

مهار فرسایش بادی توسط پلیمر SBR و میکروارگانسیم باسیلوس پاسته اوری (مطالعه موردی: منطقه جبل کندی)

فرزانه دوزالی جوشین^{۱*}، کاظم بدو^۲، محسن برین^۳، حسین سلطانی جیقه^۴

۱. دانشجوی دکتری گروه عمران، گرایش مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

۲. استاد گروه عمران، گرایش مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه ارومیه

۳. استادیار گروه خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

۴. دانشیار گروه عمران، گرایش مکانیک خاک و پی، دانشکده فنی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۲۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۳)

چکیده

فرسایش بادی از عوامل اصلی تخریب خاک و محیط زیست، انتقال ذرات معلق و رسوب‌دهنده آن در شبکه‌های آبیاری و زهکشی است. بادهای موسمی منطقه، منجر به فرسایش بادی اراضی کشاورزی استان‌های آذربایجان شرقی و غربی شده و آثار مخربی بر منابع زیست‌محیطی و تأسیسات اقتصادی خواهد داشت. هزینه زیاد مالچ‌های نفتی و آثار مخرب آنها در محیط زیست، منجر به استفاده از مواد سازگار با محیط زیست و ارزان‌تر شده است. در این تحقیق، اثر پلیمر مایع رزین SBR و میکروارگانسیم باسیلوس پاسته اوری بر کنترل فرسایش بادی و طوفان گرد و غبار در منطقه جبل کندی ارزیابی شده است. برای شبیه‌سازی فرسایش خاک از دستگاه تونل باد با دامنه سرعت صفر تا ۱۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری از کف تونل استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده، در نمونه‌ها، با افزایش سرعت باد مقدار فرسایش خاک به صورت نمایی افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در نمونه شاهد تا سرعت حدود هفت متر بر ثانیه افزایش مقدار فرسایش خاک ناچیز است، ولی از سرعت حدود هفت متر بر ثانیه تا حدود ۱۵ متر بر ثانیه، مقدار فرسایش خاک از ۵/۵۱ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت افزایش یافته است. همچنین روند افزایش مقدار فرسایش خاک در نمونه تثبیت شده با میکروارگانسیم بسیار کند و در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه برابر ۱/۱ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت و در نمونه تثبیت شده با پلیمر تقریباً صفر است. برای بررسی مقاومت سطحی نمونه‌های خاک تثبیت شده از آزمایش مقاومت فروری استفاده شد که طبق نتایج، مقدار متوسط مقاومت فروری در نمونه‌های تثبیت شده با میکروارگانسیم و پلیمر به ترتیب برابر با ۵۸ و ۷۶ کیلوپاسکال است در حالی که مقاومت فروری نمونه شاهد ۱۵ کیلوپاسکال می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بهسازی، باکتری باسیلوس، پلیمر رزین SBR، کنترل فرسایش بادی، مقاومت فروری.

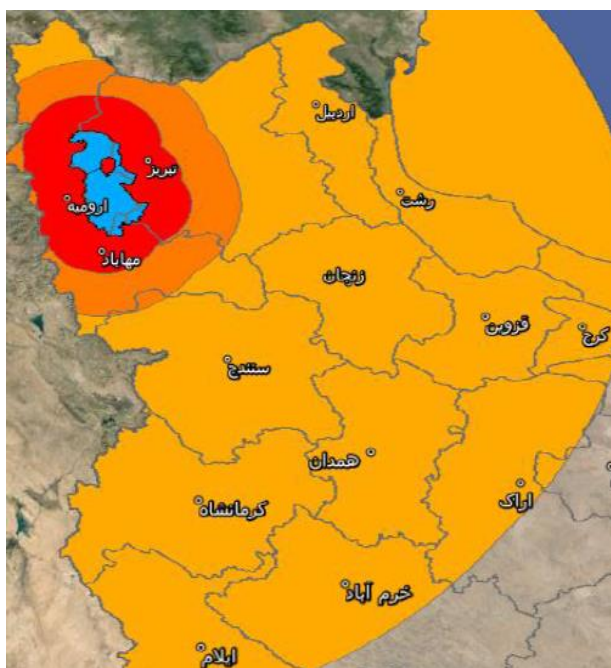
مقدمه

یکی از مشکلاتی که اخیراً در اثر دخالت‌های بشری و استفاده غیرمنطقی از منابع طبیعی و تخریب آن‌ها در حال گسترش است، پدیده گرد و غبار است. مناطق خشک با بیش از ۴۰ درصد سطح زمین، منبع مهمی از طوفان‌های گرد و غبار در جهان هستند (Dehkordi and Huh Abu Nasr, 2015). در مقیاس جهانی خطر فرسایش بادی کمتر از فرسایش آبی است، ولی گاهی ابعاد آن از فرسایش آبی بیشتر است (Refahi, 2013).

در سال‌های اخیر میزان فرسایش بادی در برخی مناطق ایران افزایش چشمگیری داشته و وسعت عرصه‌های تحت تأثیر فرسایش بالغ بر ۳۰ میلیون هکتار، یعنی حدود یک ششم کل وسعت ایران، است (Rashinho, 2009). حدود ۱۰ میلیون هکتار از این ۳۰ میلیون هکتار را مناطق با حساسیت فرسایش شدید

کشور ایران با مساحتی بیش از ۱۶۴ میلیون هکتار، در عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی واقع شده که در نوار خشک کره زمین قرار دارد (Shahsavani, 2010). موقعیت ایران در منطقه خشک باعث شده تا علاوه بر مشکلات ناشی از فرسایش بادی در داخل کشور، حرکت ماسه‌های روان از کشورهای همسایه نیز موجب بی‌نظمی در سیستم آب و هوایی کشور شود. در حال حاضر، فرسایش بادی و هجوم ماسه‌های روان به تأسیسات اقتصادی و منابع زیستی یکی از معضلات اصلی کشور است (Kurdovani, 2001).

می‌شود که عمدتاً رسوبات تخریبی از نوع رسوبات شیمیایی و بیوشیمیایی را وارد دریاچه می‌کنند. خشکی و پسروری آب این دریاچه توسط عوامل انسانی و اقلیمی حالت فوق اشباع در محیط ایجاد می‌نماید که منجر به شور شدن آب زیرزمینی منطقه شده و مشکلات زیست‌محیطی فراوانی مثل فرسایش بادی خاک و طوفان‌های نمکی در منطقه را به وجود می‌آورد. از مهمترین بحران‌های زیست‌محیطی این پدیده بیابان‌زایی و فرسایش بادی است که طوفان‌های گرد و غبار و حرکت ریزگردها از پیامدهای آن می‌باشد. با توجه به وقوع این بحران در دریاچه ارومیه، عرصه بیشتری از بستر دریاچه خشک و در معرض فرسایش بادی قرار گرفته است (Azizi et al., 2016).



شکل ۲. مناطق تحت تأثیر در شعاع ۵۰۰ کیلومتری دریاچه ارومیه (Kokabinejad and Panahi, 2013)

ایجاد ریزگردهای نمکی ناشی از توسعه کانون‌های تولید ریزگرد در دریاچه ارومیه و مناطق شوره‌زار مجاور آن، بیابان‌زایی و پسروری آن در محدوده‌های کشاورزی و مسکونی، ایجاد بیماری‌های صعب‌العلاج در منطقه، تخریب و از بین رفتن اراضی کشاورزی، افزایش مهاجرت از مناطق مجاور دریاچه و به ویژه تخلیه روستاهای نزدیک دریاچه و نوسان در پارامترهای اقلیمی حوضه، از قبیل افزایش دما و کاهش بارش از اهم خطرات و تهدیدات ناشی از تداوم خشکی دریاچه ارومیه، هستند (Hoseini Mughari et al., 2017).

در بر گرفته است که نیاز به عملیات کنترل و حفاظتی دارند. دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران، بین دو استان آذربایجان شرقی و غربی، بزرگترین دریاچه ایران و دومین دریاچه شور دنیا است که در معرض خطر خشک شدن کامل بوده و طی ۲۰ سال اخیر، ۸ متر کاهش تراز آب داشته است (Matlabi, 2013) و جزو مناطق با حساسیت فرسایش شدید می‌باشد. در شکل (۱) نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه در بازه زمانی حدود نیم قرن نشان داده شده است. طبق نظر کارشناسان در صورت خشک شدن این دریاچه، هوای معتدل منطقه تبدیل به هوای گرمسیری خواهد شد (Afyuni et al., 1997) و مطابق شکل (۲) مناطق واقع در شعاع ۵۰۰ کیلومتری آن تحت تأثیر قرار خواهند گرفت.

حوضه دریاچه ارومیه توسط رودخانه‌های زیادی تأمین



شکل ۱. نوسانات تراز آب دریاچه ارومیه از سال ۱۳۴۶ تا ۱۳۹۵ (Kokabinejad and Panahi, 2013)

اختصاص ۹۰٪ درصد منابع آبی منطقه به بخش کشاورزی، تبخیر زیاد در پی گرم شدن هوا و برداشت غیرمجاز از آب‌های زیرزمینی در پی حفر چاه، از دلایل اصلی خشک شدن این دریاچه است. عوامل مؤثر بر تشدید بحران خشکی دریاچه ارومیه نیز شامل حرکت ۶۵۰ کیلومتری طوفان نمک دریاچه آرال در ۲۹ آوریل ۲۰۰۸، تغییرات اقلیمی و استمرار خشکسالی‌ها، توسعه نامتوازن بخش کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه و برداشت بیش از حد مجاز از منابع آب تجدیدپذیر حوضه آبریز دریاچه، می‌باشند (Duan et al., 2016).

محیط‌زیست به عنوان جایگزین آنها شده است (Santoni *et al.*, 2003). از مهمترین معایب مالچ‌های نفتی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Vaezi, 2011): ۱) توسط باد ساییده و در محیط پراکنده شده و آلودگی محیط زیست ایجاد کرده و در رشد و نمو گیاهان و سلامتی انسان‌ها و جانوران مشکل ایجاد می‌کند، ۲) به دلیل رنگ تیره، ضریب جذب بالایی دارند و توازن انرژی محیط را از بین برده و موجب پیدایش باد در محل می‌شوند، ۳) آلودگی آب‌های زیرزمینی و ۴) قابل اشتعال.

در حدود نیم قرن گذشته مواد مختلفی برای تثبیت ماسه‌های روان در جهت کنترل فرسایش بادی بکار گرفته شده است (Lyles *et al.*, 1974). با کشف نفت، استفاده از مالچ‌های نفتی برای تثبیت ریزگردها مرسوم شد. در ایران، از حدود ۴۰ سال پیش از مالچ نفتی برای کنترل فرسایش بادی استفاده می‌شود، ولی این مالچ با افزایش دمای سطحی خاک موجب کاهش رشد جوانه‌ها شده و تأثیر منفی روی بافت‌های زنده گیاه دارد (Rezaei, 2012).

سرباره فولاد با افزایش زبری فرسایش بادی را کنترل می‌کند (Babakhani and Karim Zadeh, 2013). مالچ‌های سنگریزه‌ای نیز در مهار فرسایش بادی بکار گرفته می‌شوند. این مالچ‌ها، ذرات بادآورده را هم به دام می‌اندازند (Yanli, 2003). مالچ‌های آلی مانند ضایعات نیشکر موجب افزایش مقاومت برشی، حفظ رطوبت و افزایش عناصر غذایی به بستر زیرین خاک می‌شوند (Jamili, 2013). مالچ‌های رسی در برابر باد مقاوم هستند، ولی تحت اثر همزمان باد و ذرات ریز فرسایش می‌یابند (Majdi *et al.*, 2006). مالچ معدنی هم در کشورهایی مثل آمریکا و کانادا برای کنترل گرد و غبار استفاده می‌شود (Goodrich *et al.*, 2009). از سال ۱۹۸۰ به بعد، تثبیت خاک با پلیمر، به دلیل اجرای آسان و سرعت اجرا و کسب مقاومت بالا، از اهمیت بیشتری نسبت به مواد تثبیت‌کننده قدیمی برخوردار شد (Abbasi *et al.*, 2011). با توجه به ویژگی‌های مختلف، این مواد شیمیایی با اهداف و اشکال مختلف برای افزایش ظرفیت نگهداری خاک و کنترل فرسایش بادی و آبی مورد استفاده قرار گرفتند (Samaee *et al.*, 2007). هر کدام از این پلیمرها در انواع امولسیون، مایع و یا پودر جامد تهیه می‌شوند. در چند سال اخیر، استفاده از فناوری رسوب کربنات کلسیم (MICP) توسط باکتری و اوری و کلریدکلسیم نیز برای تثبیت ریزگردها مرسوم شده است (Bang and Min, 2011). در این روش اوری توسط سلول‌های باکتری هیدرولیز شده و مطابق رابطه (۱) یون کربنات تولید می‌شود که با یون کلسیم به کربنات کلسیم تبدیل شده و رسوب کربنات کلسیم را ایجاد می‌کند (رابطه ۲)

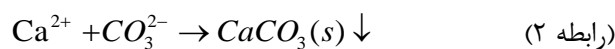
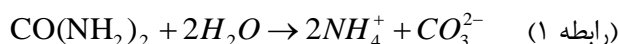
با توجه به پیامدهای سوء ناشی از پدیده بیابان‌زایی که در سال‌های اخیر به صورت ریزگردها در اکثر مناطق کشور مشاهده شده است، ضرورت اتخاذ تدابیری در این زمینه بسیار حیاتی است. خوشبختانه این موضوع در بند (ب) ماده ۱۹۳ قانون برنامه پنجم توسعه مورد تأکید قرار گرفته است و براساس این بند سازمان حفاظت محیط‌زیست مکلف شده است تا تمهیدات لازم را برای کاهش انتشار کانون‌های ریزگرد اتخاذ کند (Hazirei and Zare Ernani, 2013).

کنترل فرسایش بادی طی سه گام در مراحل برداشت ذرات، حمل و نقل ذرات و رسوب ذرات انجام می‌شود (Armbrust and Dickerson, 1971). بهترین راهکار برای کنترل فرسایش بادی در مرحله برداشت ذرات بوده و مرحله انتقال ذرات مشکل‌ترین مرحله است. در ایران کنترل در مرحله رسوب ذرات متداول‌تر است (Heydari and Ahmadi, 2010). دو روش اساسی برای کنترل فرسایش بادی وجود دارد که عبارت هستند از: الف) کاهش سرعت باد در نزدیکی سطح زمین تا کمتر از سرعت آستانه فرسایش باشد، ب) کنترل عوامل مؤثر بر خصوصیات خاک، مثل رطوبت خاک (Refahi, 2013). راهکارهای مختلفی برای جلوگیری از فرسایش بادی خاک وجود دارد که مهمترین آنها به قرار زیر است: ۱) حفظ رطوبت خاک، ۲) استقرار پوشش گیاهی، ۳) ایجاد موانع در مسیر باد، ۴) ایجاد خاک دانه‌های درشت در خاک سطحی و ۵) مالچ‌پاشی.

متداول‌ترین روش تثبیت ماسه‌های روان مالچ‌پاشی است (Shafabakhsh and Ebrahimi, 2008). به مواد طبیعی یا مصنوعی که بتواند پوشش محافظی به صورت لایه مجزا و گسترده روی زمین ایجاد کرده و سطح خاک را از آسیب‌های مختلفی مانند باد و باران حفظ کند مالچ‌پاشی گفته می‌شود (Fryrear and Skidmore, 1985). مالچ‌ها به گروه‌های گوناگون نفتی، شیمیایی و بیولوژیک تقسیم می‌شوند و باید به گونه‌ای انتخاب شوند که بسته به شرایط محیط دارای خاصیت مورد نظر باشند.

مهمترین ویژگی‌ها در انتخاب مالچ‌ها شامل موارد زیر است؛ این‌که دارای خاصیت الاستیسیته باشند تا باد و ذرات نتواند آن را به صورت پوسته پوسته درآورد، آب و هوا را عبور داده و در دسترس گیاه قرار دهد، دوام بیشتری داشته باشد، مواد غذایی را کاهش نداده و باعث از بین رفتن موجودات زنده خاک نشود و روی محصولات اثر سوئی نداشته و برای افرادی که با آن سر و کار دارند مضر نباشد (Josheph *et al.*, 1980). مالچ‌های نفتی علیرغم عملکرد خوب در کنترل فرسایش بادی، دارای معایبی هستند که منجر به استفاده از مالچ‌های دوستدار

(Whiffin et al., 2007).



باکتری مورد استفاده در این تحقیق *Sporosarcina pasteurii PTCC1 1645* است. این باکتری هوازی و گرم مثبت است و از رایج‌ترین باکتری‌های مورد استفاده جهت تولید رسوب کربنات کلسیم از طریق کاتالیز کردن واکنش تبدیل اوری به آمونیوم و دی اکسید کربن است. این باکتری علاوه بر بهبود رفتار خاک، در تعمیر و بهبود دوام بتن نیز استفاده می‌شود. با توجه به موارد گفته شده و در راستای حمایت از اهداف محیط‌زیست، در این تحقیق با انجام آزمایش‌های تونل باد و مقاومت فروروی، اثر پلیمر رزین مایع SBR^۲ و روش رسوب میکروبی کربنات کلسیم، جهت کنترل فرسایش بادی ماسه‌های روان منطقه جبل کندی ارومیه بررسی شده است. در این تحقیق برای اولین بار از محیط کشتی صنعتی عصاره خیسانده ذرت برای کشت باکتری باسیلوس پاسته اوری استفاده شده است. هر دو ماده بکار برده شده برای تثبیت ماسه بادی منطقه جبل کندی، پلیمر SBR و باکتری باسیلوس پاسته اوری از مواد نوین برای تثبیت ماسه‌های بادی و مهار فرسایش بادی این منطقه بوده است.

مواد و روش‌ها

پلیمر مایع رزین استایرن بوتادین رابر (SBR)

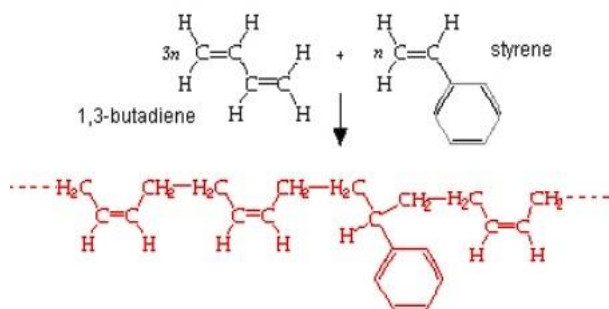
کو-پلیمر استایرن و بوتادینی که بیش از ۵۰٪ بوتادین داشته باشد SBR نامیده می‌شود. نسبت معمولی مونومرها ۷۰٪ تا ۷۵٪ بوتادین به ۲۵٪ تا ۳۰٪ استایرن است و در صورتی که استایرن بالای ۵۰٪ باشد، محصول به شدت پلاستیک می‌شود و در تهیه رنگ‌های شیرابه‌ای (لاتکس) استفاده می‌شود. کو-پلیمر استایرن بوتادین رابر پلیمری متداول با کارایی زیاد و بالا جزو پرمصرف‌ترین لاستیک‌های دنیا می‌باشد. این ماده، به علت داشتن مواد اولیه ارزان و فراوان، قیمت مناسبی دارد و به همین دلیل، بالاترین حجم تولید را در صنعت لاستیک به خود اختصاص داده است. بالغ بر ۷۰٪ SBR تولیدی در صنعت تایرسازی به‌خصوص آج تایر، ۱۵٪ در قطعات مکانیکی و حدود ۱۰٪ به شکل شیرابه (لاتکس) مصرف می‌شود. رزین SBR بر پایه حلال آب و دی متیل فرمامید است.

این رزین از شرکت پایا رزین اصفهان به‌صورت آماده (محلول) تهیه شد. در حالت محلول پلیمریزاسیون یونی است، محصول این روش دارای خطیت زیاد، انعطاف بالا و مقاومت سایشی و پارگی بالا در مقابل تنش‌های دینامیکی است. دانسیته این پلیمر ۰/۹۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. ساختار شیمیایی این رزین حلقوی-خطی (آلیفاتیک-آروماتیک) است. ۱۰۰ میلی‌لیتر از محلول با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر این پلیمر مایع برای هر مترمربع با ضخامت یک سانتی‌متر به صورت پاشش با اسپری در تهیه نمونه‌های آزمایش تونل باد استفاده شد. این پلیمر دارای دمای انتقال شیشه‌ای (Tg) بسیار متفاوت و منحصر به فرد بوده، بدلیل دمای Tg پایین حالت الاستیسیته این پلیمر زیاد است. Tg حداقل دمای است که در آن در کنفورماسیون پلیمر (شکل فضایی زنجیره‌های پلیمر) تغییر ایجاد می‌شود. این دما برحسب استاندارد ASTM E 1356 اندازه‌گیری می‌شود (Movahedan et al., 2012).

از جمله مشخصه‌های دیگر این پلیمر می‌توان به مقاومت سایشی و خستگی بالا اشاره نمود. غیرسمی و سازگار با محیط‌زیست است. زمانی که درجه حرارت واقعی محیط بیشتر از دمای انتقال شیشه‌ای پلیمر باشد، انعطاف‌پذیری می‌شود و در صورتی که درجه حرارت واقعی نسبت به دمای محیط کمتر باشد، امکان سفت و شکننده شدن را دارد. از جمله مزایای SBR می‌توان به ارزان بودن، مقاومت در برابر آب، مقاومت در برابر اسید و الکل اشاره نمود. SBRها دارای خواصی همچون مقاومت فرسایشی عالی، مقاومت در برابر سایش، انعطاف‌پذیری در دماهای پایین، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی، مقاومت در برابر حرارت و مقاومت به ضربه می‌باشند.

در شکل (۳) ساختار شیمیایی استایرن بوتادین روبر نشان داده شده است (Abbasi et al., 2011).

Styrene-Butadiene Rubber



شکل ۳. ساختار شیمیایی استایرن بوتادین روبر

توصیف منطقه و ترکیب شیمیایی ماسه بادی مورد آزمایش روستای جبل‌کندی در ۴۰ کیلومتری شمال ارومیه و در محور ارومیه- سلماس و در غرب دریاچه ارومیه است که موقعیت آن در شکل (۴) نشان داده شده است. مناطق با رنگ روشن در اطراف دریاچه ارومیه در شکل (۴) شوره‌زارها و زمین‌های ماسه‌ای فاقد پوشش گیاهی و مستعد فرسایش بادی را نشان می‌دهد. در حدود یک کیلومتری این روستا ۳۰۰ هکتار از اراضی به شن‌های روان تبدیل شده و روز به روز بر تپه‌های آن افزوده می‌شود. این تپه‌ها تهدیدی جدی بر روستاها و باغات اطراف به شمار می‌روند. منطقه جبل‌کندی به عنوان یکی از کانون‌های فعال ریزگرد شناخته شده است. با پیش‌روی به سمت دریاچه، فرسایش بادی خاک به وضوح دیده می‌شود و کانون فعال ریزگرد در منطقه به شکل تل ماسه‌های روان، خودنمایی می‌کند. در این منطقه، علاوه بر فرسایش شدید بادی، از بین رفتن پوشش گیاهی و فعال بودن کانون ریزگرد و شوری‌زایی از عوامل تخریب محیط‌زیست است که با پس‌روی آب دریاچه این عوامل تشدید یافته است. وزش بادهایی با سرعت زیاد در این منطقه، طوفان‌های گرد و غبار ایجاد کرده و باعث حرکت شن‌های روان به سمت روستا می‌شود.



شکل ۴. تصویر ماهواره‌ای از موقعیت روستای جبل‌کندی

خاک ماسه بادی

مشخصات فیزیکی و مکانیکی خاک

براساس مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌های ماسه در منطقه جبل‌کندی به روش XRF مهم‌ترین اجزاء تشکیل‌دهنده ماسه‌های بادی منطقه، شامل SiO_2 حدود ۶۰٪، اکسید کلسیم (CaO) حدود ۱۵٪، اکسید آلومینیوم (Al_2O_3) حدود ۱۰٪ و

این پلیمر آب‌دوست بوده، قابلیت نگهدارندگی آب را در ساختار خود داشته و در حالت مرطوب کاملاً الاستیک است. pH پلیمر در مخلوط با ماسه در حدود ۸ است. به دلیل روان بودن و ویسکوزیته پایین قابلیت پمپ شدن دارد که از ویژگی‌های مثبت آن است. هنگام مرطوب شدن، پلیمر به صورت اسفنج عمل کرده و علاوه بر امکان نفوذ آب به لایه‌های پایین‌تر، از فرسایش ماسه به وسیله جریان آب جلوگیری می‌کند. این عوامل باعث می‌شود که امکان استقرار و رشد گیاه بر روی ماسه‌های بادی فراهم شود. علاوه بر تثبیت ذرات خاک و ماسه، دارای شبکه آب‌دوست است که به عنوان نگهدارنده رطوبت باعث افزایش رشد طبیعی بذر، نهال و گیاه هم می‌شود.

میکروارگانیزم مورد استفاده

باکتری مناسب برای استفاده در روش رسوب‌گذاری بیولوژیکی کربنات کلسیم، باید توانایی کاتالیز کردن هیدرولیز اوری را داشته باشد که تحت عنوان باکتری مولد اوره‌آز یاد می‌شود. باکتری باسیلوس پاسته اوری از رایج‌ترین باکتری‌های مورد استفاده جهت تولید رسوب کربنات کلسیم از طریق کاتالیز کردن واکنش تبدیل اوری به آمونیوم و دی‌اکسید کربن است. ژن باکتری *Sporosarcina pasteurii* PTCC1 1645 از مرکز کلکسیون قارچ و باکتری ایران خریداری شد. کشت باکتری و فرآیند شبیه‌سازی فرسایش بادی به ترتیب در آزمایشگاه بیوتکنولوژی دانشکده کشاورزی و آزمایشگاه ژئوتکنیک زیست‌محیطی دانشکده فنی دانشگاه ارومیه انجام شد. کشت اولیه باکتری در محیط استاندارد با ترکیب ۲۰ گرم بر لیتر عصاره مخمر و ۱۰ گرم بر لیتر سولفات آمونیوم با pH برابر ۸ در یک شیکر انکوباتور با ۱۲۰ دور در دقیقه، تحت شرایط هوایی انجام شد. برای تولید حجم بیشتر محلول باکتری جهت استفاده در کنترل فرسایش بادی نمونه‌های خاک، از محیط کشت صنعتی عصاره خیسانده ذرت تهیه شده از شرکت شهر صنعتی البرز استفاده شد. محلول سیمان‌تاسیون نیز شامل کلرید کلسیم و اوری بود. دمای انجام کلیه آزمایش‌ها حدود ۲۵ درجه سانتیگراد (با ۲ درجه افزایش یا کاهش) بود. مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر محلول MICP (۵۰ میلی‌لیتر باکتری و ۵۰ میلی‌لیتر محلول سیمان‌تاسیون) برای عمق یک سانتی‌متر و مساحت یک مترمربع مقدار بهینه برای تثبیت نمونه خاک تعیین شد. براساس روش ارائه شده در این روش که از محیط کشت صنعتی عصاره خیسانده ذرت استفاده شد، بر مبنای قیمت‌های کنونی هزینه هر هکتار تثبیت خاک با این روش حدود ۱۵۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال به ازای هر هکتار برآورد می‌شود.

ms/cm بدست آمد که بیانگر غیرشور بودن خاک بود. لگاریتم منفی غلظت یون‌ها در محلول، pH نامیده می‌شود. برای تعیین pH از روش استاندارد ASTM D 4972-01 استفاده شد. مقدار pH خاک نیز ۷/۹۵ بدست آمد که نشان‌دهنده حالت قلیایی ضعیف آن است. میزان مواد آلی خاک نیز ۰/۹۵٪ بدست آمد.

دامنه سرعت باد استفاده شده در آزمایش‌ها با توجه به سرعت باد غالب منطقه

در این آزمایش از دستگاه تونل باد با سرعت صفر تا ۱۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری از کف تونل (معادل صفر تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در ارتفاع ۱۰ متری) استفاده شد. این دستگاه مناسب سرعت باد منطقه جبل‌کندی است، چرا که با توجه به اطلاعات اداره هواشناسی استان آذربایجان غربی، باد غالب در منطقه حدود ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتر در ارتفاع ۱۰ متری است.

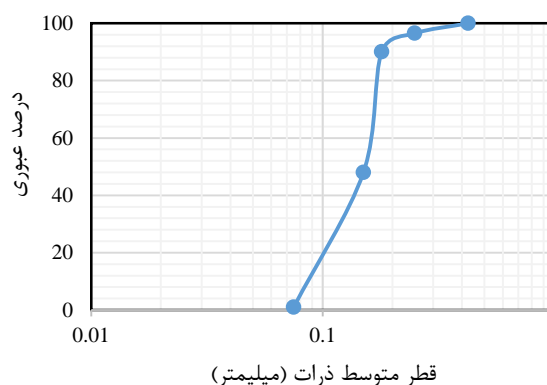
بررسی روند خشک شدن نمونه خاک

مخلوط ماسه و پلیمر در سطح خود به حد اشباع رسیده و پس از نفوذ به لایه‌های پایین‌تر، از میزان آن کاسته شد. نفوذ پلیمر بسته به حجم پاشش و میزان غلظت آن ضخامت‌های متفاوتی را ایجاد می‌کرد. از آنجایی که نزدیک به ۹۸٪ حجم مایع پاشیده شده را آب معمولی تشکیل می‌داد، بنابراین پس از قرارگیری در سطح و به نسبت درجه حرارت محیط، مراحل خشک شدن آغاز می‌شد. به منظور تعیین رابطه بین از دست دادن آب نسبت به زمان، اقدام به تهیه تعدادی نمونه از ترکیب ماسه و پلیمر به روش پاشش بر سطح ماسه در آزمایشگاه شد. سپس نمونه‌ها در درجه حرارت‌های ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد آزمایش شدند. ۲۵ درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین دمای فصول پاییز و زمستان و ۵۰ درجه سانتی‌گراد بیش‌ترین دمای مربوط به فصول بهار و تابستان ماسه‌های بادی منطقه جبل‌کندی است. نتایج نشان داد که برای از دست دادن رطوبت ترکیب ماسه با پلیمر در درجه حرارت ۵۰ درجه سانتی‌گراد حداقل ۲۴ ساعت زمان لازم است. این وضعیت در درجه حرارت ۲۵ درجه سانتی‌گراد تا ۷۲ ساعت اندازه‌گیری شده است.

برای بررسی روند خشک شدن نمونه خاک با محلول باکتری و سیمان‌تاسیون، درون سینی‌های مخصوص، نمونه خاک با چگالی نسبی و تخلخل برجا و محلول باکتری و سیمان‌تاسیون (۵۰٪ محلول باکتری و ۵۰٪ محلول سیمان‌تاسیون) با تخلخل ۰/۵ ریخته شد تا ماسه بادی به حد اشباع برسد. در دو دمای ۲۵ و ۵۰ درجه سانتی‌گراد به نمونه‌ها فرصت خشک شدن داده شد. نمونه‌های مذکور برای از دست دادن رطوبت به ترتیب حدود ۴ و ۲ روز زمان نیاز داشتند. (نظر به این‌که طبق

اکسید آهن نیز حدود ۴٪ است. سایر اکسیدهای دیگر از جمله اکسیدهای سدیم، پتاسیم، منیزیم و منگنز نیز با درصدهای پایین در این ماسه‌ها یافت می‌شود. ماسه‌های بادی روان عمدتاً ریزدانه بوده و قابل حمل به وسیله باد هستند. ترکیب شیمیایی ماسه‌های بادی نشان داد که تقریباً ۶۰٪ ذرات تشکیل‌دهنده ماسه‌های روان منطقه از سیلیس تشکیل شده و حدود ۲۵٪ آنها نیز ترکیبی نسبتاً یکسان از ذرات آلومینا و آهک هستند. دانه‌بندی به روش خشک (طبق استاندارد ASTM D 422) نشان داد خاک منطقه ماسه بدون دانه‌بندی شده (SP) می‌باشد (شکل ۵). از نظر اندازه ذرات، بخش اعظم ذرات در حد ماسه و در حد ناچیز (کمتر از یک درصد) از سیلت و رس تشکیل شده‌اند که بیش از ۹۰٪ ذرات، قطری بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ میلی‌متر دارند. بافت خاک به روش هیدرومتری بیانگر بافت شنی خاک مورد آزمایش بود.

نسبت تخلخل نمونه‌های برجا برابر ۰/۵ و وزن مخصوص طبیعی ۱/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب طبق استاندارد ASTM D 4254 بدست آمد. مطابق با استاندارد ASTM D 854-87 چگالی ویژه ذرات جامد خاک برابر ۲/۷۹ و رطوبت برجا برابر ۲/۱۵٪ طبق استاندارد ASTM D 2216 اندازه‌گیری شد.



شکل ۵. منحنی دانه‌بندی خاک مورد آزمایش

مشخصات شیمیایی خاک

سوسپانسیون آب مقطر و خاک با نسبت یک به یک تهیه و با استفاده از شیکر حدود ۲۰ دقیقه تکان داده شد. مواد نامحلول ته‌نشین شده و قسمتی که بالای بشر به صورت محلول بود، از کاغذ صافی عبور داده و عصاره‌گیری شد و pH، EC و املاح موجود در عصاره خاک تعیین شد. هر چه غلظت یون‌ها در محلول خاک بیشتر باشد، هدایت الکتریکی (EC) آن نیز بیشتر خواهد بود. واحد EC زیمنس و میزان شوری خاک را تعیین خواهد کرد. در این تحقیق مقدار EC خاک مورد آزمایش ۰/۹۲

نمونه‌های شاهد و تثبیت شده درون سینی‌های آزمایش استقرار یافته و در مدت زمان‌های متفاوت در معرض جریان باد با سرعت‌های مختلف قرار داده شدند. کاهش جرم نمونه‌ها پس از شبیه‌سازی جریان باد به عنوان مقدار خاک فرسایش یافته در نظر گرفته شد.

آماده‌سازی نمونه

قبل از شروع آزمایش کنترل فرسایش خاک با دستگاه تونل باد، برای تهیه نمونه‌های تثبیت‌شده خاک با پلیمر SBR ابتدا غلظت بهینه پلیمر (۲۰ گرم بر لیتر برای این پلیمر) تعیین شد و سپس حجم مورد نیاز از این پلیمر با غلظت بهینه بدست آمده در عمق یک سانتی‌متری برای یک مترمربع از خاک مورد آزمایش جهت بهینه تثبیت (۱۰۰ میلی‌لیتر برای خاک مورد آزمایش) بدست آمد. بدست‌آوردن غلظت بهینه و حجم بهینه محلول پلیمر حدود یک ماه زمان بر بود.

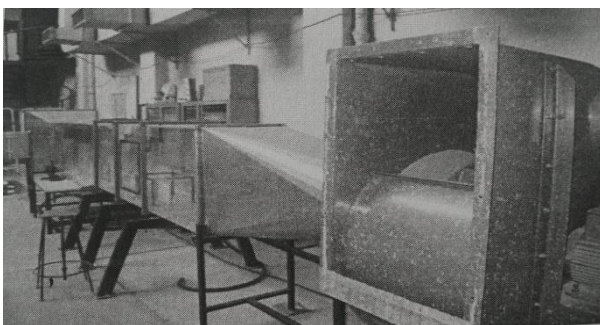
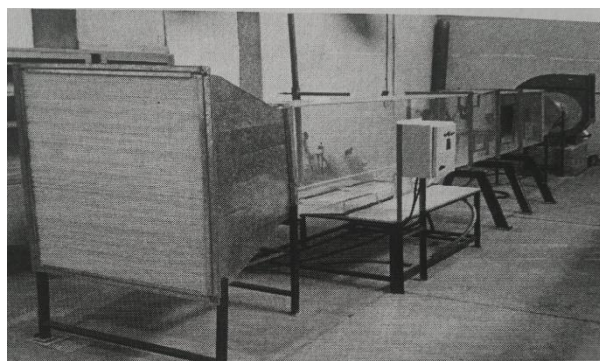
برای تهیه نمونه‌های تثبیت‌شده خاک با میکروارگانسیم حدود ۳ ماه زمان نیاز بود. بعد از تهیه ژن باکتری از مرکز قارچ و باکتری ایران، کشت اولیه در محیط توصیه شده با دستورالعمل‌های مرکز قارچ و باکتری انجام شد. بعد باکتری در محیط صنعتی عصاره خیسانده ذرت، کشت داده شد و چندین بار آزمایش‌ها با داده‌های مختلف تکرار گردید تا باکتری به $OD=1/5-2/5$ برسد. محلول سیمان‌تاسیون (اوری و کلرید کلسیم) بهینه با انجام آزمایش‌های مکرر و سعی و خطا (مقدار و ترکیب مختلف آن‌ها از نظر مولار) بدست آمد (یک مولار اوری و یک مولار کلرید کلسیم).

سرانجام غلظت بهینه میکروارگانسیم (۵۰٪ درصد باکتری و ۵۰٪ محلول سیمان‌تاسیون) با حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر برای هر مترمربع در عمق یک سانتی‌متری به عنوان حجم بهینه مورد نیاز جهت تثبیت خاک بدست آمد. برای تهیه نمونه‌های خاک در سینی‌های مخصوص تونل باد به چگالی تقریبی برابر با g/cm^3 ۱/۵ و تخلخل ۰/۵ و رطوبت اولیه ۲/۵٪ که شرایط برجای خاک مورد آزمایش است، ابتدا خاک مورد آزمایش در اون با دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قرار داده شد تا کاملاً خشک شود، بعد از بیرون آوردن خاک از اون با افزودن آب توسط اسپری رطوبت خاک به ۲/۵٪ رسانده شد، آنگاه با دست داشتن ابعاد سینی آزمایش و بدست آوردن حجم آن و ضرب کردن حجم سینی بدست آمده در چگالی خاک، وزن خاک مورد نیاز برای سینی آزمایش مشخص شد. محلول‌های تثبیت‌کننده به صورت کاملاً یکنواخت و به کمک آبپاش بر روی خاک داخل سینی‌ها پاشیده شد. برای خشک شدن کامل

استاندارد ASTM D 2216 برای خشک‌شدن کامل یک نمونه خاک در دمای ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد ۲۴ ساعت زمان نیاز است بنابراین در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، حدود ۴ روز و در دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد، حدود ۲ روز برای خشک‌شدن نمونه‌ها زمان نیاز بود).

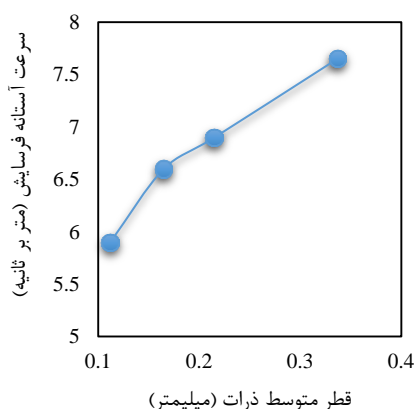
تهیه نمونه و آزمایش فرسایش بادی

برای بررسی اثر پلیمر و باکتری در کنترل فرسایش بادی، از دستگاه تونل باد استفاده شد (شکل ۶). این دستگاه قادر به تولید جریان باد با سرعت در محدوده صفر تا ۱۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری از کف تونل (معادل سرعت صفر تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت در ارتفاع ۱۰ متری) می‌باشد. با توجه به اینکه سرعت باد غالب منطقه حدود ۸۰ تا ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت است بنابراین دستگاه تونل باد مناسب برای شبیه‌سازی شرایط فرسایشی منطقه است. ابعاد سینی آزمایش $2 \times 25 \times 40$ سانتی‌متر است. جنس دیواره تونل باد از پلگسی گلاس و جنس بخش دیفیوژ و سینی آزمایش از ورق آهن گالوانیزه است. طول کل تونل باد $4/5$ متر و طول بخش آزمون $2/5$ متر است و محل قرارگیری نمونه‌ها هم یک متری بخش آزمون در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری از کف تونل است. این تونل باد دارای دو پنجره با ابعاد 30×22 سانتی‌متر و یک پنجره با ابعاد 50×45 سانتی‌متر، فن با توان ۳ kW، یکنواخت‌کننده توزیع هوا، مبدل و محفظه آزمایش است.

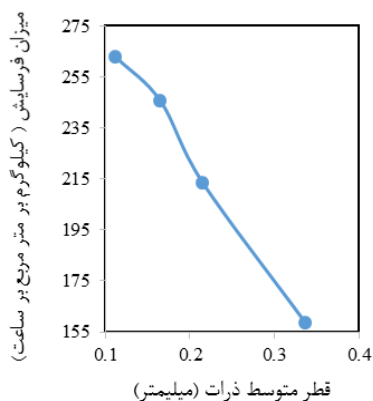


شکل ۶. دستگاه تونل باد استفاده شده در آزمایش (شکل بالا دستگاه تونل باد از نمای ورودی و شکل پایین دستگاه تونل باد از نمای خروجی)

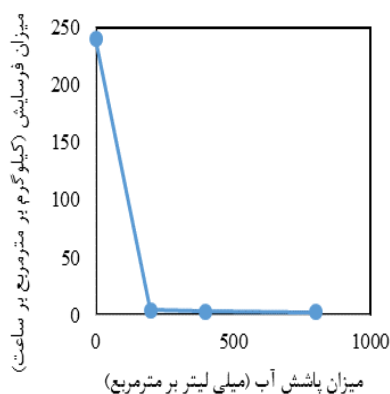
ایجاد چسبندگی بین ذرات، فرسایش بادی را به میزان چشمگیری کاهش می‌دهد. این نتایج با نتایج تحقیقات Diouf *et al.* (1990) سازگار است به طوری که پاشیدن آب روی سطح خاک باعث افزایش رطوبت خاک شده و فرسایش را کنترل می‌کند. با اینکه افزایش رطوبت خاک می‌تواند به عنوان یک روش کنترل فرسایش بادی در نظر گرفته شود، ولی در اقلیم‌های گرم و خشک با میزان تبخیر زیاد، روش پایداری نبوده و از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد (Walker and Costing, 1971).



شکل ۷. تأثیر اندازه ذرات در میزان سرعت آستانه فرسایش بادی



شکل ۸. تأثیر اندازه ذرات در میزان فرسایش بادی



شکل ۹. تأثیر رطوبت در میزان فرسایش بادی

نمونه‌های تثبیت شده، سینی‌های آماده شده با پلیمر و میکروارگانیزم به ترتیب به مدت ۲ و ۴ روز در هوای آزاد خشک شدند.

برای یکسان‌سازی شرایط بستر، بر روی نمونه شاهد نیز آبپاشی با همان حجم انجام شد. محلول پلیمر SBR با غلظت امولسیون ۲۰ گرم در لیتر و به مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر در یک مترمربع در عمق یک سانتی‌متری با اسپری روی نمونه‌های خاک دستگاه تونل باد اسپری شد. محلول میکروارگانیزم هم شامل ۵۰٪ باکتری با (OD=۱/۵-۲/۵) و ۵۰٪ محلول سیمانتاسیون (یک مولار اوره، یک مولار کلرید کلسیم) نیز به مقدار ۱۰۰ میلی‌لیتر در یک مترمربع در عمق یک سانتی‌متری به همان روش پاشش با اسپری روی نمونه‌های خاک انجام شد. تعداد تکرار هر آزمایش ۳ بار بود. آزمایش فرسایش با زمانهای مختلف (۳، ۱۰، ۳۰ روز) روی نمونه‌های خاک انجام شد تا کنترل فرسایش با گذشت زمان نیز بررسی شود و این زمان‌ها به صورت اتفاقی و صرفاً جهت نشان دادن تأثیر ماده تثبیت شده برای کنترل فرسایش خاک با گذشت زمان بود.

اندازه‌گیری مقاومت فروری

برای بررسی اثر پلیمر و میکروارگانیزم روی مقاومت فروری نمونه‌ها از دستگاه میکروپنترومتر طبق استاندارد ASTM D 2573 استفاده شد. این دستگاه شامل یک میله کوچک با نوک مخروطی است که مقدار فشار لازم برای فرورفتن میله در نمونه را ثبت می‌کند. مقاومت فروری نمونه‌ها در سه نقطه از سطح هر نمونه تعیین شد (Ghaffari and zomorrodian, 2017).

نتایج و بحث

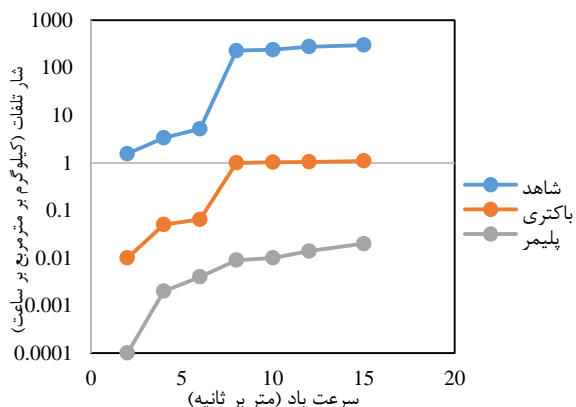
اثر دانه‌بندی بر سرعت آستانه فرسایش بادی (شکل ۷) نشان داد که با افزایش قطر ذرات، سرعت آستانه فرسایش بادی افزایش می‌یابد. با افزایش قطر ذرات و در نتیجه افزایش وزن دانه‌های ماسه، نیروی لازم برای جابه‌جایی ذرات خاک افزایش یافته و ذرات ریزدانه به دلیل سبک بودن در سرعت پایین هم مستعد فرسایش بادی هستند. مطابق شکل (۸)، اثر قطر متوسط ذرات خاک بر میزان فرسایش بادی نشان می‌دهد که با کاهش قطر ذرات و در نتیجه کاهش وزن ذرات، میزان فرسایش بادی افزایش می‌یابد.

(Mahmoud Abadi and Azimzadeh, 2013) نیز نشان دادند که با افزایش اندازه ذرات لایه سطحی و مالچ سنگریزه‌ای می‌توان فرسایش خاک را کاهش داد. از نتایج مربوط به اثر رطوبت بر میزان فرسایش بادی در شکل (۹) مشاهده می‌شود که پاشیدن آب روی نمونه‌ها با نفوذ در فضای خالی بین ذرات و

جدول ۲. نتایج فرسایش بادی نمونه خاک تثبیت نشده و خاک تثبیت شده با آب با توجه به زمان عمل آوری و محلول‌های استفاده شده

آب	بدون تثبیت	محلول تثبیت
۲۴/۱	۲۴۰	فرسایش ۳ روزه
۲۲۸	۲۴۰	فرسایش ۱۰ روزه
۲۴۰	۲۴۰	فرسایش ۳۰ روزه

نتایج مربوط به تغییرات مقدار خاک فرسایش یافته در ۳ نمونه شاهد، تثبیت شده با پلیمر و تثبیت شده با میکروارگانیزم در سرعت‌های مختلف تونل باد در شکل (۱۰) نمایش داده شده است. طبق نتایج بدست آمده، در نمونه‌ها با افزایش سرعت باد مقدار فرسایش خاک به صورت نمایی افزایش می‌یابد، به گونه‌ای که در نمونه شاهد تا سرعت حدود هفت متر بر ثانیه افزایش مقدار تلفات خاک ناچیز است، ولی از سرعت حدود هفت تا ۱۵ متر بر ثانیه، مقدار فرسایش خاک از ۵/۵۱ به ۲۴۰ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت افزایش یافته است که نشان‌دهنده تأثیر سرعت‌های بالا در میزان فرسایش خاک است. همچنین روند افزایش مقدار فرسایش خاک در نمونه تثبیت شده با میکروارگانیزم بسیار کند و در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه برابر ۱/۱ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت و در نمونه تثبیت شده با پلیمر تقریباً صفر است. بنابراین محلول‌های تثبیت‌کننده خاک به خوبی برای کنترل فرسایش خاک به ویژه در سرعت‌های بالای باد مؤثر هستند. نتایج تحقیقات بدست آمده از آزمایش کنترل باد با نتایج تحقیقات بدست آمده از Maleki et al. (2016) کاملاً سازگار است.



شکل ۱۰. مقدار فرسایش خاک در نمونه شاهد و بازسازی شده با باکتری، پلیمر در سرعت‌های مختلف تونل باد (صفر تا ۱۵ متر بر ثانیه)

مقاومت فروری

فرسایش بادی با استفاده از فروسنج برای نمونه‌های شاهد، تثبیت شده با پلیمر و میکروارگانیزم، در شرایط هوای خشک

آزمایش تونل باد روی نمونه شاهد با رطوبت خاک محل انجام شد و با افزایش تدریجی سرعت باد از صفر تا ۱۵ متر بر ثانیه، سرعت آستانه فرسایش بادی تعیین شد. برای اندازه‌گیری فرسایش خاک، سرعت تونل باد روی ۱۵ متر بر ثانیه و به مدت ۵ دقیقه تنظیم شد. با میزان رطوبت ۲/۵٪، سرعت آستانه فرسایش بادی ۶/۷ متر بر ثانیه و میزان فرسایش بادی ۲۴۰ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت بدست آمد. طبق نتایج بدست آمده این خاک به شدت مستعد فرسایش بادی و نیازمند تثبیت است.

در نمونه تثبیت شده با باکتری میزان فرسایش ۱/۱ کیلوگرم بر مترمربع در ساعت و در نمونه تثبیت شده با پلیمر این میزان تقریباً برابر صفر بود. برای بررسی تأثیر محلول‌های استفاده شده و زمان عمل آوری، نمونه خاک جداگانه توسط آب، پلیمر و محلول سیمان‌تاسیون (حاوی اوری و کلرید کلسیم) تثبیت شد. کلرید کلسیم با غلظت ۰/۰۵ مولار به تنهایی باعث تثبیت خاک می‌شود، بنابراین از این محلول هم به صورت جداگانه استفاده شد تا تأثیرش بر خاک مشخص شود.

روش تزریق و مدت زمان عمل آوری برای همه محلول‌ها یکسان بود. اولین آزمایش نمونه‌ها ۳ روز بعد از آخرین تزریق آنها بود. همین نمونه‌ها بعد از ۱۰ و ۳۰ روز دوباره آزمایش شدند. مدت زمان آزمایش ۵ دقیقه بود. طبق نتایج جدول (۱)، نمونه تثبیت شده با پلیمر بهترین تأثیر را در کنترل فرسایش بادی دارد و با گذشت ۳۰ روز همچنان تأثیر خود را حفظ کرده و تقریباً میزان فرسایش بادی در آن برابر صفر بود.

محلول حاوی باکتری با اوری و کلرید کلسیم نیز بعد از پلیمر تأثیر بسیار زیادی در کنترل فرسایش بادی دارد، به گونه‌ای که حدود ۹۹٪ فرسایش بادی را کاهش داده است. محلول سیمان‌تاسیون به تنهایی نمی‌تواند از فرسایش بادی جلوگیری کند. لازم به ذکر است که نمونه تثبیت نشده، تحت آزمایش فرسایش ۳، ۱۰ و ۳۰ روزه همان مقدار ۲۴۰ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت را نشان داد. نتایج در جدول (۱) آمده است. همچنین آزمایش روی نمونه تثبیت نشده و نمونه تثبیت شده با آب انجام شد و نتایج در جدول (۲) بیان شده است.

جدول ۱. نتایج فرسایش بادی نمونه خاک با توجه به زمان عمل آوری و محلول‌های استفاده شده

محلول تثبیت	پلیمر	کلرید کلسیم	باکتری+ اوری و کلرید کلسیم
فرسایش ۳ روزه	۰	۲/۲۵	۱/۱
فرسایش ۱۰ روزه	۰	۸/۷۵	۱/۳
فرسایش ۳۰ روزه	۰/۰۱	۱۳۶/۸	۱/۹

فروروی را نیز افزایش می‌دهد.

پس از خشک شدن ماسه بادی پلیمری، یک سطح کاملاً صاف بر روی خاک تشکیل می‌شود که به راحتی دچار گسیختگی نمی‌شود. مکانیسم کنترل فرسایش و گرد و غبار توسط پلیمر به صورت افزایش پایداری خاکدانه‌ها در حالت خشک و اتصال خاکدانه‌های سطحی از طریق تشکیل ضخامت سطحی است که به دلیل اتصال مناسب به یکدیگر و بزرگ شدن، در برابر فرسایش بادی مقاوم و از تولید گرد و غبار جلوگیری می‌کند.

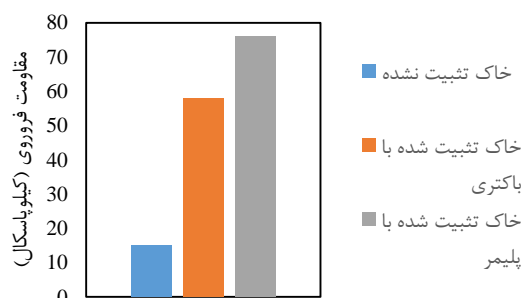
مقاومت خاک به ویژه در خاک‌های ماسه‌ای اغلب بوسیله جرم مخصوص ظاهری و مقدار آب تخمین زده می‌شود (Dexter, 1988). مقاومت خاک با کاهش وزن مخصوص ظاهری و افزایش مقدار آب، کاهش می‌یابد (Horn and Baumgartl, 2002).

مقدار مالچ لازم در واحد سطح بر اساس عواملی از قبیل خصوصیات زمین، میزان بارندگی، جهت و سرعت باد، نحوه اجرای پروژه و غیره مشخص می‌شود (Refahi, 2013). Yamanaka et al. (2004) نشان دادند که مقاومت مالچ به فرسایش بادی با افزایش ضخامت لایه مالچ به صورت نمایی افزایش می‌یابد.

Van Pelt and Zobeck (2004) دریافتند که ۲ گرم بر مترمربع پلی‌آکریل‌آمید برای سطح خاک‌های لوم شنی و لوم، فرسایش بادی را به صورت مؤثر و اقتصادی کنترل می‌کند. طبق تحقیق Movahedan et al. (2012) افزودن ماده‌ی پلیمری پلی وینیل استات به میزان ۲۵ گرم در مترمربع در شرایط آزمایشگاهی، با توسعه‌ی ارتباط بین ذرات و تشکیل یک لایه‌ی سطحی بر روی خاک، میزان فرسایش در برابر باد همراه با ذرات را کاهش داده است. (Dong et al., 2008). برای تثبیت سطحی ماسه، ماده‌ی به دست آمده از خمیر کاغذ و پلیمری شده با اسید آکرلیک و فرمالدئید را استفاده کردند.

با توجه به اینکه در تحقیقات گذشته از دامنه سرعت‌های مختلفی برای بررسی فرسایش بادی استفاده شده و همچنین ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک و نیز نوع مالچ مورد استفاده متفاوت بوده است، مقایسه کلی بین تثبیت‌کننده‌ها از لحاظ فنی و اقتصادی براحتی امکان‌پذیر نخواهد بود؛ ولی با توجه به بررسی منابع، هر دو ماده مورد استفاده در این تحقیق (روش باکتری و روش پلیمر) از جنبه زیست‌محیطی و نیز ترسیب بعد از تزریق در خاک برای کاربرد در مقیاس بزرگ و عملی آسان‌تر هستند. در حالی که مالچ‌های استفاده شده در تحقیقات گذشته در مقیاس بزرگ نیاز به تجهیزات پیشرفته داشته و از جنبه محیط‌زیست نیز مشکل‌آفرین هستند.

در یک سانتی‌متری لایه سطحی از نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که نتایج آن در شکل (۱۱) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده از تثبیت‌کننده‌ها به طور چشمگیری مقدار مقاومت فروروی نمونه ماسه بادی را افزایش داده و مقدار متوسط مقاومت فروروی در نمونه‌های تثبیت شده با میکروارگانیزم و پلیمر به ترتیب برابر با ۵۸ و ۷۶ کیلوپاسکال است در حالی که مقاومت فروروی نمونه شاهد ۱۵ کیلوپاسکال می‌باشد. این امر نشان دهنده افزایش بیش از ۳ برابری مقاومت فروروی نمونه خاک در اثر استفاده از میکروارگانیزم و افزایش بیش از ۵ برابری در اثر تثبیت با پلیمر است. افزایش مقاومت فروروی در نمونه تثبیت شده با میکروارگانیزم به دلیل تشکیل رسوب کربنات کلسیم در بین حفرات خاک است که باعث ایجاد لایه سخت در یک سانتی‌متری سطح نمونه‌ها شده است.



شکل ۱۱. مقایسه مقاومت فروروی نمونه‌های شاهد و بازسازی شده با باکتری و پلیمر

مطابق تحقیقات Charman and Murphy (2000) کاتیون کلسیم در بهم‌آوری کلونیدهای خاک و کاهش فرسایش‌پذیری نقش بسزایی دارد. (Mohammadi et al., 2011) مشاهده کرد که در خاک‌های ماسه‌ای، کلرید کلسیم مؤثرتر از امولسیون پلیمری پلی وینیل استات است.

Goudie and Middleton (2006) سمیت کلریدها را اندازه‌گیری کرد و دریافت که اگر کلریدها در اندازه‌ی معمول بکارگرفته شوند، تهدیدی برای محیط زیست نخواهند بود.

پلیمر استفاده شده با ساختار چند شبکه‌ای، در ترکیب با آب باعث فعال شدن واکنش‌های الکترواستاتیک درون شبکه‌ای شده و در مجاورت با ذرات ماسه مثل یک چسب آلی آنها را به یکدیگر چسباندنده است. با از دست دادن آب از درون شبکه‌ها امکان چسبندگی ذرات ماسه به یکدیگر زیادتر شده و واکنش تکمیل می‌شود. بدلیل ساختار بیوپلیمری شبکه، این پلیمر به مرور زمان تجزیه شده و به طبیعت نیز باز می‌گردد. این نتایج نشان می‌دهد که تثبیت خاک با محلول‌های استفاده شده در سطح خاک علاوه بر اینکه مقاومت آنرا در برابر تنش برشی جریان باد افزایش می‌دهد، مقاومت خاک در مقابل نیروی

استفاده شد. اگر از این محیط صنعتی برای کشت باکتری در حجم‌های مورد نیاز برای آزمایش‌ها استفاده نمی‌کردیم، هزینه هر هکتار تثبیت خاک با روش باکتری ۲۵۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال می‌شد که با استفاده از این محیط صنعتی به ۱۵۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال کاهش یافت. روش استفاده از پلیمر نیز به راحتی و با هزینه کمتر از باکتری (۱۰۰/۰۰۰/۰۰۰ ریال برای هر هکتار) در مقیاس صنعتی قابل اجرا است. در تحقیقات آتی استفاده از روش باکتری با محیط کشت‌های صنعتی دیگر نیز پیشنهاد می‌شود. در زمینه پلیمر نیز استفاده از سایر پلیمرهای دوستدار محیط زیست نیز می‌تواند در این زمینه کارساز باشد و با تولید انبوه گامی بلند در زمینه تثبیت ریزگردهای کشور برداشته شود. به منظور بهینه نمودن شرایط اجرایی، آزمایش‌های بیشتر باید در مقیاس صحرائی نیز انجام شود و میزان مواد مورد استفاده در شرایط طبیعی با لحاظ نمودن پارامترهای مهم، نظیر پلاستیسیته، سمیت، دما، رطوبت، جهت و میزان سرعت باد تعیین شود. همچنین اثرات زیست محیطی کاربرد این مالچ‌ها نیز باید مورد بررسی قرار گیرد.

REFERENCES

- Abbasi, N., Moohannand, M. and Karamety, M. (2011). Investigating the Effect of Chemical Polymers on Physical and Mechanical Properties of Soils. *Journal of Agricultural Engineering*, 4, 64-75. (In Farsi)
- Afyuni, M., Mojtabapour, R. and Nourbakhsh, F. (1997) *Salty and Sodium soils*. Arkan: Publications. (In Farsi)
- Armbrust, D. and Dickerson, J. (1971). Temporary wind erosion control: cost and effectiveness of 34 commercial materials. *Journal of soil and water conservation*, 26, 154-157.
- Azizi, G., Safarrad, T., Mohammadi, H., Faraji Sabokbar, H. (2016). Evaluation and Comparison of Reanalysis Precipitation Data in Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 48(1): 33-49. (In Farsi)
- Babakhani, S. and Karim Zadeh, H. (2013) *Application of steel slag in stabilizing erosive soils. (Case study, Harand area)*. Desert Management Magazine. (In Farsi)
- Bagnold, R. A. (1941) *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen. pp. 265. (In Farsi)
- Bang, S. and Min, S. (2011). Application of Microbiologically Induced Soil Stabilization Technique for Dust Suppression. *International Journal of Geo-Engineering*, 3, 27-37.
- Charman, P.E.V. and Murphy, B.W. (2000). Soils, Their properties and management. *Journal of Land and Water Conservation*, 3, 206-212.
- Dehkordi, M. and Huh Abu Nasr, P. (2015). Investigation of Factors Affecting the Effects on Its Effects and Environmental Effects. In: *Proceeding of 10th National Conference on Biology and Environmental Sciences in Agriculture*, 15-17 Oct., Scientific and Applied Center, Gorgan, Iran, pp.358-365. (In Farsi)
- Dexter, A.R. (1988). Advances in characterization of soil structure. *Journal of Soil Till. Res*, 11, 199-238.
- Diouf, B., Skidmore, E., Layton, J. and Hagen, L. (1990). Stabilizing fine sand by adding clay: laboratory wind tunnel study. *Soil technology*, 3, 21-31.
- Dong, Z., Wang, L. and Zhao, S. (2008). A potential compound for sand fixation synthesized from the effluent of pulp and paper mills. *Journal of Arid Environments*, 72(7), 1388-1393.
- Duan, Z., Liu, J., Tuo, Y., Chiogna, G., and Disse, M. (2016). Evaluation of eight high spatial resolution gridded precipitation products in Adige Basin (Italy) at multiple temporal and spatial scales. *Science of The Total Environment*. In Press.
- Fryrear, D. W. and Skidmore, E. (1985). *Methods for controlling wind erosion*. In R. F. Follett and B. A. Stewart (Eds.) *Soil Erosion and Crop Productivity* (pp.443-57). Madison: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America.
- Ghaffari, H., Zomorrodian, M. (2017). Evaluation of shear strength of soil stabilized by microbiology. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(4), 737-748. (In Farsi)
- Goodrich, B.A., Koski, R.D. and Jacobi, W. R. (2009). Monitoring surface water chemistry near magnesium chloride dust suppressant treated roads in Colorado. *Journal of Environmental Quality*, 38, 2373-2381.
- Goudie, A.S. and Middleton, N.J. (2006). Dust Storm Control. In A. Goudie and N. J. Middleton (ed.),

نتیجه‌گیری کلی

در این تحقیق تثبیت ریزگردهای منطقه جبل کندی با استفاده از دو ماده دوستدار محیط زیست، باکتری باسیلوس پاسته اوری و پلیمر رزین مایع SBR بررسی شد. برای شبیه‌سازی فرسایش خاک از دستگاه تونل باد با دامنه سرعت صفر تا ۱۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۵ سانتی‌متری از کف تونل استفاده شده است. طبق نتایج بدست آمده، در سرعت ۱۵ متر بر ثانیه، مقدار فرسایش خاک در نمونه شاهد ۲۴۰ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت، در نمونه تثبیت شده با میکروارگانسیم ۱/۱ کیلوگرم بر مترمربع بر ساعت و در نمونه تثبیت شده با پلیمر تقریباً صفر است. در بررسی مقاومت سطحی نمونه‌های خاک تثبیت شده با آزمایش مقاومت فروروی، افزایش بیش از ۳ برابری مقاومت فروروی نمونه خاک در اثر استفاده از میکروارگانسیم و افزایش بیش از ۵ برابری در اثر تثبیت با پلیمر بدست آمد. کاهش فرسایش خاک در هر دو ماده استفاده شده تقریباً برابر ۱۰۰٪ بدست آمد. در این مقاله برای کشت باکتری، از محیط کشت عصاره ذرت خیسانده شده و تهیه شده از کارخانه عصاره‌گیری ذرت در شهرک صنعتی قزوین که به صورت رایگان تهیه شده است،

- Desert Dust in the Global System* (Chapter 8). (pp. 193-199). Springer Science & Business Media.
- Hazirei, F. and Zare Ernani, M. (2013). Investigation of Effect of Clay-Lime Mulch for Sand Dunes Fixation. *Journal of Water and Soil*, 27, 373-380. (In Farsi)
- Heydari, M. and Ahmadi, J. (2010). Effect of pebble mulch and its roughness on wind erosion in wind erosion measuring instrument. In: *Proceeding of 7th national conference on erosion and dust storm*, 13-15 Dec., Yazd University, Yazd, Iran, pp. 265-282. (In Farsi)
- Horn, R. and Baumgartl, T. (2002) *Dynamic properties of soils*. In: *Soil Physics Companion*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
- HoseiniMughari, M., Araginezhad, Sh., Ebrahimi, Q. (2017). Study of the accuracy of global networked rainfall data in Urmia Lake basin. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 48(3), 587-598. (In Farsi)
- Jamilli, T. (2013). *Preparation of environmentally friendly mulch from sugarcane waste for stabilization of Ahvaz sand*. M. Sc. Dissertation, University of Khoozestan, Agricultural and Natural Resources. (In Farsi)
- Josheph, P.V., Raipal, D.K. and Deka, S.N. (1980). *Journal of the convective dust storms of Northwest India*, 31, 431-442.
- Kokabinejad, A.H. and Panahi, S. (2013). Environmental impacts of groundwater subsidence in the Urmia plain and its relationship with Lake Urmia. *Geosciences*. In: *Proceeding of 1th InterNational Congress of Earth Sciences*, 27-30 Oct., Urmia, Iran, pp.56-85. (In Farsi)
- Kurdovani, P. (2001) *Drought and ways of coping with it in Iran*, Tehran University: Press. (In Farsi)
- Lyles, L., Schrandt, R. and Schmeidler, N. (1974). Commercial soil stabilizers for temporary wind-erosion control. *Trans. ASAE*, 17, 1015-1019.
- Mahmoud Abadi, M. and Azimzadeh, h. (2013). Study of the effect of soil particle size distribution on the severity of wind erosion. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*. 1(1), 81-92. (In Farsi)
- Majdi, H., Karimian-Eghbal, M., Karimzadeh, H. and Jalalian, A. (2006). Effect of Different Clay Mulches on the Amount of Wind Eroded Materials. *JWSS-Isfahan University of Technology*, 10, 137-149. (In Farsi)
- Maleki Kaklar, M., Ebrahimi, S., Asadzadeh, F. and Emami Tabrizi, M. (2016). Evaluation of the Efficiency of Carbonate Microbial Sediment for Stabilizing Sands. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 47(2), 407-415. (In Farsi)
- Matlabi, A. (2013) Reasons for salt accumulation in soil and emergence of saline soils in Iran. *Journal of Salt*, 1(2), 75-86. (In Farsi)
- Mohammadi, M., Abbasi, N. and Keramati, M. (2011). Investigation of the effect of polyvinyl acetate on the control of soil erosion. *Journal of Water and Soil (Agriculture Sciences and Technology)*, 25 (3), 113-126. (In Farsi)
- Movahedan, M., Abbasi, N. and Keramati, M. (2012) Wind erosion control of soils using polymeric materials. *Eurasian Journal of Soil Science*, 1 (2), 81 –86. (In Farsi)
- Rashinho, A. (2009) *Dust phenomenon in Khuzestan province, Quarterly of rainfall*, The internal publication of the Meteorological Administration of Khuzestan province. (In Farsi)
- Refahi, H. (2013). *Wind erosion and control*. (6th ed.). Tehran University: Press. (In Farsi)
- Rezaei, S.A. (2012). Comparison of the Effect of Polythene Polymer and Oil Mulch on Seed Germination and Plant Establishment for Biological Stabilization of Sandy Hills. *Journal of Iranian Derby and Desert Research*, 16 (1), 136-124. (In Farsi)
- Samaee, H.R., Golchin, A. and Mossadeghi, M.R. (2007). Pollution control due to wind erosion by water-soluble polymers. In: *Proceeding of 4th National conference on soil and environment and sustainable development*, 15-17 Dec., Yazd University, Yazd, Iran, pp. 260-272. (In Farsi)
- Santoni, R.L., Tingle, J.S. and Webster, S.L. (2003). "Stabilization of silty sand with non traditional additives". *Transportation Research Record*, 1787, TRB, National Research Council, Washington D. C., pp. 61-70.
- Shafabakhsh, Gh. and Ebrahimi, P. (2008) *Guidelines for fixing the dams and pavement layers*. (6th ed.). Research Institute of Transportation. (In Farsi)
- Shahsavani, M. (2010). Effects on dust storms on the health an environment. *Journal of science and medicine university of north Khorasan*, 4(2), 45- 56. (In Farsi)
- Vaezi, A. (2011). Application of oil mulch in controlling wind erosion and stabilization of flowing sand. In: *Proceeding of 8th national conference on wind erosion and dust storms*, 12-14 Oct., Yazd University, Yazd, Iran, pp.234-242. (In Farsi)
- Van Pelt, R., and Zobeck, T. (2004). Effects of Polyacrylamide, Cover Crops, and Crop Residue Management on Wind Erosion. In proceedings of *13th International Soil Conservation Organisation Conference (ISCO)*, July 2004. Brisbane, Australia, pp. 1-4.
- Walker, P. and costing, A. (1971). Atmospheric dust accession in south – eastern Australia. *Dust soil Res*, 9, 1-5.
- Whiffin, V.S., van Paassen, L.A. and Harkes, M.P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. *Journal of Geomicrobiology*, 24, 417-423.
- Yamanaka, T., Inoue, M. and Kaihotsu, I. (2004). Effect of gravel mulch on water vapo transfer above and below the soil surface. *Journal of Agricultural Water Manage*, 67, 145-155.
- Yanli, X. (2003). Gravel- sand mulch for soil and water conservation in the semiarid loess region of northwest China. *Journal of Catena*, 52(2), 105-107.