



توسعه و بهینه‌سازی مالچ زیست‌سازگار بر پایه مواد معدنی و ملاس برای تثبیت ماسه‌های روان، مطالعه موردی ماسه‌زارهای آران و بیدگل

جلال محمدی^۱، یوسف عظیمی^{۲*}، سلمان زارع^۳، مجید بصیرت^۴

۱- گروه محیط زیست انسانی، دانشکده محیط زیست کرج، کرج، ایران

۲- گروه پژوهشی مهندسی محیط زیست و پایش آلاینده‌ها، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

۳- گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی دانشگاه تهران، تهران، ایران

۴- مؤسسه تحقیقات خاک و آب کشور، سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، کرج، ایران

نوع مقاله:	چکیده
پژوهشی	مقدمه: فرسایش بادی یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط زیستی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. ایران به‌ویژه در نواحی بیابانی مانند آران و بیدگل و کاشان، به دلیل بارندگی اندک، فقر پوشش گیاهی و خاک‌های حساس، به شدت در معرض این پدیده قرار دارد. مالچ‌پاشی طی دهه‌های اخیر به‌عنوان روشی مؤثر در تثبیت ماسه‌های روان مطرح بوده است. در حالی که مالچ‌های نفتی به دلیل هزینه بالا و پیامدهای محیط زیستی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند، مالچ‌های زیستی حاصل از پسماندهای کشاورزی و صنعتی گزینه‌ای ایمن، تجزیه‌پذیر و مقرون‌به‌صرفه محسوب می‌شوند. هدف این پژوهش توسعه مالچی سازگار با محیط زیست بر پایه زئولیت، بنتونیت و ملاس (پسماند صنایع قند) است.
تاریخچه مقاله:	مواد و روش‌ها: این پژوهش در مقیاس آزمایشگاهی و با بهره‌گیری از روش طراحی آزمایش مخلوط D-Optimal انجام شد. ماسه‌های مورد استفاده از بیابان‌های کاشان برداشت و بر اساس استاندارد ASTM مشخصات فیزیکی آن تعیین شد. مالچ پیشنهادی ترکیبی از بنتونیت کلسیمی (مش ۲۰۰)، زئولیت آنزیمیت میکرونیزه و ملاس غلیظ صنعتی بود. نسبت اختلاط مواد با استفاده از نرم‌افزار DX11 طراحی و آزمون شد. پنج شاخص عملکردی برای ارزیابی کیفیت مالچ در نظر گرفته شد: مقاومت برشی (SS)، مقاومت فشاری (CS)، مقاومت ضربه‌ای (IR)، مقاومت سایشی (AR) و ضخامت سله (CT). با انجام آزمایش‌ها، نتایج بدست آمده با روش‌های آماری ANOVA، آزمون دانکن و تحلیل همبستگی پیرسون و اسپیرمن تحلیل شد. مدل‌های چندجمله‌ای نیز برای برازش پاسخ‌ها و تعیین ترکیب بهینه بر اساس بهینه‌سازی ریاضی تدوین گردید.
دریافت:	نتایج: نتایج تحلیل واریانس نشان داد که تیمارهای مختلف مالچ تأثیر معناداری ($p < 0.05$) بر همه شاخص‌های عملکردی داشتند. حداکثر مقاومت برشی در تیمارهای ۲۸، ۱۴ و ۱۵، به ترتیب ۸/۲۷، ۸/۲۰ و ۸/۱۷ N/cm^2 و بیشترین مقاومت فشاری در تیمارهای ۱ و ۱۵، به ترتیب ۳/۱۷ و ۳/۱۵ kg/cm^2 بود. بیشترین مقاومت ضربه‌ای در تیمارهای ۱۵، ۲۸، ۳۳ و ۱۸ به ترتیب به میزان ۰/۷۵، ۰/۷۱، ۰/۷۱ و ۰/۷۱ و بیشترین مقاومت سایشی در تیمارهای ۴، ۲، ۹، ۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۴، ۲۹، ۳۰ و ۳۰ همگی به مقدار یک ثبت شد. حداکثر ضخامت سله نیز در تیمارهای ۲۱، ۱۶ و ۳۰ به ترتیب به میزان ۱/۹۲، ۱/۹۱ و ۱/۸۹ سانتی‌متر به‌دست آمد. ضریب همبستگی بین مقاومت برشی، فشاری و ضربه‌ای بسیار بالا و معنادار بود، در حالی که مقاومت سایشی ارتباط ضعیف و
پذیرش:	
کلمات کلیدی:	مالچ‌های زیستی، تثبیت ماسه، ملاس، زئولیت، بنتونیت، طراحی مخلوط

غیرمعناداری با دیگر متغیرها نشان داد. ترکیب بهینه مالچ با هدف بیشینه‌سازی شاخص‌های SS، CS، IR و CT شامل ۵۰٪ ملاس، ۲۳٪ بنتونیت و ۲۷٪ زئولیت بود. نتایج اعتبارسنجی نشان داد انحراف نسبی بین داده‌های تجربی و مدل از همخوانی قابل قبولی برخوردار است.

بحث: استفاده از ملاس به دلیل خواص چسبندگی و توانایی ایجاد پیوند بین ذرات خاک، در کنار بنتونیت به‌عنوان منبع کلسیم برای بهبود نگهداشت آب و زئولیت به‌عنوان ماده‌ای با ظرفیت تبادل کاتیونی بالا، منجر به توسعه مالچی پایدار با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی مناسب گردید. افزایش سهم ملاس به طور مستقیم با افزایش مقاومت‌های مکانیکی و ضخامت سله همراه بود؛ زئولیت در تقویت مقاومت سایشی مؤثرتر عمل کرد، در حالی که بنتونیت نقش کلیدی در مقاومت ضربه‌ای و ضخامت سله داشت. یافته‌ها با مطالعات مشابه همخوانی دارد. ترکیب بهینه پیشنهادی به دلیل دسترسی آسان به مواد اولیه، سادگی آماده‌سازی، عدم سمیت و پتانسیل کاربرد میدانی، می‌تواند جایگزین مؤثری برای مالچ‌های نفتی در مناطق بیابانی ایران باشد. با این حال، تأیید نهایی عملکرد آن مستلزم اجرای آزمایش‌های میدانی در شرایط واقعی اقلیمی است. این تحقیق نمونه‌ای موفق از هم‌افزایی مواد طبیعی و ضایعات صنعتی برای توسعه فناوری‌های محیط‌زیست محور در چارچوب اقتصاد چرخشی محسوب می‌شود.

مقدمه

فرسایش بادی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل فقر پوشش گیاهی، خشکی و ریزدانه بودن خاک از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی به شمار میرود (Alipur et al., 2016; Arabi Aliabad et al., 2019). ایران نیز این پدیده تهدیدی گسترده بوده و روش‌هایی چون اقدامات مکانیکی، بیولوژیک و مالچ‌پاشی برای کنترل آن به کار گرفته می‌شود (Movahedan et al., 2012; Azimi et al., 2018). با توجه به محدودیت‌های زیست‌محیطی مالچ‌های نفتی، استفاده از مالچ‌های زیستی و پلیمری گسترش یافته است (Liang et al., 2021; Soleimani et al., 2025) که با افزایش پایداری خاک و امکان ترکیب با کاشت پوشش گیاهی، گزینه‌ای بومی و کم‌هزینه محسوب می‌شوند (Abbasi et al., 2010; Xu et al., 2025). همچنین، رویکرد اقتصاد چرخشی با بهره‌گیری از ضایعات صنعتی و کشاورزی مانند سرباره فولاد، ملاس، ویناس، فیلترکیک و لیگنین سولفونات، راهکاری پایدار برای تولید مالچ‌های سازگار با محیط زیست فراهم کرده و علاوه بر کاهش مصرف منابع و آلودگی، به کنترل ریزگردها در مناطق خشک کمک می‌کند (MacArthur, 2013).

مطالعه Javiz و همکاران در سال ۲۰۲۳ نشان داد مالچ بنتونیتی اشباع از کلسیم با دانه‌بندی ۲۰ میکرون و مصرف ۲۴۰ کیلوگرم در هکتار، موجب کاهش ۹۷ درصد فرسایش بادی و بهبود پایداری و نفوذپذیری خاک شد.

همچنین Emami و همکاران (۲۰۲۱) در ارزیابی چهار نوع مالچ (پلی‌وینیل‌استات، بنتونیت، زئولیت و سیمان) گزارش کردند که همه مالچ‌ها در کاهش فرسایش مؤثر بوده‌اند، اما پلیمر و به‌ویژه بنتونیت بالاترین کارایی را داشته و به دلیل منشأ طبیعی و هزینه پایین، گزینه‌ای مناسب برای کنترل سریع فرسایش معرفی شد. در همین راستا، Safaei و همکاران (۲۰۱۲) نشان دادند مالچ سرباره‌ای با تراکم ۷۵ درصد و دانه‌بندی ۳۰-۴۵ میلی‌متر به‌صورت یک‌لایه، بیشترین اثربخشی را در به دام انداختن ذرات فرسایش‌یافته بادی دارد. Azimi و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از طراحی آزمایش مخلوط، مالچ ترکیبی ترکیبی سیمانی سرباره فولاد را بررسی کرده و تیمار ۶۸/۷۳٪ ماسه، ۲۷٪ سیمان، ۲/۹۷٪ سرباره فولادی و ۱/۳٪ آهک را به‌عنوان بهترین تیمار معرفی کردند. همچنین Komaei و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که فعال‌سازی قلیایی سیمان با سرباره کوره بلند فولاد، کاهش بیش از ۹۹ درصد نرخ فرسایش و افزایش مقاومت سطحی را به همراه داشته و این نتایج با تحلیل‌های XRD و FE-SEM تأیید شد.

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که پسماندهای نیشکر (ویناس، فیلترکیک و تفاله) می‌توانند جایگزین‌های پایدار و زیست‌سازگار برای مالچ‌های نفتی باشند. Moghadam و همکاران در سال ۲۰۱۵ نشان دادند که مالچ‌های نیشکری مقاومت برشی و نفوذپذیری را افزایش داده و کارایی آن‌ها با ضخامت بیشتر تقویت می‌شود، در حالی که مالچ نفتی

کمترین اثر را داشت. بر اساس یافته‌های Jamshidsafa و همکاران در سال ۲۰۱۵، ترکیب بهینه ۱۵۰ گرم فیلترکیک + ۵۰ گرم خاک رس بیشترین مقاومت مکانیکی و پایداری پس از بارندگی را داشت. Jamili و همکاران در سال ۲۰۱۶ گزارش کردند که مالچ‌های نیشکری با افزایش نگه‌داشت آب و پایداری خاک مؤثر هستند، هرچند مصرف زیاد ویناس موجب آب‌گریزی خاک می‌شود. در مطالعه‌ای دیگر، James (۲۰۲۰) افزودن فیلترکیک به خاک‌های رسی آهکی را موجب افزایش مقاومت و اصلاح رفتار انبساطی دانست. در نهایت، Mombeni و همکاران در سال ۲۰۲۱ با استفاده از الیاف لیگنوسولوزی تفاله نیشکر به‌عنوان مالچ زیستی، بهبود قابل توجهی در مقاومت برشی و نفوذپذیری خاک بدون اثر منفی بر جوانه‌زنی گونه‌های گیاهی مشاهده کردند که بیانگر پتانسیل بالای این پسماندها در کنترل فرسایش بادی است.

مطالعات اخیر نشان می‌دهد که ملاس و ترکیبات زیست‌پایه مشتق از آن نقش مؤثری در کنترل گردوغبار و بهبود پایداری خاک دارند. به گزارش Mombeni و همکاران در سال ۲۰۲۰، مالچ‌های زیستی ملاس و لیکور سیاه موجب افزایش مقاومت برشی و چسبندگی خاک شده و ترکیب آن‌ها عملکرد بهتری داشت. بر اساس یافته‌های Barati و همکاران (۲۰۲۴)، ترکیب ملاس، لیگنین‌سولفونات و CaCl_2 نسبت به مالچ‌های تک‌جزئی کارایی بالاتری در کنترل گردوغبار دیپوی معدنی داشته و جایگزینی زیست‌سازگار برای مالچ نفتی معرفی شد. همچنین Wang و همکاران (۲۰۲۴) نشان دادند که افزودن یک درصد ملاس به مهارکننده‌های میکروبی باعث بهبود عملکرد گردوغبار و ساختار میکروبی خاک می‌شود، اما غلظت‌های بالاتر اثر منفی دارد. در مطالعه‌ای دیگر Zhou (۲۰۲۵) با توسعه مهارکننده کف‌زای زیستی بر پایه ملاس موفق به تثبیت بیش از ۹۸ درصد گردوغبار در سرعت باد ۲۱ m/s شدند که نسبت به نمونه‌های تجاری کارایی بیشتر و هزینه کمتری داشت. در نهایت Yan و همکاران (۲۰۲۵) ترکیبی از ملاس، CaCl_2 و ماده فعال سطحی را معرفی کردند که با افزایش رطوبت‌پذیری و چسبندگی، در آزمایش‌های میدانی کاهش قابل توجه گردوغبار جاده‌های معدنی را نشان داد.

مطالعات مختلف نشان داده‌اند که پساب صنایع کاغذسازی حاوی لیگنین قابلیت بالایی در تولید مالچ‌های زیست‌سازگار دارد. به‌طور خاص Dong و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از لیگنوسولفونات مالچی تولید کردند که موجب افزایش استحکام سطحی و کاهش فرسایش بادی شد. همچنین Hanjie و همکاران (۲۰۰۹) با تولید مالچ LSSM^۱ از لیگنین پساب سیاه، موفق به تثبیت پایدار تپه‌های شنی و ارتقای ماده آلی و نیتروژن خاک در شمال‌غرب چین شدند. در ادامه Xiao (۲۰۰۷) نشان دادند که استفاده از لیگنین^۲ بازیابی‌شده از کاه برنج باعث کاهش pH، افزایش کربن آلی و نیتروژن کل و بهبود ساختار خاکدانه‌ها می‌شود که بیانگر پتانسیل بالای استفاده مجدد از پسماندهای کاغذسازی در تولید مالچ است. Liang و همکاران (۲۰۲۱) مالچ مایع زیست‌تخریب‌پذیری بر پایه پلیمرهای زیستی تولید کردند که پس از اسپری دومرحله‌ای، پایداری مکانیکی و حرارتی مناسب داشته و طی ۹۰ روز بیش از ۷۶ درصد تخریب زیستی نشان داد. این مالچ نمونه‌ای موفق از بهره‌گیری از پلیمرهای زیستی در کنترل فرسایش و ارتقای اقتصاد چرخشی محسوب می‌شود.

مطالعات مروری نشان می‌دهد که پسماندهای کشاورزی و صنعتی قابلیت بالایی در تولید مالچ‌های زیست‌سازگار برای کنترل گردوغبار دارند و از نظر زیست‌محیطی برتری محسوسی نسبت به مهارکننده‌های شیمیایی دارند. در همین راستا، پژوهش حاضر با هدف تولید مالچی پایدار و سازگار با محیط زیست، ترکیبی از ژئولیت، بنتونیت و ملاس (محصول جانبی صنایع قند و مخمر) را برای تثبیت ماسه‌های بادی مناطق بیابانی کاشان و آران و بیدگل (استان اصفهان) در مقیاس آزمایشگاهی مورد استفاده قرار داد. طراحی آزمایش‌ها با نرم‌افزار Design Expert 11 (DX11) و بر اساس روش طراحی آزمایش مخلوط^۳ انجام شد و کارایی مالچ بر اساس پنج شاخص مکانیکی شامل مقاومت برشی، فشاری، ضربه‌ای، سایشی و ضخامت سله ارزیابی گردید.

^۱ Lignin-Based Sand Stabilizing Material

^۲ Lignin

^۳ Mixture Design

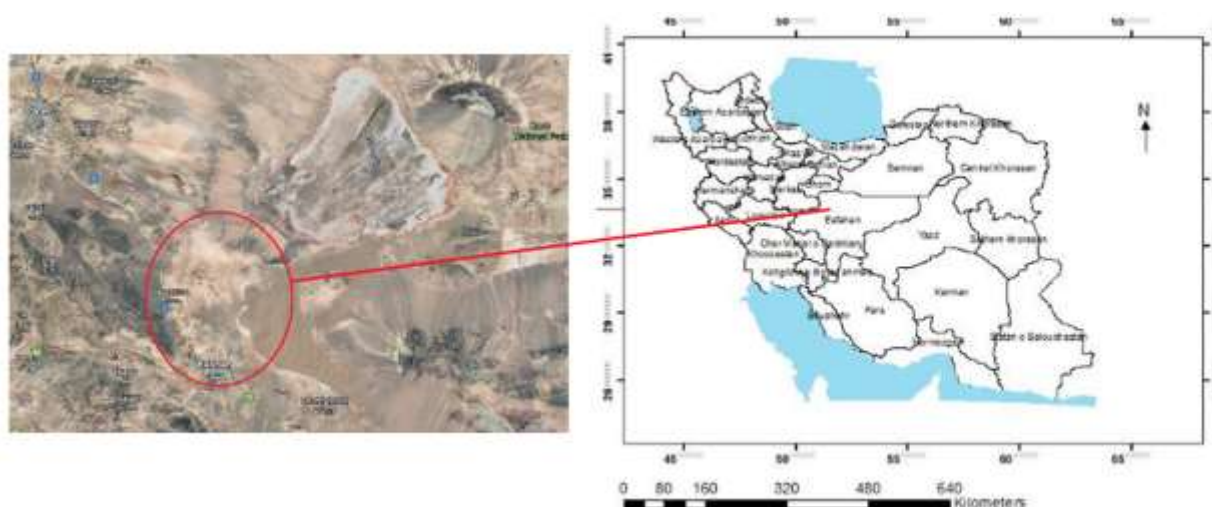
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: برای این پژوهش نمونه‌های ماسه از عمق صفر تا ده سانتی‌متری ماسه‌زارهای اطراف شهرستان‌های کاشان و آران و بیدگل، استان اصفهان برداشت شد (Error! Reference source not found.). این منطقه به دلیل اقلیم بیابانی و مجاورت با کویر مرکزی ایران، از کانون‌های اصلی فرسایش بادی و منبع ذرات گردوغبار انتقالی به مناطق مسکونی محسوب می‌شود. داده‌های ایستگاه سینوپتیک کاشان نشان داد میانگین بارندگی درازمدت ۱۳۴/۶ میلی‌متر، تبخیر و تعرق ۲۱۹۰ میلی‌متر، میانگین دمای بیشینه و کمینه به ترتیب ۳۲/۱ و

۷°C- و میانگین حداکثر و حداقل رطوبت نسبی ۵۵/۹ و ۱۷/۶ درصد است. بر اساس طبقه‌بندی کوپن، اقلیم منطقه بیابانی گرم است. ویژگی‌های ژئوتکنیکی اولیه ماسه طبق استاندارد ASTM تعیین شد. مقادیر D10 و D50 به ترتیب ۰/۰۷ و ۰/۱۴ میلی‌متر، ضریب یکنواختی (Cu) و ضریب انحناء (Cc) به ترتیب ۱/۴۲ و ۱/۳۷ به دست آمد. بر این اساس، ماسه در سیستم طبقه‌بندی متحد خاک‌ها به عنوان ماسه با دانه‌بندی ضعیف شناسایی شد. خواص شیمیایی نمونه‌ها در جدول ۱ ارائه شده است (Mombeni et al., 2020).

جدول ۱- برخی از ویژگی‌های شیمیایی ماسه مورد مطالعه (Mombeni et al., 2020).

ویژگی			
هدایت الکتریکی (dS/m)	pH	نرخ جذب سدیم	درصد مواد آلی
۲/۹۴	۷/۶	۱/۹	۰/۸



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

(Yan et al., 2025) و نقش آن در بهره‌وری منابع و اقتصاد چرخشی (Wang et al., 2024; Zhou et al., 2025) به عنوان جزء سوم ترکیب استفاده شد. این ترکیب با تکیه بر منابع داخلی، هزینه پایین و مزایای محیط‌زیستی، گزینه‌ای پایدار برای کنترل گردوغبار معرفی می‌شود.

روش انجام کار: این تحقیق در مقیاس آزمایشگاهی برای تثبیت ماسه‌های روان منطقه شهرستان کاشان و آران و بیدگل استان اصفهان بر اساس اصول طراحی آزمایش‌ها با

مواد تشکیل دهنده مالچ پیشنهادی: این تحقیق به بررسی مالچ ترکیبی جدید شامل بنتونیت، ژئولیت و ملاس برای تثبیت گردوغبار پرداخته است. ژئولیت با ظرفیت تبادل کاتیونی بالا و توانایی نگهداشت آب و عناصر غذایی (Noori et al., 2007; Ippolito et al., 2011) و بنتونیت کلسیم‌دار با خاصیت افزایش پایداری خاک و مقاومت در برابر فرسایش (Osman, 2018) انتخاب شدند. همچنین ملاس، محصول جانبی صنایع قندی، به دلیل ویژگی‌های چسبندگی و نگهداشت آب

هدف یافتن مناسبترین ترکیب و غلظت مالچ شامل زئولیت، بنتونیت و ملاس انجام شده است. طراحی آزمایش‌ها با نرم‌افزار DX11 و روش طراحی مخلوط انجام شد. برای تعیین بهترین ترکیب و غلظت، پنج شاخص عملکردی شامل مقاومت برشی، مقاومت فشاری، مقاومت ضربه‌ای، مقاومت سایشی و ضخامت سله مورد بررسی قرار گرفته است.

آماده‌سازی تیمارها: برای تهیه نمونه‌ها، ماسه‌های منطقه پس از الک کردن (نمره ۲۰۰) در سینی‌های فلزی

با ابعاد $100 \times 30 \times 2$ سانتی‌متر ریخته و تراز شدند. مالچ‌ها طبق مقادیر حاصل از طراحی مخلوط با نسبت ثابت آب مقطر (۱ لیتر به ازای ۱۲۰ گرم ترکیب) تهیه و توسط پیستول با مخزن ۲/۵ لیتری، پاشش یکنواخت اعمال گردیدند. نمونه‌ها به مدت ۵ روز در شرایط آزمایشگاهی نگهداری شدند و در تیمار شاهد تنها آب استفاده شد (شکل ۲).



شکل ۲- نمونه تیمارهای پاشیده شده بر روی سینی

طراحی آزمایش‌ها: طراحی آزمایش‌ها که توسط فیشر در سال ۱۹۲۰ معرفی شد، ابزاری کلیدی در تحقیق و توسعه برای شناسایی متغیرهای مؤثر و بررسی اثر عوامل ورودی بر ویژگی‌های خروجی است و شامل دو بخش "طراحی آزمایش" و "تحلیل آماری" می‌باشد (Montgomery, 2017). در این پژوهش، برای بهینه‌سازی مالچ سازگار با محیط‌زیست از طراحی مخلوط D-Optimum استفاده شد که با بیشینه‌سازی دترمینان ماتریس اطلاعات، واریانس ضرایب رگرسیونی را کاهش داده و امکان بررسی هم‌زمان متغیرهای مخلوط و فرایندی را فراهم می‌کند (Giugliano et al., 2006). در این روش، سهم هر عامل بین صفر تا یک (یا ۱۰۰ درصد) متغیر بوده و مجموع آن‌ها همواره برابر یک (یا ۱۰۰) است، بنابراین تغییر در یک عامل مستلزم تغییر در سایر عوامل است.

انتخاب متغیرهای مستقل و سطوح: در طراحی آزمایش، سه عامل مستقل شامل زئولیت، بنتونیت و ملاس (/) در نظر گرفته شد که مجموع آن‌ها طبق اصول

طراحی مخلوط برابر با ۱۰۰ است. به این ترتیب، تغییر هر عامل با تغییر متناسب سایر عوامل همراه خواهد بود (رابطه ۱). محدوده تغییرات عوامل (جدول ۲) بر اساس آزمایش‌های غربالگری تعیین شد (Zare et al., 2021) و برای هر ۱۲۰ گرم مواد جامد، یک لیتر آب ثابت در نظر گرفته شد. آزمایش‌ها در قالب طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار و بر اساس روش D-Optimal در نرم‌افزار DX11 طراحی گردید (جدول ۳).

$$Z+B+M=100$$

(۱)

جدول ۲- متغیرهای آزمایش و محدوده تغییرات آن‌ها (درصد وزنی)

نوع ماده	علامت اختصاری	محدوده (%)
زئولیت	Z	$50 \leq Z \leq 16$
بنتونیت	B	$16 \leq B \leq 67$
ملاس	M	$0 \leq M \leq 50$

جدول ۳- آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار DX11

شماره	بنتونیت (%)	زئولیت (%)	ملاس (%)	شماره	بنتونیت (%)	زئولیت (%)	ملاس (%)
۱	۲۴/۰۰	۲۶/۰۰	۵۰/۰۰	۱۳	۴۲/۳۳	۲۲/۳۳	۳۵/۳۳
۲	۴۰/۰۰	۳۱/۰۰	۲۹/۰۰	۱۴	۲۳/۰۰	۴۲/۶۷	۳۴/۳۳
۳	۵۰/۰۰	۱۶/۶۷	۳۳/۳۳	۱۵	۳۳/۳۳	۱۶/۶۷	۵۰/۰۰
۴	۳۱/۶۷	۵۰/۰۰	۱۸/۳۳	۱۶	۱۶/۶۷	۶۶/۶۷	۱۶/۶۷
۵	۴۰/۳۳	۱۶/۶۷	۴۳/۰۰	۱۷	۳۱/۳۳	۲۴/۶۷	۴۴/۰۰
۶	۵۰/۰۰	۱۶/۶۷	۳۳/۳۳	۱۸	۱۷/۰۰	۵۸/۶۷	۲۴/۳۳
۷	۲۳/۶۷	۶۶/۶۷	۹/۶۷	۱۹	۵۰/۰۰	۳۸/۳۳	۱۱/۶۷
۸	۱۶/۶۷	۵۰/۳۳	۳۳/۰۰	۲۰	۴۲/۳۳	۳۶/۶۷	۲۱/۰۰
۹	۵۰/۰۰	۵۰/۰۰	۰/۰۰	۲۱	۵۰/۰۰	۳۰/۶۷	۱۹/۳۳
۱۰	۴۲/۳۳	۵۷/۶۷	۰/۰۰	۲۲	۳۴/۳۳	۲۹/۳۳	۳۶/۳۳
۱۱	۱۶/۶۷	۳۳/۳۳	۵۰/۰۰	۲۳	۲۷/۳۳	۵۷/۳۳	۱۵/۳۳
۱۲	۲۴/۳۳	۵۰/۰۰	۲۵/۶۷	۲۴	۴۴/۶۷	۴۷/۰۰	۸/۳۳

انتخاب متغیر پاسخ: در این پژوهش، پنج متغیر پاسخ برای ارزیابی عملکرد مالچ ترکیبی شامل مقاومت برشی (SS^4 , N/cm²)، مقاومت فشاری (CS^5 , kg/cm²)، مقاومت ضربه‌ای (IR^6)، مقاومت سایشی (AR^7) و ضخامت سله (CT^8) در نظر گرفته شد (Moghadam et al., 2015; Azimi et al., 2018). مقاومت برشی (SS)، شاخص کلیدی چسبندگی مالچ به خاک و مقاومت در برابر فرسایش بادی است. اندازه‌گیری با دستگاه پره‌برش مینیاتوری^۹ طبق استاندارد (ASTM D4648/D4648M-2010) انجام شد و میانگین شش تکرار به‌عنوان مقدار نهایی استفاده شد (شکل ۳ الف) (Azimi et al., 2018; Code No. 783. 2019). مقاومت فشاری (CS)، نمایانگر پایداری مالچ در برابر نیروهای محوری است. اندازه‌گیری به‌طور غیرمستقیم با پنترومتر یا نفوذسنج (شکل ۳ ب) طبق استاندارد (ASTM D1558-99. 1999) انجام شد و میانگین شش نقطه به‌عنوان مقدار نمونه ثبت

شد (Azimi et al., 2018; Code No. 783. 2019). مقاومت ضربه‌ای (IR)، انرژی لازم برای شکست لایه مالچ تحت بار دینامیکی را نشان می‌دهد. آزمون با رها کردن میله فولادی ۱۵۰ گرمی از ارتفاع ۰/۵ متر انجام شد و تعداد ضربه تا تخریب سله و نفوذ میله در سطح تیمارها ثبت شد (جدول ۴). میانگین نتایج ده ناحیه برای هر تیمار به‌عنوان شاخص IR در نظر گرفته شد. مقاومت سایشی (AR)، سنجش مقاومت مالچ در برابر سایش ناشی از ذرات بادبرده است. آزمایش با کاغذ سنباده ۱۰۰ میکرون و اعمال نیروی ۵۰۰ گرم انجام شد، تعداد دفعات مالش تا تخریب کامل لایه به‌عنوان شاخص مقاومت سایشی ثبت شد و میانگین سه ناحیه برای هر نمونه استفاده شد (جدول ۵) (Code No. 783. 2019). ضخامت سله (CT)، نمایانگر پیوستگی و استحکام لایه مالچ و عملکرد محافظتی آن است. اندازه‌گیری ضخامت در پنج نقطه از سطح تیمارها با کولیس انجام شد (شکل ۳ ب) (Code No. 783. 2019).

⁴ Shear Strength⁵ Compression strength⁶ Impact Resistance⁷ Abrasion Resistance⁸ Crust Thickness⁹ Miniature Vane Shear Device



شکل ۱- (الف) دستگاه برش پره مورد استفاده در این مطالعه، (ب) دستگاه نفوذسنج جیبی مورد استفاده در این مطالعه (ج) اندازه گیری ضخامت سله به وسیله کولیس

جدول ۴- طبقه بندی مقاومت ضربه ای (Code No. 783. 2019)

شرایط طبقه مقاومت ضربه ای	کلاس
اگر با رها کردن میله سطح خاک نشکند	۱
اگر با رها کردن میله سطح خاک بشکند و تا عمق ۰/۵ سانتی متر در خاک فرو رود	۰/۷۵
اگر با رها کردن میله سطح خاک بشکند و تا عمق ۰/۵ - ۱ سانتی متر در خاک فرو رود	۰/۵
اگر با رها کردن میله سطح خاک بشکند و تا عمق ۱ - ۲ سانتی متر در خاک فرو رود	۰/۲۵
اگر با رها کردن میله سطح خاک بشکند و به ته سینی برخورد کند	۰

جدول ۵- درجه بندی مقاومت سایشی (Code No. 783. 2019)

شرایط طبقه مقاومت ضربه ای	کلاس
با بیش از ۳۰ بار حرکت سمباده، سله سطحی شکسته و ذرات ماسه جدا گردند	۱
با بیش از ۱۵-۵ بار حرکت سمباده، سله سطحی شکسته و ذرات ماسه جدا گردند	۰/۷۵
با بیش از ۵-۲ بار حرکت سمباده، سله سطحی شکسته و ذرات ماسه جدا گردند	۰/۵
اگر با رها کردن میله سطح خاک بشکند و تا عمق ۱-۲ سانتی متر در خاک فرو رود	۰/۲۵
با بیش از ۲-۱ بار حرکت سمباده، سله سطحی شکسته و ذرات ماسه جدا گردند	۰

در این پژوهش نیازی به تبدیل توانی نبوده و مدل مرتبه دوم با استراتژی حذف پیش رونده در DX11 برازش شد. انجام بهینه سازی و انتخاب ترکیب بهینه: پس از ارزیابی پاسخ ها، بهینه سازی ترکیب مالچ با استفاده از رویکرد عددی در نرم افزار DX11 انجام شد. در این روش، با تعریف تابع مطلوبیت برای هر پاسخ، طرح اختلاط بهینه بر اساس مدل های برازش شده و مقدار میانگین هندسی (D) توابع مطلوبیت (di) تعیین گردید. این روش بر پایه تابع مطلوبیت عمومی درینگر و سوویچ (رابطه ۳) توسعه یافته است (Ghafari et al., 2015).

(۳)

$$D = (d_1^{r_1} \times d_2^{r_2} \times \dots \times d_n^{r_n})^{1/\sum r_i} = (\prod_{i=1}^n d_i^{r_i})^{1/\sum r_i}$$

در این رابطه، n نشان دهنده تعداد پاسخ هایی است که در فرآیند بهینه سازی مورد نظر قرار گرفته اند و r_i بیانگر درجه اهمیت هر یک از توابع مطلوبیت d_i است. مقدار r_i

تجزیه و تحلیل آماری: در این پژوهش داده ها با آزمون های آماری مختلف تحلیل شدند. برای بررسی اختلاف معنی دار بین تیمارها از ANOVA در نرم افزار SPSS V.20 با سطح اطمینان $p < 0.05$ استفاده شد، و مقایسه میانگین ها با آزمون دانکن (DMRT) در سطح پنج درصد انجام گرفت (Duncan, 1955). ارتباط بین متغیرها با ضرایب پیرسون (برای داده های نرمال و روابط خطی) و اسپیرمن (برای داده های غیرنرمال یا پرت) بررسی شد که امکان تحلیل دقیق تر روابط را فراهم ساخت (De Winter et al., 2016). در مرحله بعد، مدل های چند جمله ای و خطی برای برازش و بهینه سازی طراحی آزمایش ها استفاده گردید و تنها مدلی معتبر شناخته شدند که $P\text{-Value} > 0.05$ داشتند (Ghafari et al., 2015). در صورت ضعف پیش بینی، تبدیلاتی مانند Box-Cox قابل استفاده بود (Moosavi et al., 2012)، اما

اعتبارسنجی: برای اعتبارسنجی نتایج و ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی، سه تکرار از نمونه‌های ترکیب بهینه ساخته شد و تمامی آزمایش‌ها روی آن‌ها تکرار گردید. همچنین شاخص انحراف نسبی مطلق (ARD) بر اساس رابطه (۴) به‌عنوان معیار دقت پیش‌بینی برای نمونه‌های بهینه محاسبه شد.

$$ARD(\%) = \frac{Experimental - Model}{Experimental} \times 100 \quad (4)$$

که در آن Experimental و Model به ترتیب بیانگر مقدار نتایج آزمایش مجدد و پیش‌بینی شده توسط مدل ریاضی پیشنهاد شده است (Mirabedini et al., 2012).

نتایج

در این بخش، نتایج آزمایش‌های تیمارهای مختلف مالچ با روش‌های آماری تحلیل و مدل ریاضی آن‌ها با نرم‌افزار DX11 برازش شد. سپس با استفاده از ابزار بهینه‌سازی نرم‌افزار، ترکیب بهینه مالچ بر اساس شاخص‌های عملکردی تعیین گردید. داده‌های مقاومت فشاری، برشی، سایشی، ضربه‌ای، ضخامت سله و نفوذپذیری در جدول ۶ و نتایج تحلیل واریانس یک‌عامله برای این ویژگی‌ها در جدول ۷ ارائه شده است.

می‌تواند از ۱ (کمترین اهمیت) تا ۵ (بیشترین اهمیت) تغییر کند. مقدار تابع مطلوبیت (di) بین صفر تا ۱ متغیر است. به‌طوری‌که $di = 1$ بیانگر پاسخ کاملاً مطلوب و $di = 0$ نشان‌دهنده پاسخ نامطلوب است. میانگین هندسی این توابع (D) هرچه به ۱ نزدیک‌تر باشد، بیانگر بهینگی ترکیب و نزدیکی مقادیر پاسخ‌ها به اهداف است، در حالی که خروج هر پاسخ از محدوده مطلوبیت، مقدار D را به صفر کاهش می‌دهد. در بهینه‌سازی عددی، اهداف می‌توانند شامل بیشینه‌سازی، کمینه‌سازی، دستیابی به مقدار هدف یا قرار گرفتن در بازه مشخص باشند. هدف این مطالعه طراحی مخلوط مالچ زیست‌سازگار بود که به‌طور هم‌زمان الزامات مقاومتی و فیزیکی را برآورده کند. شش معیار برای بهینه‌سازی ترکیب مالچ در نظر گرفته شد: بیشینه‌سازی تک‌تک متغیرهای پاسخ، بیشینه‌سازی هم‌زمان SS و CS، بیشینه‌سازی CS، SS و IR، بیشینه‌سازی CS، SS، IR و AR، بیشینه‌سازی CS، SS، IR و CT و بیشینه‌سازی هم‌زمان همه پنج متغیر پاسخ. در این فرآیند، همه پاسخ‌ها با درجه اهمیت یکسان در نظر گرفته شده و چهار محدودیت نیز برای توابع هدف اعمال شد (رابطه ۱ و جدول ۲).

جدول ۶- نتایج آزمایشات مالچ‌های مورد بررسی

شماره تیمار	مقاومت برشی N/cm ²	مقاومت فشاری Kg/cm ²	مقاومت ضربه‌ای	مقاومت سایشی	ضخامت سله (cm)	شماره تیمار	مقاومت برشی N/cm ²	مقاومت فشاری Kg/cm ²	مقاومت ضربه‌ای	مقاومت سایشی	ضخامت سله (cm)
۱	۵/۹	۳/۱۵	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۳۲	۱۹	۲/۶۲	۱/۷۰	۰/۳۳	۱	۰/۷۳
۲	۶/۱۲	۱/۸۳	۰/۵۰	۱	۱/۴۲	۲۰	۳/۵۸	۱/۷۸	۰/۵۰	۰/۹۲	۱/۸۵
۳	۵/۳	۲/۷۵	۰/۵۲	۰/۶۰	۱/۳۱	۲۱	۴/۹۳	۲/۰۰	۰/۲۹	۱	۱/۹۱
۴	۳/۳۷	۱/۵۸	۰/۵۰	۱	۱/۱۲	۲۲	۷/۳۷	۲/۷۰	۰/۲۹	۱	۱/۲۳
۵	۶/۴۳	۲/۵۷	۰/۶۳	۰/۷۵	۱/۵۰	۲۳	۵/۲۵	۱/۹۲	۰/۴۲	۰/۳۳	۱/۴۹
۶	۴/۷۷	۲/۹۷	۰/۴۴	۰/۴۰	۱/۲۷	۲۴	۳/۵۰	۲/۰۰	۰/۲۹	۱	۱/۴۸
۷	۱/۷۲	۱/۷۰	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۹۵	۲۵	۲/۵۰	۱/۶۲	۰/۲۹	۰/۵۰	۱/۳۴
۸	۴/۲۸	۱/۷۲	۰/۳۸	۰/۵۸	۱/۴۷	۲۶	۴/۰۰	۲/۱۵	۰/۴۶	۱	۱/۲۵
۹	۲	۱/۵۳	۰/۲۷	۰/۹۵	۱/۲۲	۲۷	۵/۴۲	۳/۰۲	۰/۵۳	۰/۵۵	۱/۸۹
۱۰	۱/۶۲	۱/۵۰	۰/۲۹	۰/۸۳	۱/۲۷	۲۸	۸/۲۷	۲/۵۳	۰/۷۱	۰/۹۲	۱/۶۰
۱۱	۵	۳/۱۸	۰/۴۳	۰/۷۰	۱/۵۰	۲۹	۶/۰۳	۱/۶۸	۰/۴۲	۱	۱/۶۹
۱۲	۴/۶۲	۲/۳۰	۰/۵۰	۰/۵۰	۱/۸۰	۳۰	۳/۴۹	۱/۵۴	۰/۴۸	۰/۹۳	۱/۸۹
۱۳	۵/۰۷	۲/۶۳	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۳۴	۳۱	۳/۰۲	۱/۷۰	۰/۲۹	۰/۵۰	۰/۸۰
۱۴	۸/۲۰	۲/۵۰	۰/۶۷	۰/۵۸	۱/۵۶	۳۲	۶/۰۲	۲/۶۸	۰/۵۴	۰/۵۸	۱/۲۵
۱۵	۸/۱۷	۳/۱۷	۰/۷۵	۰/۲۵	۱/۷۱	۳۳	۷/۴۵	۳/۰۰	۰/۷۱	۰/۵۰	۱/۶۶
۱۶	۳	۱/۷۰	۰/۴۰	۰/۹۰	۱/۹۲	۳۴	۲/۲۳	۱/۳۰	۰/۲۱	۰/۲۵	۱/۲۲
۱۷	۷/۷۳	۲/۹۵	۰/۵۴	۰/۵۸	۱/۴۹	۳۵	۱/۵۷	۱/۶۷	۰/۲۳	۰/۸۸	۱/۱۵
۱۸	۳/۵۰	۲/۰۵	۰/۷۱	۰/۵۸	۱/۳۲	۳۶	۴/۷۷	۲/۴۰	۰/۴۶	۰/۹۲	۱/۲۱

جدول ۷- پارامترهای آماری برای متغیرهای پاسخ در تیمارهای مختلف

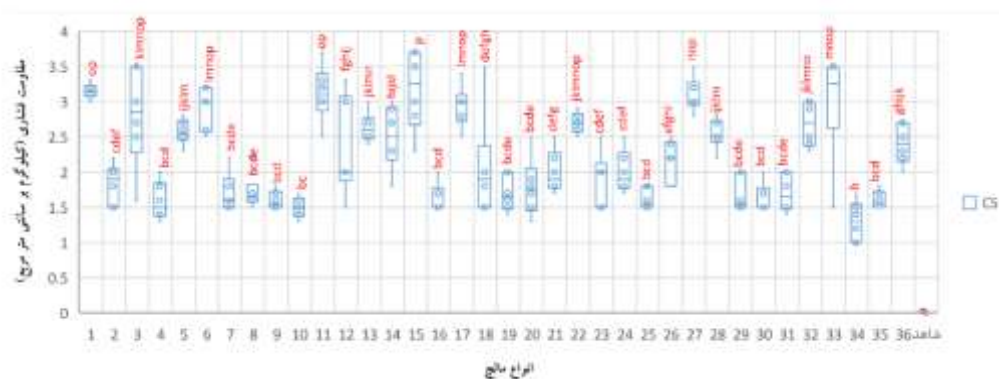
متغیر پاسخ	حداقل	حداکثر	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	آماره آزمون F	مقدار احتمال (p) / سطح معناداری
مقاومت برشی	۱/۶۲	۸/۲۷	۹۴۷/۰۴۶	۳۶	۲۶/۳۰۷	۵۶/۹۲۲	۰/۰۰۰
مقاومت فشاری	۱/۳	۳/۱۷	۹۸/۷۶۵	۳۶	۲/۷۴۳	۲۱/۵۹۱	۰/۰۰۰
مقاومت ضربه‌ای	۰/۲۱	۰/۷۵	۶/۱۲۸	۳۶	۰/۱۷۰	۱۶/۸۸۹	۰/۰۰۰
مقاومت سایشی	۰/۲۵	۱	۸/۴۵۳	۳۶	۰/۲۳۵	۲۱/۹۴۷	۰/۰۰۰
ضخامت سله	۰/۷۳	۱/۹۲	۲۵۳۶/۴۳۷	۳۶	۷۰/۴۵۷	۴۱/۳۶۷	۰/۰۰۰

جدول ۶ بیشترین مقدار مقاومت سایشی در تیمارهای ۴، ۲، ۹، ۱۹، ۲۱، ۲۲، ۲۴، ۲۹، ۳۰ و همگی به میزان یک مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش کامل داشت. کمترین مقاومت سایشی مربوط به تیمارهای ۳۴، ۷ و ۱۵ با مقدار ۰/۲۵ بود. آزمون دانکن (شکل ۴ د) نشان داد اختلاف معناداری میان گروه تیمارهای با بیشترین و کمترین مقاومت سایشی وجود ندارد. در ارتباط با ضخامت سله نتایج آزمون ANOVA نشان داد که اثر تیمارهای مالچ بر ضخامت سله معنادار است ($F = 41/376, p < 0.05$). با توجه به جدول ۶ بیشترین ضخامت سله در تیمارهای ۲۱، ۱۶ و ۳۰ به ترتیب ۱/۹۱، ۱/۹۲ و ۱/۸۹ سانتی‌متر بود که نسبت به شاهد افزایش قابل توجهی داشت. کمترین میزان ضخامت سله مربوط به تیمارهای ۳۱ و ۱۹ به ترتیب به میزان ۷۳/۰ و ۸/۰ سانتی‌متر ثبت شد. آزمون دانکن (شکل ۴) نشان داد اختلاف معناداری بین گروه تیمارهای با بیشترین و کمترین ضخامت سله وجود ندارد.

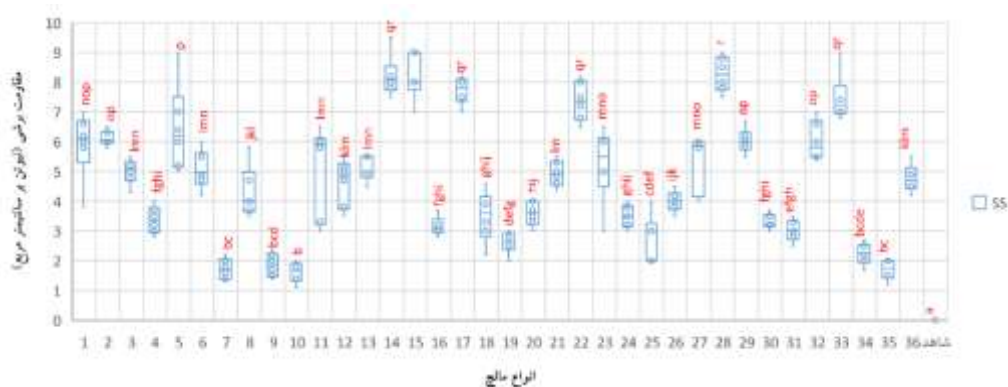
تحلیل همبستگی بین متغیرهای پاسخ: در شکل ۵ تحلیل ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن با سطح معناداری ۰/۰۵ نشان داد که نتایج دو روش در اکثر موارد همخوانی دارند (شکل ۵). سه متغیر مقاومت برشی، فشاری و ضربه‌ای همبستگی مثبت، قوی و معنادار داشتند، در حالی که ضخامت سله همبستگی مثبت اما ضعیفی با آنها داشت و تنها رابطه با مقاومت فشاری غیرمعنادار بود. مقاومت سایشی همبستگی معناداری با سایر متغیرها نداشت. ضعف همبستگی ضخامت سله و مقاومت سایشی احتمالاً ناشی از خطای انسانی در آزمون سایشی دستی و تفاوت محل اندازه‌گیری ضخامت با محل آزمون‌های مقاومتی است. بازنگری در دستورالعمل آزمون سایشی و اندازه‌گیری ضخامت سله در محل آزمون‌های مقاومتی توصیه می‌شود.

در ارتباط با مقاومت برشی نتایج آزمون ANOVA نشان داد که اثر تیمارهای مالچ بر مقاومت برشی معنادار است ($F = 21/591, p < 0.05$). با توجه به جدول ۶ بیشترین مقاومت برشی در تیمارهای ۲۸، ۱۴ و ۱۵ به ترتیب با مقادیر ۸/۲۷، ۸/۲۰ و ۸/۱۷ نیوتن بر سانتی‌متر مربع مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش چشمگیری داشت. کمترین مقدار مربوط به تیمارهای ۱۰ و ۳۵ به میزان ۱/۶۲ و ۱/۷۰ نیوتن بر سانتی‌متر مربع بود. آزمون دانکن (شکل ۴ الف) نشان داد تفاوت معناداری میان گروه‌های دارای بیشترین و کمترین مقاومت وجود ندارد. همچنین نتایج آزمون ANOVA نشان داد که اثر تیمارهای مالچ بر مقاومت فشاری معنادار است ($F = 56/922, p < 0.05$). با توجه به جدول ۶ بیشترین مقاومت فشاری در تیمارهای ۱ و ۱۵ با مقادیر ۳/۱۷ و ۳/۱۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش محسوسی داشت. کمترین مقدار به تیمارهای ۱۰ و ۳۴ به ترتیب به میزان ۱/۳ و ۱/۵ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع تعلق داشت. آزمون دانکن (شکل ۴ ب) نشان داد تفاوت معناداری میان تیمارهای دارای بیشترین و کمترین مقاومت فشاری وجود ندارد. در ارتباط با مقاومت ضربه‌ای نتایج آزمون ANOVA نشان داد تیمارهای مالچ بر مقاومت ضربه‌ای اثر معناداری دارند ($F = 16/889, p < 0.05$). با توجه به جدول ۶ بیشترین مقاومت ضربه‌ای در تیمارهای ۱۵، ۲۸، ۳۳ و ۱۸ به میزان ۰/۷۵، ۰/۷۱، ۰/۷۱ و ۰/۷۱ مشاهده شد که نسبت به شاهد افزایش چشمگیری داشت. کمترین مقدار به تیمارهای ۳۴، ۳۵ و ۹ به میزان ۰/۲۱، ۰/۲۵ و ۰/۲۵ تعلق گرفت. آزمون دانکن (شکل ۴ ج) نشان داد اختلاف معناداری میان گروه تیمارهای با بیشترین و کمترین مقاومت ضربه‌ای وجود ندارد. همچنین نتایج آزمون ANOVA نشان داد که تیمارهای مالچ بر مقاومت سایشی اثر معناداری دارند ($F = 21/947, p < 0.05$). با توجه به

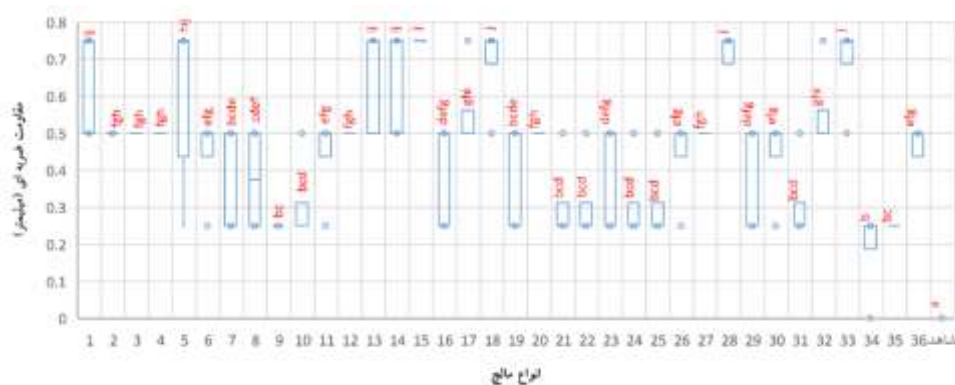
الف



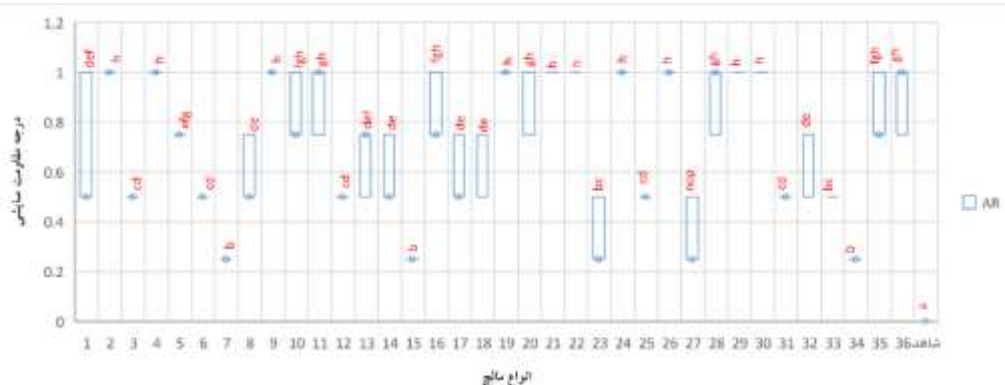
ب.



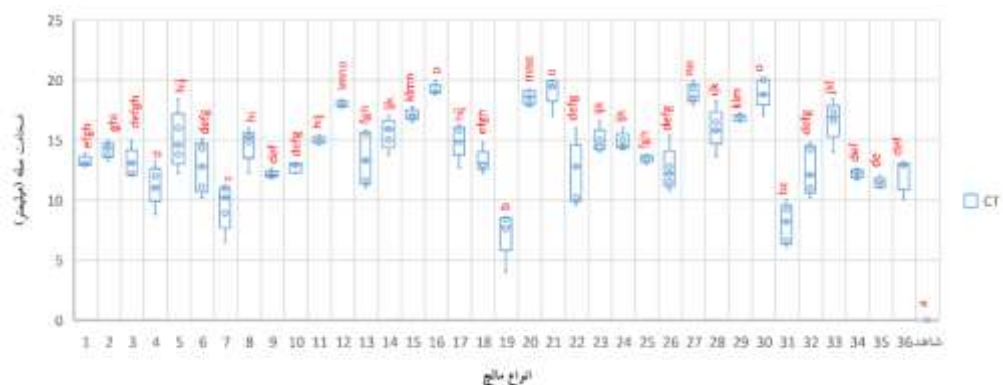
ج



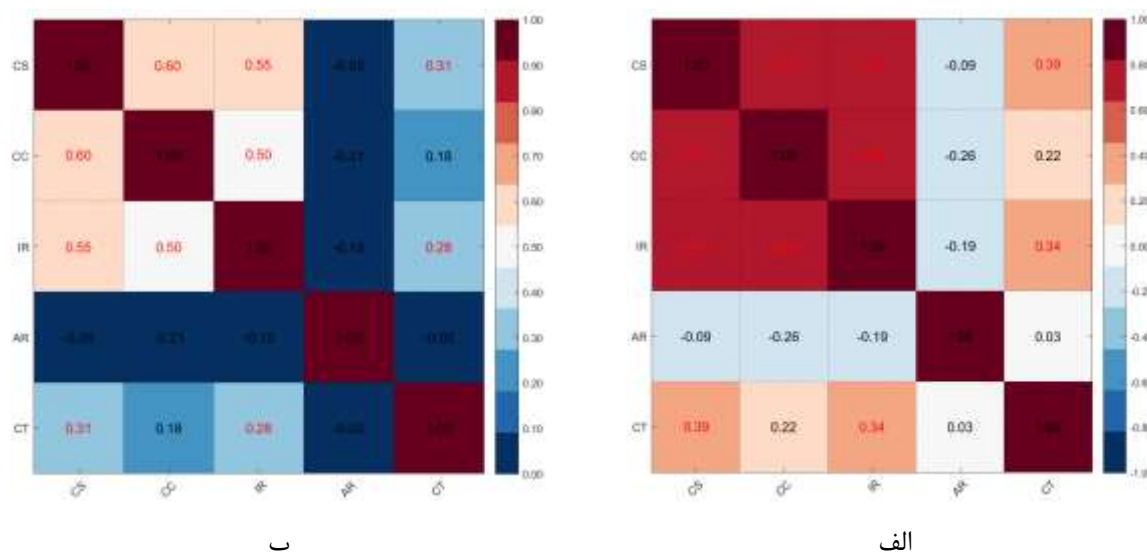
د



شکل ۲- نمودار میله‌ای متغیرهای پاسخ در تیمارهای مختلف و گروه‌بندی آن بر اساس آزمون دانکن (الف) مقاومت برشی، (ب) مقاومت فشاری، (ج) مقاومت ضربه‌ای (د) مقاومت سایشی



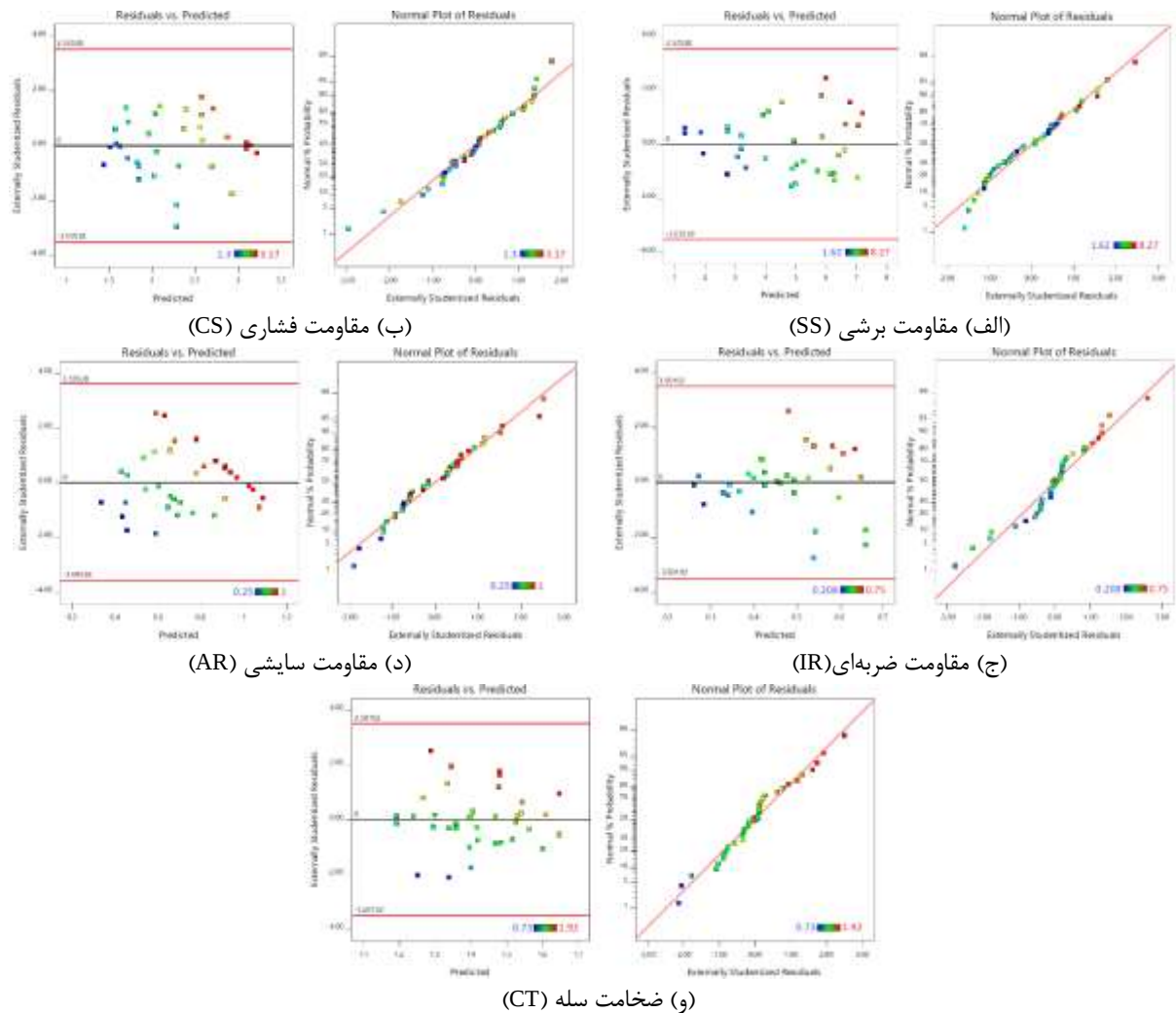
ادامه شکل ۲- نمودار میله‌ای متغیرهای پاسخ در تیمارهای مختلف و گروه‌بندی آن بر اساس آزمون دانکن (و) ضخامت سله



شکل ۳- تحلیل همبستگی بین متغیرهای پاسخ بر اساس (الف) ضریب پیرسون (ضرایبی که به رنگ قرمز هستند دارای همبستگی معنادار در سطح معناداری ۰/۰۵ هستند)، (ب) بر اساس ضریب اسپیرمن (ضرایبی که به رنگ قرمز هستند دارای همبستگی معنادار در سطح معناداری ۰/۰۵ هستند)

محاسبه می‌شود (Montgomery, 2017). فرض بر این است که باقیمانده‌ها (θ_i) تصادفی، نرمال با میانگین صفر و دارای واریانس ثابت باشند. در این حالت، نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها خطی بوده و نمودار پراکنش خطاها (θ_i) در برابر مقادیر پیش‌بینی‌شده ($\hat{y}_i$) فاقد الگوی مشخص است. چنین شرایطی نشان‌دهنده همواریابی خطاها و برازش مناسب مدل است. نتایج نتایج شکل ۴، نیز این شرایط را تأیید کرده و بیانگر نرمال بودن باقیمانده‌ها، همواریابی و استقلال خطاها است. همچنین نزدیکی نقاط به خطوط مرجع و خطی بودن نمودار احتمال نرمال، کفایت آماری مدل‌های **Error!** **Reference source not found.** را نشان می‌دهد.

برازش مدل: برای بررسی اثر اجزای مالچ و تعیین ترکیب بهینه، بهترین مدل‌های چندجمله‌ای با روش برازش حذف پیشرونده انتخاب شدند. نتایج آنالیز واریانس (**Error!** **Reference source not found.**) نشان داد که اثر مالچ بر تمامی متغیرهای پاسخ (مقاومت فشاری، برشی، ضربه‌ای، سایشی و ضخامت سله) معنادار است. بر اساس شاخص‌های آماری (**Error!** **Reference source not found.**)، مدل درجه دو برای مقاومت برشی و فشاری، مدل خطی برای مقاومت ضربه‌ای و ضخامت سله و مدل درجه سه برای مقاومت سایشی بهترین برازش را ارائه کردند. یکی از روش‌های ارزیابی کفایت مدل، تحلیل باقیمانده‌ها است که به صورت اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و مقادیر پیش‌بینی‌شده، ($\theta_i = y_i - \hat{y}_i$).



شکل ۴- آزمون‌های تشخیص کفایت، (راست) نمودار پراکنش خطای مشاهده شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده (چپ) نمودار نقطه‌ای احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای متغیر پاسخ

جدول ۸- آنالیز ANOVA برای مدل‌های انتخاب شده برای هر چهار پاسخ

متغیر پاسخ	نوع مدل برازش شده	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F-Value	p-value Prob > F
SS	درجه دو	۱۰۵/۱۹	۵	۲۱/۰۴	۲۰/۲۱	<۰/۰۰۰۱
CS	درجه دو	۱۰/۱۱	۵	۲/۰۲	۳۶/۹۱	<۰/۰۰۰۱
IS	خطی	۰/۴۸۳۱	۲	۰/۲۴۱۵	۲۴/۱	<۰/۰۰۰۱
AR	درجه سه	۱/۴۸	۹	۰/۱۶۴۶	۴/۹۹	۰/۰۰۰۶
CT	خطی	۰/۵۴۵۲	۲	۰/۲۷۲۶	۳/۵۱	۰/۰۴۱۵

جدول ۹- مدل‌های برازش شده بر روی هر چهار پاسخ

معادله برازش شده بر متغیرهای پاسخ	شاخص‌های آماری					
	تعیین رگرسیونی	تعیین مربع شده	تعیین مربع تعدیل شده	تعیین مربع (R ²)	تعیین مربع (R ²)	تعیین مربع (R ²)
$SS = -17.73 \times Z - 5.84 \times B + 1.44 \times M + 52.49 \times Z \times B + 53.42 \times Z \times M + 18.48 \times B \times M$	۰/۶۹	۰/۷۳	۰/۷۷	۲۱/۷۶	۴/۶۹	۱/۰۲
$CS = 2.38 \times Z + 1.33 \times B + 6.74 \times M - 1.07 \times Z \times B - 4.61 \times Z \times M - 4.00 \times B \times M$	۰/۸۱	۰/۸۴	۰/۸۶	۱۰/۶۴	۲/۲۰	۰/۲۳
$IR = 0.187 \times Z + 0.33 \times B + 1.04 \times M$	۰/۵۱	۰/۵۷	۰/۵۹	۲۱/۶۸	۰/۴۶	۰/۱۰
$AR = -20.47 \times Z + 7.51 \times B - 0.93 \times M + 29.57 \times Z \times B + 37.13 \times Z \times M - 4.01 \times B \times M - 39.72 \times Z \times B \times M + 59.65 \times Z \times B \times (Z - B) + 24.86 \times Z \times M \times (Z - M) - 8.66 \times B \times M \times (B - M)$	۰/۲۳	۰/۵۱	۰/۶۳	۲۵/۵۶	۰/۷۱	۰/۱۸
$CT = 0.89 \times Z + 1.50 \times B + 2.0 \times M$	۰/۰۲	۰/۱۳	۰/۱۸	۱۹/۶۲	۱/۴۲	۰/۲۸

بهینه‌سازی عددی ترکیب مالچ: پس از برازش مدل رگرسیون بین متغیرهای طراحی مخلوط و پاسخ‌ها، بهینه‌سازی عددی با استفاده از توابع مطلوبیت انجام شد تا ترکیب مالچ سازگار با محیط‌زیست با در نظر گرفتن معیارهای مقاومتی و فیزیکی تعیین گردد. در این روش، برای هر معیار تابع مطلوبیت (با مقادیر ۰ تا ۱) تعریف شده و پاسخ‌ها به گونه‌ای بهینه شدند که الزامات هر معیار

برآورده شود. این فرآیند بر پایه نتایج طراحی آماری آزمایش مخلوط انجام گرفت. برای تعیین طرح اختلاط بهینه مالچ، ده تابع هدف به همراه چهار محدودیت در فرآیند بهینه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت و ترکیب درصد بهینه پارامترها در **Error! Reference source not found.** ارائه شده است.

جدول ۱۰- نتایج بهینه‌سازی ترکیب مالچ پیشنهادی با در نظر گرفتن معیارهای مختلف

ردیف	بیشینه‌سازی	مقادیر بهینه متغیرهای					مقادیر بهینه توابع هدف				تابع
		Z	B	M	SS (N/cm2)	CS (Kg/cm ²)	IR	AR	CT		
۱	SS	۳۰/۳۱	۱۹/۶۹	۵۰/۰۰	۷/۲۵	۳/۲۰	۰/۶۴	۰/۵۲	۱/۵۶	۰/۸۵	
۲	CS	۳۳/۰۰	۱۷/۱۶	۴۹/۸۴	۷/۲۰	۳/۲۱	۰/۶۴	۰/۴۸	۱/۵۵	۱	
۳	IR	۱۶/۶۶	۳۳/۳۴	۵۰/۰۰	۶/۲۷	۳/۱۰	۰/۶۶	۰/۵۹	۱/۶۵	۰/۸۳	
۴	AR	۳۹/۱۸	۳۰/۳۲	۳۰/۵۰	۶/۰۵	۲/۳۴	۰/۴۹	۱/۰۰	۱/۴۱	۰/۷۸	
۵	CT	۱۶/۶۶	۳۳/۳۴	۵۰/۰۰	۶/۲۷	۳/۱۰	۰/۶۶	۰/۵۹	۱/۶۵	۰/۷۷	
۶	CS و SS	۳۰/۳۲	۱۹/۶۸	۵۰/۰۰	۷/۲۵	۳/۲۰	۰/۶۴	۰/۵۶	۱/۵۶	۰/۹۲	
۷	IR و CS و SS	۲۸/۵۱	۲۱/۴۹	۵۰/۰۰	۷/۲۳	۳/۱۸	۰/۶۴	۰/۵۳	۱/۵۷	۰/۸۸	
۸	AR و IR و CS و SS	۳۳/۰۵	۲۳/۶۰	۴۳/۳۵	۷/۰۳	۲/۸۷	۰/۵۹	۰/۷۲	۱/۵۱	۰/۷۴	
۹	CT و IR و CS و SS	۲۶/۹۵	۲۳/۰۵	۵۰	۷/۱۹	۳/۱۷	۰/۶۵	۰/۵۳	۱/۵۸	۰/۸۳	
۱۰	CT و AR و IR و CS و SS	۳۱/۱۴	۲۳/۸۲	۴۵/۰۴	۷/۱۱	۲/۹۴	۰/۶۰	۰/۶۸	۱/۵۳	۰/۷۳	

بحث

این مطالعه با هدف توسعه مالچ ترکیبی زیست سازگار و اقتصادی بر پایه رویکرد اقتصاد چرخشی، به بررسی تأثیر زئولیت، بنتونیت و ملاس در تثبیت ماسه های روان پرداخت. نتایج نشان داد این ترکیب به دلیل در دسترس بودن و خواص فیزیکی مناسب مواد معدنی و چسبندگی بالای ملاس، موجب افزایش پایداری مکانیکی خاک و تفاوت معنادار نسبت به نمونه شاهد گردید.

در این پژوهش، با استفاده از طراحی آزمایش مخلوط D-Optimal، اثر ترکیب های مختلف زئولیت، بنتونیت و ملاس بر شاخص های مقاومت برشی (SS)، مقاومت فشاری (CS)، مقاومت ضربه ای (IR)، مقاومت سایشی (AR) و ضخامت سله (CT) بررسی شد. نتایج ANOVA و آزمون دانکن نشان داد که ترکیب مواد اثر معناداری بر همه شاخص ها دارد ($p < 0.05$). ملاس بیشترین نقش را در بهبود شاخص های مکانیکی و ضخامت سله دارد. زئولیت بیشترین اثر را بر مقاومت سایشی و مقاومت برشی دارد، به ویژه زمانی که درصد آن نسبت به بنتونیت بیشتر باشد یا در سطح ثابتی از ملاس با کاهش بنتونیت همراه گردد. بنتونیت بیشترین تأثیر را بر مقاومت ضربه ای و ضخامت سله دارد و به دلیل وجود یون های کلسیم، نگهداشت آب و مواد مغذی را افزایش داده، پیوند ذرات خاک را تقویت و مقاومت در برابر فرسایش را بهبود می بخشد (Ayoubi et al., 2018; Osman, 2018; Javiz et al., 2023). ترکیبات معدنی نقش مهمی در تثبیت و بهبود کیفیت خاک دارند. زئولیت علاوه بر افزایش مقاومت برشی، با افزایش نگهداشت آب و کود، کاهش شوری، تنظیم pH، بهبود تهویه و ارتقای بهره وری مصرف آب و نیتروژن، موجب کاهش انتشار گرد و غبار و ارتقای کیفیت خاک می شود (Noori et al., 2007; Ippolito et al., 2011). این یافته ها با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد (MolaAbasi, 2016; Azimi et al., 2018; Mombeni et al., 2020; Emami et al., 2021; Barati et al., 2024; Wang et al., 2024; Yan et al., 2025; Zhou et al., 2025).

تحلیل همبستگی نشان داد که مقاومت برشی، فشاری و ضربه ای مالچ ها دارای ارتباط مثبت و معنادار با یکدیگر هستند که با ویژگی های مکانیکی مواد همخوانی دارد. ضخامت سله نیز با این متغیرها همبستگی مثبت داشت، اگرچه رابطه آن با مقاومت فشاری معنادار نبود. مطالعات پیشین نیز اثر مثبت افزایش ضخامت سله یا لایه مالچ بر مقاومت برشی، فشاری و مقاومت در برابر فرسایش بادی و نفوذپذیری خاک را گزارش کرده اند (Diouf et al., 1990; Hazirei & Zare 2013; Moghadam et al., 2015; Sabzi et al., 2018). در مقابل، مقاومت سایشی همبستگی بسیار ضعیفی با سایر شاخص ها داشت که احتمالاً ناشی از وابستگی زیاد آن به روش دستی آزمایش و خطای انسانی است.

برازش مدل های چندجمله ای کفایت و دقت بالای آن ها در پیش بینی پاسخ ها را تأیید کرد. نتایج بهینه سازی ترکیب مالچ در جدول ۱۰ نشان داد که ملاس در اغلب معیارها (به جز مقاومت سایشی) در بیشترین مقدار قرار داشته و بازه تغییرات آن بین ۳۰ تا ۵۰ درصد است. زئولیت در بهینه سازی مقاومت سایشی بیشترین مقدار در بهینه سازی مقاومت ضربه ای و ضخامت سله کمترین مقدار را داشته و بازه آن بین ۱۶ تا ۴۸ درصد است. بنتونیت نیز معمولاً کمتر از زئولیت بوده و تنها در بهینه سازی مقاومت ضربه ای و ضخامت سله بیشترین مقدار را داشته است؛ دامنه تغییرات آن بین ۱۷ تا ۳۴ درصد قرار دارد. این نتایج نشان دهنده امکان دستیابی به ترکیب بهینه با صرفه جویی در زمان و هزینه است.

براساس جدول ۱۱، درصد اختلاف مقادیر بهینه پیش بینی شده برای پاسخ ها در سه معیار ۸، ۹ و ۱۰ (بهینه سازی همزمان) نسبت به معیارهای ۱ تا ۵ (بهینه سازی مستقل) نشان می دهد که معیارهای ۹، ۸ و ۱۰ به ترتیب کمترین اختلاف را دارند. با توجه به دقت پایین مدل مقاومت سایشی (جدول ۹) و وابستگی بالای آن به خطای انسانی، ترکیب حاصل از معیار ۹ (بهینه سازی همزمان SS، CS، IR و CT) به عنوان ترکیب بهینه مالچ پیشنهادی معرفی می شود.

جدول ۱۰- درصد اختلاف پاسخ‌های پیش‌بینی شده عملکرد مالچ پیشنهادی برای سه معیار ۸، ۹ و ۱۰ با معیارهای ۱ تا ۵

ردیف	پیش‌بینی‌سازی	اختلاف (%)				
		SS	CS	IR	AR	CT
۸	AR و IR و CS و SS	۱/۹۲	۸/۴۷	۸/۴۸	۳۴/۷۲	۶/۹۲
۹	CT و IR و CS و SS	۰/۸۳	۱/۳۱	۲/۲۷	۴۸/۳۶	۳/۸۳
۱۰	CT و AR و IR و CS و SS	۳/۰۲	۱۰/۶۵	۱۰/۷۶	۲۹/۹۸	۸/۱۴

برای اعتبارسنجی ترکیب پیشنهادی و سنجش دقت مدل‌های پیش‌بینی، سه نمونه خاک با مالچ بهینه تهیه و

جدول ۱۱ ارائه گردید. نتایج این پژوهش مبتنی بر آزمایش‌های آزمایشگاهی است و نیاز به تأیید میدانی دارد. در صورت تأیید، ترکیب پیشنهادی به دلیل سهولت تهیه، هزینه پایین، خواص مکانیکی مناسب، عدم سمیت و استفاده از پسماندهای صنعتی و کشاورزی می‌تواند

تمامی آزمایش‌ها مطابق بخش مواد و روش‌ها تکرار شد. میانگین نتایج به همراه شاخص انحراف نسبی مطلق در جایگزین مؤثر مالچ‌های نفتی در مناطق بیابانی شود. این مطالعه همچنین الگویی برای بهره‌گیری تلفیقی از منابع طبیعی و بازیافتی در توسعه فناوری‌های محیط‌زیست محور و تحقق اقتصاد چرخشی ارائه می‌دهد.

جدول ۱۱- اعتبار سنجی نتایج بهینه‌سازی

مقاومت برشی			مقاومت فشاری			مقاومت ضربه‌ای			مقاومت سایشی			ضخامت سله		
SS			CS			IR			AR			CT		
پیش‌بینی	میانگین آزمایش	ARD (%)	پیش‌بینی	میانگین آزمایش	ARD (%)	پیش‌بینی	میانگین آزمایش	ARD (%)	پیش‌بینی	میانگین آزمایش	ARD (%)	پیش‌بینی	میانگین آزمایش	ARD (%)
۷/۱	۸/۰	۱۰/۴۱	۳/۱	۳/۱	-۱۱/۵۵	۰/۶	۰/۷۱	۹/۱۵	۰/۵	۰/۷۵	۲۸/۸	۱/۵	۱/۶	۱
۹	۲	۷	۷	۷	۵	۵	۵	۵	۳	۸	۰	۸	۸	۸

منابع

- Relationships of Fine-Grained Soils, ASTM International West Conshohocken, PA.
- ASTM D4648/D4648M-24a. 2010. Standard Test Method for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Soils, ASTM International West Conshohocken, PA.
- Ayoubi, S., Mosaddeghi, M. and Besaltpour, A.A., 2018. Investigating the application of biochar, bentonite clay and polyvinyl acetate polymer on some mechanical properties of sand deposits. *Agricultural Engineering (Scientific Journal of Agriculture)*, 41(2), pp.83-97.
- Azimi, Y., Zare, S., Sarkheil, H., Bodaghjamali, J. and Heshmati, S., 2018. Construction of cement-slag mulch using mixture experiments design for fixation of sand dunes. *Journal of Range and Watershed Management*, 71(3), pp.715-735.
- Barati, M., Moazami, M.A. and Ostadhosseini, A., 2025. The Effect of Mulch in Controlling Erosion and Dust Originated From Chadormalu
- Abbasi, N., Movahedan, M. and Keramati Toroghi, M., 2010. The effects of chemical Polymer on physical and mechanical properties of soils.
- Alipur, H., Zare, M. and Shojaei, S., 2016. Assessing the degradation of vegetation of arid zones using FAO-UNIP model case study: Kashan zone. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(4), pp.1-6.
- Arabi Aliabad, F., Shojaei, S., Zare, M. and Ekhtesasi, M.R., 2019. Assessment of the fuzzy ARTMAP neural network method performance in geological mapping using satellite images and Boolean logic. *International journal of environmental science and technology*, 16(7), pp.3829-3838.
- ASTM D1558-99. 1999. Standard Test Method for Moisture Content Penetration Resistance

- an arid region. *Journal of Arid Environments*, 213, p.104974.
23. **Komaei, A., Soroush, A., Fattahi, S.M. and Ghanbari, H., 2023.** Wind erosion control using alkali-activated slag cement: Experimental investigation and microstructural analysis. *Journal of Environmental Management*, 344, p.118633.
 24. **Liang, J., Ning, R., Sun, Z., Liu, X., Sun, W. and Zhou, X., 2021.** Preparation and characterization of an eco-friendly dust suppression and sand-fixation liquid mulching film. *Carbohydrate Polymers*, 256, p.117429.
 25. **MacArthur, E., 2013.** Towards the circular economy. *Journal of industrial ecology*, 2(1), pp.23-44.
 26. **Mirabedini, S.M., Jamali, S.S., Haghighyegh, M., Sharifi, M., Mirabedini, A.S. and Hashemi-Nasab, R., 2012.** Application of mixture experimental design to optimize formulation and performance of thermoplastic road markings. *Progress in Organic Coatings*, 75(4), pp.549-559.
 27. **Khalili Moghadam, B., Jamili, T., Nadian, H. and Shahbazi, E., 2016.** The influence of sugarcane mulch on sand dune stabilization in Khuzestan, the southwest of Iran. *Iran Agricultural Research*, 34(2), pp.71-80.
 28. **MolaAbasi, H., 2016.** Evaluation of zeolite effect on strength of babolsar sand stabilized with cement using unconfined compression test. *Modares Civil Engineering journal*, 16(5), pp.203-213.
 29. **Mombeni, M., Asgari, H.R., Behbahani, A.M., Zare, S. and Yousefi, H., 2021.** Effect of bagasse lignocellulose microfibers on sand stabilization: A laboratory study. *Aeolian Research*, 49, p.100654.
 30. **Mombeni, M., Asgari, H.R., Mohammadian, B.A., Zare, S. and Yousefi, H., 2020.** Investigation of mechanical behavior of inflatable sand using malass and black liqueur. *Journal of Range and Watershed Management (Iranian Journal of Natural Resources)*, 72(4), pp.1061-1073.
 31. **Montgomery, D.C., 2017.** Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, p.103.
 32. **Moosavi, M., Moradian, S., Bastani, S. and Jalili, M., 2012.** The use of experimental design for optimizing the photostabilization of a substrate printed by a water-based overprint clear coat. *Journal of Color Science and Technology*, 6(1), pp.1-8.
 33. **Movahedan, M., Abbasi, N. and Keramati, M., 2012.** Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian Journal of Soil Science*, 1(2), pp.81-86.
 34. **Noori, M., Ahmadi, A. and Zendehtdel, M., 2007.** Comparative study between using natural and synthetic zeolites for the improvement of soil salinity and crop yield. *Toxicological & Environmental Chemistry*, 89(2), pp.233-241.
 35. **Osman, K.T., 2018.** Sandy soils. In *Management of soil problems* (pp. 37-65). Cham: Springer International Publishing.
 - Iron Mine Tailings. *Advanced Environmental Sciences*, 23(3), pp.617-636.
 9. **Code No. 783. 2019.** Technical Instructions for Evaluating Performance of Soil stabilizers mulch. Plan and Budget Organization., , Islamic Republic of Iran No. 783,2019.
 10. **Diouf, B., Skidmore, E.L., Layton, J.B. and Hagen, L.J., 1990.** Stabilizing fine sand by adding clay: laboratory wind tunnel study. *Soil technology*, 3(1), pp.21-31.
 11. **Dong, Z., Wang, L. and Zhao, S., 2008.** A potential compound for sand fixation synthesized from the effluent of pulp and paper mills. *Journal of arid environments*, 72(7), pp.1388-1393.
 12. **Duncan, D.B., 1955.** Multiple range and multiple F tests. *Biometrics*, 11(1), pp.1-42.
 13. **Emami, H., Karimi, A. and Mina, M., 2021.** Evaluation the efficiency of different mulches to combat wind erosion of sandy soil running title: Efficiency of different mulches to control wind erosion. *Sustainable Earth Trends*, 1(1), pp.20-26.
 14. **Ghafari, E., Costa, H. and Júlio, E., 2015.** Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC. *Cement and Concrete Composites*, 55, pp.17-25.
 15. **Giugliano, D., Cieriello A. and Esposito, K., 2006.** The effects of diet on inflammation: emphasis on the metabolic syndrome. *Journal of the American College of Cardiology* 484: 677-685.
 16. **Hanjie, W.A.N.G., de Vries Frits, P. and Yongcan, J.I.N., 2009.** A win-win technique of stabilizing sand dune and purifying paper mill black-liquor. *Journal of Environmental Sciences*, 21(4), pp.488-493.
 17. **Hazirei, F. and Zare, E.M., 2013.** Investigation of effect of clay-lime mulch for sand dunes fixation. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 27(2), pp.373-380.
 18. **Ippolito, J.A., Tarkalson, D.D. and Lehrsch, G.A., 2011.** Zeolite soil application method affects inorganic nitrogen, moisture, and corn growth. *Soil science*, 176(3), pp.136-142.
 19. **James, J., 2020.** Sugarcane press mud modification of expansive soil stabilized at optimum lime content: Strength, mineralogy and microstructural investigation. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 12(2), pp.395-402.
 20. **Jamili, T., Khalili, M.B. and Shahbazi, E., 2016.** Investigation of water holding capacity of sugarcane mulch for sand dune stabilization in Ahvaz. *Journal of Water and Soil (Agricultural Sciences and Technology)*, 29(5), pp.1278-1287.
 21. **Jamshidsafa, M., Khalili Moghadam, B., Jafari, S. and Ghorbani, S., 2015.** Feasibility investigation of FilterCake using in mulch production for sand dune stabilization in Ahvaz. *Agricultural Engineering*, 38(1), pp.29-42.
 22. **Javiz, E., Jalalian, A., Mosaddeghi, M.R., Chavoshi, E. and Honarjoo, N., 2023.** Assessment of wind erosion and physical and mechanical properties of bentonite clay mulch in

- soil aggregation and chemical properties. *Bioresource technology*, 98(7), pp.1482-1488.
41. **Xu, Y., Wu, Y., Ma, B., Zhang, Y., Fan, Y., Huang, X. and Liu, Z., 2025.** Performance evaluation and application of second-generation environmentally-friendly composite dust suppressant in dust control. *Scientific Reports* 151: 4450.
 42. **Yan, J., Yang, F., Zhang, W., Li, P., Zhou, W., Lu, X. and Li, K., 2025.** Characterization of road dust and formulation of a molasses-based dust suppressant for heavy-duty haul roads in open-pit coal mine. *Atmospheric Pollution Research*, 16(9), p.102589.
 43. **Zare, S., Mohammadi, J., Mombeni, M., Shokohi, R. and Ghoohestani, G., 2021.** Effect of different mulches on some physical and mechanical properties of Aeolian soil.
 44. **Zhou, G., Zhao, M., Yao, J., Dao, V.D., Li, S., Wang, H., Li, J. and Liu, B., 2025.** Environmental application of molasses-based foam dust suppressant: Preparation, performance evaluation and mechanism analysis. *Construction and Building Materials*, 458, p.139541.
 36. **Sabzi, M., Asgari, H.R. and Afzali, S.F., 2018.** Assessment sugar factories wastes' performance on wind erosion control. *Pollution*, 4(3), pp. 539-546.
 37. **Safaei Gahnaviyeh, A.R., Karim-zadeh, H. and Shokraki, R., 2012.** F. Use of steel manufacturing slag (Foulad Mobarake Co.) as mulch to stabilize wind eroded sediment case study: Soils in East of Isfahan. *Environ. Erosion Res. J.*, 2(2), pp.15-24.
 38. **Soleimani, M., Mirjani, M., Ahmed, A., Khalilimoghadam, B., Cruz, M.D. and Christensen, J.H., 2025.** Long-term effects of petroleum mulch on concentration, health, and ecological risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in sand dune soils of Khuzestan province, Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(3), pp.1430-1446.
 39. **Wang, J., Hu, X., Zhao, Y., Li, X., Zhao, P. and Guo, Y., 2024.** Effects of molasses-based microbial dust suppressant on soil dust and microbial community. *Powder Technology*, 441, p.119831.
 40. **Xiao, C., Bolton, R. and Pan, W.L., 2007.** Lignin from rice straw Kraft pulping: Effects on





Development and Optimization of an Eco-Friendly Mulch Based on Minerals and Molasses for Stabilizing Sand Dunes – A Case Study in the Aran and Bidgol Sand Fields

Jalal Mohammadi¹, Yousef Azimi^{*2}, Salman Zare³, Majid Basirat⁴

1- Human Environment Group, College of Environment, Karaj, Iran

2*- Research Group of Environmental engineering and pollution monitoring, Research center for Environment and Sustainable Development, Department of Environment, Tehran, Iran

3- Department of Reclamation of Arid and Mountainous Region, Natural Resources Faculty, University of Tehran, Karaj, Iran

4- Soil and Water Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Karaj, Iran

Original Article

Received:
2025.08.04

Accepted:
2025.09.11

Keywords:
Bio-Based Mulch,
Sand Stabilization,
Molasses,
Zeolite,
Bentonite,
Mixture Design

Abstract

Introduction: Wind erosion is one of the major environmental challenges in arid and semi-arid regions of Iran, particularly in desert areas such as Aran and Bidgol and Kashan, where low precipitation, poor vegetation cover, and fragile soils intensify the phenomenon. Mulching is a common method for stabilizing mobile sands; however, petroleum-based mulches are limited due to high costs and adverse environmental impacts. Accordingly, bio-based mulches derived from agricultural and industrial by-products are considered safe, biodegradable, and cost-effective alternatives. The present study aimed to develop an eco-friendly mulch based on zeolite, bentonite, and molasses (a by-product of the sugar industry).

Materials and Methods: The research was conducted at the laboratory scale using a D-Optimal mixture design approach. Sand samples were collected from the deserts of Kashan and characterized according to ASTM standards. The proposed mulch was formulated from calcium bentonite (mesh 200), micronized clinoptilolite zeolite, and concentrated industrial molasses. The mixing ratios were designed and tested using DX11 software. Five performance indices were used to evaluate mulch quality: shear strength (SS), compressive strength (CS), impact resistance (IR), abrasion resistance (AR), and crust thickness (CT). The experimental results were analyzed using ANOVA, Duncan's test, and Pearson and Spearman correlation analyses. Polynomial models were developed to fit the responses and determine the optimal formulation through mathematical optimization.

Results: ANOVA results showed that mulch treatments had significant effects ($p < 0.05$) on all performance indices. Maximum shear strength was recorded in treatments 28, 14, and 15, at 8.27, 8.20, and 8.17 N/cm², respectively. The highest compressive strength was observed in treatments 1 and 15, at 3.17 and 3.15 kg/cm², respectively. The greatest impact resistance was found in treatments 15, 28, 33, and 18, with values of 0.75, 0.71, 0.71, and 0.71, respectively. The highest abrasion resistance (value = 1) was recorded across treatments 4, 2, 9, 19, 21, 22, 24, 29, 26, and 30. Maximum crust thickness was obtained in treatments 21, 16, and 30, at 1.92, 1.91, and 1.89 cm, respectively. A strong and significant correlation was found

between shear, compressive, and impact strength, while abrasion resistance showed weak and insignificant correlations with the other variables. The optimized mulch formulation aimed at maximizing SS, CS, IR, and CT consisted of 50% molasses, 23% bentonite, and 27% zeolite. Model validation results indicated a good agreement between experimental data and model predictions.

Discussion: Molasses, due to its adhesive properties and ability to bind soil particles, combined with bentonite as a calcium source for improved water retention and zeolite for its high cation exchange capacity, resulted in the development of a sustainable mulch with favorable physical and mechanical properties. Increasing molasses content directly enhanced mechanical strengths and crust thickness. Zeolite was more effective in improving abrasion resistance, whereas bentonite played a key role in impact resistance and crust thickness. The findings are consistent with previous studies. The proposed optimized formulation, due to its accessible raw materials, simple preparation process, non-toxicity, and potential for field application, can serve as an effective alternative to petroleum-based mulches in Iran's desert regions. However, final performance validation requires field trials under actual climatic conditions. This study serves as a successful example of synergizing natural materials and industrial residues to develop environmentally focused technologies within a circular economy framework.