

شبیه‌سازی رفتار باد در رسوب‌گذاری روی سطوح شیب‌دار در آزمایشگاه

امجد ملکی* - دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه رازی، کرمانشاه

عباسعلی ولی - استادیار دانشگاه شیراز

وجیهه کرداریان - کارشناس ارشد ژئومورفولوژی، دانشگاه رازی، کرمانشاه

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۰۷/۰۳ تأیید نهایی: ۱۳۹۰/۰۹/۱۸

چکیده

فرسایش بادی با حفر زمین، انتقال مواد و انباشتن آنها در جای دیگر به‌اشکال گوناگون، موجب دگرگونی زیاد در چهره‌ی زمین می‌شود. هدف از این پژوهش، بررسی رفتار باد روی سطوح با شیب‌های متفاوت، در فرآیند رسوب‌گذاری بادی در آزمایشگاه است. بدین منظور آزمایش باد در آزمایشگاه و در چارچوب طرحی کاملاً تصادفی با ۷ تیمار، شامل شیب‌های ۰٪، ۲٪، ۵٪، ۱۰٪ انجام شد. نتایج آنالیز واریانس طرح، بیانگر اختلاف معنادار در سطح خطای کمتر از ۱٪، در میزان رسوب دریافت شده توسط تیمارها بوده است. مقایسه‌ی میانگین تیمارها به‌روش دانکن نیز حاکی از این است که بیشترین میزان ترسیب در سطح بدون شیب انجام شده و با افزایش شیب (مستقیم و معکوس) این میزان کاهش می‌یابد. برای بیان ارتباط بین درصد شیب و میانگین رسوب دریافت شده، از روش آنالیز رگرسیون استفاده شده که نتایج آن حاکی از کاهش میانگین رسوب مواد بادرفتی با افزایش شیب سطح است و از میان سه مدل خطی، درجه دو و درجه سه، مدل درجه دو برای برآورد رسوب‌گذاری روی شیب‌های متفاوت انتخاب شد. در نهایت با استفاده از آنالیز رگرسیون، ارتباط میان فاصله از خروجی تونل و میزان رسوب دریافت شده مورد ارزیابی قرار گرفت که طی آن مشخص شد، رفتار باد و عملکرد آن در فرآیند رسوب‌گذاری روی سطوح با شیب‌های گوناگون، متفاوت است. بنابراین، چگونگی روند رسوب‌گذاری روی هر یک از سطوح با مدل‌های مناسب مشخص شد که با توجه به ارزیابی مدل‌های خطی، درجه دو و درجه سه، مدل خطی برای شیب‌های مثبت (مستقیم) و شیب صفر و مدل‌های درجه دو برای شیب‌های منفی (معکوس) انتخاب شد. بر اساس نتایج حاصل از این مطالعه، مشخص شد که شبیه‌سازی آزمایشگاهی، به‌عنوان روشی مناسب برای مطالعه‌ی رفتار باد در فرآیند رسوب‌گذاری روی سطوح با ویژگی‌های مختلف است.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی، آزمایشگاه، رفتار باد، رسوب‌گذاری.

مقدمه

همان‌گونه که در مناطق پُرباران فرسایش آبی اهمیت دارد، در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیز باد عامل اصلی فرسایش است و آثار نامطلوب آن را می‌توان به شکل فرسایش بادی و بیابان‌زایی مشاهده کرد. فرسایش بادی در تمام مناطق دنیا روی می‌دهد و خسارات زیادی به بار می‌آورد (رفاهی، ۱۳۸۵). این خسارات شامل کاهش حاصلخیزی و قدرت تولید خاک (مورگان^۱، ۱۹۹۰)، کاهش سطح زیر کشت (لال^۲، ۱۹۹۰)، تغییر بافت خاک (بلک^۳ و همکاران، ۱۹۸۹)، کاهش ظرفیت آب قابل دسترس (داریس^۴، ۱۹۸۹)، تخریب ساختمان فیزیکی خاک و کاهش یکنواختی شرایط خاک (مورگان، ۱۹۹۰)، کاهش دید و افزایش ناراحتی‌های تنفسی و همچنین سبب آلودگی محیط (ویلسن^۵، ۱۹۹۶) می‌شود. باد به‌عنوان یک عامل فرسایشی، با کندن زمین و از سوی دیگر با انتقال مواد و انباشتن آنها به اشکال مختلف و همچنین جابه‌جا کردن تپه‌های ماسه‌ای از محلی به محل دیگر، دگرگونی‌های فراوانی بر چهره‌ی زمین به وجود می‌آورد (احمدی، ۱۳۸۷). این دگرگونی‌ها، به‌ویژه مورد توجه ژئومورفولوژیست‌ها بوده است. تأثیر شناخت رفتارهای رسوب‌گذاری بادی در برنامه‌ریزی‌های مدیریت چشم‌انداز و مدیریت مناطق خشک و نیمه‌خشک گریزناپذیر است؛ چراکه پیدایش هر فرم روی زمین، علامت خاصی شامل گرایش تکاملی یا قهقرایی در سیستم است. بنابراین، در مدیریت چشم‌اندازهای طبیعی، ایجاد فرم‌ها و تغییرات و توسعه و تکامل آنها، مبتنی وجود روابط، تنش‌ها و بازخوردهای سیستم است و از آنجاکه مدیریت، درصدد تقویت علائم برقرارکننده‌ی پایداری در سیستم است، بنابراین شناسایی شیوه‌ی عملکرد فرآیندها در ایجاد فرم‌های مختلف در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از دلایل اهمیت موضوع است. از جمله روش‌های مطالعه‌ی مسائل فرسایش بادی، روش شبیه‌سازی شرایط طبیعی با کاربرد تجربه‌های تونل باد است. برتری استفاده از تونل باد برای بررسی‌های حرکت مواد با باد آن است که کنترل و تغییر نظام‌مند عوامل حاکم بر فعالیت بادی، مانند سرعت باد را امکان‌پذیر می‌کند. (گودرزی نژاد، ۱۳۷۸).

چپیل^۶ در سال ۱۹۴۵ با استفاده از شبیه‌سازی و کاربرد تونل باد، وضع حرکت دانه‌های ماسه را در بستر صاف تونل بررسی کرد و مشاهده کرد که دانه‌های ماسه، ابتدا در امتداد بستر می‌غلطند و پس از گذر مسافت کوتاهی، کمابیش به شکل عمودی به هوا پرتاب می‌شوند که زاویه‌ی صعود ذرات بین ۷۵ تا ۹۰ درجه در حال تغییر است. زو^۷ در سال ۲۰۰۱ در مطالعات آزمایشگاهی خود با استفاده از کاربرد تونل باد، رابطه میان سرعت باد و ارتفاع را مورد بررسی قرار داده و بیان می‌کند که سرعت افقی باد با افزایش ارتفاع به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. ویگس^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۴ با استفاده از کاربرد تونل باد در آزمایشگاه، تأثیر رطوبت روی حرکت ماسه‌ها به‌وسیله‌ی باد را بررسی کردند. نتایج این بررسی بیان می‌کند که خشکی ذرات خاک، سبب ایجاد فضایی میان ذرات شده که طیّ وزش باد، نیروی بالابرنده وارد عمل شده و فرسایش بادی افزایش می‌یابد. حال آنکه با وجود رطوبت و آب، این فضاها پُر شده و تنها ذرات سستی که در سطح قرار گرفته‌اند با

1. Morgan 1990
2. Lal 1990
3. Black 1989
4. Daris 1989
5. Wilson 1996
6. Chepil 1945
7. Zou 2001
8. Wiggs 2004

وزش باد به حرکت درمی‌آیند. ژانگ^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۷ با استفاده از همین روش، روی فرسایش‌پذیری چندین نوع خاک در منطقه‌ی تبت، از جمله خاک‌های مراتع با پوشش طبیعی، خاک‌های زراعی و خاک‌هایی با مقدار زیادی مواد بادرفتی به آزمایش پرداخته‌اند، نتایج این پژوهش نشان داد که در نهایت، خاک‌های حاوی مواد بادرفتی، بیشترین میزان فرسایش‌پذیری و خاک‌هایی با پوشش طبیعی، کمترین میزان فرسایش‌پذیری را دارند.

با توجه به اینکه شیب یکی از عناصر اصلی در ایجاد فرم، میزان و مقدار آن شاخص نمود اشکال سطحی به‌شمار می‌رود، از دیدگاه کاربردی در ژئومورفولوژی اهمیت دارد (رامشت، ۱۳۷۵). بنابراین، مطالعات براساس روش‌های تجربی با هدف کلی شبیه‌سازی رفتار باد در رسوب‌گذاری روی سطوح شیب‌دار در آزمایشگاه انجام گرفته است. در این زمینه، مطالعه بر اساس الگوی شبیه‌سازی‌شده‌ی عوامل شکل‌زا در آزمایشگاه بوده است. نتایج حاصل از انجام آزمایش‌ها در چارچوب طرح آماری مناسب با استفاده از روش‌های تجزیه و تحلیل آماری مورد بحث قرار گرفته و در پایان رفتار باد در رسوب‌گذاری روی سطوح با ویژگی‌های متفاوت با استفاده از مدل ارزیابی شد.

مواد و روش‌ها

برای دستیابی به نتایج رفتار باد روی سطوح با شیب‌های متفاوت در فرآیند رسوب‌گذاری بادی، پژوهش طی مراحل زیر انجام گرفته است:

مرحله‌ی اول: طراحی آزمایش

- ۱-۱- شبیه‌ساز باد که از دستگاه فن با توان هواده‌ی ثابت ۷۰۰۰ وات استفاده شده است؛
- ۱-۲- تونل باد برای حمل و تمرکز رسوبات به سمت تیمارها که تونل استفاده شده در این بررسی، از نوع تونل ثابت با طول ۱۰۰، عرض ۸۵ و ارتفاع ۱۰۰ سانتی‌متر انتخاب شده است؛
- ۱-۳- منبع ورود رسوب به‌داخل تونل باد که این منبع در بالای تونل و در فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متری از دمنده جای گرفته و در هر یک ثانیه، ۱۰ گرم رسوب به داخل تونل تزریق می‌کند.

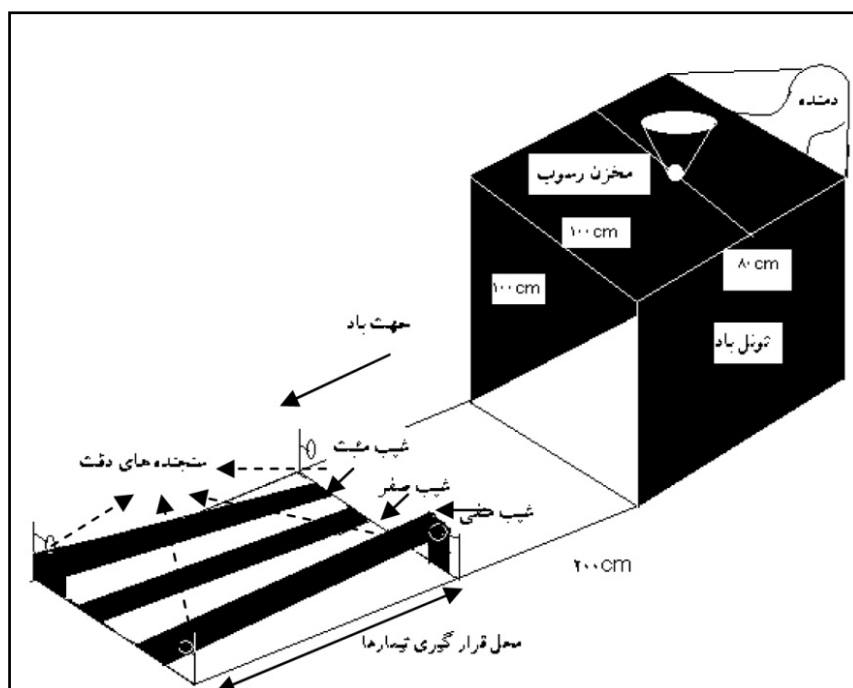
۲- انواع سنجنده‌ها

- ۱-۲- سنجنده برای توزین میزان پراکنش رسوبات با دقت ۰/۰۱ گرم؛
- ۲-۲- شیب‌سنج؛
- ۲-۳- سنجنده‌های دقت که برای اطمینان از پراکنش رسوب بر روی کل تیمارهای مورد آزمایش استفاده می‌شود. این سنجنده‌ها از یک پایه به ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و یک نمونه‌گیر تشکیل شده و در چهار ضلع محدوده‌ی تیمارها قرار می‌گیرد.

- ۳- ظروف نمونه‌گیر، شامل پتری دیش یک‌بار مصرف آزمایشگاهی. این ظروف به شکل دایره‌ای با سطح مقطع ۳۱۴ سانتی‌مترمربع و ارتفاع لبه‌ی ۱ سانتی‌متر با وزن مناسب بوده که در مقابل باد مقاومت کرده و مکان آن در طول آزمایش تغییر نمی‌کند.

۴- سطوح مورد استفاده برای تیمارهای آزمایش که این سطوح از جنس چوب با ابعاد ۲۰۰ سانتی‌متر و عرض ۸ سانتی‌متر انتخاب شد.

پس از طراحی آزمایش، طراحی تیمارهای آزمایش شیب انجام گرفت. طراحی تیمارهای آزمایش، وابسته به انجام یکسری پیش‌آزمایش بوده تا فاصله‌ی قرارگیری تیمارها از تونل باد و همچنین درصد شیب تیمارها مشخص شود. براساس این پیش‌آزمایش‌ها، هفت تیمار با شیب‌های ± 10 ، ± 5 ، ± 2 ، و 0 انتخاب شد و در فاصله‌ی ۱/۵ متری از تونل قرار گرفتند. در شکل شماره‌ی ۱، نمایشی از سیستم طراحی شده و همچنین چگونگی قرارگیری تیمارها مشاهده می‌شود.



شکل ۱. تصویر شماتیک از سیستم شبیه‌سازی شده

مرحله‌ی دوم: اجرای آزمایش و نمونه‌برداری

آزمایش در چارچوب طرح آماری کاملاً تصادفی با ۷ تیمار اجرا و نمونه‌برداری شده است که پس از آغاز کار سیستم در مدت ۳۰ ثانیه، میزان رسوبات دریافت‌شده توسط نمونه‌ها، شامل سنجنده‌های دقت و تیمارها، جمع‌آوری و با ترازو وزن شدند.

مرحله‌ی سوم: تجزیه و تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری‌شده

تجزیه و تحلیل آماری داده‌های جمع‌آوری‌شده با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام گرفت و برای تجزیه‌ی واریانس نمونه‌های جمع‌آوری‌شده از تیمارها انتخاب و وجود اختلاف بین تیمارها به کمک آن مورد آزمون قرار گرفت.

سپس با استفاده از پس‌آزمون مقایسه‌ی میانگین (انتخاب آزمون دانکن) میانگین تیمارها با یکدیگر مقایسه و گروه‌بندی شدند.

در نهایت با استفاده از آنالیز رگرسیون، مدل مناسبی برای بررسی ارتباط میان شیب با میانگین رسوب دریافتی به دست آمد. همچنین روند رسوب‌گذاری روی تیمارها بررسی و مدل‌های مناسب برای هر یک از تیمارها ارائه شد.

یافته‌های تحقیق

در جدول شماره ۱، ویژگی‌های توصیفی تیمارهای شیب ارائه شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های توصیفی تیمارهای شیب

فاصله‌ی اطمینان ۰/۹۹ برای میانگین		ماکزیمم	مینیمم	معیار خطا	انحراف معیار	میانگین	تعداد	تیمار (شیب) %
مرز بالایی	مرز پایینی							
۶/۶۹	۵/۲۷	۷/۴۶	۴/۱	۰/۳۲	۱/۱۱	۵/۹۸	۱۲	۰
۲/۹۵	۲/۱۲	۳/۸	۱/۵۲	۰/۱۸	۰/۶۵	۲/۵۲	۱۲	-۱۰
۴/۴۰	۳/۴۸	۵/۱۶	۲/۷۴	۰/۲۰	۰/۷۱	۳/۹۴	۱۲	-۵
۵/۴۷	۴/۴۱	۶/۵۲	۴/۰۵	۰/۲۴	۰/۸۳	۴/۹۴	۱۲	-۲
۵/۵۸	۳/۹۴	۶/۳۳	۲/۸۷	۰/۳۷	۱/۲۹	۴/۷۶	۱۲	+۲
۴/۴۴	۳/۰۱	۵/۳۱	۱/۷۸	۰/۳۲	۱/۱۲	۳/۷۲	۱۲	+۵
۵/۳۱	۱/۷۸	۳/۳۳	۰/۲۴	۰/۲۶	۰/۹۲	۲/۰۵	۱۲	+۱۰
۳/۳۳	۳/۶۴	۷/۴۶	۰/۲۴	۰/۱۷	۱/۵۹	۳/۹۹	۸۴	مجموع

در جدول فوق آماره‌های میانگین، انحراف معیار، خطای برآورد، بیشینه، کمینه و فاصله‌ی اطمینان ۰/۹۹ حاصل از تکرارهای هر تیمار محاسبه و ارائه شده است. میانگین هر تیمار، بیانگر متوسط وزن رسوبات دریافتی آن تیمار بر حسب گرم و انحراف معیار آن مبین پراکندگی اوزان تکرارهای هر تیمار است که معیار خطای آن نیز ارائه شده است. مقادیر بیشینه و کمینه، حاصل بزرگترین و کوچکترین مقادیر نمونه‌ها در هر تیمار است. فاصله‌ی اطمینان با خطای کمتر از ۰/۰۱ مبین محدوده‌ی قرارگرفتن هر تیمار در آن دامنه است. نتایج تجزیه‌ی طرح کاملاً تصادفی در قالب تحلیل واریانس تیمارهای مختلف آزمایش نیز در جدول شماره ۲ ارائه شده است. جدول تحلیل واریانس آزمون فرضیه‌ی آزمایش، وجود اختلاف معنادار بین میزان رسوب دریافت شده از تیمارها را بیان می‌کند. در صورت کوچکتر بودن سطح معنادار از ۰/۰۱ می‌توان این‌گونه بازگو کرد که تیمارهای آزمایش با ۹۹ درصد اطمینان، اختلاف معناداری را نشان می‌دهد.

جدول ۲. تحلیل واریانس تیمارهای مختلف شیب برای طرح کامل تصادفی

منبع تغییرات	مجموع مربعات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F	سطح معنادار
تیمار	۱۳۷/۱۸۸	۶	۲۲/۸۶	۲۴	*** ۰/۰۰
خطا	۷۳/۳۲	۷۷	۰/۹۵		
کل	۲۱۰/۵۱	۸۳			

** معنادار در سطح $\alpha \leq 0/01$

نتایج به‌دست آمده از جدول شماره‌ی ۲، حاکی از وجود اختلاف معنادار در سطح خطای کمتر از ۱ درصد بین تیمارها است. بنابراین میزان رسوب دریافت‌شده‌ی هر یک از تیمارهای آزمایش با ۹۹ درصد اطمینان، اختلاف معناداری را نشان می‌دهد. برای گروه‌بندی تیمارها، از آزمون مقایسه‌ی میانگین به‌روش دانکن استفاده شد که نتایج آن در جدول شماره‌ی ۳ مشاهده می‌شود. این جدول تعداد گروه‌های همگن‌شده براساس تست دانکن را ارائه می‌کند. بنابراین تیمارهایی که در یک گروه قرار می‌گیرند، دارای میانگین یکسان و تیمارهایی که در گروه‌های مختلف قرار می‌گیرند، میانگین آنها دارای اختلاف معناداری در سطح خطای کمتر از ۰/۰۱ است.

جدول ۳. نتایج مقایسه‌ی میانگین تیمارهای مختلف شیب به کمک آزمون دانکن در سطح $\alpha \leq 0/01$

گروه‌بندی میانگین‌ها بر اساس $\alpha \leq 0/01$				تکرار	تیمار (درصد شیب) %
گروه ۴	گروه ۳	گروه ۲	گروه ۱		
			۲/۰۵	۱۲	٪۱۰
			۲/۵۳	۱۲	-٪۱۰
		۳/۷۲		۱۲	٪۵
		۳/۹۴		۱۲	-٪۵
	۴/۶۸			۱۲	٪۲
	۴/۷۶			۱۲	-٪۲
۵/۹۸				۱۲	٪۰

نتایج به‌دست آمده از آزمون دانکن در سطح خطای کمتر از ۰/۰۱ حاکی از قرار گرفتن میانگین تیمارها در چهار گروه جداگانه است، به‌گونه‌ای که سطوح با شیب ± 10 با کمترین میزان رسوب در گروه اول و شیب ± 5 در گروه دوم و شیب ± 2 در گروه سوم و سطح بدون شیب با بیشترین میزان رسوب دریافت‌شده در گروه پنجم قرار گرفته است.

در جدول شماره‌ی ۴، تحلیل رگرسیون ارتباط میان دو عامل میانگین رسوب دریافت‌شده از هر تیمار، به‌عنوان متغیر وابسته و درصد شیب، به‌عنوان متغیر مستقل در چارچوب مدل‌های خطی، درجه دوم و درجه سوم ارائه شده است.

جدول ۴. تحلیل رگرسیون ارتباط میان درصد شیب و میانگین رسوب دریافت شده از هر تیمار

۹				۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ستون ردیف
ضرایب مدل				سطح معنادار	مدل معیار خطای	مقدار F	درجه آزادی (df)	ضریب تبیین (R ²)	همبستگی (r)	نوع مدل	عوامل مدل	۱
b3	b2	b1	b0									
-	-	-۰/۰۲۴	۳/۹۸	۰/۸۰	۱/۵۰	۰/۰۶۷	۶	۰/۰۱۳	۰/۱۱	خطی	میانگین رسوب دریافت شده و درصد شیب	۲
-	-۰/۰۲۹	-۰/۰۲۴	۵/۰۵	۰/۰۰۸	۰/۵۹	۱۴/۱۸۹	۶	۰/۸۷۶	۰/۹۳۶	درجه ۲		
۲/۶۹E-۵	-۰/۲۹	-۰/۰۲۶	۳/۰۵	۰/۰۷	۰/۹۸	۲/۰۹	۶	۰/۵۱۲	۰/۵۳۱	درجه ۳		

در جدول فوق، ستون شماره‌ی ۳ بیانگر ضریب همبستگی بین متغیرها، ستون شماره‌ی ۴ نشان‌دهنده‌ی ضریب تبیین هر مدل که بیانگر درصدی از تغییرات متغیر وابسته است و با متغیر مستقل توجیه می‌شود، ستون شماره‌ی ۵ درجه آزادی هر مدل، ستون شماره‌ی ۶ مقدار آماره‌ی آزمون (F)، ستون شماره‌ی ۷ معیار خطای مدل که انحراف معیار برآوردهاست، ستون شماره‌ی ۸ سطح معنادار بودن مدل و ستون شماره‌ی ۹ نشان‌دهنده‌ی ضرایب مدل برای ارائه‌ی معادله‌ی آن است. مدل مناسب، با توجه به سطح معنادار کمتر از ۰/۰۱ و همچنین ضریب تبیین بالاتر و خطای معیار کمتر انتخاب شده است. براساس داده‌های ستون شماره‌ی ۸، تنها مدل درجه ۲، سطح معنادار کمتر از ۰/۰۱ داشته و ۰/۸۷ تغییرات میانگین رسوب‌گذاری هر تیمار را با تغییرات شیب در معیار خطای ۰/۵۹ توجیه می‌کند.

با استفاده از تحلیل رگرسیون، چگونگی روند رسوب‌گذاری روی هر یک از تیمارها و ارتباط میان دو عامل میزان رسوب دریافت‌شده (gf) به‌عنوان متغیر وابسته و فاصله‌ی (cm) ابتدای منطقه‌ی رسوب‌گذاری به‌عنوان متغیر مستقل در قالب مدل‌های خطی، درجه دوم و درجه سوم به‌دست آمد که در جدول شماره‌ی ۵ مشاهده می‌شود.

در این جدول براساس مقادیر سطح معنادار کمتر از ۰/۱، هر سه مدل برای بیان ارتباط میان عوامل شیب‌های مثبت و شیب صفر معنادار هستند، بنابراین مدل مناسب با توجه به ضریب تبیین بالاتر و معیار خطای کمتر انتخاب شد.

در مدل خطی برای شیب ۰/۱۰٪ با ضریب تبیین ۰/۹۵ و خطای معیار ۰/۱۴، شیب ۰/۵٪ با ضریب تبیین ۰/۹۸ و خطای معیار ۰/۱۰، شیب ۰/۲٪ با ضریب تبیین ۰/۹۶ و خطای معیار ۰/۳۱ و برای شیب صفر با ضریب تبیین ۰/۹۸ و خطای معیار ۰/۱۴ مناسب‌ترین مدل است. در شیب‌های منفی، مدل خطی براساس مقادیر سطح معنادار بیشتر از ۰/۱، مدل مناسبی نیست و مدل‌های درجه دوم و درجه سوم، مدل مناسبی برای بیان ارتباط عوامل است. با توجه به ضریب تبیین بالاتر و معیار خطای کمتر، مدل درجه ۲ برای شیب‌های ۰/۲٪ با ضریب تبیین ۰/۷۳ و خطای معیار ۰/۴۷، شیب ۰/۵٪ با ضریب تبیین ۰/۹۱ و خطای معیار ۰/۳۳، شیب ۰/۱۰٪ با ضریب تبیین ۰/۷۳ و خطای معیار ۰/۳۷، مناسب‌ترین مدل برای بیان چگونگی روند رسوب‌گذاری توسط باد روی تیمارها است.

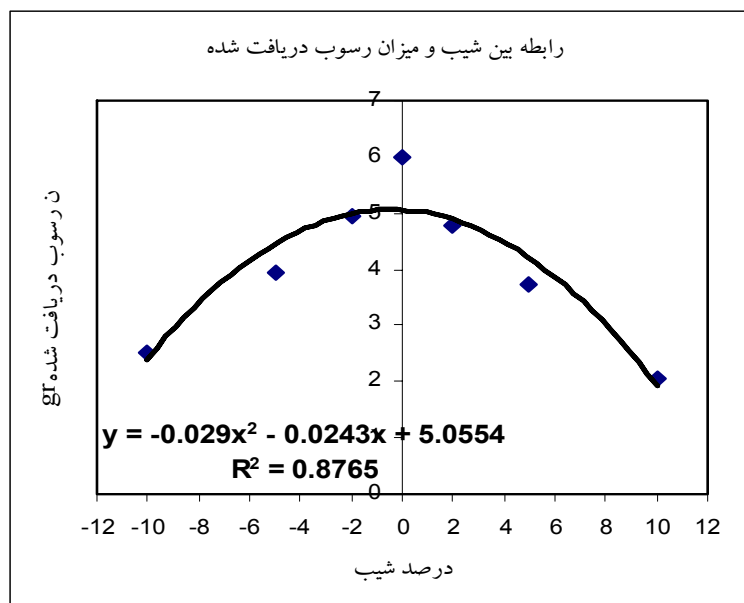
جدول ۵ نتایج آنالیز رگرسیون بین دو متغیر فاصله (cm) از ابتدای منطقه رسوب‌گذاری و مقدار رسوب دریافت شده (gr)

ستون ردیف	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰ ضرایب مدل		
										b0	b1	b2
۱	تیمار (شیب) %	پارامترهای مدل	نوع مدل	ضریب همبستگی (r)	ضریب تبیین (r ²)	درجه آزادی (df)	مقدار F	خطای معیار برآورد	مساحت معیار	b3	b2	b1
										-	-	-
										-	-	-
۲	شیب +/۱۰	مقدار رسوب دریافت شده و فاصله	درجه ۲	۰/۹۴	۰/۸۹	۱۱	۱۴۳/۱۶	۰/۱۷	۰/۰۰۰	-۱E-۰۵	-۰/۰۰۷۱	-۰/۰۱۳۳
										-	-	-
										-	-	-
۳	شیب +/۵	مقدار رسوب دریافت شده و فاصله	درجه ۲	۰/۹۸	۰/۹۸	۱۱	۴۷۵/۳۱	۰/۱۲	۰/۰۰۰	-۳E-۰۵	-۰/۰۰۳۹	-۰/۰۱۷۳
										-	-	-
										-	-	-
۴	شیب +/۲	مقدار رسوب دریافت شده و فاصله	خطی	۰/۹۸	۰/۹۶	۱۱	۱۷۰/۸۵	۰/۳۱	۰/۰۰۰	-	-۰/۰۱۹۳	-
										-	-	-
										-	-	-
۵	شیب ۰	مقدار رسوب دریافت شده و فاصله	درجه ۲	۰/۹۸	۰/۹۷	۱۱	۱۷۸/۲۳	۰/۱۴	۰/۰۰۰	-	-۰/۰۱۶۷	-
										-	-	-
										-	-	-
۶	شیب -/۲	مقدار رسوب دریافت شده و فاصله	درجه ۲	۰/۸۵	۰/۷۳	۱۱	۱۲/۵۵	۰/۴۷	۰/۰۰۲	-	-۰/۰۹۹۵	-
										-	-	-
										-	-	-
۷	شیب -/۵	مقدار رسوب دریافت شده و فاصله	درجه ۲	۰/۹۵	۰/۹۱	۱۱	۴۷/۱۶	۰/۲۳	۰/۰۰۰	-	-	-
										-	-	-
										-	-	-
۸	شیب -/۱۰	مقدار رسوب دریافت شده و فاصله	خطی	۰/۷۱	۰/۵۱	۱۱	۱۰/۵۳	۰/۴۷	۰/۰۰۹	-	-	-
										-	-	-
										-	-	-
۸	شیب -/۱۰	مقدار رسوب دریافت شده و فاصله	درجه ۲	۰/۸۴	۰/۷	۱۱	۱۲/۴۴	۰/۳۷	۰/۰۰۳	-	-	-
										-	-	-
										-	-	-
۸	شیب -/۱۰	مقدار رسوب دریافت شده و فاصله	درجه ۲	۰/۸۴	۰/۷	۱۱	۱۲/۴۴	۰/۳۷	۰/۰۰۳	-	-	-
										-	-	-
										-	-	-

نتایج و بحث

نتایج عوامل واریانس طرح کاملاً تصادفی و مقایسه‌ی میانگین به‌روشنی دانکن حاکی از واکنش متفاوت سطوح با شیب‌های مختلف، در مقابل عملکرد فرآیند بادرفتی است؛ به‌گونه‌ای که سطح بدون شیب، بیشترین میزان مواد بادرفتی را ترسیب و با افزایش شیب سطح (منفی یا مثبت) از میزان این ترسیب کاسته می‌شود. با توجه به نتایج این پژوهش، سطح بدون شیب حدود ۲/۵ بار، به‌دام‌اندازی و تراکم رسوب را نسبت به سطوح با شیب $\pm 10\%$ افزایش داده است. بنابراین اگر مبنای گروه‌بندی سطوح را دریافت و تمرکز رسوب قرار دهیم، سطوح به دو دسته‌ی سطوح رسوب‌قرار و سطوح رسوب‌فرار گروه‌بندی می‌شوند که سطوح بدون شیب در گروه سطوح رسوب‌قرار و سطوح شیب‌دار در گروه سطوح رسوب‌فرار دسته‌بندی می‌شوند.

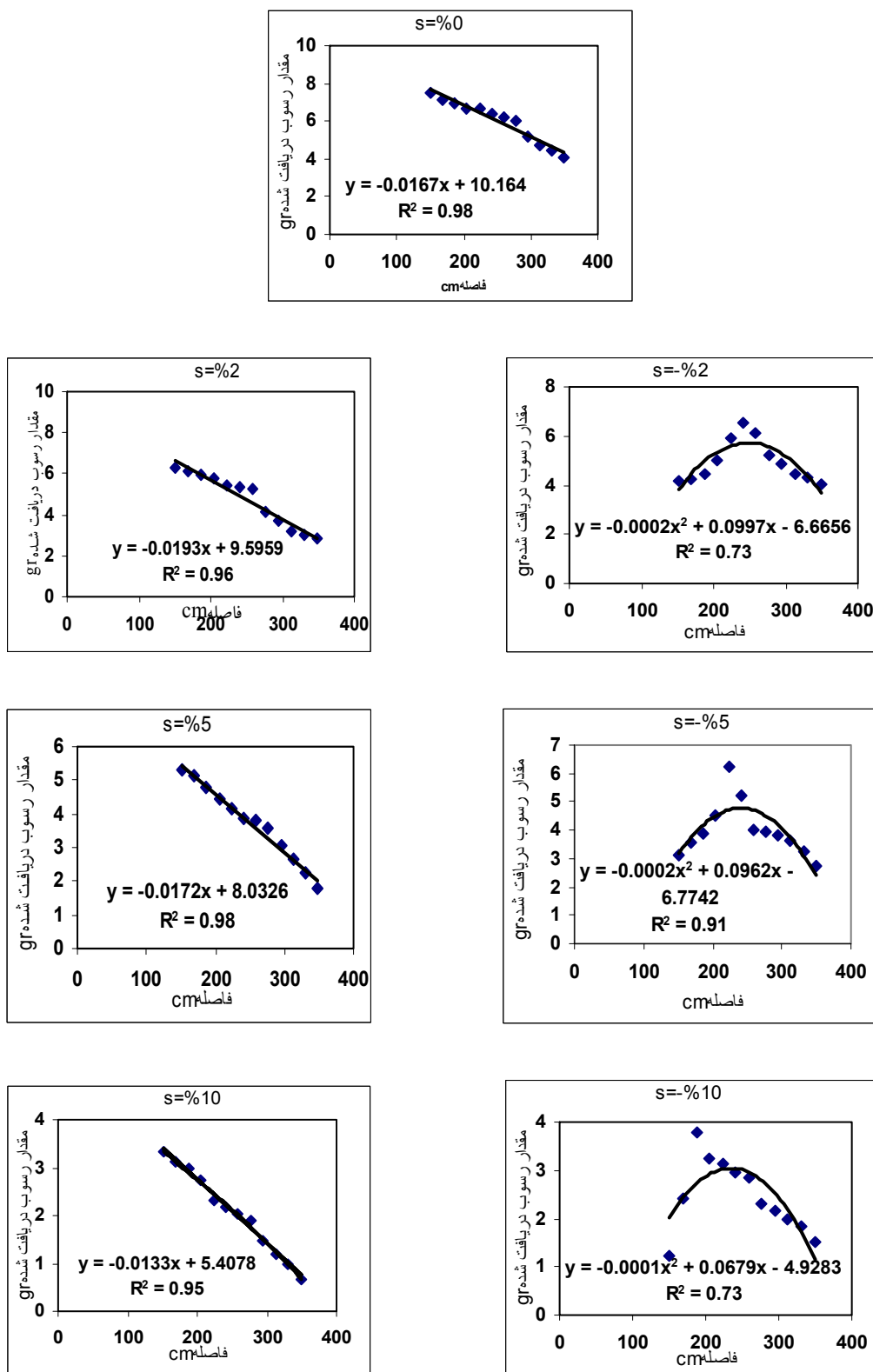
نتایج به‌دست آمده از عوامل رگرسیون نیز حاکی از وجود ارتباط میان دو پارامتر شیب با میانگین میزان رسوب دریافت‌شده از تیمارها بوده و این ارتباط منجر به ارائه‌ی مدل آماری مناسب شده است که به‌ازای درصد شیب سطح، میانگین رسوب دریافتی برآورد می‌شود. شکل شماره‌ی ۲، رابطه‌ی میان شیب سطح را با میانگین رسوب دریافت‌شده (gr) نشان می‌دهد.



شکل ۲. نمودار ارتباط میان شیب سطح (درصد) با میانگین رسوب دریافت‌شده (gr)

از شکل شماره‌ی ۲، چنین برداشت می‌شود که با افزایش شیب سطح در هر دو جهت (مثبت و منفی) کاهش معناداری در میزان مواد ترسیب‌شده رخ می‌دهد و مدل رگرسیونی $(y = -0.029x^2 - 0.0243x + 5.0554)$ ، ۸۷٪ تغییرات رسوب‌گذاری را با تغییرات شیب نشان می‌دهد.

نتایج بررسی چگونگی روند رسوب‌گذاری با استفاده از آنالیز رگرسیون روی هر یک از تیمارها نیز، حاکی از ارتباط معناداری میان فاصله‌ی خروجی تونل و میزان رسوب دریافت‌شده است. شکل شماره‌ی ۳ مناسب‌ترین مدل برای ارتباط میان فاصله و میزان رسوب دریافت‌شده را برای هر تیمار نشان می‌دهد.



شکل ۳. نمودارهای ارتباط میان میزان رسوب‌گذاری با فاصله از خروجی تونل در سطوح مختلف

از نمودارهای شکل شماره ۳، تغییرات رسوب‌گذاری با فاصله‌ی خروجی تونل به شرح زیر توجیه می‌شود:

برای شیب صفر مدل رگرسیونی $(y = -0.0167x + 10.164)$ ، 0.98 تغییرات رسوب‌گذاری،
 برای شیب $+2\%$ مدل رگرسیونی $(y = -0.0193x + 9.59)$ ، 0.96 تغییرات رسوب‌گذاری،
 برای شیب $+5\%$ مدل رگرسیونی $(y = -0.0172x + 8.032)$ ، 0.98 تغییرات رسوب‌گذاری،
 برای شیب $+10\%$ مدل رگرسیونی $(y = -0.013x + 5.40)$ ، 0.95 تغییرات رسوب‌گذاری،
 برای شیب -2% درصد مدل رگرسیونی $(y = -0.002x^2 + 0.009x - 6.66)$ ، 0.73 تغییرات رسوب‌گذاری،
 برای شیب -5% درصد مدل رگرسیونی $(y = -0.002x^2 + 0.0096x - 6.77)$ ، 0.91 تغییرات رسوب‌گذاری،
 برای شیب -10% درصد مدل رگرسیونی $(y = -0.0001x^2 + 0.0067x - 4.92)$ ، 0.73 تغییرات رسوب‌گذاری.

با توجه به مدل‌های ارائه‌شده، ارتباط میان پارامترهای مدل منفی بوده و با افزایش فاصله، کاهش معناداری در میزان رسوب دریافت‌شده از تمام تیمارها رخ می‌دهد. این نتیجه بیانگر این است که همواره جهت حرکت ذرات از ارتفاعات به سمت نقاط پست‌تر نخواهد بود یا به بیان دیگر، همواره جابه‌جایی ذرات توسط باد در جهت نیروی ثقل نیست و سطح اساس باد به‌اجبار سطح عمومی اقیانوس‌ها تلقی نمی‌شود.

نتیجه‌گیری

اهمیت نقش باد در نواحی خشک و نیمه‌خشک، به‌شکل تراکم ماسه‌های بادی است و تشکیل و گسترش اشکال حاصل از تراکم ماسه در مناطق مستعد، مشکلات زیادی را در این مناطق ایجاد کرده است. ازجمله این مشکلات می‌توان به تخریب اراضی زراعی، تدفین برخی از گیاهان زراعی، تدفین عمیق لوله‌های آبرسانی و غیره، قطع راه‌های ارتباطی و همچنین پوشش خاک‌های حاصلخیز منطقه با مواد غیرحاصلخیز است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، عرصه‌های فعال برای تمرکز مواد بادرفتی، سطوح بدون شیب هستند. این نتیجه‌گیری می‌تواند برای مدیریت اراضی و کاربری آنها مورد استفاده قرار داده شود. البته لازم به ذکر است که این برنامه‌ریزی‌ها نباید در راستای کاهش شکل‌زایی یا گسترش یک شکل خاص باشد، بلکه باید با هدف کنترل وضعیت موجود و استفاده‌ی بهینه از آن تدوین شوند.

با توجه به مطالب گفته‌شده، استفاده از شبیه‌سازی در آزمایشگاه، شرایطی را ایجاد کرد تا با حذف و کنترل یکسری از متغیرهای فرعی سیستم، رفتار باد در مرحله‌ی رسوب‌گذاری روی سطوح با شیب‌های متفاوت، به‌طور دقیق بررسی و تأثیر شیب در پاسخ به رفتار باد در فرآیند بادرفتی مشخص شود. دستیابی به این نتایج با استفاده از روش میدانی، به‌دلیل محدودیت‌های بسیار زیاد، ازجمله وسعت سطوح، کمبود امکانات نمونه‌برداری برای کنترل و نظارت دقیق بر نمونه‌گیرها و عدم امکان تکرار نمونه‌برداری برای مشخص کردن صحت آزمایش (به‌دلیل تغییراتی که هم روی سطح و هم در متغیرهای فرسایش مانند، سرعت و جهت باد رخ داده است)، بسیار مشکل و پرهزینه است.

منابع

- رامشت، محمد حسین، ۱۳۷۵، کاربرد ژئومورفولوژی در برنامه‌ریزی مّلی و منطقه‌ای، انتشارات دانشگاه اصفهان، اصفهان.
- رفاهی، حسینقلی، ۱۳۸۵، فرسایش بادی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- کوک، آریو و جی. سی دورکمپ، ۱۳۷۸، ژئومورفولوژی و مدیریت محیط، ترجمه‌ی شاهپور گودرزی نژاد، جلد دوم، چاپ اول، انتشارات سمت، تهران.
- Chun-Lai Zhang , Xue-Yong Zou ,*, Ping Yang , Yu-Xiang Dong ,Sen Li , Xin-Hu Wei , Shuo Yang, Xing-Hui Pan, 2007, **Wind Tunnel Test and 137Cs Tracing Study on Wind Erosion of Several Soils in Tibet**, Journal Soil & Tillage Research, Vol. 94, PP. 269-282.
- Daris, B. and Condra, G., 1989, **The on Site Costs of Wind-erosion on Farms in Newmexico**, Journal of Soile an Water Cons, Vol. 44, No. 4, PP. 339-343.
- Chepil, W.S., 1945, **Dynamics of Wind Erosion: I: Nature of Movement of Soil by Wind**, Soil Science, Vol. 60, PP. 305-320.
- Black, J. M. W. and Chanasky, D. S., 1989, **The Wind Erodibility of Some Alberta Soils after Seeding: Aggregation in Relation to Fild Parameters**, Can. J. Soile Sci, Vol. 69, PP. 835-847.
- Lal, R., 1990, **Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management**, Mcgraw Hill, Inc., New York.
- Morgan, R. P. C., 1990, **Soile Erosion and Conservation**, 3th ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Wiggs, G. F. S., Baird, A. J., Atherton, R. J., 2004, **The Dynamic Effect of Moisture on the Entrainment and Transport of Sand by Wind**, Geomorphology, Vol. 59, PP. 15-30.
- Wilson, R., Spengler, J., 1996, **Particles in Our Air: Concentrations and Health Effects**, Harvard University Press, Cambridge.
- Zou, X. Y., Wang, Z.L., Hao, Q.Z., Zhang, C.L., Liu, Y.Z., Dong, G.R., 2001, **The Distribution of Velocity and Energy of Saltating Sand Grains in a Wind Tunnel**, Geomorphology, Vol. 36, PP. 155-165.