

مقاله پژوهشی

بررسی تاثیر مشخصات دوغاب زیستی بر تثبیت سطوح انباشتگاه های معدنی

علیرضا محمدی^۱، رامین دوست محمدی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، زنجان، alirezaturk1374@gmail.com

۲. دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه زنجان، زنجان، ramini.doostmohammadi@znu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲ - پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۵

چکیده

مقدار قابل توجهی از مواد معدنی انباشته شده در انباشتگاه‌ها در اثر وزش باد پخش شده و علاوه بر به هدر رفتن ماده معدنی، آلودگی محیط زیست را به همراه خواهند داشت. در این مقاله پتانسیل استفاده از ترسیب میکروبی کلسیم کربنات (دوغاب زیستی) در تثبیت انباشته‌های معدنی در مقابل وزش باد مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش، اجزای ماده ناپایدار (مواد معدنی یا باطله‌های خرد و انباشته شده) با استفاده از رسوب کلسیم کربنات ایجاد شده به وسیله عملکرد باکتری اسپوروسارسیناپاستوری، به هم متصل شده و در مقابل وزش باد پایدار می‌شود. در این مطالعه انباشته‌های تهیه شده از باطله فرآیند هیدرومتالورژی کارخانه فرآوری معدن سرب و روی انگوران در مقیاس آزمایشگاهی تحت مقادیر مختلف مواد پایه دوغاب (احجام مختلف محلول باکتری، کلسیم کلرید و اوره) و در سرعت‌های متفاوت باد بررسی شد. برای طراحی بهینه الگوهای آزمایشگاهی، از روش رویه پاسخ با ۵ سطح تغییر برای هر متغیر استفاده شده که منجر به انجام ۳۱ آزمون آزمایشگاهی شد. نتایج آزمون‌ها و مدلسازی‌ها نشان داد که در حالت بدون دوغاب‌پاشی، وزش باد با سرعت تقریبی ۱۰ متر بر ثانیه قادر به برداشت ۲۲ درصد خاک انباشته شده در مدت زمان یک دقیقه است، در حالی که فقط با یک مرحله پاشش دوغاب زیستی (محلول باکتری، کلسیم کلرید و اوره به میزان ۰/۵۶ میلی‌لیتر بر سانتی‌متر مربع)، مقدار برداشت خاک به ۰/۵۴ درصد وزن کل انباشته کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی

گرد و غبار معدنی، رسوب میکروبی کلسیم کربنات، دوغاب زیستی، روش سطح پاسخ

۱- مقدمه

این روش حذف کنند [۶]. بان چیا و همکاران (۲۰۱۹) بیان کردند که اگرچه استفاده از کلسیم کلرید به عنوان منبع کلسیم مرسوم است ولی می‌توان برای از بین بردن اثرات منفی بنیان Cl^- از منابع دیگر کلسیم مانند آب دریا، ماسه‌های کلسیتی و یا محصولات جانبی صنایع مانند غبارهای کوره‌های کاخانه‌های سیمان به جای آن استفاده کرد [۷].

فرآیند رسوب میکروبی کلسیم کربنات با استفاده از باکتری اسپوروسارسیناپاستوری می‌تواند خاک یا ذرات دیگر را بدون از هم گسیختگی ساختار اولیه تثبیت کند. فرآیند رسوب‌گذاری به صورتی است که ابتدا لایه نازکی از رسوب دور ذرات را می‌پوشاند، سپس در محل اتصال ذرات پلی تشکیل می‌شود که علت اصلی بهبود مقاومت خاک است [۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ و ۱۳]. مطالعات نشان می‌دهد که pH و دانه‌بندی خاک در موفقیت استفاده از روش ترسیب میکروبی موثر است. کیخا و همکاران (۲۰۱۷) پژوهشی برای بررسی pH بر مقاومت فشاری خاک بهبود یافته با رسوب میکروبی کلسیت انجام دادند. مطالعات آن‌ها نشان داد زمانی که pH از ۵ به ۹ می‌رسد مقاومت فشاری خاک بهبود یافته و به مقدار بیشینه می‌رسد [۱۴].

در تمرکز بر استفاده از تکنولوژی ترسیب میکروبی کلسیم کربنات در حوزه بازسازی و کاهش آلودگی‌های مرتبط با فعالیت‌های معدنی مطالعات محدودی انجام شده است که مهم‌ترین آن‌ها در ادامه بیان می‌شود. فراشاهی و همکاران (۲۰۱۹)، تاثیر پاشش یک میکروارگانیسم رسوب‌دهنده کلسیم کربنات بر سطح گرد زغال را برای کنترل گرد و غبار مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور این باکتری در حجم‌های معین روی نمونه‌های گرد زغال دانه‌بندی شده، پاشیده شده و نمونه‌ها بر اساس مقاومت در برابر باد با دو سرعت مختلف با هم مقایسه شده است. نمونه‌ها در ۴ سن مختلف از ۲ تا ۱۴ روزه دسته‌بندی شده و درصد جرم جدا شده از سطح در اثر جریان هوا مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان‌دهنده موثر بودن روش پیشنهادی در کاهش پخش گرد زغال در هوا است و پاشش باکتری باعث بهبود تثبیت گرد و غبار تا ۸۷ درصد نسبت به نمونه شاهد (گرد زغال خشک) بوده است [۱۲]. مواندیرا و همکاران (۲۰۱۹) عوامل فیزیکی و شیمیایی تاثیرگذار بر تثبیت باطله‌های معدنی (حاصل از کوره سرباره و کارخانه لیچ معدن سرب) با استفاده از ترسیب میکروبی کلسیم کربنات را تعیین کردند. مطالعات آن‌ها نشان داد که در مقیاس آزمایشگاهی، روش به کار برده شده باعث کاهش ضریب جذب آب شده و یک ابزار موثر در جلوگیری از انتشار غبار و آلودگی محیط است. آن‌ها استفاده از روش ترسیب میکروبی را

وزش باد بیش‌ترین پتانسیل را برای انتقال سریع ریزگردها دارد زیرا هوا با سرعت بسیار بیشتری نسبت به آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی حرکت می‌کند [۱]. انتشار ذرات گرد و غبار تقریباً در همه معادن مشکل آفرین است. گرد و غبار به طور بالقوه برای سلامتی انسان، محیط زیست، شرایط کار و همچنین بهره‌وری یک معدن خطرناک است [۲]. با استخراج معادن، سطح طبیعی زمین از بین می‌رود و مواد معدنی یا باطله خرد شده در انباشتگاه‌ها انباشته می‌شوند. این در حالی است که با وزش باد مقدار زیادی از این مواد که گاهی حاوی عناصر سنگین‌اند هدر می‌رود و همچنین هوای اطراف آلوده می‌شود [۳]. ریزگردها خطری بالقوه برای سلامتی انسان‌ها در سراسر جهان محسوب می‌شوند و مقادیر قابل توجهی از آن‌ها توسط فعالیت‌های انسانی مانند عملیات معدنی ایجاد می‌شوند [۴]. تثبیت مواد معدنی ذخیره شده در انباشتگاه‌ها و پیشگیری از انتشار این مواد به وسیله باد علاوه بر منافع اقتصادی، موجب کاهش آلودگی هوا می‌شود و در نتیجه ارتقای سلامت جامعه و حفظ محیط زیست را به همراه دارد. یکی از روش‌ها و فن‌آوری‌های نوین در جلوگیری از انتشار گرد و غبار استفاده از رسوب بیولوژیکی است که موجب چسبندگی ذرات می‌شود. رسوب بیولوژیکی به وسیله میکروارگانیسم‌هایی که با تولید آنزیم اوره آز (آنزیمی که اوره را هیدرولیز می‌کند)، واکنش هیدرولیز اوره به کربنات و آمونیوم را کاتالیز می‌کنند، تشکیل می‌شود. در این فرآیند اوره به آمونیاک و کاربامات هیدرولیز شده و کاربامات با واکنش در آب به آمونیاک و اسید کربنیک تبدیل می‌شود. در ادامه، این فرآورده‌ها تشکیل بی‌کربنات، آمونیوم و یون‌های هیدروکسید می‌دهند. واکنش‌های اخیر باعث افزایش pH شده و موجب تبدیل بی‌کربنات به کربنات می‌شود. با توجه به اینکه دیواره‌های سلولی میکروارگانیسم بار منفی دارد، باکتری کاتیون‌های Ca^{2+} را از محیط جذب می‌کند تا در سطح خود ته‌نشین سازد. در نهایت یون‌های Ca^{2+} با یون‌های کربنات واکنش می‌دهد و موجب رسوب کلسیم کربنات در دیواره سلول می‌شود [۵]. در فرآیند استفاده از تکنولوژی دوغاب زیستی در مراحل هیدرولیز اوره بنیان NH_4^+ در صورت استفاده از کلرید کلسیم به عنوان منبع یون کلسیم، بنیان Cl^- تولید می‌شود که ملاحظات زیست‌محیطی را به همراه دارد. مدیریت این دو بنیان یکی از چالش‌های محققان در سالهای اخیر بوده است. گوتامان و همکاران (۲۰۲۱) ترسیب بنیان آمونیوم را در قالب استروویت در خاک ترمیم شده با روش ترسیب میکروبی کلسیم کربنات مورد بررسی قرار دادند. آزمایشات ایشان در دو مرحله شستشوی آمونیوم و سپس ترسیب آمونیوم در قالب استروویت انجام شد. آن‌ها موفق شدند تا ۹۰ درصد آمونیوم را با

آن‌ها هفت نوع باطله معدنی متفاوت با پتانسیل‌های مختلف تولید زهاب اسیدی را مطالعه و مشاهده کردند که با استفاده از روش یاد شده، در تمامی نمونه‌ها پوشش‌های غیریکنواخت کلسیم کربنات پیرامون سطوح دانه‌ها تشکیل شده است. نتایج مطالعات ایشان نشان داد که pH زهاب خروجی افزایش و غلظت کادمیوم، سرب و روی در زهاب کاهش یافته است. این مطالعات تایید کرد که با استفاده از ترسیب میکروبی کلسیم کربنات، انتشار مواد سمی از انباشتگاه‌های معدنی به محیط زیست اطراف کاهش یافته است [۲۰].

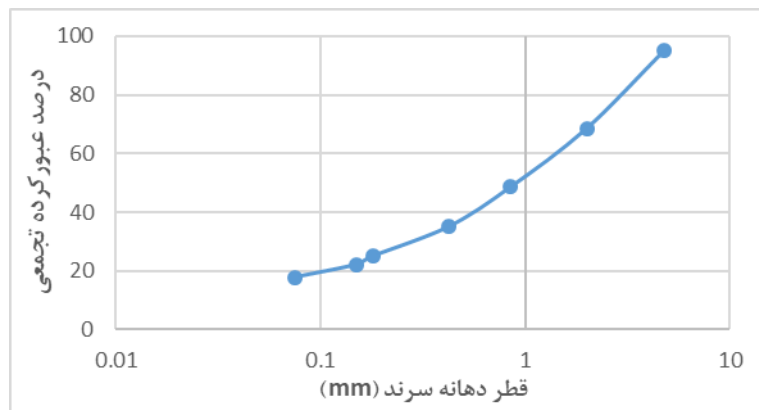
وان پاسن و همکاران (۲۰۱۰)، چنگ و همکاران (۲۰۱۳)، القبانی و همکاران (۲۰۱۳) و مالکی و همکاران (۲۰۱۶) که در استفاده از ترسیب میکروبی کلسیم کربنات با استفاده از باکتری اسپروسارسینا پاستوری در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها پژوهش و گزارش کرده‌اند که استفاده از باکتری اسپروسارسینا پاستوری با غلظت نوری^۱ ۱ و غلظت اوره و کلسیم کلرید ۱ مولار بهترین نتیجه را در تولید رسوب داشته و بنابراین استفاده از غلظت‌های یاد شده، اساس ادامه تحقیق در پژوهش حاضر قرار گرفته است [۲۱ و ۲۲ و ۲۳ و ۲۴]. در مطالعات پیشین بیشتر به بررسی غلظت اجزای محلول سیمان‌ساز و نوع خاک پرداخته شده است و تاثیر مقدار مصرف این اجزا در واحد سطح مشخص نشده است. در این مقاله اندرکنش مقادیر اجزای دوغاب در واحد سطح و همچنین تعداد دفعات دوغاب‌پاشی بر کنترل انتشار غبارهای انتشار یافته از انباشتگاه‌های باطله حاصل از فرآیند هیدرومتالورژی معدن سرب و روی انگوران در مقابل سرعت‌های مختلف باد مورد بررسی قرار گرفته است. برای نیل به این موضوع از طراحی آزمایش با روش سطح پاسخ و انجام آزمون‌های آزمایشگاهی استفاده شده است.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مشخصات باطله‌های آزمایش

در این پژوهش از باطله حاصل از فرآیند هیدرومتالورژی کارخانه فرآوری سرب و روی انگوران استفاده شد. آنالیزهای XRD نشان می‌دهد که این باطله‌ها حاوی کانی‌های هماتیت، زینسیت، کلسیت، اسفالریت، فلدسپار، انگلریت، کوارتز، ژیپس و باسانیت است. منحنی دانه‌بندی خاک مورد مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است. انجام آزمون‌های تعیین حدود اتربرگ این خاک نشان‌دهنده این است که حد روانی، حد خمیری و شاخص خمیری این خاک به ترتیب معادل ۴۵/۴، ۲۷/۷۰ و ۱۷/۷ درصد است. مطابق سیستم طبقه‌بندی متحد خاک^۲ این خاک در گروه ماسه‌های سیلتی قرار می‌گیرد.

یک روش سازگار با محیط زیست معرفی کردند که توانایی کنترل آلودگی در معادن حاوی فلزات سنگین را دارد [۱۵]. استفاده از ترسیب میکروبی کلسیم کربنات به جای سیمان در اتصال و مقاوم‌سازی پرکننده‌ها در مراحل پرکردن و بازسازی معادن توسط دنگ و همکاران (۲۰۲۰) پیشنهاد شد، آن‌ها با بیان این که استفاده از سیمان به عنوان اتصال‌دهنده پرهزینه است، موجب افزایش شدید pH محیط شده و تولید آن باعث آزاد کردن حجم بزرگی از کربن دی‌اکسید به محیط زیست می‌شود که این روش را به عنوان جایگزین سازگارتر با محیط زیست معرفی کردند و با انجام آزمون‌هایی در آزمایشگاه به این نتیجه رسیدند که با افزایش بیش از اندازه حجم باکتری به محلول سیمان‌ساز، مقاومت پرکننده‌ها کاهش می‌یابد و رابطه مستقیمی بین حجم اجزای جامد پرکننده و مقاومت نهایی حاصل وجود دارد [۱۶]. مقاوم‌سازی انباشتگاه‌های معدن مس با رسوب کلسیم کربنات حاصل از باکتری اسپروسارسینا پاستوری توسط اولیویرا و همکاران (۲۰۲۱) مورد بررسی قرار گرفت. گزارش‌های ارایه شده توسط آن‌ها نشان می‌دهد که مقاومت حاصل از نمونه‌ها بیش از ۰/۵۴ مگاپاسکال نبوده است. نفوذپذیری اندک باطله، امکان نفوذ محلول سیمان‌ساز به جوانب نمونه‌ها را به ۱/۸ میلی‌متر محدود کرده است. اگر چه مقاومت مواد دانه ریز با این فرآیند افزایش چشمگیری نداشته است ولی ایجاد یک پوشش نازک از رسوب کربنات کلسیم بر روی انباشتگاه حاوی عناصر خطرناک، مانع از پخش آن در محیط پیرامون شده است [۱۷]. کانگ و همکاران (۲۰۲۲) از روش ترسیب میکروبی کلسیم کربنات در کاهش انتشار آلودگی در انباشتگاه‌های حاوی پیریت استفاده کرده و گزارش کردند که مقاومت فشاری باطله‌های سولفیدی در استفاده از این روش افزایش و ضریب نفوذپذیری خاک کاهش می‌یابد. تشکیل یک لایه نازک از رسوب کلسیم کربنات بر روی انباشته‌های سولفیدی، مانع از اکسید شدن آن‌ها می‌شود [۱۸]. بالا بردن مقاومت فشاری باطله‌های واسطه سنگین معدن سرب و روی انگوران با استفاده از ترسیب میکروبی کلسیم کربنات توسط پرویزی و همکاران (۲۰۲۱) مورد سنجش قرار گرفت و ملاحظه شد که مقاومت فشاری خاک پس از ترمیم تا ۴ مگاپاسکال افزایش می‌یابد. آن‌ها نمونه‌های استاندارد تهیه شده از باطله واسطه سنگین را تحت بارهای اولیه متفاوت قرار دادند و با انجام آزمون‌های آزمایشگاهی (تعیین مقاومت فشاری و تعیین سرعت موج) نشان دادند که با افزایش فشار اولیه، مقاومت باطله‌های ترمیم یافته نیز زیاد می‌شود [۱۹]. پرودوفوت و همکاران (۲۰۲۲) امکان کاهش انتشار فلزات سنگین و زهاب‌های اسیدی را با استفاده از ترسیب میکروبی کلسیم کربنات مورد بررسی قرار دادند.



شکل ۱- منحنی دانه‌بندی باطله انباشته حاصل از فرآیند هیدرومتالورژی مورد مطالعه

۲-۲- مشخصات باکتری مورد استفاده

در پژوهش حاضر از باکتری اسپوروسارسیناپاستوری استفاده شده است. این باکتری، غیرسمی است، اوره را هیدرولیز می‌کند، در طبیعت به وفور یافت می‌شود و مقاومت بالایی در برابر عوامل فیزیکی و شیمیایی محیط دارد. باکتری اسپوروسارسیناپاستوری در شرایط هوازی و در دمای ۲۸ درجه سانتی‌گراد رشد می‌کند. مناسب‌ترین محیط کشت برای میکروارگانیزم مورد نظر، محیط کشت مایع شامل نوترینت برات، اوره و آب در pH تقریبی ۸٫۵ تا ۹ است [۲۱]. این باکتری از کلکسیون منطقه‌ای قارچ‌ها و باکتری‌های صنعتی ایران با کد "PTCC-1645" تهیه شد.

مراحل آماده‌سازی باکتری اسپوروسارسیناپاستوری به ترتیب عبارتند از:

- کشت استریل باکتری در میکروتیوب
- کشت استریل باکتری در محیط جامد
- کشت استریل باکتری در محیط مایع
- کشت غیراستریل باکتری در محیط مایع برای استفاده از آن در پاشش روی خاک

برای استفاده طولانی مدت از باکتری خریداری شده باید ذخیره مناسب برای آن تهیه شود. به همین منظور، باکتری اولیه در محیط مایع و شرایط استریل کشت داده می‌شود و پس از رشد باکتری، از آن ذخیره تهیه می‌شود. برای کشت باکتری در محیط مایع در فواصل زمانی مختلف، نیاز به کشت باکتری در محیط جامد وجود دارد. برای کشت باکتری در محیط جامد از نوترینت آگار به همراه اوره با غلظت ۲ درصد استفاده شده است. برای تولید دوغاب زیستی و انتقال باکتری به خاک باید باکتری به گونه‌ای باشد که قابلیت پراکنده شدن در خاک برای آن به آسانی امکان‌پذیر باشد. به این منظور

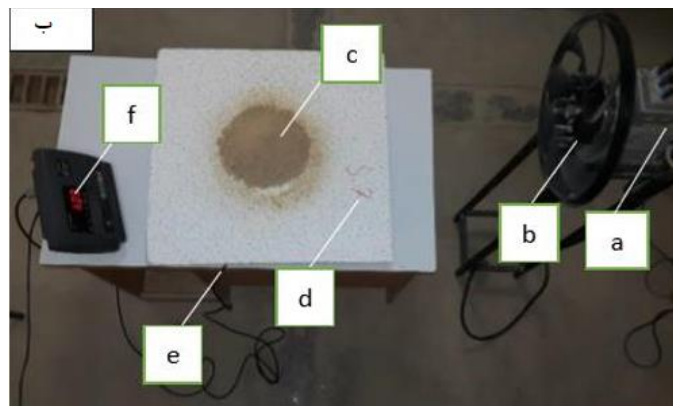
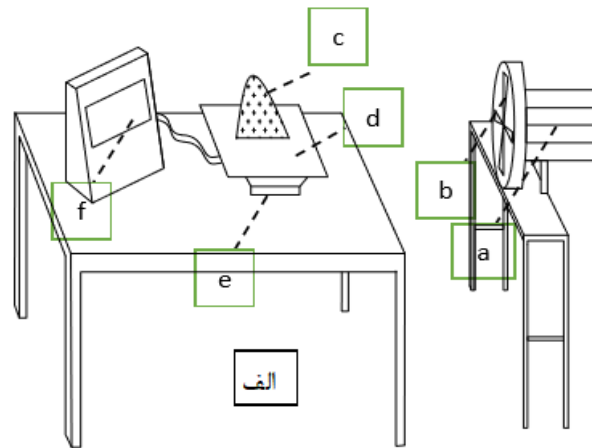
باکتری در محیط مایع تا رسیدن به غلظت نوری نزدیک به ۱ به مدت ۲۴ ساعت کشت داده می‌شود [۲۵]. در این تحقیق برای تعیین غلظت مناسب باکتری از معیار غلظت نوری که با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر در طول موج ۶۰۰ نانومتر اندازه گرفته می‌شود (OD_{600}) استفاده شده است. محیط کشت نوترینت برات جزو محیط کشت‌های مایعی است که برای کشت این باکتری مناسب است. در جدول ۱ مواد و مقادیر مورد استفاده در مرحله کشت نهایی باکتری اسپوروسارسیناپاستوری نشان داده شده است.

جدول ۱- مواد مورد استفاده و مقادیر آن‌ها در محیط کشت نهایی مایع

ماده مورد استفاده	مقدار
نوترینت برات (Nutrient broth)	۶٫۵ گرم بر لیتر
اوره	۲۰ گرم بر لیتر
آب	۱ لیتر

۲-۳- مشخصات تجهیزات آزمایشگاهی

مجموعه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده به منظور شبیه‌سازی وضعیت انباشته مواد باطله در مقابل وزش باد جهت انجام پژوهش حاضر در شکل ۲ نشان داده شده است. این مجموعه شامل یک موتور الکتریکی (a) با توان ۷۵۰ وات و فرکانس بیشینه ۵۰ هرتز است که توانایی چرخش ۲۷۷۵ دور بر دقیقه را دارد. موتور و پروانه (b) با قطر ۵۲ سانتی‌متر که به محور آن متصل است قادر به تولید بادی تا سرعت ۱۴ متر بر ثانیه است. خاک باطله به صورت کپه‌ای (c) بر روی یک صفحه مسطح (d) انباشته شده و بر روی یک سلول بار (e) قرار گرفته است. دقت سلول بار ۰٫۱ گرم است و تغییر وزن خاک در طول آزمایش بر روی نشانگر (f) نمایش و ثبت می‌شود (شکل ۲- الف و ب).



شکل ۲- مجموعه آزمایشگاهی الف- طراحی شده و ب- ساخته شده

۴-۲- روش انجام آزمایش

در انباشتگاه، خاک‌های چسبنده و غیرچسبنده وجود دارد. یکی از دلایل این تغییر چسبندگی، متغیر بودن محتوی رطوبت در محل‌های مختلف انباشتگاه است. هر چه چسبندگی خاک کمتر باشد، مقاومت کمتری دارد و به راحتی در مقابل وزش باد منتشر می‌شود. در تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی سعی بر آن شده است که کمترین میزان چسبندگی در انباشتگاه مد نظر قرار گیرد تا بتوان با حداقل سرعت وزش باد، انتشار آن را مشاهده و تاثیر دوغاب زیستی در تثبیت آن را ثبت کرد. به همین منظور ابتدا توده خاک باطله منتقل شده از کارخانه فرآوری به مدت ۴۸ ساعت در خشک‌کن با دمای ۱۰۴ درجه سانتی‌گراد خشک و سپس کاملاً با یکدیگر مخلوط شدند تا بتوان از آن‌ها، نمونه‌های غیرچسبنده همسان و در شرایط یکسانی تهیه کرد. خاک همسان تهیه شده در داخل قیف مخروطی شکل ریخته شده و پس از برداشتن قیف، کپه‌های مخروطی شکل یکسان (با قطر قاعده و ارتفاع به ترتیب ۷۵ و ۴۵ میلی‌متر) با وزن ۱ کیلوگرم تهیه شد. نمونه‌های تهیه شده با استفاده از آبپاش دستی و از فاصله ۲۰ سانتی‌متری تحت پاشش یکنواخت اجزای دوغاب زیستی (ابتدا محلول باکتری و سپس ترکیب کلسیم کلرید و

اوره) قرار گرفت. با توجه به نتایج مطالعات پیشین، باکتری اسپروسارسینا پاستوری با غلظت نوری $OD_{600}=1$ ، اوره و کلرید کلسیم با غلظت ۱ مولار به عنوان اجزای محلول دوغاب‌ساز انتخاب شدند. میزان اجزای دوغاب زیستی پاشیده شده بر روی نمونه‌ها با استفاده از روش سطح پاسخ تعیین شد که جزئیات آن‌ها در بخش ۲-۵ توضیح داده می‌شود. نمونه‌های دوغاب‌پاشی شده پس از ۲۴ ساعت با استفاده از مجموعه آزمایشگاهی تهیه شده، به مدت ۱ دقیقه در معرض وزش باد قرار گرفته و سرعت باد در مجاورت انباشته‌ها با استفاده از بادسنج کنترل شد. وزن انباشته‌ها در ابتدا و پایان آزمایش با سلول بار ثبت شد تا امکان مقایسه و تحلیل نتایج فراهم شود.

۲-۵- طراحی آزمایش با استفاده از مدل روش سطح پاسخ

روش سطح پاسخ (RSM)^۳ مجموعه‌ای از تکنیک‌های آماری و ریاضیات کاربردی برای ساخت مدل‌های تجربی است. هدف مهم (RSM)، طراحی آزمایش است که عموماً با عنوان (DOE)^۴ شناخته می‌شود. انتخاب بهینه طرح آزمایش می‌تواند تاثیر زیادی بر روی صحت تخمین سطح پارامترها، کاهش تعداد آزمایش‌ها و در نتیجه کاهش هزینه‌های پروژه داشته باشد [۲۶].

برابر وزش باد استفاده شد. تعداد کل آزمایش‌های طراحی شده ۳۱ عدد بود که شامل ۱۶ نقطه مکعبی، ۷ نقطه مرکزی در مکعب و ۸ نقطه محوری هستند [۲۶].

بر اساس طراحی انجام شده، پنج سطح متغیرهای مورد بررسی در آزمایشات (سرعت باد، تعداد دفعات دوغاب پاشی، میزان محلول باکتری، میزان محلول کلسیم کلرید و اوره) به شرح جدول (۲) تعیین گردیدند.

جدول ۲- متغیرهای مستقل، محدوده و مقادیر آن‌ها در آزمایشات طراحی شده

متغیر	نماد	-۲	-۱	۰	+۱	+۲
سرعت باد (متر بر ثانیه)	A	۶	۸	۱۰	۱۲	۱۴
تعداد دفعات دوغاب پاشی	B	۱	۳	۵	۷	۹
میزان محلول باکتری (میلی لیتر بر سانتی مترمربع)	C	۰٫۱۸۸	۰٫۳۷۷	۰٫۵۶۶	۰٫۷۵۵	۰٫۹۴۳
میزان محلول کلسیم کلرید و اوره (میلی لیتر بر سانتی مترمربع)	D	۰٫۱۸۸	۰٫۳۷۷	۰٫۵۶۶	۰٫۷۵۵	۰٫۹۴۳

نتیجه آزمایش (یعنی مقدار خاک برداشت شده در اثر وزش باد) ملاحظه می‌شود.

۱-۳- مدلسازی

پس از استخراج نتایج آزمایش، یک مدل ریاضی مناسب بین متغیرهای مستقل و مقدار پاسخ (متغیر وابسته) مطابق رابطه ۱ ارائه شد.

$$R(\%) = 0/2386 + 0/1318(A) - 0/1105(B) - 0/0439(C) - 0/0361(D) + 0/0298(A^2) + 0/0171(B^2) - 0/0264(C^2) - 0/0114(D^2) - 0/0367(A \times B) - 0/0159(A \times C) + 0/0034(A \times D) + 0/0434(B \times C) + 0/0141(B \times D) + 0/0307(C \times D) \quad (1)$$

باشد باید به خوبی به نتایج ثبت شده آزمایشگاهی منطبق باشد (یعنی در سطح اطمینان ۹۵ درصد مقدار P-Value کمتر از ۰٫۰۵ باشد) و برعکس، عدم برازش بر باقی‌مانده‌ها نیز برقرار باشد (مقدار P-Value باقی‌مانده‌ها بیشتر از ۰٫۰۵ باشد). در مدل رگرسیون پیشنهادی مقدار $P\text{-value} < 0/0001$ و در باقیمانده‌ها $P\text{-value} = 0/158$ به دست آمد که دو شرط فوق تامین شده و بنابراین مدل پیشنهادی کفایت لازم را دارد.

نتیجه برازش مدل پیشنهادی بر نتایج داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۵ آمده است. شکل ۳ نیز مقادیر پیش‌بینی شده با مدل پیشنهادی در مقابل نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی ثبت شده را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۳ مشاهده می‌شود، ضریب همبستگی ۹۴٫۳۲ درصد است که نشان از همبستگی خوب نتایج مدل و مقادیر ثبت شده آزمایشگاهی دارد.

کامپوزیت مرکزی (CCD)^۵، روش متداول طراحی آزمایش است. تعداد آزمایش‌ها در این روش به طور معمول زیاد است، زیرا در این روش هر فاکتور پنج سطح متفاوت (شامل سه نقطه در داخل و دو نقطه خارج از حدود مشخص شده برای هر عامل) دارد. این روش از نقاط مکعبی، مرکزی و محوری ساخته شده است. در پژوهش حاضر از CCD که یک طرح گسترده از RSM است، جهت مدلسازی، بهینه‌سازی و بررسی استفاده از ترسیب میکروبی کلسیم کربنات در کمینه کردن مقدار خاک هدررفته انباشته‌ها در

۲- نتایج آزمایش، مدلسازی و بحث

با توجه به طراحی آزمایش انجام گرفته (بخش ۳-۵) و استفاده از مجموعه آزمایشگاهی طراحی و ساخته شده (بخش ۳-۴)، ۳۱ آزمون آزمایشگاهی انجام گرفت که اجزای هر آزمایش در جدول ۳ مشاهده می‌شود. در جدول ۳ میزان متغیرها (یعنی سرعت باد، تعداد دفعات دوغاب پاشی، میزان محلول باکتری، میزان محلول کلسیم کلرید و اوره) و همچنین

که در آن:

A: سرعت باد (متر بر ثانیه)

B: تعداد دفعات دوغاب پاشی

C: حجم مصرفی محلول باکتری در واحد سطح (میلی لیتر بر سانتی مترمربع)

D: حجم مصرفی محلول کلسیم کلرید و اوره در واحد سطح (میلی لیتر بر سانتی مترمربع)

مقادیر پیش‌بینی شده، از مدل چند جمله‌ای درجه دوم تبعیت می‌کند که این مدل در آزمون آنالیز واریانس دارای آماره‌های معناداری است (جدول ۴).

برای بررسی مورد تایید بودن مدل پیشنهادی، از دو آزمون مقایسه P-value برای مدل رگرسیون و مقادیر باقی‌مانده استفاده شده است. در صورتی که مدل پیشنهادی مورد تایید

جدول ۳- ماتریس طراحی آزمایش و مقدار پاسخ ها بر اساس اجرای آزمایش

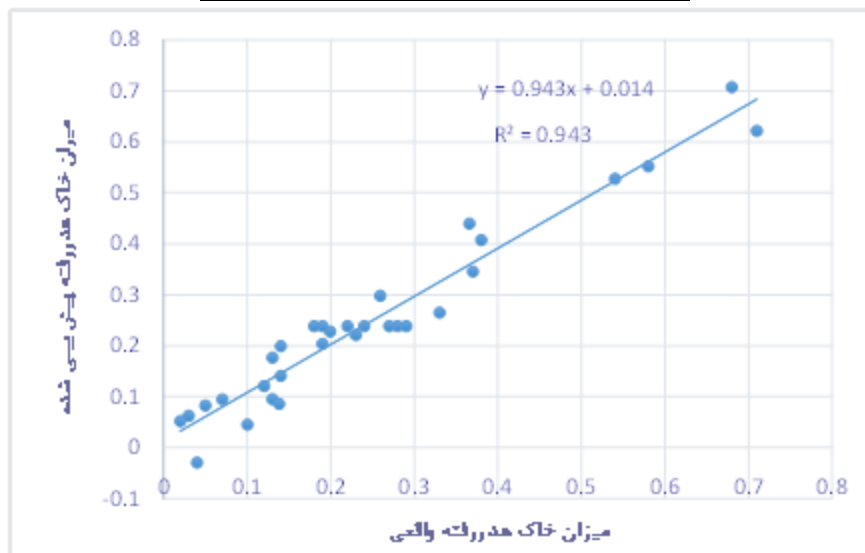
مقدار خاک هدررفته (درصد)		متغیرهای مستقل				
پیش بینی شده	واقعی	میزان محلول کلسیم کلرید و اوره $\frac{ml}{cm^2}$	میزان محلول باکتری $\frac{ml}{cm^2}$	تعداد دفعات دوغاب پاشی	سرعت باد $\frac{m}{s}$	نمونه‌ها
۰٫۳۴۵	۰٫۳۷۰	۰٫۴	۰٫۴	۳	۸	۱
۰٫۷۰۷	۰٫۶۸۰	۰٫۴	۰٫۴	۳	۱۲	۲
۰٫۰۸۳	۰٫۰۵۰	۰٫۴	۰٫۴	۷	۸	۳
۰٫۲۹۸	۰٫۲۵۹	۰٫۴	۰٫۴	۷	۱۲	۴
۰٫۱۴۱	۰٫۱۴۰	۰٫۴	۰٫۸	۳	۸	۵
۰٫۴۴۰	۰٫۳۶۶	۰٫۴	۰٫۸	۳	۱۲	۶
۰٫۰۵۲	۰٫۰۲۰	۰٫۴	۰٫۸	۷	۸	۷
۰٫۲۰۴	۰٫۱۹۰	۰٫۴	۰٫۸	۷	۱۲	۸
۰٫۱۷۷	۰٫۱۳۰	۰٫۸	۰٫۴	۳	۸	۹
۰٫۵۵۲	۰٫۵۸۰	۰٫۸	۰٫۴	۳	۱۲	۱۰
-۰٫۰۲۹	۰٫۰۴۰	۰٫۸	۰٫۴	۷	۸	۱۱
۰٫۱۹۹	۰٫۱۴۰	۰٫۸	۰٫۴	۷	۱۲	۱۲
۰٫۰۹۵	۰٫۱۳۰	۰٫۸	۰٫۸	۳	۸	۱۳
۰٫۴۰۷	۰٫۳۸۰	۰٫۸	۰٫۸	۳	۱۲	۱۴
۰٫۰۶۳	۰٫۰۳۰	۰٫۸	۰٫۸	۷	۸	۱۵
۰٫۲۲۸	۰٫۱۹۹	۰٫۸	۰٫۸	۷	۱۲	۱۶
۰٫۰۹۴	۰٫۰۷۰	۰٫۶	۰٫۶	۵	۶	۱۷
۰٫۶۲۲	۰٫۷۱۰	۰٫۶	۰٫۶	۵	۱۴	۱۸
۰٫۵۲۸	۰٫۵۴۰	۰٫۶	۰٫۶	۱	۱۰	۱۹
۰٫۰۸۶	۰٫۱۳۸	۰٫۶	۰٫۶	۹	۱۰	۲۰
۰٫۲۲۱	۰٫۲۳۰	۰٫۶	۰٫۲	۵	۱۰	۲۱
۰٫۰۴۵	۰٫۱۰۰	۰٫۶	۰٫۹	۵	۱۰	۲۲
۰٫۲۶۵	۰٫۳۳۰	۰٫۲	۰٫۶	۵	۱۰	۲۳
۰٫۱۲۱	۰٫۱۲۰	۰٫۹	۰٫۶	۵	۱۰	۲۴
۰٫۲۳۹	۰٫۱۹۰	۰٫۶	۰٫۶	۵	۱۰	۲۵
۰٫۲۳۹	۰٫۱۸۰	۰٫۶	۰٫۶	۵	۱۰	۲۶
۰٫۲۳۹	۰٫۲۸۰	۰٫۶	۰٫۶	۵	۱۰	۲۷
۰٫۲۳۹	۰٫۲۴۰	۰٫۶	۰٫۶	۵	۱۰	۲۸
۰٫۲۳۹	۰٫۲۹۰	۰٫۶	۰٫۶	۵	۱۰	۲۹
۰٫۲۳۹	۰٫۲۷۰	۰٫۶	۰٫۶	۵	۱۰	۳۰
۰٫۲۳۹	۰٫۲۲۰	۰٫۶	۰٫۶	۵	۱۰	۳۱

جدول ۴- نتایج آنالیز واریانس مدل چند جمله‌ای درجه دوم پیش بینی میزان خاک هدررفته

منابع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	P.V
مدل	۱۴	۰٫۹۲۶۰۵۲	۰٫۰۶۶۱۴۷	۰٫۰۰۰
باقیمانده	۱۶	۰٫۰۵۵۸۱۶	۰٫۰۰۳۴۸۹	۰٫۱۵۸
جمع	۳۰	۰٫۹۸۱۸۶۸		

جدول ۵- واریانس ضرایب متغیر

مقادیر (p)	ضرایب	فاکتور	روابط
۰٫۰۰۰	۰٫۱۳۱۸	A	خطی
۰٫۰۰۰	-۰٫۱۱۰۵	B	خطی
۰٫۰۰۲	-۰٫۰۴۳۹	C	خطی
۰٫۰۰۹	-۰٫۰۳۶۱	D	خطی
۰٫۰۱۶	۰٫۰۲۹۸	A ²	درجه دوم
۰٫۱۴۲	۰٫۰۱۷۱	B ²	درجه دوم
۰٫۰۲۹	-۰٫۰۲۶۴	C ²	درجه دوم
۰٫۳۱۶	-۰٫۰۱۱۴	D ²	درجه دوم
۰٫۰۲۴	-۰٫۰۳۶۷	A*B	ضرب خارجی
۰٫۲۹۸	-۰٫۰۱۵۹	A*C	ضرب خارجی
۰٫۸۲۲	۰٫۰۰۳۴	A*D	ضرب خارجی
۰٫۰۱۰	۰٫۰۴۳۴	B*C	ضرب خارجی
۰٫۳۵۳	۰٫۰۱۴۱	B*D	ضرب خارجی
۰٫۰۵۴	۰٫۰۳۰۷	C*D	ضرب خارجی



شکل ۳- رابطه بین پاسخ‌های پیش‌بینی شده و واقعی

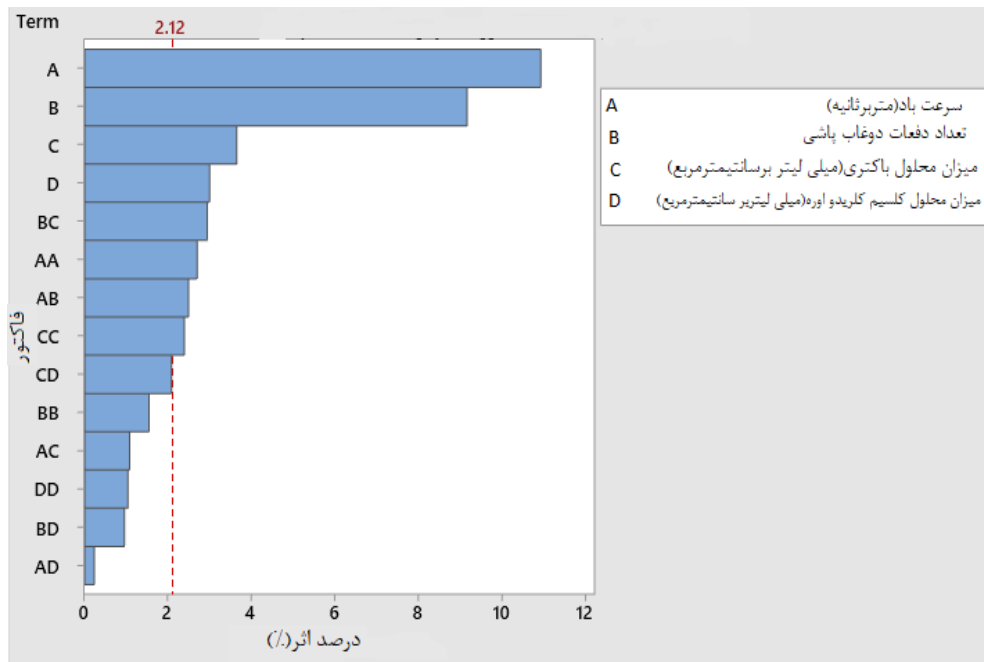
مورد مطالعه و محاسبه درصد اثر هر فاکتور بر پاسخ در شکل ۴ نشان داده شده است که با رابطه ۲ قابل محاسبه است.

$$P_i = \left\{ \frac{(b_i^2)}{\sum b_i^2} \right\} \times 100 \quad (2)$$

که در آن b ضریب رگرسیون هر ترم را بر اساس مقادیر کد شده نشان می‌دهد. همانطور که از نمودار شکل ۵ مشخص است، بالاترین اثر بر پاسخ مربوط به سرعت باد، تعداد دفعات دوغاب‌پاشی و میزان حجم محلول باکتری با درصد اثرهای به ترتیب ۱۰٫۹۳، ۹٫۱۶ و ۳٫۶۴ درصد است.

به طور کلی اهمیت هر متغیر در مدل با مقدار P مرتبط با آن تعیین می‌شود. ضریب متغیرهای مدل درجه دوم و نیز مقادیر P برای هر متغیر، توسط آنووا تعیین شده است که نتایج حاصل در جدول ۶ ارائه شده است. با تحلیل‌های انجام شده مشخص می‌شود که فاکتورهای (D,C,B,A) و (C^2 , A^2) اهمیت بالاتری نسبت به فاکتورهای (D^2 , B^2) دارند. همچنین فاکتورهای ($A*B$) و ($B*C$) اهمیت بیشتری در مقایسه با فاکتورهای ($A*C$)، ($A*D$)، ($B*D$) و ($C*D$) در مدل پیشنهادی دارند.

همچنین نمودارهای پارتو برای مقایسه میزان اثر متغیرهای



شکل ۴- نمودار اثر پار تو شاخص‌های ورودی به مدل بر پاسخ

مقدار خاک هدررفته در شرایطی که میزان حجم محلول کلسیم کلرید و اوره برابر ۰/۶ میلی‌لیتر بر سانتی‌متر مربع و تعداد دفعات دوغاب‌پاشی برابر ۵ باشد در شکل ۶ به صورت کانتورهای دو بعدی مشاهده می‌شود. شکل ۶ تاثیر مثبت استفاده بیشتر از باکتری در کاهش برداشت خاک را در مقادیر بیش از ۰/۵ میلی‌لیتر بر سانتی‌متر مربع تایید می‌کند که با رسیدن به مصرف باکتری ۰/۹ میلی‌لیتر بر سانتی‌متر مربع میزان خاک برداشت شده به حداقل مقدار خود می‌رسد.

همچنین از شکل ۶ مشخص می‌شود که در سرعت باد ۱۴ متر بر ثانیه در صورتی که میزان باکتری مصرفی از ۰/۵ به ۰/۹۵ میلی‌لیتر بر سانتی‌متر مربع افزایش یابد (کمتر از دو برابر)، مقدار خاک به هدر رفته از ۰/۷۱ به ۰/۳۵ درصد (کمتر از نصف) کاهش می‌یابد.

۳-۴- تعداد دفعات دوغاب‌پاشی و میزان محلول کلسیم کلرید و اوره

شکل ۷ نمودار کانتوری متغیرهای مورد بررسی را با جزئیات بیشتری نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در صورتی که میزان مصرفی محلول‌های اوره و کلسیم کلرید ۰/۹ میلی‌لیتر بر سانتی‌متر مربع باشد، تعداد دفعات دوغاب‌پاشی ۴ تا ۹ بار منجر به کاهش هرزرفتنی خاک کمتر از ۰/۲ درصد می‌شود و بنابراین در این حالت افزایش تعداد دفعات دوغاب‌پاشی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در نتیجه عملیات نخواهد داشت.

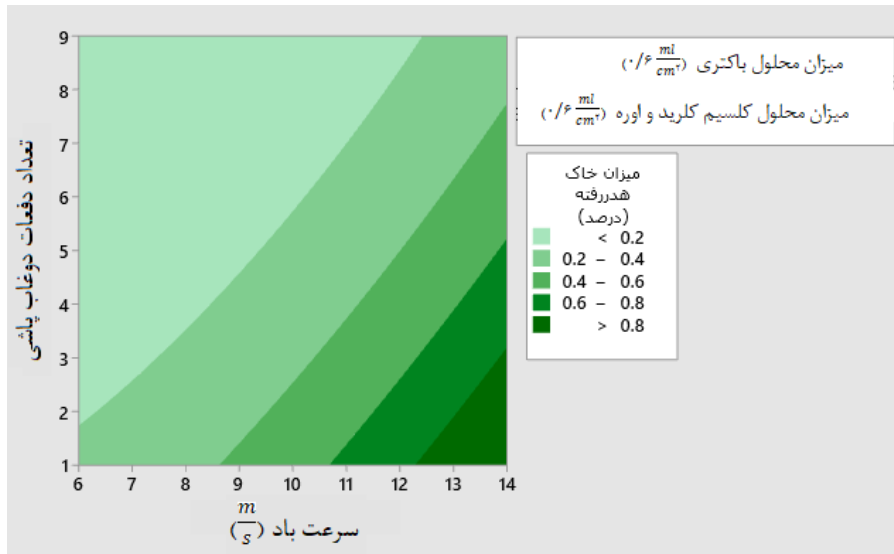
طرح‌های کانتوری دوبعدی برای تخمین میزان خاک هدررفته در شکل‌های ۵ تا ۱۲ ارائه شده است. این شکل‌ها نمایش گرافیکی از روابطی است که تعامل میان متغیرهای مستقل (سرعت باد، تعداد دفعات دوغاب‌پاشی، میزان محلول باکتری و میزان محلول کلسیم کلرید و اوره) در رسیدن به متغیر هدف (میزان خاک هدررفته) را نشان می‌دهد.

۳-۲- سرعت باد و تعداد دفعات دوغاب‌پاشی

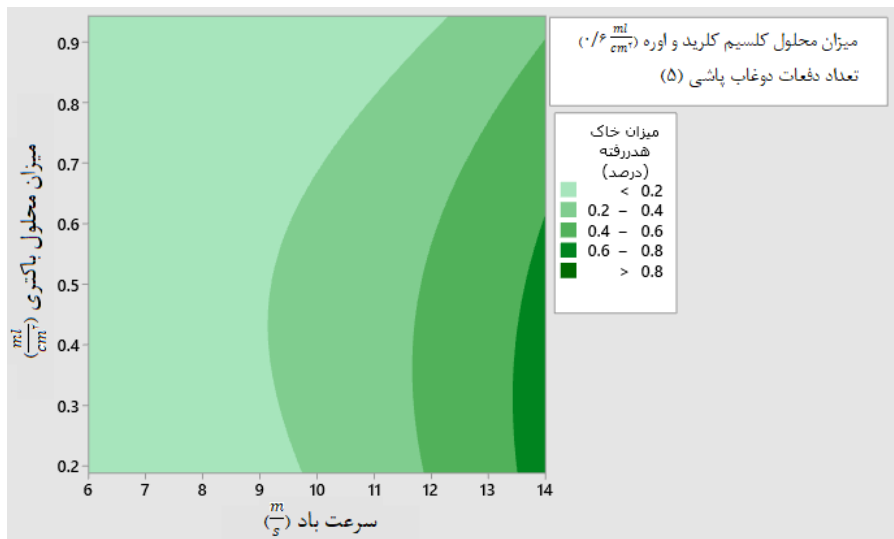
شکل ۵ تاثیر هم‌زمان سرعت باد و تعداد دفعات دوغاب‌پاشی بر میزان خاک برداشته شده از انباشته در اثر وزش باد را در شرایطی که میزان مصرف محلول باکتری و کلسیم کلرید و اوره برابر ۰/۶ میلی‌متر بر سانتی‌متر مربع باشد، نشان می‌دهد. همانطور که در شکل دیده می‌شود با افزایش تعداد دفعات دوغاب‌پاشی و کاهش سرعت باد، مقدار خاک برداشت شده از انباشته کمتر شده است و در دفعات ثابت دوغاب‌پاشی، نرخ خاک برداشت شده در سرعت‌های بیشتر باد، زیادتر است. نتایج حاصل از این نمودارها نشان می‌دهد که در ۵ بار عملیات دوغاب‌پاشی، در سرعت باد ۶ متر بر ثانیه، مقدار خاک برداشته شده از انباشته در مقابل وزش باد ۰/۷۰ درصد است، این در حالی است که با افزایش سرعت باد به ۱۴ متر بر ثانیه (کمتر از ۲/۵ برابر) مقدار خاک هدررفته به ۰/۷۱۰ درصد (به بیش از ۱۰ برابر) افزایش پیدا می‌کند.

۳-۳- سرعت باد و میزان محلول باکتری

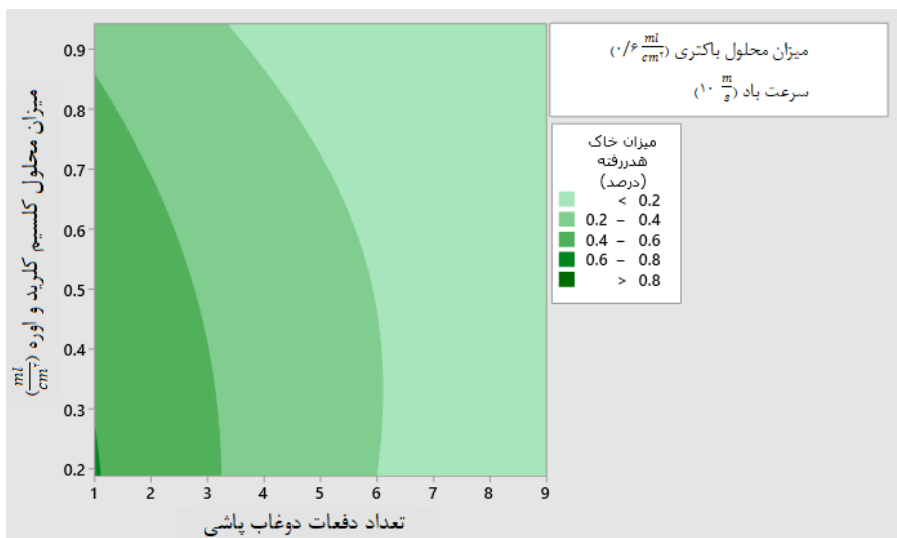
تاثیر هم‌زمان سرعت باد و میزان حجم محلول باکتری بر



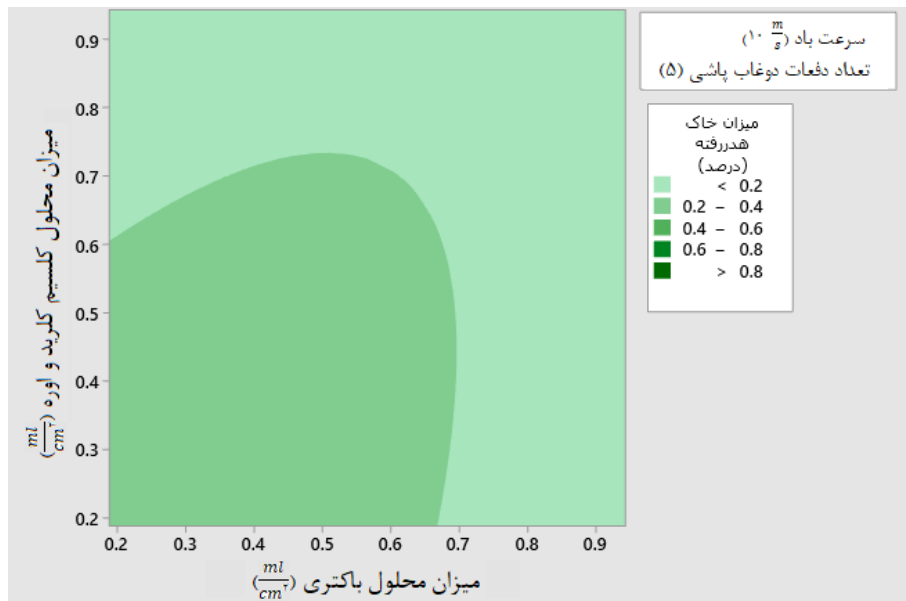
شکل ۵- نمودار کانتور تاثیر تعداد دوغاب پاشی و سرعت باد در میزان خاک هدررفته



شکل ۶- نمودار کانتور تاثیر سرعت باد و میزان محلول باکتری در میزان خاک هدررفته



شکل ۷- نمودار کانتور تاثیر تعداد دوغاب پاشی و میزان محلول کلسیم کلرید و اوره در میزان خاک هدررفته



شکل ۸- نمودار کانتور تاثیر میزان محلول باکتری و میزان محلول کلسیم کلرید و اوره در میزان خاک هدررفته

۳-۵- حجم باکتری و حجم کلسیم کلرید و اوره

نمودار شکل ۸ تاثیر هم‌زمان میزان محلول باکتری و میزان محلول کلسیم کلرید و اوره در مقدار خاک برداشته شده از انباشته را در شرایطی که سرعت باد برابر ۱۰ متر بر ثانیه و تعداد دفعات دوغاب‌پاشی برابر ۵ باشد، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که با افزایش استفاده از میزان باکتری مصرفی، مقدار خاک برداشت شده در اثر وزش باد کاهش می‌یابد. در مقادیر کم مصرف باکتری، با افزایش میزان اوره و کلسیم کلرید، مقدار خاک برداشت شده کاهش می‌یابد و بالعکس در مقادیر مصرف زیاد باکتری با افزایش مصرف اوره و کلسیم کلرید، مقدار خاک برداشت شده افزایش می‌یابد. از کانتورهای دوبعدی مواد مصرفی (شکل ۸) مشاهده می‌شود در مقادیر مصرف محلول‌های اوره و کلسیم کلرید بیش از ۰/۷ میلی‌لیتر بر سانتی‌متر مربع، میزان باکتری پاشیده شده بر روی پوشش تاثیر چندانی بر میزان تغییر خاک برداشت شده ندارد به طوری که در تمامی این حالات، مقدار خاک هرز رفته کمتر از ۰/۲ درصد است. نتایج حاصل از این نمودارها نشان می‌دهد که باید حد بهینه مواد اولیه مصرفی در طراحی پروژه‌های اجرایی تعیین شود که در بخش ۴-۵ به این موضوع پرداخته می‌شود.

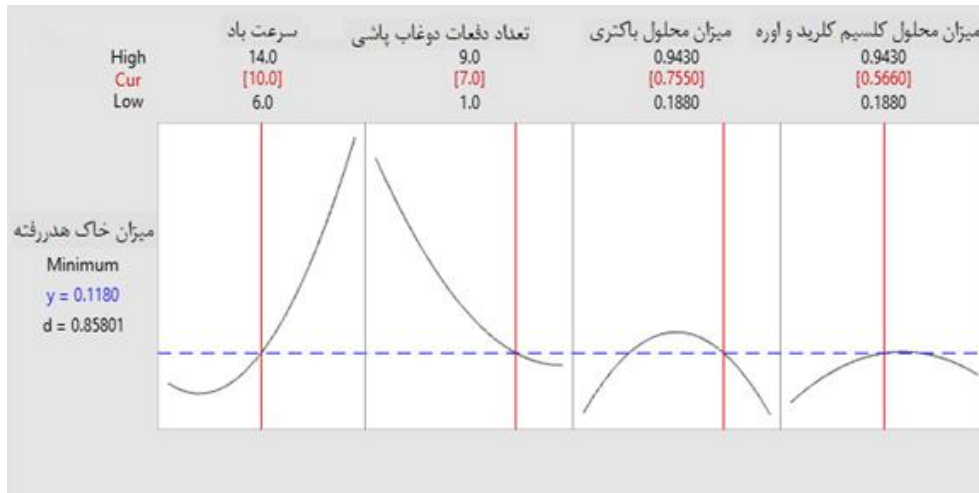
۳-۶- بهینه‌سازی

شناسایی سطح بهینه متغیرهای ورودی برای دستیابی به سطح پاسخ‌های مورد نظر، از ملزومات تمامی پژوهش‌های آماری است. از این رو، برای بهینه‌سازی مدل، سطح مطلوب متغیرهای ورودی (تعداد دفعات دوغاب‌پاشی، میزان محلول باکتری و میزان

محلول کلسیم کلرید و اوره) در سرعت متوسط تولید شده در آزمایشگاه (۱۰ متر بر ثانیه) با روش RSM در نرم‌افزار طراحی الگوی آزمایش (Minitab 19) بدست آمد. شکل ۹ روند تغییر بهینه میزان خاک هدررفته را در مقابل متغیرهای سرعت باد، تعداد دفعات دوغاب‌پاشی، میزان محلول باکتری و میزان محلول کلسیم کلرید و اوره نشان می‌دهد. محل تلاقی کمینه مقدار خاک هدررفته (خط‌چین آبی) با نمودارهای این تغییرات (خطوط مشکی) منجر به تعیین مقادیر بهینه متغیرهای ورودی (خطوط قرمز) می‌شود که این مقادیر بهینه در جدول ۶ آمده است. بنابراین با توجه به این شکل و جدول، با در نظر گرفتن سرعت باد متوسط ۱۰ متر بر ثانیه، تعداد دفعات دوغاب‌پاشی ۷ بار، میزان محلول باکتری ۰/۷۵۵۰ میلی‌لیتر بر سانتی‌متر مربع سبب دستیابی به مقدار کمترین خاک هدررفته ۰/۱۱۸۰ درصد می‌شود.

۳-۷- نتایج عدم استفاده از باکتری

برای بررسی عملکرد روش اجرا شده، نمونه‌ای بدون اجرای عملیات دوغاب‌پاشی نیز تهیه شد. شکل ۱۰- الف نمونه بدون دوغاب و فقط تحت پاشش آب و شکل ۱۰- ب نتیجه عملکرد وزش باد با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه بر روی این نمونه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، شکل انباشته پس از وزش باد بر هم خورده و بخش عمده خاک برداشته شده است. شکل ۱۰- ج انباشته تحت تزریق دوغاب را قبل از وزش باد و شکل ۱۰- د شرایط همین نمونه پس از وزش باد را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نمونه دوغاب‌پاشی شده در اثر وزش باد تغییر شکلی نداشته است.



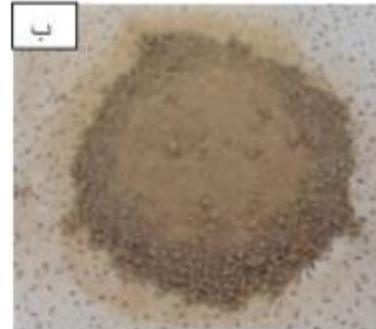
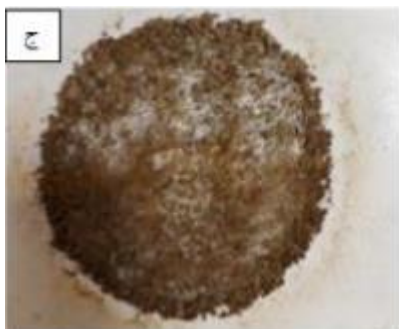
شکل ۹- گرافهای بهینه‌سازی مدل

جدول ۶- نتایج بهینه‌سازی مدل در متوسط سرعت باد تولید شده در آزمایشگاه (۱۰ متر بر ثانیه)

پارامترهای ورودی	تعداد دفعات دوغاب پاشی	میزان محلول باکتری (میلی لیتر بر سانتی‌متر مربع)	میزان محلول کلسیم کلرید و اوره (میلی لیتر بر سانتی‌متر مربع)
مقادیر بهینه	۷	۰٫۷۵	۰٫۵۶

یک مرحله پاشش دوغاب زیستی (محلول باکتری، کلسیم کلرید و اوره به میزان ۰٫۵۶ میلی لیتر بر سانتی‌متر مربع، مقدار برداشت خاک به ۰٫۵۴ درصد وزن کل انباشته کاهش می‌یابد.

نتایج آزمون‌ها نشان دادند که در حالت بدون دوغاب پاشی (که نمونه فقط تحت تاثیر آب پاشی بوده است)، وزش باد با سرعت تقریبی ۱۰ متر بر ثانیه قادر به برداشت ۲۲ درصد خاک انباشته شده در مدت زمان یک دقیقه است در حالی که فقط با



شکل ۱۰- نمایی از نمونه‌های ساخته شده، الف- نمونه بدون دوغاب، ب- نمونه بدون دوغاب در معرض وزش باد، ج- نمونه دوغاب پاشی شده و د- نمونه حاوی دوغاب در معرض وزش باد

۴- نتیجه گیری

منابع

1. Walter, j., weber, Jr., Raul, M., Mc, Ginley., and Lynn, E., Katz., (1991). "Sorption phenomena in subsurface systems concepts models and effects on contaminant fate and transport". Environmental and waer resources engineering, 25(5):499-528.
2. Howard, B. Cameron, I., (1998). "Dust control: Best practice environmental management in mining". Environment Australia, 73 p.
3. Petavratzi, E., Kingman, S., Lowndes, L., (2005). "Particulates from mining operations: A review of sources effect and regulations". Minerals engineering, 18(12):1183-1199.
4. Volkamer, R., Jimenez, JL., San Martini, F., (2006). "Secondary organic aerosol formation from anthropogenic air pollution: rapid and higher than expected". Geophysical Research Letters, 33(17): 1-4.
5. Periasamy, A., Chang, H., Yu-Jin, S., JaeSeong, S., (2016). "Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications". Department of biological Engineering, 5(250):1-26.
6. Gowthaman, S., Mohsenzadeh, A., Nakashima, K., Kawazaki, S., (2022). "Removal of ammonium by-products from the effluent of bio-cementation system through struvite precipitation". Materials today, 61: .243-249.
7. Ban Cheah, C, Ee Tan, L., Ramli, M., Kawazaki, S., (2021). "Recent advances in slag-based binder and chemical activators derived from industrial by-products – A review ". Construction and Building Materials, 272: .1-34.
8. Whiffin, V.S., van Paassen, L. A., Harkes, M. P. "Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique". Journal of Geomicrobiology, 24(5):417-423.
9. Cheng, L., Shahin, M., A, Cord-Ruwisch., R, Addis., M, Hartanto, T., Elms, C., (2014). "Soil stabilisation by Microbial-Induced Calcite Precipitation (MICP): Investigation into some pHyysical and environmental aspects". In the International Congress on Environmental Geotechnics, 7(36): 1105-1112.
10. Naeimi, M., Chu, J., (2017). "Comparison of conventional and bio-treated methods as dust suppressants. Environmental Science and Pollution Research", 12(24): 23341-23350.
11. Rajabi, S.R., Kiani, F., khavazi, K., Rouhipour, H., Khormali, F., (2019). "An environmentally friendly soil improvement technology for sand and dust storms control". Environmental Health Engineering and Management Journal, 6(1):63-71.
12. Farashahi, M., Bagherpour, R., Kalhori, H., Ghasemi, E., (2019). "Application of bacteria for

پخش و هرز مواد خردشده از انباشته های مواد معدنی و یا باطله های مربوطه در اثر وزش باد یکی از مشکلات بزرگ صنعت معدنکاری است. در بسیاری موارد باطله های انباشته شده در مجاورت معادن و کارخانه های فرآوری، حاوی مواد معدنی اند که در آینده نزدیک و با پیشرفت تکنولوژی به عنوان منابع ثانویه برای بازیابی عناصر ارزشمند مورد استفاده قرار خواهند گرفت. بنابراین توسعه روشی در جهت حفظ برجای مواد معدنی و امکان فرآوری مجدد آن در آینده ضروری است. یکی از روش های تثبیت انباشته ها استفاده از رسوب کلسیم کربنات برای اتصال دانه های خاک سطوح و ایجاد پوششی بر روی آن ها است. در این مقاله تاثیر اجزای دوغاب زیستی در کنترل انتشار خاک از انباشتگاه باطله فرآیند هیدرومتالورژی کارخانه فرآوری سرب و روی انگوران زنجان سنجیده شده است. عوامل موثر در عملکرد و تولید دوغاب زیستی شامل سرعت باد، تعداد دفعات دوغاب پاشی، میزان حجم باکتری و میزان حجم سایر اجزای دوغاب (کلسیم کلرید و اوره) با استفاده از انجام آزمون های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته اند. در طراحی آزمایش های مورد نیاز از روش رویه پاسخ (از نوع طراحی ترکیب مرکزی) استفاده شده که نتایج این آزمایش ها در نهایت به ارایه یک مدل منجر شده است. مقایسه نتایج آزمون ها و مدل پیشنهادی بر اساس تحلیل های واریانس انجام شده که نشان از عملکرد مثبت و اطمینان مطلوب مدل دارد. بر اساس نتایج بدست آمده، عوامل مورد بررسی تاثیر قابل توجهی در میزان خاک برداشته شده از انباشت را دارند ولی بعد از سرعت وزش باد (متغیر محیطی)، تعداد دفعات دوغاب پاشی (متغیر اجرایی) بیشترین تاثیر را دارا بوده است به طوری که تاثیر آن بیش از دو برابر سایر عوامل بوده است. با استفاده از مدل پیشنهادی می توان در شرایط وزش های باد با سرعت های متفاوت نسبت به تعیین بهینه اجزای دوغاب زیستی تصمیم گیری کرد. نتایج آزمون های انجام شده نشان می دهند که استفاده از ترسیب میکروبی کلسیم کربنات می تواند باعث کاهش بیش از ۹۷ درصدی در میزان خاک هدررفته و کنترل ایجاد گرد و غبار شود.

پی نوشت ها

1. Optical Density (OD)
2. Unified soil classification system
3. Response Surface Methodology (RSM)
4. Design of Experiment (DOE)
5. Central Composite Design (CCD)
6. Anova

20. Proudfoot, D., Brooks, L., Gammons, C.H., Barth, E., Bless, D., Nagisetty, R.M., Lauchnor, E. G., (2022). "Investigating the potential for microbially induced carbonate precipitation to treat mine waste". *Journal of Hazardous Materials*, 424: .
21. Van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J. M, van der Star, W. R. L., van Loosdrecht, M. C. M., (2010). "Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis:large-scale biogROUT experiment". *Geotechnical and geoenvironmental Engineering*, 136(12):1721-1728.
22. Cheng, L., Cord-Ruwisch, R.,Shahin, M. A., (2013). "Cementation of sand soil by microbially induced calcite precipitation at various degrees of saturation". *Canadian Geotechnical*,50(1): 81-90.
23. Al Qabany, A., Soga, K., (2013). "Effect of chemical treatment used in MICP on engineering properties of cemented soils". *Geotechnique*, 63(4):331-339.
24. Maleki, M., Ebrahimi, S., Asadzadeh, F., Emami Tabrizi, M., (2016). "Performance of microbial-induced carbonate precipitation on wind erosion control of sandy soil". *Int. J. Environ. Sci. Technol*,13(2):937-944.
25. Bernardi, D., DeJong, J.T., Montoya, B.M., Martinez, B.C., (2014). "Bio-bricks: Biologically cemented sandstone bricks", <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.019>, *Nature*, pp. 462-469.
26. Box, G. E. P., Draper, N. R. (2007). "Response surfaces, mixtures, and ridge analyses". Wiley, chap. 2, pp. 1-855.
13. Chae, S.H., Chung, H., Nam, K., (2021). "Evaluation of microbially Induced calcite precipitation (MICP) methods on different soil types for wind erosion control". *Environmental Engineering Research*, 26(1): 1-6.
14. Keykha, H. A., Asadi, A., Zareian, M., (2017). "Environmental Factors Affecting the Compressive Strength of Microbiologically Induced Calcite Precipitation-Treated Soil". *Geomicrobiology Journal* 10: 889-894.
15. Mwandira, W., Nakashima, K., Kawasaki, S., Ito, M., Sato, T., Igarashi, T., Banda, K., Chirwa, M., Nyambe, I., Nakayama, S., Ishizuka, M., (2019). "Efficacy of biocementation of lead mine waste from the Kabwe Mine site evaluated using *Pararhodobacter sp.*". *Environmental Science and Pollution Research*, 26:15653-15664.
16. Deng, X., Yuan, Z., Li, Y., Liu, H., Feng, J., Wit, B., (2020). "Experimental study on the mechanical properties of microbial mixed backfill". *Construction and Building Material*, 265:
17. Oliveira D.D., Horn, E.J., Randall, D.J., (2021). "Copper mine tailings valorization using microbial induced calcium carbonate precipitation". *Journal of Environmental Management*. 298:
18. Kang, B., Zha, F., Deng, W., Wang, R., Sun, X., Lu, Z., (2022). "Biocementation of Pyrite Tailings Using Microbially Induced Calcite Carbonate Precipitation". *Molecules*, 27: 1-27.
19. Parvizi, S., Doostmohammadi, R., Ghasemian Roodsari, F., (2021). "The Enhancement of Mine Waste Stability Using Biocementation". *Journal of Mining Science*, 57: 557-568.