (رابطه ۵) تشخیص داد که در شکل ۱۳ نیز، تصاویر سه‌بعدی آن ارائه شده است.

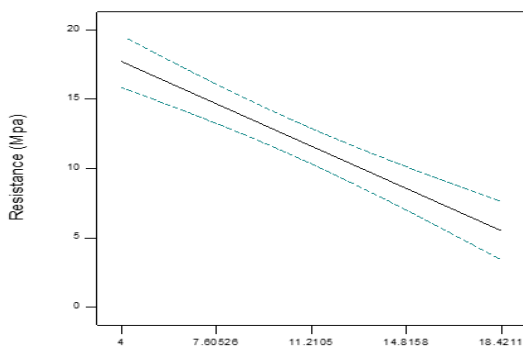
$$\text{Resistance} = +54.77521016285527 - 561.18896231216115 * d_{10} - 1.20878079886698 * C_{II} \quad (5)$$

$$- 12.24486830415315 * C_c + 10.28911898840430 * \text{nominal maximum size of aggregate}$$

پارامتر برای ارزیابی کیفیت بلوک به‌عنوان کف‌پوش است؛ به‌طوری‌که حداقل مقاومت فشاری بلوک‌هایی که به‌عنوان کف‌پوش در معیار مورد استفاده قرار می‌گیرند برابر ۱۵ مگا پاسکال است.

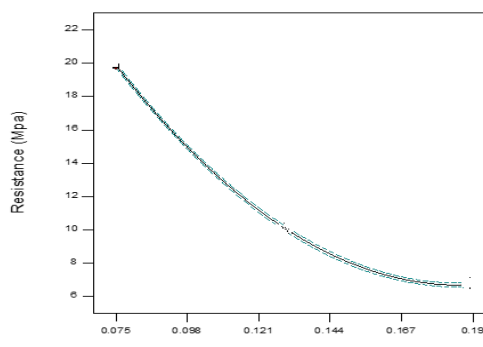
در ادامه تأثیر هم‌زمان پارامترهای مستقل بر مقاومت فشاری بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده با پلیمر مورد بررسی قرار گرفت که نرم‌افزار بهترین رابطه بین پارامترهای مستقل و وابسته را یک

با داشتن روابط بین پارامترهای دانه‌بندی و مقاومت فشاری بلوک‌های تثبیت‌شده با پلیمر می‌توان به‌راحتی قبل از ساخت نمونه و انجام آزمایش مقدار مقاومت فشاری بلوک را تخمین زد؛ چراکه مقاومت فشاری بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده مهم‌ترین



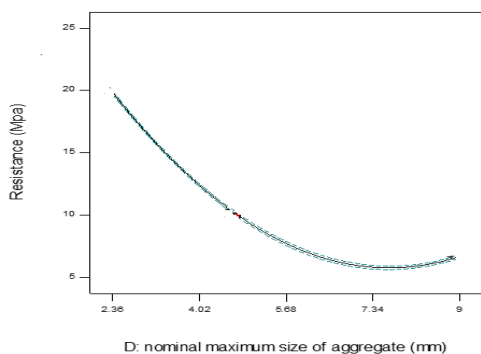
B: Cu (mm)

(ب)

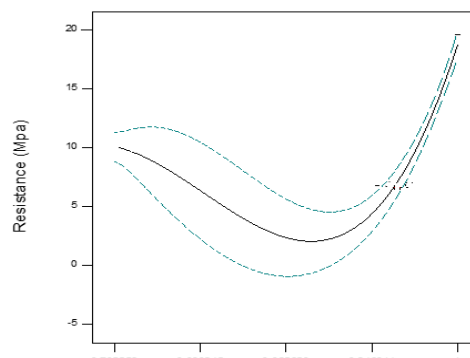


A: d10 (mm)

(الف)



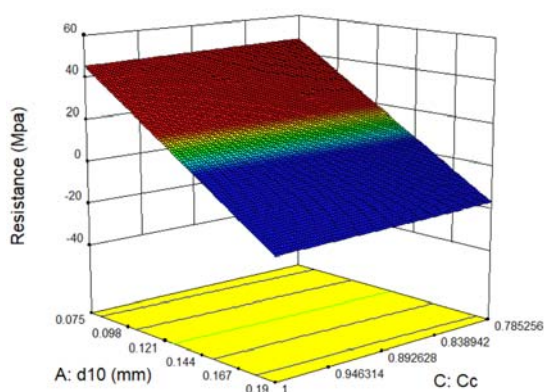
(د)



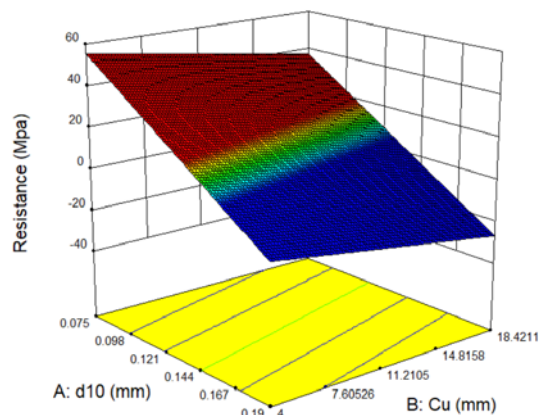
C: Cc

(ج)

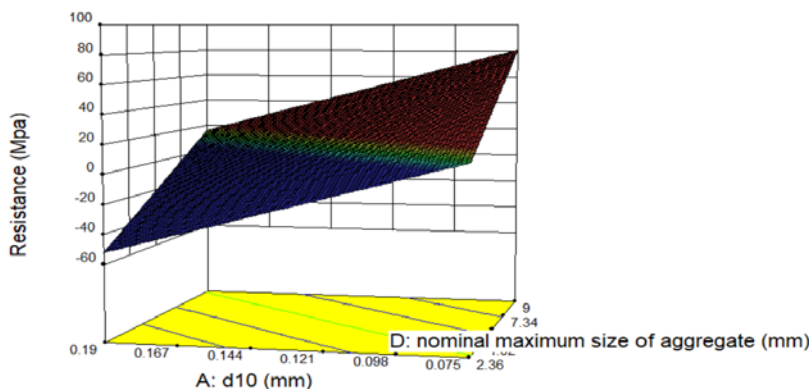
شکل ۱۲. الف- رابطه بین مقاومت فشاری بلوک خاکی تثبیت‌شده با اندازه مؤثر ب- رابطه بین مقاومت فشاری بلوک خاکی تثبیت‌شده با ضریب یکنواختی ج- رابطه بین مقاومت فشاری بلوک خاکی تثبیت‌شده ضریب انحنا د- رابطه بین مقاومت فشاری بلوک خاکی تثبیت‌شده حداکثر اندازه اسمی ذرات خاک



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۱۳. تصاویر سه‌بعدی رابطه پارامتر مستقل و وابسته به صورت هم‌زمان

## ۵- نتیجه‌گیری

افزایش مقدار پلیمر، افت وزنی در اثر چرخه‌های آزمایش دوام کاهش می‌یابد؛ به طوری که با افزایش پلیمر خالص از ۵ تا ۲۰ درصد، افت وزنی بلوک پلیمری در اثر چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ به ترتیب یک‌دهم و یک‌هشتم برابر می‌شود. با روابط ارائه شده در جدول ۳ می‌توان با داشتن مقادیر غلظت و درصد پلیمر امولسیون در محدوده مشخص شده، پارامترهای مربوط به دوام بلوک‌های پلیمری را تخمین زد. بر اساس نتایج این پژوهش رابطه مستقیمی میان پارامترهای درصد جذب آب و ضریب مویبگی با افت وزنی در اثر چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ وجود دارد. پردازش تصویر نشان می‌دهد که افزایش درصد پلیمر سبب چسبندگی بهتر ذرات ماسه به یکدیگر و در نتیجه کاهش تخلخل نمونه و همچنین افزایش انسجام نمونه می‌گردد؛ از این رو است که نمونه با بیشترین درصد پلیمر بهترین عملکرد را از نظر دوام دارد.

همان‌طور که اشاره شد هدف این پژوهش بررسی دوام بلوک‌های خاکی تثبیت شده با کوپلیمر آکریلاتی دوستاندار با محیط‌زیست است. بدین منظور نمونه‌هایی برای انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری، جذب آب، جذب آب از طریق مویبگی، چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ ساخته شد و به کمک نرم‌افزار Design-Expert و SPSS تحلیل شد. نتایج این پژوهش به شرح زیر است.

- افزایش مقدار پلیمر سبب افزایش مقاومت فشاری اولیه بلوک خاکی می‌شود.

- اگرچه چرخه تر و خشک و چرخه ذوب و یخ سبب افت مقاومت فشاری نمونه‌ها می‌شود؛ اما نتایج آزمون آماری  $t$  بیانگر آن است که این افت مقاومت قابل ملاحظه نیست.

- افزایش میزان پلیمر در بلوک تثبیت شده سبب کاهش درصد جذب آب و میزان جذب آب از طریق مویبگی می‌شود.

نمونه و انجام آزمایش مقدار مقاومت فشاری بلوک را تخمین زد؛ چراکه مقاومت فشاری بلوک‌های خاکی تثبیت‌شده مهم‌ترین پارامتر برای ارزیابی کیفیت بلوک به‌عنوان کف‌پوش است.

## ۶- سپاسگزاری

لازم به ذکر است که بخشی از مطالب این مقاله برگرفته از پروپوزال رساله دکتری تحت عنوان بررسی عملکرد بلوک خاکی تثبیت‌شده با پلیمر است. بدین‌وسیله از تمامی اساتید بزرگواری که در تکمیل این پژوهش راهنمایی کردند و همچنین شرکت پیچک تأمین بابت حمایت مالی، قدردانی می‌شود.

-مطابق نتایج آزمایش مقاومت فشاری، با ریزتر شدن دانه‌بندی مقاومت فشاری بلوک‌ها حدود ۳ برابر افزایش یافته است.

-نتایج نشان می‌دهد که مقاومت فشاری بلوک خاکی تثبیت‌شده به‌شدت تحت تأثیر دانه‌بندی خاک مورد استفاده است.

-نتایج تحلیل آماری بیانگر آن است که پارامترهای اندازه مؤثر، ضریب یکنواختی و حداکثر اندازه اسمی با مقاومت فشاری رابطه عکس دارد.

-علاوه بر این نتایج تحلیل آماری بیانگر آن است که با افزایش ضریب انحنای ابتدا مقاومت فشاری کاهش و سپس افزایش می‌یابد.

-با داشتن روابط بین پارامترهای دانه‌بندی و مقاومت فشاری بلوک‌های تثبیت‌شده با پلیمر می‌توان به‌راحتی قبل از ساخت

## ۷- مراجع

122846.

[doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2021.122846](https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2021.122846)

-Asha Sapna, A. P., & Anbalagan, C. (2023). Sustainable Eco-Friendly Building Material – A Review Towards Compressed Stabilized Earth Blocks and Fire Burnt Clay Bricks. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1210(1), 12023. [doi.org/10.1088/1755-1315/1210/1/012023](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1210/1/012023)

-Aubert, J. E., Fabbri, A., Morel, J. C., & Maillard, P. (2013). An earth block with a compressive strength higher than 45 MPa!. *Construction and Building Materials*, 47, 366-369. (n.d.).

-Dabakuyo, I., Mutuku, R. N., & Onchiri, R. O. (2022). Mechanical properties of compressed earth block stabilized with sugarcane molasses and metakaolin-based geopolymer. *Civil Engineering Journal*, 8(4), 780–795.

-Elahi, T. E., Shahriar, A. R., & Islam, M. S. (2021). Engineering characteristics of compressed earth blocks stabilized with cement and fly ash. *Construction and Building Materials*, 277, 122367. [doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2021.122367](https://doi.org/10.1016/j.conbuil-dmat.2021.122367)

-Farsi, G., and Choghuni, M. (1400). Studying the effect of material grading on the compressive strength of concrete. *In The*

-Abdullahi, M. (2005). Compressive strength of sandcrete blocks in Bosso and Shiroro areas of Minna, Nigeria. *AU JT*, 9(2), 126-131. (n.d.).

-Agyeman, S., Obeng-Ahenkora, N. K., Assiamah, S., & Twumasi, G. (2019). Exploiting recycled plastic waste as an alternative binder for paving blocks production. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00246.

[doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00246](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00246)

-Akrami G, Alipour L. (2016). The role of Vernacular Materials in Sustainable Architecture: An Environmental viewpoint. *JHRE*. 35(156), 29-48. (in Persian)

-Aninda, S. S., & Islam, M. S. (2023). Effectiveness of waste concrete powder in fabricating compressed stabilized earth blocks: Strength, durability and thermal assessment. *Journal of Building Engineering*, 80, 107989.

[doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107989](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107989)

-Arab, M. G., Omar, M., Almajed, A., Elbaz, Y., & Ahmed, A. H. (2021). Hybrid technique to produce bio-bricks using enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) and sodium alginate biopolymer. *Construction and Building Materials*, 284,

- Labiad, Y., Meddah, A., & Beddar, M. (2022). Physical and mechanical behavior of cement-stabilized compressed earth blocks reinforced by sisal fibers. *Materials Today: Proceedings*, 53, 139–143. [doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.446](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.446)
- Lambe, T. W., & Whitman, R. V. (1991). Soil mechanics. *John Wiley & Sons*.
- Latha, A. T., & Murugesan, B. (2024). Compressed stabilised earth block synergistically valorising municipal solid waste incinerator bottom ash and sisal fiber: Strength, durability and life cycle analysis. *Construction and Building Materials*, 441, 137514. (n.d.).
- Medvey, B., & Dobszay, G. (2020). Durability of Stabilized Earthen Constructions: A Review. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(3), 2403–2425. [doi.org/10.1007/s10706-020-01208-6](https://doi.org/10.1007/s10706-020-01208-6)
- Morel, J. C., Pkla, A., & Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building materials*, 21(2), 303-309.
- Mokhtari, M., Bagheri, M., and Ghafourifard, Z. (1403). Investigation of the effect of different granulations on the performance properties of porous asphalt. *14th National Congress of Civil Engineering*. (in Persian)
- Monjemzadeh, S. A., Ziari, K. A., and Majedi, H. (2018). Analysis of the level of welfare of Iranian cities with a population of over one million based on sustainable development with emphasis on economic and social indicators. *Quarterly Journal of Geography (Regional Planning)*, 8(31), 277–301.
- Muigai, A., Mwea, S., & Osano, S. (2021). Suitability of Plastic Paving Blocks for Construction of Non-Motorised Transport Facilities. *East African Journal of Engineering*, 4(1), 33–38.
- Nagapan, S., Antonyova, A., Rasiah, K., Yunus, R., & Sohu, S. (2017). Comparison of strength between laterite soil and clay compressed stabilized earth bricks (CSEBs). *MATEC Web of Conferences*, 103, 01029.
- 7th Annual International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Development*. (in Persian)
- Ghafourifard, Z., Mokhtari, M., Khobiri, M., and Jalilian, S. (1403). A study of earth blocks as materials for sustainable development. *The fourth National Conference on Civil Engineering, Smart Development and Sustainable Systems*. (in Persian)
- Ghafourifard, Z., Khobiri, M. (2014). Improving the performance of clay block pavements for rural sidewalks and roads using additives. *Quarterly Journal of Housing and Rural Environment*, 41(179), 91–105. (in Persian)
- Hany, E., Fouad, N., Abdel-Wahab, M., & Sadek, E. (2021). Investigating the mechanical and thermal properties of compressed earth bricks made by eco-friendly stabilization materials as partial or full replacement of cement. *Construction and Building Materials*, 281, 122535. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122535](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122535)
- Kargar N, Shafaat A, Veisheh S. (2023). Construction of compressed bricks using carpet waste residues and their reinforcement with stabilizer. *JHRE*. 42(182), 111-124. [doi: 10.22034/42.182.111](https://doi.org/10.22034/42.182.111) (in Persian)
- Kalhori, H., & Bagherpour, R. (2017). Application of carbonate precipitating bacteria for improving properties and repairing cracks of shotcrete. *Construction and Building Materials*, 148, 249–260.
- Karisma, D. A., Nursandah, F., & Rahmawaty, F. (2023). Utilization of Plastic Bottle Waste as Material for Making Sustainable Cement-Less Aesthetic Paving Blocks. *INERSIA Lnformasi Dan Ekspose Hasil Riset Teknik Sipil Dan Arsitektur*, 19(2).
- Kumar, N., & Barbato, M. (2022). Effects of sugarcane bagasse fibers on the properties of compressed and stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 315, 125552. [doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125552](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125552)

- <http://hdl.handle.net/10204/12110>  
Standard 20185. (2015). Concrete floor blocks - Requirements and test methods. (In Persian)
- Teixeira, E. R., Machado, G., P. Junior, A. D., Guarnier, C., Fernandes, J., Silva, S. M., & Mateus, R. (2020). Mechanical and Thermal Performance Characterisation of Compressed Earth Blocks. In *Energies* Vol. 13, Issue 11. [doi.org/10.3390/en13112978](https://doi.org/10.3390/en13112978)
- Tempa, K., Chettri, N., Thapa, G., Phurba, Gyeltshen, C., Norbu, D., Gurung, D., & Wangchuk, U. (2022). An experimental study and sustainability assessment of plastic waste as a binding material for producing economical cement-less paver blocks. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 26, 101008.  
[doi.org/10.1016/j.jestch.2021.05.012](https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.05.012)
- Thanushan, K., Youganathan, Y., Pooraneswaran, S., Juthathatheu Gracian, C., & Sathiparan, N. (2021). Strength and Durability Characteristics of Coconut Fibre Reinforced Earth Cement Blocks. *Journal of Natural Fibers*, 18(6), 773–788.  
[doi.org/10.1080/15440478.2019.1652220](https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1652220)
- Touré, P. M., Sambou, V., Faye, M., Thiam, A., Adj, M., & Azilinson, D. (2017). Mechanical and hygrothermal properties of compressed stabilized earth bricks (CSEB). *Journal of Building Engineering*, 13, 266–271.  
[doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.08.012](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.08.012)
- Sharma, P., & Sharma, M. (2017). Utilization of Quarry dust in cement concrete paver blocks for rural Roads. *International Research Journal of Advanced Engineering and Science*, 2(1), 118-124.
- Valenzuela, M., Ciudad, G., Cárdenas, J. P., Medina, C., Salas, A., Oñate, A., Pincheira, G., Attia, S., & Tuninetti, V. (2024). Towards the development of performance-efficient compressed earth blocks from industrial and agro-industrial by-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 194, 114323.  
[doi.org/10.1016/j.rser.2024.114323](https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114323)
- Nshimiyimana, P. H. I. L. B. E. R. T., Hema, C., Sore, S. O., Zoungrana, O. U. S. M. A. N. E., Messan, A. D. A. M. A. H., & Courard, L. (2022). Durability performances of compressed earth blocks exposed to wetting–drying cycles and high temperature. *WIT T. (n.d.)*
- Paul, S., Islam, M. S., & Elahi, T. E. (2023). Potential of waste rice husk ash and cement in making compressed stabilized earth blocks: Strength, durability and life cycle assessment. *Journal of Building Engineering*, 73, 106727.  
[doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106727](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106727)
- Paul, S., Islam, M. S., & Hossain, M. I. (2023). Suitability of Vetiver straw fibers in improving the engineering characteristics of compressed earth blocks. *Construction and Building Materials*, 409, 134224.  
[doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134224](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134224)
- Petkar, S. (2014). Environmental impact of construction materials and practices. - Rigassi, V. (1985). Compressed earth blocks: Manual of production. Network. *GATE/BASIN*.
- Sadeghian, A., Abdollahi, R., Akbari, A., and Javidinejad, M. (2013). Stabilized earth blocks, an innovative material in modern earth architecture. *Design and Planning in Architecture and Urbanism*, 2(1), 66-82. (in Persian)
- Sarhat, S. R., & Sherwood, E. G. (2014). The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry. *Construction and Building Materials*, 58, 111-121.
- Sathiparan, N., Anburavel, A., Selvam, V. V., & Vithurshan, P. A. (2023). Potential use of groundnut shell ash in sustainable stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, 393, 132058.  
[doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132058](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132058)
- Seifan, M., & Berenjian, A. (2019). Microbially induced calcium carbonate precipitation: a widespread phenomenon in the biological world. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 103, 4693–4708.
- Smit, M. A., Akhalwaya, I., & Rust, F. C. (2021). Laboratory evaluation of alternative cost effective pavement materials.

- Yathrabi, H., & Azami, A. (2005). Utilization of “Compressed Earth Blocks (CEB)” Technology in Architecture. *Kerman Civil Architecture and Urban Planning Conference*. (In Persian)
- Zahra, T., Thamboo, J., & Asad, M. (2021). Compressive strength and deformation characteristics of concrete block masonry made with different mortars, blocks and mortar beddings types. *Journal of Building Engineering*, 38, 102213.
- Zahri, A. M., & Zainorabidin, A. (2019). An overview of traditional and non traditional stabilizer for soft soil. In IOP Conference Series. *Materials Science and Engineering*, 527.
- Wieser, A. A., Scherz, M., Passer, A., & Kreiner, H. (2021). Challenges of a Healthy Built Environment: Air Pollution in Construction Industry. *Sustainability*, Vol. 13, Issue 18.  
**doi.org/10.3390/su131810469**
- Xu, J., Xiong, W., Guo, X., Lai, T., Liu, Y., & Ying, W. (2022). Properties of using excavated soil waste as fine and coarse aggregates in unfired clay bricks after dry-wet cycles. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01471.

# Investigation of the Effect of Bio-Based Acrylate Copolymer on the Durability and Compressive Strength of Sand-Based Pavement under Environmental Cycles

*Zohre Ghafourifard, Ph.D., Student, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.*

*Maryam Mokhtari, Associate Professor, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.*

*Mohammad Mehdi Khabiri, Associate Professor, Engineering Faculty,  
Yazd University, Yazd, Iran.*

*Seyed Mehrdad Jalilian, Associate Professor, Engineering Faculty, Yazd University, Yazd, Iran.*

*E-mail: mokhtari@yazd.ac.ir*

Received: May 2025- Accepted: August 2025

## **ABSTRACT**

Today, environmental problems have become a global concern; thus, the use of eco-friendly materials such as soil blocks and pavements has gained special importance in the construction industry. Accordingly, this study investigates the effects of stabilizing sandy soil blocks using AS emulsion acrylate copolymer, an environmentally friendly polymer, on their durability. For this purpose, soil block samples with different polymer percentages (5% to 20%) were prepared and subjected to compressive strength, water absorption, capillary absorption, wet-dry cycle, and freeze-thaw cycle tests. Additionally, the impact of different grain size distributions on the compressive strength of these blocks was examined. The results showed that increasing the polymer content led to an increase in initial compressive strength and a reduction in strength loss during durability tests. Specifically, increasing the polymer content from 5% to 20% reduced the weight loss of the blocks due to wet-dry and freeze-thaw cycles by one-tenth and one-eighth, respectively. Statistical t-test analyses indicated that although there is strength loss due to durability cycles, it is not statistically significant. Moreover, increasing the polymer content significantly reduced water absorption and capillary action. The provided regression equations enable the prediction of the durability parameters of polymer-stabilized blocks based on polymer concentration and percentage. This study identified a direct relationship between water absorption rate, capillary coefficient, and weight loss due to durability cycles. These findings demonstrate that using the AS copolymer can effectively enhance the durability of soil blocks against environmental factors. The results also indicate that the grain size distribution has a significant effect on compressive strength: finer grain sizes increased the compressive strength of the blocks by approximately three times.

**Keywords:** Bio-Based Acrylate Copolymer, Durability of Polymer Blocks, Eco-Friendly Pavement, Wet-Dry Cycles, Compressive Strength