

## کاربرد مدل LAPSUS در برآورد رواناب و رسوب در حوضه زوجی کاخک شهرستان گناباد

مسعود عشقی‌زاده<sup>۱</sup>، علی طالبی<sup>۲\*</sup>، محمدتقی دستورانی<sup>۳</sup>، حمیدرضا عظیم‌زاده<sup>۲</sup>

۱. دانش‌آموخته دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری دانشگاه یزد

۲. دانشیار، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد

۳. استاد، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت ۱۳۹۴/۱۱/۰۲؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۲/۱۷)

### چکیده

در این تحقیق مدل LAPSUS به‌عنوان یک مدل برآورد رواناب و فرسایش و رسوب برای نخستین‌بار در ایران در حوضه زوجی کاخک شهرستان گناباد معرفی و اجرا شده است. مدل LAPSUS یک مدل تغییر چشم‌انداز است که قادر به محاسبه حجم رواناب، فرسایش و رسوب طی چهار مرحله محاسبه بارش مؤثر، روندیابی جریان سطحی، محاسبه ظرفیت حمل رسوب و محاسبه میزان حمل رسوب است. ورودی‌های این مدل شامل مدل رقومی ارتفاع، مقدار بارش، ضریب رواناب، عامل همگرایی، ضرایب ویژه دبی و شیب و عامل فرساینده‌گی و ته‌نشست است. نتایج نشان داد مدل LAPSUS قادر است حجم رواناب و فرسایش و رسوب روندیابی شده از وقایع را به‌صورت نقشه‌های رواناب و فرسایش و رسوب با فرمت رستری به‌خوبی نمایش دهد. نتایج اعتبارسنجی نیز نشان داد مقدار RMSE نرمال‌شده برای مقادیر رواناب ۳/۵ درصد و برای فرسایش ۲/۶ درصد است. همچنین ضریب تبیین برای داده‌های رواناب ۹۹ درصد و برای داده‌های فرسایش ۹۷ درصد است. بر این اساس با توجه به ورودی‌های در دسترس و محدود، این مدل می‌تواند به‌عنوان یک مدل برآورد رواناب، فرسایش و رسوب برای ایران معرفی شود.

**کلیدواژه‌گان:** روندیابی، ظرفیت حمل رسوب، مدل تغییر چشم‌انداز، مدل LAPSUS.

## مقدمه

به‌طور کلی، برای اندازه‌گیری فرسایش و رسوب دو روش وجود دارد؛ مستقیم و غیرمستقیم. روش‌های مستقیم با استفاده از انواع ابزار و وسایل اندازه‌گیری صورت می‌گیرد. در این روش‌ها معمولاً فرسایش و رسوب در مراحل و به‌صورت‌های مختلف اندازه‌گیری و به‌صورت کمی میزان آنها ارائه می‌شود. در روش‌های غیرمستقیم از انواع مدل‌ها، روابط تجربی و سایر پارامترهای مؤثر در ایجاد فرسایش و رسوب برای برآورد فرسایش و رسوب استفاده می‌شود. مدل نمادی از واقعیت است که مهم‌ترین ویژگی‌های دنیای واقعی را به‌صورتی ساده و کلی بیان می‌کند [۱۶].

مدل‌سازی فرسایش و رسوب عبارت است از فرایندی که به‌روش ریاضی، جداسازی ذرات خاک، انتقال رسوب و ته‌نشست ذرات حمل‌شده در سطح اراضی را توضیح می‌دهد. این مدل‌ها می‌توانند به‌عنوان وسیله‌های پیش‌بینی برای ارزیابی میزان خاک از دست‌رفته برای برنامه‌ریزی حفاظتی، برنامه‌ریزی پروژه و بررسی فرسایش خاک و تنظیم و اصلاح اراضی استفاده شوند. همچنین مدل‌های ریاضی متکی بر حالات طبیعی فرسایش می‌توانند محل و زمان وقوع فرسایش را پیش‌بینی کنند و به این ترتیب طراحان برنامه‌های حفاظت خاک را کمک کنند تا با تمرکز تلاش‌های خود، فرسایش خاک را کاهش دهند. علاوه بر این، مدل‌های فرسایش خاک به‌عنوان ابزاری برای درک فرایندهای فرسایش و رسوب و تأثیرات متقابل آنها و نیز به‌منظور تعیین و تنظیم اولویت‌های تحقیق استفاده واقع می‌شوند [۱۶].

<sup>۱</sup>LAPSUS یک مدل تغییر چشم‌انداز (LEM<sup>۲</sup>) است. مدل‌های تغییر چشم‌انداز نتایج حاصل از فعالیت فرایندهای مختلف به شکل‌گیری و تغییر شکل چشم‌انداز را روی یک مدل دیجیتال قابل به‌روزرسانی از چشم‌انداز مانند مدل رقومی ارتفاع (DEM<sup>۳</sup>) نشان می‌دهند [۲۳] و [۲۴]. مدل LAPSUS برای نخستین‌بار در سال ۲۰۰۱ میلادی در دانشگاه واخنینگن هلند توسط تیم تحقیقاتی اسخورل<sup>۴</sup> و ولدکم<sup>۵</sup> معرفی شد و شروع به توسعه کرد. در

این مدل شبیه‌سازی فرسایش و رسوب براساس دو فرض اساسی انجام می‌گیرد. فرض نخست بیان می‌دارد که انرژی پتانسیل جریان سطحی نیروی لازم برای انتقال رسوب را فراهم می‌کند. در فرض دوم تفاوت بین رسوب ورودی و خروجی از هر پیکسل برابر با افزایش خالص در ذخیره رسوب بیان می‌شود.

دبی در این مدل براساس بارش مؤثر محاسبه می‌شود. سپس این دبی به طرف پیکسل‌های پایین دست روندیابی می‌شود. بخش رسوب این مدل براساس معادله پیوستگی حرکت رسوب بنا شده است [۹ و ۱۴]. میزان انتقال رسوب با استفاده از ظرفیت حمل رسوب جریان از یک پیکسل به سایر پیکسل‌ها به‌صورت یک تابع از دبی جریان سطحی و مقدار شیب محاسبه می‌شود. پس از محاسبه دبی برای هر پیکسل شبکه، ابتدا ظرفیت حمل رسوب محاسبه و سپس براساس آن میزان حمل رسوب از هر پیکسل برآورد می‌شود. با جمع این مقادیر در خروجی مد نظر مقدار فرسایش و رسوب قابل محاسبه است.

این مدل در حال حاضر در کشورهای نظیر هلند، نیوزیلند، بلژیک، کنیا، آفریقای جنوبی، اوگاندا، اسپانیا، اکوادور، فرانسه، برزیل، تایوان، کانادا، انگلستان، یونان، غنا و مالی به‌منظور ارزیابی فرایندهای مختلف تغییر چشم‌انداز مانند فرسایش و رسوب‌گذاری، زمین‌لغزش و... به‌کار گرفته شده است [۲].

کلاسنز و همکارانش [۶] تعاملات و بازخوردهای بین تغییر کاربری اراضی و فرایندهای ژئومورفیک را در جنوب اسپانیا بررسی کردند. آنها برای شبیه‌سازی تغییر کاربری اراضی از مدل CLUE و برای شبیه‌سازی فرایندهای فرسایش و رسوب از مدل LAPSUS استفاده کردند. سپس برای بررسی تعاملات و بازخوردهای ناشی از تغییر کاربری اراضی و فرایندهای ژئومورفیک این دو مدل برای کاربری‌های مختلف از اراضی با هم ترکیب شدند. این مطالعه نشان داد تأثیرات تغییر کاربری اراضی می‌تواند به فعالیت‌های مکانی پیچیده‌ای در سطح کاربری و فرایندهای ژئومورفیک منجر شود که این تأثیرات در مقیاس‌های مکانی و زمانی می‌تواند متفاوت باشد. در این بین با تعیین مقادیر ضرایب و پارامترهای مورد نیاز برای مدل لاپسوس، این مدل توانایی بررسی این تأثیرات در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف را به‌خوبی دارد.

1. Landscape Process modelling at multi dimensions and scaleS
2. Landscape Evolution Model
3. Digital Elevation Model
4. Schoorl
5. Veldkamp

## مواد و روش‌ها

### منطقهٔ مطالعه‌شده

منطقهٔ مطالعه‌شده، در زیرحوضهٔ نمونه از حوضهٔ زوجی کاخک واقع بوده است که از زیرحوضه‌های حوضهٔ آبخیز شهید مهدی نوری کاخک و طرح ملی حوضه‌های معرف و زوجی کشور است. این حوضه در فاصلهٔ ۳۵ کیلومتری جنوب شهر گناباد در خراسان رضوی واقع شده است. و بین طول‌های "۵۸°۳۵'۵۷" تا "۵۸°۳۶'۳۵" شرقی و عرض‌های "۳۴°۰۴'۰۶" تا "۳۴°۰۵'۰۶" شمالی قرار دارد. مساحت این حوضه ۱۰۶/۵ هکتار است. این حوضه ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری دارد که در بازه‌های زمانی ۵ دقیقه‌ای داده‌های بارش و رواناب را ثبت می‌کند. همچنین ایستگاه‌های اندازه‌گیری فرسایش و رسوب در سطح دامنه‌ها به‌صورت میدانی پین‌های فرسایشی و پلات‌های رسوب مستقر هستند [۸]. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی-سیاسی این حوضه را نشان می‌دهد. جدول ۱ ویژگی‌های فیزیکی حوضهٔ زوجی را نشان می‌دهد.

### مراحل اجرایی مدل LAPSUS

#### مرحلهٔ نخست: محاسبهٔ بارش مؤثر

دبی در مدل LAPSUS براساس بارش مؤثر محاسبه و به طرف پیکسل‌های پایین‌دست روندیابی می‌شود. این دبی در واحد طول پیکسل (dx) می‌تواند برحسب مترمکعب بیان شود. بارش مؤثر در این مدل با استفاده از ضریب رواناب تعیین می‌شود [۳، ۴، ۵ و ۱۵].

#### مرحلهٔ دوم: روندیابی جریان سطحی

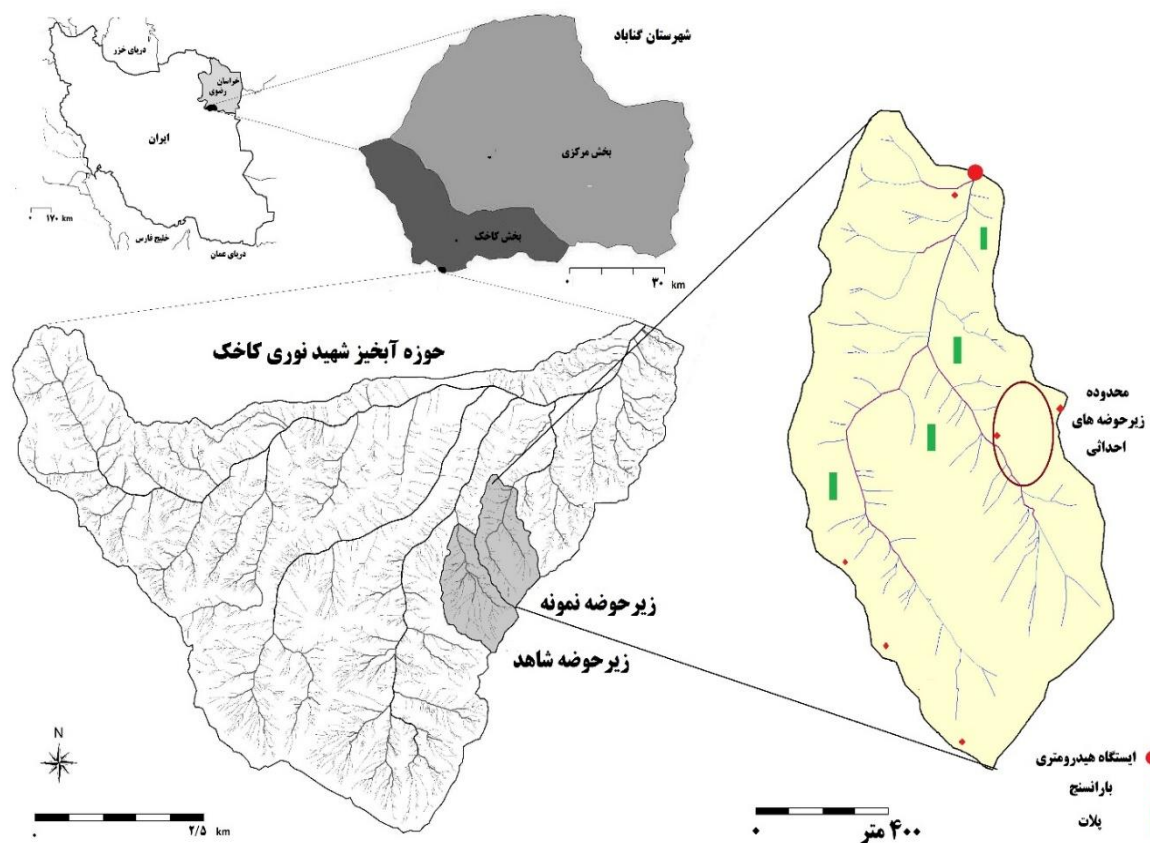
در مدل LAPSUS پس از محاسبهٔ دبی براساس بارش مؤثر، این دبی به طرف پیکسل‌های پایین‌دست دامنه براساس الگوریتم جریان متعدد روندیابی و مقدار تجمعی آن برای هر پیکسل سطح شبکه محاسبه می‌شود. در روندیابی جریان متعدد درصد دبی خارج‌شده از یک پیکسل به هر یک از پیکسل‌های پایین‌دست مجاور با استفاده از یک عامل وزنی مشخص برای هر جهت محاسبه می‌شود. این نسبت در هر جهت از رابطهٔ ۱ محاسبه می‌شود [۱۰، ۱۱، ۱۸ و ۲۸]:

$$F_i = \frac{(\tan \beta)_i^p}{\sum_{j=1}^{\max \lambda} (\tan \beta)_j^p} \quad (1)$$

بارتمن و همکارانش [۴] مدل LAPSUS را برای شبیه‌سازی دینامیک رسوب برای دو مقیاس دامنه و حوضه به‌کار برده‌اند. آنها مقادیر پارامترهایی را که برای روندیابی جریان، محاسبهٔ ظرفیت حمل جریان و فرسایشی و رسوب‌گذاری در مدل تعریف می‌شود برای هر دو مقیاس دامنه و حوضه محاسبه کردند. براساس نتایج به‌دست آمده پس از تعیین پارامترها در دو مقیاس دامنه و حوضه بر اثر تعامل بین دامنه و اراضی پایین‌دست آن، رسوباتی که در فصول گرم و دارای پوشش گیاهی در سطح دامنه رسوب کرده‌اند، به‌عنوان یک منبع تولید رسوب در فصول سرد و بدون پوشش گیاهی برای حوضه عمل می‌کنند. همچنین فرایندهای تعاملی بین فرسایش رسوب‌گذاری و توزیع جریان، رفتار مدل را در دو مقیاس دامنه و حوضه تعیین می‌کند. مهم‌ترین کار صورت‌گرفته در این تحقیق تعیین پارامترهای مدل برای دو فصل دارای پوشش گیاهی و فاقد پوشش گیاهی و سپس بررسی تأثیرات آن بر رواناب، فرسایش و رسوب بود.

کیسترا و همکارانش [۱۱] مدل LAPSUS را به‌عنوان یک مدل تحویل رسوب در مقیاس زمانی روزانه برای کاربرد در حوضه‌های متوسط (۲۰ تا ۲۰۰ کیلومتر مربع) توسعه دادند. هدف آنها تعیین پارامترهای ورودی مدل به‌منظور توسعهٔ مدل لاپسوس بود. نتایج آنها نشان داد که این مدل ورودی‌های کم و قابل دسترسی را لازم دارد و به‌طور قابل اعتمادی می‌تواند دبی پیک را پیش‌بینی کند که برای برآورد ظرفیت حمل رسوب، بار رسوبی و رسوب‌گذاری لازم است.

کاربرد مدل LAPSUS در یک منطقه برای نخستین‌بار نیازمند تعیین پارامترهای اولیهٔ مدل برای منطقهٔ اجراشده است. به‌طوری که در تمامی مطالعات صورت‌گرفته توسط این مدل، تعیین پارامترها و ضرایب ورودی برای مدل لازم و ضروری است. هدف از این تحقیق اجرای مدل LAPSUS به‌صورت یک مطالعهٔ موردی در یک منطقهٔ نیمه‌خشک از ایران بوده تا برای نخستین‌بار این مدل در ایران معرفی شود و نتایج آن به‌عنوان یک مدل برآورد رواناب، فرسایش و رسوب برای این منطقه بررسی شود. برای این منظور لازم است ورودی‌های اولیهٔ این مدل برای شرایط منطقهٔ مطالعه‌شده تعریف و مقادیر بهینهٔ پارامترهای مدل استخراج شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی- سیاسی منطقه مطالعه شده

جدول ۱. ویژگی‌های فیزیکی حوضه زوجی کاخک [۷]

زیر حوضه		عنوان
شاهد	نمونه	
۱۱۰/۶	۱۰۶/۵	مساحت (هکتار)
۵۵/۴	۵۲/۹	شیب متوسط وزنی (درصد)
۱/۸	۱/۸	طول آبراهه (کیلومتر)
۳۲	۳۶	زمان تمرکز (دقیقه)
۱۳/۵	۱۰/۲	تراکم شبکه هیدروگرافی
۲۳۲۵	۲۱۷۱	ارتفاع متوسط (متر)
۰/۰۲۹	۰/۰۲۷	حجم آب جاری شده (میلیون مترمکعب)
۱۵	۵/۸	فرسایش (تن در هکتار)
	۲۴۳	متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر)
	۱۴/۲	متوسط دمای سالانه (سانتی‌گراد)
	شمشک	سازند عمده زمین شناسی
	۱۶۴۵	تبخیر سالانه (میلی‌متر)
		پوشش گیاهی غالب

چمن پیزی، جاروی وحشی، گوش بره، کما، کنگر، گون، درمنه

در صورتی که مقدار رسوب ورودی به پیکسل کمتر از ظرفیت حمل باشد ( $S_0 < C$ )، شرایط فرسایش در آن پیکسل حاکم است و میزان حمل رسوب به صورت رابطهٔ ۳ محاسبه می‌شود [۹ و ۱۴]:

$$S = C + (S_0 - C)e^{-dx.D/C} \quad (۳)$$

در صورتی که مقدار رسوب ورودی به پیکسل بیشتر از ظرفیت حمل باشد ( $S_0 > C$ )، شرایط رسوب‌گذاری در آن پیکسل حاکم است و میزان حمل رسوب به صورت رابطهٔ ۴ محاسبه می‌شود [۹ و ۱۴].

$$S = C + (S_0 - C)e^{-dx.T/C} \quad (۴)$$

در رابطه‌های ۳ و ۴،  $S$  میزان حمل رسوب ( $m^3$ )،  $C$  ظرفیت حمل رسوب ( $m^3$ )،  $S_0$  رسوب ورودی ( $m^3$ )،  $dx$  طول پیکسل شبکه ( $m$ )،  $D$  ظرفیت جداشدگی ذرات خاک سطحی ( $m^2$ ) و  $T$  ظرفیت ته‌نشست ( $m^2$ ) است. ظرفیت جداشدگی، میزان سهولت ذرات خاک را برای جدا شدن و ظرفیت ته‌نشست، میزان سهولت رسوبات را برای ته‌نشست نشان می‌دهند و به صورت رابطه‌های ۵ و ۶ محاسبه می‌شوند [۳، ۴، ۵، ۱۵ و ۲۷].

$$D = k_{es} \cdot Q \cdot \tan \beta \quad (۵)$$

$$T = P_{es} \cdot Q \cdot \tan \beta \quad (۶)$$

در رابطه‌های ۵ و ۶،  $k_{es}$  عامل فرسایش‌پذیری سطح ( $1/m$ )،  $P_{es}$  عامل پتانسیل رسوب‌گذاری ( $1/m$ ) و  $\beta$  زاویهٔ شیب در جهت پایین‌دست است. عامل  $k_{es}$  و  $P_{es}$  تأثیرات پوشش سطح را شامل می‌شود. مقادیر مطلق این دو عامل از طریق واسنجی تعیین می‌شود.

مقدار این دو عامل در مدل LAPSUS با هم برابر و ثابت در نظر گرفته می‌شود، اما یکی روی پیکسل‌هایی از شبکه که شرایط فرسایش و دیگری روی پیکسل‌هایی با شرایط رسوب‌گذاری، اعمال می‌شود [۳، ۵، ۱۵ و ۲۷].

با مقایسهٔ میزان حمل رسوب ( $S$ ) در هر پیکسل شبکه با رسوب ورودی به آن تغییرات میزان حمل رسوب ( $dS$ ) برای آن پیکسل محاسبه می‌شود (رابطهٔ ۷) و براساس آن مقدار فرسایش و رسوب‌گذاری تعیین می‌شود [۳، ۴، ۵، ۱۵ و ۲۷].

$$dS = S - S_0 \quad (۷)$$

$F_i$  نسبت جریان در جهت  $i$  که بین  $0$  تا  $1$ ،  $\beta$  زاویهٔ شیب بین پیکسل مرکزی و پیکسل پایین‌دست در جهت  $i$ ، عامل همگرایی،  $i$  و  $z$  جهت اصلی و فرعی جریان به پیکسل‌های مجاور هستند.

در مدل LAPSUS از یک مقدار ثابت برای عامل همگرایی ( $p$ ) استفاده می‌شود. این مقدار با توجه به مقیاس مطالعه‌شده (دامنه، حوضه) و شرایط غالب توپوگرافی منطقهٔ مطالعه‌شده (شیب و همگرا و واگرایی جریان) تنها یک مقدار بین  $1$  تا  $10$  در نظر گرفته می‌شود [۴، ۵، ۱۱، ۲۴، ۳۰ و ۳۱].

### مرحلهٔ سوم: محاسبهٔ ظرفیت حمل رسوب

بخش رسوب مدل LAPSUS براساس معادلهٔ پیوستگی حرکت رسوب بنا شده است. این مدل میزان انتقال رسوب را با استفاده از ظرفیت حمل رسوب جریان از یک پیکسل به سایر پیکسل‌ها به صورت یک تابع از دبی جریان سطحی و مقدار شیب محاسبه می‌کند. پس از روندیابی جریان سطحی به طرف پیکسل‌های پایین‌دست و محاسبهٔ مقدار تجمعی آن برای هر پیکسل سطح شبکه در بازهٔ زمانی معین، ظرفیت حمل رسوب در هر پیکسل در بازهٔ زمانی تعیین‌شده به صورت رابطهٔ ۲ قابل محاسبه است [۹ و ۱۴]:

$$C = \alpha Q^m \cdot (\tan \beta)^n \quad (۲)$$

$C$  ظرفیت حمل رسوب ( $m^3$ )،  $Q$  دبی روندیابی شده ( $m^3$ )،  $\beta$  زاویهٔ شیب در جهت پایین‌دست،  $\alpha$  ضریب اصلاحی برای تبدیل واحد ظرفیت حمل رسوب است در صورتی که برابر با واحد دبی باشد، مقدار آن برابر  $1$  خواهد بود.  $m$  و  $n$  ضرایب ثابت به ترتیب نمایندهٔ دبی و شیب در سیستم شبکه است که فرایندهای غالب حمل رسوب را بیان می‌کنند. کربای (۱۹۷۱) مقدار این ضرایب را برای فرسایش سطحی در سطح دامنه‌ها برای  $m$ ،  $1/3$  تا  $1/7$  و برای  $n$ ،  $1/3$  تا  $2$  پیشنهاد داده است. براساس تحقیقات اخیر روی این مدل در سطح دامنه، مقدار  $1/6$  برای هر دو ضریب تعیین شده است [۳، ۳۱ و ۳۲].

### مرحلهٔ چهارم: محاسبهٔ میزان حمل رسوب

پس از محاسبهٔ ظرفیت حمل رسوب، میزان حمل رسوب با مقایسهٔ مقدار رسوب ورودی و ظرفیت حمل در هر پیکسل محاسبه می‌شود.

کوچک با مساحت بین ۴۰۰ تا ۴۰۰۰ مترمربع در حوضه نمونه در نظر گرفته شد. از آنجا که هدف از این مرحله صرفاً بررسی عملکرد مدل لاپسوس بود. بنابراین، ورود مقادیر دقیق و مشاهداتی مورد نیاز است. برای این منظور تمامی این زیرحوضه‌ها تحت پایش مستقیم است و مقادیر فرسایش و رسوب و حجم جریان خروجی در آنها برای ۱۷ واقعه رگباری دقیقاً اندازه‌گیری شده است. شکل ۲ زیرحوضه‌های مطالعه شده مدل را نشان می‌دهد. جدول ۲ مشخصات هر یک از زیرحوضه‌های بررسی شده در حوضه زوجی کاخک را نشان می‌دهد.

در نهایت، مقادیر تجمعی فرسایش و رسوب در سطح مد نظر محاسبه شده است که روی نقشه رستری خروجی قابل مشاهده است.

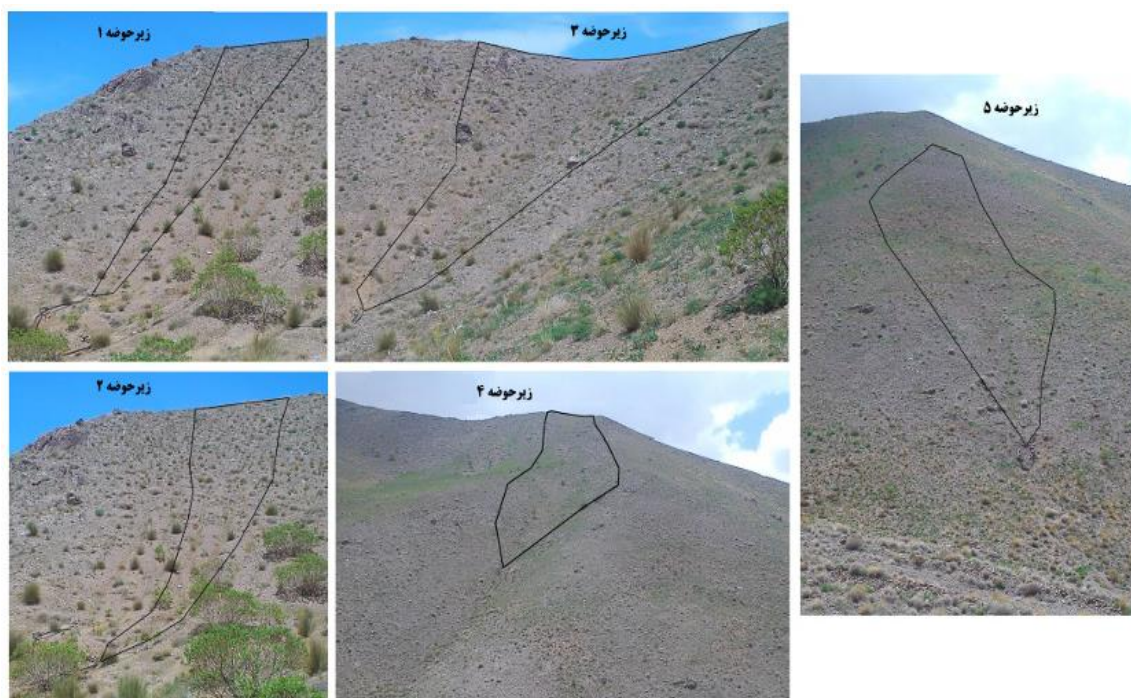
### اجرای مدل

ورودی‌های اصلی و پایه مدل LAPSUS شامل مدل رقمی ارتفاع، مقدار ارتفاع بارندگی، ضریب رواناب، عامل همگرایی، ضرایب  $m$  و  $n$  و عامل فرساینده  $(K_{es})$  و ته‌نشست  $(P_{es})$  است که به صورت کد برنامه‌نویسی شده در محیط  $C^{++}$  به منظور اجرای مدل تعریف شده‌اند.

به منظور اجرا و به کارگیری مدل LAPSUS، ۵ زیرحوضه

جدول ۲. مشخصات هر یک از زیرحوضه‌های بررسی شده در حوضه زوجی کاخک

زیرحوضه	مساحت (مترمربع)	کمترین ارتفاع (متر)	بیشترین ارتفاع (متر)	شیب متوسط (درصد)	نوع کاربری	نوع پوشش گیاهی	بافت خاک	زمین‌شناسی
۱	۵۰۲	۲۰۸۰/۵	۲۱۱۲/۱	۵۳				
۲	۴۶۲	۲۰۷۸/۴	۲۱۱۰/۶	۵۳				
۳	۹۶۳	۲۰۹۴/۴	۲۱۲۰/۸	۶۱	مرتعی	علفی-بوته‌ای	شنی لومی	شمشک
۴	۴۰۹۸	۲۱۳۴/۳	۲۲۲۵/۵	۵۹				
۵	۲۴۸۴	۲۰۸۲/۷	۲۱۷۰/۲	۵۸				



شکل ۲. زیرحوضه‌های مطالعه شده مدل LAPSUS در حوضه زوجی کاخک

شد. براساس نتایج واسنجی بهترین مقدار عامل همگرایی برای اجرای مدل LAPSUS در منطقهٔ مطالعه‌شده تعیین شد. جدول ۳ بهترین مقادیر عامل همگرایی تعیین‌شده برای هر یک از زیرحوضه‌ها را نشان می‌دهد.

برای تعیین مقدار بهینهٔ ضرایب ویژهٔ دبی و شیب همانند سایر مطالعات انجام‌شده با مدل LAPSUS، مقدار این ضرایب برای هر یک از زیرحوضه‌ها با استفاده از واسنجی تعیین شد. براساس نتایج واسنجی بهترین مقدار برای  $1/7m$  و برای  $2n$  تعیین شد که در دامنهٔ مقادیر تعیین‌شده در مطالعات قبلی است.

برای تعیین مقدار بهینهٔ  $K_{es}$  همانند سایر مطالعات انجام‌شده با مدل LAPSUS، مقدار این عامل برای هر یک از زیرحوضه‌ها با استفاده از واسنجی تعیین شد. براساس نتایج واسنجی بهترین مقدار  $K_{es}$  برای اجرای مدل LAPSUS در منطقهٔ مطالعه‌شده تعیین شد. جدول ۴ بهترین مقادیر  $K_{es}$  تعیین‌شده برای هر یک از زیرحوضه را نشان می‌دهد.

بررسی خروجی مدل به‌صورت رواناب، فرسایش و رسوب پس از ورود داده‌های مورد نیاز به مدل، با هر بار اجرا حجم رواناب و مقدار فرسایش یا رسوب خروجی به‌صورت دو نقشهٔ تجمعی رواناب سطحی و نقشهٔ تجمعی فرسایش و رسوب به‌عنوان خروجی مدل محاسبه و به‌صورت رستری با فرمت اسکی ارائه می‌شود.

پس از اجرای مدل LAPSUS برای هر یک از زیرحوضه‌ها، به‌منظور اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از مقادیر مشاهداتی هر رگبار ثبت‌شده برای زیرحوضه‌ها مقایسه شد. برای این منظور از سه معیار ضریب تبیین<sup>۱</sup>، ناش-ساتکلیف<sup>۲</sup> و RMSE نرمال شده، استفاده شد [۱۳، ۱۶ و ۲۲].

### نتایج

برای تعیین مقدار بهینهٔ عامل همگرایی همانند سایر مطالعات انجام‌شده با مدل LAPSUS، مقدار این عامل برای هر یک از زیرحوضه‌ها با استفاده از واسنجی تعیین

جدول ۳. مقادیر عامل همگرایی تعیین‌شده برای هر یک از زیرحوضه‌ها

زیرحوضهٔ ۱	زیرحوضهٔ ۲	زیرحوضهٔ ۳	زیرحوضهٔ ۴	زیرحوضهٔ ۵
۱ تا ۱۰	۱ تا ۱۰	۱ تا ۱۰	۶	۱ تا ۱۰

بهترین مقدار برای تمامی رگبارها

جدول ۴. مقادیر مقدار  $K_{es}$  تعیین‌شده برای هر یک از زیرحوضه‌ها

زیرحوضهٔ ۱	زیرحوضهٔ ۲	زیرحوضهٔ ۳	زیرحوضهٔ ۴	زیرحوضهٔ ۵
۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۹

بهترین مقدار  $K_{es}$

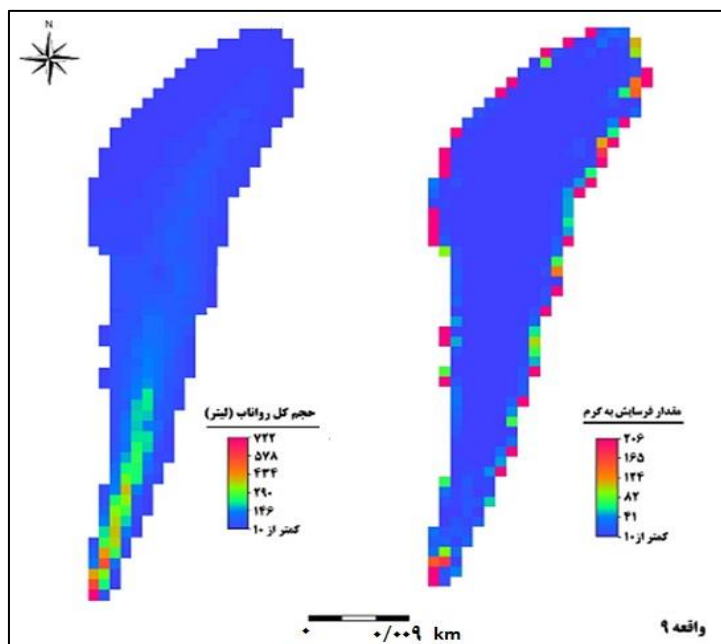
برآوردی و مشاهداتی در منطقهٔ مطالعه‌شده را نشان می‌دهد. بر این اساس مقدار  $R^2$  برای رواناب  $0/99$  و برای فرسایش و رسوب  $0/97$  است. جدول ۵ مقادیر ضریب تبیین، ناش-ساتکلیف و RMSE نرمال‌شده را نشان می‌دهد. جدول ۶ مقادیر رواناب سطحی و فرسایش و رسوب محاسبه‌شده توسط مدل LAPSUS برای رگبارهای منجر به رواناب در زیرحوضهٔ مطالعه‌شده را نشان می‌دهد. نمونهٔ نقشه‌های خروجی مدل LAPSUS برای رواناب و رسوب در رگبار ۹ در شکل ۴ در زیرحوضهٔ ۱ نشان داده شده است.

پس از تعیین مقدار  $K_{es}$  مدل اجرا و خروجی مدل به‌صورت دو نقشهٔ تجمعی رواناب سطحی و نقشهٔ تجمعی فرسایش یا رسوب محاسبه و به‌صورت رستری با فرمت اسکی ایجاد شد. پس از محاسبهٔ رواناب سطحی و فرسایش و رسوب توسط مدل LAPSUS در زیرحوضه‌ها، اعتبارسنجی نتایج بررسی شد. برای این منظور نتایج با سه معیار ضریب تبیین، ناش-ساتکلیف و RMSE نرمال‌شده بررسی شد. شکل ۳ الف، نسبت مقادیر رواناب برآوردی و مشاهداتی و شکل ۳ ب، نسبت مقادیر فرسایش و رسوب

1. Coefficient of Determination  
2. Nash & Sutcliffe







شکل ۴. خروجی مدل لاپسوس برای رخداد ۹ در زیرحوضه ۱

افزایش دقت خروجی‌ها برای حوضه‌های مختلف و در دسترس نبودن داده‌های مشاهداتی کافی در بسیاری از حوضه‌های ایران، امکان تعیین ضرایب مدل توسط واسنجی وجود ندارد. از جمله این ضرایب که در مدل اولیه LAPSUS به صورت ثابت در نظر گرفته شده، مقدار تلفات بارش است. در این مدل مقدار تلفات بارش در ابتدا براساس یک درصد ثابت از تبخیر و نفوذ برای مدل تعریف شد [۲۹]. بعدها این ضریب با ضریب رواناب جایگزین شد. در نتیجه، برای اجرای مدل نیاز به داشتن اطلاعات دقیق از ضریب رواناب است. با تعیین مقادیر ضریب رواناب در منطقه مطالعه شده این تحقیق، مشخص شد در صورت داشتن مقدار دقیق ضریب رواناب مدل قادر است با دقت زیادی کار روندیابی جریان را انجام دهد. اما تغییرات زیاد ضریب رواناب در رگبارهای مختلف و سطوح مختلف، امکان تعیین مقدار دقیق آن را برای بسیاری از کارشناسان مشکل ساخته است و معمولاً با خطای زیادی همراه خواهد بود مگر اینکه دسترسی به داده‌های مشاهداتی برای منطقه مطالعه شده وجود داشته باشد.

در مدل LAPSUS به کارگیری روندیابی جریان با استفاده از الگوریتم توزیع جریان چندجهته است. روندیابی جریان چندجهته شرایط توپوگرافی طبیعی سطح زمین را در نظر گرفته و در شبیه‌سازی حرکت جریان به سمت

#### بحث و نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از اجرای مدل در منطقه مطالعه شده نشان داد همانند سایر مطالعات صورت گرفته [۲، ۴، ۶ و ۱۱]، در صورت تعیین پارامترها و ضرایب ورودی اولیه، مدل توانایی و قابلیت برآورد مقادیر رواناب و فرسایش یا رسوب حاصل از وقایع رگباری را در سطح دامنه‌ها و زیرحوضه‌ها داراست. هر چند ورودی‌های در دسترس از مزیت‌های اصلی مدل LAPSUS است، لازم است ضرایب ورودی مدل از طریق واسنجی برای یک منطقه تعیین شود. سپس براساس ضرایب تعیین شده، مدل برای مناطق مشابه نیز قابلیت اجرا را دارد. مقادیر اولیه برای یک منطقه شامل عامل همگرایی، ضرایب ویژه دبی و شیب و عامل فرسایش‌پذیری سطح است. این ضرایب برای مدل در یک زیرحوضه واقع در شمال شرق ایران با متوسط بارندگی ۲۴۳ میلی‌متر در سال که اقلیم نیمه‌خشک دارد؛ تعیین شد و براساس آنها مقادیر رواناب و فرسایش یا رسوب به صورت لایه‌های رستری برآورد شد. درباره کاربرد این ضرایب در سایر مناطق ایران همانند مطالعات صورت گرفته با این مدل، از ضرایب کالیبره شده در یک منطقه برای اجرای مدل در مناطق مشابه می‌توان استفاده کرد [۲۶، ۲۷]. با اجرای مدل LAPSUS در یک منطقه، دامنه ضرایب ثابت این مدل برای مناطق مشابه تعیین می‌شود. اما به منظور کاربردی‌تر کردن این مدل و

ILWIS همگی روندیابی جریان سطحی را براساس روش جریان تک‌جهته شبیه‌سازی می‌کنند. این نکته یکی از نقص‌های موجود در این مدل‌ها و برنامه‌هاست. در تمامی این برنامه‌ها و مدل‌ها نیز علت این امر دشواری برنامه‌نویسی برای روندیابی جریان چندجهته بیان شده است. زیرا تعریف روندیابی جریان تک‌جهته برای برنامه‌ها و مدل‌ها آسان‌تر است [۲۹]. در حال حاضر کد برنامه‌نویسی توزیع جریان چندجهته برای نرم‌افزارهای پرکاربردی مانند ArcGIS و ILWIS طراحی نشده و تلاش‌های صورت‌گرفته توسط تیم‌های کارشناسی آنها تا کنون بی‌نتیجه بوده است. بر این اساس با توجه به خروجی رستری که مدل LAPSUS برای رواناب سطحی براساس روندیابی جریان چندجهته انجام می‌دهد، می‌تواند تحولی در روش‌های روندیابی جریان برای مطالعات هیدرولوژیکی به‌وجود آورد. مخصوصاً اینکه خروجی آنها تحت فرمت اسکی است و باید در محیط‌های GIS خوانده شود. بنابراین، این مدل می‌تواند روندیابی جریان چندجهته برای حوضه‌های آبخیز را برای برنامه‌های GIS پوشش دهد.

از مهم‌ترین ویژگی‌های مدل LAPSUS قابلیت در نظر گرفتن تأثیر و نقش پوشش بر مقادیر فرسایش و رسوب سطح دامنه‌ها و حوضه‌هاست. این تأثیرات از طریق تعیین مقادیر عامل فرسایش‌پذیری ( $K_{es}$ ) در مدل LAPSUS صورت می‌گیرد.

در مدل LAPSUS مقدار عامل  $K_{es}$  نشان‌دهنده خصوصیات سطح و تابع زبری آن است. این زبری در مدل حاضر شامل تاج پوشش گیاهی، لاشبرگ و پوشش سنگی است. مقادیر تعیین‌شده  $K_{es}$  برای زیرحوضه‌ها همگی در دامنه تعیین‌شده برای این عامل در مطالعات صورت‌گرفته با این مدل قرار گرفت. مقدار  $K_{es}$  برای زیرحوضه ۱ برابر ۰/۰۰۳۱ تعیین شد. لسچن و همکارانش [۱۵] نیز مقدار این عامل را برای شرایط نیمه‌خشک جنوب اسپانیا ۰/۰۰۳۵ تعیین کرده‌اند. در زیرحوضه ۲ مقدار برابر با ۰/۰۰۰۶ تعیین شد. بررسی‌ها و مشاهدات ثبت‌شده از شرایط سطح این زیرحوضه نشان‌دهنده وجود زبری زیاد در کف آبراهه به‌دلیل وجود لاشبرگ فراوان و سنگ‌ریزه بوده است. بنابراین، با وجود کم‌تر بودن مقدار عامل تعیین‌شده، این مقدار با شرایط زیرحوضه همخوانی داشت. لسچن و همکارانش [۱۵] برای زیرحوضه‌های با زبری بیشتر و خاک نفوذپذیرتر در شرایط

پایین‌دست به طبیعت سطح زمین نزدیک‌تر است. در بسیاری از مدل‌های موجود، حرکت و روندیابی جریان به‌صورت جریان تک‌جهته فرض می‌شود، اما در طبیعت روندیابی جریان سطحی در سطح حوضه‌ها به‌طور مستقیم تحت تأثیر توپوگرافی سطح قرار دارد و از آن تبعیت می‌کند. الگوریتم توزیع جریان چندجهته زمانی نتایج قابل قبول و نزدیک به واقعیت خواهد داشت که شرایط توپوگرافی سطحی در نظر گرفته شود. الگوریتم توزیع جریان چندجهته با توانایی‌ای که تعریف مقدار عامل همگرایی برای آن ایجاد می‌کند؛ می‌تواند جریان سطحی را براساس شرایط توپوگرافی سطحی شبیه‌سازی کند. در این الگوریتم عامل شیب تعیین‌کننده مقدار عامل همگرایی است به‌طوری که هر چه شیب پیکسل اصلی در جهت جریان نسبت به شیب پیکسل‌های مجاور بیشتر شود، مقدار  $p$  (عامل همگرایی) بیشتر خواهد بود و با افزایش مقدار آن، روندیابی جریان از حالت جریان چندجهته به جریان تک‌جهته تغییر خواهد یافت. بنابراین، از ویژگی‌های ممتاز مدل LAPSUS قابلیت روندیابی جریان براساس هر دو نوع روندیابی جریان چندجهته و جریان تک‌جهته است. روندیابی جریان سطحی در مدل LAPSUS این امکان را فراهم می‌سازد تا علاوه بر نشان‌دادن محل‌های تمرکز جریان، مساحت سطوح زهکشی‌کننده بالادست یک نقطه و حجم جریان ورودی به آن را محاسبه کند. این امر می‌تواند در تعیین پتانسیل و قابلیت یک محل برای یک کاربری خاص استفاده شود. همچنین می‌توان در اولویت‌بندی نقاط برای عملیات حفاظت آب و خاک با دقت بیشتری تصمیم‌گیری کرد.

در جدیدترین مطالعات صورت‌گرفته روی روندیابی جریان سطحی، برتری الگوریتم روندیابی جریان چندجهته نسبت به جریان تک‌جهته پذیرفته شده است [۱۸]. زیرا این روندیابی قادر است با توجه به شرایط توپوگرافی هر دو نوع روندیابی جریان سطحی را انجام دهد و به نوعی مکملی برای روندیابی جریان تک‌جهته نیز باشد. در حالی که الگوریتم روندیابی جریان تک‌جهته این قابلیت را ندارد و در تمامی سطوح نوع روندیابی را از نوع تک‌جهته محاسبه می‌کند. با این‌وجود، بیشتر مطالعات و مدل‌هایی که کار روندیابی جریان سطحی را انجام می‌دهند و نرم‌افزارهایی که برای این منظور به کار گرفته شده‌اند مانند ArcGIS و

اختصاصی [۱] در مطالعات خود تأیید کرده‌اند. آنها تراکم پوشش ۵۰ درصدی سنگ و سنگ‌ریزه را به‌عنوان یک مالچ سنگ‌ریزه‌ای مناسب در اراضی حساس به فرسایش بادی در دشت یزد معرفی کردند که نشان‌دهنده نقش پوشش سنگ و سنگ‌ریزه در راستای نقش پوشش گیاهی بر فرسایش خاک است. هر چند میزان تأثیر آن نسبت به پوشش گیاهی کمتر است، اما نقش ویژه بر فرسایش دارد. مدل LAPSUS با تعیین مقدار عامل  $K_{es}$  که تحت تأثیر زبری سطح براساس پوشش گیاهی و سنگ و سنگ‌ریزه است، این نقش را در نظر می‌گیرد.

براساس این نتایج مدل فعلی LAPSUS قادر است به خوبی حجم رواناب و رسوب خروجی از زیرحوضه‌ها را برای منطقه مطالعه شده برآورد کند. نتایج همانند نتایج اسخورل و ولدکم [۲۷] که از توسعه‌دهندگان اصلی این مدل هستند، نشان‌دهنده کارایی این مدل در برآورد رواناب و رسوب است. کلاپسنز و همکارانش [۶] و تم و همکارانش [۳۲] نیز مدل LAPSUS را برای شبیه‌سازی فرسایش و رسوب اجرا و قابلیت آن را برای این کار تأیید کرده‌اند. بارتمن و همکارانش [۳ و ۴] نیز نتایج کاربرد مدل LAPSUS برای برآورد فرسایش و رسوب در دو مقیاس دامنه و حوضه تأیید کرده‌اند. کیسترا و همکارانش [۱۲] نشان دادند که مدل LAPSUS به‌طور قابل اعتمادی می‌تواند حجم جریان را پیش‌بینی کند که برای برآورد ظرفیت حمل رسوب، بار رسوبی و رسوب‌گذاری لازم است. اسخورل و همکارانش [۲۵] مدل LAPSUS را دارای قابلیت زیاد در برآورد فرسایش و رسوب و تغییر چشم‌اندازها بر اثر فرسایش خاک بیان کرده‌اند. نتایج تحقیق حاضر نیز نشان داد با داشتن مقادیر ورودی مدل، امکان برآورد رواناب و فرسایش و رسوب در مناطق مختلف ایران وجود دارد.

#### منابع

- [1]. Ahmadi, H., Ekhtesasi, M.R., 1996. The effect of Pebbles Mulch to Control of Wind Erosion on Clay and Salty Lands. *Journal of Desert*, 5(2), pp. 1-4. (In persian)
- [2]. Baartman, J.E.M., Temme, A.J.A.M., Schoorl, J.M., Claessens, L., Viveen, W., van Gorp, W. and Veldkamp, A., 2009, Landscape Evolution Modelling-LAPSUS. In Congreso Internacional sobre Desertificación.

نیمه‌خشک جنوب اسپانیا مقدار عامل  $K_{es}$  را  $0/0005$  تعیین کرده‌اند. مقدار مقدار  $K_{es}$  برای زیرحوضه ۳ برابر  $0/002$  تعیین شد. لسنچن و همکارانش نیز مقدار این عامل را برای دامنه‌ها در شرایط نیمه‌خشک جنوب اسپانیا  $0/002$  تعیین کرده‌اند. در زیرحوضه‌های ۴ و ۵ مقادیر به‌ترتیب  $0/0012$  و  $0/0009$  تعیین شد [۱۵]. بارتمن و همکارانش [۴] برای اراضی مرتعی مقدار این عامل را  $0/001$  تعیین کردند. اسخورل و همکارانش [۲۵] نیز در شرایط نیمه‌خشک جنوب اسپانیا مقدار  $0/0014$  را برای این عامل تعیین کرده‌اند. لسنچن و همکارانش [۱۵] نیز مقدار این عامل را برای شرایط نیمه‌خشک جنوب اسپانیا  $0/0015$  تعیین کرده‌اند.

نتایج تحقیق حاضر نشان داد مقدار  $K_{es}$  در زیرحوضه ۲ نسبت به سایر زیرحوضه‌ها کمتر است. این در حالی است که این زیرحوضه از نظر شرایط توپوگرافی و پوشش گیاهی تفاوت چندانی با زیرحوضه‌های مجاور خود (زیرحوضه‌های ۱ و ۳) ندارد. از نظر پوشش گیاهی نیز از زیرحوضه‌های ۴ و ۵ فقیرتر است، اما مقدار  $K_{es}$  در این زیرحوضه کمترین مقدار است. تنها تفاوت این زیرحوضه با سایر زیرحوضه‌ها زبری بیشتر سطح ناشی از پوشش سنگ و سنگ‌ریزه سطحی به‌ویژه در داخل آبراهه‌هاست. نتایج روحی‌پور و همکارانش [۲۱] نشان داد که پوشش سنگ و سنگ‌ریزه سطحی تأثیر عمده‌ای بر خصوصیات فیزیکی و هیدرولوژیکی سطح داشته و باید در مدل‌های فرسایش و رسوب در نظر گرفته شود. بر این اساس مدل LAPSUS با تعیین عامل  $K_{es}$ ، نقش پوشش سنگ و سنگ‌ریزه را همراه با پوشش گیاهی به‌عنوان عوامل تأثیرگذار بر زبری سطح در نظر می‌گیرد. هرچه زبری سطح بیشتر باشد، مقدار این فاکتور کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده کاهش مقدار فرسایش و رسوب است. براساس نتایج روحی‌پور و همکارانش [۲۱] با افزایش پوشش سنگ و سنگ‌ریزه به بیشتر از ۲۰ درصد میزان فرسایش و رسوب به‌صورت چشمگیری کاهش می‌یابد. در مدل LAPSUS نیز همان‌طور که در زیرحوضه ۲ مشخص است، با افزایش درصد سنگ و سنگ‌ریزه سطحی به بیشتر از ۲۰ درصد مقدار عامل  $K_{es}$  به‌صورت چشمگیری کاهش یافته که به تبع آن مقدار فرسایش و رسوب این زیرحوضه کاهش داشته است. سایر زیرحوضه‌ها متوسط پوشش سنگ و سنگ‌ریزه ۲۰ درصدی دارند. نقش حفاظتی درصد پوشش سنگ و سنگ‌ریزه را نیز احمدی و

- [3]. Baartman, J.E.M., Temme, A.J.A.M., Veldkamp, T., Jetten, V.G. and Schoorl, G.M., 2013, Exploring the role of rainfall variability and extreme events in long-term landscape development. *Catena*, 109, pp. 25–38.
- [4]. Baartman, J.E.M., Van Gorp, W., Temme, A.J.A.M. and Schoorl, J.M., 2012, Modelling sediment dynamics due to hillslope–river interactions: incorporating fluvial behaviour in landscape evolution model LAPSUS. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, pp. 923–935.
- [5]. Buis, E. and Veldkamp, A., 2008, Modelling dynamic water redistribution patterns in arid catchments in the Negev Desert. *Earth Surface Processes and Landforms*, 33(1), pp. 107–122.
- [6]. Claessens, L., Schoorl, J.M., Verburg, P.H., Geraedts, L. and Veldkamp, A., 2009, Modelling interactions and feedback mechanisms between land use change and landscape processes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 129(1-3), pp. 157–170.
- [7]. Eshghizadeh, M., Fazelpoor, M.R. and Ekhtesasi, M.R., 2015, Analysis of Analytical Hierarchy Process Method to Prioritize and Determine the Most Important Factors Influencing Sediment Yield in Semi-arid Region of Iran. *Int. J. Farm Alli. Sci*, 4(1), pp. 37–49
- [8]. Eshghizadeh, M., Talebi, A., Dastorani, M.T. and Azimzadeh, H.R., 2016, Effect of natural land covers on runoff and soil loss at the hillslope scale. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2(2), pp. 125–134.
- [9]. Foster, G.R. and Meyer, L.D., 1975, Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: Anonymous (Ed.), *Present and Perspective Technology for Predicting Sediment Yields and Sources*. Proceedings of the Sediment Yield Workshop, Oxford 1972, United States Department of Agriculture, Washington, DC, pp. 190–207.
- [10]. Freeman, T.G., 1991, Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences*, 17(3), pp. 413–422.
- [11]. Holmgren, P., 1994, Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: An empirical evaluation. *Hydrological processes*, 8, pp. 327–334.
- [12]. Keesstra, S.D., Temme, A.J.A.M., Schoorl, J.M. and Visser, S.M., 2014, Evaluating the hydrological component of the new catchment-scale sediment delivery model LAPSUS-D. *Geomorphology*, 212, pp. 97–107.
- [13]. khazaei, M., Mirzaei, M.R., Malekian, A., 2014, Evaluating the efficiency of two artificial neural network approach (MLP and RBF) for rainfall-runoff modeling. *Water Management in Arid Lands*, 1(1), pp. 1–12. (In persian)
- [14]. Kirkby, M.J., 1971, Hillslope process-response models based on the continuity equation. *Inst. Br. Geography Specification Publication*, 3, pp. 15–30.
- [15]. Lesschen, J.P., Schoorl, J.M. and Cammeraat, L.H., 2009, Modelling runoff and erosion for a semi-arid catchment using a multi-scale approach based on hydrological connectivity. *Geomorphology*, 109, pp. 174–183.
- [16]. Mahmoodzadeh, A., 2004. *Research methods in soil erosion*. University of Orumie Press. (In persian)
- [17]. Osmani, H., Motamedvaziri, B., Moeni, A., 2013, Simulation of discharge, calibration and validation of SWAT model, case study: Tehran Latyan dam upstream. *Watershed Engineering and Management*, 5(2), pp. 13–143. (In persian)
- [18]. Pilesjö, p. and Hasan, A., 2014, A Triangular Form-based Multiple Flow Algorithm to Estimate Overland Flow Distribution and Accumulation on a Digital Elevation Model. *Transactions in GIS*, 18(1), pp. 108–124.
- [19]. Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O., 1991, The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5, pp. 59–79.
- [20]. Refahi, H., 2006. *Water Erosion and Conservation*. University of Tehran Press. (In persian)
- [21]. Roohipoor, H., Javadi, P., Mahboobi, A.A., 2005. The Effect of Stone Cover on Erosion and sediment of two types of soil by using of Flume and Simulated rain. 3rd Erosion and Sediment National Conference. Tehran, Soil Conservation and Watershed Research Center. (In persian)
- [22]. Savage, M.J., 1993, Statistical aspects of model validation. Presented at a workshop on the field water balance in the modeling of cropping systems, University of Pretoria, South Africa.
- [23]. Schoorl, J.M., Sonneveld, M.P.W. and Veldkamp, A., 2000, Three-dimensional landscape process modelling: the effect of DEM resolution. *Earth Surf. Proc. Landforms*, 25, pp. 1025–1034.

- [24]. Schoorl, J.M., 2002, Addressing the Multi-scale Lapsus of Landscape. Ph.D. thesis, Wageningen University.
- [25]. Schoorl, J.M., Temme, A.J.A.M. and Veldkamp, T., 2014, Modelling centennial sediment waves in an eroding landscape – catchment complexity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, pp. 1526–1537.
- [26]. Schoorl, J.M., Veldkamp, A. and Bouma, J., 2002, Modeling water and soil redistribution in a dynamic landscape context. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66, pp. 1610–1619.
- [27]. Schoorl, J.M. and Veldkamp, A., 2001, Linking land use and landscape process modelling: a case study for the Alora region (South Spain). *Agric.Ecosyst.Environ*, 85, pp. 281-292.
- [28]. Talebi, A., Eshghizadeh, M., Dastorani, M.T., Azimzadeh, H.R., 2014. Watershed Measures Impacts on Surface Runoff Routing by use of Multiple Flow Direction Algorithm. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 1(2), pp.83-97. (In persian)
- [29]. Tarboton, D.G., 1997, A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), pp. 309–319.
- [30]. Temme, A.J.A.M., Schoorl, J.M. and Veldkamp, A., 2006, Algorithm for dealing with depressions in dynamic landscape evolution models. *Comp.Geosci*, 32, pp. 452 - 461.
- [31]. Temme, A.J.A.M. and 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), pp. 573 - 589.
- [32]. Temme, A.J.A.M., Peeters, I., Buis, E., Veldkamp, A. and Govers, G., 2011, Comparing landscape evolution models with quantitative field data at the millennial time scale in the Belgian loess belt. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36, pp. 1300–1312.