

پیش‌بینی حساسیت به فرسایش نهشته‌های بادی با استفاده از مدل‌های توزیع اندازه ذرات در بخشی از ساحل غربی دریاچه ارومیه

فرخ اسدزاده^{۱*}، مارال خدادادی^۲ و احسان احسان‌ملاح^۳

*- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران، پست الکترونیک: f.asadzadeh@urmia.ac.ir

۲- استادیار، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، پژوهشکده کشاورزی هسته‌ای، گروه خاک، آب و تغذیه گیاه، کرج، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ایران

تاریخ دریافت: ۹۴/۱۲/۱۴ تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۲۷

چکیده

در سال‌های اخیر، بخش زیادی از عرصه آبی دریاچه ارومیه خشک و بستری از رسوبات ریزدانه شور به وجود آمده که بسیار مستعد فرسایش بادی هستند. این پژوهش به منظور بررسی قابلیت برخی مدل‌های ریاضی در تشریح توزیع اندازه ذرات نهشته‌های بادی و پیش‌بینی حساسیت به فرسایش با استفاده از توزیع اندازه ذرات در تپه‌های ماسه‌ای بخشی از سواحل غربی دریاچه ارومیه انجام شد. در مجموع ۴۸ نمونه از رئوس یک شبکه ۵۰۰×۵۰۰ متری و از عمق ۵-۰ سانتی‌متری جمع‌آوری گردید. توزیع اندازه ذرات نمونه‌ها با استفاده از روش غربال خشک تعیین شد. شاخص‌های آماری اندازه ذرات شامل قطر میانگین، جورشدگی، چولگی و کشیدگی محاسبه گردید. نه مدل توزیع اندازه ذرات برای تعیین مدل مناسب در تشریح توزیع اندازه رسوبات بادی مورد بررسی قرار گرفته و از اجزاء وزنی مربوط به قطرهای ۸۴۰، ۴۲۰، ۲۱۰، ۱۰۵، ۵۲٫۵ و ۲۶٫۲۵ میکرومتر برای تعیین میزان حساسیت به فرسایش بادی استفاده گردید. نتایج نشان داد که میانگین اندازه ذرات در نهشته‌های بادی بطور متوسط برابر با $310 \mu m (\phi 1/69)$ بود که در مقایسه با اغلب بیابان‌های جهان، شامل ماسه‌های نسبتاً درشت‌تر، با جورشدگی ضعیف و بسیار لپتوکورتیک بود. با توجه به ضرایب کارایی، مدل فردلاند بهترین عملکرد را در تشریح توزیع اندازه ذرات رسوبات مورد مطالعه نشان داد. نمونه‌های مورد مطالعه به طور میانگین دارای ۹۷ درصد ذرات کوچکتر از ۸۴۰ میکرومتر بوده و بسیار مستعد فرسایش بادی می‌باشند. حدود ۸۰ درصد ذرات قابلیت انتقال توسط فرایند جهش و حدود ۱۷ درصد توسط فرایند تعلیق را دارند.

واژه‌های کلیدی: تپه‌های ماسه‌ای، مدل‌های توزیع اندازه ذرات، حساسیت به فرسایش بادی، دریاچه ارومیه.

مقدمه

ماسه‌های روان اشاره کرد. علاوه بر عوامل اقلیمی مانند سرعت باد و مقدار رطوبت، ویژگی‌های فرسایش‌پذیری ذرات خاک که به‌طور عمده مربوط به چگونگی توزیع اندازه ذرات آن است، نقش مهمی در میزان فرسایش بادی دارند. توزیع اندازه ذرات از مهمترین و پایه‌ای‌ترین خصوصیات رسوبات اعم از آبی و بادی محسوب می‌شود و بسیاری از ویژگی‌های کمی و کیفی آنها مانند تخلخل، نفوذپذیری،

فرسایش بادی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تخریب اراضی بوده و مشکلات جدی در بسیاری از نقاط دنیا از جمله ایران به وجود آورده است. از پیامدهای مخاطره‌آمیز فرسایش بادی می‌توان به تشکیل طوفان‌های گرد و غبار (Zobeck & van Plet, 2006)، تخلیه ذرات حاصلخیز خاک (Sharratt et al., 2007) و در نهایت حرکت

کردند. پژوهش آنان نشان داد که فراوانی دامنه‌های مختلف اندازه ذرات شامل ذرات کوچکتر از $840\ \mu\text{m}$ ، کوچکتر از $420\ \mu\text{m}$ و همچنین فراوانی ذرات در محدوده‌های $840\ \mu\text{m}$ تا $420\ \mu\text{m}$ و $420\ \mu\text{m}$ تا $840\ \mu\text{m}$ دارای ارتباط آماری معنی‌دار با مقدار فرسایش اندازه‌گیری شده در تونل باد است. این پژوهشگران همچنین ذرات در دامنه $2000\ \mu\text{m}$ تا $30\ \mu\text{m}$ را به‌عنوان ذرات مستعد فرسایش بادی گزارش کرده و بر این اساس اظهار داشتند که لس‌های سیلنتی عمدتاً توسط فرایند تعلیق و خاک‌های ماسه‌ای توسط فرایند جهش فرسایش می‌یابند. Mahmoodabadi و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر توزیع اندازه ذرات خاک بر شدت فرسایش بادی را بوسیله تونل باد مطالعه کردند. نتایج آنان نشان داد با افزایش اندازه ذرات موجود در سطح، شدت فرسایش بادی به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد؛ که دلیل این امر را از یکسو افزایش مقاومت در برابر جدا شدن و از سوی دیگر، کاهش سرعت باد در سطح تماس با خاک و کاهش فرسایش بادی دانستند.

مطالعات ذکرشده و نتایج آنها به روشنی نشان‌دهنده اهمیت اندازه ذرات و چگونگی توزیع آنها در فرایند فرسایش بادی است. ویژگی‌های توزیع اندازه ذرات در نهشته‌های بادی، عموماً بر مبنای مدل توزیع لاگ نرمال و در مقیاس فی (ϕ) مورد بررسی قرار می‌گیرد (Krumbein & Pettijohn, 1938) و برای بیان ویژگی‌های توزیع ذرات از پارامترهای معمول آمار توصیفی مانند قطر میانگین، جورشدگی (sorting) چولگی (skewness) و کشیدگی (kurtosis) استفاده می‌شود (Menéndez-Aguado *et al.*, 2015; Blott & Pye, 2001; Folk & Ward, 1957). نمونه Zhu و همکاران (۲۰۱۴) توزیع اندازه نهشته‌های بادی را در منطقه ایجینا در چین بررسی کردند، آنان آمار توصیفی توزیع اندازه ذرات شامل قطر میانگین، جورشدگی، چولگی و کشیدگی ذرات را محاسبه کرده و گزارش کردند که در مقایسه با سایر بیابان‌های جهان، تپه‌های ماسه‌ای ایجینای چین دارای ماسه‌های نسبتاً درشت‌تر، با جورشدگی ضعیف و نسبتاً پلیتی کورتیک (platykurtic) می‌باشند. پارامترهای توصیفی یادشده اگرچه برای اهداف

قابلیت انتقال، واکنش‌پذیری شیمیایی و فرسایش‌پذیری تحت تأثیر اندازه ذرات و چگونگی توزیع آنها می‌باشد (Indraratna *et al.*, 2012; Sierra *et al.*, 2011; Flemming, 2007; Boadu, 2000). مطالعات انجام شده در طول دهه‌های اخیر بیانگر این واقعیت است که مورفولوژی و جابجایی تپه‌های ماسه‌ای و همچنین ساختار و توزیع پوشش گیاهی به‌طور عمده تحت تأثیر توزیع اندازه ذرات آنهاست (Wang *et al.*, 2003; Musila, 1998; Livingstone & Warran, 1996). از سوی دیگر فرسایش‌پذیری بادی خاک‌ها و نهشته‌های بادی اغلب بر پایه اطلاعات مربوط به توزیع اندازه آنها بیان می‌گردد (Mahmoodabadi *et al.*, 2011; Mirzamostafa *et al.*, 1996; Shao *et al.*, 1998). برای نمونه Chepil (۱۹۴۱) فراوانی خاکدانه‌های با قطر کمتر از $840\ \mu\text{m}$ را به‌عنوان شاخص فرسایش‌پذیری بادی معرفی کرده است که این شاخص به‌طور گسترده در مدل‌های پیش‌بینی و همچنین مطالعات فرسایش بادی مورد استفاده واقع شده است (Fryrear *et al.*, 2000; Woodruff and Siddoway, 1965). براساس این شاخص، خاکدانه‌های با قطر کوچکتر از $840\ \mu\text{m}$ شامل ذرات حساس به فرسایش توسط سه فرایند تعلیق (suspension)، جهش (saltation) و خزش (creep) می‌باشد (Chandler *et al.*, 2005). Chepil (۱۹۴۱) بر پایه پژوهش‌های فراوان انجام شده، ذرات خاک را به دو جزء فرسایش‌پذیر شامل جزء کوچکتر از $420\ \mu\text{m}$ و جزء $420\ \mu\text{m}$ تا $840\ \mu\text{m}$ و دو جزء فرسایش‌ناپذیر شامل اجزاء $840\ \mu\text{m}$ تا $2000\ \mu\text{m}$ و $2000\ \mu\text{m}$ تا $6400\ \mu\text{m}$ تقسیم‌بندی کرد. Mirzamostafa و همکاران (۱۹۹۸) محاسبات جداگانه‌ای برای تعیین اندازه ذرات مربوط به هر یک از فرایندهای تعلیق و جهش در فرسایش بادی انجام دادند. آنان قطر کوچکتر از $100\ \mu\text{m}$ میکرومتر را به‌عنوان اندازه ذرات حساس به تعلیق و قطر بین $840\ \mu\text{m}$ تا $100\ \mu\text{m}$ را به‌عنوان قطر مواد جهشی مشخص کردند. Chandler و همکاران (۲۰۰۵) تأثیر توزیع اندازه ذرات نهشته‌های بادی را بر روی حساسیت به فرسایش بادی در آمریکا بررسی

بسیار زیاد شکل گرفته‌اند که حرکت سریع آنها و ریزگردهای تولیدی توسط آنها، سکونتگاه‌های روستایی، اراضی کشاورزی و شهرک صنعتی ارومیه را با تهدید جدی مواجه کرده است. براین اساس مطالعه توزیع اندازه ذرات رسوبات نهشته‌های بادی به منظور پی بردن به حساسیت آنها در برابر فرایندهای مختلف فرسایش بادی ضروریست. بنابراین، این مطالعه با هدف بررسی کارایی تعدادی از مدل‌های کاربرد توزیع اندازه ذرات در نهشته‌های بادی منطقه جبل کندی انجام شده و در ادامه حساسیت نهشته‌های بادی منطقه نسبت به فرایندهای فرسایش بادی با استفاده از مدل برتر و کلاس‌های اندازه‌ای مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

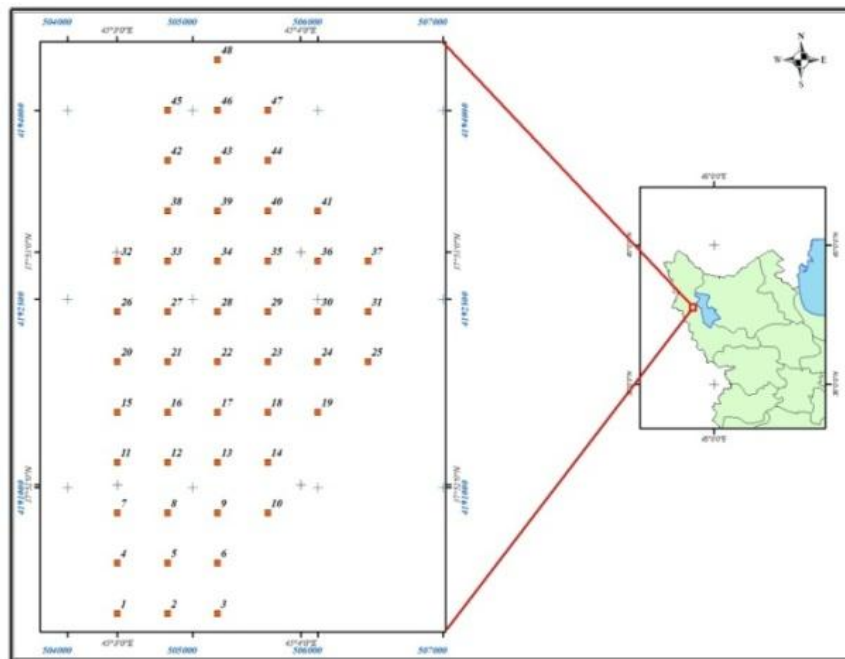
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه و نمونه برداری

منطقه مورد مطالعه در ساحل غربی دریاچه ارومیه و در روستای جبل کندی واقع در ۳۵ کیلومتری شمال شهرستان ارومیه واقع شده است (شکل ۱). وسعت منطقه در حدود ۷۰۰ هکتار بوده و در محدوده مختصات جغرافیایی $37^{\circ}51'14''$ تا $45^{\circ}41'41''$ شرقی و $37^{\circ}53'53''$ تا $37^{\circ}51'14''$ شمالی قرار دارد. متوسط ارتفاع منطقه از سطح دریا حدود ۱۲۶۸ متر می‌باشد. میانگین سالانه دما و بارندگی به ترتیب $13/7$ Cm و 315 mm می‌باشد. براساس گزارش ایستگاه سینوپتیک کهریز واقع در مختصات جغرافیایی $37^{\circ}52'$ عرض شمالی و $45^{\circ}00'$ طول شرقی که فاصله آن از منطقه مطالعاتی در حدود ۵ کیلومتری است، متوسط سرعت باد در منطقه برابر با $2/5$ متر در ثانیه بوده و بیشترین و کمترین سرعت باد به ترتیب مربوط به ماه‌های فروردین و آبان است. جهت باد غالب نیز به سمت جنوب غرب می‌باشد. میانگین بیشینه سرعت باد مربوط به دوره آماری بین سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۴ در ماه‌های مختلف بین $9/5$ تا $17/7$ متر در ثانیه متغیر می‌باشد.

مقایسه‌ای مفید هستند اما در بسیاری از موارد، نیاز به داشتن تابعی پیوسته از توزیع اندازه ذرات یک نمونه وجود دارد که با استفاده از آن بتوان فراوانی مربوط به هر قطر دلخواه از ذرات رسوب را به دست آورد (Gupta & Yan, 2006). توابع ریاضی که برای توصیف پیوسته توزیع فراوانی تجمعی اندازه ذرات مورد استفاده قرار می‌گیرند تحت عنوان مدل‌های توزیع اندازه ذرات شناخته شده و به طور گسترده‌ای در مطالعات خاک و رسوب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این زمینه توابع ریاضی متعددی مانند مدل‌های لاگ نرمال، نرمال، نمایی، لگاریتمی- نمایی، فرکتال (Fractal)، ویبول (Weibull function)، فردلاند (Fredlund) و سوربک (Swrebec function) پیشنهاد شده است (Sun et al., 2002; Wills and Napier-Munn, 2006; Menéndez-Aguado et al., 2015). هرچند این مدل‌ها برای توصیف توزیع اندازه ذرات نمونه‌های خاک و رسوبات آبی به طور وسیعی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند (Hwang et al., 2002; Zhao et al., 2011; Botula et al., 2013; Mehdizadeh et al., 2015; Menéndez-Aguado et al., 2015). اما با وجود انجام مطالعات بسیار گسترده در زمینه اندازه ذرات رسوبات بادی (Abuodha, 2003; Wang et al., 2003; Ghanei Bafghi & Yarahmadi, 2010; Mohammadkhan, 2012; Zhu et al., 2014)، کارایی این مدل‌ها در رابطه با نهشته‌های بادی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

در سال‌های اخیر با تسریع روند خشک شدن دریاچه ارومیه، کانون‌های فعال فرسایش بادی در بستر قدیمی دریاچه تشکیل شده که علاوه بر آسیب‌های معمول، شوری این رسوبات سبب افزایش چالش‌های مربوط به سلامتی انسان‌ها شده و محیط‌زیست منطقه را در معرض تهدیدهای جدی قرار داده است. بر اساس شواهد موجود، منطقه جبل‌کندی واقع در حاشیه شمال غربی دریاچه ارومیه به‌عنوان یکی از مهمترین کانون‌های ریزگرد دریاچه ارومیه شناخته شده است. در این ناحیه تپه‌های ماسه‌ای با سرعتی



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و نقاط نمونه‌برداری در بخشی از سواحل غربی دریاچه ارومیه

قرار گرفت. از سری الک‌های با قطر ۲۰۰۰، ۱۴۰۰، ۱۰۰۰، ۸۵۰، ۵۰۰، ۲۵۰، ۱۵۰، ۱۰۶، ۷۵ و ۵۳ میکرومتر به منظور انجام آزمایش غربال خشک استفاده شد. پارامترهای آمار توصیفی اندازه ذرات نهشته‌های بادی شامل میانگین، جورشدگی، چولگی و کشیدگی (جدول ۱) بر اساس روش Folk و Ward (۱۹۵۷) و با استفاده از صفحه گسترده مربوط به نرم‌افزار GRADISTAT محاسبه شدند. در روش مذکور مقیاس فی (ϕ) برای توصیف اندازه ذرات مورد استفاده قرار گرفت. روابط مورد استفاده و همچنین طبقه‌بندی مقادیر مربوط به جورشدگی، چولگی و کشیدگی به ترتیب در جدول ۱ آورده شده است و که در آن ϕ_x قطر ذرات (برحسب ϕ) در درصد فراوانی تجمعی X است.

منطقه جبل کندی در طی سال‌های گذشته بخشی از بستر دریاچه ارومیه بوده و پس از خشک شدن دریاچه، تپه‌های ماسه‌ای در آن شکل گرفته‌اند. ماسه‌زارهای موجود در منطقه جبل کندی در حال حاضر یکی از مناطق بحرانی از لحاظ فرسایش بوده و به‌عنوان مهمترین کانون ریزگرد اطراف دریاچه ارومیه محسوب می‌شود. از این رو، این منطقه برای این پژوهش انتخاب گردید.

برای تعیین توزیع اندازه ذرات، ۴۸ نمونه از عمق صفر تا ۵ سانتی‌متری سطح خاک و از رئوس یک شبکه منظم ۵۰۰×۵۰۰ متری جمع‌آوری گردید. نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل شده و پس از هوا خشک شدن، جرم ۱۰۰ گرم از نمونه‌ها به منظور انجام آزمایش غربال خشک مورد استفاده

جدول ۱- روابط مشخصات گرافیکی-لگاریتمی Folk و Ward (۱۹۵۷) و طبقه‌بندی مقادیر مربوط به جورشدگی، چولگی و کشیدگی (Blott and Pye, 2001)

کشیدگی	چولگی	انحراف معیار	میانگین		
I	S				
کشیدگی (K _G)	چولگی (Sk ₁)	جور شدگی (S ₁)			
<۰/۶۷	بسیار پلتي كورتیک	+۱/۰ تا +۰/۳	بسیار ریز اریب	<۰/۳۵	بسیار خوب جور شده
۰/۶۷-۰/۹۰	پلتي كورتیک	+۰/۱ تا +۰/۳	ریز اریب شده	۰/۵-۰/۳۵	خوب جور شده
۰/۹۰-۱/۱۱	مزو كورتیک	-۰/۱ تا +۰/۱	متقارن	۰/۵-۰/۷	تقریباً خوب جور شده
۱/۱۱-۱/۵۰	لیتو كورتیک	-۰/۳ تا -۰/۱	درشت اریب	۰/۷-۱/۰	بطور متوسط جور شده
۱/۵۰-۳/۰۰	بسیار لیتو كورتیک	-۱/۰ تا -۰/۳	بسیار درشت اریب	۱/۰-۲/۰	بطور ضعیف جور شده
>۳/۰۰	بی نهایت لیتو كورتیک	-	-	۲/۰-۴/۰	خیلی ضعیف جور شده
-	-	-	-	> ۴/۰	بی نهایت ضعیف جور شده

مدل‌های ریاضی توزیع اندازه ذرات

در این مطالعه با استفاده از نتایج آزمایش غربال خشک، منحنی تجربی توزیع اندازه ذرات رسوبات بادی به صورت تجمعی ترسیم شده و نه مدل ریاضی مختلف شامل مدل‌های لاگ-نرمال (Buchan, 1989)، نرمال (Buchan et al., 1993)، نمایی (Gimenez et al., 2001)، لگاریتمی (Zhuang et al., 2001)، لگاریتمی-نمایی (Kolev et al., 1996)، فرکتال (Bird et al., 2000)، ویبول (Assouline et al., 1998)، فردلانند (Fredlund et al., 2000) و سوربک (Menéndez-Aguado et al., 2015) بر روی داده‌های تجربی برازش شد. برازش مدل‌ها با استفاده روش رگرسیون

غیرخطی و بر مبنای حداقل نمودن مجموع مربعات خطای مدل در نرم‌افزار MATLAB انجام شد. جدول ۲ روابط ریاضی مربوط به مدل‌های نه‌گانه به همراه پارامترهای آنها را نشان می‌دهد. در این جدول d و F(d) به ترتیب بیانگر قطر ذرات و فراوانی تجمعی ذرات کوچکتر از d می‌باشد. مقایسه کارایی مدل‌های توزیع اندازه ارائه شده در جدول ۲ با استفاده از معیارهای مختلف کارایی شامل ضریب تبیین (R²)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و آماره آکائیک (AIC) انجام شد؛ که روابط مورد استفاده برای محاسبه این معیارها به ترتیب زیر است.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})(P_i - P_{mean})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{mean})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P_{mean})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$AIC = n \left[\ln(2f) + \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n-p} \right) + 1 \right] + p \quad (3)$$

در این روابط، O_i و P_i به ترتیب مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط پیش‌بینی شده توسط مدل در یک نقطه، O_{mean} و P_{mean} به ترتیب میانگین مقادیر مشاهده‌ای و پیش‌بینی شده توسط مدل، n تعداد نقاط و p تعداد پارامترهای مدل است.

جدول ۲- معادلات ریاضی مربوط به مدل‌های توزیع اندازه ذرات مورد استفاده*

نام مدل	نام اختصاری	معادله	پارامترهای مدل
نرمال	Norm	$F(d) = (1 + erf\left[\frac{d - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right])/2$	μ و σ
فرکنالی	Frac	$F(d) = Cd^{(3-D)}$	C و D
لاگ نرمال	Log-N	$F(d) = (1 + erf\left[\frac{\log(d) - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right])/2$	μ و σ
لگاریتمی	Log	$F(d) = a \ln d + b$	a و b
نمایی	Exp	$F(d) = Cd^{-s}$	c و s
لگاریتمی نمایی	Log-exp	$F(d) = a \exp(B \log d)$	a و B
فردلاند	Fred	$F(d) = \frac{1}{\ln\left[\exp(1) + \left(\frac{1}{d}\right)^n\right]^m} \left[1 - \frac{\left(\ln\left(1 + \frac{d_f}{d}\right)\right)^7}{\left(\ln\left(1 + \frac{d_f}{d_m}\right)\right)^7}\right]$	$d_m=0.0001$, d_f , m , n , a (mm)
ویبول	Wei	$F(d) = c + (1 - c)(1 - \exp(-aD^b))$ $D = \frac{d - d_{min}}{d_{max} - d_{min}}$	a , b , c
سوربک	Swer	$F(d) = \left[1 + \left[\frac{\ln\left(\frac{d_{max}}{d}\right)}{\ln\left(\frac{d_{max}}{d_{50}}\right)}\right]^b\right]$	d_{50} و B

*: در این روابط؛ $F(d)$ ، نشان‌دهنده فراوانی تجمعی ذرات با قطر کوچکتر از d ؛ erf ، تابع خطا و d_{max} و d_{min} به ترتیب برابر با حداکثر و حداقل قطر ذرات نمونه‌ها هستند.

پارامترهای آنها بهبود می‌یابد. با این حال افزایش تعداد پارامترها، نه تنها تفسیر نتایج مدل‌ها را دشوار می‌کند، بلکه

افزایش R^2 و کاهش RMSE نشان‌دهنده افزایش کارایی مدل خواهد بود. مطلوبیت برازش مدل‌ها با افزایش تعداد

در دامنه $840-100 \mu\text{m}$ (حساس به فرایند حرکت جهشی ذرات) و فراوانی ذرات با قطر کوچکتر از $100 \mu\text{m}$ (حساس به تعلیق) به‌عنوان دیگر شاخص‌های حساسیت به فرسایش بادی با استفاده از مدل بهینه محاسبه شده و توزیع مکانی شاخص‌های فرسایش‌پذیری اشاره شده به کمک نرم‌افزار ArcGIS ترسیم شد.

نتایج

توزیع اندازه رسوبات بادی

اندازه ذرات در ۴۸ نمونه رسوب بادی مورد مطالعه، شامل کلاس اندازه‌ای ماسه خیلی درشت تا ذرات کوچکتر از $53 \mu\text{m}$ میکرومتر بود (جدول ۳). کلاس اندازه‌ای ماسه ریز دارای دامنه فراوانی نسبی بین $36/4$ تا $87/8$ درصد را در نمونه‌های مورد مطالعه داشته و بیشترین فراوانی کلاس اندازه‌ای در تمامی نمونه‌ها را شامل می‌گردد.

کاربرد پارامترهای مدل را به‌عنوان شاخص‌های ارزیابی منحنی، پیچیده می‌نماید (Buchan et al., 1993). بر این اساس آماره آکائیک بهترین مدل مطلوب را با در نظر گرفتن کمترین مقدار خطا در عین داشتن کمترین تعداد پارامتر برازشی مشخص می‌کند. در واقع این معیار تعادلی میان دقت مدل و پیچیدگی آن برقرار کرده و مدل دارای کمترین مقدار آکائیک، کاراترین مدل از نظر خطا و تعداد پارامتر بود.

پس از تعیین بهترین مدل از نظر قابلیت برازش بر داده‌های مشاهده‌ای، شاخص‌های مختلف فرسایش‌پذیری بادی که در منابع مختلف مورد اشاره و تأکید قرار گرفته‌اند با استفاده از مدل مطلوب برآورد شدند. شاخص‌های فرسایش‌پذیری شامل فراوانی ذرات با قطر کوچکتر از $840 \mu\text{m}$ و همچنین فراوانی ذرات در دامنه $840-420 \mu\text{m}$ و فراوانی ذرات با قطر کوچکتر از $420 \mu\text{m}$ بود (Chepil, 1941). همچنین دامنه‌های اندازه ذرات پیشنهاد شده توسط Mirzamostafa و همکاران (۱۹۹۸)، شامل فراوانی ذرات

جدول ۳- مشخصات آماری فراوانی هریک از کلاس‌های اندازه‌ای در نمونه‌های نهشته‌های بادی

انحراف معیار	درصد فراوانی			دامنه کلاس اندازه (میلی‌متر)	کلاس اندازه‌ای
	حداکثر	حداقل	میانگین		
۴/۵۸	۱۹/۵۳	۰	۳/۱۴	۱-۲	ماسه خیلی درشت
۵/۳۷	۲۱/۵۸	۰/۰۹	۴/۵۸	۰/۵-۱	ماسه درشت
۶/۹۸	۲۸/۳۷	۱/۰۴	۱۲/۱۸	۰/۲۵-۰/۵	ماسه متوسط
۱۴/۲۷	۸۷/۸۳	۳۶/۳۵	۶۹/۱۱	۰/۱-۰/۲۵	ماسه ریز
۴/۹۹	۲۷/۰۷	۲/۸۸	۹/۶۱	۰/۰۵-۰/۱	ماسه خیلی ریز
۱/۸۶	۱۰/۲۹	۰/۱۱	۱/۳۹	<۰/۰۵	سیلت و رس

میانگین اندازه ذرات در نهشته‌های بادی منطقه مورد مطالعه برابر با $314 \mu\text{m}$ ($\phi 1/69$)، با دامنه‌ای بین $41 \mu\text{m}$ - $17 \mu\text{m}$ ($\phi 2/54$ تا $\phi 1/30$) بود (جدول ۴).

شاخص‌های آماری دانه‌بندی نمونه‌ها شامل قطر میانگین، جورشدگی یا انحراف معیار، چولگی و کشیدگی با استفاده از صفحات گسترده GRDISTAT محاسبه گردید.

جدول ۴- آماره‌های مربوط به توزیع اندازه ذرات براساس روش Ward و Folk

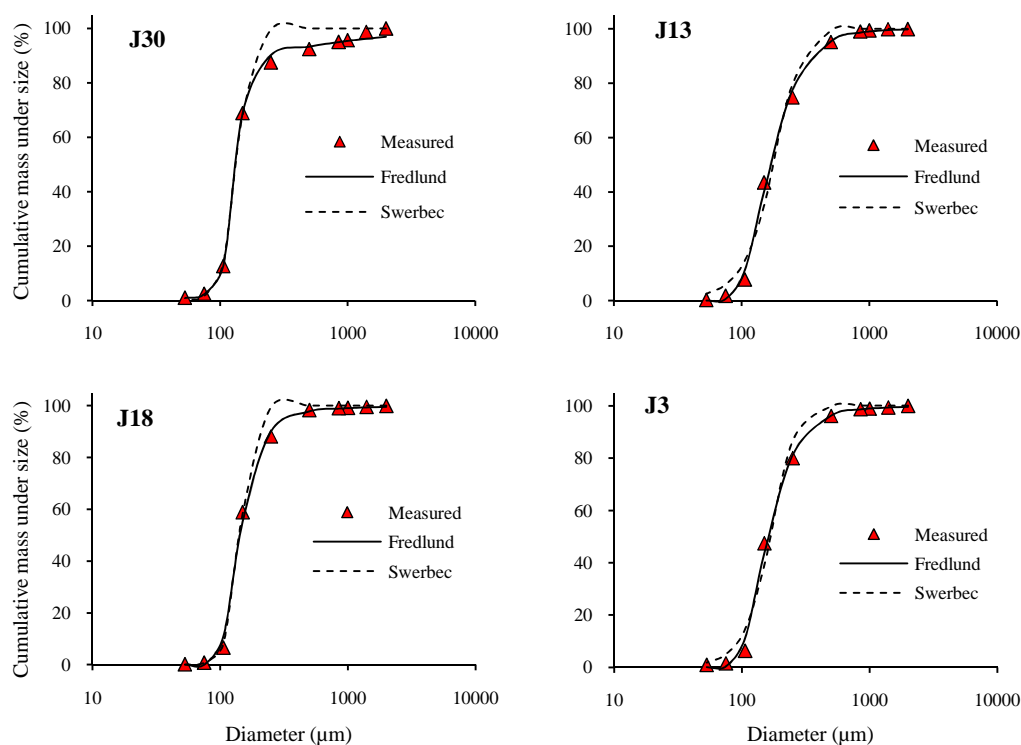
آماره	میانگین (میکرومتر)	جور شدگی	چولگی	کشیدگی
میانگین	۳۱۴	۰/۶۸	۰/۳۷	۸/۰۲
انحراف معیار	۵۱	۰/۳۲	۰/۸۲	۹/۳۸
حداقل	۱۷۲	۰/۲۵	-۳/۶	-۱/۳۷
حداکثر	۴۰۶	۱/۳۷	۱/۵۵	۴۵/۴۲

مقادیر جورشدگی در نهشته‌های بادی مورد مطالعه دارای دامنه‌ای بین ۰/۲۵ تا ۱/۳۷ (به‌طور میانگین ۰/۶۷) می‌باشد (جدول ۴) که بر اساس طبقه‌بندی درجه جورشدگی پیشنهادی توسط Ward و Folk (۱۹۵۷) و مطابق با جدول ۱، در کلاس‌های جورشدگی خوب ($< 0/35$) تا جورشدگی ضعیف قرار دارند. بطور کلی اختلاف معنی‌داری در جورشدگی رسوبات بخش‌های مختلف اطراف منطقه جبل کندی در جهت باد غالب مشاهده نشد. بر اساس جدول ۴، مقدار چولگی دامنه وسیعی بین ۳/۶- تا ۱/۵ را دربر گرفته است که در کلاس چولگی مثبت شدید تا چولگی شدید منفی قرار می‌گیرد (جدول ۱). چولگی مثبت مشخص‌کننده انحراف از میانگین به سمت ذرات ریز (مشخص‌کننده زیادی ذرات ریز) و چولگی منفی مشخص‌کننده انحراف از میانگین به سمت ذرات درشت (مشخص‌کننده وجود دامنه‌ای از ذرات درشت‌تر است) می‌باشد. بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه دارای چولگی مثبت و یا بسیار ریز اریب شده با میانگین اندازه ذرات نسبتاً درشت بودند. مقدار کشیدگی در بیشتر نمونه‌ها بسیار زیاد با میانگین ۸/۰۲ بود (جدول ۴) که در گروه بسیار لپتوکورتیک (Extremely leptokurtic) قرار می‌گیرد (جدول ۱).

ارزیابی کارایی مدل‌های توزیع اندازه ذرات

از نه مدل ریاضی شامل لاگ-نرمال، نرمال، لگاریتمی، نمایی، لگاریتمی-نمایی، فردلاند، فرکتال، ویبول و سوربک برای برازش توزیع اندازه ذرات استفاده شد. منحنی توزیع

اندازه ذرات برای چهار نمونه منتخب رسوبات بادی و همچنین برازش دو مدل فردلاند و سوربک بر داده‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. دامنه تغییرات ضرایب کارایی شامل ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و معیار اطلاعاتی آکائیک، برای نه مدل یادشده در ۴۸ نمونه مورد مطالعه، به شکل نمودار جعبه‌ای در شکل ۳ آورده شده است. میانگین ضریب تبیین (R^2) در مدل‌های مختلف دارای دامنه ۰/۷۱۳ تا ۰/۹۹۵ بود. بیشترین مقدار ضریب تبیین مربوط به مدل فردلاند بود و مدل‌های لاگ-نرمال، نرمال، ویبول و سوربک نیز دارای ضریب تبیین بزرگتر از ۰/۹۸۷ بوده و عملکرد مشابهی را ارائه کردند. کمترین مقدار ضریب تبیین مربوط به مدل لگاریتمی-نمایی بود، همچنین مدل‌های لگاریتمی، نمایی و فرکتال نیز دارای ضریب تبیین پایینی بودند. همچنین کمترین و بیشترین مقدار پراکندگی ضریب تبیین به ترتیب مربوط به مدل‌های لگاریتمی-نمایی و فردلاند بودند. ریشه میانگین مربعات خطا در دامنه‌ای بین ۰/۰۳۴ تا ۰/۳۱۷ در مدل‌های مختلف متغیر بود (شکل ۲). همان گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود ریشه میانگین مربعات خطا در مدل‌های لاگ نرمال، فردلاند و بعد مدل‌های سوربک، نرمال و ویبول دارای کمترین مقدار بود. مدل لگاریتمی دارای بیشترین ریشه میانگین مربعات خطا بود، همچنین مدل‌های فرکتال، لگاریتمی-نمایی و نمایی نیز دارای ریشه میانگین مربعات خطا بالایی بودند.

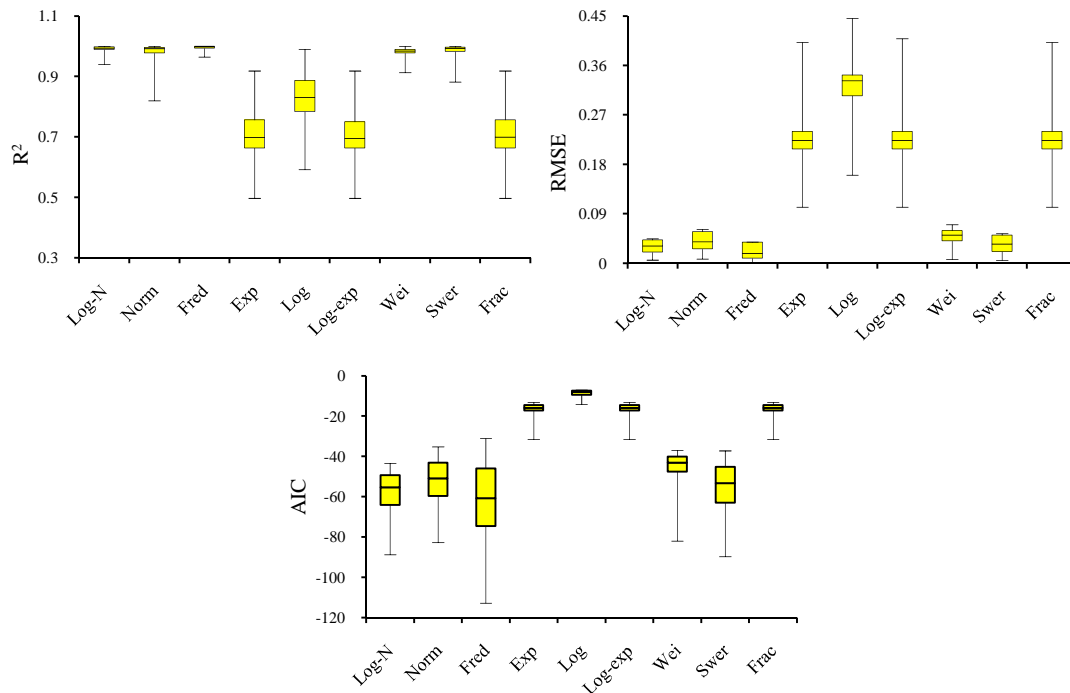


شکل ۲- منحنی توزیع اندازه ذرات برای چهار نمونه منتخب و چگونگی برازش دو مدل فردلاند و سوربک بر آنها

کاراثرین مدل در برازش داده‌های توزیع اندازه نهشته‌های بادی شناسایی گردید.

در مجموع همان گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود با توجه به هر سه ضریب کارایی، مدل فردلاند بهترین مدل برای برازش داده‌های رسوب در اطراف منطقه جبل کندی شناخته شد. مدل دو پارامتری لاگ-نرمال با اختلاف کمی از مدل فردلاند از نظر ضریب تبیین، ریشه میانگین مربعات خطا و معیار آکائیک، در رتبه دوم قرار گرفته و با دقت قابل قبولی می‌تواند برای تشریح توزیع اندازه ذرات در بیشتر نمونه‌های رسوبات بادی استفاده شود.

همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود در مجموع نتایج معیار آکائیک با نتایج ضریب تبیین همخوانی دارد. کمترین مقدار معیار آکائیک مربوط به مدل فردلاند با میانگین $-۶۹/۵$ و بیشترین آن مربوط به مدل لگاریتمی با مقدار میانگین $-۱۸/۸$ بود. این معیار تعداد پارامترها را نیز به‌عنوان یک عامل مهم در انتخاب مدل مناسب در نظر می‌گیرد، عبارت دیگر امتیاز منفی برای تعداد بیشتر پارامترهای مدل محاسبه می‌گردد، با وجود این مدل چهار پارامتری فردلاند در مقابل مدل‌های دو پارامتری مانند لاگ-نرمال، نرمال و سوربک و سه پارامتری ویبول به‌عنوان

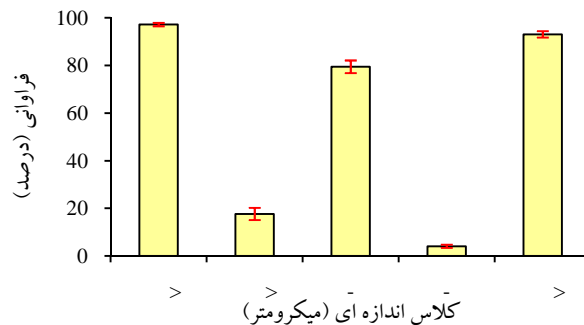


شکل ۳- تغییرات ضرایب کارایی برای مدل‌های مورد بررسی در نمونه‌های مورد مطالعه

نیز مورد بررسی قرار گرفتند. به‌طور میانگین نمونه‌ها به‌ترتیب دارای حدود $۹۳/۱ \pm ۱/۳$ و $۴/۱ \pm ۰/۷$ درصد ذرات کوچکتر از $۴۲۰ \mu\text{m}$ و $۴۲۰ - ۸۴۰ \mu\text{m}$ بودند (شکل ۴). تغییرات مکانی ذرات کوچکتر از $۴۲۰ \mu\text{m}$ و $۸۴۰ - ۴۲۰ \mu\text{m}$ به‌ترتیب در شکل‌های ۶ ب و ج ارائه شده است. همانطور که در شکل ۵ ب و ج مشاهده می‌شود تغییرات مکانی ذرات کوچکتر از $۴۲۰ \mu\text{m}$ و $۴۲۰ - ۸۴۰ \mu\text{m}$ بسیار نزدیک است، دلیل این امر نیز این است که بخش اعظم ذرات کوچکتر از $۸۴۰ \mu\text{m}$ (به‌طور میانگین حدود ۹۳٪) دارای قطر کوچک‌تر از $۴۲۰ \mu\text{m}$ هستند.

حساسیت به فرسایش بادی

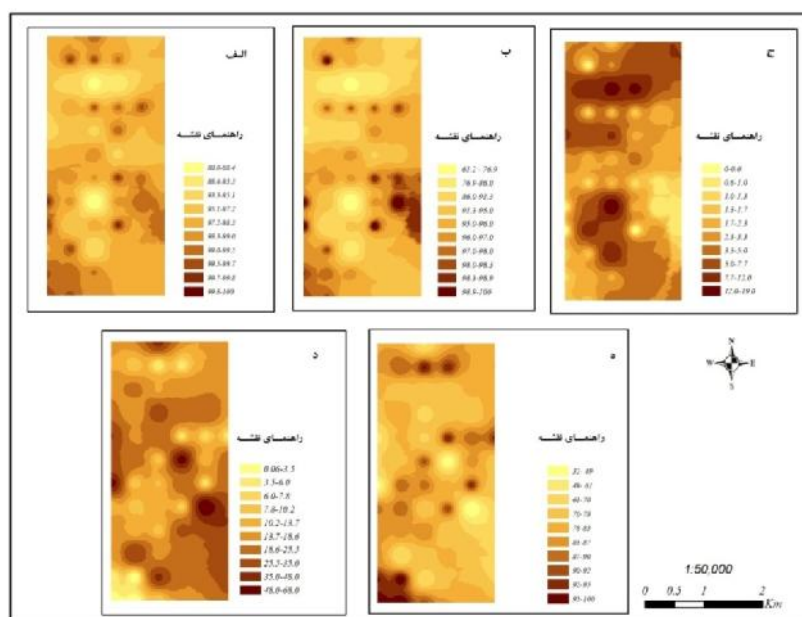
نمونه‌های مورد مطالعه به‌طور میانگین دارای ۹۷ درصد ذرات کوچکتر از $۸۴۰ \mu\text{m}$ بودند و بسیار مستعد فرسایش بادی می‌باشند (شکل ۴). تغییرات مکانی ذرات کوچکتر از $۸۴۰ \mu\text{m}$ در شکل ۵ الف نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ الف مشاهده می‌شود بر اساس این معیار تقریباً تمامی نمونه‌های جمع‌آوری شده از اطراف منطقه جبل کندی حساس به فرسایش بادی هستند. این معیار به تغییرات فرسایش‌پذیری نمونه‌های مورد مطالعه حساس نبود، زیرا تقریباً در همه نمونه‌ها ذرات کوچکتر از $۸۴۰ \mu\text{m}$ غالب بود. بنابراین اجزاء وزنی کوچکتر از $۴۲۰ \mu\text{m}$ و $۴۲۰ - ۸۴۰ \mu\text{m}$



شکل ۴- فراوانی کلاس‌های اندازه مربوط به فرسایش‌پذیری بادی

فراوانی ذرات کوچکتر از $100\mu\text{m}$ و $840\mu\text{m}$ – $100\mu\text{m}$ به ترتیب در شکل‌های ۶ د و ه نمایش داده شده است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که بیشتر نهشته‌های بادی در بخشی از سواحل غربی دریاچه ارومیه مستعد فرسایش بادی بوده که بخش اعظم این ذرات (۸۰٪) توسط فرایند جهش منتقل می‌شوند.

براساس مطالعات Mirzamostafa و همکاران (۱۹۹۸) دو کلاس اندازه‌ای شامل ذرات کوچکتر از $100\mu\text{m}$ به عنوان اندازه ذرات حساس به تعلیق و ذرات در دامنه $840\mu\text{m}$ – $100\mu\text{m}$ به عنوان قطر مواد جهشی مورد بررسی قرار گرفت. بطور میانگین نمونه‌ها دارای $17/2 \pm 2/5$ درصد ذرات کوچک‌تر از $100\mu\text{m}$ بوده و $79/5 \pm 2/6$ درصد ذرات در دامنه $840\mu\text{m}$ – $100\mu\text{m}$ بودند (شکل ۴). نقشه تغییرات مکانی



شکل ۵- نقشه تغییرات مکانی درصد فراوانی جرمی ذرات (الف) > 840 ، (ب) > 420 ، (ج) > 220 ، (د) > 100 و (ه) 840 – 100 میکرومتر با استفاده از درون‌یاب میانگین عکس فاصله (IDW)

بحث

غالب در این مطالعه (۱۲۵ تا ۲۵۰ میکرومتر) در این دامنه رسوبات بادی قرار می‌گیرد. میانگین اندازه ذرات در نهشته‌های بادی برابر با $314\mu\text{m}$ ($\phi 1/69$) بود که در مقایسه با سایر بیابان‌های جهان مانند بیابان‌های ایچینا در چین (Zhu, 2014)، تاکلامکان در چین (Zhu, 2007)، نامیب در نامیبی و آفریقای جنوبی (Lancaster, 1981)، ثار در هند (Goudie et al., 1973)، عربستان سعودی (Lancaster, 1981) و سیمون در استرالیا (Folk, 1971) دارای میانگین قطر بزرگتری می‌باشند (جدول ۵). البته مقدار میانگین اندازه ذرات در این مطالعه با برخان وایت سندز (Lancaster, 1995) در آمریکا قابل مقایسه

این مطالعه به منظور بررسی قابلیت مدل‌های ریاضی در تشریح توزیع اندازه نهشته‌های بادی و پیش‌بینی حساسیت به فرسایش بادی با استفاده از توزیع اندازه ذرات در تپه‌های ماسه‌ای بخشی از سواحل غربی دریاچه ارومیه در نزدیکی منطقه جبل کندی انجام شد. در واقع این منطقه به عنوان یکی از کانون‌های فعال ریزگرد در اطراف دریاچه ارومیه شناسایی شده است. نتایج نشان داد که اندازه ذرات غالب، ماسه ریز با میانگین حدود ۷۰ درصد بود. در مقیاس جهانی اندازه ذرات غالب در نهشته‌های بادی بین ۱۲۵ تا ۵۰۰ میکرومتر (۱ تا ۳ فی) متغیر می‌باشد (Bagnold, 1937) که اندازه ذرات

می‌باشد (جدول ۵).

پارامتر جورشدگی در نهشته‌های بادی مورد مطالعه بطور میانگین برابر با ۰/۶۷ بود که در کلاس جورشدگی تقریباً خوب تا جورشدگی متوسط قرار داشت. Bagnold (۱۹۴۱) نشان داد که بهترین مقادیر جورشدگی برای نهشته‌های بادی مربوط به ماسه متوسط تا ریز بوده و جورشدگی با کوچکتر شدن و یا بزرگتر شدن رسوبات بدتر می‌شود. بطور کلی اختلاف معنی‌داری در جورشدگی رسوبات بخش‌های مختلف اطراف منطقه جبل کنده در جهت باد غالب مشاهده نشد. بدین معنی که هیچگونه الگوی جورشدگی اندازه ذرات در جهت باد غالب در منطقه وجود نداشت که با نتایج مطالعات Zhu و همکاران (۲۰۱۴) در چین و Abuodha (۲۰۰۳) در کنیا مطابقت داشت. هرچند Qian و همکاران (۲۰۰۹) در چین، جورشدگی اندازه ذرات با توجه به موقعیت نمونه بر روی تپه‌های ماسه‌ای در جهت باد غالب را مشاهده کردند.

مقدار چولگی دامنه وسیعی داشت که از کلاس چولگی مثبت شدید تا چولگی شدید منفی قرار می‌گرفت که بسیار نزدیک به نتایج Zhu و همکاران (۲۰۱۴) در بیابان اجینای

چین بود. چولگی مثبت مشخص کننده انحراف از میانگین به سمت ذرات ریز و چولگی منفی مشخص کننده انحراف از میانگین به سمت ذرات درشت می‌باشد. مقدار چولگی در توزیع مربوط به نمونه‌ها به‌طور متوسط برابر با ۰/۳۷ بود. بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه دارای چولگی مثبت و یا بسیار ریز اریب شده با میانگین اندازه ذرات نسبتاً درشت بودند که با نتایج مطالعات Zhu و همکاران (۲۰۱۴) در چین مطابقت داشت. به‌طور کلی اختلافات در توزیع اندازه ذرات در نمونه‌های مختلف نسبتاً کم بود که با نتایج Abuodha (۲۰۰۳) نیز همخوانی دارد.

به‌طور کلی میانگین اندازه ذرات، جورشدگی، چولگی و کشیدگی در نهشته‌های بادی منطقه مطالعاتی برابر با ۰/۳۱۴ میلی‌متر (۱/۶۹ ϕ)، ۰/۶۷، ۰/۳۷ و ۸/۰۲ بود. به‌طوری که بیشتر نمونه‌های مورد مطالعه دارای میانگین اندازه ذرات نسبتاً درشت با چولگی مثبت و یا بسیار ریز اریب شده و در گروه بسیار لیتوکورتیک قرار می‌گرفتند. در مقایسه با اغلب بیابان‌های جهان می‌توان بیان کرد که منطقه مورد مطالعه شامل ماسه‌های نسبتاً درشت‌تر، با جورشدگی ضعیف بود (جدول ۵).

جدول ۵- میانگین اندازه ذرات تپه‌های ماسه‌ای خطی و یا برخان در نقاط مختلف جهان (بر حسب فی)

انحراف معیار	میانگین	منطقه
۰/۵۶-۰/۳۸	۳/۰۱-۱/۶۸	سرچشمه آولیس (Menéndez-Aguado <i>et al.</i> , 2015)
۰/۶	۲/۲۶	بیابان ایجینا (Zhu <i>et al.</i> , 2014)
۰/۳۹	۳/۰۴	بیابان تاکالامکان (Zhu, 2007)
۰/۴۸-۰/۲۹	۲/۴۵-۱/۷۷	ساحل مالیندی (Abuodha, 2003)
۰/۴۹	۲/۱۶	جنوب غرب بیابان کالاهاری (Lancaster, 1986)
۰/۳۷	۲/۴۴	بیابان نامیب (Lancaster, 1981)
۰/۵۵	۲/۲	بیابان نامیب (برخان) (Lancaster, 1995)
۰/۴۶	۲/۳۷	بیابان لیبی (Ahlbrandt, 1979)
۰/۵۳	۲/۰۲	حوزه کانینگ استرالیا (Ahlbrandt, 1979)
۰/۴۳	۲/۵۳	بیابان سیمسون (Folk, 1971)
۰/۸۱-۰/۳۰	۲/۹۰-۱/۶۲	بیابان سیمسون (Wasson, 1983)
۰/۵۶	۲/۶۵	بیابان نار (Goudie <i>et al.</i> , 1973)
۰/۴۳	۱/۸۷	بیابان سینا (Tsoar, 1978)

انحراف معیار	میانگین	منطقه
۰/۴۱	۲/۴۳	بیابان گارن (برخان) (Lancaster, 1995)
۰/۴۲	۲/۴۶	تپه‌های ماسه‌ای الگودان (برخان) (Lancaster, 1995)
۰/۵۹	۱/۶۱	وایت سندز (برخان) (Lancaster, 1995)
۰/۵۱	۲/۰۲	ساحل اسکلتون (برخان) (Lancaster, 1995)
۰/۴۶	۲/۲۷	دریای سالتون (Lancaster, 1995)
۰/۵۳	۳/۲۵	تونس (Lancaster, 1995)
۰/۴۹	۱/۸۰	تپه‌های ماسه‌ای کلسو (Lancaster, 1995)
۰/۳۲	۲/۶۷	عربستان سعودی (Lancaster, 1995)
۰/۶۰	۲/۲۰	موریتانی (Lancaster, 1995)

اندازه رسوبات ماسه‌ای اطراف دریاچه ارومیه را تشریح کند. نکته قابل توجه این است که در مجموعه داده‌های مورد مطالعه، مدل چهار پارامتری فردلاند با فاصله کمی از مدل دو پارامتری لاگ-نرمال عملکرد بهتری ارائه کرد که نشان می‌دهد مدل لاگ-نرمال نیز توانایی مطلوبی در توصیف توزیع اندازه ذرات نهشته‌های بادی دارد. Hwang و همکاران (۲۰۰۲) نیز کارایی مطلوب مدل لاگ نرمال را گزارش کرده‌اند.

ارزیابی حساسیت به فرسایش بادی نمونه‌های مورد مطالعه نشان داد که به‌طور میانگین نهشته‌های موجود در منطقه دارای ۹۷ درصد ذرات کوچکتر از $840\mu\text{m}$ بوده و بسیار مستعد فرسایش بادی می‌باشند که این یافته با نتایج Chandler و همکاران (۲۰۰۵) همخوانی دارد. براساس پیشنهاد Mirzamostafa و همکاران (۱۹۹۶) مبنی بر حساسیت ذرات کوچکتر از $100\mu\text{m}$ به فرایند تعلیق و حساسیت ذرات در دامنه $840\mu\text{m}$ – $100\mu\text{m}$ به فرایند جهش، می‌توان گفت که در حدود ۸۰ درصد از ذرات قابلیت انتقال توسط فرایند جهش و حدود ۱۷ درصد از ذرات نیز حساسیت بالایی نسبت به انتقال توسط فرایند تعلیق را دارند.

بطور کلی نتایج این پژوهش قابلیت مدل‌های ریاضی در تشریح توزیع اندازه نهشته‌های بادی در بخشی از سواحل غربی دریاچه ارومیه را روشن کرد. بر اساس نتایج، مدل فردلاند بخوبی توانست توزیع اندازه نهشته‌های بادی اطراف

ارزیابی ضرایب کارایی در مدل‌های نه‌گانه مورد برازش نشان داد که بیشترین مقدار ضریب تبیین مربوط به فردلاند است. همچنین مدل‌های لاگ-نرمال، نرمال، ویبول و سوربک نیز دارای ضریب تبیین بالایی بوده و عملکرد مشابهی را ارائه کردند. کمترین مقدار ضریب تبیین مربوط به مدل لگاریتمی-نمایی بود، همچنین مدل‌های لگاریتمی، نمایی و فرکتال نیز دارای ضریب تبیین پایینی بودند. Zolfaghari و همکاران (۲۰۱۴) نیز به دقت پایین مدل فرکتال در توصیف توزیع اندازه ذرات خاک‌های ماسه‌ای اشاره کرده‌اند. به‌طور کلی نتایج معیار آکائیک با نتایج ضریب تبیین همخوانی داشت. کمترین مقدار معیار آکائیک مربوط به مدل فردلاند و بیشترین آن مربوط به مدل لگاریتمی بود. با وجود اینکه معیار یادشده، امتیاز منفی برای تعداد بیشتر پارامترهای مدل محاسبه می‌کند، اما مدل چهار پارامتری فردلاند در مقابل مدل‌های دو پارامتری مانند لاگ-نرمال، نرمال و سوربک و سه پارامتری ویبول به‌عنوان کاراترین مدل در برازش داده‌های توزیع اندازه نهشته‌های بادی شناسایی گردید که با نتایج Mehdizadeh و همکاران (۲۰۱۵)، Shangguan و همکاران (۲۰۱۴) و Hwang و همکاران (۲۰۰۲) در نمونه‌های خاک مطابقت دارد. هرچند Hwang و همکاران (۲۰۰۲) اظهار نمودند که بافت نمونه می‌تواند عملکرد مدل‌های توزیع اندازه ذرات را تحت تأثیر قرار دهد و کارایی نسبی مدل فردلاند با افزایش مقدار رس افزایش می‌یابد، اما مدل فردلاند به خوبی توانست توزیع

- lognormal model to particle-size distribution in soils. *Soil Science*, 147: 155-161.
- Buchan, G. D., Grewal, K. S. and Robson, A. B., 1993. Improved models particle diameter and standard deviation from sand, silt, and clay of particle-size distribution: an illustration of model comparison fractions, *Soil Science*, 152(4): 427-431.
- Chandler, D. G., Saxton, K. E. and Busacca, A. J., 2005. Predicting wind erodibility of loessial soils in the Pacific Northwest by particle sizing. *Arid Land Research and Management*, 19(1): 13-27.
- Chepil, W. S., 1941. Relation of wind erosion to the dry aggregate structure of a soil. *Scientific Agriculture*, 21(8):488-507.
- Flemming, B. W., 2007. The influence of grain-size analysis methods and sediment mixing on curve shapes and textural parameters: implications for sediment trend analysis. *Sedimentary Geology*, 202(3): 425-435.
- Folk, R. L. and Ward, W. C., 1957. The Brazos river bar. a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, 27, 3-26.
- Folk, R. L., 1971. Longitudinal dunes of the northwestern edge of the Simpson Desert, Northern Territory, Australia. 1. Geomorphology and grain size relationships. *Sedimentology* 16: 5-54.
- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G. and Wilson, G. W., 2000. An equation to represent grain-size distribution. *Canadian Geotechnical Journal*, 37(4): 817-827.
- Fryrear, D. W., Bilbro, J. D., Saleh, A., Schomberg, H., Stout, J. E. and Zobeck, T. M., 2000. RWEQ: Improved wind erosion technology. *Journal of soil and water conservation*, 55(2): 183-189.
- Ghanei Bafghi, M. J. and Yarahmadi, A. R. 2010. Investigation of relationship between granulometric characteristics of sand dune deposits and erosive wind direction using geostatistics in Hassan Abad of Bafgh. *Journal of Range and Watershed Management. Iranian Journal of Natural Resources*, 63(2): 235-248.
- Gimenez, D., Rawls, W. J., Pachepsky, Y. and Watt, J. P. C., 2001. Prediction of a pore distribution factor from soil textural and mechanical parameters. *Soil science*, 166(2): 79-88.
- Goudie, A. S., Allchin, B., Hegde, K. T. M., 1973. The former extensions of the great Indian sand desert. *The Geographical Journal*, 139: 243-257.
- Gupta, A. and Yan, D. S., 2006. *Mineral processing design and operation: an introduction*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands.
- Hwang, S. I., Lee, K. P., Lee, D. S. and Powers, S. E., 2002. Models for estimating soil particle-size distributions. *Soil Science Society of America Journal*, 66(4): 1143-1150.
- Indraratna, B., Nguyen, V. T. and Rujikiatkamjorn, C., 2012. Hydraulic conductivity of saturated granular soils determined using a constriction-based
- دریاچه ارومیه را تشریح کند. از این رو، این مدل را می توان به عنوان مدلی کارآمد در استخراج منحنی پیوسته ای از توزیع اندازه ذرات معرفی و پیشنهاد کرد. بر این اساس پیشنهاد می شود کارایی این مدل با تعداد بیشتری از نمونه های رسوبات بادی در مناطق مختلف کشور مورد اعتبارسنجی قرار گیرد تا بتوان از آن به عنوان یک مدل استاندارد استفاده کرد. بنابراین با توجه به حساسیت بسیار زیاد نهشته های بادی موجود، استفاده از روش های حفاظت خاک به منظور کاهش اثرات زیان بار رسوبات بادی در منطقه ضروریست. از آنجایی که استقرار گیاه در منطقه بدلیل شوری بالای نهشته ها بسیار دشوار است، از این رو پیشنهاد می شود تا در قدم اول با استفاده از مالچ اقدام به تثبیت منطقه گردد.

منابع مورد استفاده

- Abuodha, J.O.Z., 2003. Grain size distribution and composition of modern dune and beach sediments, Malindi Bay coast, Kenya. *Journal of African Earth Sciences*, 36(1): 41-54.
- Ahlbrandt, T.S., 1979. Textural parameters of aeolian deposits. 51-89. In: McKee, E. D. (Eds.), *A Study of Global Sand Sesa*. US Geological Survey Professional Paper 1052, Washington.
- Assouline, S., Tessier, D. and Bruand, A., 1998. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resources Research*, 34(2): 223-231.
- Bagnold, R. A., 1937. The size-grading of sand by wind. *Proceedings of the Royal Society of London, Mathematical and Physical Sciences*, 163 (9): 250-264.
- Bagnold, R. A., 1941. *The physics of blown sand and desert dunes*. Chapman and Hall, London, 265p.
- Bird, N. R. A., Perrier, E. and Rieu, M., 2000. The water retention function for a model of soil structure with pore and solid fractal distributions. *European Journal of Soil Science*, 51(1): 55-63.
- Blott, S. J. and Pye, K., 2001. GRADISTAT, a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(11): 1237-1248.
- Boadu, F. K., 2000. Hydraulic conductivity of soils from grain-size distribution: new models. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(8): 739-746.
- Botula, Y. D., Cornelis, W. M., Baert, G., Mafuka, P. and Van Ranst, E., 2013. Particle size distribution models for soils of the humid tropics. *Journal of Soils and Sediments*, 13(4): 686-698.
- Buchan, G. D., 1989. Applicability of the simple

- and Gallego, J. R., 2011. Feasibility study on the use of soil washing to remediate the As-Hg contamination at an ancient mining and metallurgy area. *Journal of hazardous materials*, 196: 93-100.
- Sun, D., Bloemendal, J., Rea, D. K., Vandenberghe, J., Jiang, F., An, Z. and Su, R., 2002. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sedimentary Geology*, 152(3): 263-277.
- Tsoar, H., 1978. The Dynamics of Longitudinal Dunes: Final Technical Report. US Army European Research Office, 171 p.
- Wang, X., Dong, Z., Zhang, J., Qu, J. and Zhao, A., 2003. Grain size characteristics of dune sands in the central Taklimakan Sand Sea. *Sedimentary Geology*, 161(1): 1-14.
- Wasson, R. J., 1983. Dune sediment types, sand colour, sediment provenance and hydrology in the Strzelecki-Simpson Desert, Australia. 121-139. In: Brookfield, M. E. and Ahlbrandt, T.S. (Eds.), *Eolian Sediments and Processes*. Elsevier, Amsterdam, 196p.
- Wills B. A. and Napier-Munn T. J., 2006. Mineral processing technology. Butterworth-Heinemann, Massachusetts, USA.
- Woodruff, N. P. and Siddoway, F. H., 1965. A wind erosion equation. *Soil Science Society of America Journal*, 29(5): 602-608.
- Zhao, P., Shao, M. A. and Horton, R., 2011. Performance of soil particle-size distribution models for describing deposited soils adjacent to constructed dams in the China Loess plateau. *Acta Geophysica*, 59(1): 124-138.
- Zhu, B., 2007. Geochemistry, hydrochemistry and sedimentology of the Taklamakan desert in Tarim basin, NW China. Ph.D Thesis, Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences (IGGCAS), Beijing, China.
- Zhu, B. Q., Yu, J. J., Rioual, P. and Ren, X. Z., 2014. Particle size variation of aeolian dune deposits in the lower reaches of the Heihe River basin, China. *Sedimentary Geology*, 301: 54-69.
- Zhuang, J., Jin, Y. and Miyazaki, T., 2001. Estimating water retention characteristic from soil particle-size distribution using a non-similar media concept. *Soil Science*, 166(5): 308-321.
- Zobeck, T. M. and Van Pelt, R. S., 2006. Wind-induced dust generation and transport mechanics on a bare agricultural field. *Journal of hazardous materials*, 132(1): 26-38.
- Zolfaghari, A., Tirgharsoltani, M. T., Yazdani, M. R and E. Soleimani-Sardo. 2014. Investigation of models for describing soil particle size distribution. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 45(2): 199-20.
- technique. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(5): 607-613.
- Kolev, B., Rousseva, S. and Dimitrov, D., 1996. Derivation of soil water capacity parameters from standard soil texture information for Bulgarian soils. *Ecological Modelling*, 84(1): 315-319.
- Krumbein, W. C. and Pettijohn, F. J., 1938. *Manual of Sedimentary Petrography*. Appleton-Century Crofts, New York, 549p.
- Lancaster, N., 1981. Grain size characteristics of Namib Desert linear dunes. *Sedimentology*, 28: 115-122.
- Lancaster, N., 1995. *Geomorphology of Desert Dunes*. Routledge, London, 290p.
- Livingstone, I. and Warren, A., 1996. *Aeolian geomorphology: an introduction*. Longman. 211p.
- Mahmoodabadi, M., Dehghani, F. and Azimzadeh, H. R., 2011. Effect of soil particle size distribution on wind erosion rate. *Journal of Soil Management and Sustainable Production*, 1(1):81-97.
- Mehdizadeh, L., Asadzadeh F. and Samadi, A., 2015. Application of mathematical models to describe the particle size distribution of sediments behind successive check dams. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 6(4): 323-336.
- Menéndez-Aguado, J. M., Peña-Carpio, E. and Sierra, C., 2015. Particle size distribution fitting of surface detrital sediment using the Swrebec function. *Journal of Soils and Sediments*, 15(9): 2004-2011.
- Mirzamostafa, N., Stone, L. R., Hagen, L. J. and Skidmore, E. L., 1998. Soil aggregate and texture effects on suspension components from wind erosion. *Soil Science Society of America Journal*, 62(5): 1351-1361.
- Mohammadkhan, S., 2012. Grain Size and Shape of Sand Grains in Ergs of Iran. *Desert*, 17(1): 57-64.
- Musila, W. M., 1998. Floristic composition, structure and distribution patterns of coastal sand dune vegetation: a case study of the coastal dunes between Malindi and Mambui. Ph.D. thesis, Moi University, Eldoret, Kenya, 160p.
- Qian, Y., Wu, Z., Yang, H. and Jiang, C., 2009. Spatial heterogeneity for grain size distribution of eolian sand soil on longitudinal dunes in the southern Gurbantunggut Desert. *Journal of Arid Land*, 1(1): 26-33.
- Shao, Y. P., Raupach, M. R. and Leys, J. F., 1996. A model for predicting aeolian sand drift and dust entrainment on scales from paddock to region. *Soil Research*, 34(3): 309-342.
- Sharratt, B., Feng, G. and Wendling, L., 2007. Loss of soil and PM10 from agricultural fields associated with high winds on the Columbia plateau. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(4): 621-630.
- Sierra, C., Menéndez-Aguado, J. M., Afif, E., Carrero, M.

Predicting wind erodibility of sand dunes by particle size distribution models in parts of western coast of Urmia Lake

F. Asadzadeh^{1*}, M. Khodadadi² and E. Ehsan-Malahat³

1*- Corresponding author, Assistant Professor, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran, Email: f.asadzadeh@urmia.ac.ir

2- Assistant Professor, Nuclear Science and Technology Research Institute (NSTRI), Nuclear Agriculture Research School, Department of Soil, Water and Plant Nutrition, Karaj, Iran

3- M.Sc. Student, Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran

Received: 3/4/2016 Accepted: 7/17/2016

Abstract

Huge parts of Urmia Lake have been dried up in recent years. As a result, vast areas of salty fine sand dunes, which are very susceptible to wind erosion, have been formed. This study was conducted to investigate the performance of Particle Size Distribution (PSD) models in description of sand dune PSDs and predicting wind erodibility by using PSD models in parts of western coast of Urmia Lake. Totally, 48 samples from a grid of 500m × 500m were collected. PSD of the samples was determined by dry sieving method. Statistical parameters of grain size including mean, sorting, skewness and kurtosis were calculated. Performance of nine *PSD models* in describing the grain size distribution was assessed by the coefficient of determination (R^2), Root mean square error (RSME) and Akaike criterion (AIC) of the models. To determine wind erodibility of sand dunes, mass fractions of aggregates <840, <420, 420-840, <100 and 100-840 μm in diameter were determined. Results showed that average of mean grain size of sand dune samples was 310 μm (1.69ϕ), which in comparison with many other desert areas of world, are composed of relatively coarse sands, poorly sorted and very leptokurtic. According to the different efficiency, the Fredlund model showed the best performance in describing PSD of the samples. Averagely, around 97% of particles of the samples are less than 840 μm in diameter therefore the study area is very susceptible to wind erosion. About 80% of particles i accounted for particles susceptible to erosion by the processes of suspension and 17% particles are prone to erosion by processes of saltation.

Keywords: Sand dunes, particle size distribution models, wind erodibility, Urmia Lake.