

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

Received: 2024.08.21
Accepted: 2024.10.08

Mehrdad Barati,^{1*}  Mohammad Amin Moazami,¹ Akram Ostadhosseini²

¹ Department of Geology,
Faculty of Basic Sciences,
Bu-Ali Sina University,
Hamedan, Iran

² Ministry of Industry, Mine
and Trade, Esfahan,
Iran Affiliation

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: The Chadormalu iron deposit is located in the Bafgh-Saghand iron-bearing region. This deposit is located in Yazd province, 180 km east-northeast of Yazd city. Chadormalu contains two iron-bearing reserves. Large amounts of mineral waste have accumulated around the Chadormalu mine and its processing factory. Wind and rainfall have caused the dispersion and spread 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 dispersion in the environment should be prevented. Molasses and lignin sulfate are used for dust control. These additives are non-toxic and low-cost. The aim of this study is to investigate the effectiveness of mulch in controlling erosion and dust caused by the waste of the Chadormalu iron mine.

Materials and methods: In order to prepare suitable mulch in this study with the environmental conditions of the region, 10 variables (montmorillonite, lignosulfonate, perlite, zeolite, molasses, magnesium chloride, calcium chloride, potassium chloride, calcium carbonate, water) were investigated and used in a randomized manner in 6 stages. Chemical analysis by ICP-OES, scanning electron microscopy (SEM), granulation, shear strength, wind tunnel, and thickness determination were performed on the samples.

Results and discussion: A combination of lignosulfonate, molasses, and calcium chloride has been used to stabilize a mineral waste dump. The operation of stabilizing the waste dump with mulch has led to an increase in the shear strength of the mulched samples compared to the unmulched sample. Increasing the vertical load on the samples has led to an increase in the strength of the samples and prevention of wind erosion. One of the most important characteristics of the mulch used in this study is the thickness of the mulch on the samples. Measurement of the thickness of the mulch layer on the Chadormalu samples showed that the thickness of the mulch layer varies from 2 to 4 centimeters, which is in the very good quality category, which indicates the durability and high resistance of the mulched samples. The wind erosion index in the Chadormalu samples is on average in the 10 to 25 percent category, which indicates the good quality of these samples.

Conclusion: The results of ICP-OES analysis showed that the concentration of heavy metals was lower than the permissible limit. Imaging and SEM analysis results clearly showed the creation of a coating layer on the soil surface and the creation of adhesion and cohesion between soil particles due to the use of mulch. As a result of the stabilization operation, the shear strength and adhesion of the samples showed a significant increase. The results of the wind tunnel test showed that the stabilization and mulching operation led to a significant reduction in the concentration of sediment particles, and that increasing the amount of mulch spraying caused greater penetration of the mulch into the soil and that increasing the concentration of mulch, despite reducing its penetration depth in the soil, increased its resistance to wind erosion by increasing the amount of adhesion between soil particles. The results of SEM analysis clearly showed the creation of a coating layer on the soil surface and the creation of adhesion and cohesion between soil particles due to the use of mulch. As a result of the stabilization operation, the shear strength and adhesion of the samples showed a significant increase. The stabilization operation of the samples caused a significant increase in the shear strength and adhesion of the samples. The results of the wind tunnel test over a 2-minute period at different speeds showed that the stabilization operation resulted in a significant reduction in the concentration of sediment particles. The results showed that increasing the mulch application rate resulted in greater penetration of the mulch into the soil and increasing the mulch concentration, despite decreasing its penetration depth into the soil, increased its resistance to wind erosion by increasing the amount of adhesion between soil particles.

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

How to cite this article:
Barati, M., Moazami, M.A.
and Ostadhosseini, A.,
2025. The Effect of Mulch in
Controlling Erosion and
Dust Originated From
Chadormalu Iron Mine
Tailings. Adv. Environ. Sci.
23(3): 617-636.

* Corresponding Author Email Address: barati@basu.ac.ir
DOI: 10.48308/envs.2024.1430



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

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



تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۳۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۷

مهرداد براتی^{۱*}، محمد امین معظمی^۱، اکرم استادحسینی^۲

^۱ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ وزارت صنعت معدن تجارت، اصفهان، ایران

چکیده مبسوط

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 قرار دارد. چادرملو شامل دو توده معدنی آهن‌دار است. مقادیر زیادی باطله معدنی در اطراف معدن چادرملو و کارخانه‌فرآوری آن انباشت شده است. وزش باد، بارندگی 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. 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: جهت انجام تحقیق و تهیه مالچ مناسب با شرایط محیطی منطقه، ۱۰ متغیر (مونت‌موریونیت، لیگنوسولفانات، پرلیت، زئولیت، ملاس، کلرید متیزیم، کلرید کلسیم، کلرید پتاسیم، کربنات کلسیم، آب) به روش تصادفی و در ۶ مرحله مورد بررسی و استفاده قرار گرفت. آنالیز شیمیایی ICP-OES، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، دانه‌بندی، مقاومت برشی، تونل باد و تعیین ضخامت روی نمونه‌ها انجام شد.

نتایج و بحث: از ترکیب لیگنوسولفانات، ملاس، کلرید کلسیم برای تثبیت دپو باطله معدنی 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 و جلوگیری از فرسایش بادی گشت. 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 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 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.

استناد به این مقاله: براتی، م.، مه.، معظمی و ا. استادحسینی. ۱۴۰۴.

بررسی کارایی مالچ در کنترل فرسایش و گرد و غبار ناشی از باطله‌های معدن آهن چادرملو. فصلنامه علوم محیطی نوین. ۲۳(۳): ۶۳۶-۶۱۷.

* Corresponding Author Email Address: barati@basu.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2024.1430



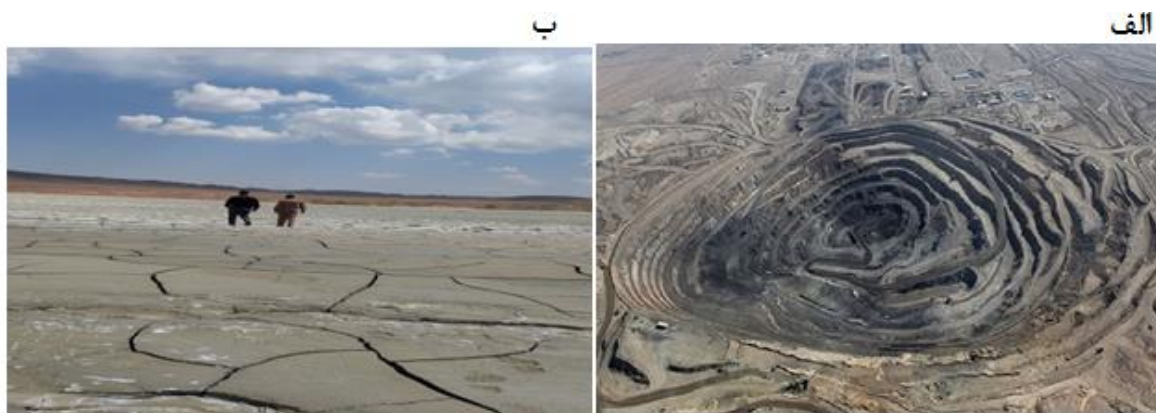
مقدمه

کانسار آهن چادرملو دارای ۴ سد باطله، دو حوضچه جدید در حال آب‌گیری و نیز دو حوضچه در حال ساخت می‌باشد (شکل ۱ الف). تخلیه باطله مسئله‌ای بزرگ در حفظ محیط زیست می‌باشد، این مسئله بویژه در مورد کانسارهای بزرگ مثل چادرملو اهمیت زیادی دارد، زیرا در این قبیل موارد حجم باطله بسیار زیاد است (شکل ۱ ب). 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 گاه‌آ‌ 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

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).

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، گاه 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.

و پلیمری) و زیستی (مانند: کاشت گیاه و استفاده از مالچ- های طبیعی) استفاده می‌شود که هرکدام دارای مزایا و معایبی می‌باشد (Amraei and Dahrazma, 2020). (Ekhtesasi *et al.* (2013) در تحقیقی استفاده از مالچ به- عنوان بستری برای انجام فعالیت‌های احیا بیولوژیک و کنترل فرسایش بادی را مورد مطالعه قرار داده و مالچ‌های بیولوژیکی (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



شکل ۱- الف) کانسار آهن چادرملو، ب) باطله‌های کانسار آهن چادرملو.
Fig. 1- (a) Chadormalu iron deposit, (b) Chadormalu iron mine tailings

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 کمر بند 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

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

شمالی می‌باشد و در این توده آهک‌های مارنی قابل مشاهده است (Heidarian *et al.*, 2018, Nayebi *et al.*, 2022).

تهیه و آماده سازی نمونه‌ها

برخی از رایج‌ترین کنترل‌کننده‌های استفاده‌شده در دیوها 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).

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 آذرین درونی دربرگرفته‌اند. ژرفای توده جنوبی کمتر از توده

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

Table 1. The most common controllers used in mineral deposits (Morera and González, 2018).

کنترل‌کننده‌ها	پایزه	شسته شدن خاک	تغییرات PH و شوری	آفات مسمی بر گونه‌های جانوری	تولید گل	خوردگی مواد	بازرطوبت (سطح نوزده)
آب	۵۰	×	×		×		
کلرید کلسیم	۵۵	×				×	×
کلرید منیزیم	۷۷	×	×	×		×	×
لیگنوسولفونات	<۶۳						×
ملاس	<۸۴			×			×
امولسیون‌های نفتی	>۹۵						×
پلیمرهای مصنوعی	۵۰-۴۰						

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 استفاده‌شده است این ماده افزودنی غیرسمی و غیرخورنده و اثرات زیست‌محیطی مخرب ندارد. به طور کلی در این تحقیق ۱۰ متغیر (شامل مونت-موریونیت، 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.

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 ۰/۱٪، ۰/۲٪، ۰/۵٪، ۱٪، 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 ۰/۱٪، ۰/۲٪، ۰/۵٪، ۱٪، ۲/۵٪ استفاده شده است. همچنین به طور گسترده سوئد و

آزمایش اول

مواد مورد استفاده برای تهیه مالچ با ترکیب مناسب شامل مونت‌موریونیت، لیگنوسولفانات، پرلیت، زئولیت، ملاس، منیزیم کلراید، کلسیم کلراید، پتاسیم کلراید، کلسیم کربنات، 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 نمونه-های 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.

Fig. 2- Sample of mulched and unmulched waste soil from the Chadormalou iron mine in the first experiment.

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 موادها 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.

Table 2. Materials used to prepare mulch in the third experiment.

ترکیب افزودنی مالچ (بر حسب گرم)	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مونت موریونیت	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

آزمایش پنجم

با بررسی های انجام شده مشخص گردید در آزمایش قبلی مواد موثرتر در تهیه مالچ، کربنات کلسیم، ملاس و لیگنین می باشند و بنای ساخت مالچ برای آزمایش جدید، این ۳ مورد در غلظت های 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 نمونه ها 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.

آزمایش ششم

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

مالچ ها 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 خاک های مالچ پاشی شده در هر ردیف با یک قسمت مالچ پاشی نشده مقایسه گردد. بررسی نمونه ها بعد از یک هفته نشان داد که در تمام نمونه ها ترک ایجاد شده است.

آزمایش چهارم

در این آزمایش با بررسی های صورت گرفته از حالات ظاهری خاک ناشی از انباشت باطله معدن چادرملو، ۸ مورد (ملاس، مونت موریونیت، 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 نمونه های جداگانه از مالچ ها، سه ماده مناسب تر شامل کربنات کلسیم، ملاس و لیگنین جهت ادامه آزمایش ها تشخیص داده شد.

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

Table 3. Materials used to prepare mulch in the fifth experiment.

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

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

Table 4. Materials used to prepare mulch in the sixth experiment.

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 سائز ذرات برای سائزهای بزرگتر از ۸۰ میکرون توسط سرنده انجام می‌گیرد و اندازه‌گیری سائز ذرات با دستگاه LPSA^۱

در ابعاد میکرون (برای سائزهای 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

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

Table 5. Results of geochemical analysis of mulch using ICP-OES method.

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 ^r	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

فرسایش بادی و حرکت ماسه‌های روان شبیه‌سازی کرد. هنگامی که اولین ذره خاک شروع به حرکت از روی سرعت-سنج می‌کند، سرعت آستانه فرسایش در ارتفاع ۲۰ سانتی متری 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.

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 سانتی متر طول و ۳ سانتی متر 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

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

Table 6. Wind tunnel test results for seven-day mulched soil samples from the Chadormalou iron mine (in grams).

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

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

Table 7. Wind tunnel test results for thirty-day mulched soil samples from the Chadormalou iron mine (in grams).

سرعت باد (متر بر ثانیه)	۶/۲۸	۱۰/۳۱	۱۹/۶۶	۲۷/۲
وزن مواد جابجا شده بعد از مالچ‌پاشی (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 بین المللی 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 (UU³) 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 آن‌که 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
Table 8. The data obtained from the shear strength test of Chadormello iron mine tailings soil

شماره	مشخصات نمونه	زاویه اصطکاک (Q)(C) °	چسبندگی (C) (Kg/Cm ²)
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^۴

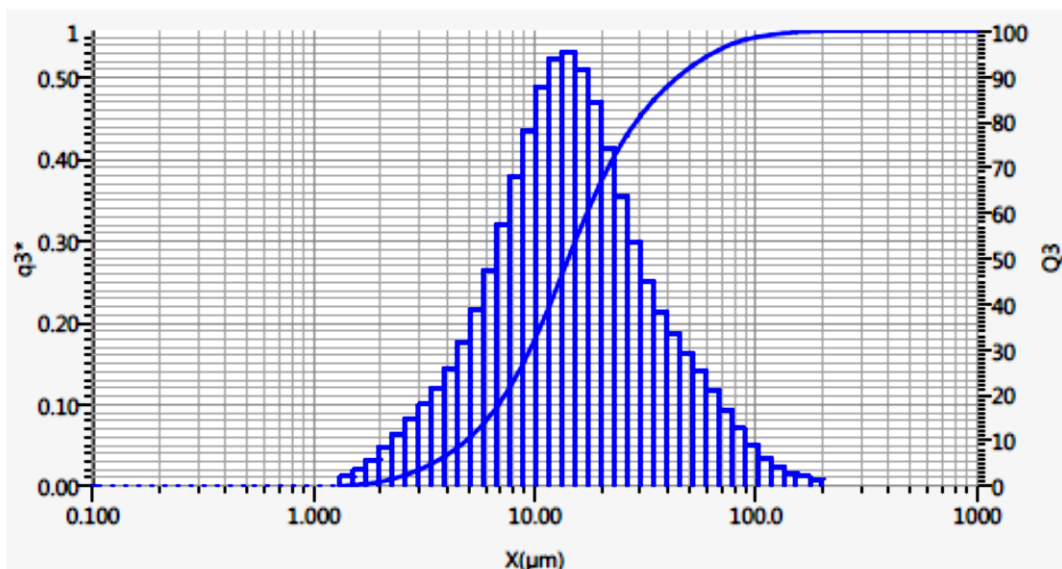
در این تحقیق از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل LEO 1400 برای بررسی و مشخص کردن توانایی مالچ منتخب در چسبندگی ذرات خاک به یکدیگر و نفوذ آن در حفرات خاک استفاده گردید (Maleki *et al.*, 2016; Ketabi *et al.*, 2017).

نتایج و بحث

نتایج آنالیز دانه‌بندی

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 ۱۲/۶ 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.

Fig. 3- Granulation diagram of Chadormello iron mine tailings soil sample.

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.

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

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

Table 9. Calculated values of soil pollution standards (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).

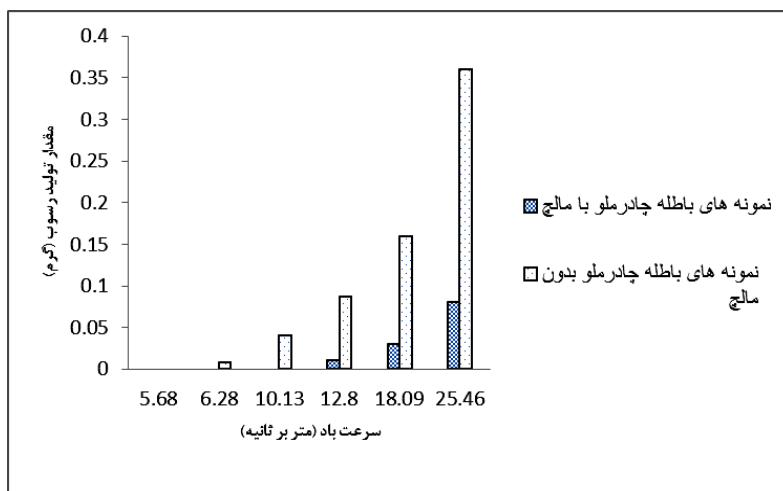
Table 10. Description of the characteristics of the heavy element index for evaluating the efficiency of soil stabilizing materials (Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, 2019).

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	کادمیوم			
		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 این‌که 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. 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 در گروه مقاوم قرار می‌گیرند.



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

Fig. 4- Amount of tailings sediment produced in the Chadormelou iron mine (grams) at different wind speeds.

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

Table 11. Relative estimation of soil or mulch resistance to wind erosion using a wind erosion measuring device (Ekhtesasi and Bahrami, 2018).

مقدار رسوب جمع آوری 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

فرسایش بادی در نمونه تحت تأثیر مواد تثبیت کننده و WEC: مقدار فرسایش بادی در نمونه شاهد می باشد. ویژگی های شاخص میزان فرسایش بادی جهت بررسی کارایی مواد تثبیت کننده خاک در جدول ۱۲ ارائه شده است. شاخص فرسایش بادی در نمونه های چادرملو به طور متوسط در طبقه ۱۰ تا ۲۵ درصد قرار می گیرد که کیفیت خوب این نمونه ها را نشان می دهد.

با داشتن متوسط میزان فرسایش نمونه شاهد و نمونه تحت تأثیر مواد تثبیت کننده می توان شاخص فرسایش بادی را بر اساس رابطه ۱ تعیین نمود و این عدد را به عنوان شاخص فرسایش بادی جهت اظهار نظر در مورد مواد تثبیت کننده در نظر گرفت.

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

که در آن، WEI: شاخص فرسایش بادی؛ WEM: مقدار

جدول ۱۲- تشریح ویژگی های شاخص میزان فرسایش بادی در خاک جهت بررسی کارایی مواد تثبیت کننده خاک (Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, 2019).

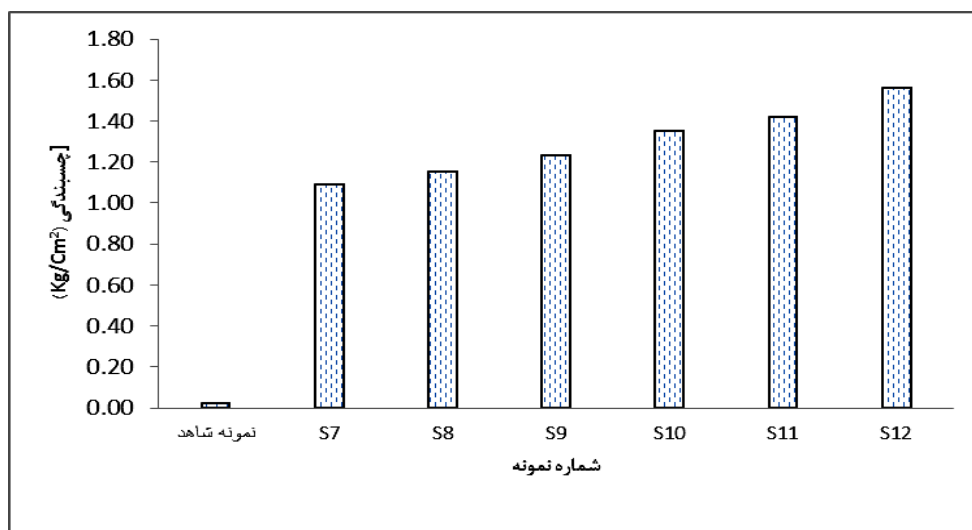
Table 12. Description of the characteristics of the wind erosion index in soil to evaluate the effectiveness of soil stabilization materials (Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, 2019).

معیار	شاخص	دستگاه یا روش اندازه گیری	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

سطح بستر خاکی منجر به فرسایش و جابجایی ذرات می گردد همانند یک نیروی برشی بر بستر عمل کرده و بالا رفتن مقاومت برشی بستر به نوعی مانعی در این زمینه محسوب می شود. در شکل ۵ میزان چسبندگی در نمونه های مالچ پاشی شده با نمونه شاهد باطله های 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.

همان طور که از نتایج جدول ۸ مشخص است، عملیات تثبیت منجر به افزایش مقاومت برشی نمونه های مالچ پاشی شده نسبت به نمونه بدون مالچ شده است. افزایش بار عمودی بر روی نمونه ها منجر به افزایش مقاومت نمونه ها گشته که در رفتار برشی طبیعی است. افزایش مقاومت برشی نمونه ها در اثر عملیات تثبیت دلیل دیگری بر اثربخش بودن این روش تثبیت در جلوگیری از فرسایش بادی می باشد. به طور کلی نیروی باد که با تماس خود بر

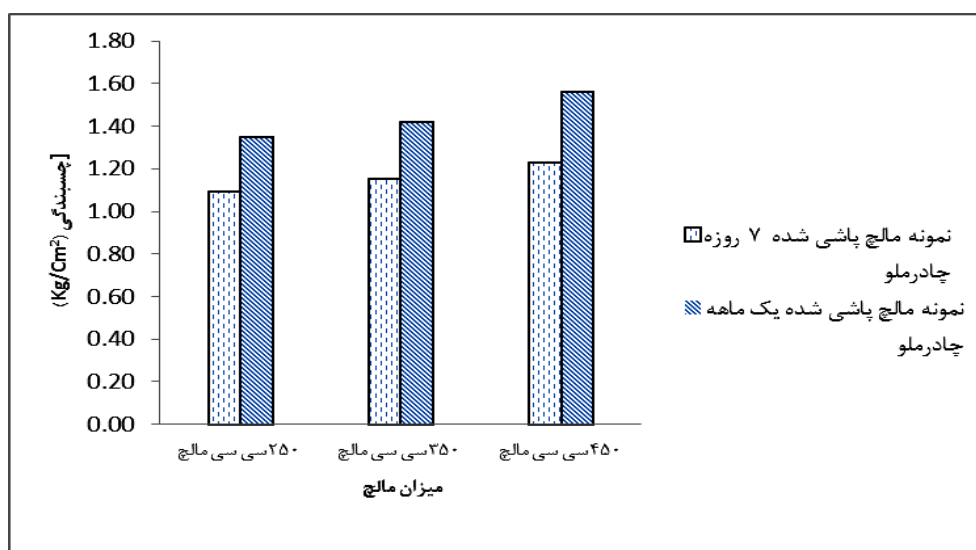


شکل ۵- مقایسه چسبندگی در نمونه‌های مالچ پاشی شده و نمونه شاهد معدن آهن چادرملو.

Fig. 5 - Comparison of adhesion in mulched samples and control samples from the Chadormalou iron mine

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.

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). مقاومت برشی، از شاخص‌های ارزیابی معیار استحکام مالچ می‌باشد. مقاومت برشی نشان‌دهنده میزان چسبندگی مواد می‌باشد، بنابراین هرچه مقاومت برشی بیشتر باشد، مالچ از چسبندگی و استحکام بالاتری برخوردار است. به عبارت



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

Fig. 6- Investigating the effect of time on adhesion in mulched samples of Chadormello iron mine.

جدول ۱۳- تشریح ویژگی‌های شاخص مقاومت برشی جهت بررسی کارایی مواد تثبیت‌کننده خاک (Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, 2019).

Table 13. Description of the characteristics of the shear strength index to evaluate the effectiveness of soil stabilization materials (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

ضخامت لایه مالچ بر روی نمونه‌های خاک باطله معدن آهن چادرمولو نشان داد که ضخامت لایه مالچ از ۲ تا ۴ سانتی‌متر متغیر می‌باشد. ویژگی‌های شاخص ضخامت سله جهت بررسی کارایی مواد تثبیت‌کننده خاک در جدول ۱۴ ارائه شده است. براساس جدول ۱۴ نمونه‌های خاک باطله مالچ پاشی شده معدن چادرمولو در طبقه چهارم با کیفیت خیلی خوب قرار می‌گیرند که نشان‌دهنده ماندگاری و مقاومت بالای نمونه‌های مالچ پاشی شده می‌باشد.

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

جدول ۱۴- ویژگی‌های شاخص ضخامت سله جهت بررسی کارایی مواد تثبیت‌کننده خاک (Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, 2019).

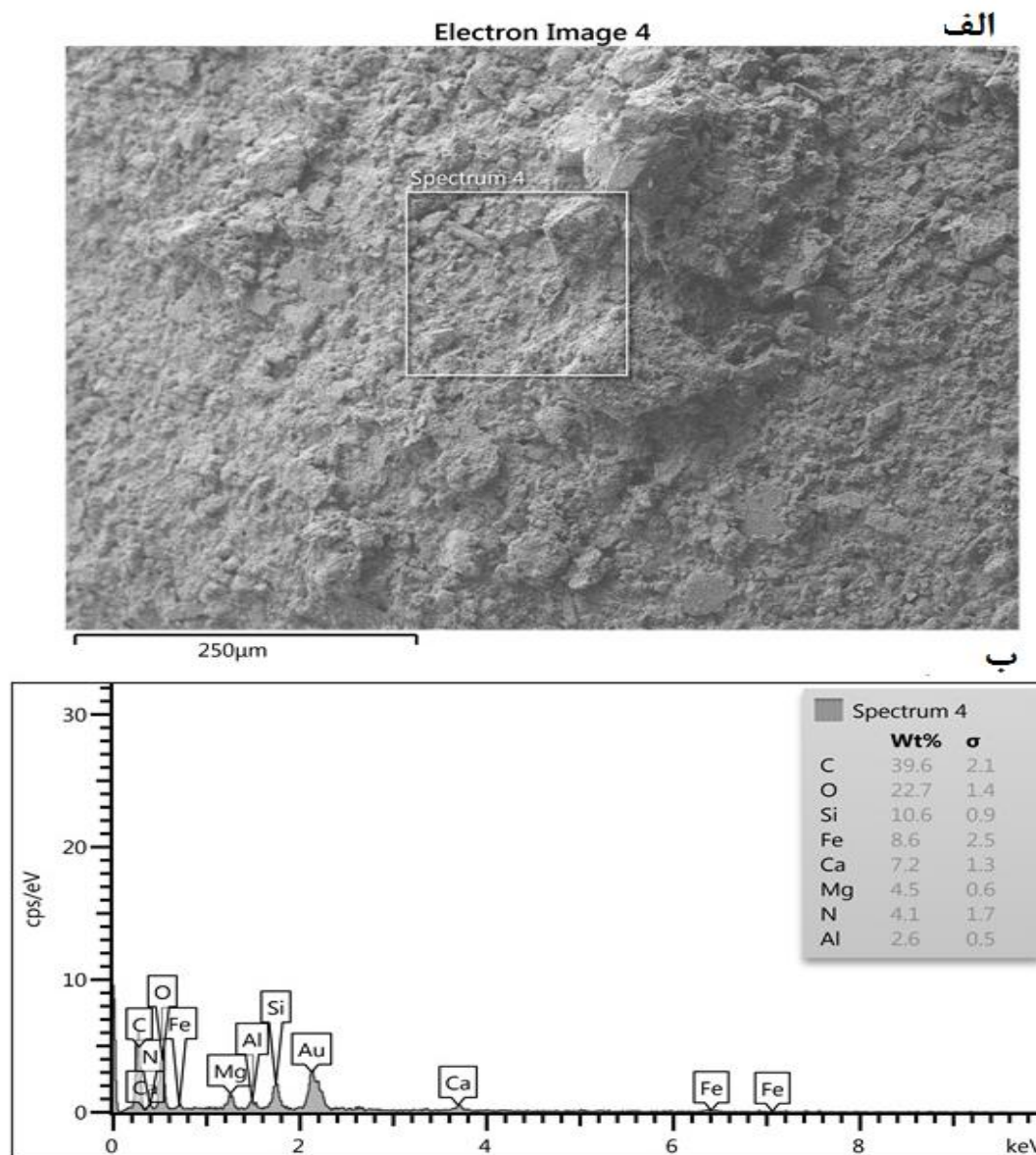
Table 14. Characteristics of the layer thickness index for evaluating the efficiency of soil stabilization materials (Islamic Republic of Iran Plan and Budget Organization, 2019.)

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

چسباندن ذرات به یکدیگر و تشکیل لایه‌ای بر روی خاک توسط مالچ مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که آنالیز SEM (شکل ۷ الف) و طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) (شکل ۷ ب)، ۶ ماه بعد از مالچ‌پاشی انجام گرفت. همانطور در شکل ۷ مشخص است عناصر مشخص شده در کلیه نمودارها نشان دهنده عناصر ترکیبات تشکیل‌دهنده 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.

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 چادرمولو 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



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

Fig. 7- (a) SEM image of mulched soil samples from Chadormaloo iron mine tailings, (b) X-ray energy dispersive spectroscopy of mulched samples.

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

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

می‌یابد. در نمونه‌های مالچ‌پاشی شده میزان فرسایش بادی در سرعت‌های مختلف باد کمتر از نمونه‌های شاهد می‌باشد که نشان می‌دهد پاشش مالچ بر روی نمونه‌ها باعث افزایش مقاومت و چسبندگی بیشتر ذرات خاک شده است. تعیین مقاومت برشی نمونه‌های معدن چادرمولو نشان داد که نمونه‌های مالچ‌پاشی 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 می‌سازد.

سپاسگزاری

نویسندگان لازم می‌دانند از آقای دکتر رضا شهبازی مسئول محترم قسمت زمین‌شناسی زیست‌محیطی سازمان زمین‌شناسی بخاطر همکاری‌های ایشان قدردانی نمایند.

پی‌نوشت‌ها

¹ Laser Particle Size Analyzer

² Limit of Quantification

³ Unconsolidated Undrained

⁴ Scanning Electron Microscopy

References

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., & 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., & Siddoway, F.H. (1963). Effect of ridges on erosion of soil by wind. *Soil. Science*, 28, 557-560. <https://doi.org/10.2136/sssaj1964.03615995002800040031x>.

توجه به اینکه فرسایش بادی معمولاً در مناطقی با خاک دارای مقادیر زیادی ماسه ریز و سیلت اتفاق می‌افتد، خاک‌های باطله مورد مطالعه در زمره خاک‌های مستعد فرسایش قرار دارند. انجام آزمایش‌های مختلف نشان داد که بهترین مالچ برای تثبیت باطله معدن چادرمولو ترکیب لیگنو سولفانات (۱۲۵ گرم)، ملاس (۲۵۰ میلی‌لیتر)، کلرید کلسیم (۶۲/۵ گرم) می‌باشد. 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 می‌سازد. اندازه‌گیری ضخامت لایه مالچ بر روی نمونه‌های باطله معدن چادرمولو نشان داد که ضخامت لایه مالچ از ۲ تا ۴ سانتیمتر متغیر می‌باشد که مقایسه ضخامت این نمونه‌ها با ویژگی‌های شاخص ضخامت سله جهت بررسی کارایی مواد تثبیت کننده خاک نشان دهنده کیفیت خیلی خوب نمونه‌های مالچ‌پاشی شده و ماندگاری و مقاومت بالای مالچ می‌باشد. آزمایش تونل باد نشان داد که با افزایش سرعت باد در نمونه‌های مالچ‌پاشی شده و نمونه‌های شاهد (بدون مالچ) شدت فرسایش خاک افزایش

منابع

Bagnold, R.A. (1937). The size-grading of sand by wind, *Proceedings of the Royal Society*, 163, 250-264. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0225>.

Bagnold, R.A. (1941). *The Physics of blown sand and desert dunes*. Chapman and hall Ltd, London, England. <https://doi.org/10.1177/030913339401800105>.

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., & James, J.G. (2003). Heavy metal concentrations during storm events in a rehabilitated industrialized catchment. *Hydrological Processes*, 17(10), 1923-1939. <https://doi.org/10.1002/hyp.1218>.

Chepil, W.S. (1956). Influence of moisture on erodibility of soil by wind. *Soil Science*, 20, 288-292. <https://doi.org/10.2136/sssaj1956.03615995002000020033x>.

Deng, Z.Q., de Lima, J. L. & Jung, H.S. (2008).

- Sediment transport rate-based model for rainfall-induced soil erosion. *Catena*, 76 (1), 54-62. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.09.005>.
- Ekhtesasi, M. R., Zare Arnani, M. & 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., & Bahrami, H. (2018). Introduction of indicators and guidelines for mulch testing, 4th National Conference on Wind Erosion and Dust Storms, Yazd University (in Persian).
- Gholami Tabas, J., Jafari, M., & 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 (in Persian).
- Infante, D.J.U., Martinez, G.M.A., Arrua, P.A., & 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. <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0058-2>.
- Jafari Shalkoohy, A., Vafaeian, M., Rowshanzamir, M.A., & 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). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.73.273>.
- Kashefighasemabadi, A., Karbassi, A., Tabatabaee, M., & 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., & Hajjalilue Bonab, M. (2017). Stabilization of calcareous sand dunes using phosphoric acid mulching. *Journal of Arid Environments*, 148, 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.011>.
- Kotta, A. B., Patra, A., Kumar, M., & 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. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1708-x>.
- Heidarian, H., Lentz, D. R., Alirezaei, S., McFarlane, C. R., & 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. <https://doi.org/10.3390/min8030087>.
- Maleki Kalker, M., Ebrahimi, S., Asadzadeh, F., & 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). <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2016.58345>.
- Mehrabi, S.H., Soltani, S., & 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). <https://doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.71.69>.
- Mirahmadi, H.R., & 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., & González, V. (2018). dust production in mining suppression measures in quarry blasting, master degree in mining engineering, 233pp. <https://oa.upm.es/52948/>.
- Movehedan, M., Abbasi, N., & 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. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.9695>.
- Nayebi, N., Esmacily, D., Modabberi, S., Shinjo, R., Deevsalar, R., & 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. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.301762.1930>.
- Parsakhoo, A., Hosseini, S.A., Lotfalian, M., Mohammadi, J., & Salarijazi, M. (2020). Effects of molasses, polyacrylamide and bentonite on dust control in forest roads. *Journal of Forest Science*, 66, 218-225. <https://doi.org/10.17221/41/2020-JFS>.
- Omane, D., Liu, W. V., & 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. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.12.005>.
- 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., & 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.
- Shiyatyy, Y. I., Lavrovsky, A. B., & 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. Ph.D. Thesis, Clausthal University of Technology.

Zhongju, M., Xiaohong, D., Yong, G., Xiaomeng, R., Yanlong, D., & 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. <https://doi.org/10.12074/201804.02347>.



*This page is intentionally
left blank.*