

## ارزیابی عوامل مؤثر بر تثبیت خاک‌های ریزدانه در برابر باد به منظور جلوگیری از پیدایش ریزگردها

عطا جعفری شالکوهی<sup>۱\*</sup>، محمود وفائیان<sup>۲</sup>، محمدعلی روشن ضمیر<sup>۲</sup> و مسعود میرمحمد صادقی<sup>۳</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۰/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۵/۳)

### چکیده

فرسایش بادی و معضلات مربوط به آن، هر ساله خسارات سنگینی به بخش‌های محیط زیستی، اجتماعی و سلامت جامعه وارد می‌کند. در ایران نیز به دلیل وسعت مناطق خشک و گرد و غبارهایی که هر ساله بخش وسیعی از کشور را تحت پوشش قرار می‌دهند، مقابله و هدایت بهینه این پدیده حائز اهمیت می‌باشد. در این پژوهش عوامل تأثیرگذار بر فرسایش بادی از جمله اثر اندازه ذرات، نوع مواد پلیمر، ارتفاع ریزش مواد و اثر زمان بر روی تثبیت ذرات خاک در برابر فرسایش پذیری و میزان عمق نفوذ محلول‌های پلیمری مورد ارزیابی قرار گرفت. آزمون‌ها به صورت آزمایشگاهی و با استفاده از دستگاه تونل باد مدارباز تحت سرعت باد حدود ۴۰ کیلومتر بر ساعت انجام شد. همچنین پدیده فرسایش موضعی و عمومی بر روی سطح خاک مرتبط با اندازه ذرات خاک و یک‌نواختی سطح پوشش نمونه‌ها بررسی شد. نتایج نشان داد که با افزایش ارتفاع ریزش محلول‌های پلیمری به دلیل افزایش میزان عمق نفوذ در خاک، میزان فرسایش پذیری خاک کاهش یافت و با گذشت زمان اثر تثبیت‌کنندگی این محلول‌ها بر روی خاک‌های درشت دانه‌تر بیشتر از خاک‌های ریزدانه بود. در این تحقیق، نتایج آزمایشگاهی با برخی از روابط تئوری ارائه شده در این زمینه مقایسه گردید، که تطابق مناسبی با نتایج آزمون‌های صورت گرفته در آزمایشگاه نشان داد.

واژه‌های کلیدی: فرسایش بادی، تونل باد مدارباز، ریزگردها، محلول‌های پلیمری

۱. گروه مهندسی عمران، واحد بندرانزلی، دانشگاه آزاد اسلامی

۲. گروه مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

۳. گروه مهندسی عمران، دانشگاه آموزشی و پژوهشی صنعت آب و برق اصفهان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: ata.jafary@gmail.com

## مقدمه

بیش از یک چهارم از خشکی‌های جهان تحت تأثیر بیابان‌زایی می‌باشند. این مسئله بعد از دو چالش مهم تغییر اقلیم و کمبود آب به‌عنوان سومین چالش مهم جهان در قرن ۲۱ محسوب می‌شود (۱۰). در ایران حدود ۱۰۰ میلیون هکتار از اراضی در معرض پدیده بیابان‌زایی قرار دارند که از این مساحت ۷۵ میلیون هکتار در معرض فرسایش آبی، ۲۰ میلیون هکتار در معرض فرسایش بادی و ۵ میلیون هکتار در معرض سایر عوامل تخریب سرزمین مانند شوری و آلودگی می‌باشند (۹). نتایج حاصل از فرسایش بادی، تشکیل نهشته‌های بادی اعم از تپه‌های ماسه‌ای و رسوبات لسی، تشکیل حفره در زمین، تسطیح سطح زمین، رسوب مواد، از بین رفتن خاک، تغییر بافت خاک، از بین رفتن مواد غذایی و کاهش قدرت تولیدی خاک، خسارت به گیاهان، تشدید زمین لغزه و آلودگی هوا می‌باشد (۵).

روش‌های گوناگون و متنوعی برای تثبیت خاک‌های بادرفتی، شامل روش‌های تثبیت زیستی (۲)، روش‌های تثبیت فیزیکی و مکانیکی (۱۲)، روش‌های تثبیت شیمیایی (۸ و ۱۰) و روش‌های نوین با مصالح مدرن (۴ و ۱۴) وجود دارد. هدف اصلی در این روش‌ها، تثبیت خاک جهت کنترل فرسایش بادی، دستیابی به مواد افزودنی است که بتواند بر روی خاک، قشر یکنواخت به‌هم چسبیده‌ای را به‌وجود آورد که مقاوم به باد و باران باشد، دوام بیشتری داشته باشد، برای افرادی که با آن سرو کار دارند مضر نباشد، اثر سوء روی محصولات کشاورزی نداشته و مواد غذایی خاک را کاهش ندهد (۸). مالچ‌های نفتی در کنار اثرات سودمند از نظر تثبیت ماسه‌های روان، دارای اثرات زیان‌باری مانند ضریب جذب حرارتی بالا، آلودگی محیط زیست، مشکلات در رشد و نمو گیاهان و تهدید برای سفره‌های آب زیرزمینی و برای سلامتی انسان و جانوران را خواهد داشت (۱۰).

در سال‌های اخیر استفاده از مواد پلیمری مصنوعی، به‌منظور افزایش پایداری، اندازه خاک دانه‌ها و تثبیت خاک مورد توجه جدی قرار گرفته است. یکی از ویژگی‌های بارز پلیمرها این

است که باعث اتصال ذرات به یکدیگر شده و خاکدانه‌های درشت‌تری را ایجاد می‌نماید که در واقع باعث افزایش پایداری خاکدانه‌ها می‌گردد (۸). نتایج تحقیق موحدان و همکاران (۸) بر روی تأثیر ماده پلیمری با پایه پلی‌وینیل‌استات (Polyvinyl Acetate) بر میزان فرسایش بادی خاک‌ها، نشان داد که ماده پلیمری مورد نظر با تشکیل یک لایه نسبتاً سخت که ماهیتاً با لایه تشکیل شده با آب در سطح متفاوت است، به‌خوبی می‌تواند فرسایش بادی با سرعت ۲۶ متر بر ثانیه را کاهش دهد. همچنین نتایج پژوهش‌های سمائی و همکاران (۶) مرتبط با بررسی تأثیر پلیمر محلول در آب از گروه اکریلیک نشان می‌دهد، اضافه شدن پلیمرها سبب پایداری خاکدانه‌ها و افزایش میانگین وزنی قطر آنها در حالت خشک می‌گردد. کینت و نوانکو (۱۶) نیز در مطالعات خود تشکیل خاکدانه‌های بزرگتر از خاکدانه‌های کوچک را به‌وسیله اثر مولکول‌های پلیمر تأیید نموده‌اند. کاربرد پلیمرهای آلی جهت تثبیت و افزایش پارامترهای مقاومتی خاک نیز بیش از پیش مورد توجه پژوهشگران می‌باشد. بارزی و همکاران (۳) تأثیر پلیمر پلی‌وینیل‌اکریلیک (Polyvinyl Acrylic) را بر رفتار خاک‌ها مورد ارزیابی قرار داده و نشان دادند نمونه‌های تثبیت شده ۸۰ درصد مقاومت خود را در ۷ روز اول و ۹۰ درصد مقاومت خود را در ۱۴ روز نخست به‌دست آورده و با افزایش زمان، میزان مقاومت افزایش یافت. تأثیر پلیمرهای مختلف اوره-فرمالدئید (Urea-formaldehyde) (۱۱)، اوره-فرمالدئید (Urea-phenol-formaldehyde) (۱۹)، اوره-فرمالدئید (Urea-furfural-formaldehyde) (۱۸)، پلی‌وینیل‌الکل (Polyvinyl alcohol) (۲۰) و پلی‌وینیل‌استات (Polyvinyl acetate) (۲۲) بر روی مقاومت‌های فشاری نمونه‌های خاک تثبیت شده مورد بررسی قرار گرفته است.

این ترکیبات می‌توانند جهت افزایش مقاومت ماسه‌های بادرفتی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین این ترکیبات شبیه مصالح تزریقی که تمایل به ژله‌ای شدن و یا همانند تثبیت

جدول ۱. پارامترهای اندازه‌گیری شده خاک

نوع خاک	حد روانی (LL)	حد خمیری (PL)	چگالی خشک (گرم بر سانتی‌مترمکعب)
CL	۴۳	۲۳	۱/۶۱

کننده‌های پایه قیری که برای رشد گیاهان مضر هستند، نمی‌باشند. از فواید مهم این ترکیبات، بهبود استحکام و مقاومت خاک، جلوگیری از فرسایش بوده و از آن‌جا که شامل برخی مواد غذایی هستند، حتی ممکن است برای رشد گیاهان نیز مفید باشند (۲۱). در این پژوهش تأثیر پلیمر سلولزی با غلظت‌های مختلف بر روی خاک‌ها با دانه‌بندی‌های مشخص مورد ارزیابی قرار گرفته و اثر ارتفاع ریزش مواد، غلظت محلول پلیمری، اندازه دانه‌ها بر روی میزان فرسایش‌پذیری خاک‌ها و همچنین میزان عمق نفوذ محلول‌ها بررسی شد.

### مواد و روش‌ها

خاک مورد استفاده از نوع خاک ریزدانه بوده که به مقدار مورد نیاز از منطقه سیاهکل استان گیلان برداشت شد. پس از انتقال خاک به آزمایشگاه، آزمایش‌های دانه‌بندی به روش الک و هیدرومتری، حدود اتربرگ و چگالی به روش موم‌گیری انجام پذیرفت. طبق آزمایش‌های انجام شده و براساس طبقه‌بندی متحد، خاک از نوع رس با حد خمیری پایین (CL) می‌باشد. نتایج دیگر آزمایش‌های انجام‌شده در جدول ۱ خلاصه شده است.

به منظور انجام مطالعات در خصوص بررسی رفتار و تعیین نحوه‌ی اثرات عوامل مختلف تأثیرگذار بر خاک‌های باد رفتی دستگاه تونل بادمدار باز در محل آزمایشگاه نصب و راه‌اندازی شد. این تونل مشابه با تونل باد ساخته شده توسط اختصاصی (۱) و موحدان (۸) با انجام اصلاحاتی طراحی و ساخته شد. دستگاه از چهار جزء اصلی تشکیل شده است. بخش نخست شامل موتور تولید باد تک فاز با مشخصات ۲۸۰۰ دور در دقیقه، جریان ۱۸ آمپر، توان ۳ کیلووات، قطر پروانه ۳۵ سانتی‌متر می‌باشد. با توجه به قابلیت چرخش موتور در دو جهت سیستم

می‌تواند به صورت حالت مکش و حالت هوادهی عمل نماید. با آزمایش‌های صورت گرفته و تعیین سرعت باد توسط بادسنج دستی تهیه شده، سرعت باد در حالت مکش بر روی ظرف نمونه داخل تونل حدود ۱۰ کیلومتر بر ساعت از حالت هوادهی فن بیشتر می‌باشد. البته این حالت امکان استفاده از چندین سرعت باد جهت انجام تست‌های مورد نظر را فراهم می‌کند. بادسنج تهیه شده با مشخصات بیشینه سرعت ۹۰ کیلومتر بر ساعت، ابعاد ۱۸۰×۷۲×۳۲ میلی‌متر می‌باشد. بیشینه سرعت اندازه‌گیری شده بر روی ظرف نمونه و ماس با جداره پایین تونل باد حدود ۳۸ تا ۴۲ کیلومتر بر ساعت بود. تغییرات سرعت و فشار باد در دستگاه تونل باد مدار باز، توسط نرم‌افزار FLUENT مدل‌سازی و تحلیل و نتایج آن در بخش نتایج و بحث آورده شده است. سکوی نشمین دستگاه به گونه‌ای تنظیم شد که محور چرخش پروانه موتور در مرکز جعبه تونل باد قرار گیرد. پروانه مورد استفاده از جنس چدن و مقاوم در برابر ضربه ذرات خاک مورد آزمایش و با پره‌هایی با جهت ۴۵ درجه نسبت به راستای محور چرخش طراحی و ساخته شد. همچنین در دستگاه تونل باد از فن لوله محوری استفاده شد. بخش دوم شامل دهانه ورودی دستگاه تونل باد با مقطع اولیه دایروی و مقطع ثانویه مربعی شکل جهت اتصال به قطعات دیگر می‌باشد. سطح مقطع ورودی با قطر ۴۵ سانتی‌متر حدود ۱۵۹۰ سانتی‌مترمربع و سطح مقطع خروجی با ابعاد ۳۰ در ۳۰ سانتی‌متر حدود ۹۰۰ سانتی‌مترمربع می‌باشد. جنس قطعات مختلف تونل باد آهن گالوانیزه است که توسط بوشن‌های مخصوصی به یکدیگر متصل می‌شوند. قسمت سوم شامل جعبه مکعب مستطیلی به ابعاد ۱ در ۰/۳ در ۰/۳ متر با سه محفظه جهت تصویربرداری و اندازه‌گیری مشخصات مورد نیاز در نمونه می‌باشد. این بخش شامل محفظه و یا سینی نمونه به ابعاد



شکل ۱. بخش‌های مختلف دستگاه تونل باد ساخته شده

طبقه‌بندی و مقاومتی جهت شناخت نوع و خواص آن، در سه رده به صورت مابین ال‌ک ۸ و ۳۰، مابین ال‌ک ۳۰ و ۵۰ و همچنین رد شده از ال‌ک ۵۰ طبقه‌بندی گردید. جهت انجام تست‌ها، خاک‌ها در هر رده درون سینی‌های مخصوص ریخته شد (شکل ۲). جهت بررسی نوع مواد افزودنی، آزمایش‌ها در سه حالت خشک، با پوشش آب و با پوشش محلول پلیمری انجام پذیرفت. نحوه ریزش آب و محلول‌های پلیمری توسط اسپری و هم به صورت وزنی و سقوط آزاد توسط آبپاش‌های مخصوص می‌باشد. غلظت محلول‌ها در محدوده‌های مختلف ۲۰ و ۵۰ گرم در لیتر و ارتفاع ریزش مواد در حالت‌های ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ متری از سطح نمونه پاشیده شدند.

زمان انجام تست‌ها نیز در دو حالت پس از خشک‌شدن در همان روز و همچنین پس از گذشت حدود ۱۵ روز از زمان پاشش محلول می‌باشد. مقدار پاشش محلول پلیمری برای هر مترمربع نمونه، ۱ لیتر در نظر گرفته شد. در نتیجه برای ابعاد سینی تونل باد (۰/۲ در ۰/۳ متر) مقدار محلول جهت ریزش به مقدار ۶۰ میلی‌لیتر بود. عمق نفوذ محلول‌ها در هر رده خاک پس از پاشش بر روی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. همچنین جهت بررسی میزان فرسایش بادی نمونه‌های تهیه شده پیش از قرارگیری داخل دستگاه تونل باد و همچنین پس از اعمال باد توسط ترازوهای دیجیتال توزین شدند.

۰/۳ در ۰/۴ متری می‌باشد که حدوداً در ناحیه مرکزی آن قرار گرفته است. قسمت نهایی (چهارم) دستگاه شامل مقطع شیپوری جهت انتقال هوا به داخل دستگاه می‌باشد. سطح مقطع اولیه آن ۳۰×۳۰ سانتی‌متر مربع و سطح مقطع بیرونی آن حدود ۴۰×۴۰ سانتی‌متر مربع می‌باشد. نمایی از بخش‌های مختلف دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است.

پلیمر امولسیون سلولوزی مورد استفاده، ترکیبی از دو نوع کربوهیدرات به نام آمیلوز و آمیلوپکتین بود. تکپارهای این چندقندی‌ها واحدهای گلوکز هستند که به روش سر به دم به یکدیگر وصل شده و تشکیل پیوندهای آلفا ۱ و ۴ را می‌دهند. مطالعات جهت بررسی پارامترهای تأثیرگذار در تثبیت خاک‌های بادرفتی با انجام آزمایش‌های متعدد مطابق جدول ۲ انجام یافت. آزمایش‌ها در سری‌های مختلف جهت بررسی پارامترهای مشخصی ترتیب داده شد. همچنین برخی از آزمایشات جهت بررسی دقیق‌تر در چندین تکرار به صورت نمونه‌های شاهد انجام یافت.

در مجموع ۲۱ سری آزمایش با هر بار تغییرات جهت تعیین اثرات اندازه ذرات، نوع مواد افزودنی، نحوه ریزش و میزان غلظت مواد افزودنی، ارتفاع ریزش مواد و زمان انجام آزمایش بر روی میزان فرسایش خاک‌ها و همچنین میزان عمق نفوذ مواد افزودنی بررسی گردید. تمامی آزمایش‌ها بر روی سینی‌های مخصوص تهیه شده به ابعاد ۰/۲ در ۰/۳ در ۰/۰۲ متری انجام شد. پس از انتقال خاک‌ها به آزمایشگاه و انجام آزمایش‌های

جدول ۲. جزئیات سری آزمایش‌های انجام یافته در شرایط مختلف

آزمایش	اندازه ذرات خاک (میلی‌متر)	نوع مواد افزودنی	نحوه ریزش مواد افزودنی	غلظت مواد افزودنی (گرم در لیتر)	ارتفاع ریزش (سانتی‌متر)	زمان انجام آزمایش
۱		خشک	---	---	---	پس از خشک شدن
۲			اسپری	---	۵۰	
۳				---	---	
۴		آب	وزنی	---	۱۵۰	
۵				---	۲۰۰	
۶			اسپری	---	---	
۷	مابین الک ۸ و ۳۰			---	۵۰	پس از ۱۵ روز
۸				۲۰	---	
۹				---	۱۵۰	
۱۰		محلول پلیمر		---	۲۰۰	
۱۱			وزنی	---	۵۰	
۱۲				۵۰	۱۵۰	پس از خشک شدن
۱۳				---	۲۰۰	
۱۴		خشک	---	---	---	
۱۵	مابین الک ۳۰ و ۵۰	آب		---	---	
۱۶			اسپری	۲۰	۵۰	
۱۷		محلول پلیمر		---	---	پس از ۱۵ روز
۱۸		خشک	---	---	---	پس از خشک شدن
۱۹		آب		---	---	
۲۰	رد شده از الک ۵۰		اسپری	۲۰	۵۰	
۲۱		محلول پلیمر		---	---	پس از ۱۵ روز

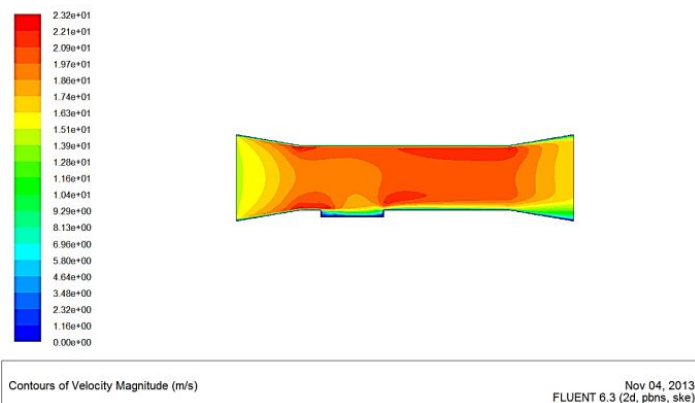


شکل ۲. نمونه‌های تهیه شده در اندازه‌های گوناگون درون سینی مخصوص جهت قرارگیری در دستگاه تونل باد

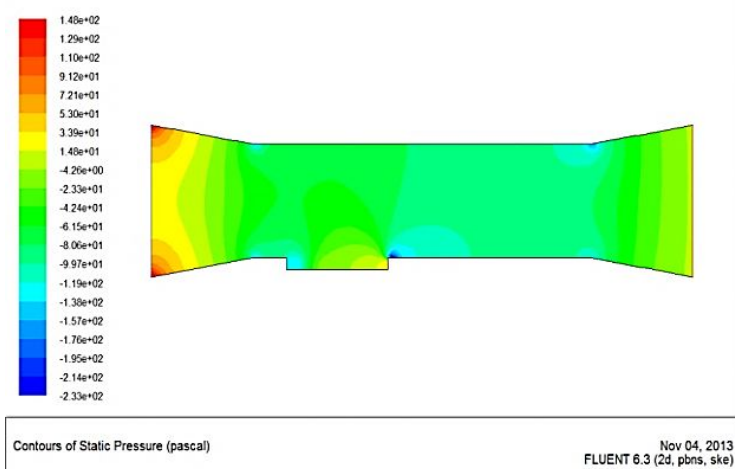
## نتایج و بحث

مدارباز، دستگاه در نرم‌افزار FLUENT مدل‌سازی و با توجه به ابعاد و اندازه‌های موجود و سرعت‌های اندازه‌گیری شده در

جهت مطالعه تغییرات سرعت و فشار باد در دستگاه تونل باد



شکل ۳. تغییرات سرعت باد (متربرثانیه) در دستگاه تونل باد



شکل ۴. تغییرات فشار استاتیکی (پاسکال) در دستگاه تونل باد

کاهش یافت، به شکلی که این مقدار از  $368/65$  گرم برای خاک رد شده از الک  $50$  به مقدار  $106/6$  گرم برای خاک مابین الک  $8$  و  $30$  کاهش یافت. نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از پژوهش‌های صفائی و همکاران (۷) متناسب است. با افزایش دانه‌بندی میزان هدررفت خاک در برابر فرسایش بادی کاهش می‌یابد. همچنین تغییرات میزان فرسایش نسبت به اندازه دانه‌ها در شکل ۵ نشان داده شده است.

طی ۹ مرحله آزمایش، اثر محلول پلیمری بر روی فرسایش خاک و مقایسه آن با حالت خشک بررسی شد. در تمامی آزمایش‌ها از محلول با غلظت  $20$  گرم در لیتر استفاده شده است. نتایج به دست آمده در جدول ۴ خلاصه شده است. بر این اساس، مقدار فرسایش خاک با اعمال سرعت باد متوسط  $40$

فواصل مختلف، تغییرات مورد نظر بررسی شد. تغییرات سرعت باد و فشار وارده در تونل باد در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود تغییرات سرعت از صفر تا حدود  $23/2$  متربرثانیه در تونل باد متغیر است (شکل ۴). در اطراف سینی نمونه این تغییرات در حدود  $10$  تا  $16$  متربرثانیه بوده که با مقادیر اندازه‌گیری شده توسط بادسنج (حدود  $40$  تا  $50$  کیلومتربرساعت) تطابق مناسبی دارد. همچنین فشار وارده ناشی از نیروی باد در تونل باد از مقدار  $233-233$  تا  $148$  پاسکال مطابق شکل ۵ متغیر بود.

جهت بررسی اثر اندازه ذرات خاک بر فرسایش‌پذیری ۶ مورد آزمایش انجام گرفت که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. میزان فرسایش خاک‌ها با افزایش اندازه ذرات خاک

جدول ۳. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها جهت تعیین اثر اندازه ذرات در میزان فرسایش بادی

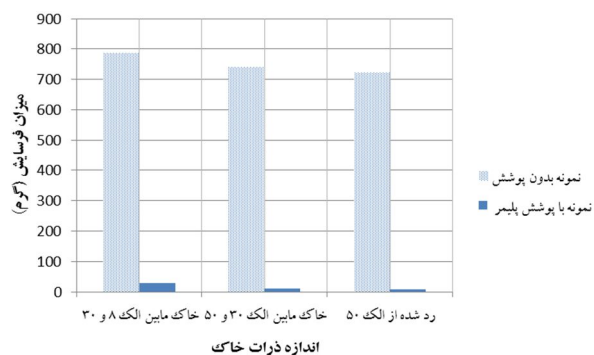
سری آزمایش	رنج اندازه ذرات	قطر متوسط ذرات (میلی متر)	مقدار فرسایش (گرم)	متوسط فرسایش (گرم)	میزان فرسایش پذیری (گرم بر متر بردقیقه)
A1	مابین الک ۸ و ۳۰	۱/۴۸	۹۰/۹	۱۰۶/۶	۱۲۸/۷
A2	مابین الک ۸ و ۳۰		۱۲۲/۳		۱۷۳/۱
B1	مابین الک ۳۰ و ۵۰	۰/۴۵	۳۰۲	۲۳۵/۶	۴۲۷/۵
B2	مابین الک ۳۰ و ۵۰		۱۶۹/۲		۲۳۹/۵
C1	رد شده از الک ۵۰	۰/۲۲۵	۴۲۷/۲	۳۶۸/۶۵	۶۰۴/۷
C2	رد شده از الک ۵۰		۳۱۰/۱		۴۳۸/۹

جدول ۴. نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها جهت تعیین اثر محلول‌های پلیمری بر تثبیت خاک

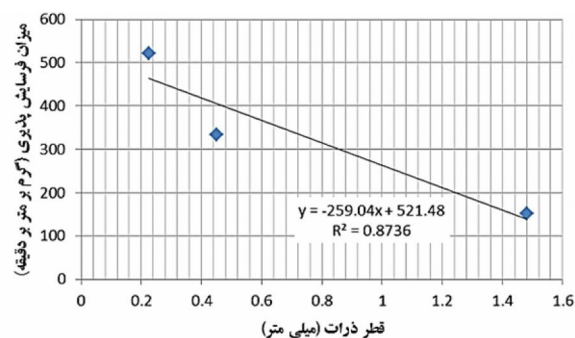
گروه	شماره آزمایش	نوع خاک	نوع مواد افزودنی	میزان فرسایش (گرم)	متوسط فرسایش (گرم)	میزان فرسایش پذیری (گرم بر متر بردقیقه)
۱	SP01	مابین الک ۸	بدون پوشش پلیمر	۷۸۶	۷۸۶	۳۹۳۰
	SP02	۳۰ و ۵۰	با پوشش پلیمر	۴/۳		
	SP03			۱۷/۸		
۲	SP04	مابین الک ۳۰	بدون پوشش پلیمر	۷۳۹/۳	۷۳۹/۳	۳۶۹۶/۵
	SP05	۵۰ و ۳۰	با پوشش پلیمر	۱/۳		
	SP06			۶/۹		
۳	SP07	رد شده از الک ۵۰	بدون پوشش پلیمر	۷۲۲/۳	۷۲۲/۳	۳۶۱۱/۵
	SP08	الک ۵۰	با پوشش پلیمر	۵/۶		
	SP09			۱/۴		

کیلومتر بر ساعت در سطح خاک، به ترتیب برای رده‌های خاک بین الک ۸ و ۳۰، مابین الک ۳۰ و ۵۰ و رد شده از الک ۵۰ از مقدار حدود ۶۳/۱۴، ۷۵/۰۶ و ۷۸/۷۸ درصد، به میزان ۰/۹۱، ۰/۳۴ و ۰/۲۹ درصد برای پاشش محلول پلیمری کاهش یافت (شکل ۶).

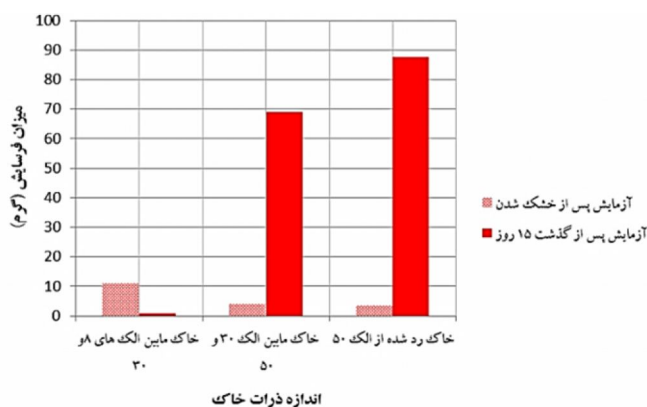
اثر تثبیت کنندگی محلول پلیمری برای خاک‌های ریزدانه‌تر، نقش مؤثری داشته که می‌توان این پدیده را مرتبط با ایجاد واکنش‌های شیمیایی بین ذرات ریزتر و پلیمر دانست. محلول



شکل ۶. میزان اثر پاشش محلول‌های پلیمری بر روی تثبیت خاک



شکل ۵. تغییرات میزان فرسایش پذیری خاک با قطر ذرات



شکل ۷. اثر پارامتر زمان بر روی تثبیت خاک‌های بادرستی

باد تولیدی مورد ارزیابی قرار گرفتند. تغییرات به وجود آمده در میزان فرسایش خاک‌ها در شکل ۷ نشان داده شده است. برای خاک در رده الف (مابین الک‌های ۸ و ۳۰) فرسایش پذیری خاک با گذشت زمان و تأثیر پلیمرهای محلول کاهش یافته است به طوری که از میزان ۱۱/۰۵ گرم به میزان حدود ۰/۹ گرم رسیده است. نکته قابل تأمل افزایش میزان فرسایش خاک‌ها با گذشت زمان برای رده‌های ۲ و ۳ می‌باشد. دلیل این واقعه را می‌توان به برداشت پولک‌های ورقه‌ای خاک توسط مکش باد و کاهش قابل توجه وزن خاک دانست. با برداشت لایه‌های ورقه‌ای در سطح خاک، لایه‌های پایین‌تر خاک بدون هیچ‌گونه تثبیت‌کننده‌ای قابلیت فرسایش را خواهند داشت. لذا با کاهش ابعاد و اندازه ذرات قابلیت ورقه‌ای شدن سطح خاک همانند شکل ۸ و در نتیجه کنده شده از سطح خاک و تداوم فرسایش اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

پلیمری با غلظت ۲۰ گرم بر لیتر بر روی اندازه مختلف ذرات، فرسایش بادی را تا مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. نتیجه بررسی‌ها توسط موحدان و همکاران (۸) در تأثیر ماده پلیمری با پایه پلی وینیل استات بر میزان فرسایش بادی خاک‌ها، نشان داد ماده پلیمری، فرسایش بادی با سرعت ۲۶ متر بر ثانیه (۹۳/۶ کیلومتر بر ساعت) را کاهش دهد. میزان فرسایش تیمارها در برابر باد با سرعت ۲۶ متر بر ثانیه نسبت به نمونه شاهد (بدون پوشش پلیمر) حداقل ۹۰ درصد کاهش یافته است (۸).

در ادامه آزمایش‌های صورت گرفته، اثر زمان تأثیر ریزش محلول‌ها نیز بررسی شد. نمونه‌هایی از سه رده خاک مورد آزمایش تهیه و محلول پلیمری با غلظت ۲۰ گرم در لیتر بر روی نمونه‌ها پاشیده شد. تمامی نمونه‌ها پس از خشک شدن در همان روز و همچنین با گذشت ۱۵ روز پس از ریزش محلول‌ها، در داخل تونل باد ساخته شده قرار گرفته و تحت





شکل ۸ ترک‌های به وجود آمده در سطح خاک و وقوع پدیده پولکی شدن

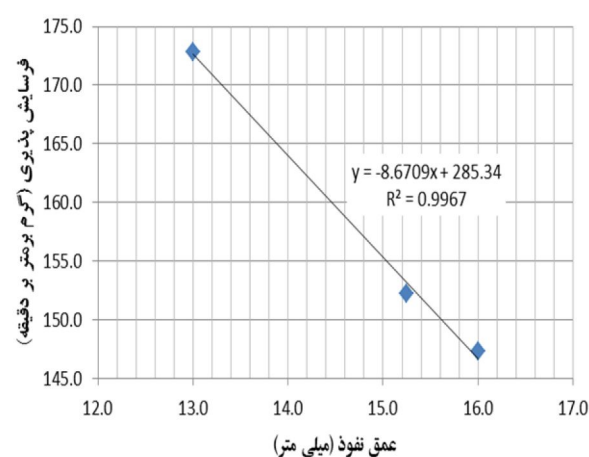
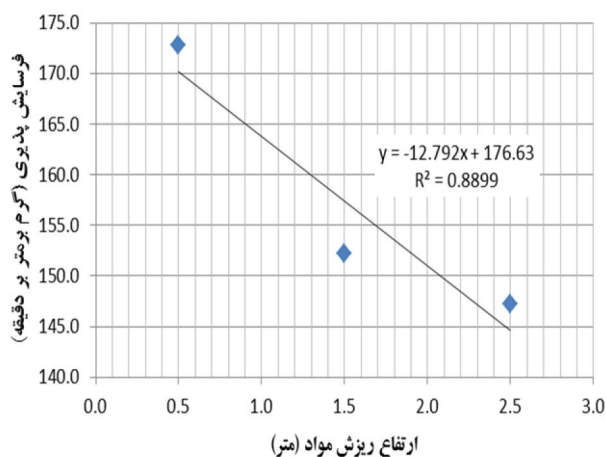
جدول ۵. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌ها جهت تعیین اثر ارتفاع ریزش محلول در فرسایش‌پذیری و عمق نفوذ خاک

شماره آزمایش	نوع خاک	ارتفاع ریزش محلول (متر)	میزان فرسایش (گرم)	میزان فرسایش پذیر (گرم بر متر بردقیقه)	متوسط عمق نفوذ (میلی متر)
۱	نوع خاک ۳۰ و ۸	۰/۵	۴۷/۷	۱۷۲/۸	۱۳
۲		۰/۵	۹۲/۵	۶۹/۱	۱۳
۳		۰/۵	۶۷/۲	۶۹/۱	۱۳
۴		۰/۵	۵۴/۸	۶۹/۱	۱۳
۵		۱/۵	۶۵/۶	۱۵۲/۳	۱۵
۶		۱/۵	۶۲/۳	۱۵۲/۳	۱۵
۷		۱/۵	۵۳/۸	۱۴۷/۳	۱۶
۸		۲/۵	۶۰/۵	۱۴۷/۳	۱۶
۹		۲/۵	۶۲/۴	۱۴۷/۳	۱۶

پاشش از طریق وزن مواد می‌باشد. در جدول ۵ آزمایش‌های انجام شده جهت بررسی تأثیر پارامتر ارتفاع ریزش محلول‌ها نشان داده شده است.

میزان فرسایش خاک‌ها برای ریزش محلول، با افزایش ارتفاع کاهش و اثر غیریکنواختی سطح نمونه به‌جهت برخورداری از محلول‌های پلیمری با افزایش ارتفاع ریزش مواد افزایش یافت. دلیل افزایش میزان فرسایش نسبت به استفاده از اسپری‌ها در حالت گذشته را می‌توان به این قضیه مرتبط دانست. اما آنچه در آزمایش‌ها به‌طور واضح و مشخص است برخورداری از انرژی بیشتر قطرات محلول با افزایش ارتفاع

در سری آزمایش‌های انجام شده این بار اثر پارامترهای ارتفاع ریزش محلول‌های پلیمری در برابر عمق نفوذ محلول و میزان فرسایش بادی آنها مورد توجه قرار گرفت. ارتفاع ریزش مواد در ارتفاع‌های ۰/۵، ۱/۵ و ۲/۵ متری از سطح نمونه انجام یافته است. نحوه ریزش محلول‌ها از طریق آب‌پاش‌های دستی انجام پذیرفت. در مقایسه با آزمایش‌های گذشته از اسپری‌های آب‌پاش جهت یکنواختی سطح نمونه استفاده می‌شد که به‌دلیل ایجاد حالت ریزش مواد بدون اعمال فشار اضافی، از روش‌های نامبرده استفاده گردید. لازم به‌ذکر است عمق نفوذ محلول برای حالت به‌کارگیری اسپری‌ها در ارتفاع‌های پایین، بیشتر از روش



شکل ۹. اثرات ارتفاع ریزش محلول‌ها بر میزان فرسایش پذیری و عمق نفوذ در خاک

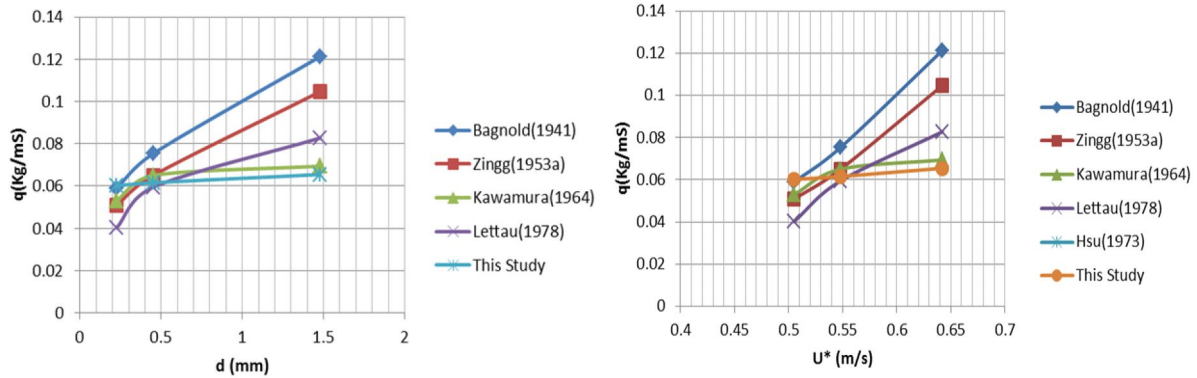


شکل ۱۰. میزان عمق نفوذ محلول‌ها و حرکت خاک به صورت توده‌های منسجم

شده گردیده و به دلیل عمق نفوذ محدود، فرسایش به صورت کلی (General Shear Erosion) و حرکت توده خاک به وقوع خواهد پیوست. در شکل ۱۰ میزان عمق نفوذ محلول‌ها و نحوه حرکت توده خاک به واسطه اعمال فشار باد نشان داده شده است.

جهت بررسی تئوری نتایج، میزان خاک منتقله براساس روابط محققین برحسب سرعت اصطکاکی مورد بررسی قرار گرفت. مولفه نیرو جهت برداشت خاک از تنش برشی سیال به دست آمده که وابسته به شکل پروفیل باد است، ترم مناسب جهت کاربرد، سرعت اصطکاکی است که به صورت جذر نسبت تنش برشی سیال به چگالی سیال

می‌باشد که در لحظه تماس با نمونه سبب فروریزش و تغییر شکل‌های موضعی در نقطه سقوط می‌گردد. این قضیه سبب افزایش عمق نفوذ محلول‌ها با افزایش ارتفاع ریزش می‌گردد. در شکل ۹ تغییرات به وجود آمده در عمق نفوذ محلول‌ها و اثرگذاری پارامترهای مختلف نشان داده شده است. با افزایش عمق نفوذ محلول‌ها در خاک و به سبب افزایش ارتفاع ریزش مواد، مقادیر کمتری از خاک تحت فرسایش بادی قرار می‌گیرند. توجه به این نکته ضروری است که افزایش ارتفاع بایستی با یکنواختی پوشش محلول‌ها در سطح خاک همراه باشد. در غیر این صورت اثر محلول‌ها در چند نقطه محدود سبب شروع فرسایش در همجواری ذرات خاک تثبیت



شکل ۱۱. تغییرات مقدار خاک منتقله براساس سرعت اصطکاکی و قطر متوسط ذرات

دانه‌ها و براساس متوسط اندازه آنها برای حالت خشک محاسبه شد. مقدار خاک منتقله ( $q$ ) برحسب ( $\text{kgm}^{-1}\text{S}^{-1}$ ) با توجه به میزان سرعت اصطکاکی و اندازه ذرات از روابط زیر قابل محاسبه است (۵):

$$q = C \left(\frac{d}{D}\right)^{0.5} \left(\frac{\rho}{g}\right) U_*^2 \quad (13) \quad [4]$$

$$q = C \left(\frac{d}{D}\right)^{0.75} \left(\frac{\rho}{g}\right) U_*^2 \quad (5) \quad [5]$$

$$q = K \frac{\rho}{g} (U_* - U_{*t})(U_* + U_{*t})^2 \quad (6) \quad [6]$$

$$q = C_1 \frac{\rho}{g} \left(\frac{d}{D}\right)^{0.5} (U_*)^2 (U_* - U_{*t}) \quad (17) \quad [7]$$

مقادیر خاک منتقله براساس روابط ارائه شده محاسبه و جهت مقایسه با نتایج آزمایش‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

با توجه به شرایط یکسان نمونه برداری و میزان اعمال باد برای هر آزمایش با افزایش سرعت اصطکاکی، میزان خاک منتقله افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش ابعاد ذرات و بزرگ‌تر شدن آنها مقادیر سرعت اصطکاکی و آستانه سرعت اصطکاکی بیشتر می‌شود. علت این موضوع را می‌تواند مرتبط با افزایش وزن و نیروی جاذبه ذرات که سبب اعمال نیروی بیشتری جهت فرسایش بادی می‌شود، دانست. نتایج آزمایش‌های صورت گرفته تطابق مناسبی با روابط ارائه شده توسط محققین مختلف نشان داده است.

تعریف می‌شود (۲۳). آنان تشریح نمودند که سرعت اصطکاکی برای شرایط پروفیل خنثی می‌تواند از طریق رابطه ۱ تعیین گردد:

$$U_* = \frac{K(0.4)U_z}{\ln((Z-D)/Z_0)} \quad [1]$$

$U_*$ : سرعت اصطکاکی (متربرثانیه)،  $U_z$ : سرعت باد در ارتفاع  $Z$  (متربرثانیه)،  $Z$ : ارتفاع بالاتر از سطح خاک که در آن سرعت باد اندازه‌گیری می‌شود (متر)،  $D$ : ارتفاع متوسط المان‌های زبری، (متر) و  $Z_0$ : زبری آیرودینامیکی (متر).

سرعت آستانه اصطکاکی نیز براساس روابط ۲ و ۳ قابل محاسبه می‌باشد (۱۵ و ۲۳).

$$U_{*t}(\text{Gregory \& Darwish}) = 0.118 [21/2 D_{50} (1 + 0.1 W_a + \frac{0.045}{D_{50}^2} + \frac{1/2}{D_{50}} \exp^{-0.1 \frac{W_a}{W_w}} (W_a - W_c))]^{0.5} \quad [2]$$

$$U_{*t}(\text{Bagnold}) = 0.1 \left(\frac{\rho_a g d}{\rho_p}\right)^{0.5} \quad [3]$$

$D_{50}$ : قطر متوسط ذرات خاک (میلی‌متر)،  $W_a$ : درصد رطوبت خاک،  $W_w$ : نقطه پژمردگی خاک به صورت درصد،  $W_c$ : آب رسیده به رس در خراش‌ها روی سطح ذرات به صورت درصد،  $\rho_a$ : چگالی هوا،  $\rho_p$ : چگالی ذره،  $g$ : شتاب ثقل و  $d$ : قطر ذره. ابتدا میزان سرعت اصطکاکی و آستانه سرعت اصطکاکی براساس سرعت باد اندازه‌گیری شده به دست آمده و سپس با توجه به روابط، مقدار خاک منتقله تعیین گردید. سرعت اصطکاکی و آستانه سرعت اصطکاکی برای سه محدوده اندازه

## نتیجه گیری

در این پژوهش عوامل تأثیرگذار بر فرسایش پذیری خاک‌های بادرفتی مورد ارزیابی قرار گرفت. طی چندین سری آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌ها در دستگاه تونل باد، اثرات ابعاد و اندازه ذرات، نوع محلول‌های افزودنی، ارتفاع ریزش محلول و اثر زمان بر روی میزان فرسایش و عمق نفوذ محلول‌ها بررسی گردید. نحوه فرسایش بر روی خاک‌های تثبیت شده در دو بخش فرسایش موضعی و فرسایش کلی مشاهده شد. بر روی خاک‌ها با ذرات درشت‌تر، حرکت دانه‌ها بیشتر به صورت موضعی و مرحله‌ای بوده در حالیکه در خاک‌ها با ابعاد ذرات ریزتر، فرسایش از نوع کلی و حرکت به صورت توده‌ای و منسجم مرتبط با میزان عمق نفوذ محلول انجام شد. با افزایش قطر متوسط ذرات، میزان فرسایش پذیری تحت فشار باد ثابت کاهش یافت و محلول‌های پلیمری به کار رفته میزان فرسایش را تا بیش از ۹۰ درصد نسبت به حالت اولیه پس از خشک شدن در حالت طبیعی کاهش می‌دهد. اثرات وقوع گرد و خاک ناشی از حرکات معلق ذرات ریز و همچنین حرکات خزشی ذرات درشت خاک در کاربرد این محلول‌ها تقلیل می‌یابد. با گذشت

زمان از شروع ریزش محلول‌های پلیمری بر روی سطح خاک میزان فرسایش افزایش یافته به طوری که این افزایش در مقایسه با فرسایش در حالت خشک از رشد و نمو کمتری برخوردار است. استفاده هم‌زمان و موازی در به‌کارگیری از تثبیت‌کننده‌های پلیمری و بیولوژیکی می‌تواند در بهبود شرایط کنترل فرسایش بادی مثمر فایده واقع گردد. با افزایش میزان ارتفاع ریزش مواد، به دلیل افزایش عمق نفوذ در خاک میزان فرسایش کاهش یافته که نکته حائز اهمیت کنترل یک‌نواختی سطح پوشش خاک و جلوگیری از وقوع فرسایش‌های کلی در افزایش میزان ارتفاع از سطح خاک می‌باشد. بررسی‌ها از نظر روابط تئوری مرتبط با میزان خاک منتقله توسط پژوهشگران گوناگون، تطابق مناسبی با نتایج آزمون‌های صورت گرفته در آزمایشگاه نشان داد. در نهایت توصیه می‌گردد جهت پژوهش‌های تکمیلی بررسی عوامل مذکور در شرایط میدانی و در نظر گرفتن پارامترهای دیگر از جمله جهت باد، میزان پوشش گیاهی، دما و رطوبت و غیره انجام گیرد.

## منابع مورد استفاده

۱. اختصاصی، م. ر. ۱۳۷۰. گزارش طراحی و ساخت دستگاه سنجنده فرسایش بادی، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی دفتر یزد، ص ۱۵.
۲. اکبریان، م. ۱۳۸۹. شناسایی مناسب‌ترین گونه گیاهی جهت نهال‌کاری در پروژه‌های تثبیت ماسه‌های روان استان هرمزگان. دومین همایش ملی فرسایش بادی. دانشگاه یزد. بهمن ۱۳۸۹.
۳. بارزی، ش.، م. وفائیان و م. ابطیحی. ۱۳۸۹. تثبیت خاک‌های دانه‌ای با پلیمرهای مایع. پنجمین کنگره ملی مهندسی عمران. دانشگاه مشهد. اردیبهشت ۸۹.
۴. برادران، پ.، م. مهدوی، ز. عابدی و ر. زعفریان. ۱۳۸۹. طراحی و ساخت مالچ‌های سنتزی زیست سازگار با استفاده از امکانات بومی مناطق ایران در کنترل فرسایش بادی و کانون‌های ریزگرد. دومین همایش ملی فرسایش بادی. دانشگاه یزد. بهمن ۱۳۸۹.
۵. رفاهی، ح. ۱۳۸۳. فرسایش بادی و کنترل آن. چاپ سوم. انتشارات دانشگاه تهران. تهران.
۶. سمائی، ح. ر.، ا. گلچین و م. ر. مصدقی. ۱۳۸۵. کنترل آلودگی ناشی از فرسایش بادی به وسیله پلیمرهای محلول در آب. همایش خاک و محیط زیست و توسعه پایدار. پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران. کرج. آبان ۱۳۸۵.
۷. صفائی، ا.، ح. کریم‌زاده، ف. روحانی و م. ترکش اصفهانی. ۱۳۹۰. بررسی اثر مالچ سرباره بر میزان فرسایش بادی به منظور تثبیت

- شن‌های روان اولین کنگره بین‌المللی پدیده گرد و غبار و مقابله با آثار زیانبار آن. دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان. خوزستان. بهمن ۱۳۹۰.
۸. موحدان، م.، ن. عباسی و م. کرامتی. ۱۳۹۰. بررسی آزمایشگاهی تأثیر پلیمر پلی وینیل استات بر کنترل فرسایش بادی خاک‌ها. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی) ۲۵(۳): ۶۱۶-۶۰۶.
۹. ناطقی، د.، ع. محمدی. ۱۳۸۴. راهبردها، سیاست‌ها و برنامه‌های مقابله با بیابان‌زایی در ایران. مجله جنگل و مرتع. فصلنامه علمی، اجتماعی، اقتصادی سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور ۸۱: ۴۸-۵۶.
۱۰. واعظی، ع. ۱۳۸۹. کاربرد مالچ‌های نفتی در مهار فرسایش بادی و تثبیت شن‌های روان. دومین همایش ملی فرسایش بادی. دانشگاه یزد. بهمن ۱۳۸۹.

11. Agarwal, K. B. and S. B. Ram. 1981. Sand stabilization by use of urea formaldehyde resin binder. Roorkee. Roorkee. 24762. India, Trans Indian Soc Desert Technol Univ Cent Desert Stud. 1981. 6:61-65.
12. Armbrust, D. V., W. S. Chepil and F. H. Siddoway. 1964. Effects of Ridges on Erosion of Soil by Wind Soil Science 28(4).
13. Bagnold, R. A. 1943. The physics of Blown Sand and Desert Dunes. Morrow, New York.
14. Bouhicha, R., F. Aouissi and S. Kenai. 2005. Performance of composite soil reinforced with barely straw. Cement and Concrete Composites. 27: 617-621.
15. Gregory, J. M. and M. M. Darwish. 1990. Threshold Friction Velocity Prediction Considering Water Content. Paper presented at the Winter Meeting of the ASAE. Chicago. Paper No. 902562.
16. Kenneth, N. and P. E. Nwankwo. 2001. Polyacrylamide as a soil stabilizer for erosion control. Wisconsin department of transportation. Report No. W1: 6-98.
17. Lettau, H. H. 1978. Explaining the world's driest climate. Institute for Environmental Studies. University of Wisconsin. Madison.
18. Lukania, T. M. 1968. Strengthening of clay soils with polymer materials. Mater Shestomu vses soveshch zakrepleniya uplotneniyu gruntov. 6: 158-162.
19. Prakash, A. and C. R. Kapoor. 1981. Urea-phenol-formaldehyde copolymer resins as dune sand stabilizer. Trans Indian Soc Desert Tech Univ. Cent Desert Stud. 6: 116-119.
20. Sakata, T., M. Nakabayashi and S. Shi. 1970. Process for stabilizing soil. US patent 3: 412-495.
21. Shawqui, M. Lahalih and A. Neaz. 1998. Effect of new soil stabilizers on the compressive strength of dune sand. Construction and Building Materials. 12: 321-328.
22. Siddiqi, R. A. and C. J. Moore. 1981. Polymer stabilization of sandy soils for erosion control. Trans Res Rec. 827: 30-34.
23. Udai, B., M. Singh., R. James, R. Gregory and R. Wilson. 2001. Texas Erosion Analysis Model: Theory and Validation. 10<sup>th</sup> International Soil Conservation Meeting.