

## The Effect of Mulch in Controlling Erosion and Dust Originated from Chadormalu Iron Mine Tailings

Mehrdad Barati,<sup>1\*</sup> Akram Ostad Hosseini,<sup>2</sup> Mohammad Amin Moazami<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

<sup>2</sup> Ministry of Industry, Mine and Trade, Esfahan, Iran

**Introduction:** Chadormalu iron deposit is located in Bafaq-Saghand iron ore region. This mine is located in Yazd province, 180 km east-northeast of Yazd city, 65 km north of Bafaq city and 50 km north of Choghart mine. Chadormalu consists of two separate iron deposits. There are large amounts of tailings soil around Chadormalu mine and its processing refractories. Wind, rain and weather changes cause the dispersion and release of soil particles in these accumulations. Some of these soils contain heavy elements such as nickel, vanadium and chromium, which are harmful to human health and the environment, and their distribution in the environment should be prevented. There are various methods such as using water, polymer materials, petroleum mulch, and potash waste to stabilize the dust, each having specific weaknesses such as durability. Molasses and lignin sulfate are used for dust control, these additives are non-toxic and have low cost. The research aims is to investigate the effect of mulch in controlling erosion and dust originated from Chadormalu iron mine tailings.

**Material and Methods:** In general, 10 variables (montmorillonite, lignin sulfonate, perlite, zeolite, molasses, magnesium chloride, calcium chloride, potassium chloride, calcium carbonate, water) were investigated and used in order to conduct research and prepare mulch suitable for the environmental conditions of the region. . In this study, the method of conducting experiments was used randomly and the experiments were conducted in 6 stages with the construction and application of different mulches. The tests carried out to check the efficiency of the manufactured mulch include ICP-OES, SEM, granulation, shear strength, wind tunnel and thickness determination.

**Results and Discussion:** In this research, the combination of lignin sulfonate, molasses, and calcium chloride has been used to stabilize the waste accumulations of Chadormello mine. The operation of stabilizing waste piles with mulch leads to an increase in the shear strength of the samples. The mulched sample is higher than the non-mulched sample. Increasing the vertical load on the samples led to an increase in the strength of the samples, which is normal in shear behavior. One of the most important characteristics of the mulch used in this research is the thickness of the mulch on the samples. The measurement of the thickness of the mulch layer on the samples of Chadormelo showed that the thickness of the mulch layer varies from 2 to 4 cm which are placed in the category of very good quality, which indicates the durability and high resistance of the mulched samples. The index of wind erosion in the mulched samples of Chadormalu is on average in the range of 10 to 25%, which shows the good quality of these samples.

**Conclusion:** The results of ICP-OES analysis on mulch samples showed that the concentration of heavy metals is lower than the permissible limit. The results of SEM analysis clearly show the creation of a coating layer on the soil surface

---

\* Corresponding Author Email Address: Barati@basu.ac.ir

and the creation of adhesion and continuity between soil particles due to the use of mulch. As a result of the stabilization process, the shear strength and adhesion of the samples show a significant increase. The results of the wind tunnel test showed that the stabilization and mulching operations have led to a significant reduction in the concentration of sediment particles, and the increase in the amount of mulch spraying causes more penetration of the mulch in the soil and an increase in the concentration of the mulch despite the decrease in the depth of its penetration in the soil, due to the increase in the amount Adhesion between soil particles makes it more resistant to wind erosion.

**Keywords:** Soil stabilization, Mulch, Wind tunnel, Shear strength, Chadormalu

نسخه  
پایان  
انتشار

## بررسی کارایی مالچ در کنترل فرسایش و گرد و غبار ناشی از باطله‌های معدن آهن چادرملو

مهرداد براتی<sup>۱\*</sup>، اکرم استاد حسینی<sup>۲</sup>، محمد امین معظمی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

<sup>۲</sup> وزارت صنعت معدن تجارت، اصفهان، ایران

**سابقه و هدف:** کانسار آهن چادرملو در منطقه آهن خیز بافق- ساغند قرار دارد. این کانسار در استان یزد در فاصله ۱۸۰ کیلومتری شرق- شمال شرق شهر یزد و ۶۵ کیلومتری شمال شهرستان بافق و ۵۰ کیلومتری شمال معدن چغارت قرار دارد. چادرملو از دو توده معدنی آهن دار تشکیل شده است. مقادیر زیادی باطله معدنی (خاک و سنگ) در اطراف معدن چادرملو و کارخانه‌فرآوری آن انباشت شده است. وزش باد، بارندگی و تغییرات جوی سبب پراکندگی و انتشار ذرات خاک موجود در این انباشت‌ها شده است. برخی از این خاک‌ها حاوی عناصر سنگینی مانند نیکل، وانادیوم و کروم هستند که برای سلامتی انسان و محیط زیست مضر می‌باشند و بایستی از پراکنش آنها در محیط جلوگیری به عمل آید. روش‌های متنوعی از قبیل استفاده از آب، مواد پلیمری، مالچ‌های نفتی، و ضایعات پتاس به جهت تثبیت گرد و غبار وجود داشته که هر کدام دارای نقاط ضعف خاص از جمله دوام و مدت ماندگاری می‌باشند. از ملاس و لیگنین سولفات برای کنترل گرد و غبار استفاده می‌شود، این مواد افزودنی غیر سمی و دارای هزینه کم هستند. هدف از این مطالعه، بررسی کارایی مالچ در کنترل فرسایش و گرد و غبار ناشی از باطله‌های معدن آهن چادرملو می‌باشد.

**مواد و روش‌ها:** به طور کلی جهت انجام تحقیق و تهیه مالچ مناسب با شرایط محیطی منطقه، ۱۰ متغیر (مونت‌موریونیت، لیگنوسولفانات، پرلیت، ژئولیت، ملاس، کلرید منیزیم، کلرید کلسیم، کلرید پتاسیم، کربنات کلسیم، آب) مورد بررسی و استفاده قرار گرفت. در این بررسی از روش انجام آزمایشات به صورت تصادفی استفاده شده است و آزمایشات در ۶ مرحله با ساخت و کاربرد مالچ‌های مختلف انجام گردید. آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی کارایی مالچ ساخته شده شامل آنالیز شیمیایی ICP-OES، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، دانه‌بندی، مقاومت برشی، تونل باد و تعیین ضخامت می‌باشند.

**نتایج و بحث:** در این پژوهش از ترکیب لیگنوسولفانات، ملاس، کلرید کلسیم برای تثبیت دپو باطله معدن چادرملو استفاده شده است. عملیات تثبیت دپو باطله با مالچ منجر به افزایش مقاومت برشی نمونه‌های مالچ پاشی شده نسبت به نمونه بدون مالچ شده است. افزایش بار عمودی بر روی نمونه‌ها منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها گشته که در رفتار برشی طبیعی است. افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها در اثر عملیات تثبیت دلیل دیگری بر اثربخش بودن این روش تثبیت در جلوگیری از فرسایش بادی می‌باشد. یکی از مهمترین ویژگی‌های مالچ مورد استفاده در این تحقیق ضخامت مالچ بر روی نمونه‌ها می‌باشد. اندازه‌گیری ضخامت لایه مالچ بر روی نمونه‌های چادرملو نشان داد که ضخامت لایه مالچ از ۲ تا ۴ سانتیمتر متغیر

\* Corresponding Author Email Address: Barati@basu.ac.ir

می‌باشد، که در رده با کیفیت خیلی خوب قرار می‌گیرند، که نشان‌دهنده ماندگاری و مقاومت بالای نمونه‌های مالچ پاشی شده می‌باشد. شاخص فرسایش بادی در نمونه‌های چادرملو به طور متوسط در طبقه ۱۰ تا ۲۵ درصد قرار می‌گیرد که کیفیت خوب این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

**نتیجه‌گیری:** نتایج آنالیز ICP-OES روی نمونه‌های مالچ نشان داد که غلظت فلزات سنگین کمتر از حد مجاز است. نتایج آنالیز و تصویربرداری SEM به طور واضحی ایجاد یک لایه پوشش بر سطح خاک و ایجاد چسبندگی و پیوستگی بین ذرات خاک را در اثر استفاده از مالچ نمایان ساخته است. در اثر عملیات تثبیت، مقاومت برشی و چسبندگی نمونه‌ها افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهند. نتایج آزمایش تونل باد نشان داد که عملیات تثبیت و مالچ پاشی منجر به کاهش قابل توجه تمرکز ذرات رسوب گردیده است و افزایش میزان پاشش مالچ باعث نفوذ بیشتر مالچ در خاک و افزایش غلظت مالچ علی‌رغم کاهش عمق نفوذ آن در خاک، به واسطه افزایش مقدار چسبندگی بین ذرات خاک، سبب مقاومت بیشتر آن در مقابل فرسایش بادی می‌شود. نتایج آنالیز SEM به طور واضحی ایجاد یک لایه پوشش بر سطح خاک و ایجاد چسبندگی و پیوستگی بین ذرات خاک را در اثر استفاده از مالچ معلوم می‌سازد. در اثر عملیات تثبیت مقاومت برشی و چسبندگی نمونه‌ها افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهند. عملیات تثبیت نمونه‌ها باعث افزایش قابل توجه مقاومت برشی و چسبندگی نمونه‌ها شده است. نتایج آزمایش تونل باد در یک بازه زمانی ۲ دقیقه در سرعت‌های مختلف نشان داد که عملیات تثبیت منجر به کاهش قابل توجه تمرکز ذرات رسوب گردیده است. نتایج نشان داد که افزایش میزان پاشش مالچ باعث نفوذ بیشتر مالچ در خاک و افزایش غلظت مالچ علی‌رغم کاهش عمق نفوذ آن در خاک، به واسطه افزایش مقدار چسبندگی بین ذرات خاک، سبب مقاومت بیشتر آن در مقابل فرسایش بادی می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** تثبیت خاک، مالچ، تونل باد، مقاومت برشی، کانسار آهن چادرملو، بافق

## مقدمه

به طور کلی عملیات معدن‌کاری مشکلات فراوانی را برای محیط زیست فراهم می‌آورد که از جمله آن‌ها می‌توان به تولید باطله، تولید پساب اسیدی و در نتیجه تحرک و آزادسازی فلزات سمی و سنگین، آلودگی خاک، آلودگی هوا، آلودگی آب، خطرات سلامتی برای انسان و سایر موجودات اشاره نمود (Alizadegan, 2010). معدن‌کاری و فرآوری آهن از وسیع‌ترین فعالیت‌های انسان‌زادی است که سبب جابجایی حجم عظیمی از سنگ و تولید انواع متنوعی از باطله‌ها می‌شود. برهم‌زدن غلظت زمین‌شیمیایی طبیعی عناصر در محیط‌های زمین-شناختی مانند آب، رسوب و خاک از مهم‌ترین عواقب زیست محیطی معدن‌کاری، فرآوری و ذوب کانسنگ‌های اکسیدی آهن به همراه ترکیبات سولفیدی است. این اختلال می‌تواند عوارض زیست محیطی جدی را به زیست بوم سامانه‌های اطراف این مراکز تحمیل کند؛ زیرا محیط‌های آب، رسوب و خاک به نوعی بستر رشد و منبع تامین عناصر مورد نیاز موجودات زنده در چرخه‌های زیستی محسوب می‌شوند (Deng et al., 2008). به‌طور کلی میزان فرسایش بادی در خاک‌ها و انباشت‌های معدنی به عواملی مانند بافت (Bagnold, 1937) و ساختمان خاک (Jafari Shalkoohy et al., 2015)، میزان چسبندگی ذرات خاک به یکدیگر (Shiyaty et al., 1972)، مقدار ماده آلی موجود در خاک (Refahi, 2012)، میزان رطوبت (Chepil., 1956; Zhongju et al., 2018)،

زبری سطح (Armbrust et al, 1963) و شکل ذرات خاک و انباشت معدنی (Bagnold., 1941) بستگی دارد. همچنین عوامل محیطی مانند دما (Refahi, 2012)، سرعت باد (Chepil, 1945; Zhongju et al., 2018) میزان بارندگی (Mehrabi et al., 2015) و مقدار پوشش گیاهی منطقه (Gholami Tabas et al., 2013; Zhongju et al., 2018) بر مقدار فرسایش خاک تاثیرگذار هستند. از جمله مهم‌ترین این عوامل سرعت باد و بافت خاک موجود در یک منطقه می‌باشد (Refahi, 2012; Zhongju et al., 2018).

کانسار آهن چادرمو دارای ۴ سد باطله، دو حوضچه جدید در حال آب‌گیری و نیز دو حوضچه در حال ساخت می‌باشد (شکل ۱). تخلیه باطله مسئله‌ای بزرگ در حفظ محیط زیست می‌باشد، این مسئله بویژه در مورد کانسارهای بزرگ مثل چادرمو اهمیت زیادی دارد، زیرا در این قبیل موارد حجم باطله بسیار زیاد است. انباشت باطله گذشته از تاثیرات عینی آن بر روی محیط اطراف علاوه بر از بین رفتن منظره طبیعی یک ناحیه، تاثیرات مهمی بر روی محیط زیست دارد، زیرا اجزاء تشکیل‌دهنده باطله، شامل دانه‌های جامد، یون‌های فلزات سنگین، انواع مواد شیمیایی مصرف شده در کارخانه کانه‌آرایی، به محیط نفوذ می‌کنند و باعث آلودگی آبخوان‌ها می‌شوند (Mirahmadi and Bangian Tabriz, 2016; Kashefighasemabadi et al., 2019). همچنین وجود جریان‌های جوی و بادهای شدید باعث جابجایی این ذرات که گاهاً حاوی فلزات سنگین است به محیط اطراف و زمین‌های کشاورزی می‌شود. یکی از روش‌های موثر جهت جلوگیری از پدیده فرسایش باطله‌های معدنی و کاهش اثرات زیست محیطی آن‌ها، افزایش پوشش سطحی و بالا بردن مقاومت باطله‌ها در برابر فرسایش می‌باشد. از جمله روش‌های پرکاربرد برای تثبیت باطله‌های مستعد فرسایش بادی استفاده از انواع مالچ می‌باشد. مالچ کلمه‌ای انگلیسی به معنی "پوشش" است و به مواردی اطلاق می‌گردد که می‌تواند پوشش محافظتی بر روی زمین یا در اطراف ریشه گیاه ایجاد کند. این لغت سابقاً به پوشش سطح خاک به وسیله مواد آلی از قبیل کاه و کلش، برگ گیاهان و گاهی کودهای حیوانی و مواد مشابه اطلاق می‌شد، ولی اخیراً به مواد طبیعی و یا مصنوعی دیگری نیز که بتواند پوشش محافظتی به صورت یک لایه مجزا و گسترده روی زمین ایجاد کند و سطح رویی خاک را از گزند عوامل مختلف باد و باران مصون دارند اطلاق می‌شود (Refahi, 2012) برای تثبیت خاک از روش‌های مختلف فیزیکی (مانند: شخم زدن زمین)، شیمیایی (مانند: مالچ‌های نفتی و پلیمری) و زیستی (مانند: کاشت گیاه و استفاده از مالچ‌های طبیعی) استفاده می‌شود که هرکدام دارای مزایا و معایبی می‌باشد (Amraei and Dahrzma, 2020).

(Ekhtesasi et al. (2013) در تحقیقی استفاده از مالچ به‌عنوان بستری برای انجام فعالیت‌های احیا بیولوژیک و کنترل فرسایش بادی را مورد مطالعه قرار داده و مالچ‌های بیولوژیک (سریشوم و صمغ گیاهی)، معدنی (ترکیبات سیمان سیاه و سفید) و شیمیایی (ترکیبات اوره فرمالدئید) را مورد آزمایش قرار دادند. نامبردگان با توجه به نتایج به دست آمده استنتاج نمودند که ترکیب مالچ سیمانی سفید از سایر مالچ‌ها در مقابل آزمایش‌های فیزیکی انجام شده مناسب‌تر است. (Safaei et al. (2012) تعیین بهترین ترکیب سرباره فولادسازی (فولاد مبارکه) به‌عنوان مالچ جهت تثبیت رسوبات فرسایش یافته بادی در خاک‌های منطقه شرق اصفهان را مورد بررسی قرار داده است. نتایج به دست آمده نشان داد که به دام‌اندازی ذرات با افزایش سرعت باد، بیشتر می‌گردد. (Movehedan et al. (2011) اثر ماده پلیمری

پلیوینیلستات را در کنترل میزان فرسایش بادی به صورت آزمایشگاهی در تونل باد مورد بررسی قرار دادند و نتایج را با نمونه‌های تیمار شده با آب مقایسه کردند. نتایج نشان داد که افزودن ماده پلیمری پلیوینیلستات میزان فرسایش بادی را در نمونه‌های ماسه بادی به صفر کاهش داده است. مالچ‌هایی که در سال‌های اخیر مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از: محلول کلرید سدیم، کربنات سدیم و یا پتاسیم، فرآورده‌های سنگین نفتی، کاه و قیر امولسیونه، کوراسل، فیبر، سنگریزه، کاغذ، پشم شیشه، لایه‌های نازک پلاستیک، پلی‌اتیلن و سلوفان (Refahi, 2012). هدف از این پژوهش ساخت بهترین ترکیب تثبیت کننده (مالچ) جهت تثبیت باطله‌های معدن آهن چادرملو می‌باشد. بدین منظور با تهیه غلظت‌های مختلف از مالچ و پاشش آن بر روی باطله‌ها، قابلیت آن در کنترل میزان فرسایش بادی مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱. الف) کانسار آهن چادرملو، ب) باطله‌های کانسار آهن چادرملو

## مواد و روش‌ها

### معرفی منطقه مورد مطالعه

کانسار آهن چادرملو در منطقه آهن خیز بافق - ساغند قرار دارد. این کانسار در استان یزد در فاصله ۱۸۰ کیلومتری شرق - شمال شرق شهر یزد و ۶۵ کیلومتری شمال شهرستان بافق و ۵۰ کیلومتری شمال معدن چغارت قرار دارد. چادرملو یکی از بزرگترین نهشته‌های آهن شناخته شده منطقه معدنی می‌باشد. این کانسار با مقدار ذخیره اصلی ۴۰۰ Mt با آهن ۵۵ درصد و ۲/۱۵ درصد فسفات یکی از نهشته‌های اکسید آهن - آپاتیت در ناحیه بافق در کمربند کاشمر - کرمان ایران مرکزی می‌باشد (Torab, 2008). کانسار چادرملو میزبان سنگ‌های آتشفشانی - نفوذی پرکامبرین است، که با سنگ‌های ریولیت، ریوداسیت، گابرو، گرانیت، دیوریت و دایک‌های دیابازیک و همچنین سنگ‌های دگرگونی با انواع مختلف شیست نمود پیدا کرده است. به طور کلی چادرملو از دو توده شمالی و جنوبی تشکیل شده است که توده شمالی بزرگترین توده معدن است و حدود ۸۰ درصد کل ذخیره را تشکیل می‌دهد. چادرملو از دو توده معدنی تشکیل شده است. طبق داده‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس توده شمالی حداقل تا ۳۰۰ متر ژرفا دارد. قسمت مرکزی توده شمالی را سنگ‌های

آذین درونی دربرگرفته‌اند. ژرفای توده جنوبی کمتر از توده شمالی می‌باشد و در این توده آهک‌های مارنی قابل مشاهده است (Nayebi *et al.*, 2022; Heidarian *et al.*, 2018).

### تهیه و آماده سازی نمونه‌ها

برخی از رایج‌ترین کنترل‌کننده‌های استفاده‌شده در دپوها و انباشت‌های معدنی در جدول ۱ آورده شده است. در این شکل کنترل‌کننده‌ها از لحاظ ملاحظات زیست‌محیطی و محدودیت عملکرد و مزایای عملکرد مقایسه شده‌اند (Morera and González, 2018).

جدول ۱. رایج‌ترین کنترل‌کننده‌های استفاده‌شده در انباشت‌های معدنی (Morera and González, 2018)

کنترل‌کننده‌ها	بازدهی	شسته شدن خاک	تغییرات PH و شوری	اثرات منفی بر گونه‌های جانوری	تولید گل	خورده‌گی مواد	جادو رطوبت (سطح انزوده)	هزینه بالا
آب	۵۰	×	×		×			
کلرید کلسیم	۵۵	×				×	×	
کلرید منیزیم	۷۷	×	×	×		×	×	
لیگنوسولفونات	<۶۳						×	
ملاس	<۸۴			×			×	
امولسیون‌های نفتی	>۹۵							×
پلیمرهای مصنوعی	۵۰-۴۰							

با توجه مطالعات انجام شده، از ملاس برای کنترل گرد و غبار استفاده می‌شود، این ماده افزودنی غیر سمی و دارای هزینه کم است و اثرات زیست‌محیطی مخرب ندارد (Omane *et al.*, 2018; Kotta *et al.*, 2019; Parsakhoo *et al.*, 2020). در این پروژه هم از درصدهای ۱/۰٪، ۰/۲٪، ۱٪، ۵٪ استفاده شد. همچنین از لیگنوسولفونات برای کنترل گرد و غبار استفاده شده است این ماده افزودنی در درصدهای کم غیرسمی و به راحتی با آب رقیق شده و غیر خورنده و در درصدهای پایین اثرات مخرب زیست‌محیطی ندارد و به همین علت از درصدهای ۱/۰٪، ۰/۲٪، ۱٪، ۲/۵٪ استفاده شده است. همچنین به‌طور گسترده سوئد و آمریکا که دو کشور حساس به محیط‌زیست هستند برای کنترل گرد و غبار در معادن از لیگنوسولفونات استفاده می‌کنند (Adams, 1998). همچنین از کلرید کلسیم برای کنترل گردوغبار استفاده شده است این ماده افزودنی غیرسمی و غیر خورنده و اثرات زیست‌محیطی مخرب ندارد. به طور کلی در این تحقیق ۱۰ متغیر (شامل مونت‌موریونیت، لیگنین سولفونات، پرلیت، زئولیت، ملاس، کلرید منیزیم، کلرید کلسیم، کلرید پتاسیم، کربنات کلسیم، آب) مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی از روش انجام آزمایشات به صورت تصادفی استفاده شده است و آزمایشات در ۶ مرحله انجام گردید.

### آزمایش اول

مواد مورد استفاده برای تهیه مالچ با ترکیب مناسب شامل مونت‌موریونیت، لیگنوسولفانات، پرلیت، زئولیت، ملاس، منیزیم کلراید، کلسیم کلراید، پتاسیم کلراید، کلسیم کرینات، آب می‌باشند. ۰/۱ گرم از هر یک از این مواد را در بشر با ۱۰۰ cc آب به وسیله هم زن آزمایشگاهی مخلوط شد تا به خوبی مواد قابل حل و پاشش شوند.

در ۲ ظرف جداگانه استیل به مقدار یک کیلوگرم از باطله چادرملو ریخته شد. سپس باطله موجود در ظرف‌ها را به سه قسمت مساوی تقسیم کرده و یک قسمت را به عنوان نمونه دست نخورده برای مقایسه نهایی نگه داشته تا پس از یک هفته تاثیر نمونه‌های مالچ پاشی شده به نسبت حالت اولیه‌ی خاک مقایسه گردد. در مرحله بعد مالچ ساخته شده بر روی دو قسمت دیگر ریخته شد (شکل ۲). بررسی نمونه‌های مالچ پاشی شده بعد از یک هفته نشان داد که در این آزمایش باطله‌های مذکور به خوبی از نظر ظاهری جمع نشده بودند و با اعمال کمی فشار توسط انگشت، تخریب می‌شدند.



شکل ۲. نمونه خاک باطله مالچ پاشی شده و نشده معدن آهن چادرملو در آزمایش اول

## آزمایش دوم

مواد مورد استفاده در آزمایش اول جهت تهیه مالچ برای آزمایش دوم نیز مورد استفاده قرار گرفت. ۰/۵ گرم از هر یک از این مواد با ۱۰۰ سی سی آب مخلوط شد. سپس مالچ ساخته شده بر روی نمونه‌های باطله چادرملو ریخته شد. بررسی نمونه‌های مالچ پاشی شده بعد از یک هفته نشان داد که در این آزمایش نیز باطله‌های مذکور به خوبی از نظر ظاهری جمع نشده بودند و استحکام لازم را نداشتند.

## آزمایش سوم

در این آزمایش ۴ عدد پلیت استیل با یک کیلوگرم از خاک باطله چادرملو پر شد. هر پلیت را به سه قسمت و هر قسمت را به سه قسمت دیگر تقسیم گردید، بر این اساس ۶ مدل مالچ متفاوت در نظر گرفته شد که در هر یک از این مالچ‌ها یکی از مواد با درصد دو برابر به نسبت سایر مواد لحاظ گردید تا درصد تاثیرگذاری مواد مختلف پس از گذشت یک هفته بررسی شود و به مرور موارد اضافی از مالچ حذف گردد تا به یک ترکیب موثر در استحکام خاک‌های مورد نظر در برابر آب و جابه جایی باد دست یابیم. از ۹ مورد مواد به کار برده



شده در ساختن مالچ‌ها، ۶ عدد از آن‌ها که در استحکام خاک نقش موثرتری دارند و به عنوان مواد پایه انتخاب شدند. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است ۶ نمونه مالچ با نسبت‌های مختلف از مواد بکار برده شده تهیه گردید.

جدول ۲. مواد مورد استفاده جهت تهیه مالچ در آزمایش سوم

ترکیب افزودنی مالچ (بر حسب گرم)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مونت‌موریونیت	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
لیگنین سولفانات	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
پرلیت	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
زئولیت	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
ملاس (سی سی)	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵
کلرید منیزیم	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۵
کلرید کلسیم	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
کلرید پتاسیم	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
کربنات کلسیم	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵
سولفونات کلسیم	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۱
آب (سی سی)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

مالچ‌ها به صورت جداگانه در ۶ قسمت از ۹ قسمت جدا شده، پاشیده شد و ۳ قسمت باقی مانده در هر پلیت به عنوان نمونه دست نخورده در نظر گرفته شد تا پس از یک هفته خاک‌های مالچ‌پاشی شده در هر ردیف با یک قسمت مالچ‌پاشی نشده مقایسه گردد. بررسی نمونه‌ها بعد از یک هفته نشان داد که در تمام نمونه‌ها ترک ایجاد شده است.

#### آزمایش چهارم

در این آزمایش با بررسی‌های صورت گرفته از حالات ظاهری خاک ناشی از انباشت باطله معدن چادرملو، ۸ مورد (ملاس، مونت‌موریونیت، کلرید منیزیم، لیگنین، کربنات کلسیم، زئولیت، سولفونات کلسیم و کلرید کلسیم) از ۹ مورد مواد را به صورت جداگانه به غلظت ۱ گرم در ۱۰۰ سی سی آب مخلوط کرده و پاشش انجام شد تا از این طریق ماده مناسب تشخیص داده شود. طی بررسی نمونه‌های جداگانه از مالچ‌ها، سه ماده مناسب تر شامل کربنات کلسیم، ملاس و لیگنین جهت ادامه آزمایش‌ها تشخیص داده شد.

#### آزمایش پنجم

با بررسی‌های انجام شده مشخص گردید در آزمایش قبلی مواد موثرتر در تهیه مالچ، کربنات کلسیم، ملاس و لیگنین می‌باشند و بنای ساخت مالچ برای آزمایش جدید، این ۳ مورد در غلظت‌های متفاوت در نظر گرفته شد تا به مالچ مورد نظر با غلظت مناسب مواد دست یافته شود (جدول ۳). سپس مواد مورد نظر را به صورت جدا گانه در ۱۰۰ سی سی آب در بشر مخلوط کرده و توسط پاشنده بر روی باطله چادرملو پاشیده شد. بررسی نمونه‌ها بعد از یک هفته نشان داد که نمونه اول و دوم بر روی باطله چادرملو تاثیر بسیار عالی داشته و خاک به شدت مستحکم شده است.

جدول ۳. مواد مورد استفاده جهت تهیه مالچ در آزمایش پنجم

ترکیب افزودنی مالچ	۱	۲	۳
--------------------	---	---	---

لیگنوسولفانات (گرم)	۱	۴	۵/۲
ملاس (سی سی)	۴	۱	۲/۵
کلرید کلسیم (گرم)	۲/۵	۲/۵	۲/۵
آب (سی سی)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰

## آزمایش ششم

با توجه به آزمایش‌های انجام شده در جلسه‌ی قبل مقدار مواد را اندکی افزایش داده تا جواب مطلوب‌تر حاصل شود. بررسی نمونه‌ها بعد از یک هفته نشان داد که همه نمونه‌ها برای چادرملو موثر واقع شدند (جدول ۴). بنابراین نمونه ششم به منظور ارزیابی کیفیت مالچ انتخاب گردید.

جدول ۴. مواد مورد استفاده جهت تهیه مالچ در آزمایش ششم

ترکیب مالچ	۱	۲	۳	۴	۵	۶
لیگنین سولفانات (گرم)	۵	۱۰	۵۰	۱۰۰	۲۵	۱۲۵
ملاس (سی سی)	۱۰	۱۰	۱۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵۰
کلسیم کلراید (گرم)	۲/۵	۲/۵	۲۵	۲۵	۱۲/۵	۶۲/۵
آب (سی سی)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱۰۰	۲۵۰۰

## ارزیابی کارایی مالچ

برای بدست آوردن ترکیب بهینه و ارزیابی و حصول نتیجه از کارایی مالچ ساخته شده بر روی باطله‌های آهن چادرملو آزمایش‌های ذیل طراحی و مشخص گردید که عبارتند از:

- ۱- تعیین بافت خاک، ۲- بررسی وجود آلودگی مالچ با استفاده از روش تجزیه شیمیایی ICP-OES، ۳- آزمایش تونل باد، ۴- بررسی خاک مالچ پاشی شده از نظر مقاومت برشی، ۵- تعیین ضخامت مالچ، ۶- بررسی دوام و پایداری مالچ با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM).

## دانه‌بندی

بسیاری از خواص مکانیکی و فیزیکی خاک‌ها تابعی از جنس، شکل، اندازه و چگونگی توزیع اندازه دانه‌ها می‌باشد. در تحقیقات مهندسی لازم است تصویر مناسبی از نحوه توزیع اندازه‌های مختلف ذرات خاک ارائه شود. بدین منظور اقدام به آنالیز مکانیکی ذرات خاک و تهیه منحنی توزیع اندازه ذرات خاک یا همان منحنی تجمعی گردید. شناسایی سایز ذرات برای سایزهای بزرگتر از ۸۰ میکرون توسط سرنده انجام می‌گیرد و اندازه‌گیری سایز ذرات با دستگاه \*LPSA در ابعاد میکرون (برای سایزهای کوچکتر از ۸۰ میکرون) توسط لیزر انجام می‌گیرد. در این بررسی آنالیز دانه‌بندی خاک با روش LPSA در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور انجام گردید.

## آنالیز ژئوشیمیایی مالچ

\* . Laser Particle Size Analyzer

در این تحقیق به منظور بررسی اثرات زیست‌محیطی مالچ، یک نمونه مالچ ساخته شده برای معدن چادرملو با روش آنالیز شیمیایی ICP-OES مدل JY70PLUS در مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور آنالیز گردید (جدول ۵). از این روش برای آنالیز عنصری همزمان نمونه‌ها استفاده می‌شود. نمونه‌ها پس از هضم، به صورت محلول به دستگاه معرفی می‌شوند و نشر عناصر مورد نظر، به صورت همزمان، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

دستگاه آنالیز ICP-OES امکان اندازه‌گیری ۴۰ عنصر در سطح غلظتی ppm در نمونه‌های خاک را فراهم می‌سازد. همچنین این روش قادر به شناسایی و کمی سنجی ۲۶ عنصر در نمونه‌های آب و گیاه تا سطوح غلظتی ppm و ppb می‌باشد.

جدول ۵. نتایج آنالیز ژئوشیمیایی مالچ با استفاده از روش ICP-OES

Elements	Ag (ppb)	Al (ppm)	As (ppb)	Ba (ppb)	Be (ppb)	Ca (ppm)	Cd (ppb)	Co (ppb)	Cr (ppb)	Cu (ppb)	Fe (ppm)	K (ppm)
LOQ*	10 (ppb)	10(ppb)	10(ppb)	5(ppb)	5(ppb)	100(ppb)	5(ppb)	20(ppb)	10(ppb)	10(ppb)	100(ppb)	100(ppb)
Chadormalu	<10	0.10	67	116	<5	248.52	<5	<20	<10	19	0.58	117.41

Elements	Li (ppb)	Mg (ppm)	Mn (ppb)	Na (ppm)	Ni (ppb)	P (ppb)	Pb (ppb)	Sr (ppb)	Ti (ppb)	V (ppb)	Zn (ppb)	Zr (ppb)
LOQ	10(ppb)	100(ppb)	5(ppb)	100(ppb)	20(ppb)	50(ppb)	50(ppb)	10(ppb)	10(ppb)	10(ppb)	100(ppb)	5(ppb)
Chadormalu	<10	26.06	574	19.22	<20	493	<50	1153	<10	<10	<100	<5

#### آزمایش تونل باد

به منظور بررسی میزان فرسایش بادی از دستگاه تونل باد دارای سیستم مدار باز و دمنده استفاده گردید. سینی‌هایی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت با توجه به اندازه و ابعاد تونل و تیمارهای بکار رفته به ابعاد ۳۰ سانتی‌متر عرض، ۱۰۰ سانتی‌متر طول و ۳ سانتی‌متر عمق انتخاب شد. در این تونل باد امکان شبیه‌سازی سرعت باد از حداقل ۰/۵ تا ۳۵ متر بر ثانیه وجود دارد، به عبارتی می‌تواند بادهایی با سرعت ۱۲۰ کیلومتر در ساعت و بیشتر را از منظر فرسایش بادی و حرکت ماسه‌های روان شبیه‌سازی کرد. هنگامی که اولین ذره خاک شروع به حرکت از روی سرعت‌سنج می‌کند، سرعت آستانه فرسایش در ارتفاع ۲۰ سانتی‌متری برای خاک مورد نظر قرائت می‌گردد (Safaei, 2011). توزین سینی‌ها قبل و بعد از اعمال باد در تونل انجام گردید تا به این ترتیب میزان خاک فرسایش یافته در آن سرعت و در پایه زمانی ۲ دقیقه مشخص گردد. نتایج آزمایش تونل باد در جدول‌های ۶ و ۷ برای نمونه‌های مالچ‌پاشی شده هفت و سی روزه نشان داده شده است.

جدول ۶. نتایج آزمایش تونل باد برای نمونه‌های خاک مالچ‌پاشی شده معدن آهن چادرملو هفت روزه (بر حسب گرم)

سرعت باد (متر بر ثانیه)	۵/۶۸	۶/۲۸	۱۰/۱۳	۱۲/۸	۱۸/۰۹	۲۵/۴۶
وزن مواد جابجا شده بعد از مالچ‌پاشی (گرم)	۰	۰	۰	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۸
بدون مالچ‌پاشی	۰	۰/۰۰۸	۰/۰۳۹۸	۰/۰۸۷	۰/۱۶	۰/۳۶

\* Limit of quantification

جدول ۷. نتایج آزمایش تونل باد برای نمونه‌های خاک مالچ‌پاشی شده معدن آهن چادرملو سی روزه (بر حسب گرم)

سرعت باد (متر بر ثانیه)	۶/۲۸	۱۰/۳۱	۱۹/۶۶	۲۷/۲
وزن مواد جابجا شده بعد از مالچ‌پاشی (گرم) (گرم)	۰	۰/۰۱	۰/۵	۰/۱

### بررسی مقاومت برشی

در مبحث مکانیک خاک، مقاومت برشی بیانگر پایداری ذرات بستر خاکی در برابر نیروهای برشی وارد شده می‌باشد. پایداری برشی ذرات خاک ناشی از اصطکاک، در هم قفل شدگی، سیمانه شدن و ایجاد پیوندهای شیمیایی بین آن‌ها است (Infante et al., 2016). تست برش مستقیم با تمرکز بر پارامترهایی از قبیل چسبندگی و مقاومت به درستی می‌تواند شاخصه‌های اصلی سیمانه شدن بستر تثبیت شده را نشان دهد. استاندارد بین‌المللی مورد استفاده برای آزمایش برش مستقیم، استاندارد (ASTM D 3080) می‌باشد (ASTM D3080, 2011). در این تحقیق برای تعیین مقاومت برشی نمونه‌ها از روش زهکشی نشده تحکیم نیافته (UU\*) در آزمایشگاه مکانیک خاک سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده گردید. در این آزمایش بارهای افقی به سرعت وارد می‌شوند و نمونه فرصت زهکشی نخواهد داشت. ضمناً اعمال بار افقی، قبل از آن که نمونه تحت بار عمودی تحکیم یابد شروع می‌شود. نتایج آزمایش برش مستقیم و پارامترهای ذاتی نمونه‌ها اعم از چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی از ترسیم نقاط تحت تنش‌های ثابت قائم در جدول ۸ درج گردیده است.

### جدول ۸. داده‌های حاصل از آزمایش مقاومت برشی خاک باطله معدن آهن چادرملو

شماره	مشخصات نمونه	زاویه اصطکاک (Q) (C) °	چسبندگی (C) (Kg/Cm <sup>2</sup> )
S7	بعد از یک هفته مالچ پاشی با حجم ۲۵۰ CC مالچ	۴	۱/۰۹
S8	بعد از یک هفته مالچ پاشی با حجم ۳۵۰ CC مالچ	۵	۱/۱۵
S9	بعد از یک هفته مالچ پاشی با حجم ۴۵۰ CC مالچ	۶	۱/۲۳
S10	بعد از یک ماه مالچ پاشی با حجم ۲۵۰ CC مالچ	۸	۱/۳۵
S11	بعد از یک ماه مالچ پاشی با حجم ۳۵۰ CC مالچ	۸	۱/۴۲
S12	بعد از یک ماه مالچ پاشی با حجم ۴۵۰ CC مالچ	۹	۱/۵۶
S14	نمونه شاهد چادرملو با آب	۴	۰/۰۲

### آنالیز SEM<sup>†</sup>

در این تحقیق از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO 1400 برای بررسی و مشخص کردن توانایی مالچ منتخب در چسبندگی ذرات خاک به یکدیگر و نفوذ آن در حفرات خاک استفاده گردید (Maleki et al., 2016; Ketabi et al., 2017).

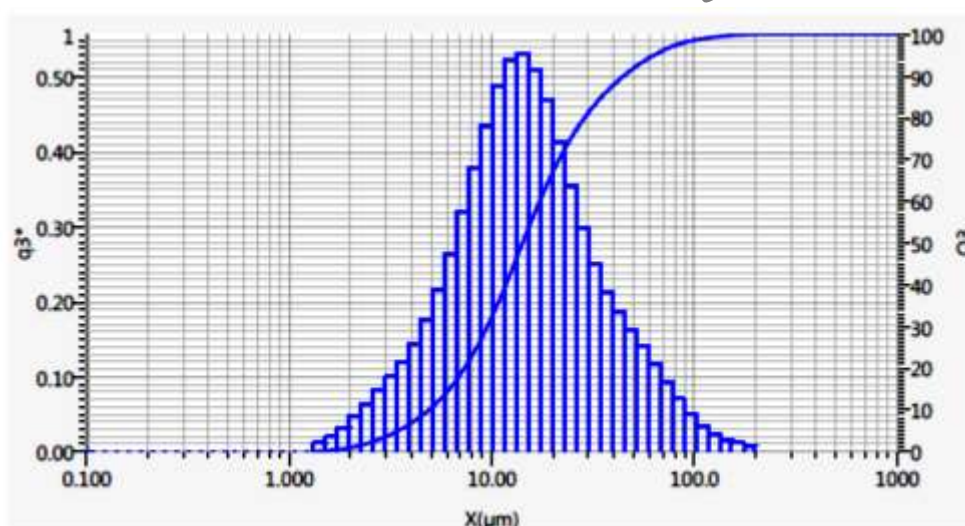
### نتایج و بحث

### نتایج آنالیز دانه‌بندی

\* . Unconsolidated Undrained

† . Scanning Electron Microscopy

توزیع اندازه دانه‌های خاک در نمونه باطله چادرملو به صورت منحنی تجمعی بر محورهای مختصات نیمه لگاریتمی در شکل ۳ نشان داده شده است. منحنی‌های تجمعی از جمع کردن درصد وزن ذرات اندازه‌گیری شده در یک رده با درصد اندازه ذرات در رده قبلی حاصل می‌شود و با استفاده از آن‌ها، محاسبه پارامترهای آماری از قبیل میانگین، میانه و غیره به سادگی صورت می‌گیرد. مد نمونه خاک باطله آهن چادرملو برابر با ۱۴/۱۵ میکرومتر (معادل سیلت متوسط دانه) می‌باشد، به طوری که این طبقه از ذرات (مد)، برای خاک باطله آهن چادرملو ۸۸/۵ درصد از ذرات را به خود اختصاص داده است. میانه خاک باطله آهن چادرملو برابر ۱۴/۱۹ میکرومتر یا ۶/۱۲ فی می‌باشد. میانگین ترسیمی ذرات نیز برابر با ۲۰/۸۱ میکرومتر بوده که جزو سیلت متوسط دانه محسوب می‌شود. مقدار چولگی نمونه باطله آهن چادرملو برابر ۲/۹ می‌باشد که نظر چولگی به سمت رسوبات ریزدانه (یا مثبت) قرار می‌گیرد. مقدار کشیدگی برای نمونه باطله آهن چادرملو برابر ۱۵/۳۴ می‌باشد که در زمره منحنی‌های بسیار کشیده طبقه‌بندی می‌گردد. مقدار عددی جورشدگی برای نمونه باطله آهن چادرملو برابر ۱/۲۲ می‌باشد که مبین جورشدگی به شدت بد است.



شکل ۳. نمودار دانه‌بندی نمونه خاک باطله معدن آهن چادرملو

### نتایج آنالیز ژئوشیمیایی مالچ

وجود عناصر سنگین، یکی از شاخص‌های ارزیابی معیار خصوصیات مالچ می‌باشد. فلزات سنگین یکی از مهم‌ترین و شناخته شده‌ترین آلاینده‌ها هستند که ورود آن‌ها به محیط زیست سبب بروز صدمات و بیماری‌های مختلفی می‌شود. این عناصر در غلظت‌های مشخصی سمی و برای موجودات زنده از جمله انسان مضر می‌باشند (Blake et al., 2003).

فلز سنگین به فلزها یا شبه فلزهای دارای اثرات زیست محیطی اشاره دارد. این ترکیبات به علت آثار سمی و توان تجمع زیستی در گونه‌های مختلف جانداران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. چنانچه میزان این عناصر به دلایل گوناگونی از حدود معینی فراتر رود سلامت گیاهان و حیوانات و به تبع آن انسان به مخاطره می‌افتد. مهم‌ترین عناصر سنگین مورد بررسی در این تحقیق شامل آرسنیک،

جیوه، روی، سرب، کادمیم، کروم، نیکل و وانادیم می‌باشند مقدار تمامی عناصر و ترکیبات موردنظر باید کمتر از مقدار یا آستانه مشخص شده باشد. چنانچه مقدار این آلاینده‌ها بیشتر از آستانه باشد، ماده تثبیت کننده مورد بررسی نامناسب بوده و قابل استفاده نخواهد بود (Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, 2019).

مقایسه مقادیر بدست آمده از نمونه‌های مالچ معدن آهن چادرملو (جدول ۵) با مقادیر محاسبه شده استاندارد آلاینده‌گی خاک (جدول ۹) و مقادیر عناصر سنگین مورد مطالعه جهت بررسی کارایی مواد تثبیت کننده خاک (جدول ۱۰) نشان می‌دهد که مالچ‌های مورد استفاده فاقد آلودگی زیست محیطی می‌باشند.

جدول ۹. مقادیر محاسبه شده استاندارد آلاینده‌گی خاک (Quality standards of soil resources and its guidelines, 2021)

Elements	Ag	As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	V	Zn
Soil (ppm)	20	17	500	5	3.9	20	64	63	50	300	130	200

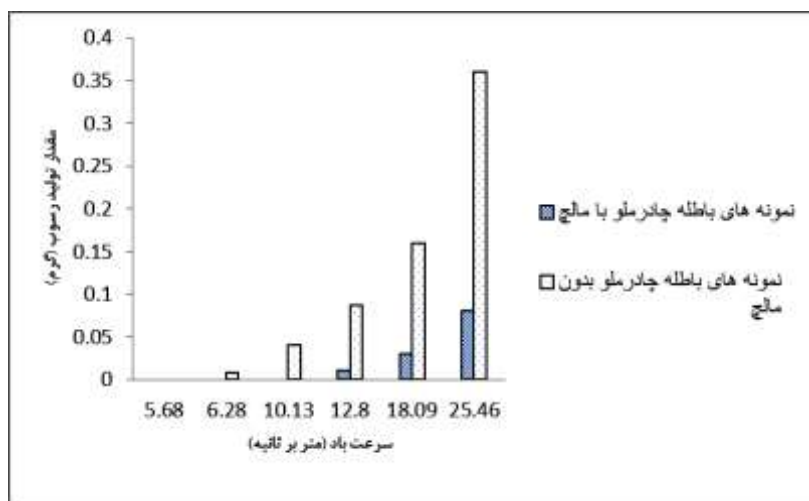
جدول ۱۰. تشریح ویژگی‌های شاخص عناصر سنگین جهت بررسی کارایی مواد تثبیت کننده خاک (Islamic Republic of Iran Plan

and Budget Organization, 2019)

کیفیت	سطح	آستانه	عناصر	دستگاه یا روش اندازه‌گیری	شاخص	معیار
خوب	کمتر از حد آستانه	۲۰۰	سرب	دستگاه ICP، جذب اتمی یا فلورسانس اتمی	فلزات سنگین	خصوصیات مالچ
		۱۵۰	کروم			
		۱۰	کادمیم			
		۱۲۰	نیکل			
		۱۳۰۰	روی			
		۵	جیوه			
		۱۰	آرسنیک			
		۱۳۰	وانادیوم			

### نتایج آزمایش تونل باد

به طور کلی هدف از انجام تست تونل باد برآورد مقاومت ذرات در برابر نیروهای فیزیکی، امکان جدا شدن ذرات از بستر، به اضافه برآورد فرسایش بادی در یک دوره زمانی مشخص می‌باشد. مقایسه دو نمونه‌ی با مالچ و بدون مالچ چادرملو نشان داد که میزان فرسایش بادی در نمونه‌های بدون مالچ بیشتر است (شکل ۴). با توجه به این که نمونه‌های مالچ پاشی شده فرسایش بادی کمتری را نشان دادند آزمایش تونل باد برای این نمونه‌ها بعد از سی روز مجدداً انجام گردید (جدول ۶). نتایج آنالیز تونل باد نشان داد که میزان فرسایش بادی در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های هفت روزه افزایش پیدا کرده است.



شکل ۴. مقدار رسوب تولید شده باطله در معدن چادرملو (گرم) در سرعت‌های باد مختلف

برآورد نسبی مقاومت خاک و یا مالچ در مقابل بادبردگی به کمک دستگاه سنجش فرسایش بادی در جدول ۱۱ نشان داده شده است (Ekhtesasi And Bahrami, 2018). بررسی نتایج آنالیز تونل باد نمونه‌های چادرملو نشان داد که نمونه‌های مورد بررسی در گروه نمونه‌های مقاوم قرار می‌گیرند.

جدول ۱۱. برآورد نسبی مقاومت خاک و یا مالچ در مقابل بادبردگی به کمک دستگاه سنجش فرسایش بادی ( Ekhtesasi And Bahrami, 2018)

مقدار رسوب جمع‌آوری شده از تونل باد (بر حسب گرم)	وضعیت پایداری خاک و یا مالچ
بیش از ۵ گرم	بسیار حساس
۲-۵ گرم	حساس
۲/۵-۰ گرم	نسبتاً مقاوم
۱/۵-۰ گرم	مقاوم

با داشتن متوسط میزان فرسایش نمونه شاهد و نمونه تحت تأثیر مواد تثبیت‌کننده می‌توان شاخص فرسایش بادی را بر اساس رابطه ۱ تعیین نمود و این عدد را به عنوان شاخص فرسایش بادی جهت اظهارنظر در مورد مواد تثبیت‌کننده در نظر گرفت.

$$WEI = \frac{WEM}{WEC} \times 100 \quad (1)$$

که در آن، WEI: شاخص فرسایش بادی؛ WEM: مقدار فرسایش بادی در نمونه تحت تأثیر مواد تثبیت‌کننده و WEC: مقدار فرسایش بادی در نمونه شاهد می‌باشد.

ویژگی‌های شاخص میزان فرسایش بادی جهت بررسی کارایی مواد تثبیت‌کننده خاک در جدول ۱۲ ارائه شده است. شاخص فرسایش بادی در نمونه‌های چادرملو به طور متوسط در طبقه ۱۰ تا ۲۵ درصد قرار می‌گیرد که کیفیت خوب این نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

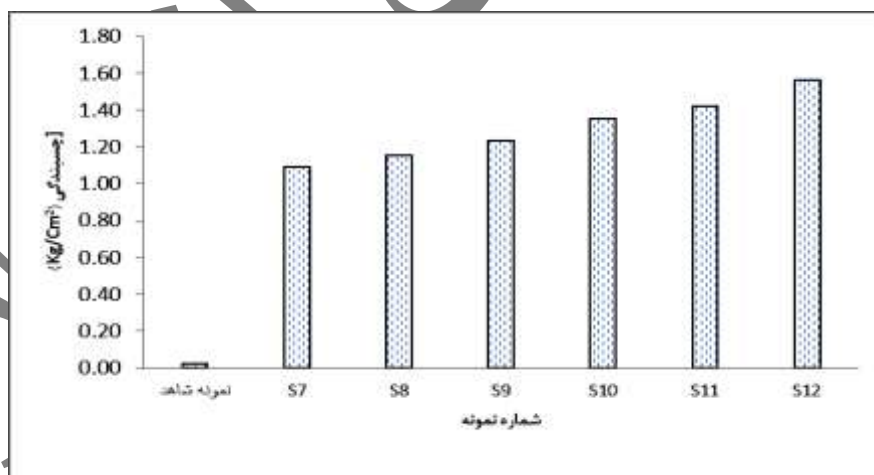
جدول ۱۲. تشریح ویژگی‌های شاخص میزان فرسایش بادی در خاک جهت بررسی کارایی مواد تثبیت کننده خاک (Islamic)

(Republic of Iran Plan and Budget Organization, 2019)

معیار	شاخص	دستگاه یا روش اندازه‌گیری	طبقات (شاخص فرسایش بادی)	کیفیت
تثبیت خاک در مقابل فرسایش بادی	میزان فرسایش بادی	دستگاه تونل باد	بیشتر از ۵۰ درصد	ضعیف
			۵ تا ۵۰ درصد	متوسط
			۱۰ تا ۲۵ درصد	خوب
			کمتر از ۱۰ درصد	بسیار خوب

### مقاومت برشی

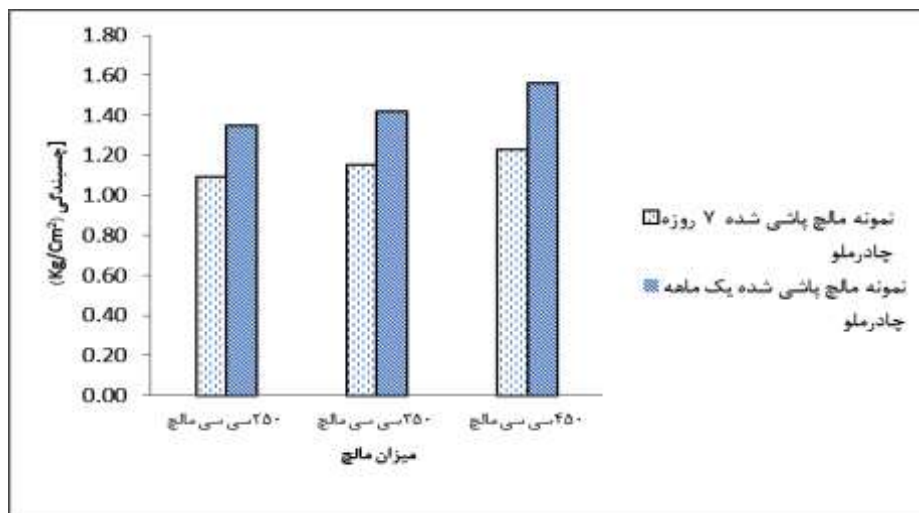
همان‌طور که از نتایج جدول ۸ مشخص است، عملیات تثبیت منجر به افزایش مقاومت برشی نمونه‌های مالچ پاشی شده نسبت به نمونه بدون مالچ شده است. افزایش بار عمودی بر روی نمونه‌ها منجر به افزایش مقاومت نمونه‌ها گشته که در رفتار برشی طبیعی است. افزایش مقاومت برشی نمونه‌ها در اثر عملیات تثبیت دلیل دیگری بر اثربخش بودن این روش تثبیت در جلوگیری از فرسایش بادی می‌باشد. به طور کلی نیروی باد که با تماس خود بر سطح بستر خاکی منجر به فرسایش و جابجایی ذرات می‌گردد همانند یک نیروی برشی بر بستر عمل کرده و بالا رفتن مقاومت برشی بستر به نوعی مانعی در این زمینه محسوب می‌شود. در شکل ۵ میزان چسبندگی در نمونه‌های مالچ پاشی شده با نمونه شاهد باطله‌های معدن آهن چادرملو مقایسه شده است. عملیات تثبیت منجر به بالا رفتن ۵۴ الی ۷۸ برابری چسبندگی نمونه مالچ پاشی شده نسبت به نمونه شاهد معدن آهن چادرملو شده است.



شکل ۵. مقایسه چسبندگی در نمونه‌های مالچ پاشی شده و نمونه شاهد معدن آهن چادرملو

برای بررسی تاثیر گذشت زمان بر روی پایداری و استحکام نمونه‌ها، میزان چسبندگی برای نمونه‌های یک ماهه باطله‌های چادرملو نیز اندازه‌گیری شد. مقایسه نمونه‌های مالچ پاشی شده ۷ روزه با یک ماهه نشان می‌دهد با گذشت زمان چسبندگی و مقاومت نمونه‌ها افزایش یافته است (شکل ۶).





شکل ۶. بررسی تاثیر زمان بر چسبندگی در نمونه‌های مالچ پاشی شده معدن آهن چادرملو

مقاومت برشی، از شاخص‌های ارزیابی معیار استحکام مالچ می‌باشد. مقاومت برشی نشان‌دهنده میزان چسبندگی مواد می‌باشد، بنابراین هر چه مقاومت برشی بیشتر باشد، مالچ از چسبندگی و استحکام بالاتری برخوردار است. به عبارت دیگر استحکام مواد تثبیت‌کننده خاک با مقاومت برشی رابطه مستقیمی دارد. این شاخص دارای چهار طبقه می‌باشد. هر طبقه نشان‌دهنده میزان مقاومت برشی یا چسبندگی می‌باشد. ویژگی‌های شاخص مقاومت برشی جهت بررسی کارایی مواد تثبیت‌کننده خاک در جدول ۱۳ ارائه شده است. بر اساس جدول ۱۳ نمونه‌های مالچ پاشی شده معدن چادرملو از نظر مقاومت برشی و چسبندگی در طبقه ۳ قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده کیفیت و استحکام خوب این نمونه‌ها می‌باشد.

جدول ۱۳. تشریح ویژگی‌های شاخص مقاومت برشی جهت بررسی کارایی مواد تثبیت‌کننده خاک ( Islamic Republic of Iran Plan

(and Budget Organization, 2019)

معیار	شاخص	دستگاه یا روش اندازه گیری	مقدار	کیفیت
تثبیت خاک در مقابل فرسایش بادی	مقاومت برشی	دستگاه برش	کمتر از ۰/۵	ضعیف
			۰/۱-۵	متوسط
			۲-۱	خوب
			بیشتر از ۲	بسیار خوب

### ضخامت لایه مالچ

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های مالچ مورد استفاده در این تحقیق ضخامت مالچ بر روی نمونه‌ها می‌باشد. ضخامت لایه مالچ، یکی از شاخص‌های ارزیابی معیار استحکام مالچ می‌باشد. استحکام مواد تثبیت‌کننده خاک با ضخامت سله ایجاد شده رابطه مستقیمی دارد، اما باید توجه داشت که ضخامت زیاد سله ممکن است سبب افزایش مقاومت فشاری و همچنین کاهش نفوذپذیری خاک گردد. اندازه‌گیری ضخامت لایه مالچ بر روی نمونه‌های خاک باطله معدن آهن چادرملو نشان داد که ضخامت لایه مالچ از ۲ تا ۴ سانتی‌متر متغیر می‌باشد.

ویژگی‌های شاخص ضخامت سله جهت بررسی کارایی مواد تثبیت کننده خاک در جدول ۱۴ ارائه شده است. براساس جدول ۱۴ نمونه‌های خاک باطله مالچ پاشی شده معدن چادرملو در طبقه چهارم با کیفیت خیلی خوب قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده ماندگاری و مقاومت بالای نمونه‌های مالچ پاشی شده می‌باشد.

جدول ۱۴. ویژگی‌های شاخص ضخامت سله جهت بررسی کارایی مواد تثبیت کننده خاک ( Islamic Republic of Iran Plan and )

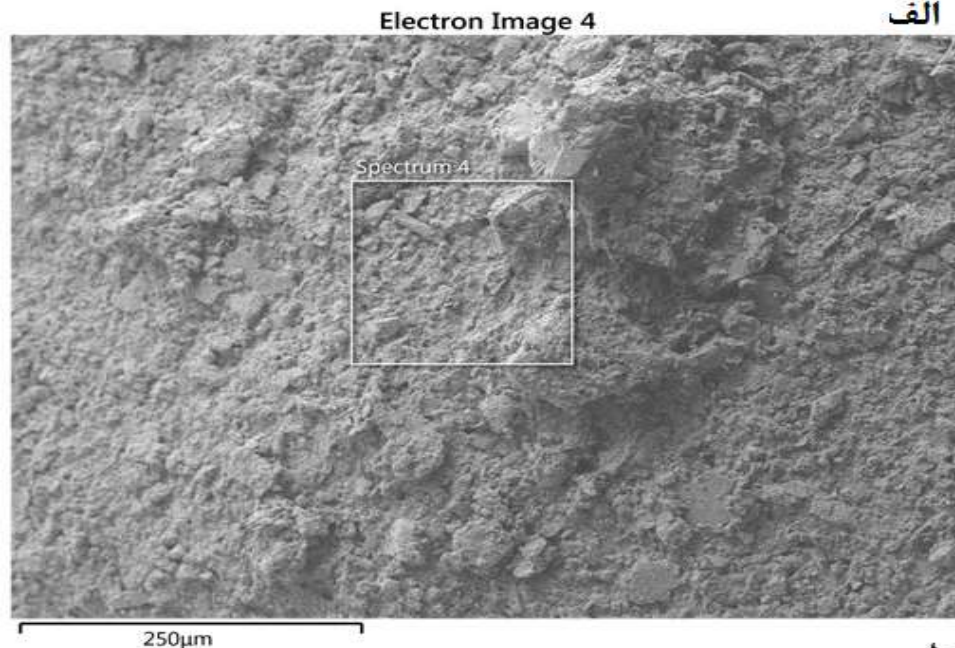
(Budget Organization, 2019)

معیار	شاخص	دستگاه یا روش	ملاحظات	طبقات	کیفیت
خواص مکانیکی	ضخامت لایه مالچ	کولیس یا خط کش	عمق مؤثر سله اندازه گیری شود.	کمتر از ۰/۲	ضعیف
				۰/۲ تا ۰/۵	متوسط
				۰/۵ تا ۱	خوب
				بیشتر از یک	خیلی خوب

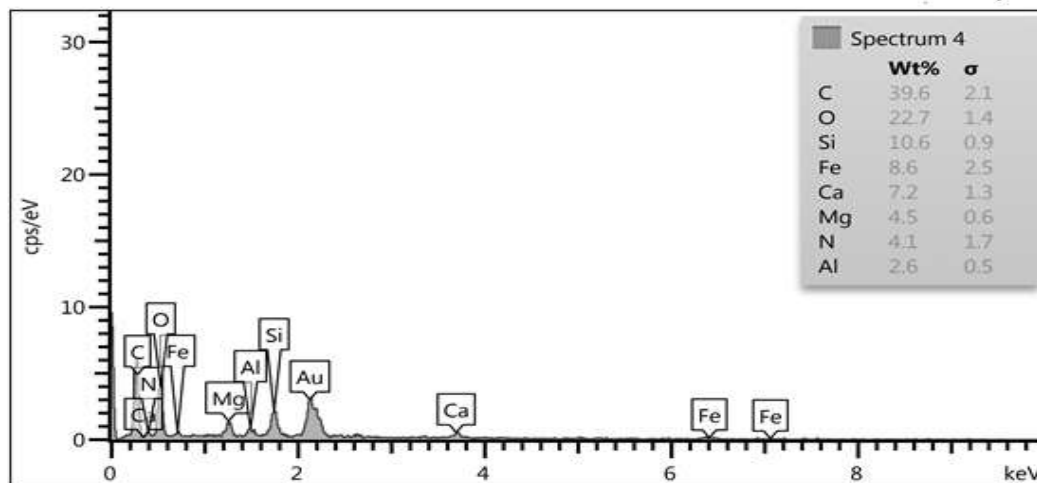
### آنالیز SEM-EDS

در تحقیق حاضر با تصاویری که توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از نمونه‌ها با بزرگنمایی مشخص گرفته شد، برای بررسی و مشخص کردن توانایی مالچ منتخب در چسبندگی ذرات خاک به یکدیگر و نفوذ آن در حفرات خاک استفاده شد. تصاویر حاصل از آزمایش SEM بر روی نمونه‌ی مالچ پاشی شده چادرملو در شکل ۷ نشان داده شده است. این شکل اتصال ذرات به هم و تشکیل یک لایه چسب مانند بر روی ذرات را نمایان می‌سازد. همچنین به طور واضح نقش پوشش مالچ مورد استفاده در چسباندن ذرات به یکدیگر و تشکیل لایه‌ای بر روی خاک توسط مالچ مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که آنالیز SEM و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)، ۶ ماه بعد از مالچ‌پاشی انجام گرفت. همانطور در شکل ۷ مشخص است عناصر مشخص شده در کلیه نمودارها نشان دهنده عناصر ترکیبات تشکیل دهنده مالچ می‌باشند که این نشان دهنده پایداری مالچ بر روی نمونه‌ها می‌باشد و با گذر زمان مالچ از روی نمونه‌ها شسته نشده و با چسبندگی بین ذرات دلیلی برای استحکام بالای نمونه‌ها می‌باشد.

الف



ب



شکل ۷- الف) تصویر SEM نمونه‌های خاک مالچ‌پاشی شده باطله معدن آهن چادرملو، ب) طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس

نمونه‌های مالچ‌پاشی شده

### نتیجه‌گیری

در این بررسی به منظور تثبیت باطله‌های آهن چادرملو به ساخت مطلوب‌ترین تثبیت کننده (مالچ) پرداخته شد. آزمایش‌های انجام شده به منظور بررسی کارایی مالچ ساخته شده شامل SEM, ICP-OES, دانه‌بندی، مقاومت برشی، تونل باد و تعیین ضخامت می‌باشند. بررسی آنالیز دانه‌بندی نمونه‌ی خاک باطله معدن آهن چادرملو نشان داد که دارای میانه ۱۴/۱۹ میکرومتر بوده و مد ذرات نیز مقدار ۱۴/۱۵ میکرومتر را نشان می‌دهد که محدوده سیلت ریزدانه را شامل می‌شود. میانگین ترسیمی ذرات نیز برابر با ۲۰/۸۱ میکرومتر بوده که جزو سیلت متوسط دانه محسوب می‌شود. نمونه مورد مطالعه با جورشدگی به شدت بد، چولگی یا کج شدگی به سمت رسوبات ریزدانه (یا مثبت) و منحنی بسیار کشیده مشخص می‌گردد. با توجه به اینکه فرسایش بادی معمولاً در مناطقی با خاک دارای مقادیر زیادی ماسه

ریز و سیلت اتفاق می افتد، خاک‌های باطله مورد مطالعه در زمره خاک‌های مستعد فرسایش قرار دارند. انجام آزمایش‌های مختلف نشان داد که بهترین مالچ برای تثبیت باطله معدن چادرملو ترکیب لیگنو سولفانات (۱۲۵ گرم)، ملاس (۲۵۰ میلی لیتر)، کلرید کلسیم (۶۲/۵ گرم) می باشد. نتایج آنالیز ICP-OES نشان داد که افزودن مالچ به خاک باعث افزایش عناصر سنگین در خاک تثبیت شده، نشده است. این امر سازگاری زیست محیطی این مالچ طبیعی را جهت تثبیت خاک معلوم می سازد. اندازه گیری ضخامت لایه مالچ بر روی نمونه‌های باطله معدن چادرملو نشان داد که ضخامت لایه مالچ از ۲ تا ۴ سانتیمتر متغیر می باشد که مقایسه ضخامت این نمونه‌ها با ویژگی‌های شاخص ضخامت سله جهت بررسی کارایی مواد تثبیت کننده خاک نشان دهنده کیفیت خیلی خوب نمونه‌های مالچ پاشی شده و ماندگاری و مقاومت بالای مالچ می باشد. آزمایش تونل باد نشان داد که با افزایش سرعت باد در نمونه‌های مالچ پاشی شده و نمونه‌های شاهد (بدون مالچ) شدت فرسایش خاک افزایش می یابد. در نمونه‌های مالچ پاشی شده میزان فرسایش بادی در سرعت‌های مختلف باد کمتر از نمونه‌های شاهد می باشد که نشان می دهد پاشش مالچ بر روی نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت و چسبندگی بیشتر ذرات خاک شده است. تعیین مقاومت برشی نمونه‌های معدن چادرملو نشان داد که نمونه‌های مالچ پاشی شده نسبت به نمونه‌های شاهد استحکام و چسبندگی بیشتری دارند. نتایج آنالیز SEM-EDS به طور واضحی ایجاد یک لایه پوشش بر سطح خاک و ایجاد چسبندگی و پیوستگی بین ذرات خاک را در اثر استفاده از مالچ معلوم می سازد.

## سپاسگزاری

نویسندگان لازم می دانند از آقای دکتر رضا شهبازی مسئول محترم قسمت زمین شناسی زیست محیطی سازمان زمین شناسی بخاطر همکاری‌های ایشان قدردانی نمایند.

## References

## منابع

- Adams, J.W., 1998. Environmental effects of applying lignosulfonate to roads. Daishowa Chemicals Inc. Research and Development Division.
- Alizadegan, A., 2010. Study of Geochemical and Mineralogical Properties of Waste Dumps with Economic and Environmental Viewpoint in Sar-cheshmeh Copper Mine, Iran. Master's thesis. University of Tehran, Iran, 147 (in Persian).
- American society for testing and materials (ASTM D3080), (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.
- Amraei, A. and Dahrazma, B., 2020. Evaluation of the vegetable mulch produced from *Eremurus spectabilis* on soil erosion control. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52(4), 251-254 (in Persian).
- Armbrust, D.W., Chepil, W.S. and Siddoway, F.H., 1963. Effect of ridges on erosion of soil by wind, *Soil. Science*, 28, 557-560.
- Bagnold, R.A., 1937. The size-grading of sand by wind, *Proceedings of the Royal Society*, 163, 250-264.
- Bagnold, R.A., 1941. *The Physics of blown sand and desert dunes*. Chapman and hall Ltd, London, England,
- Bagnold, W.S., 1941. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind. *Soil Science*, 60, 305- 320.

- Blake, W.H., Walsh, R.P.D., Barnsley, M.J., Palmer, G., Dyrinda, P. and James, J.G., 2003. Heavy metal concentrations during storm events in a rehabilitated industrialized catchment. *Hydrological Processes*, 17(10), 1923-1939.
- Chepil, W.S., 1956. Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Science*, 20, 288-292.
- Deng, Z.Q., de Lima, J. L. and Jung, H.S., 2008. Sediment transport rate-based model for rainfall-induced soil erosion. *Catena*, 76 (1), 54-62.
- Ekhtesasi, M. R., Zare Arnani, M. and Haji Abedi, M., 2013. Comparison chemical, biological and mineral Mulch for sand fixation. 3th national conference on wind erosion and dust storms, Yazd University.
- Ekhtesasi, M. and Bahrami, H., 2018. Introduction of indicators and guidelines for mulch testing, 4th National Conference on Wind Erosion and Dust Storms, Yazd University (inPersian).
- Gholami Tabas, J., Jafari, M. and Azarniyond, H., 2013. Assessing the Implications of Planting *Haloxylon aphyllum* on the Vegetation and Soil Properties of Stabilized Sandy Desert (Samad Abad, Sarakhs). *Quarterly Journal of Environmental Erosion Researches*, 3(1), 35-44 (inPersian).
- Infante, D.J.U., Martinez, G.M.A., Arrua, P.A. and Eberhardt, M., 2016. Shear strength behavior of different geosynthetic reinforced soil structure from direct shear test. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2, 1-16.
- Jafari Shalkoohy, A., Vafaeian, M., Rowshanzamir, M.A. and Mirmohammad sadeghi, M., 2015. Effective Factors in Fine- Grained Soil Stabilization to Prevent Dust Generation. *Journal of Water and Soil Science*, 19(73), 273-285 (in Persian).
- Kashefghasemabadi, A., Karbassi, A., Tabatabaee, M. and Dehabadi, A. M., 2019. Development of soil pollution risk index in the vicinity of a waste dam in Chadormalu iron ore mine. *International journal of environmental science and technology*, 16(12), 8485-8494.
- Ketabi, H., Fahmi, A., Samadi kafil, H. and Hajjalilue Bonab, M., 2017. Stabilization of calcareous sand dunes using phosphoric acid mulching. *Journal of Arid Environments*, 148, 34-44.
- Kotta, A. B., Patra, A., Kumar, M. and Karak, S. K., 2019. Effect of molasses binder on the physical and mechanical properties of iron ore pellets. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 26(1), 41-51.
- Heidarian, H., Lentz, D. R., Alirezai, S., McFarlane, C. R. and Peighambari, S., 2018. Multiple stage ore formation in the Chadormalu iron deposit, Bafq Metallogenic Province, Central Iran: evidence from BSE imaging and apatite EPMA and LA-ICP-MS U-Pb geochronology. *Minerals*, 8(3), 87.
- Maleki Kalker, M., Ebrahimi, S., Asadzadeh, F. and Emami Tabrizi, M., 2016. Evaluation of the Efficiency of Microbial Induced Carbonate Precipitation for Loose Sand Dunes Fixation. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(2), 407-415 (in Persian).
- Mehrabi, S.H., Soltani, S. and Jafari, R., 2015. Analyzing the Relationship Between Dust Storm Occurrence and Climatic Parameters. *Journal of Soil and Water Science*, 19(71), 69-80 (in Persian).
- Mirahmadi, H.R. and Bangian Tabriz, A.H., 2016. Classification and Separation of mine wastes in Chadormalu iron. *Iranian Journal of Environmental Geology*, 9(33), 1-11
- Morera, G. and González, V., 2018. dust production in mining.suppression measures in quarry blasting, master degree in mining engineering, 233pp.
- Movehedan, M., Abbasi, N. and Keramati, M., 2011. Experimental investigation of polyvinyl acetate polymer application for wind erosion control of soils. *Journal of water and soil*, 25(3), 606-616.

- Nayebi, N., Esmaily, D., Modabberi, S., Shinjo, R., Deevsalar, R. and Lehmann, B., 2022. Geochemistry and petrogenesis of intrusive rocks of Chadormalu deposit; an implication on whole rock geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 32(4), 29-42.
- Parsakhoo, A., Hosseini, S.A., Lotfalian, M., Mohammadi, J. and Salarijazi, M., 2020. Effects of molasses, polyacrylamide and bentonite on dust control in forest roads. *Journal of Forest Science*, 66, 218-225.
- Omane, D., Liu, W. V. and Pourrahimian, Y., 2018. Comparison of chemical suppressants under different atmospheric temperatures for the control of fugitive dust emission on mine hauls roads. *Atmospheric Pollution Research*, 9(3), 561-568.
- Refahi, H., 2012. Wind erosion and control, Tehran University Press. Tehran, Iran, (in Persian).
- Safaei, A.R., 2011. Use of steel making slag ( Foulad Mobarake Co. ) as mulch to stabilize wind eroded sediment (The case study: the soils in eastern of Isfahan). Master's thesis. Isfahan University of Technology.
- Safaei, A.R., Karimzadeh, H., Rouhani Shahraki F. and Tarkesh Isfahani, M., 2012. Use of Steel Manufacturing Slag (Foulad Mobarake Co.) as Mulch To Stabilize Wind Eroded Sediment Case Study: Soils in East of Isfahan. *Environmental Erosion Research Journal*, 2 (2), 15-24.
- Shiyaty, Y. I., Lavrovsky, A. B. and Khmolenk, M.I., 1972. Effect of texture on the cohesion and wind resistance of fine Soil clods. *Soviet Soil Science*, 4, 12-105.
- Torab, F. M., 2008. Geochemistry and metallogeny of magnetite apatite deposits of the Bafq mining district, Central Iran. Univ.-Bibliothek.
- Zhongju, M., Xiaohong, D., Yong, G., Xiaomeng, R., Yanlong, D. and Meng, W., 2018. Interactive effects of wind speed, vegetation coverage and soil moisture in controlling wind erosion in temperature desert steppe, Inner Mongolia of China. *Journal of Arid Land*, 10(4), 534-547.