



دوره‌ی ۳۴، شماره‌ی ۳، شماره‌ی پیاپی ۱۳۲، پاییز ۱۴۰۰، صفحه‌های ۳۹-۱۹
شناسه‌ی دیجیتال: 10.22092/wmej.2021.351438.1357

مقاله‌ی پژوهشی



پژوهش‌های آبخیزداری

تأثیر اقدام‌های آبخیزداری بر امکان فرسایش خاک با شبیه‌ساز آزمایشگاهی در گوربند، سیستان و بلوچستان

نرگس کریمی نژاد

گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده‌ی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

عباس گلی جبرنده

شرکت مهندسين مشاور نوآوران علوم مکانی

هادی علی‌زاده

شرکت مهندسين مشاور نوآوران علوم مکانی

محسن حسینعلی‌زاده

گروه مدیریت مناطق بیابانی، دانشکده‌ی مرتع و آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

حمیدرضا پورقاسمی

(نویسنده‌ی مسئول)* دانشیار بخش مهندسی منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده‌ی کشاورزی، دانشگاه شیراز

*رایانامه‌ی نویسنده‌ی مسئول: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۲ شهریور ۱۳۹۹ تاریخ پذیرش: ۳۰ آذر ۱۳۹۹

چکیده

هدف از این تحقیق تحلیل اندازه‌ی اثرگذاری اقدام‌های آبخیزداری در زیرحوزه نمونه و مقایسه‌ی آن با زیرحوزه شاهد در گوربند سیستان و بلوچستان، و شناسایی منطقه‌های حساس به فرسایش در آن‌ها است. در این تحقیق، تصاویر پهپاد در دو زیرحوزه با مساحت ۵۸ هکتار (شاهد) و ۸۳ هکتار (نمونه) به کار گرفته شد. نقشه‌ی شماره‌ی منحنی و چهار نقشه‌ی پایه شامل ارتفاع، درجه‌ی شیب، جهت زه‌کشی و تجمع آبراه تهیه، و براساس آن‌ها سه حالت ممکن ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر بارش روزانه برای شبیه‌سازی با لندپلنر، با دو شاخص فرسایش و آستانه‌ی پستی‌بلندی در نظر گرفته شد. نتیجه‌ی به‌دست‌آمده برای دو زیرحوزه با روش‌های چارچوب جعبه‌یی، چارچوب چهاروجهی و سطح زیرمنحنی عمل‌کرد نسبی ارزیابی شد. شاخص فرسایش در شبیه‌ساز لندپلنر با در نظر گرفتن بیشینه‌ی بارش روزانه (۶۰ میلی‌متر) نشان داد که اندازه‌ی فرسایش خاک در زیرحوزه شاهد ۰/۵۴۸۲۱ بود، که بیش‌تر از اندازه‌ی فرسایش خاک در زیرحوزه نمونه (۰/۱۵۵۹۳) است. شبیه‌سازی براساس آستانه‌ی فرسایش نیز نشان داد که تغییر عددی شاخص آستانه‌ی پستی‌بلندی (۲-۰) در زیرحوزه نمونه کم‌تر از تغییر ناشی از این شاخص در زیرحوزه شاهد (۳-۰) است. به‌طور کلی می‌توان گفت که به‌دلیل اقدام‌های آبخیزداری مناسبی که در زیرحوزه نمونه انجام شد، این زیرحوزه در شرایط بهتری از شاهد است، زیرا اندازه‌ی فرسایش خاک در آن به‌مراتب کم‌تر از آن است، در حالی که هر سه حالت ممکن بارش کم‌تر بودن فرسایش خاک را در زیرحوزه نمونه پیش‌بینی می‌کند. بنابراین، شبیه‌سازی براساس حالت‌های بارش و شماره‌ی منحنی با شبیه‌ساز آزمایشگاهی لندپلنر برای ارزیابی اثرگذاری اقدام‌های آبخیزداری در زیرحوزه زوجی‌یی که امکان فرسایش خاک در آن‌ها وجود دارند، توصیه می‌شود.

واژگان کلیدی: پهپاد، سیستان و بلوچستان، زیرحوزه زوجی، شبیه‌ساز فیزیک‌محور

مقدمه

فرسایش خاک مهم‌ترین فرآیند تخریب سرزمین است، که علاوه بر کاهش کیفیت، تخریب محیط‌زیست و خسارت مالی، آسیب‌هایی نظیر انتقال و ته‌نشست مواد معلق در پایین‌دست را به دنبال دارد (داتروبیچ و همکاران ۲۰۱۲؛ پوزن ۲۰۱۸). یکی از هدف‌های اصلی در مدیریت پایدار زمین ارتقای کمی و کیفی تولید در طولانی‌مدت است، که سبب حفظ کیفیت خاک می‌شود و از تخریب آن جلوگیری می‌کند (دیوب و همکاران ۲۰۲۰). بنابراین برای مدیریت بهتر و پایدارتر، آگاهی از نحوه تغییرپذیری ویژگی‌های خاک، و شناسایی عوامل مؤثر بر خصوصیت‌های فیزیکی و شیمیایی آن در منطقه‌هایی که تغییر کرده و نوع‌های مختلف فرسایش در آن به وجود آمده است، ضروری به نظر می‌رسد. نیاز مبرم و ضروری پژوهش‌های فرسایش خاک به کاربرد شبیه‌سازهای فیزیک‌محور برای مقابله با فرآیندهای مختلف آب‌شناسی و فرسایشی، و مهار بهتر آن‌ها احساس می‌شود (کمپو-سکوز و همکاران ۲۰۱۳؛ توری و پوزن ۲۰۱۴). شبیه‌سازهای توزیعی فیزیکی با توان بررسی پویایی فرسایش‌های خاک را باید به شیوه‌ی فرآیندی به کار برد. این خود مستلزم دسترسی به اطلاعات دقیق تغییر مکانی و توان محدود به تشکیل و توسعه دادن نوع‌های مختلف فرسایش خاک است، که با گسترش استفاده از فن‌های جدید سنجش از دور برطرف می‌شود.

یکی از گام‌های مهم در واداشتن مدیریت مؤثر، درک و شناخت پویایی فرسایش‌های موجود است، که تأثیرپذیری فرآیند این نوع از فرسایش‌ها با سایر فرآیندهای آب‌شناسی و فرسایشی در آبخیز را شامل می‌شود (پوزن ۲۰۱۱). بررسی پویایی مکانی فرسایش‌های موجود در زیرحوزه‌های زوجی در کوتاه‌مدت هدف مهمی است که دنبال کردن آن ضمن تأمین کردن هدف‌های حفاظت آب و خاک، تأثیر گسترده‌ی بر پایداری بهره‌وری و کشاورزی می‌گذارد (پوزن ۲۰۱۱؛ بارتلی و همکاران ۲۰۲۰؛ بووی و همکاران ۲۰۲۰). این نکته در شبیه‌سازهایی که فرسایش خاک را با شبیه‌سازی جریان آب محاسبه می‌کنند (به‌عنوان مثال تجربی، رگرسونی) درست است (دی‌ونت و همکاران، ۲۰۱۳؛ دیوب و همکاران ۲۰۲۰).

یکی از کارآمدترین و به‌روزترین شبیه‌سازهای آب‌پویایی (هیدرولوژی) بر پایه‌ی معادله‌های آزمایشگاهی لندپلنر^۱ است که با توان زیاد شبیه‌سازی فرسایش‌های خندقی، تونلی و حرکت‌های توده‌ی با روی کرد فرآیندی در مقیاس زمانی کوتاه مدت، ممکن است برای بررسی امکان فرسایش به کار رود (تاکر و اسلینگرلند ۱۹۹۷؛ پی‌ترز و همکاران ۲۰۰۶؛ تمی و ولدکمپ

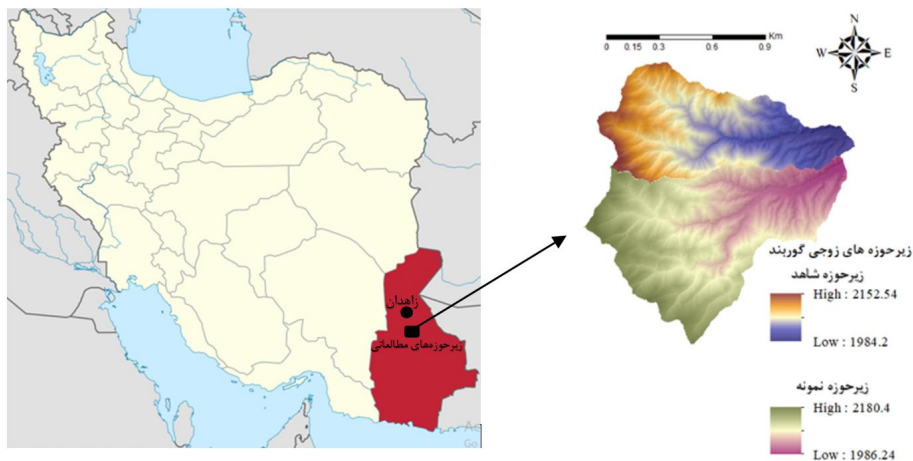
۲۰۰۹؛ روسی و همکاران ۲۰۱۵؛ کریمی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۰). این شبیه‌ساز فرآیندهای فیزیکی اصلی ایجاد و گسترش فرسایش خاک (عوامل آب‌شناسی، زمین‌ریخت‌شناسی و تغییر کاربری زمین ناشی از تغییر فصل) را با قانون‌های فیزیکی محاسبه و شبیه‌سازی می‌کند. از این‌رو، با بررسی دقیق پویایی این فرسایش‌ها با شبیه‌ساز لندپلنر، و با به‌کارگیری اطلاعات بسیار دقیق مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی زیاد می‌توان انتظار مدیریت منطبق با الگوهای طبیعی را برآورده کرد.

برای شبیه‌سازی و تعیین سهم رخساره‌های فرسایشی به اطلاعات بسیار دقیق پستی‌بلندی نیاز است. استفاده از فن‌آوری پهپاد و نقشه‌ها و تصویرهای خروجی آن باعث افزایش دقت و تفکیک‌پذیری مدل‌های ارتفاعی می‌شود، که با آن می‌توان پایش و اندازه‌گیری فرسایش خاک را با دقت و جزئیات بیشتر بررسی کرد (هامشاو و همکاران ۲۰۱۹). به بیان دیگر، پایش و اندازه‌گیری فرسایش خاک با مدل‌های رقومی ارتفاع با وضوح زیاد از ضرورت‌های اجتناب‌ناپذیر مدیریت پایدار منابع آب و خاک دانسته می‌شود (مایر و همکاران ۲۰۱۹؛ گوان و همکاران ۲۰۲۰)، که با آن می‌توان ویژگی‌های مستخرج از مدل‌های رقومی ارتفاع را دقیق ارزیابی، و امکان شبیه‌سازی و تعیین فرسایش را در رخساره‌های مختلف حتا در شیارهای کوچک فراهم کرد. بنابراین، کاربرد پهپاد به‌همراه نرم‌افزارهایی با کاربرد تهیه‌ی عکس‌های هوایی ممکن است ابزاری مطمئن برای تهیه‌ی تصویر با مختصه‌دهی فضایی سه‌بعدی در پژوهش‌ها باشد (کوسی و همکاران ۲۰۱۷)؛ کریمی‌نژاد و همکاران ۲۰۱۹).

فرسایش خاک نیز مانند بسیاری از پدیده‌های طبیعی پیچیدگی‌هایی دارد که نمی‌توان در عرصه به‌راحتی پیمایش و اندازه‌گیری کرد. گسترش شدید نوع‌های مختلف فرسایش خاک (جلالی‌فرد و همکاران ۲۰۱۸، کریمی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۰) آسیب‌رساندن به زمین‌های کشاورزی و مرتعی، زیرساخت‌ها و نسبت زیاد تولید مواد معلق در رخساره‌های فرسایشی و تغییر سیمای سرزمین (حسینعلی‌زاده و همکاران ۲۰۱۹)، نیاز ضروری به‌کارگیری شبیه‌ساز آزمایشگاهی لندپلنر را برای تهیه‌ی نقشه‌ی امکان فرسایش خاک، به‌کارگیری اطلاعات با قدرت تفکیک مکانی زیاد، و ارزیابی اثر اقدام‌های آبخیزداری با شاخص‌های سطح زیرمنحنی عمل‌کرد نسبی و چارچوب‌های چهاروجهی را بیش از پیش مهم کرده است.

مواد و روش‌ها

زیرحوزه‌های نمونه و شاهد گوربند (مساحت ۱۴۱ هکتار) در ۲۸ کیلومتری غرب زاهدان است (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه‌ی نمونه و شاهد گوربند در استان سیستان و بلوچستان.

شاهد و نمونه به ترتیب ۲۱۵۴ و ۲۱۹۴ متر و کم‌ترین ارتفاع هر دو ۲۰۰۲ متر است (جدول ۱). جهت شبکه‌ی زه‌کشی از جنوب غرب و غرب به سمت شرق و شمال شرق است.

مساحت زیرحوزه شاهد ۵۸ هکتار و زیرحوزه نمونه ۸۳ هکتار است. موقعیت جغرافیایی این دو بین $36^{\circ} 52'$ و 60° تا $37^{\circ} 53'$ و 29° طول شرقی و $20^{\circ} 45'$ و 29° تا $21^{\circ} 39'$ عرض شمالی است. بیش‌ترین ارتفاع زیرحوزه

جدول ۱- ویژگی‌های عمومی زیرحوزه‌ی شاهد و نمونه.

ویژگی‌ها	زیرحوزه‌ی شاهد	زیرحوزه‌ی نمونه
مساحت (هکتار)	۵۸	۸۳
محیط (متر)	۳۷۱۰	۴۶۱۷
ارتفاع کمینه (متر)	۲۰۰۲	۲۰۰۲
ارتفاع بیشینه (متر)	۲۱۵۴	۲۱۹۴

می‌توان انتظار داشت که تغییر ناشی از تراکم پوشش گیاهی بتواند تاثیر چشم‌گیری بر مقدار عددی نقشه‌ی شماره‌ی منحنی داشته باشد. در زیرحوزه نمونه، اقدام‌های آبخیزداری در ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ شامل سنگ و ملات، خشکه‌چین، اقدام‌های خاکی و تراکمی، حصارکشی، احداث فلوم، کندن یک چاه، ساخت اطاقک نگهبانی، ساخت تابلوی سیمانی در ابتدای زیرحوزه نمونه برای رسم نقشه و گذاشتن علامت‌ها و ویژگی‌های حوزه، تهیه و نصب در ورودی حوزه برای نگهداری از ساختارها، نصب باران نگار استیل پلوویو، نصب برق ایستگاه، احداث ایستگاه‌های هواشناسی، آب‌شناسی، و شناسایی مکان‌های مناسب برای احداث قطعه‌های (پلات‌های) فرسایش است (شکل ۲).

تفاوت اساسی دو زیرحوزه نمونه و شاهد در این است که، زیرحوزه نمونه قرق شده است و در آن چرا نمی‌شود، بنابراین تفاوت در اندازه‌ی کم‌تر رفت‌وآمد در زیرحوزه نمونه بوده است و مواد معلق پشت بندها بیش‌تر ناشی از ساخت و ساز سازه‌ها است.

شیب متوسط حوزه $35/9\%$ است. بیش‌ترین مساحت آن در طبقه‌ی شیب 840 تا 60% و کم‌ترین آن در طبقه‌ی کم‌تر از 5% است. بارندگی متوسط حوزه 179 میلی‌متر است، که بیش‌ترین آن در بهمن است. دمای متوسط سالانه $15/4^{\circ}C$ و گرم‌ترین ماه تیر، و سردترین ماه دی است. اقلیم حوزه به‌روش آمبرژه خشک سرد تعیین شده است، بادخیزترین ماه‌های سال فروردین و اردیبهشت، و جهت غالب وزش باد از شمال به جنوب است (زهرایی و همکاران، ۱۳۸۹).

در منطقه ۶۳ گونه‌ی گیاهی هست که بیش‌تر آن‌ها از خانواده‌ی Asteraceae است. پوشش تاجی در حوزه‌ی نمونه $21/45\%$ است. تیپ غالب زیرحوزه‌ی شاهد درمنه‌ی دشتی Cousinia (خانواده‌ی کاسنی) است.

پوشش تاجی در زیرحوزه شاهد $15/02\%$ و تیپ غالب آن درمنه‌ی دشتی است. بیش‌ترین اندازه‌ی تراکم در منطقه‌ی نمونه را چمن پیازدار دارد. بنابراین



شکل ۲- نمونه‌هایی از فعالیت‌های آبخیزداری در زیرحوزه نمونه.

مجهول براساس نقطه‌های معلوم)، و با دستور IDW (وزن‌دهی براساس فاصله‌ی معکوس)، و نقشه‌ی شماره‌ی منحنی پهنه‌بندی می‌شود (رابطه‌ی ۱ تا ۳):

$$Q = \frac{(P-\lambda S)^2}{P+(1-\lambda)S} \quad (1)$$

$$S_{0.20} = 25.4 \left[\frac{1000}{CN} - 10 \right] \text{ in mm} \quad (2)$$

while for $\lambda = 0.05$

$$S_{0.05} = 25.4 \cdot 1.33 \left[\frac{1000}{CN} - 10 \right]^{1.15} \text{ in mm} \quad (3)$$

Q عمق روان‌آب مستقیم و P عمق بارندگی روی داد، $Y_s=I_a$ انتزاع اولیه یا بارندگی روی داد، که برای شروع روان‌آب لازم است، و CN شماره‌ی منحنی است که نقشه‌ی آن براساس گروه هیدرولوژیکی خاک و کاربری زمین تهیه می‌شود (رابطه‌ی ۴).

$$CN = \frac{1000}{\left[10 + \frac{5}{25.4} \left\{ P+2 \cdot Q_{off} - \sqrt{4 \cdot Q_{off}^2 + (5 \cdot P \cdot Q_{off})} \right\} \right]} \quad (4)$$

روش تحقیق

شماره‌ی منحنی روان‌آب سنجیه‌ی تجربی است که در آب‌شناسی (هیدرولوژی) برای پیش‌بینی روان‌آب یا مقدار نفوذ بارش مازاد به‌کار برده می‌شود (روسی و همکاران ۲۰۱۴). شماره‌ی منحنی روان‌آب روشی مؤثر برای تعیین مقدار تقریبی روان‌آب مستقیم از بارش در منطقه‌ی خاص است، که در شبیه‌ساز لندپلنر یکی از مهم‌ترین ورودی‌های شبیه‌ساز گرفته می‌شود، و در بخش معادله‌های تجربی نرم‌افزار R به‌کار می‌رود (روسی و همکاران ۲۰۱۵). شماره‌ی منحنی روان‌آب با توجه به‌نوع گروه هیدرولوژیکی خاک، کاربری زمین (با در نظر گرفتن وضعیت آب‌شناسی) پایه‌گذاری شده است. یکی از این روش‌ها بر مشاهدات‌های پرشمار در حوزه‌های معرف و اقلیم‌های مختلف آمریکا بنا شده است. در این روش با تعیین گروه هیدرولوژیکی خاک و تعیین نوع پوشش گیاهی، با بهره‌گیری از جدول شماره‌ی ۲-۹ در آن آرس‌اس (۲۰۰۹) مقدار عددی شماره‌ی منحنی با کاربری مرتع تعیین می‌شود. سپس عدد به‌دست‌آمده به‌ازای هر نقطه‌ی نمونه‌برداری شده‌ی خاک در ستون مربوط به لایه‌ی رستری گذاشته و میان‌یابی (مشخص کردن ارزش نقطه‌های

بخش شامل شش نقشه در دو زیرحوزه است که در آن حالت ممکن بارش روزانه (کمینه، میانگین، بیشینه) به کار بسته شد. کمینه، میانگین، و بیشینه‌ی اندازه‌ی بارش روزانه که منجر به فرسایش می‌شود ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی متر گرفته شد. کمینه‌ی اندازه‌ی بارش براساس اندازه‌ی بارندگی منجر به فرسایش و بیشینه‌ی آن براساس بیش‌ترین بارندگی روزانه‌ی ثبت شده در محدوده‌ی تعیین شده است. دسته‌ی دوم از خروجی شبیه‌ساز به شکل پایا یا ثابت (آستانه‌ی پستی‌بلندی) است، که در آن حالت ممکن شماره‌ی منحنی در نظر گرفته می‌شود. در این شاخص، اثر بارش عامل ورودی دانسته نمی‌شود (رابطه‌ی ۶).

(۶)

$$\sin(S) \geq 0.73ce^{1.3RCF} (0.00124 \cdot S_{0.05} - 0.037) A^{-0.38}$$

S زاویه‌ی شیب‌دار، C برابر با ۱° است، RCF درصد قطعات سنگی، و A وسعت منطقه‌ی بالادست (هکتار) است. خروجی شبیه‌ساز سه نقشه‌ی پیش‌بینی تغییر فرسایش منطقه، براساس ۵ عامل یا نقشه‌ی ورودی شامل شماره‌ی منحنی، درجه‌ی شیب، ارتفاع از سطح دریا، زه‌کشی و تجمع آب است. بنابراین می‌توان چارچوب نظری شبیه‌ساز لندپلنر را در دو زیرحوزه نمونه و شاهد گوربند ترسیم کرد (شکل ۲). این شبیه‌ساز ۵ نقشه‌ی ورودی دارد. خروجی شبیه‌ساز ۲ شاخص فرسایش و آستانه‌ی پستی‌بلندی است، که می‌توان آن‌ها را با منحنی تشخیص عمل کرد نسبی و سطح زیرمنحنی (ROC) ارزیابی کرد.

با فعالیت‌های انجام شده در دو منطقه انتظار می‌رود که تفاوت معنی‌داری در نقشه‌های خروجی از این دو شاخص به دست آید. شکل ۳ نمودار جریان‌ی پژوهش را نشان می‌دهد.

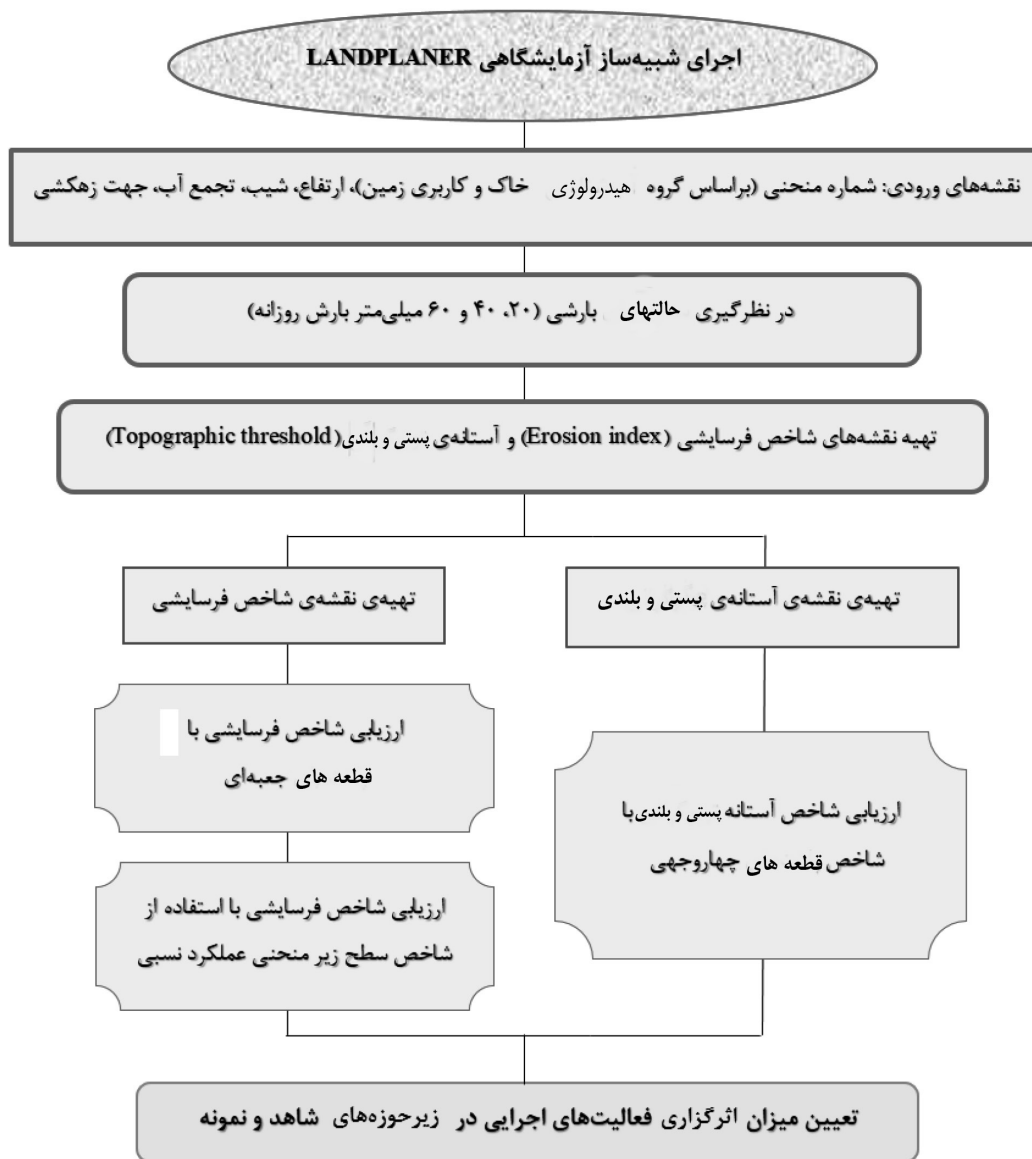
این رابطه‌ی تجربی نشان می‌دهد که اندازه‌ی فرسایش به شدت باران بسیار حساس است، و افزایش این متغیر ناشی از تغییر اقلیم، فرسایش را در دهه‌های آینده به شدت گسترش خواهد داد. در این رابطه‌ی تجربی اغلب فرض متأثر بودن محدوده‌ی پژوهش از آب‌دهی روان آب ناشی از واقعه‌ی بارش در نظر گرفته شده است، چرا که الگوهای مکانی انواع کاربری زمین داخل زیرحوزه بر ویژگی‌های روان آب تأثیر می‌گذارد. مسئله‌ی موجود اساساً به دلیل ماهیت ذاتی فرسایش است، که شامل مجموعه‌ی از فرآیندها (مانند فرسایش آبی، فرورنشست، تونلی، چین خوردگی، ترک خوردگی ناشی از فشار و فرآیندهای حرکات توده‌یی از جمله لغزش)، در تعامل با هم است. اثرهای یکپارچه‌ی این فرآیندها در نهایت منجر به اندازه‌یی از فرسایش، تغییر (وندکر کو و همکاران ۲۰۰۱؛ ون‌مرک ۲۰۱۶)، و رشد غیرخطی آن در طولانی مدت می‌شود (ون‌وال اغم و همکاران ۲۰۰۵). در تحقیقات انجام شده روی کرد فرآیندمحوری برای انواع فرسایش در نظر گرفته نشده است.

شبیه‌سازی لندپلنر در چهار نرم‌افزار، GRASS، GIS، SAGA، و RStudio انجام شد. این شبیه‌ساز دو دسته خروجی دارد که دسته‌ی اول پویا است (شاخص فرسایش) و در آن اثر بارندگی روزانه با شدت‌های مختلف در نظر گرفته می‌شود (رابطه‌ی ۵):

(۵)

$$e_{pot} = \alpha \cdot \left(\frac{Q_{off} \cdot \sin(S)}{S_{0.05}} \right)^\beta$$

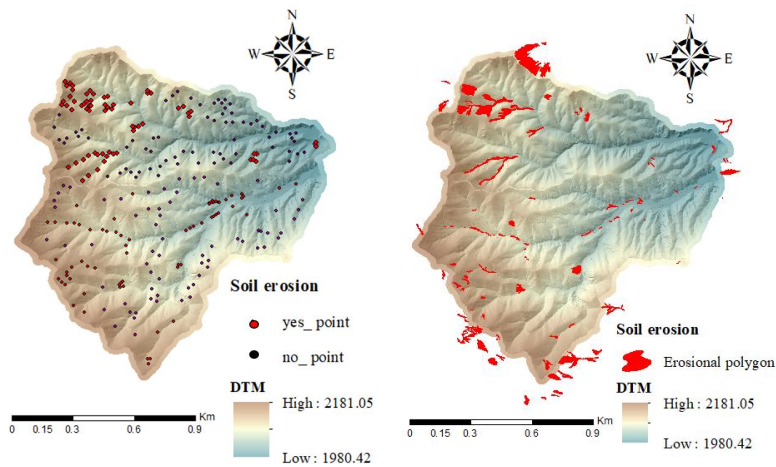
Qoff روان آب سلول (نقطه‌ی تصویر) محاسبه شده، با مدل هیدرولوژیکی و S زاویه‌ی شیب است. هم‌اکنون ضریب‌های α و β عدد ۱ فرض شده است، اما برای شناسایی مقدار سنجه‌ها یا دست‌کم دامنه‌ی آن‌ها، شبیه‌ساز واسنجی می‌شود. خروجی این



شکل ۳- نمودار جریان شبیه‌ساز لندپلنر در دو زیرحوزه شاهد و نمونه.

چندضلعی‌های فرسایشی، در هر یک از زیرحوزه‌ها ۷۰ نقطه‌ی با فرسایش و ۷۰ نقطه‌ی بی فرسایش مشخص شد (شکل ۴).

مرحله‌ی ارزیابی شبیه‌ساز لندپلنر بعد از اجرای آن برای راستی‌آزمایی شبیه‌ساز به کار برده می‌شود. برای ارزیابی، براساس



شکل ۴- نقشه‌ی نقطه‌یی زیرحوزه‌های شاهد و نمونه در مکان‌های با فرسایش و بی فرسایش براساس تصویر پهپاد.

نقشه‌های خروجی شبیه‌ساز (سه نقشه‌ی به‌دست‌آمده شاخص فرسایش و یک نقشه‌ی به‌دست‌آمده از آستانه‌ی پستی-بلندی)، به نقطه‌ها نسبت داده می‌شود، و خروجی آن به‌شبهه‌ی پاکسل وارد رمزهای نوشته‌شده در نرم‌افزار R می‌شود تا در مرحله‌ی بعد بتوان صحت و دقت نتیجه را ارزیابی کرد. همین کار برای نقطه‌هایی که در آن‌ها اثری از فرسایش نیست نیز انجام می‌شود. روش اول ارزیابی در این تحقیق در محدوده‌هایی با رخساره‌های فرسایشی و بی رخساره‌های فرسایشی قطعه‌های چهاروجهی است (پورقاسمی و همکاران ۲۰۲۰). چهار وجه قطعه این‌ها است:

- حالت مثبت صحیح وضعیتی را نشان می‌دهد که در محدوده فرسایش هست و آزمایش نیز به‌درستی فرسایش‌پذیری محدوده را نشان می‌دهد.

- منفی صحیح نیز حالتی است که در محدوده‌ی فرسایش نیست و آزمایش نیز به‌درستی نبود فرسایش را نشان می‌دهد. دو حالت اشتباه می‌تواند رخ دهد، یکی مثبت غلط است که محدوده‌ی بی فرسایش است اما آزمایش به اشتباه فرسایش را نشان می‌دهد، و دیگری منفی غلط که در محدوده‌ی فرسایش هست، اما آزمایش به اشتباه آن را نشان نمی‌دهد.

روش دوم، که در ارزیابی به‌کار برده می‌شود سطح‌زیرمنحنی تشخیص عمل کرد نسبی است. نتیجه‌ی شبیه‌سازی براساس روی داد فرسایش و در قالب روش اعتبارسنجی انجام شد، که از ابزارهای تشخیصی عمل کرد سامانه یا آزمایش دانسته می‌شود. مساحت زیر این منحنی معیاری کمی برای اعتبارسنجی گرفته می‌شود. هرگاه مقدار مساحت زیر منحنی بیش‌تر از ۷۰٪ باشد دقت شبیه‌ساز پذیرفتنی است (حسینعلی‌زاده و همکاران ۲۰۱۹).

این شاخص عددی بین ۰ و ۱ است، و نشان می‌دهد که قدرت تشخیص آزمایش چه قدر است. اگر این عدد به ۱ نزدیک باشد به

براساس نظر کارشناسی، منطقه‌هایی که حساسیت بیش‌تری به فرسایش دارد، یا مکان‌هایی که در آن اثر فرسایش بیش‌تری هست، شناسایی شد و به‌شکل نقطه در زیرحوزه‌های شاهد و نمونه در نظر گرفته شد. در زیرحوزه‌هایی که اثر فرسایش به شکل خندق، فروچاله، راس خندق و انواع دیگر فرسایش به وضوح تشخیص داده نمی‌شود، انتخاب نقطه‌ها در این مرحله به وسیله‌ی کارشناس براساس مشاهده‌های زمینی و با تصویر پهپاد انجام شد. به این نقطه‌های جی‌آی‌اسی که به‌شکل پرونده‌ی نقطه‌یی تولید شده، و طول و عرض جغرافیایی آن‌ها مشخص شده است، تمام ورودی‌های شبیه‌ساز به‌همراه نقشه‌های خروجی شبیه‌ساز (سه نقشه‌ی به‌دست‌آمده از شاخص فرسایش و یک نقشه‌ی به‌دست‌آمده از آستانه‌ی پستی-بلندی) به نقطه‌ها نسبت داده، و خروجی آن به‌شبهه‌ی پاکسل وارد رمزهای نوشته‌شده در نرم‌افزار R شد، تا در مرحله‌ی بعد بتوان صحت و دقت نتیجه را ارزیابی کرد. همین کار برای نقطه‌هایی که در آن‌ها اثری از فرسایش نیست نیز انجام شد.

مرحله‌ی ارزیابی شبیه‌ساز لندپلنر بعد از اجرای آن، برای راستی‌آزمایی (کالیبراسیون) شبیه‌ساز به‌کار برده می‌شود. مرحله‌ی ارزیابی برای تشخیص تناسب روش برگزیده برای تعیین کردن منطقه‌های مساعد فرسایش به‌کار رفته است، و کارآیی روش (از دید دقت، زمان و داده‌های نیازداشته برای شبیه‌سازی) شناسایی می‌شود (روسی و همکاران ۲۰۱۴). مکان‌هایی که در آن اثر فرسایشی هست شناسایی، و به‌شکل نقطه در محدوده در نظر گرفته می‌شود (روسی و همکاران ۲۰۱۵). بنابراین در محدوده‌هایی که اثر فرسایش به‌شکل آب‌کند و حرکات توده‌یی به وضوح تشخیص داده می‌شود، نقشه‌ی شاخص فرسایش با بهترین حالت ممکن ساخته می‌شود. سپس به این نقطه‌ها یا پهنه‌ها که به‌شکل پرونده‌ی نقطه‌یی تولید شده‌است، تمام ورودی‌های شبیه‌ساز به همراه

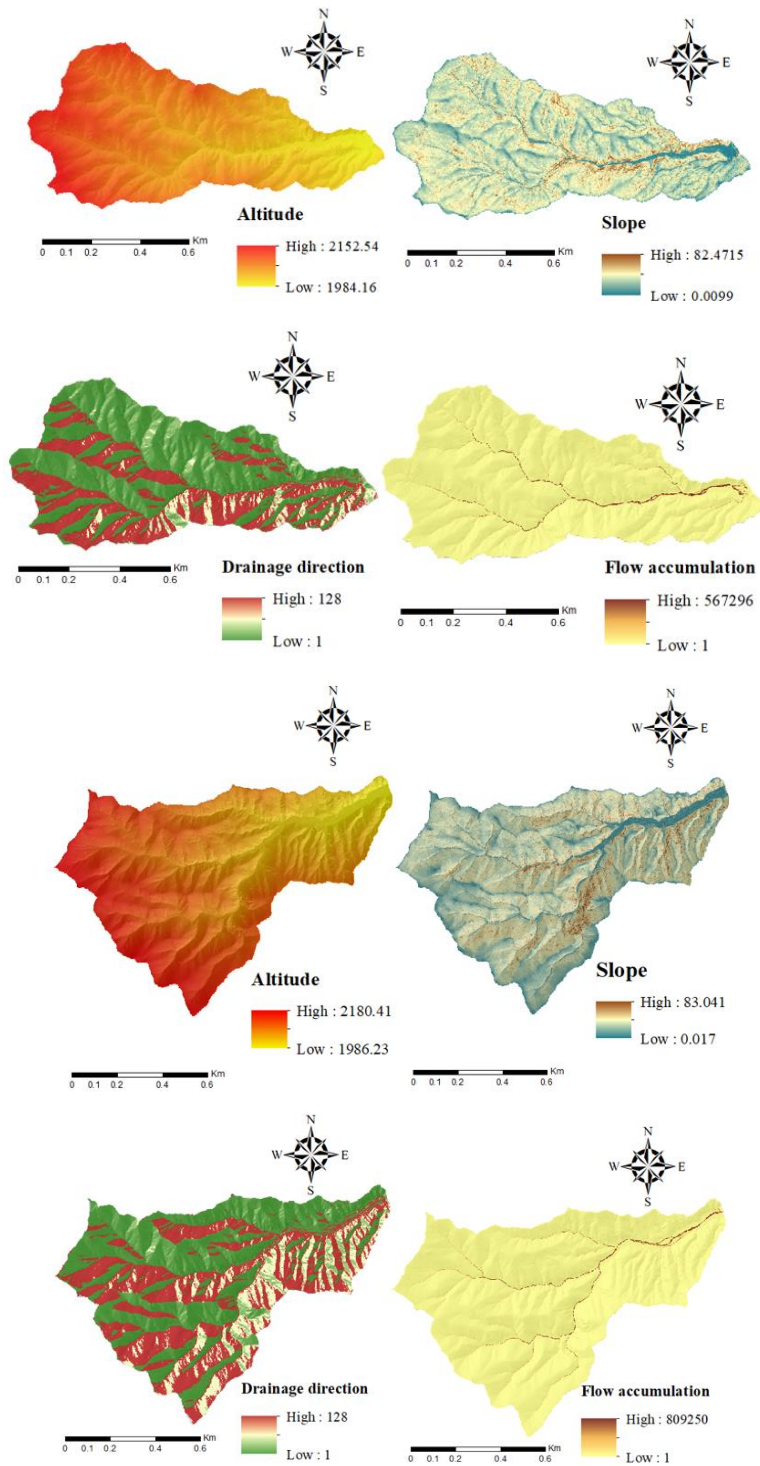
معنای آن است که داده‌ها عموماً در بالای خط نیم‌ساز است، و اندازه‌ی مثبت صحیح زیاد است. عددهای سطح زیرمنحنی نزدیک به ۰/۵ همان برابری اندازه‌ی مثبت صحیح و مثبت کاذب را نشان می‌دهد، و عددهای کم‌تر از ۰/۵ بیانگر بیش‌تر بودن اندازه‌ی مثبت کاذب از اندازه‌ی مثبت صحیح است. روش سوم نیز برای ارزیابی شبیه‌ساز روش چهارچوب‌های جعبه‌یی (Box plots) است، که با مقایسه‌کردن اندازه‌ی فرسایش براساس سه حالت ممکن بارش با رمزنویسی در نرم‌افزار R انجام شد (روسی و همکاران ۲۰۱۴). در این روش هر چه اختلاف دو جعبه در هر حالت ممکن بیش‌تر باشد، مقدار فرسایش در آن حالت بیش‌تر، و آن حالت ممکن به واقعیت زمینی نزدیک‌تر است.

نتایج و بحث

فرسایش خاک موضوع تحقیقاتی همه‌گیر در میان محققان است (کاستیلو و گومز ۲۰۱۶). در ایران و سرتاسر جهان پژوهش‌های زیادی در نوع‌های مختلف فرسایش خاک انجام شده‌است. پژوهش در فرسایش خاک با بررسی عامل‌ها و سنجه‌های محیطی مؤثر بر آن‌ها، ساختن شبیه‌ساز و ایازی، تجزیه و تحلیل برخی ویژگی‌های خاک، کار آزمایشگاهی و تجزیه و تحلیل آن‌ها، و پهنه‌بندی خطر فرسایش در ایران (خوجه و همکاران ۲۰۱۲، تجری و کاردل ۲۰۱۴، ابراهیمی ۲۰۱۷، صابرچناری

و همکاران ۲۰۱۸، روشن‌ضمیر ۲۰۲۰، امیری و همکاران ۲۰۱۹، کرنژادی و همکاران ۲۰۱۹). پژوهش‌هایی در خارج از ایران برای شبیه‌سازی و بررسی پویایی ریختی (مورفولوژیکی) و عقب‌نشینی فرسایش خاک با تجزیه و تحلیل در جی‌آی‌اس، تجزیه و تحلیل آزمایشگاهی نمونه‌های برداشته از بالادست آن، و تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی پویایی و شبیه‌سازی ریاضی این فرسایش‌ها با عکس و تصویر هوایی (رایک‌زاپ و همکاران ۲۰۱۱، ولز و همکاران ۲۰۱۱، بارتلی و همکاران ۲۰۲۰)، و فرآیندهای مؤثر بر شکل‌گیری فرسایش (پوزن و همکاران ۲۰۰۳، والکارسل و همکاران ۲۰۰۳، والننتین و همکاران ۲۰۰۵، وان‌والگم ۲۰۰۵، چن و همکاران ۲۰۰۷، توری و پوزن ۲۰۱۴، بووی و همکاران ۲۰۲۰) انجام شده‌است.

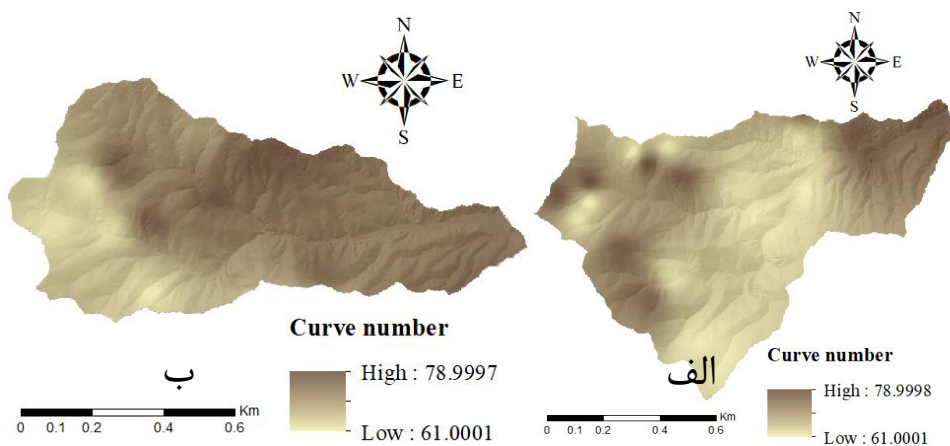
شبیه‌ساز آزمایشگاهی لندپلنر برای تهیه‌ی نقشه‌ی امکان فرسایش خاک در دو زیرحوزه شاهد و نمونه به کار گرفته‌شد، تا اثر اقدام‌های آبخیزداری بررسی شود. از آن‌جاکه خاک هر دو زیرحوزه خیلی کم‌عمق و نسبتاً درشت بافت، و در زمین مرتفع است، شیب آن بیش از ۳۰٪ و زه‌کشی و روان‌آب آن خیلی سریع است، و خاک‌های زیرحوزه بیش‌تر از نوع میانه‌بافت شنی با ازت و مواد آلی کم است، می‌توان این دو زیرحوزه را از دید گروه هیدرولوژیکی خاک در گروه B گذاشت. نقشه‌های ورودی شبیه‌ساز در زیرحوزه در شکل‌های ۵ آورده شده‌است.



شکل ۵- نقشه‌های ورودی شبیه‌ساز لندپلنر در زیرحوزه ی نمونه (راست) و شاهد (چپ).

زیرحوزه شاهد و نمونه گذاشته شد، و میان‌یابی (مشخص کردن ارزش نقطه‌های مجهول براساس نقطه‌های معلوم) با روش وزن فاصله‌ی معکوس انجام، و نقشه‌ی شماره‌ی منحنی پهنه‌بندی شد (شکل ۶ الف و ب).

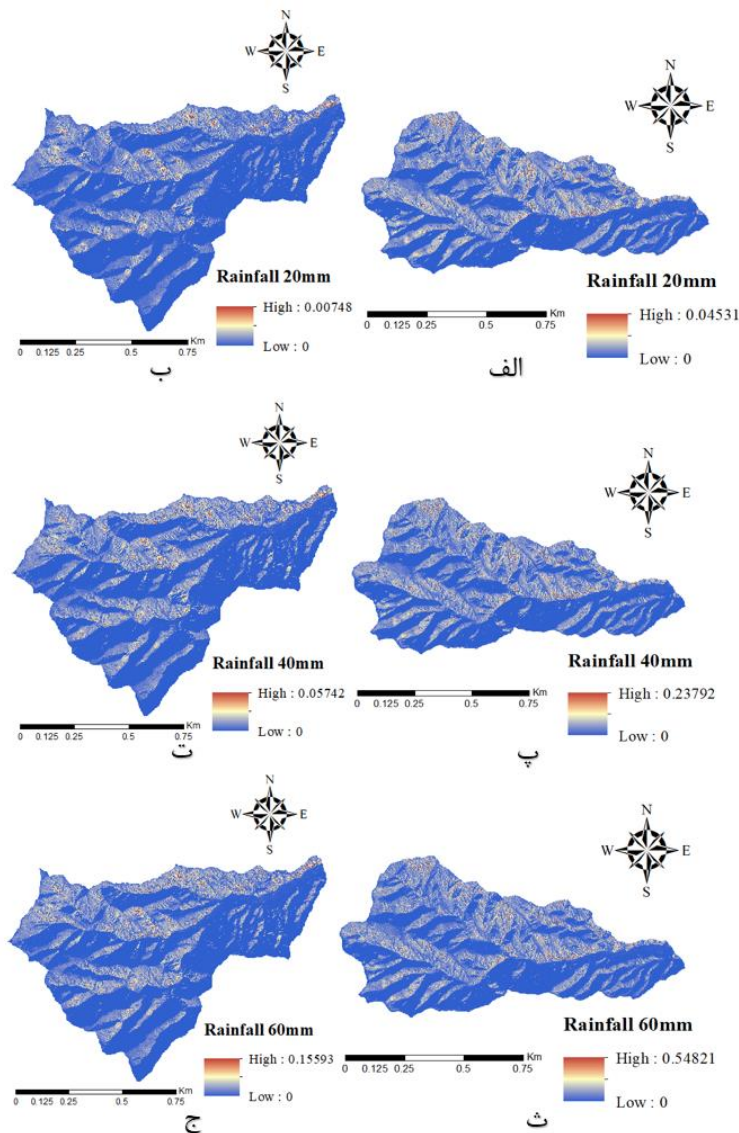
با توجه به تعیین گروه هیدرولوژیکی خاک در دو زیرحوزه (گروه B) و تعیین نوع پوشش گیاهی (عمدتاً گیاهان بوته‌یی و خودرو)، شماره‌ی منحنی در منطقه‌های با کاربری مرتع تعیین کرده شد. عدد به‌دست آمده به ازای هر گیاه در ستون لایه‌ی رستری



شکل ۶- نقشه‌های شماره‌ی منحنی براساس گروه هیدرولوژیکی خاک و کاربری زمین (الف: زیرحوزه‌ی نمونه، ب: زیرحوزه‌ی شاهد).

پس از تهیه‌ی نقشه‌ی شماره‌ی منحنی و چهار نقشه‌ی پایه‌ی دیگر (ارتفاع، شیب، جهت زه‌کشی و تجمع آبراه)، شبیه‌سازی با شبیه‌ساز لندپلنر و شاخص فرسایش انجام شد. بیش‌تر بودن مقدار این شاخص نشان‌دهنده‌ی فرسایش بیش‌تر، و کم‌تر بودن آن نشان‌دهنده‌ی مواد معلق بیش‌تر است. برای شبیه‌سازی با شاخص فرسایشی، حالت ممکن متوسط بارندگی روزانه در سه تراز کمینه، میانه و بیشینه به‌کار گرفته شد. متوسط بارندگی روزانه‌ی فرساینده در تراز کمینه ۲۰ میلی‌متر در روز، و در تراز میانه و بیشینه به‌ترتیب ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر در روز بود (شکل ۷ الف-ج).

نقشه‌ی شماره‌ی منحنی زیرحوزه نمونه ۶۲ تا ۷۱ است و محدوده‌ی عددی شماره‌ی منحنی شاهد ۷۱ تا ۸۰ است (شکل ۶ الف). بنابراین حوزه‌ی نمونه در شرایط بهتری از دید شماره‌ی منحنی است (روان‌آب کم‌تر و مقدار نفوذ از بارش مازاد بیشتر)؛ این تفاوت را باید در گروه هیدرولوژیکی خاک و کاربری زمین (ناشی از پوشش گیاهی حوزه) جست. مشابه این نتیجه، روسی و همکاران (۲۰۱۵) در مقایسه‌ی تفاوت نقشه‌های شماره‌ی منحنی در بخش مرکزی ایتالیا، تفاوت در نتیجه‌ی آستانه‌های پستی‌بلندی ایجادشده در شناسایی منطقه‌های مستعد به روی داد رأس آب‌کندها را ناشی از آن دانستند.



شکل ۷- نقشه‌های شاخص فرسایش براساس نقشه‌های ورودی شبیه‌ساز با در نظر گرفتن بارش روزانه (کمینه ۲۰ میلی متر، متوسط ۴۰ میلی متر، بیشینه ۶۰ میلی متر) در زیرحوزه‌ی نمونه و شاهد.

تایید می‌کند. نتیجه‌ی شبیه‌سازی لندپلنر نشان داد که در این زیرحوزه‌ها با در نظر گرفتن بیشینه‌ی بارش روزانه (۶۰ میلی‌متر) اندازه‌ی فرسایش خاک در زیرحوزه شاهد (شکل ۷ ث) $0/54821$ بود، که بیش‌تر از اندازه‌ی فرسایش خاک در نمونه (۰/۱۵۵۹۳) است (شکل ۷ ج).

به‌طور کلی می‌توان گفت که به‌دلیل اقدام‌های حفاظتی مناسبی که در زیرحوزه نمونه انجام شده‌است، این زیرحوزه در شرایطی بهتر از شاهد بود، زیرا اندازه‌ی فرسایش خاک به مراتب کم‌تر از آن بود. درحالی‌که هر سه حالت ممکن بارش کم تر بودن فرسایش خاک را در زیرحوزه نمونه پیش‌بینی کردند. کریمی‌نژاد و همکاران ۲۰۲۰ نشان دادند که به‌دلیل آن‌که

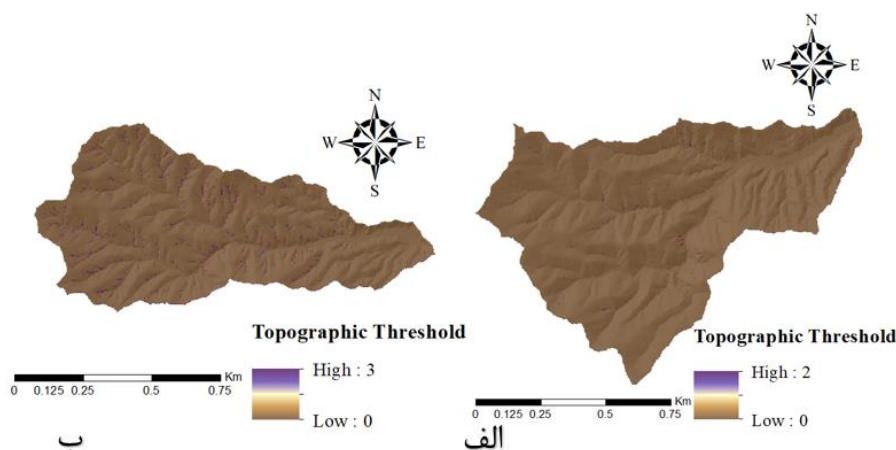
هنگامی که اندازه‌ی متوسط روزانه‌ی بارش در زیرحوزه ۲۰ میلی‌متر بود، بیش‌ترین اندازه‌ی شاخص فرسایش در زیرحوزه شاهد $0/05431$ بود (شکل ۷ الف)، که در مقایسه با مقدار آن در شرایط مشابه بارندگی (۰/۰۰۷۴۸) در زیرحوزه نمونه بیش‌تر بود (شکل ۷ ب).

اندازه‌ی شاخص فرسایش خاک در منطقه‌ی شاهد در زمانی که حالت بارش ۴۰ میلی‌متر به‌کار گرفته‌شد $0/23792$ بود (شکل ۷ پ). این در شرایطی است که اندازه‌ی شاخص فرسایشی در زیرحوزه‌ی نمونه (بارش ۴۰ میلی‌متر) $0/05742$ است (شکل ۷ ت). بنابراین به‌کارگیری حالت ممکن بارش ۴۰ میلی‌متر نیز اندازه‌ی فرسایش کم‌تر زیرحوزه‌ی نمونه را از زیرحوزه شاهد

در نظر نگرفتن حالت‌های ممکن بارش در فرآیند شبیه‌سازی است. شکل ۸ نقشه‌های پهنه‌بندی خروجی ناشی از آستانه‌های فرسایشی را نشان می‌دهد، که در آن مقدار فرسایش زیرحوزه نمونه (شکل ۸ الف) کم‌تر از شاهد بود (شکل ۸ ب)، زیرا در زیرحوزه نمونه تغییر عددی شاخص (۲-۰) کم‌تر از تغییر ناشی از آن در شاهد (۳-۰) بود. بنابراین هر دو شاخص به‌کاررفته در شبیه‌سازی لندپلنر نشان داد که فرسایش خاک در زیرحوزه نمونه کم‌تر از شاهد است.

شبیه‌ساز لندپلنر توان زیادی در شبیه‌سازی تحول فرسایش دارد، با روی‌کرد فرآیندی در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت، این روش یکی از کارآمدترین و به‌روزترین شبیه‌سازهای آب‌پویایی، بر پایه‌ی معادله‌های فیزیکی برای تعیین گسترش انواع فرسایش است.

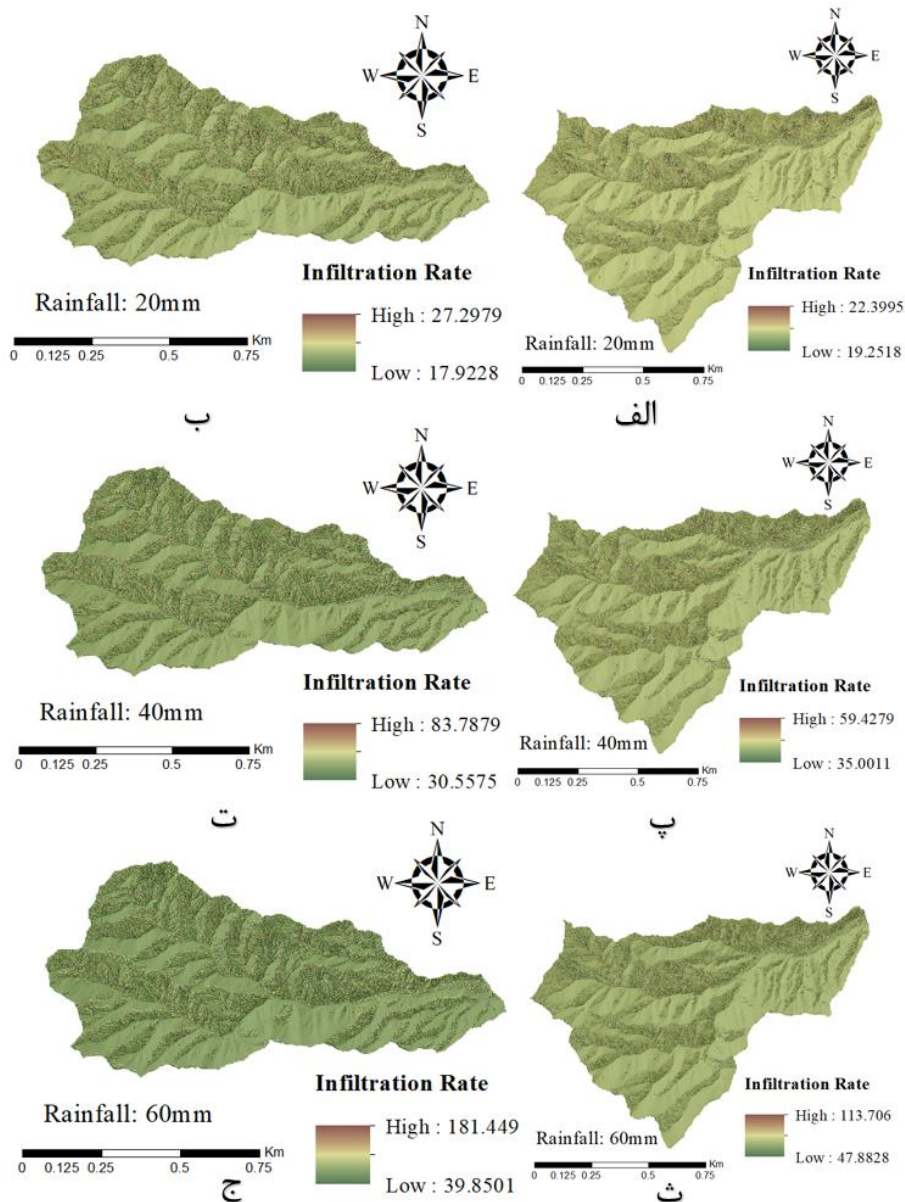
علاوه بر شاخص فرسایش، شاخص آستانه‌ی پستی‌وبلندی نیز برای تعیین کردن اندازه‌ی فرسایش در زیرحوزه‌ها به‌کار گرفته شد. تفاوت شاخص آستانه‌ی پستی‌وبلندی با شاخص فرسایش



شکل ۸- نقشه‌های آستانه‌ی فرسایش براساس نقشه‌های ورودی شبیه‌ساز لندپلنر با در نظر نگرفتن بارش روزانه در زیرحوزه‌ی نمونه (الف) و شاهد (ب).

زیرحوزه نمونه و شاهد را نشان می‌دهد. کم‌ترین نفوذپذیری با هر سه حالت ممکن بارش در نمونه بیش‌تر از شاهد بود، درحالی‌که بیش‌ترین نفوذپذیری با هر سه حالت بارشی در شاهد بیش‌تر از نمونه بود.

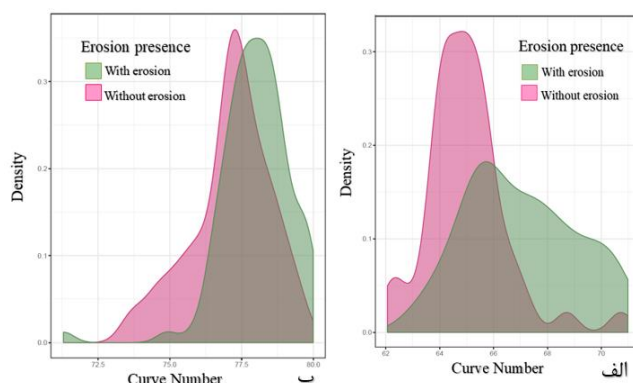
علاوه بر این‌ها، برای تهیه‌ی نقشه‌های نفوذپذیری خاک (یکی از خروجی‌های شبیه‌ساز لندپلنر) نیز در نرم‌افزار R رمزنویسی شد. شکل ۹ نقشه‌های اندازه‌ی نفوذپذیری (واحد داری) براساس ۵ نقشه‌ی ورودی شبیه‌ساز با در نظر گرفتن بارش روزانه (کمینه ۲۰ میلی‌متر، متوسط ۴۰ میلی‌متر، بیشینه ۶۰ میلی‌متر) در



شکل ۹- نقشه‌های نفوذپذیری براساس نقشه‌های ورودی شبیه‌ساز با در نظر گرفتن بارش روزانه (کمینه ۲۰ میلی متر، متوسط ۴۰ میلی متر، بیشینه ۶۰ میلی متر) در زیرحوزه‌ی نمونه و شاهد.

بیش تری ایجاد می‌کند. برای مثال در محدوده‌های حدود ۶۶ در زیرحوزه نمونه فرسایش خاک بیش تر بود، چون شماره‌ی منحنی بیش تر بود، و این نشان دهنده‌ی روان‌آب بیش تر در سطح است. در حالی که در مکان‌هایی که حساسیت خاک به فرسایش کم تر برآورد شد، شماره‌ی منحنی حدود ۶۴ بود (شکل ۱۰ الف). در محدوده‌های ۷۷/۵-۸۰ در زیرحوزه شاهد، شماره‌ی منحنی بیش تر ناشی از روان‌آب بیش تر، منجر به فرسایش بیش تری شد، اما در مکان‌هایی با حساسیت به فرسایش کم تر، شماره‌ی منحنی ۷۷/۵-۷۵ بود (شکل ۱۰ ب).

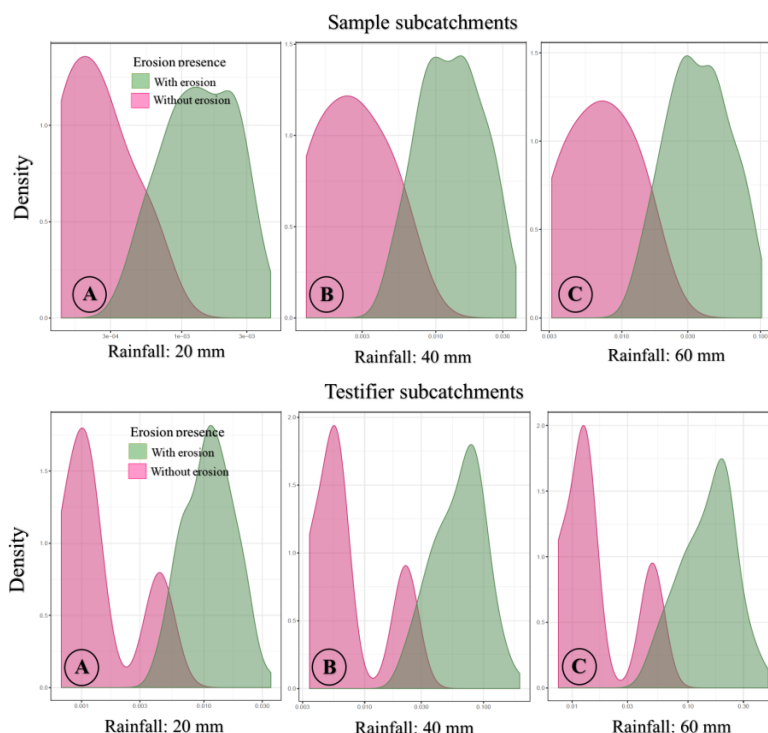
برای ارزیابی شبیه‌ساز لندلنر در محدوده‌های با فرسایش و بی فرسایش، در زیرحوزه نمونه آستانه‌های عددی عوامل ورودی شبیه‌ساز که در آن‌ها احتمال فرسایش خاک بیش تر است، با آستانه‌های عددی که در آن‌ها احتمال فرسایش خاک کم تر است، مقایسه کرده شد. نمودارهای سبز نشان دهنده‌ی ایجاد یا گسترش فرسایش خاک، و نمودارهای صورتی نشان دهنده‌ی فرسایش خاک کم تر یا نبود فرسایش خاک است. تحلیل‌های آماری براساس نقشه‌ی شماره‌ی منحنی نشان می‌دهد که هر چه شماره‌ی منحنی افزایش یابد، مکان‌ها شرایط فرسایشی



شکل ۱۰- مقایسه‌ی آستانه‌های عددی محدوده‌های با فرسایش و بی فرسایش براساس نقشه‌ی شماره‌ی منحنی در زیرحوزه‌ی نمونه (الف) و شاهد (ب).

در حالی که در هر سه نمودار، با افزایش اندازه‌ی بارندگی، نمودار سبز (فرسایش بیشتر) به سمت راست رفت، به این معنا که فرسایش خاک افزایش یافت (شکل ۱۱).

ارزیابی در زیرحوزه نمونه و شاهد با در نظر گرفتن بارش در سه تراز ۲۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌متر نشان می‌دهد که هر چه اندازه‌ی بارش افزایش یابد (از ۲۰ میلی‌متر به ۶۰ میلی‌متر) اندازه‌ی فرسایش تراکم نقطه‌های فرسایشی: ستون عمودی) نیز بیشتر می‌شود.



شکل ۱۱- مقایسه‌ی آستانه‌های عددی محدوده‌های با فرسایش و بی فرسایش براساس حالت‌های ممکن بارش در زیرحوزه‌ی نمونه (بالا) و شاهد (پایین).

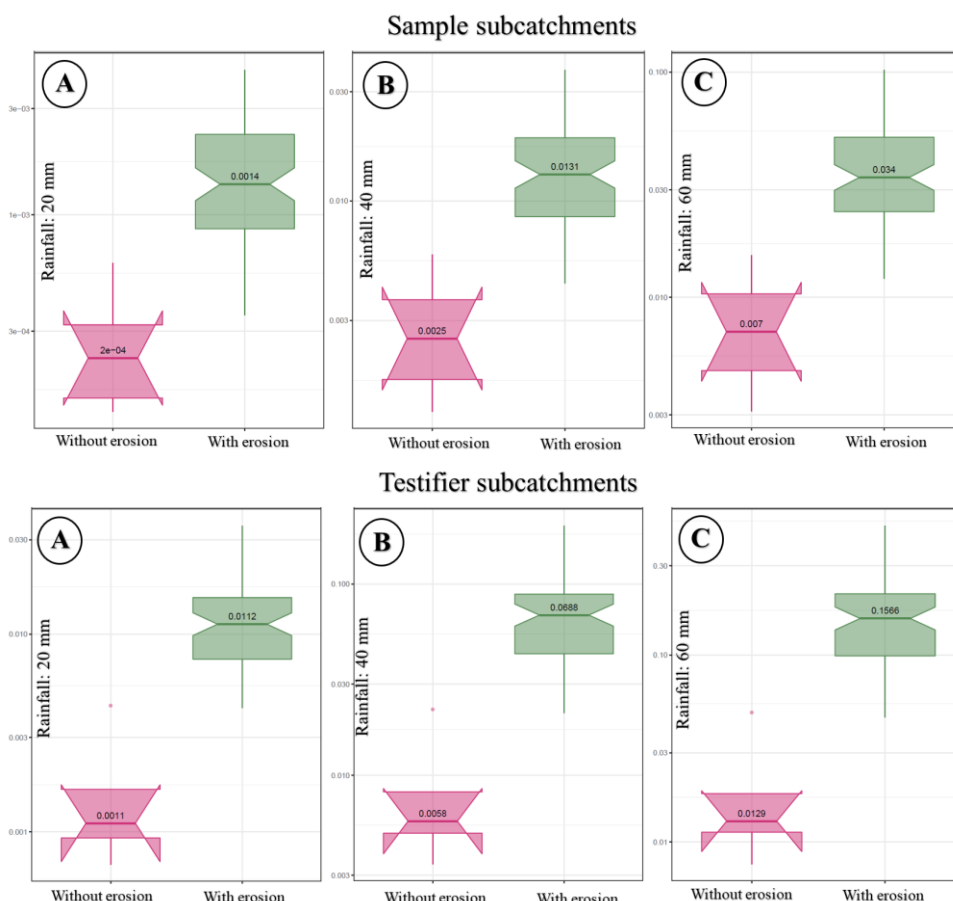
ارزیابی در زیرحوزه نمونه با حالت بارش ۲۰ میلی‌متر نشان داد که اختلافی بین محدوده‌های با فرسایش و بی فرسایش نبود ۰/۰۰۱۴ (۰/۰۴ - ۰/۰۴) است. این مقدار برای حالت بارش ۴۰ میلی‌متر ۰/۰۱۰۶ (۰/۱۳۱ - ۰/۰۲۵) و برای حالت

روش قطعه‌های جعبه‌یی برای مقایسه‌ی اندازه‌ی فرسایش براساس سه حالت ممکن بارش به کار گرفته‌شد. هر چه اختلاف دو قطعه در هر حالت بیشتر تر باشد، مقدار فرسایش بیشتر تر، و آن حالت ممکن به واقعیت زمینی نزدیک تر است. نتیجه‌ی

میلی‌متر ۰/۰۶۳ (۰/۰۵۸ - ۰/۰۶۸۸) و برای حالت بارش ۶۰ میلی‌متر نیز ۰/۱۴۳۷ (۰/۱۲۹ - ۰/۱۵۶۶) تفاوت داشت (شکل ۱۲ پایین). بنابراین، نتیجه‌ی ارزیابی برای هر دو زیرحوزه نشان داد که اندازه‌ی فرسایش خاک با افزایش مقدار بارش افزایش یافته، و به دلیل شرایط محیطی احتمال روی داد حالت ۶۰ میلی‌متر بارش بیش‌تر است.

بارش ۶۰ میلی‌متر نیز ۰/۰۲۷ (۰/۰۳۴ - ۰/۰۰۷) تفاوت داشت (شکل ۱۲ بالا).

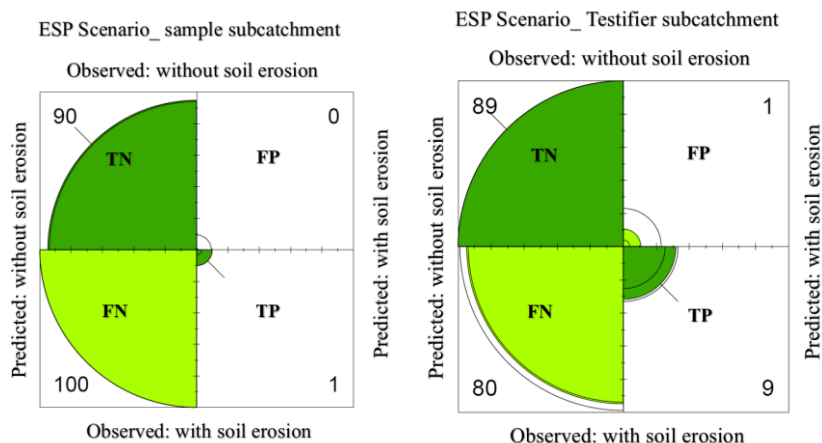
ارزیابی در زیرحوزه شاهد با حالت بارش ۲۰ میلی‌متر با روش چهارچوب‌های جعبه‌یی نشان داد که اختلاف بین محدوده‌های با فرسایش و محدوده‌هایی بی فرسایش ۰/۰۱۰۱ (۰/۰۱۱ - ۰/۰۱۱۲) است. این مقدار برای حالت بارش ۴۰



شکل ۱۲- مقایسه‌ی حالت‌های ممکن بارشی در محدوده‌های با فرسایش و بی فرسایش براساس قطعه‌های جعبه‌یی در زیرحوزه‌ی نمونه (بالا) و شاهد (پایین).

لندپلنر براساس شاخص آستانه‌ی فرسایش نشان داد که این شاخص دقت خوبی در برآورد کردن اندازه‌ی فرسایش ندارد، زیرا مجموع فرسایش خاک صحیح برآوردشده (TN) به همراه صحیح پیش‌بینی‌شده‌ی (TP) فرسایش خاک در منطقه‌های بی فرسایش کم‌تر است از مقدار عددی این نقطه‌ها که در آن‌ها پیش‌بینی‌ها صحیح نیست (FP+FN). استفاده از قطعه‌های چهاروجهی را پورقاسمی و همکاران (۲۰۲۰) نیز انجام دادند و کارایی آن در ارزیابی کردن شبیه‌سازهای داده‌کاوی در شناسایی منطقه‌های حساس به فرسایش آب‌کندی تایید شد.

ارزیابی صحت شبیه‌ساز لندپلنر در محدوده‌های با فرسایش خاک و بی فرسایش خاک براساس قطعه‌چهاروجهی در زیرحوزه نمونه و شاهد براساس شاخص آستانه‌ی فرسایش نشان داد که شاخص به‌کار گرفته‌شده دقت خوبی در برآورد کردن اندازه‌ی فرسایش در زیرحوزه نمونه دارد (شکل ۱۳)، زیرا مجموع فرسایش خاک صحیح برآوردشده (TN) به همراه صحیح پیش‌بینی‌شده‌ی (TP) فرسایش خاک در منطقه‌های بی فرسایش کم‌تر است از مقدار عددی این نقطه‌ها که در آن‌ها پیش‌بینی‌ها صحیح نیست (FP+FN). در زیرحوزه شاهد، ارزیابی صحت شبیه‌ساز



شکل ۱۳- ارزیابی صحت شبیه‌ساز لندپلنر در محدوده‌های با فرسایش و بی فرسایش بر اساس قطعه چهاروجهی در زیرحوزه‌ی نمونه و شاهد.

سطح زیرمنحنی خوب بود (مقدار عددی بین ۰/۸-۰/۹)؛ هر چند پیش‌بینی شبیه‌ساز برای حالت ۶۰ میلی‌متر بارش تا حدودی به واقعیت نزدیک‌تر بود.

جدول ۲ ارزیابی شبیه‌ساز لندپلنر با سطح زیرمنحنی را نشان می‌دهد. در زیرحوزه نمونه و شاهد، صحت هر سه حالت ممکن از نظر

جدول ۲- ارزیابی شبیه‌ساز لندپلنر با شاخص سطح زیر منحنی.

حالت‌های ممکن بارشی	سطح زیرمنحنی نمونه	سطح زیرمنحنی شاهد
۶۰ میلی متر	۰/۸۲۱۲	۰/۸۱۰۹
۴۰ میلی متر	۰/۸۲۱۱	۰/۸۱۰۹
۲۰ میلی متر	۰/۸۲۰۶	۰/۸۱۱۰

علاوه بر آن، با اجرای این طرح، زیرساخت مناسبی برای دقیق‌تر کردن شبیه‌سازهای تجربی برآورد فرسایش و مواد معلق، و ارزیابی کمی دقیق‌تر برای برنامه‌ریزی اقدام‌ها و طراحی‌های ساختمانی در آبخیزها، حفاظت خاک و اقدام‌های سازه‌یی برای وزارتخانه‌ها و دستگاه‌های اجرایی مختلف فراهم می‌شود، تا اقدام‌های اجرایی مختلف در قلمرو کشاورزی، برنامه‌ریزی‌های آبی در آبخیز، و حفاظت خاک پایدارتر و با آسیب‌های زیست‌محیطی کم‌تر باشد.

علاوه بر آن تاکنون، فن‌آوری سنجش‌از‌دور پهپاد در تحقیقات ملی برای پایش زمانی-مکانی رخساره‌های فرسایشی شایع به کار برده نشده است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که در حد توان تحقیق بیش‌تری بر واقعیت رفتارهای رخساره‌های فرسایشی و هدررفت خاک شود. بنابراین شناسایی رفتار زمانی-مکانی آن‌ها در مدیریت زمین و کاهش خسارت‌ها (خطر-محور) بسیار مهم است.

بنابراین، از یک‌سو نوع‌های مختلف فرسایش خاک عارضه‌های طبیعی ناشی از تخریب طبیعت است، که اگر در مرحله‌های اول مدیریت نشود، مهار کردن زیان‌های آن در آینده به هزینه‌های بسیار زیاد و ساخت سازه‌های پرشمار نیاز دارد. از سوی دیگر تبدیل شدن مساحت بسیار زیادی از زمین در استان سیستان و بلوچستان به خاک فرساییده نگران‌کننده و نیازمند برنامه‌ریزی جامع‌تر برای کاستن از زیان‌های ناشی از این پدیده‌ی طبیعی-انسانی است. با استناد به نتیجه‌ی تحقیقات آب‌پویایی (هیدرودینامیکی) و فرآیندی فرسایش‌های پیچیده می‌توان گفت که اگرچه ممکن نیست واکنشی فوری (درمان) برای مهار کردن آن‌ها شکل گیرد، (در هر مساله پیش‌گیری بهتر از درمان است)، ولی قطعاً با این نتیجه‌ها و شناخت وضعیت گسترش این نوع فرسایش‌ها، با برنامه‌ریزی درست در زمینه‌ی حفاظت تا حدودی می‌توان از شدت یافتن و توسعه‌ی آن‌ها پیش‌گیری کرد، و در جانیابی ساختمانی‌ها، راه‌های زیربنایی، راه‌های ارتباطی و مانند آن‌ها این دانسته‌ها را در نظر گرفت.

(زیرحوزه‌های معرف زوجی) است. این شبیه‌ساز که با موفقیت در کشور ایتالیا به‌وسیله‌ی مرکز تحقیقات ملی به‌کار برده شده‌است، ممکن است تغییر چشم‌انداز را با روندیابی و طراحی حالت‌های ممکن اندازه‌ی بارش روزانه و تغییر ناشی از پوشش گیاهی در سرتاسر مدل رقومی ارتفاعی زیرحوزه بررسی، و با در نظر گرفتن تغییر ارتفاع منحصر به هر یک از سلول‌های شبکه مطابق با فرآیندهای شیب (براساس قانون‌های آب‌پویایی)، براساس سناریوهای بارش و شماره‌ی منحنی شبیه‌سازی کند، بنابراین کاربرد آن در منطقه‌هایی که در خطر فرسایش خاک است توصیه می‌شود.

تقدیر و تشکر

این پژوهش با حمایت شرکت مهندسی مشاور نوآوران علوم مکانی (مهدی کریمی، مدیر بخش فوتوگرامتری، امیر علی‌زاده، مدیر بخش پهپاد، و آیدین کرنژادی، مدیر بخش منابع طبیعی)، اداره‌ی کل منابع طبیعی و آبخیزداری استان سیستان و بلوچستان (عبدالله بامری، معاون آبخیزداری و علیرضا سروری نژاد، رییس اداره‌ی آبخیزداری و حفاظت خاک)، و سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور (محمد شرافتی، معاون دفتر آبخیزداری و حفاظت خاک و علیرضا رجب‌پور، رییس گروه حوزه‌های معرف، زوجی) به‌انجام رسید. بدین وسیله خود را قدردان یاری بی‌دریغشان می‌دانیم.

نتیجه‌گیری

شبیه‌ساز آزمایشگاهی لندپلنر برای تحلیل اندازه‌ی اثرگذاری اقدام‌های آبخیزداری در زیرحوزه نمونه و مقایسه‌ی آن با شاهد و شناسایی منطقه‌های حساس به فرسایش انجام شد. براساس نتیجه‌ی به‌کارگیری شاخص فرسایشی لندپلنر در زیرحوزه شاهد و نمونه با در نظر گرفتن بیشینه‌ی بارش روزانه (۶۰ میلی‌متر) اندازه‌ی فرسایش خاک در شاهد بیش‌تر از نمونه بود. با شاخص آستانه‌ی فرسایش این شبیه‌ساز در زیرحوزه نمونه، تغییر عددی کم‌تری از تغییر ناشی از این شاخص در زیرحوزه‌ی شاهد نشان داد.

بنابراین، هر دو شاخص به‌کاررفته در شبیه‌ساز لندپلنر نشان داد که فرسایش خاک در زیرحوزه نمونه کم‌تر از شاهد است. ارزیابی شبیه‌ساز لندپلنر نشان داد که اندازه‌ی فرسایش خاک با افزایش بارش افزایش یافت، و از دیدگاه شرایط محیطی احتمال روی داد حالت ۶۰ میلی‌متر بارش بیش‌تر است.

شبیه‌ساز لندپلنر با پوشش‌دادن دامنه‌ی گسترده‌ی از فرآیندها، امکان مقایسه‌ی جامع بین نتیجه‌ی شبیه‌سازی پاسخ زیرحوزه‌ها به تغییر محیط را فراهم می‌کند. این کار نه‌تنها اثرهای مستقیم هر فرآیند را در بر می‌گیرد، که تعامل ارتباطی بین فرآیندهای مختلف و فرآیندهای بازخوردی مرتبط با آن‌ها را نیز شامل می‌شود. مشخصه‌ی بسیار مهم این شبیه‌ساز، شبیه‌سازی به‌شکل پیوسته و واقعیه‌ی در سطح کل زیرحوزه

- Amiri M, Pourghasemi HR, Ghanbarian GA, Afzali SF. 2019. Assessment of the importance of gully erosion effective factors using Boruta algorithm and its spatial modeling and mapping using three machine learning algorithms. *Geoderma*. 340:55–69.
- Bartley R, Poesen J, Wilkinson S, Vanmaercke M. 2020. A review of the magnitude and response times for sediment yield reductions following the rehabilitation of gullied landscapes. *Earth Surface Processes and Landforms*. 45(13): 3250–3279.
- Bovi RC, Moreira CA, Rosolen VS, Rosa FTG, Furlan LM, Helene LPI. 2020. Piping process: Genesis and network characterization through a pedological and geophysical approach. *Geoderma*. 361: 114101–114109.
- Campo Bescós MA, Flores Cervantes JH, Bras RL, Casali J, Giráldez JV. 2013. Evaluation of a gully headcut retreat model using multitemporal aerial photographs and digital elevation models. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 118(4): 2159–2173.
- Capra A, Scicolone B. 2002. SW—Soil and Water: Ephemeral gully erosion in a wheat-cultivated area in sicily (Italy). *Biosystems Engineering*. 83(1): 119–126.
- Chen JP, Kok K, Verburg PH, Cammeraat LH. 2007. Identification of vulnerable areas for gully erosion under different scenarios of land abandonment in Southeast Spain. *Catena*. 71(1): 110–121.
- De Vente J, Poesen J, Verstraeten G, Govers G, Vanmaercke M, Van Rompaey A, Arabkhedri M, Boix-Fayos C. 2013. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: where do we stand?. *Earth-Science Reviews*. 127(3): 16–29.
- Dotterweich M, Rodzik J, Zgłobicki W, Schmitt A, Schmidtchen G, Bork HR. 2012. High resolution gully erosion and sedimentation processes, and land use changes since the Bronze Age and future trajectories in the Kazimierz Dolny area (Nałęczów Plateau, SE-Poland). *Catena*. 95(1): 50–62.
- Dube HB, Mutema M, Muchaonyerwa P, Poesen J, Chaplot V. 2020. A global analysis of the morphology of linear erosion features. *Catena*. 190(1): 104–542.
- Fořter GR. 2005. Modeling ephemeral gully erosion for conservation planning. *International Journal of Sediment Research*, 20(3): 157–175.
- Guan L, Pan H, Zou S, Hu J, Zhu X, Zhou P. 2020. The impact of horizontal errors on the accuracy of freely available Digital Elevation Models (DEMs). *International Journal of Remote Sensing*, 41(19): 7383–7399.
- Hamshaw SD, Engel T, Rizzo DM, O’Neil-Dunne J, Dewoolkar MM. 2019. Application of unmanned aircraft system (UAS) for monitoring bank erosion along river corridors. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 10(1): 1285–1305.
- Hosseinalizadeh M, Alinejad M, Zarei H, Jalalifard AR. 2018. Tunnel erosion, threat or opportunity. *Scientific-Extension Journal of Land Management*. 7(2): 177–165. (In Persian).
- Hosseinalizadeh M, Kariminejad N, Chen W, Pourghasemi HR, Alinejad M, Behbahani AM, Tiefenbacher J. 2019. How can statistical and artificial intelligence approaches predict piping erosion susceptibility?. *Geomorphology*. 646: 1554–1566.
- Jalalifard A, Hosseinalizadeh M, Komaki ChB, Azim Mohseni B. 2018. Piping erosion modeling in loess soils. *Environmental Erosion Research*. 8 (4): 1–18. (In Persian).

- sian).
- Kariminejad N, Rossi M, Hosseinalizadeh M, Pourghasemi HR, Santosh M. 2020. Gully head modelling in Iranian Loess Plateau under different scenarios. *CATENA*. 194(3): 104769–104779.
- Kariminejad N, Hosseinalizadeh M, Pourghasemi HR, Bernatek-Jakiel A, Campetella G, Ownegh M. 2019. Evaluation of factors affecting gully headcut location using summary statistics and the maximum entropy model: Golestan Province, NE Iran. *Science of The Total Environment*. 677(10): 281–298.
- Kariminejad N, Hosseinalizadeh M, Pourghasemi HR. 2020. A review of spatial monitoring of piping collapse using unmanned aerial vehicle in loess-derived soils in the Golestan Province. *Journal of Watershed Management Research*. (2) 33: 69–53. (In Persian).
- Khoja J, Qudusi J, Ismaili R. 2012. Investigation of the relationship between physical and chemical properties of soil and the prevalence of trench erosion in the Golestan Province Basin, *Watershed Management Research Journal*. 3(5): 41–27. (In Persian).
- Koci J, Jarihani B, Leon JX, Sidle RC, Wilkinson SN, Bartley R. 2017. Assessment of UAV and ground-based Structure from Motion with multi-view stereo photogrammetry in a gullied savanna catchment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 6(11): 328–339.
- Kornejady A, Pourghasemi HR, Afzali SF. 2019. Presentation of RFFR new ensemble model for landslide susceptibility assessment in Iran. In *Landslides: Theory, Practice and Modelling*. 50(978): 123–143.
- Ebrahimi M, Javadi M, Vafakhah M. 2015. Investigation of effective soil and non-soil factors in creating linear gully erosion in Aq Imam watershed. *Soil Research (Soil and Water Sciences)*. 29(4): 447–498. (In Persian).
- Peeters I, Rommens T, Verstraeten G, Govers G, Van Rompaey A, Poesen J, Van Oost K. 2006. Reconstructing ancient topography through erosion modelling. *Geomorphology*. 78(3–4): 250–264.
- Poesen J. 2018. Soil erosion in the Anthropocene: Research needs. *Earth Surf. Process. Landforms* 43(1): 64–84.
- Poesen JWA, Torri DB, Vanwallegem T. 2011. Gully erosion: Procedures to adopt when modelling soil erosion in landscapes affected by gully erosion. *Handbook of Erosion Modelling*.
- Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G, Valentin C. 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*. 50(2–4): 91–133.
- Pourghasemi HR, Kariminejad N, Gayen A, Komac M. 2020. Statistical functions used for spatial modelling due to assessment of landslide distribution and landscape-interaction factors in Iran. *Geoscience Frontiers*. 11(4): 1257–1269.
- Rahmati O, Tahmasebipour N, Haghizadeh A, Pourghasemi HR, Feizizadeh B. 2017a. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion. *Geomorphology*. 298(1): 118–137.
- Rieke-Zapp DH, Nichols MH. 2011. Headcut retreat in a semiarid watershed in the southwestern United States since 1935. *Catena*. 87(1): 1–10.
- Rossi M, Torri D, Santi E. 2015. Bias in topographic thresholds for gully heads. *Natural Hazards*. 79(1): 51–69.
- Rossi M, Torri D, Santi E, Bacaro G, Marchesini I, Mondini A, Felicioni G. 2014. Slope dynamics and climatic change through indi-

- rect interactions. *Engineering Geology for Society and Territory*. 1(1): 551–555.
- Roshan Zamir S. 2020. Zoning of landslide sensitivity of Maragheh Basin to gully erosion using fuzzy multi-characteristic decision making method. *Quantitative GeomorphologicalR*. 9 (2): 194–175. (In Persian).
- Saber Chenari K, Beneficiary AA. 2016. Zoning of trench erosion risk in Qarnaveh Watershed, Golestan Province. *Echo Hydrology*. 3 (2): 231–219. (In Persian).
- Temme A, Veldkamp A. 2009. Multi-process late quaternary landscape evolution modelling reveals lags in climate response over small spatial scales. *Earth Surface Processes and Landforms*. 34(4): 573–589.
- Torri D, Poesen J. 2014. A review of topographic threshold conditions for gully head development in different environments. *Earth-Science Reviews*. 130(1): 73–85.
- Torri D, Poesen J, Rossi M, Amici V, Spennacchi D, Cremer C. 2018. Gully head modelling: a Mediterranean badlands case study. *Earth Surf. Process. Landforms*. 43(12): 2547–2561.
- Toy TJGR, Fošter KG, Renard. 2002. *Soil erosion, processes, prediction, measurement and control*, John Wiley and Sons.
- Tucker GE, Slingerland RL. 1994. Erosional dynamics, flexural isostasy, and long lived escarpments: A numerical modeling study. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 99(B6): 12229–12243.
- USDA NCRS. 2012. *National Engineering Handbook*. United States Department of Agriculture (USDA) Natural Resources Conservation Service (NRCS).
- Valcárcel M, Taboada MT, Paz A, Dafonte J. 2003. Ephemeral gully erosion in northwestern Spain. *Catena*. 50(2): 199–216.
- Valentin C, Poesen J, Li Y. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena*. 63(2–3): 132–153.
- Vandekerckhove L, Poesen J, Oostwoud Wijdenes D, Gyssels G. 2001. Short-term bank gully retreat rates in Mediterranean environments. *Catena*, 44(2):133–161.
- Vanmaercke M, Poesen J, Van Mele B, Demuzere M, Bruynseels A, Golosov V, Bezerra JFR, Bolysov S, Dvinskih A, Frankl A, Fuseina Y, Guerra AJT, Haregeweyn N, Ionita I, Makanzu Imwangana F, Moeyersons J, Moshe I, Nazari Samani A, Niacsu L, Nyssen J, Otsuki Y, Radone M, Rysin I, Ryzhov YV, Yermolaev O. 2016. How fast do gully heads retreat? *Earth-Science Rev*. 154(1): 336–355.
- Vanwalleghem T, Poesen J, Nachtergaele J, Verstraeten G. 2005. Characteristics, controlling factors and importance of deep gullies under cropland on loess-derived soils. *Geomorphology*. 69(1–4):76–91.
- Wells RR, Bennett SJ, Alonso CV. 2011. Impact of upstream sediment inflow on headcut morphodynamics. *Landform Analysis*. 17(1429): 225–227.
- Zahraei B, Naseri M, Roozbehani A. 2010. Modeling the effects of climate change on water resources in Siŝtan and Baluchestan province. Fourth Regional Conference on Climate Change. Tehran. (In Persian).
- Zarei H, Najafinejad A, Hosseinalizadeh M, Ali-pour K. 2017. Evaluation of the efficiency of EGEM model for estimating gully erosion in Ikeh Aghzali watershed of Golestan province. *Soil and water conservation research*. 24(5): 162–147. (In Persian).



Watershed Management Research

VOL. 34, No. 3, Ser. No: 132, Autumn 2021, pp. 19 -39
DOI: 10.22092/wmej.2021.351438.1357

Research Paper



An Assessment of Watershed Management Activities on the Soil Erosion Potential Using the Physical LANDPLANER Model in the Treated and Control Sub-catchment of the Goorband in Sistan and Baluchestan

Narges Kariminejad

Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Faculty of Range and Watershed Management, Dept. of Arid Zone Management, Gorgan, Iran

Abbas Goli Jirandeh

Spatial Sciences Innovators (SSI) Consulting Engineering Co.

Hadi Alizadeh

Spatial Sciences Innovators (SSI) Consulting Engineering Co.

Mohsen Hosseinalizadeh

Gorgan University of Agricultural Sciences & Natural Resources, Faculty of Range and Watershed Management, Dept. of Arid Zone Management, Gorgan, Iran

Hamid Reza Pourghasemi

(Corresponding Author) Dept. of Natural Resources and Environmental Engineering, College of Agriculture, Shiraz University, Shiraz, Iran

*Corresponding Authors Email: hr.pourghasemi@shirazu.ac.ir

Received: 23 August 2020

Accepted: 20 December 2020

Abstract

The aim of this study was to analyze the effectiveness of watershed management activities in a representative sub-catchment (treated) and its comparison with a control one, and to identify the erosion sensitive areas in these sub-catchments areas of 58 hectares (control) and 83 hectares (treated) the using UAV photogrammetry. Based on a curve number and four other basic maps (elevation, slope, drainage direction, and accumulation density), three daily precipitation scenarios of 20, 40, and 60 mm were considered to model the LANDPLANER with two indices of Erosion Index and Topographic Threshold. The results were evaluated using the boxplot methods, fourfold plot, and the area under the receiver operating characteristic curve. The Erosion index (IE) in the LANDPLANER model, considering the maximum daily precipitation of 60 mm, was 0.54821 for the control sub-catchment which was more than that of the treated one (0.15593). The modeling based on the topographic Threshold also showed that the numerical changes of the index between 0-2 in the treated sub-catchment were less than that of the control area (0-3). Therefore, it can be said that due to the appropriate protective operations that had taken place on the treated sub-catchment, this area is in a better condition than the control one, as the volume of soil erosion was less than that of the control sub-catchment. It is informative to know that all of the three precipitation scenarios predict less soil erosion in the treated sub-catchment. Therefore, simulation based on the rainfall and curve number scenarios with LANDPLANER physical model is recommended to evaluate the effect of watershed management activities on the paired sub-catchments that are degraded due to soil erosion.

Keywords: Physical-based model, paired sub-catchments, Sistan and Baluchestan, UAV