

بررسی صحت و دقت نقشه فرسایش پذیری سنگ ها در تهیه نقشه انواع فرسایش به کمک سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

دکتر علی محمدی ترکشوند*

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت

دکتر علیرضا اسلامی

استادیار دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت

وحید شادپرور

دانش آموخته دانشگاه آزاد اسلامی واحد رشت

چکیده

امکان استفاده از نقشه فرسایش پذیری سنگ ها (حساسیت سنگ ها به فرسایش) به عنوان یک مدل تهیه نقشه انواع فرسایش در حوزه پایین دست سد لتیان بررسی شد. هر یک از نقشه های رقومی واقعیت زمینی فرسایش های سطحی، شیبی، خندقی و اشکال فرسایش با لایه فرسایش پذیری سنگ ها قطع داده شد و صحت، خطا و دقت این لایه به عنوان یک مدل در برآورد چهره های فرسایش محاسبه گردید. نتایج نشان می دهد که صحت نقشه فرسایش پذیری سنگ ها در تهیه نقشه فرسایش های سطحی، شیبی، خندقی و اشکال فرسایش به ترتیب ۵۹/۱، ۵۹/۹، ۷۱/۹ و ۴۲/۹ درصد است. نقشه

* E-mail: . mohammadit_a@yahoo.com

فرسایش پذیری سنگ‌ها فقط با پذیرش ۲۸/۱ درصد خطا می‌تواند در تهیه نقشه فرسایش خندقی به کار رود و در تهیه نقشه فرسایش‌های سطحی و شیاری به ویژه نقشه اشکال فرسایش دارای صحت پایینی است، لذا نمی‌تواند به عنوان نقشه واحدهای کاری در تهیه نقشه اشکال فرسایش استفاده شود.

واژگان کلیدی: فرسایش‌پذیری سنگ‌ها، فرسایش، سامانه اطلاعات جغرافیایی

۱. مقدمه

فرسایش خاک یک مشکل ژئوزیست محیطی در کشورهای نیمه مرطوب و خشک مدیترانه‌ای است که منجر به تخریب خاک می‌گردد (بوخیر و همکاران، ۲۰۰۶). اثرات مستقیم و غیرمستقیم آن از جمله از دست رفتن خاک و پوشش گیاهی، تخریب اراضی کشاورزی، بیابانی شدن و پر شدن مخازن سدها سبب شده که حفاظت خاک به یک ضرورت اجتناب ناپذیر تبدیل شود (کولی و همکاران، ۲۰۰۲). اجرای پروژه‌های حفاظت خاک منوط به تشخیص و نقشه‌برداری مناطق فرسایش یافته و اشکال فرسایش است (موسا و همکاران، ۲۰۰۲؛ سوچره و همکاران، ۲۰۰۵). عوامل مختلفی در بروز فرسایش به اشکال مختلف مؤثرند که از آن جمله می‌توان به فرسایش پذیری سنگ‌ها یا به عبارتی حساسیت سنگ‌ها به فرسایش اشاره نمود (محمدی ترکشوند، ۲۰۰۸).

واحدهای مختلف سنگی از نظر حساسیت به فرسایش در کلاس‌های مختلفی قرار می‌گیرند. این واحدهای سنگی بر اساس مقاومتی که در برابر فرسایش دارند، ضریب ۱ تا ۲۰ می‌گیرند، طوری که واحدهای با مقاومت کمتر، ضریب کمتر و واحدهای با مقاومت بیشتر، ضریب بیشتر می‌گیرند (فیض نیا، ۱۳۷۴). رضایی و همکاران (۱۳۸۴) واحدهای سنگی مختلف را از نظر امکان گروه‌بندی هیدرولوژیکی در حوزه آبخیز سفیدرود با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بررسی نمودند. قادری و قدوسی (۱۳۸۴) نیز شدت فرسایش‌های سطحی و خندقی را نسبت به واحدهای اراضی و واحدهای سنگی مورد ارزیابی قرار دادند. واحدهای سنگی و حساسیت آنها به فرسایش یکی از عوامل مهم در بروز فرسایش با چهره‌های مختلف است. نقشه‌برداری چهره‌های فرسایشی و شدت آنها در مطالعات فرسایش و رسوب، بسیار حائز اهمیت بوده و اولویت برنامه‌های حفاظت خاک را مشخص

می‌سازد (محمدی ترکشوند و نیک‌کامی، ۱۳۸۶). بررسی‌های مربوط به فرسایش و رسوب، بیشتر معطوف به تهیه نقشه‌های کمی فرسایش و رسوب بوده و کمتر به تهیه نقشه‌های اشکال فرسایش توجه شده است (محمدی ترکشوند، ۲۰۰۸). مطالعات محدودی در مورد تهیه نقشه اشکال فرسایش صورت گرفته، مثل مطالعات GLASOD¹ که فرسایش را بر انواع آبی، بادی، فیزیکی و شیمیایی تقسیم بندی می‌کند (الدمن، ۱۹۹۱). حاجی قلیزاده (۱۳۸۵) از روش تفسیر و پردازش رقومی تصاویر ماهواره‌ای ETM+ سال ۲۰۰۲ برای تهیه شکل فرسایش در پنج حوزه استان تهران استفاده نمود. طبق تحقیق وی، تشخیص فرسایش‌های سطحی و شیاری با توجه به مقیاس شکل و نیز قدرت تفکیک تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده، کار بسیار دشواری ارزیابی شد و لذا در انجام تحقیق، در محیط GIS اقدام به جداسازی پلی‌گون‌های فرسایش خندقی با شدت کم، متوسط و زیاد نمود و در صحرا پلی‌گون‌های تفکیک شده با شرایط طبیعی تطبیق داده شد، و در صورت عدم تطابق با شرایط واقعی، اصلاح گردید. نجابت (۱۳۸۱) امکان‌سنجی پردازش رقومی تصاویر ماهواره‌ای در تهیه نقشه فرسایش سطحی خاک در استان فارس را بررسی و تأیید نمود.

طی تحقیقی در منطقه تیتا¹ در جنوب شرقی کنیا، سیروویو و همکاران (۲۰۰۴) جهت تشخیص فرسایش خندقی در دو مقیاس بزرگ و کوچک، از سنجش از دور (تفسیر عکس‌های هوایی) و GIS استفاده نمودند. شدت و پراکنش فرسایش خندقی و تغییرات آن در طول ۵۰ سال گذشته را با تفسیر عکس‌های هوایی، و فاکتورهای اصلی موثر بر فرسایش خندقی را توسط عملیات میدانی مشخص نمودند. سیدورچوک و همکاران (۲۰۰۳) در حوزه امبولوزی^۲ آفریقای جنوبی، بر طبق نوع فرسایش، درجه، گسترش و تراکم اشکال آن بر روی عکس‌های هوایی سال ۱۹۹۶ نسبت به جداسازی واحدهای فرسایشی اقدام نمودند. آنها سپس طبق روش وان‌زوی‌دام (۱۹۸۵)، با توجه به درصد پوشش گیاهی نسبت به طبقه‌بندی انواع فرسایش اقدام نمودند. با توجه به این که میزان فرسایش شیاری و بین شیاری به وسیله مدل USLE تخمین زده

¹ Global Assessment Soil Degradation

¹ Taita

² Mbuluzi

می‌شد، برای تخمین فرسایش خندقی از مدل پایدار فرسایش خندقی (سیدورچوک و همکاران، ۲۰۰۳) استفاده کردند.

در مطالعات مختلف، از نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش به عنوان یک لایه اطلاعاتی در تلفیق با لایه‌های اطلاعاتی دیگر در تهیه نقشه چهره‌های فرسایش استفاده می‌شود، لذا سؤال اینجاست که در مقیاس‌های ملی مثل ۱:۲۵۰۰۰۰، آیا واحدهای نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش از نظر اشکال فرسایش و شدت آنها همگن هستند؟ ارتباط اشکال فرسایش و شدت آنها با حساسیت سنگ‌ها به چه صورت است؟ همچنین صحت، خطا و دقت نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش (فرسایش‌پذیری سنگ‌ها) در تهیه نقشه‌های فرسایش سطحی، شیاری، خندقی و اشکال فرسایش چگونه است؟ در پاسخ به سؤالات مطروحه تحقیق حاضر طراحی و انجام شد.

۲. مواد و روش‌ها

حوزه پایین دست سد لتیان بین طول‌های شرقی $۵۱^{\circ}۳۴'$ و $۵۲^{\circ}۶'$ و عرض‌های شمالی $۳۵^{\circ}۱۳'$ و $۳۵^{\circ}۴۸'$ به عنوان حوزه مطالعاتی در نظر گرفته شد. واحدهای سنگی مختلفی در این حوزه وجود دارند که عمدتاً شامل سنگ‌های آذرآواری، توف‌ها، آندزیت، شیل، کنگلومرا، گچ و سنگ آهک در یک مساحت ۱۶۲۵۵۸ هکتار می‌باشد. نهشته‌های کواترنری نیز بخش وسیعی از حوزه به ویژه در دشت ورامین را در بر می‌گیرند. نقشه زمین‌شناسی (۱:۲۵۰۰۰۰) حوزه به دقت رقومی و از آن طبق روش فیض‌نیا (۱۳۷۴)، لایه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش تهیه شد. جدول ۱ واحدهای سنگی حوزه، مساحت و حساسیت آنها به فرسایش را نشان می‌دهد. شکل ۱ نیز نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش را در حوزه جاجرود نشان می‌دهد. واحدهای سنگی حوزه در شش طبقه تقسیم‌بندی شدند که شامل طبقات خیلی حساس، حساس، حساسیت متوسط، نسبتاً مقاوم و مقاوم به ترتیب با ضرایب مقاومت ۲-۴، ۵-۶، ۷-۸، ۹-۱۱ و ۱۲-۱۴ بودند. نهشته‌های کواترنری دارای حساسیت متوسط بودند (با ضریب مقاومت ۶)، اما در یک طبقه جداگانه قرار گرفتند.

روشی که برای طبقه‌بندی شدت اشکال فرسایش در صحرا به کار رفت، تلفیقی از روش‌های مختلف (وان زوی دام، ۱۹۸۵؛ فلوجل و همکاران، ۱۹۹۹؛ بوردمن و همکاران،

۲۰۰۳؛ و رفاهی، ۱۳۸۲) و اعمال تغییرات بر اساس نظرات کارشناسی و تجربه بوده است (محمدی ترکشوند و همکاران، ۱۳۸۴). بیش از ۳۰۰ نقطه بر روی تصویر مرکب رنگی (RGB531) ماهواره ETM+ طبق الگوی تصادفی طبقه‌بندی شده^۱ مشخص شد و برای هر نقطه با توجه به رنگ، تن، نقش، الگوهای زهکشی و خصوصیات دیگر تصویر یک پلی‌گون اولیه تعیین شد. سپس پلی‌گون‌ها طی عملیات صحرائی با کنترل زمینی اصلاح و با توجه به شدت هر یک از اشکال فرسایش در صحرا برچسب گذاری شدند. پلی‌گون‌های دارای یک شدت در هم ادغام و سه نقشه واقعی فرسایش‌های سطحی، شیاری و خندقی در محیط GIS تهیه و از قطع آنها، نقشه اشکال فرسایش به دست آمد. نقشه‌های فرسایش‌های سطحی، شیاری، خندقی و نقشه اشکال فرسایش با نقشه واحدهای کاری (نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش) قطع داده شد. برای بررسی صحت واحدهای کاری از شاخص AE^۱ (رابطه ۱).

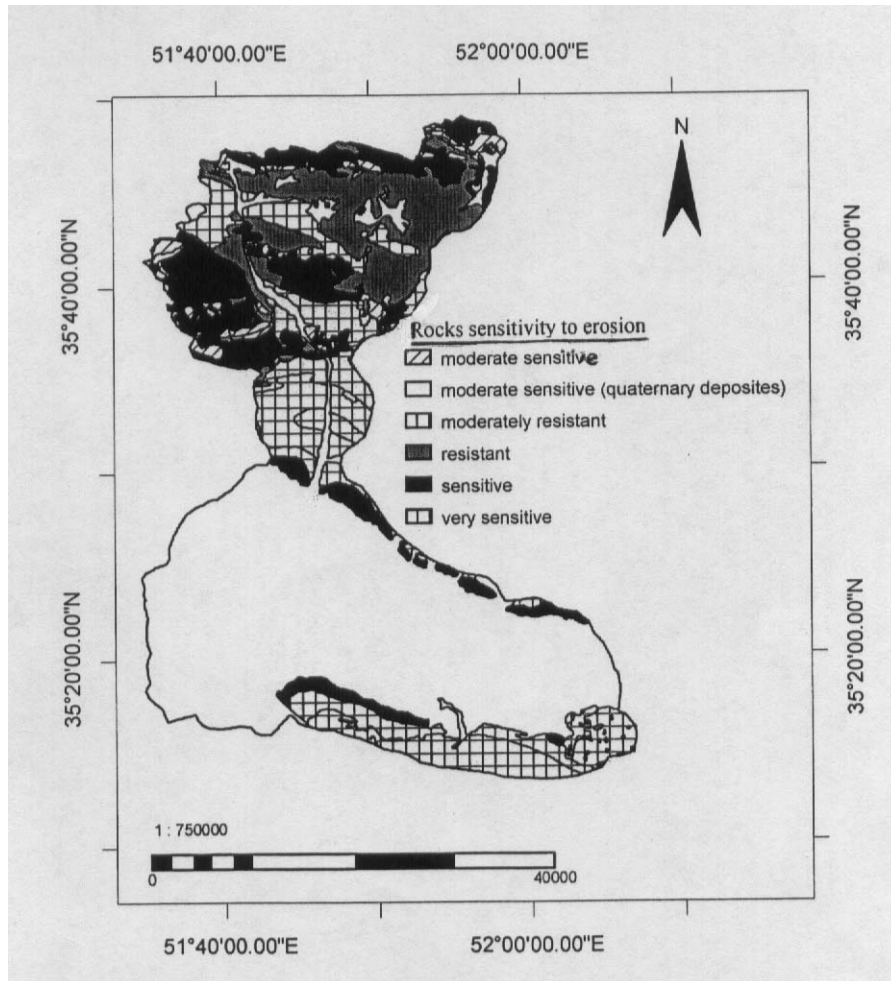
جدول ۱- نوع واحدهای سنگی و مساحت آنها در حوزه پایین دست سد سفیدرود

ردیف	نوع واحد سنگی	طبقه حساسیت به فرسایش	مساحت (هکتار)	درصد
۱	Andesit, dacit and pyroclastics	مقاوم	۳۵۵	۰/۲۲
۲	Basalt	مقاوم	۲۴۵	۰/۱۵
۳	Basic intermediate sill	مقاوم	۱۶۷	۰/۱۰
۴	Conglomera (including hezar darre formation, mio poliocene)	خیلی حساس	۹۲۱۱۶	۱۰/۴۱
۵	Conglomerate and conglomerate limestone	متوسط	۲۷۲	۰/۱۷
۶	Conglomerate (including Kahrizak formation, mio poliocene)	حساس	۴۳۷۴	۴/۵۸
۷	Limestone and dolomite (mila formation)	حساس	۷۳۳	۰/۲۳
۸	Gabbro	مقاوم	۷۸۷	۰/۴۸
۹	Gypsum (Kond formation)	خیلی حساس	۶۵۲۴	۱/۵۲
۱۰	Kavir (mud flat and salt flat, salt lake)	متوسط (نهبشته‌های کواترنری)	۷۷۳۷۷	۴۷/۸۲
۱۱	Limestone	متوسط	۱۶۴	۰/۱۰
۱۲	Limestone and marl	متوسط	۴۲۷	۰/۲۶

^۱ classified randomized sampling

^۱ Absolute Error

۲/۱۷	۳۰۵۳	حساس	Limestone numulitic (Ziafat formation)	۱۳
۰/۰۸	۱۲۹	متوسط	Limestone, shale and sand stone with phosphatic layers	۱۴
۰/۷۰	۱۳۹۱	متوسط	Limestone	۱۵
۰/۲۰	۲۶۳	متوسط	Limestone (Mobarak lime stone)	۱۶
۰/۱۵	۲۳۹	متوسط	Lower shale member, shale, dacite, lava and pyroclastics	۱۷
۱۰/۹۷	۸۳۱۱۷	مقاوم	Middle tuff member, dacite, pyroclastics, minorlava, shale, konglomera	۱۸
۰/۲۹	۴۶۴	مقاوم	Middle tuff member, dacite, pyroclastics, minorlava, shale, conglomerate	۱۹
۲/۷۴	۵۵۴۴	متوسط (نهبشته‌های کواترنری)	Mud flat and salt flat, Kavir	۲۰
۳/۸۲	۱۴۲۶	خیلی حساس	Mudstone, gypsiferous, sandstone and mudstone, shale, siltstone evaporate	۲۱
۰/۳۲	۵۲۷	متوسط	Orbitolina limestone	۲۲
۰/۲۹	۶۲۸	خیلی حساس	Salt	۲۳
۰/۵۱	۸۳۴	حساس	Shale and sandstone, coal bearing	۲۴
۰/۳۴	۵۵۴	متوسط	Shale, sandstone, dolomite and limestone baruth formation	۲۵
۰/۸۷	۱۹۴۱	خیلی حساس	Shale, siltstone and evaporate	۲۶
۳/۲۶	۵۳۰۷	خیلی حساس	Shale, siltstone evaporate	۲۷
۵/۶۲	۹۱۴۰	حساس	Shale, sandstone and konglomera	۲۸
۰/۰۶	۹۴	مقاوم	Upper tuff member	۲۹
۰/۰۶	۱۰۳/۸	مقاومت متوسط	Diorite	۳۰
۰/۰۵	۷۸	متوسط	Limestone, dolomite platy worm locks	۳۱
۰/۰۶	۹۰	متوسط	Lower shale member	۳۲
۰/۰۱	۱۳	مقاوم	Sandstone, quartzite on top (lalun sandstone)	۳۳
۰/۰۶	۹۸	حساس	Shale and sandstone Zaigun formation	۳۴
۱/۲۹	۸۹۲۰	حساس	Shale and sandstone, coal bearing	۳۵



شکل ۱- نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش در حوزه جاجرود

$$AE = |Z_{(x_i)} - Z^*_{(x_i)}| \quad \text{رابطه ۱}$$

که AE قدر مطلق خطا، $Z^*_{(x_i)}$ مساحت واحد در مدل برآورد شده (واحدهای کاری) و $Z_{(x_i)}$ مساحت واحد در مدل مشاهده‌ای (ماکزیمم درصد همگنی هر واحد در شرایط واقعی) می‌باشند. برای بررسی صحت کلی هر یک از روش‌های فوق در تهیه نقشه اشکال فرسایش، از رابطه (۲) و خطای هر یک از روش‌ها از شاخص $RMSE^{12}$ (رابطه ۳) استفاده شد.

¹² Root Mean Squared Error

$$A = \frac{\sum_{i=1}^n Z^*_{(x_i)} C_i}{\sum_{i=1}^n Z^*_{(x_i)}} \quad \text{رابطه ۲}$$

A صحت نقشه (درصد انطباق نقشه با شرایط واقعی)، a_i مساحت هر واحد کاری (مساحت واحد در مدل برآورد شده) و C_i ماکزیمم مساحتی از هر واحد (بر حسب درصد) که از نظر شدت اشکال فرسایش همگن می باشد (مساحت واحد در مدل مشاهده‌ای)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [Z_{(x_i)} - Z^*_{(x_i)}]^2}{n}} \quad \text{رابطه ۳}$$

$RMSE$ ریشه دوم میانگین مربعات خطای واحدهای کاری است.

هر کدام از مدل‌های برآورد اشکال فرسایش که جذر میانگین مربعات خطای کمتری داشته باشد، دارای خطای کمتر و صحت بیشتر است. برای بررسی دقت روش‌ها از ضریب تغییرات صحت واحدها (رابطه ۴) استفاده شد.

$$C.V. = \frac{S}{\bar{X}} * 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

S انحراف معیار صحت واحدهای برآورد شده و \bar{X} صحت کل مدل (A در رابطه ۱) می باشد. هر روشی که ضریب تغییرات صحت کمتری داشته باشد، از دقت بیشتری برخوردار است.

۳. نتایج و بحث

جدول ۲ نتیجه مقایسه نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش با نقشه واقعی فرسایش سطحی را نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که صحت واحد دارای مقاومت متوسط به فرسایش بالا است (۹۷/۳ درصد)، لیکن با توجه به مساحت ناچیز آن، همگنی آن طبیعی به نظر می‌رسد. صحت واحد مقاوم به فرسایش، ۷۵/۹ درصد است و از واحدهای با حساسیت زیاد، خیلی زیاد و متوسط، صحت بیشتری دارد. احتمالاً مقاومت واحدهای سنگی در برابر فرسایش در افزایش صحت آن نقش داشته است. کمترین صحت مربوط به واحد حساسیت متوسط است که کمتر از ۵۰ درصد می‌باشد. با توجه به این که تمام اراضی دارای حساسیت متوسط به فرسایش در تیپ اراضی کوهستان و واحد اراضی ۱/۱

واقع شده‌اند، ناهمگونی شیب، ناهمواری و برونزدگی‌های سنگی سبب بروز فرسایش سطحی با شدت‌های مختلف و کاهش صحت واحد شده است. قرار گرفتن اراضی حساس و خیلی حساس به فرسایش در فیزیوگرافی‌های مختلف (عمدتاً کوهستان و تپه‌ها) و حساسیت زیاد آنها و خصوصیات مؤثر کوهستان بر تنوع فرسایش سطحی سبب کاهش صحت شده است.

جدول ۳ نتیجه مقایسه نقشه واقعی فرسایش شیاری با نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش را نشان می‌دهد. همان طور که ملاحظه می‌شود، بیشترین صحت مربوط به واحد دارای مقاومت متوسط می‌باشد که ۹۷/۳ درصد است. کمترین صحت مربوط به واحد خیلی حساس است که زیر ۵۰ درصد می‌باشد (۴۳/۳ درصد). در اراضی حساس به فرسایش نیز صحت ۶۷/۴ درصد است و ۳۲/۶ درصد خطا وجود دارد. بیشترین صحت مربوط به واحد دارای مقاومت متوسط بود که این صحت بالا به دلیل مساحت ناچیز آن است. کمترین صحت مربوط به واحد خیلی حساس است بود. حساسیت زیاد سنگ‌ها به فرسایش و بروز فرسایش شیاری با شدت‌های مختلف از کم تا زیاد سبب کاهش صحت این واحد شده است.

جدول ۲- نتایج مقایسه نقشه واقعی فرسایش سطحی با نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش

واحد	شدت فرسایش	$Z^*(x_i)$ (هکتار)	$Z(x_i)$ (هکتار)	صحت (درصد)	خطا (درصد)	قدر مطلق خطا (هکتار)
خیلی حساس	S2	۳۲۷۱۴/۹	۱۳۶۰۲/۲	۴۱/۶	۵۸/۴	۱۹۱۱۲/۶
حساس	S2	۲۲۸۲۰/۰	۱۲۱۵۵/۲	۵۳/۳	۴۶/۷	۱۰۶۶۴/۹
حساسیت متوسط	S1	۳۷۳۸/۹	۱۷۶۹/۴	۴۷/۳	۵۲/۷	۱۹۶۹/۵
مقاومت متوسط	S3	۱۰۳/۸	۱۰۱/۰	۹۷/۳	۲/۷	۲/۹
مقاوم	S2	۱۸۳۷۵/۹	۱۳۹۴۷/۵	۷۵/۹	۲۴/۱	۴۴۲۸/۳
حساسیت متوسط (نهشته‌های کواترنری)	S1	۷۸۰۷۶/۱	۵۰۴۹۲/۲	۶۴/۷	۳۵/۳	۲۷۵۸۳/۹

جدول ۳- نتایج مقایسه نقشه واقعی فرسایش شیاری با نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش

واحد	شدت فرسایش	$Z^*(x_i)$ (هکتار)	$Z(x_i)$ (هکتار)	صحت (درصد)	خطا (درصد)	قدر مطلق خطا (هکتار)
------	------------	-----------------------	---------------------	------------	------------	----------------------

۱۸۵۵۴/۷	۵۶/۷	۴۳/۳	۱۴۱۵۸/۶	۳۲۷۱۳/۴	R2	خیلی حساس
۷۴۴۷/۶	۳۲/۶	۶۷/۴	۱۵۳۷۲/۴	۲۲۸۲۰/۰	R1	حساس
۱۳۵۸/۲	۳۶/۳	۶۳/۷	۲۳۸۰/۰	۳۷۳۸/۲	R1	حساسیت متوسط
۲/۹	۲/۷	۹۷/۳	۱۰۱/۰	۱۰۳/۸	R2	مقاومت متوسط
۷۵۳۶/۷	۴۱/۰	۵۹/۰	۱۰۸۳۹/۲	۱۸۳۷۵/۹	R1	مقاوم
۲۷۵۲۹/۱	۳۵/۳	۶۴/۷	۵۰۵۵۵/۷	۷۸۰۸۴/۸	R0	حساسیت متوسط (نهشته‌های کواترنری)

جدول ۴ نتیجه مقایسه نقشه واقعی فرسایش خندقی با نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش را نشان می‌دهد. کمترین صحت مربوط به واحد خیلی حساس بود که ۵۵/۳ درصد است. با توجه به حساسیت زیاد سنگ‌ها به فرسایش، فرسایش خندقی با شدت‌های مختلفی از کم تا بسیار زیاد در بخش‌هایی از واحد رخ داده است و منجر به پایین آمدن صحت واحد شده است. یکنواخت بودن شرایط فرسایش خندقی در پهنه واحدهای حساس، حساسیت متوسط، مقاوم و مقاومت متوسط منجر به افزایش صحت شده بود. بنابراین در واحدهایی که حساس‌تر هستند، به دلیل بروز فرسایش با شدت‌های مختلف، صحت پایین‌تر بود، البته صحت در واحد حساسیت متوسط (نهشته‌های کواترنری) نیز پایین بود. فرسایش‌های شدید خندقی در واحدهای خیلی حساس مشاهده شد و با کاهش حساسیت سنگ‌ها از شدت فرسایش خندقی کاسته شد. وجود فرسایش شدید خندقی در بخشی از واحد حساسیت متوسط (نهشته‌های کواترنری) به دلیل فیزیوگرافی دشت مانند این اراضی و تمرکز جریان‌ات آبی بالا دست است که منجر به ایجاد خندق‌ها شده است.

جدول ۴- نتایج مقایسه نقشه واقعی فرسایش خندقی با نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش

واحد	شدت فرسایش	$Z^*(x_i)$ (هکتار)	$Z(x_i)$ (هکتار)	صحت (درصد)	خطا (درصد)	قدر مطلق خطا (هکتار)
------	------------	-----------------------	---------------------	---------------	---------------	-------------------------

۱۴۶۰۷/۳	۴۴/۷	۵۵/۳	۱۸۱۰۶/۱	۳۲۷۱۳/۴	G0	خیلی حساس
۱۸۹۸/۱	۸/۳	۹۱/۷	۲۰۹۲۱/۹	۲۲۸۲۰/۰	G0	حساس
۲۹/۵	۰/۸	۹۹/۲	۳۷۰۸/۷	۳۷۳۸/۲	G0	حساسیت متوسط
۰	۰	۱۰۰	۱۰۳/۸	۱۰۳/۸	G0	مقاومت متوسط
۶۹۲/۷	۳/۸	۹۶/۲	۱۷۶۸۳/۲	۱۸۳۷۵/۹	G0	مقاوم
۲۶۶۲۲/۲	۳۴/۱	۶۵/۹	۵۱۴۶۲/۶	۷۸۰۸۴/۸	G0	حساسیت متوسط (نهشته‌های کواترنری)

جدول ۵ نتیجه مقایسه نقشه واقعی اشکال فرسایش با نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش را نشان می‌دهد. صحت واحد حساسیت خیلی زیاد بسیار پایین بوده و فقط ۲۳/۵ درصد است. بروز فرسایش‌های مختلف سطحی، شیاری و خندقی با شدت‌های متفاوت در این واحد منجر به کاهش بسیار زیاد صحت شده است. صحت در واحد حساس نیز پایین بود و ۳۱/۸ درصد می‌باشد. حساسیت زیاد سنگ‌ها به فرسایش و بروز فرسایش‌های مختلف با شدت‌های متفاوت در این واحدها، سبب کاهش بسیار زیاد صحت شده است. واحد حساسیت متوسط (نهشته‌های کواترنری)، ۵۳/۱ درصد صحت داشت. همگنی بیشتر این واحد نسبت به واحدهای دیگر از نظر فرسایش‌های سطحی، شیاری، خندقی و آبراهه-ای سبب شده که صحت آن بیشتر از واحدهای فوق باشد. صحت واحد سنگ‌های مقاوم به فرسایش نیز کمتر از ۵۰ درصد بود. واحد مقاومت متوسط سنگ‌ها به فرسایش، صحت ۹۷/۳ درصد دارد که صحت بسیار بالایی در تهیه نقشه اشکال فرسایش است. این واحد به دلیل مساحت اندک از نظر فرسایش‌های مختلف همگن بوده که در نتیجه صحت واحد افزایش یافته که البته با توجه به مساحت آن نسبت به حوزه، این موضوع اهمیتی نمی‌یابد.

واحد	شدت فرسایش	$Z^*(x_i)$ (هکتار)	$Z(x_i)$ (هکتار)	صحت (درصد)	خطا (درصد)	قدر مطلق خطا (هکتار)
خیلی حساس	S4 * R4 * G4	۳۲۷۱۴/۹	۷۶۷۲/۳	۲۳/۵	۷۶/۵	۲۵۰۴۲/۶
حساس	S2 * R1 * G0	۲۲۸۲۰	۷۲۵۱/۶	۳۱/۸	۶۸/۲	۱۵۵۶۸/۴
حساسیت متوسط	S1 * R1 * G0	۳۷۳۸/۹	۱۴۲۰/۱	۳۸/۰	۶۲/۰	۲۳۱۸/۸
مقاومت متوسط	S3 * R2 * G0	۱۰۳/۸	۱۰۱/۰	۹۷/۳	۲/۷	۲/۸
مقاوم	S2 * R1 * G0	۱۸۳۷۵/۹	۸۸۷۳/۱	۴۸/۳	۵۱/۷	۹۵۰۲/۸
حساسیت متوسط (نهشته‌های کواترنری)	S1 * R0 * G0	۷۸۰۷۶/۱	۴۱۴۵۰/۰	۵۳/۱	۴۶/۹	۳۶۶۲۶/۱

جدول ۵- نتایج مقایسه نقشه واقعی اشکال فرسایش با نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش

جدول ۶ صحت، دقت و خطای نقشه حساسیت سنگ‌ها را در برآورد فرسایش‌های سطحی، شیاری، خندقی و اشکال فرسایش نشان می‌دهد. بیشترین صحت مربوط به تهیه نقشه فرسایش خندقی است. صحت نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش در تهیه نقشه فرسایش‌های سطحی و شیاری تقریباً یکسان است و در تهیه نقشه اشکال فرسایش کمترین صحت وجود دارد. البته باید توجه داشت با این که اختلاف صحت نقشه حساسیت سنگ‌ها در تهیه نقشه فرسایش‌های خندقی و شیاری بالا است، اما تغییر پذیری صحت واحدهای کاری یکسان است یعنی از دقت یکسانی برخوردارند (۳۱/۴ درصد).

این درست است که تعداد واحدهای حساسیت سنگ‌ها در حوزه کم می‌باشد و کنترل آنها از نظر شدت چهره‌های فرسایش با توجه به ملاحظات اقتصادی و اجرایی مقرون به صرفه است، لذا چون از صحت پایینی در تهیه نقشه چهره‌های فرسایش برخوردار است، بنابراین این روش را نمی‌توان در تهیه نقشه اشکال فرسایش به کار برد. طبعاً در واحدهای بزرگ، ناهمگونی شدت اشکال فرسایش افزایش می‌یابد و منجر به افزایش خطا و کاهش صحت می‌شود که این موضوع به شدت بر افزایش جذر میانگین مربعات خطای واحدهای کاری اثر می‌گذارد.

جدول ۶- صحت، دقت و خطای نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش در تهیه نقشه شکل‌های مختلف فرسایش

شخص	نوع نقشه	سطحی	شیاری	خندقی	اشکال فرسایش
	صحت کلی (درصد)	۵۹/۱	۵۹/۹	۷۱/۹	۴۲/۹
	دقت (C.V. بر حسب درصد)	۳۵/۹	۳۱/۴	۳۱/۴	۶۲/۸
	RMSE (هکتار)	۱۴۵۱۰/۸	۱۴۲۳۷/۵	۹۴۸۰/۸	۱۹۶۰۵/۰

C.V.: ضریب تغییرات صحت واحدهای کاری

RMSE: جذر میانگین مربعات خطای واحدهای کاری

جدول ۷ مساحت اراضی (برحسب درصد نسبت به مساحت کل واحدهای کاری) در صحت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در صحت بیشتر از ۹۰ درصد، تنها فرسایش خندقی است که ۲۸/۹ درصد از اراضی قرار دارند. بیشترین مساحت در صحت کمتر از ۵۰ درصد مربوط به نقشه اشکال فرسایش است. تقریباً همه مساحت واحدهای کاری نقشه حساسیت سنگ‌ها در تهیه نقشه فرسایش‌های سطحی، شیاری و اشکال فرسایش صحت کمتر از ۵۰ درصد دارند.

جدول ۷- مساحت اراضی (برحسب درصد نسبت به مساحت کل واحدهای کاری) در صحت‌های مختلف

صحت	نوع نقشه	< ۵۰	۵۰-۷۰	۷۰-۹۰	> ۹۰
فرسایش سطحی	۲۴/۴	۶۴/۷	۱۱/۸	۰/۰۷	
فرسایش شیاری	۲۱/۰	۷۸/۹	-	۰/۰۷	
فرسایش خندقی	-	۷۱/۱	-	۲۸/۹	
اشکال فرسایش	۴۹/۸	۵۰/۱	-	۰/۰۶	

با توجه به نتایج حاصله نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش فقط با پذیرش ۲۸/۱ درصد خطا می‌تواند در تهیه نقشه فرسایش خندقی به کار رود و در تهیه نقشه فرسایش‌های سطحی و شیاری به ویژه نقشه اشکال فرسایش دارای صحت پایینی است. به نظر می‌رسد که وابستگی فرسایش خندقی به حساسیت سنگ‌ها و نوع واحدهای سنگی بیشتر از فرسایش‌های سطحی و شیاری است. شاید این موضوع به دلیل سطحی بودن

فرسایش‌های سطحی و شیاری است، در حالی که فرسایش خندقی که شیارهای عمیقی هستند با نوع بستر بیشتر در ارتباط هستند. مطالعات محمدی ترکاشوند و همکاران (۱۳۸۵) در حوزه کن تهران نیز این موضوع را تأیید می‌کند. وقتی انواع فرسایش آبی اعم از سطحی، شیاری و خندقی توأمان در نقشه اشکال فرسایش در نظر گرفته می‌شوند، به دلیل افزایش ناهمگونی شدت چهره‌های مختلف فرسایش، صحت کمتر از حالتی است که هدف تهیه نقشه فقط یکی از چهره‌های فرسایش است.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج نشان داد که شدت فرسایش خندقی ارتباط بیشتری با نوع واحدهای سنگی دارد، لذا نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش، بیشترین صحت و دقت را در تهیه نقشه فرسایش خندقی داشت. البته در تهیه همین نقشه نیز، خطای ۲۸/۹ درصد وجود داشت. نقشه حساسیت سنگ‌ها به فرسایش با توجه به صحت بسیار پایین در تهیه نقشه اشکال فرسایش نمی‌تواند استفاده شود. همچنین این نقشه از کارآیی لازم برای تهیه نقشه‌های فرسایش سطحی و شیاری برخوردار نیست.

۵. قدردانی

در پایان از مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به خاطر فراهم نمودن امکانات انجام این تحقیق و همچنین راهنمایی‌های آقایان دکتر نیک‌کامی و مهندس بیات تشکر و قدردانی می‌کنم.

۶. منابع

۱- حاجی قلیزاده، م. ۱۳۸۴. بررسی قابلیت استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا در تشخیص برخی اشکال فرسایش در استان تهران. مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۹ - ۶ شهریور ۱۳۸۴، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.

۲- رفاهی، ح. ۱۳۷۸. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران.

- ۳- رضایی، ع.، م. مهدوی، س. فیض‌نیا، لوکس، ک. و م.ح. مهدیان. ۱۳۸۴. امکان سنجی گروه‌بندی هیدورولوژیکی سازندهای زمین شناسی در حوزه آبخیز سفیدرود با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی. مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۹-۶ شهریور ۱۳۸۴، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.
- ۴- فیض‌نیا، س. ۱۳۷۴. مقاومت سنگ‌ها در مقابل فرسایش در اقلیم مختلف ایران، مجله منابع طبیعی ایران، شماره ۴۷.
- ۵- قادری، ن. و ج. قدوسی. ۱۳۸۴. بررسی فرسایش‌پذیری خاک در واحدهای اراضی حوزه تلوارچای، مجموعه مقالات سومین همایش ملی فرسایش و رسوب، ۹-۶ شهریور ۱۳۸۴، مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور.
- ۶- محمدی ترکاشوند، ع. و د. نیک‌کامی. ۱۳۸۵. نقشه اشکال فرسایش یک نقشه پایه در مدیریت پایدار خاک. همایش ملی خاک، محیط زیست و توسعه پایدار، دانشکده مهندسی آب و خاک، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه تهران، کرج.
- ۷- محمدی ترکاشوند، ع.، د. نیک‌کامی و م. اسفندیاری. ۱۳۸۴. بررسی روش تهیه نقشه اشکال فرسایش ۲۵۰۰۰۰: ۱، مطالعه موردی: حوزه آبخیز کن و سولقان. سومین همایش ملی فرسایش و رسوب. مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور، تهران.
- ۸- نجابت، مسعود، ۱۳۸۱. امکان سنجی پردازش رقومی تصاویر ماهواره‌ای به منظور شناسایی و تهیه نقشه فرسایش سطحی خاک در استان فارس، اولین کارگاه آموزشی فن‌آوریهای نوین در حفاظت خاک. مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، ۱ و ۲ بهمن ۱۳۸۱.
9. Boardman, J., A. J. Parsons, R. Holland, P. J. Holmes, and R. Washington, 2003. Development of badlands and gullies in the Sneeuwberg, Great Karoo, South Africa. *Catena*, 50 (2-4), 165-184.
10. Bou Kheir, R., O. Cerdan and C. Abdallah, 2006. Regional soil erosion risk mapping in Lebanon. *Geomorphology*, 82, pp. 347-359.
11. Flugel, W. A., M. Marker, S. Moretti, G. Rodolfi, and H. Staudenrausch, 1999. Soil erosion hazard assessment in the Mkomazi river catchment (Kwazulu/Natal-south Africa) by aerial photo interpretation. In: *Zentralblatt für geologie und palaontologie; Teil I. 3 (4)*, 641-653.
12. Khawlie, M., M. Awad, A. Shaban, R. Bou Kheir and C. Abdallah. 2002. Remote sensing for environmental protection

- of the eastern Mediterranean rugged mountainous areas, Lebanon. *ISPRS J. Photo. & Rem. Sens.*, 57, 13-23.
13. Mohammadi-Torkashvand, A. 2008. GIS: some models for preparing erosion features map. In the Proceeding 15th International Congress of the International Soil Conservation Organization (ISCO), 18- 23 May, Budapest, Hungary.
14. Moussa, R., Voltz, M. and Andrieux, P. 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes*, 16, pp. 393-412.
15. Oldeman, L. R., R. T. A. Hakkeling and W. G. Sombroek. 1991. GLASOD classification of soil degradation. <http://www.unescap.org/stat/envstat/stwes-class-glosod.pdf>.
16. Sidorchuk, A., M. Marker, S. Moretti and G. Rodolfi. 2003. Gully erosion modeling and landscape response in the Mbuluzi catchment of Swaziland. *Catena*. 50 (2-4): 507-525.
17. Sirvio, T., A. Rebeiro-Hargrave and P. Pellikka. 2004. Geoinformation in gully erosion studies in Taita hills, SE-Kenya, preliminary results, In the proceedings of the 15th Africa association of remote sensing of environment conference, 17-22 oct. 2004. Nairobi, Kenya.
18. Souchere, V., Cerdan, O. Dubreuil, N. Le Bissonnais, Y. and King, C. 2005. Modelling the impact of agri-environmental scenarios on overland flow in a cultivated catchment (Normandy, France). *Catena*, 61, pp. 229-240.
19. Van Zuidam, R. A. 1985. Terrain analysis and classification using aerial photographs. International institute for aerial survey and earth sciences. ITC-Textbook VII-6, 2. Ed., Enschede.