

ساخت مالچ سیمانی_سرباره‌ای با استفاده از روش طراحی آزمایش مخلوط برای تثبیت ماسه‌های روان

- ❖ یوسف عظیمی*؛ استادیار دانشکده محیط‌زیست کرج، البرز، ایران.
- ❖ سلمان زارع؛ استادیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
- ❖ حمید سرخیل؛ استادیار دانشکده محیط‌زیست کرج، البرز، ایران.
- ❖ جواد بذاق جمالی؛ دانشیار دانشکده محیط‌زیست کرج، البرز، ایران.
- ❖ سیامک حشمتی؛ دانشجوی عمران محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست کرج، البرز، ایران.

چکیده

یکی از روش‌های معمول برای کنترل حرکت ماسه‌های روان و کنترل گرد و غبارهای حاصله، مالچ پاشی بر سطح آن‌ها است. با وجود استفاده‌های مکرر از مالچ‌های نفتی، به دلیل هزینه‌های بسیار سنگین و مشکلات زیست‌محیطی، پژوهش‌ها و تلاش‌ها برای تولید مالچ‌های جدید سازگار با محیط‌زیست رو به افزایش است. در این تحقیق، از نسبت‌های مختلف سیمان، آهک، ماسه بادی و سرباره فولاد به‌عنوان مالچ سیمانی-سرباره‌ای برای تثبیت نمونه‌های ماسه‌زارهای منطقه رباط کریم استفاده شده است. استفاده از سرباره فولاد به دلیل مزیت‌های زیست‌محیطی حذف پسماند و خاصیت پوزلانی آن برای جایگزینی به جای قسمتی از سیمان می‌باشد. برای یافتن اختلاط بهینه و کاهش نمونه‌های آزمایشگاهی از روش طراحی آزمایش مخلوط استفاده شد و تأثیر درصد مختلف مواد تشکیل دهنده بر مقاومت برشی، فشاری، ضربه‌ای و درصد رطوبت تیمارهای مالچ سیمانی-سرباره‌ای بررسی شد. نتایج نشان می‌دهد که افزودن سرباره باعث افزایش مقاومت فشاری و برشی و همچنین قابلیت نگهداری رطوبت در مالچ ترکیبی جدید می‌شود. در نهایت با توسعه مدل ریاضی نتایج آزمایش‌ها، شش حالت مختلف برای بهینه‌سازی ترکیب مالچ سیمانی-سرباره‌ای در نظر گرفته شد، که تیمار ۶۸/۷۳۱٪ ماسه، ۲۷٪ سیمان، ۲/۹۷۹٪ سرباره فولاد و ۱/۳٪ آهک، بهترین ترکیب با در نظر گرفتن تمامی شاخص‌ها به دست آمد. برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از مدل ریاضی شش ترکیب بهینه مجدداً ساخته شده و آزمایش‌ها مجدداً بر روی آن‌ها صورت گرفته که نتایج بدست آمده حاکی از هم‌خوانی قابل قبول بین مقادیر پیش‌بینی شده و آزمایش شده می‌باشد.

کلید واژگان: گرد و غبار، مالچ سیمانی، طراحی آزمایش، سرباره فولاد

۱. مقدمه

ساخت مالچ‌های سازگار با محیط‌زیست و با صرفه اقتصادی برای کشوری مثل ایران امری مهم و حیاتی محسوب می‌شود، زیرا حدود ۸۰ میلیون هکتار از مساحت کشور شامل مناطق کویری، تپه‌های ماسه‌ای و مناطق با پوشش گیاهی کم بوده و بیابان‌زایی و فرسایش بادی و آسیب‌های زیست‌محیطی حاصله در حال حاضر تهدیدی جدی برای کشور است.

به‌طور کلی روش‌های مقابله با فرسایش بادی و تثبیت گرد و غبار شامل، تقلیل توان فرساینده‌گی باد و کاستن از سرعت و قدرت آن به کمتر از حد آستانه فرسایش و افزایش پایداری ذرات خاک در مقابل جریان باد یا ارتقاء آستانه فرسایش‌پذیری خاک‌ها می‌باشد. برای تحقق اصول ذکر شده، راه‌ها و روش‌های متنوع و متعددی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به احداث بادشکن، افزایش پوشش گیاهی، کم‌خاک‌ورزی، افزایش رطوبت خاک و یا کاربرد انواع مالچ اشاره کرد. اصولاً «کاربرد بادشکن» نماد روش‌هایی است که برای کاستن از سرعت باد در سطح خاک مورد استفاده قرار می‌گیرد. اما «کاربرد مالچ» نمایانگر روش‌هایی با هدف افزایش پایداری خاک در مقابل وزش باد و نیز فراهم کردن فرصتی برای انجام و استقرار سایر فعالیت‌های بیولوژیکی تثبیت ماسه‌ها، نظیر نهال‌کاری، بذرپاشی و قلمه‌کاری است [۲۲].

به‌طور کلی مالچ‌ها به سه دسته کلی مالچ‌های معدنی، شیمیایی و بیولوژیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. که هر یک دارای زیر شاخه‌هایی هستند. در این میان رایج‌ترین مالچ‌های مورد استفاده در دنیا مالچ‌های نفتی است که جزء مالچ‌های شیمیایی محسوب می‌شود. کاربرد مالچ‌های نفتی علاوه بر اثر مستقیم افزایش پایداری خاک در مقابل فرسایش بادی، آثار جانبی دیگری را در کوتاه‌مدت یا میان‌مدت به همراه دارند. از جمله این موارد می‌توان به ضریب جذب حرارت بالایی و ایجاد میکرو اقلیم‌های منطقه‌ای گرم مناسب برای پیدایش گردبادهای منطقه‌ای، گران‌قیمت بودن، آلودگی محصولات کشاورزی، خاک،

آب‌های زیرزمینی و هوا اشاره کرد [۳، ۷، ۲۰، ۲۲، ۲۴]. از این‌رو با توجه به دغدغه‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مالچ‌های نفتی، گرایش به استفاده از مالچ‌های طبیعی و غیرنفتی روزبه‌روز در حال افزایش است. از مزایای استفاده از مالچ‌های طبیعی عدم نیاز به تجهیزات پیچیده مالچ‌پاشی نفتی، استفاده هم‌زمان از سایر روش‌های سازگار با محیط‌زیست برای تثبیت ذرات گرد و غبار مانند کاشت گیاهان و درختچه‌ها، کاهش هزینه، استفاده از منابع زیستی و فناوری‌های بومی و ایجاد اشتغال است [۴].

بررسی اثر مقاومت مالچ‌های رسی در برابر باد نشان داد که مالچ‌های رسی زمانی که زیر بمباران ذرات موجود در جریان باد باشند، فرسایش یافته و هرچه تمرکز رس در تیمار مالچ و تعداد لایه‌ها زیادتر باشد پایداری آن در برابر فرسایش بیشتر است [۱۳]. استفاده از مالچ سرباره‌ای در به دام اندازی ذرات فرسایش یافته بادی در دستگاه سنجش فرسایش بادی نشان داد که مالچ‌های سرباره با تراکم ۷۵٪ و دانه‌بندی ۳۰-۴۵ میلی‌متر به‌صورت یک‌لایه بروی خاک بهترین عملکرد را در به دام‌اندازی گرد و غبار دارند [۲۳]. اثر مالچ‌های پلیمری با پایه پلی‌وینیل‌استات بر روی سه نوع خاک با بافت‌های متفاوت، در برابر باد همراه با ماسه ساینده، به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج تحقیق بیان می‌کند که استفاده از این پلیمر با مقدار ۲۵ گرم در متر مربع در شرایط آزمایشگاهی قادر به کنترل ۹۰ درصد فرسایش بادی با سرعت ۲۶ متر در ثانیه است [۱۸]. نوعی مالچ دوغابی، شامل مواد رس و آهک به‌عنوان یک ماده تثبیت‌کننده برای ماسه‌های روان دشت یزد مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که مقاومت تیمارهای اندازه‌گیری شده مالچ رسی - آهکی با بالا بردن نسبت رس تا ۲۰۰ گرم در یک لیتر آب افزایش می‌یابد [۱۱]. مطالعه و بررسی کارایی محلول ترکیبی کلرید کلسیم و کلرید منیزیم^۱ برای تثبیت ماسه و

^۱ Magnesium chloride

مزایا و معایب این گونه از مالچ‌ها صورت گیرد. همچنین در اکثر تحقیقات صورت گرفته روند استوار و نظام‌مندی در راستای انتخاب نمونه‌های مختلف آزمایش و همچنین تعیین ترکیب بهینه مالچ‌های مختلف صورت نگرفته است. لذا تحقیق حاضر درصدد است با استفاده از تئوری طراحی آزمایش‌ها (DoE^۱) اقدام به مشخص کردن ترکیب‌های مختلف مالچ برای آزمایش و نهایتاً تعیین ترکیب بهینه‌ای از مواد به کار رفته برای کنترل فرسایش بادی و تثبیت ماسه‌های روان نماید. در این راستا از ترکیب سیمان، آهک، سربراه فولاد و ماسه برای ساخت مالچ استفاده شده است. در این تحقیق سربراه فولاد به‌عنوان ضایعات صنعت فولادسازی برای اولین بار به عنوان جزئی از مالچ سیمانی و جایگزین مقداری از سیمان به دلیل خاصیت پوزولانی آن مورد استفاده قرار گرفته است. برای تعیین ترکیب تیمارهای مختلف از نرم‌افزار Design Expert 7 (DX7) برای تهیه طراحی آزمایش‌ها به روش طراحی آزمایش مخلوط^۴ استفاده شده است. همچنین برای بررسی کارایی مالچ سیمانی - سربراهای پیشنهادی و نیز تعیین ترکیب بهینه، چهار معیار مقاومت برشی، فشاری، ضربه‌ای و درصد رطوبت نمونه‌ها مد نظر قرار گرفته است.

۲. روش کار

این تحقیق به بررسی ترکیب بهینه نوعی مالچ ترکیبی جدید و سازگار با محیط‌زیست به‌منظور تثبیت منابع گرد و غبار پرداخته شده است. در این تحقیق به منظور تهیه ماسه (منبع ریزگرد) از ماسه‌زارهای اطراف شهرستان رباط کریم و پرنده (شهرک صنعتی شهر جدید پرنده) واقع در جنوب استان تهران استفاده شده است. این شهرستان به جهت واقع شدن در اقلیم خشک و وزش

جلوگیری از فرسایش بادی بر اساس آزمایش تونل باد، حاکی از کاهش فرسایش خاک در استفاده از این مالچ است [۲۰]. همچنین نتایج قابل قبولی در ارتباط با استفاده از ضایعات نیشکر و کارخانه‌های تولید شکر برای تثبیت ریزگردها در سال‌های اخیر به دست آمده است [۲، ۱۲]. بررسی کارایی مالچ ترکیبی میکرو سیلیکا، آهک و رس بر اساس اندازه‌گیری مقاومت برشی، مقاومت در برابر نفوذ، فرسایش خاک^۱ و سرعت آستانه اصطکاکی^۲ هفت و شصت روزه، نشان داد که با افزایش میکرو سیلیکا میزان فرسایش خاک تیمار شده کاهش و سرعت آستانه اصطکاکی افزایش می‌یابد [۱۹]. مالچ‌های شامل ترکیب‌های مختلفی از سیمان، رس، آهک و مواد مشابه تحت عنوان مالچ‌های سیمانی توسط برخی محققین به‌عنوان جایگزین مالچ‌های نفتی مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی آزمایشگاهی اثر سیمان پرتلند و کربنات کلسیم بر خاک‌هایی که در محیط به‌طور طبیعی با این دو ماده تثبیت شده‌اند بیان‌گر این موضوع است که هر دو نوع ترکیب به علت ایجاد پیوستگی بین ذرات آثار مثبتی در تثبیت ماسه‌های روان دارند. [۱]. تیمارهای مختلفی از مالچ سیمانی با ترکیب نسبت‌های مختلف سیمان پرتلند معمولی تیپ ۱، آهک و ماسه بادی پس از گذشت هفت روز مورد آزمایش‌های مقاومت فشاری و تونل باد قرار گرفتند، که نتایج نشان داد افزایش مقدار سیمان، مقاومت سله‌های ایجاد شده در سطح خاک را افزایش می‌دهد. همچنین هزینه‌های اجرایی مالچ جدید در حدود ۳۰ درصد هزینه‌های مالچ نفتی برآورد شد [۷]. تأثیر لایه ژئوتکستایل در افزایش مقاومت مالچ سیمانی با اندازه-گیری مقاومت فشاری نمونه‌ها با دستگاه نفوذسنج نشان داد که کاربرد مواد الیافی یا ژئوتکستایل‌ها به همراه مالچ سیمانی باعث کاهش مقدار سیمان مصرفی افزایش عمر مالچ و شاخص‌های پایداری و مقاومت فیزیکی مالچ سیمانی می‌گردد [۲۱]. به‌طور کلی تحقیقات صورت گرفته در زمینه مالچ با پایه سیمانی بسیار کم می‌باشد، از این‌رو لازم است تحقیقات بیشتری در راستای شناخت

^۱ Soil Loss

^۲ Threshold Friction Velocity

^۳ Design of Experiments

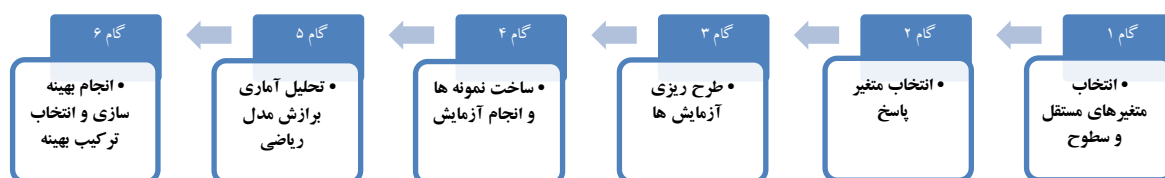
^۴ Mixture Design

آزمایش‌ها، می‌توان متغیرهای کلیدی را که بر مشخصه کیفی مورد نظر فرایند اثر می‌گذراند شناسایی کرد. با به‌کارگیری این روش می‌توان عامل‌های ورودی قابل کنترل را به‌طور سیستماتیک تغییر داد و آثار آن‌ها را بر روی پارامترهای محصول خروجی ارزیابی کرد. در انجام آزمایش‌ها دو مقوله مطرح می‌شود «طراحی آزمایش‌ها» و «تحلیل آماری». در تحلیل آماری بایستی از آزمایش‌های انجام شده اطلاعات مفید و موردنظر را به دست آورد و آن‌ها را معتبر کرد. روش‌های مختلفی برای طراحی آزمایش‌ها وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به روش‌های تک عاملی، فاکتوریل، پلاکت برمن، روش مکعبی، باکس بنکن، تاگوچی و طراحی مخلوط^۱ اشاره کرد [۸، ۱۴] در این تحقیق برای تعیین نمونه‌های آزمایشگاهی، به منظور به دست آوردن ترکیب بهینهٔ ماسه سیمانی-سرباره‌ای، از میان روش‌های موجود طراحی آزمایش‌ها، با در نظر گرفتن مجموع ۱۰۰ برای درصد اجزاء تشکیل دهندهٔ ماسه و همچنین ماهیت متغیرهای مورد مطالعه، از روش طراحی آزمایش مخلوط استفاده شده است [۹، ۱۷]. در این روش، علاوه بر ایجاد قدرت پیشگویی در زمینهٔ چگونگی تأثیر هر یک از اجزاء بر خواص نهایی، این امکان به محقق داده می‌شود که تأثیر هر یک از اجزاء را با توجه به درصد مقدار آن در شاخص‌های عملکردی محصول بررسی کند. در نمودار شکل ۱ روند تعیین ترکیب بهینه بر اساس الگوریتم طراحی آزمایش مخلوط نشان داده شده است.

بادهای شدید از بحرانی‌ترین مناطق فرسایش بادی و تشدید تولید و ورود گرد و غبار به مناطق مسکونی جنوبی تهران می‌باشد. ماسهٔ منطقهٔ مورد مطالعه با دانه‌بندی ریز و غیرچسبنده با $pH=7/1$ ، حاکی غیر شور با درجهٔ هدایت الکتریکی (dS/m) ۲/۳۱ است که برای رشد انواع گیاهان مناسب می‌باشد. با مطالعهٔ تحقیقات پیشین مالچ سیمانی-سرباره‌ای پیشنهادی در این تحقیق شامل ترکیبی از سیمان، ماسه بادی، آهک، سرباره فولاد و آب است [۷، ۲۰، ۲۳]. برای به دست آوردن ترکیب بهینه، ارزیابی و حصول اطمینان از کارایی مالچ ترکیبی سرباره‌ای پیشنهادی، چهار شاخص خاک مالچ‌پاشی شده به‌عنوان معیار عملکردی مالچ مدنظر قرار گرفته است، که عبارت‌اند از: (۱) مقاومت برشی، (۲) مقاومت فشاری، (۳) مقاومت در برابر ضربه و (۴) درصد رطوبت تیمارهای مختلف مالچ سیمانی-سرباره‌ای [۷، ۱۲، ۲۰]. بدین منظور آزمون‌های آزمایشگاهی برای به دست آوردن ترکیب بهینهٔ مالچ بر مبنای ترکیب‌های مختلف سیمان، ماسه بادی، آهک و سرباره فولاد و چهار معیار ذکر شده در نرم‌افزار DX7 بر اساس روش طراحی آزمایش‌ها مخلوط تهیه شده است.

۱.۲. طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها که در سال ۱۹۲۰ معرفی شده، یکی از عمده‌ترین ابزارهای کنترل کیفیت قبل از تولید است، که غالباً در فعالیت‌های تحقیقات و توسعه و در مراحل اولیهٔ تولید به کار می‌رود [۱۴]. در روش طراحی



شکل ۱. روند تعیین ترکیب بهینه بر اساس الگوریتم طراحی آزمایش

^۱ Mixture Design

۱. محدوده تغییرات متغیرهای آزمایش ارائه شده است. لازم به ذکر است که محدوده تغییرات عوامل مستقل بیشتر بر اساس نتایج مطالعات منبع شماره [۷] و انجام یک سری آزمایش‌های غربالگری محدود به دست آمده است.

لازم به توضیح است به دلیل ملاحظات اجرایی در پاشش مالچ تغییری در مقدار آب اضافه شده به مواد صورت نگرفته است و به ازای هر ۱ کیلو گرم از مواد جامد (ماسه، سیمان، سرباره و آهک) یک لیتر آب به مالچ اضافه شده است.

$$A+B+C+D=100 \quad \text{رابطه (۱)}$$

در ادامه هر یک از این گام‌ها به اختصار توضیح داده شده است.

گام ۱: انتخاب متغیرهای مستقل و سطوح

در این تحقیق با مبنا قرار دادن مالچ سیمانی توسعه داده شده در تحقیق ارائه شده در منبع شماره [۷] چهار متغیر میزان درصد سیمان، آهک، سرباره فولاد و ماسه در طراحی آزمایش‌ها به عنوان متغیر مستقل در نظر گرفته شده است. لازم به توضیح است که در روش طراحی مخلوط مجموع اعضا ثابت است (در این طراحی ۱۰۰). از این رو می‌توان تغییرات هر عامل نسبت به سایر عوامل را با توجه به تأثیر آن در پاسخ مشاهده کرد، این موضوع به بیان ریاضی در رابطه ۱ نشان داده شده است. در جدول

جدول ۱. متغیرهای آزمایش و محدوده تغییرات آن‌ها (درصد وزنی)

نوع ماده	علامت اختصاری	محدوده (%)
ماسه	A	$59 \leq A \leq 69$
سیمان	B	$27 \leq B \leq 37$
سرباره فولاد	C	$27 \leq C \leq 37$
آهک	D	$0.3 \leq D \leq 1.3$

روش مخلوط از نرم‌افزار DX7 استفاده شده است. با توجه به اینکه محدوده تغییرات معیارها کوچک و دامنه تغییرات آن‌ها با هم برابر نیست، از روش *D-Optimal* در الگوریتم طراحی مخلوط استفاده شد. آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار DX7 در جدول ۲ نشان داده شده است.

گام ۴: ساخت نمونه‌ها و انجام آزمایش

برای انجام آزمایش‌های نامبرده شده در حدود ۵۰۰ کیلوگرم از ماسه، ماسه‌زارهای اطراف شهرستان رباط کریم و پرنده به آزمایشگاه انتقال داده شد. سپس سینی‌هایی به ابعاد $100 \times 30 \times 2$ توسط ماسه بادی منطقه مورد مطالعه پر و سطح سینی‌ها تسطیح و آماده برای پاشیدن مالچ شدند (شکل ۲).

گام ۲: انتخاب متغیر پاسخ

مقاومت برشی، فشاری، مقاومت در برابر ضربه خاک مالچ پاشی شده و درصد رطوبت تیمارهای مختلف مالچ از مهم‌ترین متغیرهای پاسخی هستند که به‌عنوان معیارهای عملکردی مالچ سیمانی-سرباره‌ای قابل اندازه‌گیری هستند [۷، ۱۲، ۱۹]. البته معیار دیگری همچون مقاومت سایشی را هم می‌توان اندازه‌گیری کرد که در این تحقیق به دلیل عدم تفاوت این معیار برای نمونه‌های مورد آزمایش از بیان آن صرف‌نظر شده است. از این رو چهار شاخص ذکر شده به‌عنوان متغیرهای پاسخ در این تحقیق در نظر گرفته شده است.

گام ۳: طرح ریزی آزمایش‌ها

همان‌طور که اشاره شد برای طراحی آزمایش‌ها به

جدول ۲. آزمایش‌های طراحی شده توسط نرم‌افزار DX77

شماره طرح	ترتیب اجرا	A (%)	B (%)	C (%)	D (%)
۱	۱۰	۶۹	۲۷	۳/۷	۰/۳
۲	۶	۵۹	۳۶	۳/۷	۱/۳
۳	۳	۶۹	۲۸	۲/۷	۰/۳
۴	۱۱	۵۹	۳۷	۳/۷	۰/۳
۵	۱۵	۶۹	۲۷	۲/۷	۱/۳
۶	۲	۶۰	۳۷	۲/۷	۰/۳
۷	۱۷	۶۶/۵	۲۹/۵	۳/۴۵	۰/۵۵
۸	۵	۶۴	۳۲	۳/۲	۰/۸
۹	۱	۵۹	۳۷	۲/۷	۱/۳
۱۰	۱۳	۶۱/۵	۳۴/۵	۲/۹۵	۱/۰۵
۱۱	۴	۶۸	۲۷	۳۱/۷	۱/۳
۱۲	۱۶	۶۶/۵	۲۹/۵	۲/۹۵	۱/۰۵
۱۳	۷	۶۱/۵	۳۴	۳/۴۵	۱/۰۵
۱۴	۱۴	۶۶	۲۹/۵	۳/۴۵	۱/۰۵
۱۵	۹	۶۲	۳۴/۵	۲/۹۵	۰/۵۵
۱۶	۱۵	۶۱/۵	۳۴/۵	۳/۴۵	۰/۵۵
۱۷	۸	۶۶/۵	۳۰	۲/۹۵	۰/۵۵



شکل ۲. سینی‌های آزمایش آماده برای مالچ پاشی

یک لیتر آب بر روی سطح نمونه‌ها پاشیده شد. پس از گذشت یک هفته از زمان پاشیدن مالچ نمونه‌ها کاملاً خشک شد. لازم به توضیح است که دو نمونه شاهد، شاهد ۱، ماسه بادی بدون مالچ (صرفاً آب پاشی صورت گرفته) و شاهد ۲، مالچ کاملاً تهیه شده از دوغاب سیمان نیز تهیه شده است، که فقط آزمایش مقاومت برشی و مقاومت فشاری در مورد آن‌ها ثبت شده است.

برای یکسان و متناسب نمودن اندازه ذرات ترکیبات مورد استفاده مانند ماسه بادی و همین‌طور آهک تمامی مواد مورد استفاده از الک مش نمره ۴ (۴/۷۵ میلی‌متر) عبور داده شده‌اند. در ادامه نحوه انجام هر یک از آزمایش‌ها به اختصار توضیح داده شده است. لازم به توضیح است که به منظور استحکام مالچ سیمانی-سرباره‌ای در دو تکرار با فاصله زمانی ۲۴ ساعت

گام ۵: تحلیل آماری برازش مدل ریاضی

انواع مختلفی از آزمون‌های آماری برای بررسی نتایج آزمایش تیمارهای مختلف مورد استفاده قرار گرفته شد. در این تحقیق به منظور مقایسه آماری نتایج آزمایش‌ها با استفاده از نرم افزار آماری SPSS، تجزیه واریانس یک طرفه و آزمون چند دامنه‌ای دانکن صورت گرفته است. آزمون دانکن برای بررسی معنی‌داری اختلاف بین میانگین‌های مورد مقایسه است.

در طراحی آزمایش قدم بعدی برازش یک مدل موجه بر نتایج می‌باشد. از آنجایی که در اکثر مسائل مربوط به طراحی آزمایش‌ها نهایتاً مدل‌های برازش شده به منظور بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، لذا از مدل‌های چند جمله‌ای‌ها و توابع خطی، که در تمام امتدادها از دقتی یکسان برخوردارند برای برازش مدل استفاده می‌شود [۹]. برای انتخاب مدل مناسب استفاده از آنالیز واریانس استفاده می‌شود. در این تحقیق در آنالیز واریانس مقدار α ، ۰/۰۵ منظور شده است لذا مدل و عواملی موثر هستند که مقادیر اولیه P -Value آن‌ها از ۰/۰۵ کمتر باشد [۸، ۹].

اگر نتایج بدست آمده از مدل با نتایج تجربی مطابقت نداشته و یا قدرت تخمین نتایج در سایر نقاط ضعیف بوده و مدل نتایج دور از انتظار حاصل کند، می‌توان از توابع تبدیل توانی و سایر توابع استفاده کرد که بر اساس مقادیر پارامتر لامبادا منحنی $Box-Cox$ می‌توان مناسب‌ترین تبدیل توانی را بدست آورد. برای هیچ کدام از چهار پاسخ این تحقیق نیاز به اعمال تبدیل توانی نمی‌باشد [۸، ۱۶]. در این تحقیق برازش مدل ریاضی، در نرم‌افزار DX7 از مدل مرتبه دوم به همراه استراتژی برازش حذف پس‌رونده^۱ استفاده می‌شود.

گام ۶: انجام بهینه‌سازی و انتخاب ترکیب بهینه

بعد از اینکه تأثیر عوامل و برهم‌کنش‌های موجود بر روی هر یک از پاسخ‌ها بررسی شد، به منظور بهینه‌سازی

الف) مقاومت برشی (SS): برای تعیین مقاومت برشی نمونه‌ها از دستگاه پره برش مینیاتوری استفاده شد، که با ۸ تا ۱۰ مورد تکرار برای هر نمونه (سینی)، میانگین نتایج تکرار آزمایش برای تجزیه و تحلیل به نرم‌افزار DX7 وارد شد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D4648 / D4648M - 16 صورت گرفته است.

ب) مقاومت فشاری (CS): در این تحقیق برای تعیین مقاومت فشاری خاک مالچ پاشی از آزمایش دستگاه نفوذسنج و یا پنرومتر، بر روی نمونه‌های با مقاومت سیمان ۹۰٪ (یک ماهه) استفاده شد. در آزمایش هم ۸ تا ۱۰ تکرار بر روی هر نمونه از سینی خاک تیمار شده انجام شده و میانگین نتایج برای تجزیه و تحلیل وارد نرم‌افزار DX7 شد. این آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D 1558 & D 2573 صورت گرفته است.

ج) مقاومت در برابر ضربه (IS): با رها کردن میله‌ای فولادی با نوک مخروطی با زاویه ۴۵ درجه، به طول ۱۵ سانتی‌متر و به وزن ۱۵۰ گرم از ارتفاع ۱/۵ متری به صورت عمود بر روی سطح سینی‌ها در ۱۰ نقطه متفاوت، میزان مقاومت سینی خاک تیمار شده بر اساس عمق نفوذ میله سنجیده شد [۱۲].

د) درصد رطوبت (MC): برای تعیین درصد رطوبت تیمارهای مختلف مقداری از هر کدام یک سینی‌ها (پس از گذشت یک هفته) برداشته و پس از اندازه‌گیری وزن نمونه انتخاب شده در داخل ظروف آلومینیومی قرار گرفت. سپس این ظرف‌ها به مدت ۲۴ ساعت در داخل آون قرار گرفتند تا بعد از خشک شدن کامل دوباره وزن شوند. نهایتاً درصد رطوبت تیمارهای مختلف خاک با استفاده از اختلاف بین وزن حالت طبیعی و خشک بر اساس رابطه ۲ محاسبه شد [۵].

$$MC = \frac{(W_w - W_s)}{W_s} \times 100 \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن MC میزان رطوبت خاک بر حسب درصد، W_w وزن تیمار در حالت طبیعی بر حسب گرم و W_s وزن تیمار در حالت خشک بر حسب گرم می‌باشد.

^۱ Backward Elimination Regression

تلفیقی از هر چهار پاسخ، را در بر داشته باشد، (روابط ۴ تا ۹) ارائه شده است. لازم به ذکر است که در فرایند بهینه‌سازی اهمیت تمامی پاسخ‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.

رابطه (۴) $Max(SS)$

رابطه (۵) $Max(CS)$

رابطه (۶) $Max(-IS)$

رابطه (۷) $Max(MC)$

رابطه (۸) $Max(SS \times CS)^{1/2}$

رابطه (۹) $Max(SS \times CS \times (-IS) \times MC)^{1/4}$

محدودیت همه توابع هدف یکسان بوده و شرح زیر می‌باشد (روابط ۱۰ تا ۱۴).

رابطه (۱۰) $59 \leq A \leq 69$

رابطه (۱۱) $27 \leq B \leq 37$

رابطه (۱۲) $2.7 \leq C \leq 3.7$

رابطه (۱۳) $0.3 \leq D \leq 1.3$

رابطه (۱۴) $A + B + C + D = 100$

۳. نتایج

در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مختلف بر روی تیمارهای مختلف مالچ مورد تحلیل

می‌توان از دو روش عددی و گرافیکی استفاده کرد، که در این تحقیق از روش بهینه‌سازی عددی استفاده گردیده است. در نرم‌افزار DX7 بهینه‌سازی عددی با استفاده از توابع مطلوبیت برای پیدا کردن طرح بهینه استفاده می‌شود. ابتدا یک تابع مطلوبیت باید برای هر پاسخ تعریف شود. در یک طرح بهینه‌سازی عددی، طرح اختلاط بهینه مقدار میانگین هندسی (D) توابع مطلوبیت (d_i) در محدوده ممکن را بر اساس مدل‌های برازش شده بر پاسخ‌ها با استفاده از تابع مطلوبیت عمومی که در رابطه ۳ نشان داده شده، بهینه می‌کند [۶، ۸، ۹].

رابطه (۳)

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

که در آن n تعداد پاسخ‌هایی هست که در رابطه بهینه‌سازی مد نظر قرار گرفته، r_i بیانگر میزان اهمیت هر یک از توابع مطلوبیت d_i است. مقدار r_i از ۱ برای کمترین تا ۵ برای بیشترین اهمیت تغییر می‌کند. مقدار توابع مطلوبیت d_i هم از صفر برای یک پاسخ غیر مطلوب تا ۱ برای یک پاسخ مطلوب تغییر می‌کند. برای مقادیر D نزدیک به ۱، ترکیب بدست آمده از معیارهای مختلف بهینه عمومی است، و مقادیر پاسخ نزدیک به مقادیر هدف است، و اگر هر کدام از پاسخ‌ها یا عوامل در خارج از محدوده مطلوبیت خود قرار بگیرند، مقدار کلی تابع صفر می‌شود. در رویکرد بهینه‌سازی عددی، اهداف می‌توانند متغیرهای طراحی مخلوط یا پاسخ‌ها باشند. در مورد پاسخ‌ها، بهینه‌سازی می‌تواند یکی از موارد حداکثر، حداقل، مقدار مشخص یا قرار گرفتن پاسخ در محدوده معین باشد. هدف اصلی این مطالعه، ایجاد یک مخلوط مالچ سیمانی-سرباره‌ای با در نظر گرفتن معیارهای مختلف مقاومتی و فیزیکی (پاسخ‌ها) است. در ادامه مدل ریاضی شش معیار برای بهینه کردن ترکیب مالچ پیشنهادی که بیشترین مقاومت برشی، فشاری، در برابر ضربه، درصد رطوبت و تلفیقی از مقاومت برشی، فشاری و

آنالیز ANOVA تیمارهای مختلف مالچ سیمانی - سربراهای در جدول ۳، حاکی از اختلاف معنی دار مقاومت برشی نمونه مالچ‌های مختلف دارد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که مالچ ترکیبی شماره‌های یک و نه (جدول ۲) دارای بالاترین مقاومت برشی و به صورت یکسان برابر 26875 N/Cm^2 در میان سایر تیمارهای دیگر می‌باشند. در شکل ۳ نمودار میله‌ای میانگین نتایج مقاومت برشی و همچنین گروه‌بندی نتایج بر اساس آزمون چند دامنه‌ای دانکن ارائه شده است. مقادیر مقاومت برشی برای نمونه شاهد ۱ و ۲ به ترتیب برابر با $0/05$ و $0/68 \text{ N/Cm}^2$ می‌باشد.

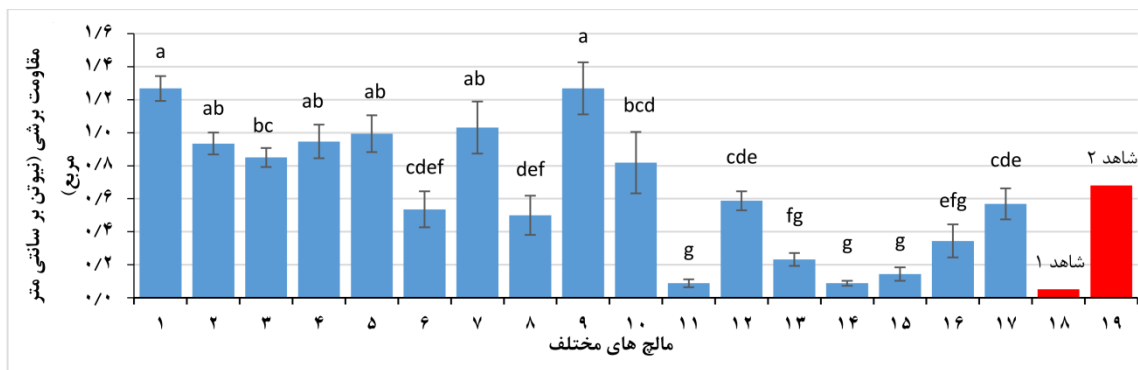
آماره قرار گرفته و با استفاده از نرم‌افزار DX7 مدل ریاضی بر روی داده‌های نتایج آزمایش‌ها برازش شده و در نهایت با استفاده از ابزار بهینه سازی نرم افزار مذکور، ترکیب بهینه برای مالچ سیمانی - سربراهای بر اساس معیارهای مختلف ارائه شده است.

۱.۳. تحلیل آماری

در جدول‌های ۳ تا ۶ آنالیز واریانس (ANOVA)، و در شکل‌های ۳ تا ۶ نمودار میله‌ای و نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن برای مقاومت برشی، فشاری و ضربه‌ای و همچنین درصد رطوبت تیمارهای مختلف که در نرم‌افزار SPSS انجام شده، ارائه شده است.

جدول ۳. تحلیل آماری داده‌های نتایج آزمایش مقاومت برشی (N/Cm^2)

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
مالچ‌های مختلف (بین طرح‌های مختلف)	۱۸/۰۸	۱۶	۱/۱۳	۱۳/۶۲	۰
خطا (برای هر طرح)	۹/۲۹۴	۱۱۲	۰/۰۸۳	-	-
کل	۲۷/۳۷۵	۱۲۸	-	-	-



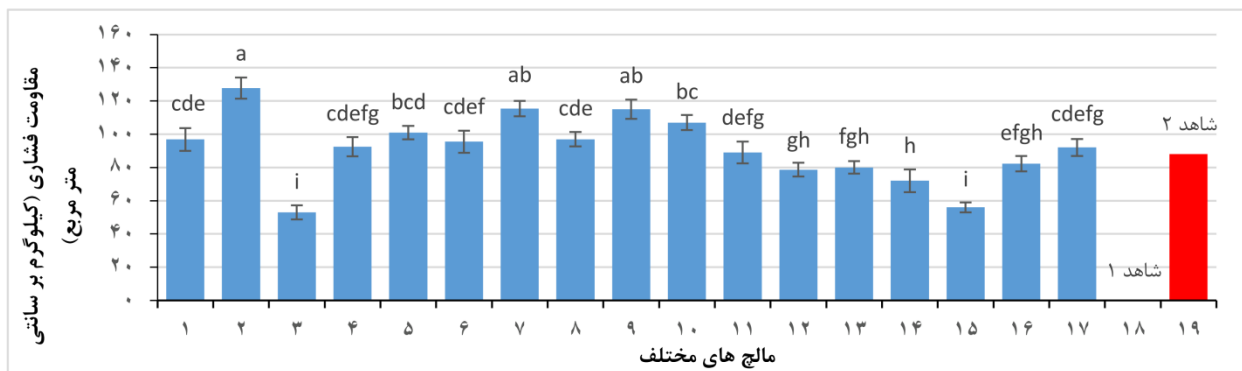
شکل ۳. نمودار میله‌ای مقاومت برشی در تیمارهای مختلف و نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن

تیمارهای دیگر می‌باشند. در شکل ۴ نمودار میله‌ای میانگین نتایج مقاومت فشاری و همچنین گروه‌بندی نتایج بر اساس آزمون دانکن ارائه شده است. مقادیر مقاومت فشاری برای نمونه شاهد ۱ و ۲ به ترتیب برابر با $0/0$ و 88 Kg/Cm^2 می‌باشد.

همچنین آنالیز ANOVA مقاومت فشاری تیمارهای مختلف مالچ سیمانی - سربراهای در جدول ۴، حاکی از اختلاف معنی دار مقاومت فشاری نمونه مالچ‌های مختلف دارد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تیمار شماره دو و نه، دارای بالاترین مقاومت فشاری و به ترتیب برابر $125/128 \text{ Kg/Cm}^2$ و 115 Kg/Cm^2 در بین سایر

جدول ۴. تحلیل آماری داده‌های نتایج آزمایش مقاومت فشاری (Kg/Cm^2)

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
مالچ‌های مختلف (بین طرح‌های مختلف)	۶۲۴۳۱/۴	۱۶	۳۹۰۱/۹۶	۱۴/۵۳۶	۰
خطا (برای هر طرح)	۴۰۸۰۲/۷	۱۵۲	۲۶۸/۴۳۹	-	-
کل	۱۰۳۲۳۴	۱۶۸	-	-	-



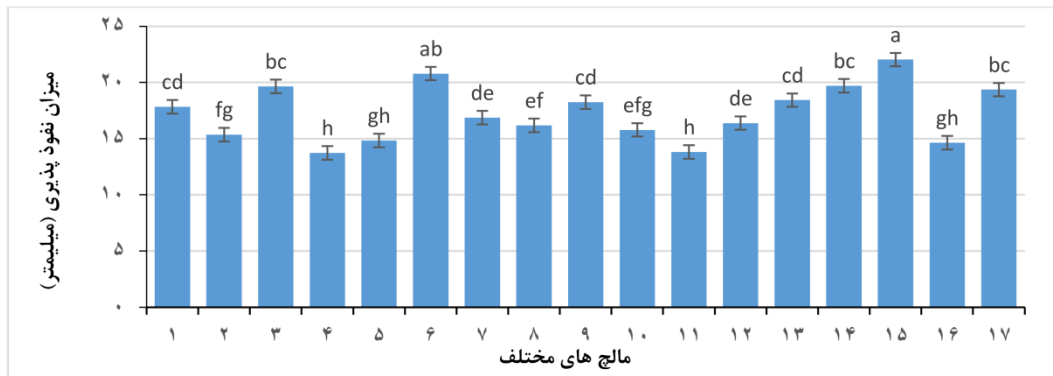
شکل ۴. نمودار میله‌ای مقاومت فشاری در تیمارهای مختلف و نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن

در نهایت در جدول ۶، آنالیز ANOVA تیمارهای مختلف مالچ سیمانی-سرباره‌ای حاکی از اختلاف معنی‌دار در درصد رطوبت نمونه مالچ‌های مختلف دارد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تیمار شماره ۱ یازده دارای بالاترین درصد رطوبت در بین تیمارهای دیگر می‌باشد. در شکل ۵ نمودار میله‌ای میانگین نتایج مقاومت ضربه‌ای و همچنین گروه‌بندی نتایج بر اساس آزمون دانکن ارائه شده است.

در جدول ۵، آنالیز ANOVA، مقاومت ضربه‌ای تیمارهای مختلف مالچ سیمانی-سرباره‌ای حاکی از اختلاف معنی‌دار مقاومت در برابر ضربه نمونه مالچ‌های مختلف دارد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که تیمار شماره چهار دارای بالاترین مقاومت در برابر ضربه و کمترین میزان عمق نفوذ که برابر ۱۳/۷۴ میلی‌متر است در میان سایر تیمارهای دیگر می‌باشد. در شکل ۵ نمودار میله‌ای میانگین نتایج مقاومت ضربه‌ای و همچنین گروه‌بندی نتایج بر اساس آزمون دانکن ارائه شده است.

جدول ۵. تحلیل آماری داده‌های نتایج آزمایش مقاومت ضربه‌ای (mm)

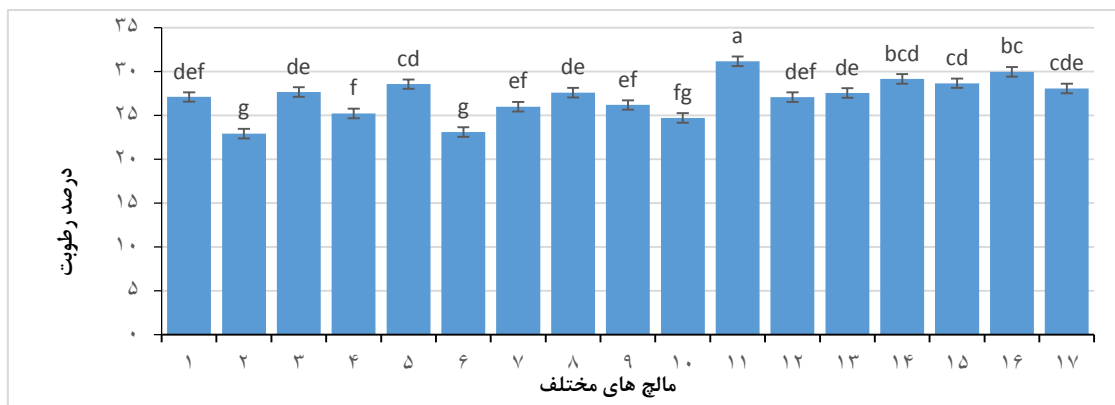
منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
مالچ‌های مختلف (بین طرح‌های مختلف)	۷/۵۷۵	۱۶	۰/۴۷۳	۰	۰
خطا (برای هر طرح)	۰/۰۰۰	۰	۰	-	-
کل	۷/۵۷۵	۱۶	-	-	-



شکل ۵. نمودار میله‌ای مقاومت ضربه‌ای در تیمارهای مختلف و نتایج آزمون مقایسه میانگین دانکن

جدول ۶. تحلیل آماری داده‌های نتایج آزمایش درصد نگهداشت رطوبت (%).

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	Sig.
مالچ‌های مختلف (بین طرح‌های مختلف)	۳۷۲/۶۳۱	۱۶	۲۳/۲۹	۲۱/۲۳	۰
خطا (برای هر طرح)	۷۴/۶۰۴	۶۸	۱/۰۹	-	
کل	۴۴۷/۲۳۵	۸۴	-	-	



شکل ۶. نمودار میله‌ای درصد نگهداشت رطوبت در تیمارهای مختلف و نتایج آزمون چند دامنه‌ای دانکن

استفاده از آنالیز واریانس بهترین مدل چندجمله‌ای برای هر کدامیک از پاسخ آزمایش‌ها ارائه شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، در این تحقیق از مدل مرتبه دوم به همراه استراتژی برازش حذف پس‌رونده برای برازش معادله چند جمله‌ای استفاده شده است. بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر چهار پاسخ آزمایش‌ها نشان داد که

۲.۳. برازش مدل و بررسی تأثیر اجزاء سازنده

مالچ بر پاسخ آزمایش‌ها

در ادامه برای بررسی تأثیر اجزاء سازنده مالچ بر خصوصیات مقاومتی و درصد نگهداشت رطوبت همچنین برای تعیین ترکیب بهینه مالچ سربراه‌ای مورد نظر، با

همان طور که مشاهده می شود مقادیر P -Value برای تمامی مدل های برازش شده کمتر از ۰/۰۵ می باشد، لذا بر مبنای علم آمار مدل های انتخاب شده از نظر آماری معنادار هستند.

مدل درجه دو کاهش یافته^۱ برای مقاومت برشی و ضربه ای و مدل خطی برای مقاومت فشاری و درصد نگهداشت رطوبت به خوبی روند موجود در پاسخ ها را نشان می دهند. نتایج آنالیز واریانس مدل های برازش شده برای هر چهار معیار در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷. آنالیز ANOVA برای مدل های انتخاب شده برای هر چهار پاسخ

پاسخ	نوع مدل برازش شده	مربعات مجموع	درجه آزادی	مربعات میانگین	F-Value	p-value Prob > F
SS	درجه دو کاهش یافته	۲/۴۱	۷	۰/۳۴	۶/۱۹	۰/۰۰۷۲
CS	خطی	۱۸۴۹/۱۷	۳	۶۱۶/۳۹	۱/۶۱	۰/۰۲۳۶
IS	درجه دو کاهش یافته	۵۶/۶۴	۴	۱۴/۱۶	۳/۰۵	۰/۰۴۰۰
MC	خطی	۲۸/۵۳	۳	۹/۵۱	۲/۳۹	۰/۰۱۱۵

نمی باشند [۱۴].

همان طور که در نمودارهای شکل ۷ نشان داده شده است خطاها به علت مشاهده نشدن یک روند خاص هم واریانس هستند و نتایج به دست آمده مؤید نرمال بودن باقیمانده ها و استقلال داده ها است. همچنین نمودار نقطه ای احتمال نرمال باقیمانده ها برای تمامی چهار پاسخ شبیه یک خط مستقیم بوده لذا مدل های ارائه شده از کفایت لازم برخوردار هستند.

برای به دست آوردن درک بهتر از تأثیر هر یک از اجزاء بر روی پاسخ ها، نمودار اثر^۲ برای هر کدام از پاسخ ها (معیارها) رسم شده است (شکل ۸). منحنی اثر نشان می دهد که چگونه در یک مدل پیش بینی کننده، پاسخ (معیار) آزمایش چگونه با کاهش و افزایش یک جزء نسبت به مقدار آن در ترکیب مرجع^۳ تغییر می کند. در نرم افزار DX7 به طور پیش فرض ترکیب مرجع نقطه مرکز طراحی آزمایش ها است [۹].

در شکل ۸ اثر تغییر همه اجزاء را بر روی چهار معیار مقاومت برشی، فشاری و ضربه ای و همچنین درصد

در جدول ۸ مدل های چند جمله ای برازش شده بر اساس عوامل مستقل برای پاسخ آزمایش ها به همراه آماره های حسن برازش و کفایت مدل ها ارائه شده است. برای بررسی کفایت مدل ها از نمودارهای باقیمانده استفاده می شود. باقیمانده ها اختلاف بین داده های مشاهده ای و مقادیر به دست آمده از مدل است $(y_i - \hat{y}_i)$ که میزان خطای (e_i) مدل را برآورد می نمایند و این دو باید دارای خواص مشابه هم باشند. فرض بر این است که مقادیر e_i ها، تصادفی بوده و دارای توزیع نرمال با میانگین صفر و انحراف معیار ثابت هستند. از این رو نمودار نقطه ای احتمال نرمال باقیمانده ها شبیه یک خط مستقیم خواهد بود. همچنین رسم نمودار پراکنش خطاهای مشاهده شده (e_i) در مقابل مقادیر پیش بینی شده متغیر وابسته (\hat{y}_i) به تشخیص هم واریانسی یا ناهم واریانسی کمک می کند. اگر مدل برازش شده از صحت کامل برخوردار باشد، نمودار پراکنش خطاهای مشاهده شده (e_i) در مقابل مقادیر پیش بینی شده متغیر وابسته (\hat{y}_i) باید بی ساختار بوده و روند خاصی مشاهده نمی شود، لذا خطاها هم واریانس بوده و به هیچ متغیر دیگری از جمله متغیر پاسخ وابسته

¹ Reduced Quadratic Model

² - Trace plot

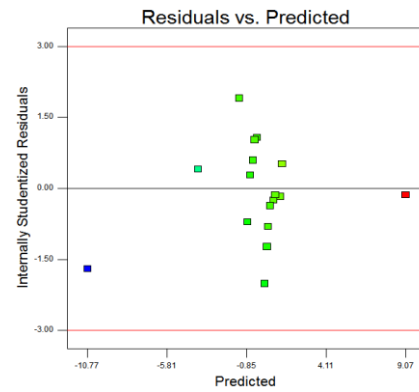
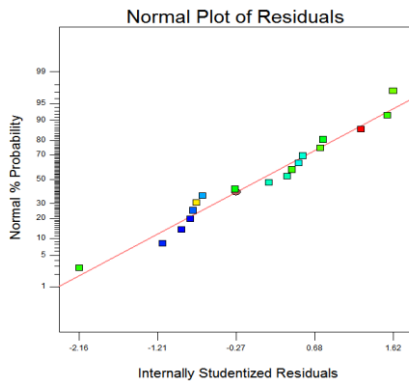
³ Reference Blend

افزایش و چنانچه به سمت چپ حرکت کنیم مقدار جزء کاهش می‌یابد. در روش طراحی مخلوط و بررسی نمودارهای اثر همیشه با افزایش یا کاهش یک جزء و بررسی تأثیر آن بر پاسخ، نسبت سایر اجزا ثابت بوده و به یک میزان کاهش یا افزایش می‌یابد و در حالت کلی مجموع اجزا ثابت باقی می‌ماند [۱۰].

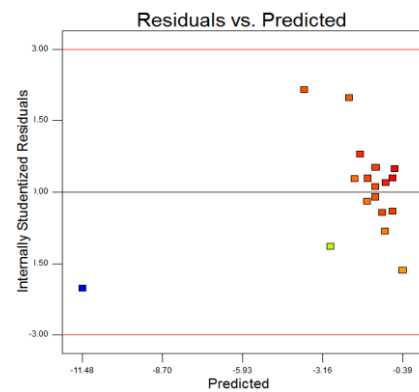
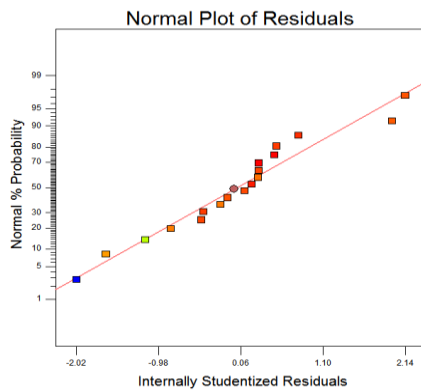
رطوبت نشان داده شده است. شیب نمودارها نشان دهنده حساسیت پاسخ نسبت به جزء مورد نظر است. همان‌طور که در نمودارهای اثر به منظور تشریح اثر اجزاء بر پاسخ یک نقطه مرکزی، (ترکیب مرجع)، که محل تقاطع منحنی‌های هر جزء است مینا در نظر گرفته می‌شود. سپس چنانچه از مرکز به سمت راست حرکت کنیم مقدار جزء مورد نظر نسبت به مقدار آن در ترکیب مرجع

جدول ۸. مدل‌های برازش شده بر روی هر چهار پاسخ

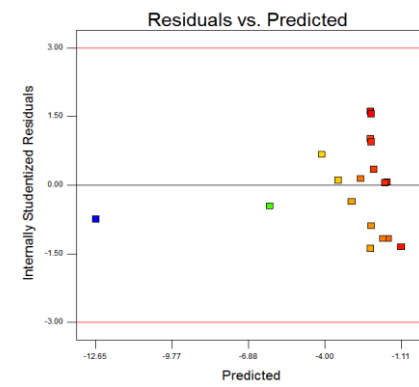
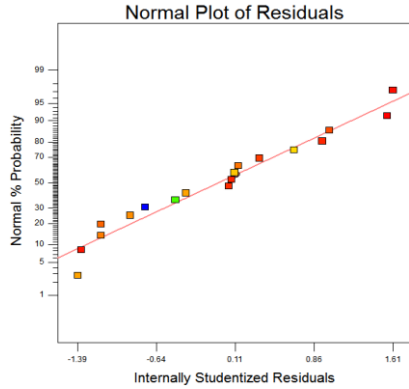
پاسخ	معادله برازش شده	شاخص‌های آماری	
مقاومت برشی (SS)	$SS = 29/87580 \times \text{Sand} + 116/83945 \times \text{Cement} - 11001/27640 \times \text{Steel Slag} + 1022/18232 \times \text{Lime} - 326/91852 \times \text{Sand} \times \text{Cement} + 11651/44509 \times \text{Sand} \times \text{Steel Slag} - 1159/14566 \times \text{Sand} \times \text{Lime} + 11921/1092 \times \text{Cement} \times \text{Steel Slag}$	انحراف استاندارد	۰/۲۴
		میانگین	۰/۷۲
		ضریب تغییرات (%)	۳۲/۸۴
		ضریب تعیین (R^2)	۰/۸۲
		ضریب تعیین تعدیل شده	۰/۶۹
مقاومت فشاری (CS)	$CS = -8/63052 \times \text{Sand} + 118/78448 \times \text{Cement} + 1388/38506 \times \text{Steel Slag} + 2092/16572 \times \text{Lime}$	انحراف استاندارد	۱۹/۵۹
		میانگین	۹۳/۶۵
		ضریب تغییرات (%)	۲۰/۹۲
		ضریب تعیین (R^2)	۰/۷۹
		ضریب تعیین تعدیل شده	۰/۶۸
مقاومت ضربه‌ای (IS)	$IS = -34/21592 \times \text{Sand} + 165/87663 \times \text{Cement} + 1534/06616 \times \text{Steel Slag} - 193/43995 \times \text{Lime} - 5988/76910 \times \text{Cement} \times \text{Steel Slag}$	انحراف استاندارد	۲/۱۶
		میانگین	۱۷/۴۴
		ضریب تغییرات (%)	۱۲/۳۶
		ضریب تعیین (R^2)	۰/۸۱
		ضریب تعیین تعدیل شده	۰/۷۳
درصد رطوبت (MC)	$MC = +36/18829 \times \text{Sand} + 2/10254 \times \text{Cement} + 78/92151 \times \text{Steel Slag} + 92/57277 \times \text{Lime}$	انحراف استاندارد	۱/۹۹
		میانگین	۲۷/۱۰
		ضریب تغییرات (%)	۷/۳۶
		ضریب تعیین (R^2)	۰/۷۹
		ضریب تعیین تعدیل شده	۰/۷۰
		ضریب تعیین پیش‌بینی	۰/۶۵



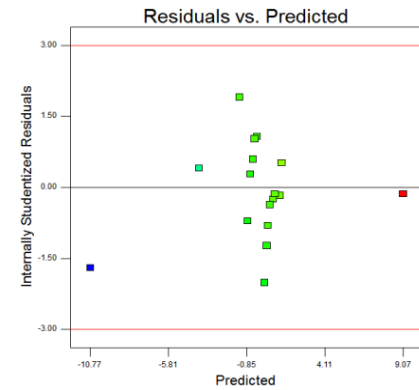
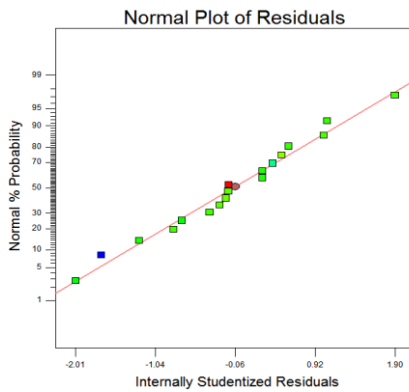
مقاومت برشی (SS)



مقاومت فشاری (CS)

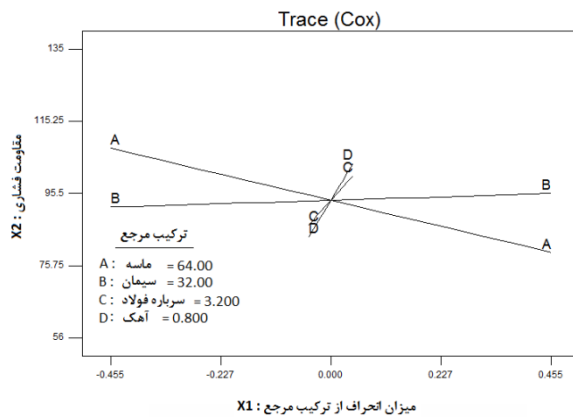


مقاومت ضربه‌ای (IS)

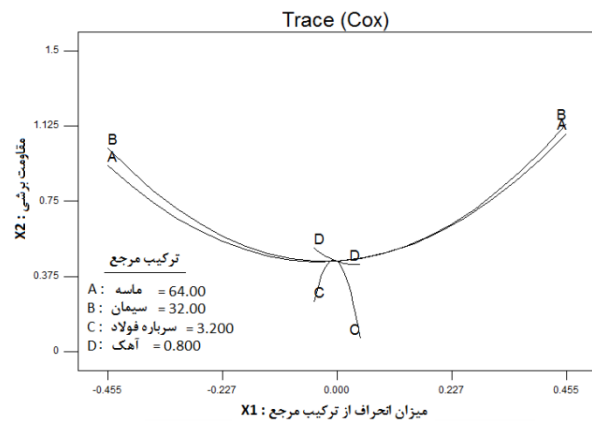


درصد رطوبت (MC)

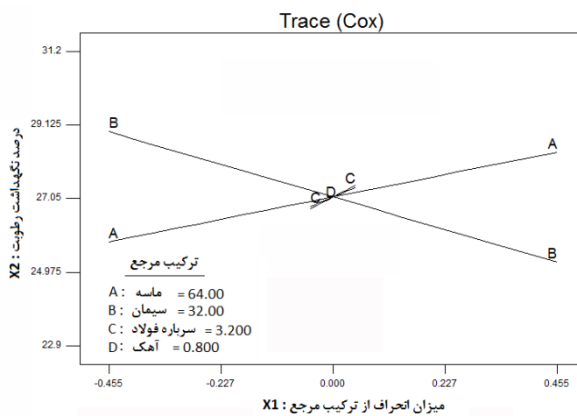
شکل ۷. آزمون‌های تشخیص کفایت، (راست) نمودار پراکنش خطای مشاهده شده در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده (چپ) نمودار نقطه‌ای احتمال نرمال باقیمانده‌ها برای متغیر پاسخ، (الف) مقاومت برشی (ب) مقاومت فشاری (ج) مقاومت ضربه‌ای (د) درصد نگاه‌داشت رطوبت



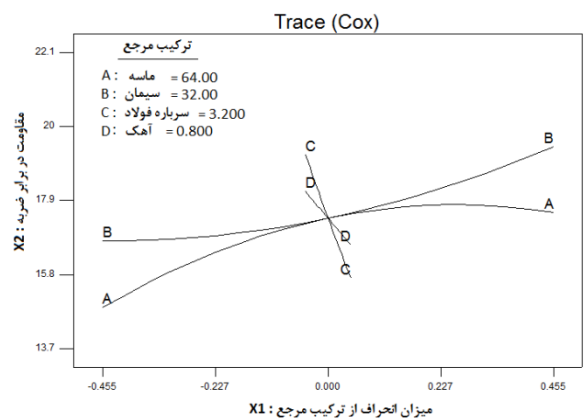
ب



الف



د



ج

شکل ۸. نمودار اثر اجزاء مالچ سیمانی-سربراه‌ای، (الف) مقاومت برشی (ب) مقاومت فشاری (ج) مقاومت ضربه‌ای (د) نگهداشت رطوبت

اثرگذاری کمتری برخوردار هستند. همچنین در شکل ۸ ج، نمودار اثر بیان می‌کند که از میان اجزاء مختلف، ماسه و سیمان ارتباط غیر خطی و سربراه و آهک ارتباط خطی با مقاومت ضربه‌ای دارند. در این میان با توجه به شیب خطوط مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت ضربه‌ای با افزایش میزان سربراه و آهک کاهش می‌یابد که البته تأثیر سربراه بیشتر از آهک می‌باشد و با افزایش میزان ماسه و سیمان مقاومت ضربه‌ای افزایش می‌یابد، که از بین این دو تأثیر سیمان در مقادیر بالاتر بیشتر از ماسه می‌باشد و در نهایت نمودار اثر مربوط به قابلیت درصد نگهداشت رطوبت نشان می‌دهد (شکل ۸ د) که همه اجزاء رابطه خطی با قابلیت نگهداشت رطوبت در تیمارهای مختلف مالچ ترکیبی سربراه‌ای دارند. از این

در شکل ۸ الف، هر چهار جزء رابطه غیر خطی نسبت به مقاومت برشی نشان می‌دهند که در این میان در محدوده تعریف شده رابطه سیمان و ماسه به صورت U شکل به طرف بالا و سربراه به صورت U شکل به طرف پایین و آهک دارای منحنی غیر خطی نزولی می‌باشد. حالت U شکل بودن سه جزء ماسه، سیمان و سربراه حاکی از این می‌باشد که برای بدست آوردن بیشترین مقاومت برشی هر سه دارای مقدار بهینه می‌باشند. نمودار اثر مربوط به مقاومت فشاری در شکل ۸ ب، نشان می‌دهد که همه اجزاء رابطه خطی با مقاومت فشاری دارند که از این میان ماسه رابطه عکس و سیمان و سربراه و آهک رابطه مستقیم دارند. با توجه به شیب خطوط نشان داده شده در شکل سیمان و سربراه از

فولاد $۲=۳/۲ \div (۲/۷+۳/۷)$ مورد استفاده قرار بگیرد. با مقایسه شکل‌های ۸ الف و ۹ الف می‌توان درستی این ادعا را تصدیق کرد.

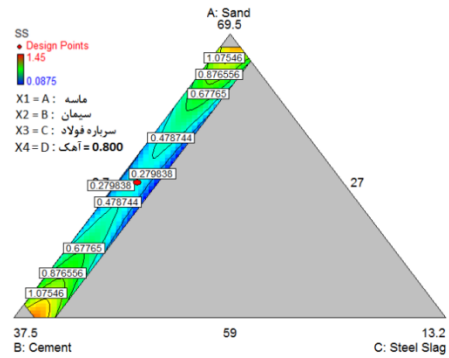
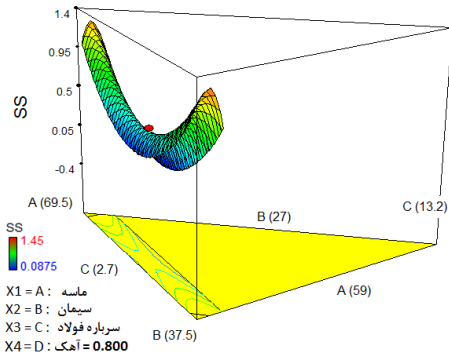
۳.۳. بهینه‌سازی عددی ترکیب مالچ

پس از ایجاد مدل رگرسیون بین متغیرهای طراحی مخلوط و پاسخ، به منظور بهینه‌سازی تابع هدف تمام متغیرها هم‌زمان و به طور مستقل تغییر می‌یابند و جواب بهینه برای هر یک از پاسخ‌ها به گونه‌ای است که ملزومات هر کدام از معیارها را برآورده می‌کند. بهینه‌سازی عددی با استفاده از توابع مطلوبیت می‌تواند برای پیدا کردن طرح بهینه استفاده شود [۱۵]. همان‌طور که قبلاً گفته شد ابتدا یک تابع مطلوبیت باید برای هر خاصیت تعریف شود. تابع مطلوبیت اعدادی بین ۰ تا ۱ می‌دهد و ممکن است به چندین روش تعریف شود. هدف اصلی این مطالعه، ایجاد یک مخلوط مالچ سیمانی-سرباره‌ای با در نظر گرفتن معیارهای مختلف مقاومتی و فیزیکی، بر اساس روش آماری طراحی آزمایش مخلوط است.

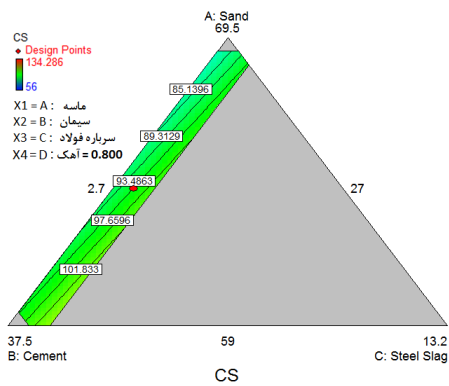
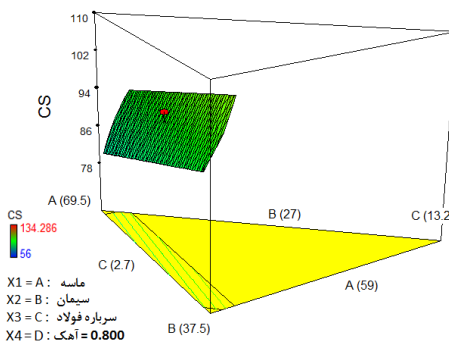
همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد شش تابع هدف مختلف (روابط ۴ تا ۹) برای تعیین طرح اختلاط بهینه برای مالچ پیشنهادی مد نظر قرار گرفته که شامل بیشینه کردن مقاومت برشی، فشاری، در برابر ضربه، درصد رطوبت و تلفیقی از مقاومت برشی، فشاری و هر چهار پاسخ است. نتایج حاصله از بهینه‌سازی (ترکیب درصد بهینه پارامترها) به صورت خلاصه در جدول ۹ ارائه شده است. با بررسی ترکیب‌های بهینه ارائه شده در جدول ۹ برای هر کدام از معیارهای بهینه‌سازی مشاهده می‌شود که، مقدار درصد ماسه در بیشینه‌سازی مقاومت برشی و درصد نگهداشت رطوبت و هر چهار پاسخ (معیار ششم) نسبت به بیشینه‌سازی مقاومت فشاری و ضربه‌ای بیشتر می‌باشد.

میان سیمان رابطه عکس و ماسه، سرباره و آهک رابطه مستقیم دارند. با توجه به شیب خطوط نشان داده شده در شکل آهک و سرباره تقریباً رفتاری یکسانی دارند و نسبت به ماسه تأثیر بیشتری دارند.

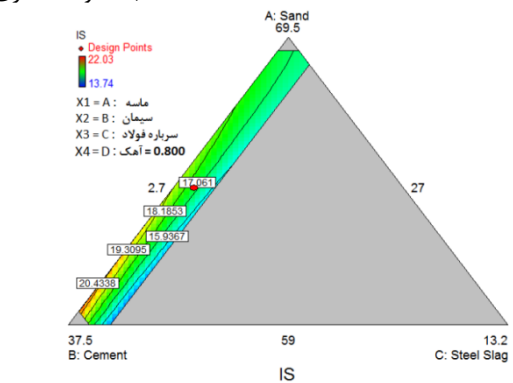
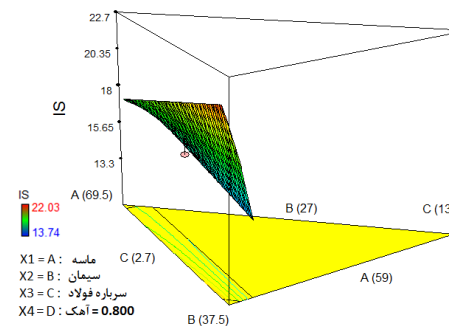
برای ارزیابی کیفی و کمی تأثیر هر جزء بر روی پاسخ‌ها (معیارها)، نمونه‌ای از نمودار سطح پاسخ دو و سه بعدی برای هر یک از پاسخ‌ها در شکل ۹ آورده شده است. نمودار سطح پاسخ برای هر معیار به صورت تابعی پیوسته از اجزاء تشکیل دهنده آزمایش‌ها می‌باشد. اما از آنجایی که چهار عامل مستقل در طراحی آزمایش‌ها در نظر گرفته شده و در فضای سه بعدی نمی‌توان تمامی چهار متغیر مستقل را نشان داد، لذا لازم است که یکی از متغیرها به صورت ثابت در نظر گرفته شود. از این‌رو شکل ۹ سطوح تراز پاسخ‌ها در ناحیه موجه آزمایش‌ها بر اساس میزان درصد متغیر سیمان، ماسه و سرباره آهن برای درصد ثابت آهک برابر با ۰/۸ نشان داده شده است. نمودارهای سطح پاسخ به طور کلی برای پیدا کردن درک مشاهده‌ای از تغییرات پاسخ نسبت به اجزاء تشکیل دهنده و همچنین انجام بهینه‌سازی گرافیکی پاسخ‌ها یا اجزاء ترکیب مورد استفاده قرار می‌گیرد. نمودارهای مشابه شکل ۹ را برای مقادیر ثابت دیگری از آهک و همچنین مقادیر ثابتی از سایر متغیرها هم قابل رسم می‌باشد. اما از آنجایی که در این تحقیق از بهینه‌سازی عددی استفاده خواهد شد، لذا بررسی و رسم سایر نمودار لزومی ندارد. با این وجود با مقایسه نمودارهای متناظر در شکل‌های ۸ و ۹ می‌توان صحت درستی تحلیل‌های صورت گرفته بر اساس نمودارهای اثر را بررسی کرد. برای مثال با بررسی شکل ۹ الف مشاهده می‌شود که با ثابت نگه داشتن مقدار آهک با افزایش مقدار درصد سیمان و هم‌زمان کاهش مقدار درصد ماسه و همچنین در حالت برعکس آن، مقدار بیشینه مقاومت برشی در شرایط بدست می‌آید که مقدار میانی بازه مجاز درصد سرباره



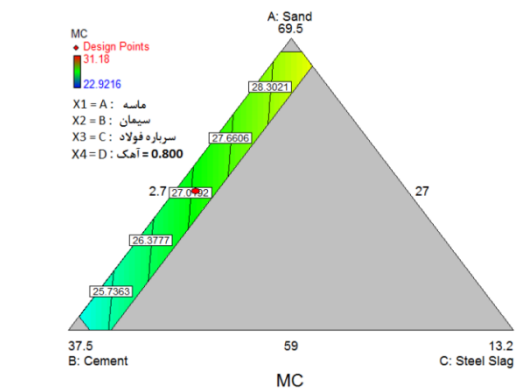
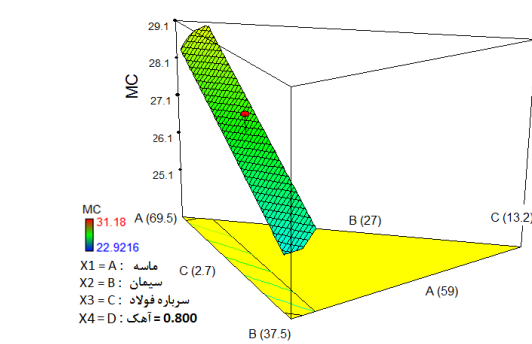
الف. مقاومت برشی - سطح پاسخ دو بعدی و سه بعدی



ب. مقاومت فشاری - سطح پاسخ دو بعدی و سه بعدی



ج. مقاومت ضربه‌ای - سطح پاسخ دو بعدی و سه بعدی



د. قابلیت نگهداشت درصد رطوبت - سطح پاسخ دو بعدی و سه بعدی

شکل ۹. نمودارهای سطح پاسخ دو بعدی و سه بعدی، (الف) مقاومت برشی (ب) مقاومت فشاری

(ج) مقاومت ضربه‌ای (د) نگه داشت رطوبت

جدول ۹. تابع‌های هدف و محدودیت‌های آن‌ها

شماره تابع هدف	مقادیر بهینه متغیرهای تصمیم (%)				مقادیر بهینه توابع هدف				تابع مطلوبیت
	ملمسه (A)	سیمان (B)	سرباره فولاد (C)	آهک (D)	مقاومت برشی SS	مقاومت فشاری CS	مقاومت در برابر ضربه IS	درصد نگهداشت رطوبت MC	
۱	۶۸/۹۹۹	۲۷/۳۳۴	۳/۳۶۷	۰/۳	۱/۵۵	-	-	-	۱
۲	۵۹	۳۶	۳/۷	۱/۳	-	۱۱۶/۲۴	-	-	۰/۷۶۹
۳	۵۹/۰۰۳	۳۵/۹۹۷	۳/۷	۱/۳	-	-	۱۴/۰۰	-	۰/۹۶۸
۴	۶۸	۲۷	۳/۷	۱/۳	-	-	-	۲۹/۳	۰/۷۷۲
۵	۵۹	۳۶/۵۰۶	۳/۱۹۴	۱/۳	۱/۴۵	۱۰۹/۸۱	-	-	۰/۸۲۹
۶	۶۸/۷۲۱	۲۷	۲/۹۷۹	۱/۳	۱/۰۴	۹۴/۷۰	۱۶/۲۹	۲۸/۹۹	۰/۶۴۷

زمان تمامی پاسخ‌ها را داشته‌اند.

۴.۳. اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبارسنجی نتایج و همچنین ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی‌کننده با ساخت نمونه‌های بهینه پیشنهاد شده در جدول ۹ مجدداً کلیه آزمایش‌ها برای هر شش نمونه برای مقایسه با نتایج پیش‌بینی‌شده توسط نرم‌افزار تکرار گردید که میانگین نتایج ۵ بار آزمایش در جدول ۱۰ ارائه شده است. علاوه بر این شاخص انحراف نسبی مطلق (ARD^1) نیز بر اساس رابطه ۱۵ به‌عنوان معیار دقت نتایج پیش‌بینی برای هر کدام یک از شش ترکیب بهینه محاسبه شده است.

$$ARD(\%) = \frac{Experimental - Model}{Experimental} \times 100 \quad \text{رابطه ۱۵}$$

که در آن $Experimental$ بیانگر مقدار نتایج آزمایش مجدد و $Model$ بیانگر مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل ریاضی پیشنهاد شده توسط نرم‌افزار می‌باشد [۹، ۱۵]. از نتایج جدول ۱۰ می‌توان مشاهده کرد، که هر چقدر تعداد اهداف (معیارها) بیشتر می‌شود دقت نتایج پیش‌بینی

این روند در مورد مقدار درصد سیمان دقیقاً بر عکس شرایط ماسه می‌باشد و درصد سیمان در بیشینه‌سازی مقاومت فشاری، ضربه‌ای و تلفیق مقاومت فشاری و برشی نسبت به سایر حالات بالاتر می‌باشد. اما در مورد سرباره مشاهده می‌شود که درصد آن در بیشینه‌سازی مقاومت برشی نسبت به مقاومت فشاری و ضربه‌ای و همچنین درصد نگهداشت آب کم می‌باشد. در مورد معیارهای تلفیقی (معیار پنجم و ششم) مقدار درصد سرباره فولاد کمتر هم شده است. اما آهک تقریباً از روند ثابتی پیروی می‌کند. نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که کمترین مقدار آهک در بیشینه‌سازی مقدار مقاومت برشی بوده و برای بقیه معیارها مقدار آن ثابت و برابر با ۱/۳ درصد می‌باشد. همچنین با مقایسه مقادیر بهینه محاسبه شده برای چهار پاسخ آزمایش‌ها (معیارهای ۱ تا ۴) نسبت به مقدار پاسخ‌های محاسبه شده برای بیشینه‌سازی هم‌زمان تمامی معیارها (معیار ششم) مشاهده می‌شود که به ترتیب برای مقاومت برشی، فشاری و ضربه‌ای و درصد نگهداشت رطوبت مقادیر بهینه به اندازه ۳/۱۸، ۲۲/۹۰، ۱۸/۵۳، ۱۶/۳۲ و ۱/۰۵ درصد اختلاف دارند. از این میان مقاومت برشی بیشترین و درصد نگهداشت رطوبت کمترین افت را نسبت به مقادیر بهینه خود در حالت بیشینه‌سازی هم-

¹ - Absolute Relative Deviation

شده کاهش می‌یابد.

جدول ۱۰. اعتبار سنجی نتایج بهینه‌سازی

شماره تابع هدف	مقاومت برشی SS			مقاومت فشاری CS			مقاومت در برابر ضربه IS			درصد رطوبت MC		
	پیش‌بینی شده	میانگین آزمایش	ARD (%)	پیش‌بینی شده	میانگین آزمایش	ARD (%)	پیش‌بینی شده	میانگین آزمایش	ARD (%)	پیش‌بینی شده	میانگین آزمایش	ARD (%)
۱	۱/۵۵	۱/۶۱	۳/۷۲	-	-	-	-	-	-	-	-	-
۲	-	-	-	۱۱۶/۲۳۹	۱۲۲/۵۰	۵/۱۱	-	-	-	-	-	-
۳	-	-	-	-	-	-	۱۴/۰۱	۱۳/۸۹	-۰/۸۶	-	-	-
۴	-	-	-	-	-	-	-	-	-	۲۹/۳	۲۵/۶۵	۱۴/۲۳
۵	۱/۴۵	۱/۷۶	۱۷/۶۱	۱۰۹/۸۱	۱۱۳/۵۰	۳/۲۵	-	-	-	-	-	-
۶	۱/۰۴	۱/۴۴	۲۷/۷	۹۴/۷	۱۲۳/۰۰	۲۱/۴	۱۶/۲۹	۱۲/۹۹	-۲۵	۲۸/۹۹	۲۱/۳۹	-۲۶

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش طراحی آزمایش مخلوط به طور مؤثری برای ساخت مدل ریاضی پیش‌بینی‌کننده عملکرد و تعیین ترکیب بهینه مالچ سیمانی سربراهای با در نظر گرفتن معیارهای مختلف فیزیکی و مقاومتی استفاده شده است. مدل‌های ریاضی بر اساس طرح آزمایش مخلوط برای چهار معیار مقاومت برشی، فشاری و ضربه‌ای و همچنین میزان درصد نگهداشت رطوبت توسعه یافته‌اند. سپس شش حالت مختلف برای بهینه‌سازی ترکیب مالچ سیمانی-سربراهای در نظر گرفته شده است. بر اساس نتایج حاصل از بهینه‌سازی طرح اختلاط ۶۸/۷۳۱٪ ماسه (۶۸۷/۳۱ گرم)، ۲۷٪ سیمان (۲۷۰ گرم)، ۲/۹۷۹٪ سربراه فولاد (۲۹/۷۹ گرم) و ۱/۳٪ آهک (۱۳ گرم) به عنوان بهترین ترکیب با در نظر گرفتن تمامی پاسخ برآورد شده است. برای اعتبارسنجی نتایج بدست آمده از مدل ریاضی شش ترکیب بهینه مجدداً ساخته شده و آزمایش‌ها مجدداً بر روی آن‌ها صورت گرفته که نتایج بدست آمده حاکی از همخوانی قابل قبول بین مقادیر پیش‌بینی شده و آزمایش شده می‌باشد.

با بررسی ترکیب‌های بهینه ارائه شده (جدول ۹) برای هر کدام از معیارهای بهینه‌سازی، مشاهده می‌شود که

مقدار درصد استفاده از ماسه در بهینه‌سازی مقاومت برشی و درصد نگهداشت رطوبت و هر چهار پاسخ (معیار ششم) نسبت به بهینه‌سازی مقاومت فشاری و ضربه‌ای بیشتر می‌باشد. این روند در مورد مقدار درصد سیمان دقیقاً بر عکس شرایط ماسه است. درصد سیمان در بهینه‌سازی مقاومت فشاری، ضربه‌ای و تلفیق مقاومت فشاری و برشی نسبت به سایر حالات بالاتر می‌باشد. اما در مورد سربراه مشاهده می‌شود که درصد آن در بهینه‌سازی مقاومت برشی نسبت به مقاومت فشاری و ضربه‌ای و همچنین درصد نگهداشت آب کم می‌باشد. در مورد معیارهای تلفیقی (معیار پنجم و ششم) مقدار درصد سربراه فولاد کمتر هم شده است. اما آهک تقریباً از روند ثابتی پیروی می‌کند. نتایج جدول ۹ نشان می‌دهد که کمترین مقدار آهک در بهینه‌سازی مقدار مقاومت برشی بوده و برای بقیه معیارها مقدار آن ثابت برابر با ۱/۳ درصد می‌باشد. همچنین با مقایسه مقادیر بهینه محاسبه شده برای چهار پاسخ آزمایش‌ها (معیارهای ۱ تا ۴) نسبت به مقدار پاسخ‌های محاسبه شده برای بهینه‌سازی هم‌زمان تمامی معیارها (معیار ششم) مشاهده می‌شود که به ترتیب برای مقاومت برشی، فشاری و ضربه‌ای و درصد نگهداشت رطوبت مقادیر بهینه

مزیت‌های اقتصادی کاهش مصرف سیمان و کاهش هزینه تولید مالچ سیمانی، استفاده مجدد از پسماندهای کارخانه‌های فولاد سازی و کاهش اثرات مخرب زیست محیطی دپوی باطله‌های معدنی و صنعتی می‌شود. بر اساس ترکیب مالچ بهینه میزان مصرف سرباره فولاد برای هر هکتار در حدود ۱۲۴۲ کیلوگرم است. نتایج حاصل از نمودار اثر نشان می‌دهد که رابطه سرباره فولاد با مقاومت برشی به صورت غیر خطی U شکل رو به پایین می‌باشد. همچنین با مقاومت فشاری و قابلیت نگه‌داشت رطوبت رابطه خطی مستقیم داشته به نحوی که با افزایش مقدار سرباره مقدار این دو معیار افزایش می‌یابد، برعکس مقاومت ضربه‌ای مالچ با افزایش مقدار سرباره به صورت خطی کاهش می‌یابد. در پایان پیشنهاد می‌شود با اجرای آزمایش‌های برجای برای مالچ سیمانی-سرباره‌ای نتایج بدست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی مورد بررسی و تحقیق بیشتر قرار گیرند. همچنین پیشنهاد می‌شود ساخت مالچ سیمانی پایه از سایر پسماندهای معدنی و صنعتی که بتوانند باعث بهبود در رفتار مکانیکی و فیزیکی مالچ شود، مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد. همان‌طور که گفته شد استفاده مجدد از پسماندهای معدنی و صنعتی فواید اقتصادی و محیط‌زیستی بسیاری دارد.

به اندازه ۳۲/۹۰، ۱۸/۵۳، ۱۶/۳۲ و ۱/۰۵ درصد اختلاف دارند. از این میان مقاومت برشی بیشترین و درصد نگهداشت رطوبت کمترین افت را نسبت به مقادیر بهینه خود در حالت بیشینه‌سازی هم‌زمان تمامی پاسخ‌ها داشته‌اند.

مقایسه نتایج تحقیق حاضر با نتایج مالچ سیمانی ارائه شده در تحقیق [۷] برای تثبیت اراضی ماسه‌ای نشان می‌دهد با وجود اینکه معیارهای در نظر گرفته شده و روش طراحی آزمایش‌های انجام گرفته در این دو تحقیق برای تعیین ترکیب بهین [مالچ سیمانی یکسان نمی‌باشد، اما میزان مصرف سیمان در ترکیب بهینه مرتبط با بهینه‌سازی تمامی معیارها (رابطه ۹) کمتر می‌باشد.

از دیگر نقاط قوت و مثبت مالچ ترکیبی سرباره‌ای می‌توان به مقاومت فشاری، برشی، بالا و دوام در برابر ضربه اشاره کرد. به دلیل وجود میکروسیلیس‌های آمورف در سرباره فولاد، که حاوی خاصیت پوزولانی و چسبندگی است، در این تحقیق برای اولین بار از سرباره فولاد به صورت پودر و در ترکیب با سایر مواد معدنی برای ساخت مالچ سیمانی-سرباره‌ای مورد مصرف قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که می‌تواند جایگزین مقداری از درصد سیمان در مالچ سیمانی پایه ارائه شده در تحقیق [۷] شود. علاوه بر این استفاده از سرباره فولاد

References

- [1] Aiban, S.A. (1994). A study of sand stabilization in eastern Saudi Arabia. *Engineering Geology*, 38(1-2), 65-79.
- [2] Asgari, H.R. and Afzali, S.F. (2018). Assessment Sugar Factories Wastes' Performance on Wind Erosion Control. *Pollution*, 4(3), 539-546.
- [3] Azoogh, L., Khalili-moghadam, B. and Jafari, S. (2018). Interaction of petroleum mulching, vegetation restoration and dust fallout on the conditions of sand dunes in southwest of Iran. *Aeolian Research*, 32, 124-132.
- [4] Baradaran-ghahfarokhi, P., Mahdavi, M., Abedi, Z., Zafariyan, R. and Baradaran, E. (2010). Designing and manufacturing of synthesized and biocompatible mulch with the use of indigenous facilities in the regions of Iran in controlling wind erosion and retardation centers. 2nd National Conference of Wind erosion and Dust Storms, Yazd, Iran, pp. 190-196 (in Persian).
- [5] Das, B.M. and Sobhan, K. (2013). *Principles of geotechnical engineering*, Cengage learning.

- [6] Derringer, G.C. and Suich, R. (1980). Simultaneous optimization of several response variables. *J Qual Technol*, 12(4), 214-9.
- [7] Ekhtesasi, M.R. and Hazirei, F. (2016). Effects of cement mulch combinations on sand dunes fixation. *Journal of Range and watershed management*, 68(4), 739-750 (in Persian).
- [8] Fatemi, S., Varkani, M. K., Ranjbar, Z. and Bastani, S. (2006). Optimization of the water-based road-marking paint by experimental design, mixture method. *Progress in Organic Coatings*, 55(4), 337-344.
- [9] Ghafari, E., Costa, H. and Júlio, E. (2015). Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC. *Cement and Concrete Composites*, 55, 17-25.
- [10] Gharib, S.H., Bastani, S., Roustazad, R. and Jalili, M. (2009). Optimization of water based flexography inks for printing on polyethylene films. *Journal of Color Science and Technology*, 3(3), 131-143 (in Persian).
- [11] Hazirei, F. and Zare Ernani, M. (2013). Investigation of effect of clay-lime mulch for sand dunes fixation. *Journal of Water and Soil*, 27(2), 373-380 (in Persian).
- [12] 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), 71-80.
- [13] Majdi, H., Karimian-Eghbal, M., Karimzadeh, H.R. and Jalalian. A. (2006). Effect of different clay mulches on the amount of wind eroded materials. *JWSS*, 10(3), 137-149 (in Persian).
- [14] Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley and sons.
- [15] Mirabedini, S.M., Jamali, S.S., Haghayegh, 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), 549-559.
- [16] Moosavi, M., Moradian, S., Bastani S. and Jalili, M. (2012). The use of experimental design for optimizing the photo stabilization of a substrate printed by a water-based overprint clear coat. *Journal of Color Science and Technology*, 6(1), 1-8 (in Persian).
- [17] Mottaghi, H. and Rabbani, M. (2007). Product quality improvement by implying design of experiment (doe), (case study on mgo-c brick in pars factory). *IQBQ*, 11(20), 161-179 (in Persian).
- [18] Movahedan, M., Abbasi, N. and Keramati, M. (2012). Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian Journal of Soil Science (Ejss)*, 1(2), 81-86.
- [19] Naghizade-Asl, F., Asgari, H.R., Emami, H. and Jafari, M. (2017). Stabilization of drifting sands using micro silica-lime-clay mixture as a mulch. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(24), 536-543.
- [20] Naseri, H.R., Shabani, N. and Keshtkar, A.R. (2014). Investigating the efficiency of calcium chloride magnesium chloride for controlling wind erosion. 3rd national Conference on combating desertification and sustainable development of Iran Desert Wetlands (Relying on Meighan Desert Wetland) Yazd, Iran, pp. 539-545 (in Persian).
- [21] Pour-Shams, A., Zareh, M., Ekhtesasi, M.R. and Sarami-Naini, M.A. (2018). Effect of geotextile layer on increasing the strength of armed cement mulch. 4th National Conference of Wind erosion and Dust Storms, Yazd, Iran, pp. 290-296 (in Persian).
- [22] Refahi, H.G. (1999). *Wind Erosion and Its Control*. Tehran University Press (in Persian).
- [23] Safai-Ghahnoye, A.R., Rouhani-Shahraki, F., Karimzadeh, H.R. and tarkesh Esfahani, M. (2012). Determining the best blend of blast furnace slag (Folad Mobarakeh) as a mulch for stabilizing the eroded sediments of the wind (Case study of Soils in East of Isfahan). 1st National Desert Conference, Tehran, Iran, pp. 540-548 (in Persian).
- [24] Zare., S. (2015). Evaluation of the efficiency of resin, mineral, polymer and biopolymer mulch for stabilization of sand dunes and the feasibility of replacing them with oil mulch. Ph.D. Dissertation, Tehran University (in Persian).

