

## اولویت‌بندی عوامل مؤثر در فرسایش سطحی با استفاده از مدل تلفیقی USLE-M و پویایی سیستم (مطالعه موردی: پایگاه تحقیقاتی سنگانه - خراسان رضوی)

سهیلا اسمعیلیان<sup>۱</sup>، علی طالبی<sup>۱\*</sup> و مجید اسمعیلیان<sup>۲</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۱۲/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱/۱۶)

### چکیده

شبیه‌سازی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر در فرسایش آبی با استفاده از کاربرد مدل (USLE-M (Universal Soil Loss Equation-Modified) در مدل پویایی سیستم و بررسی کارائی آن، از اهداف تحقیق حاضر می‌باشد. در این مدل ترکیبی، با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی سیستم‌های پویا (Vensim) کلیه متغیرها و عوامل دخیل در فرسایش و هدررفت خاک با توجه به معادله USLE-M، در نظر گرفته شده است. پس از اجرای مدل، مقادیر برآورد شده و مشاهداتی با یکدیگر مقایسه و آنالیز حساسیت به منظور مشخص نمودن پارامترهای حساس انجام گرفته است. سپس واسنجی روی پارامترهای حساس انجام گردیده است. این مطالعه حاکی از آن است که نتایج مدل، به دلیل در نظر گرفتن کلیه عوامل مؤثر در فرسایش خاک، قابل قبول بوده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل، نشان‌دهنده حساسیت بالای مدل به شیب و پوشش گیاهی به ترتیب، در شیب‌های زیاد و کم بوده است. با بررسی تغییر در پارامترهای مختلف مانند پوشش گیاهی و شیب بر روی مقدار فرسایش، درصد پوشش گیاهی بهینه نیز به ترتیب در شیب‌های ۶۷ و ۴۰ درصد، ۲۰ و ۶۰ درصد برآورد گردیده است.

واژه‌های کلیدی: سیستم دینامیکی، فرسایش و رسوب، آنالیز حساسیت، نرم‌افزار Vensim

۱. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد

۲. گروه مدیریت، دانشکده علوم اداری و اقتصاد، دانشگاه اصفهان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: talebisf@yazd.ac.ir

## مقدمه

سطح آب زیرزمینی در وقوع فروچاله در حوضه شهرستان ابرکوه با رویکرد پویایی سیستم‌ها و بررسی گزینه‌های مدیریتی پرداختند. در این تحقیق سعی شده است با رویکرد پویایی سیستم‌ها و با بررسی مکانیسم‌های دخیل در برداشت و افت سطح آب زیرزمینی و در نظر گرفتن جمعیت و سطح زیرکشت در میزان تقاضا و برداشت از آبخوان حوضه شهرستان ابرکوه و با شبیه‌سازی مسئله در نرم‌افزار Vensim سناریو و راهکارهای مناسب ارائه گردد. ملاحسینی و صلوی تبار (۸) اثر ایجاد ظرفیت ذخیره در کاهش خسارت سیلاب را با استفاده از مدل بهینه‌سازی- شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم مورد ارزیابی قرار داده‌اند. براساس نتایج به‌دست آمده، در کنار بهبود شرایط بهره‌برداری از منظر معیار بهینگی کاهش پیک سیلاب، توزیع حجم کنترل اولیه سیل میان مخازن حوضه نسبت به حالت عدم ساخت سد گرشا، مزیت دیگر احداث این سد مخزنی بوده است. دربندی و همکاران (۳) از دو مدل پویایی سیستم و برنامه‌ریزی ژنتیک برای شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب در حوضه آبریز ليقوان استفاده گردیده است. نتایج حاکی از دقت بالای مدل Vensim در شبیه‌سازی فرایند بارش- رواناب نسبت به مدل برنامه‌ریزی ژنتیک بوده و این مدل برای اکثر رویدادها ضریب همبستگی بالایی نسبت به برنامه‌ریزی ژنتیک داشته و همچنین در پیش‌بینی دبی و زمان اوج کمترین خطای مطلق را داشته است. شین‌چنگ‌یه و همکاران (۱۵) به شبیه‌سازی فرسایش خاک و اثرات آن بر مواد غذایی موجود در خاک با استفاده از مدل سیستم دینامیک در حوزه آبخیزی در تایوان پرداخته‌اند. از طریق این مدل، طبق داده‌های هیدرولوژیکی و جغرافیائی از ۵ سال گذشته، میزان کل فرسایش خاک سالانه، بار رسوب و مواد غذایی به‌ترتیب ۲۹۲/۳۲۷، ۱۰۱/۶۶۱ و ۱۴۲۸ تن برآورد شده است. شوک‌وی و همکاران (۱۴) از شبیه‌سازی سیستم دینامیک برای ارزیابی اثرات اقتصادی اجتماعی سطوح مختلف تخصیص جریان در حوضه رودخانه وی در چین استفاده نموده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که مدل به‌کار رفته در بازتاب رفتار دینامیکی سیستم در این مطالعه کارایی خوبی

امروزه فرسایش خاک به‌عنوان خطری برای رفاه انسان و حتی برای حیات او به‌شمار می‌آید. برای بررسی و کنترل این مهم، روش‌ها و مدل‌های متعددی ارائه گردیده است. با توجه به سیستمی بودن یک حوزه آبخیز، کلیه فرآیندهای موجود در آن از قبیل فرسایش خاک، یک فرآیند سیستمی بوده و می‌توان جهت شبیه‌سازی آن از تلفیق مدل سیستم دینامیکی با یکی از مدل‌های فرسایش خاک بهره جست. فرسایش خاک یک فرآیند پیچیده بوده که عوامل بسیار زیادی در آن دخیل می‌باشد. این عوامل بر روی یکدیگر اثر گذاشته و با ایجاد تعاملاتی با یکدیگر منجر به ایجاد فرسایش می‌گردند. بنابراین می‌توان براساس رویکرد پویایی سیستم‌ها که برگرفته از تفکر سیستمی بوده و ابزاری مفید در مدیریت و برنامه‌ریزی‌ها است، این فرآیند طبیعی را شبیه‌سازی نمود. مطالعاتی در زمینه کاربرد مدل سیستم دینامیک در موضوعات مختلف انجام شده است. قشقای و همکاران (۶) به بررسی تغییرات متوسط تراز آب زیرزمینی در دشت تهران با استفاده از پویایی سیستم پرداختند. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار Vensim اثر هریک از متغیرها روی مسأله شبیه‌سازی و در نهایت سعی شده که با استفاده از نتایج به‌دست آمده از مدل، راهکارهایی برای حل مسأله موجود ارائه شود. واعظی و همکاران (۹) پژوهشی به‌منظور تعیین شاخص فرسایش مناسب براساس مدل‌های USLE، MUSLE، RUSLE و USLE-M انجام داده‌اند. نتایج حاکی از آن هستند که رواناب بالاترین همبستگی را با شاخص فرسایش USLE-M مدل با ضریب تبیین ۹۰ درصد داشته است. ثمره هاشمی و همکاران (۲) به بررسی مکانیزم‌های مؤثر بر کاهش سطح سفره آب زیرزمینی در استان همدان با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها پرداخته و با بررسی دینامیکی عوامل مختلف اقتصادی- اجتماعی که کاهش سطح سفره آب زیرزمینی در این استان را سبب شده‌اند، با استفاده از نرم‌افزار Vensim اثر اتخاذ سیاست‌های مختلف مورد شبیه‌سازی قرار گرفته است. باقری هارونی و همکاران (۱) به بررسی تغییرات

پایدار منابع طبیعی کمک داشته باشند.

با بررسی منابع متعدد در این زمینه می‌توان دریافت که تاکنون مطالعه‌ای در زمینه تعیین عوامل مؤثر در فرسایش خاک با استفاده از مدل سیستم پویا صورت نگرفته است. بنابراین هدف تحقیق حاضر، شبیه‌سازی و تخمین میزان فرسایش در حوزه با استفاده از مدل USLE-M و مدل سیستم پویا به صورت ترکیبی بوده است. همچنین، در این روش کلیه متغیرهای موجود در معادله USLE-M در نرم‌افزار سیستم‌های پویا وارد و روابط میان آنها نیز مشخص گردیده است. در این مطالعه فقط فرسایش حاصل از بارش باران مدنظر بوده و از فرسایش حاصل از رواناب پس از باران صرف‌نظر شده است. دلیل انتخاب معادله USLE-M نیز سادگی روابط و پارامترهای آن و همچنین در نظر گرفتن پارامتر رواناب در آن بوده است.

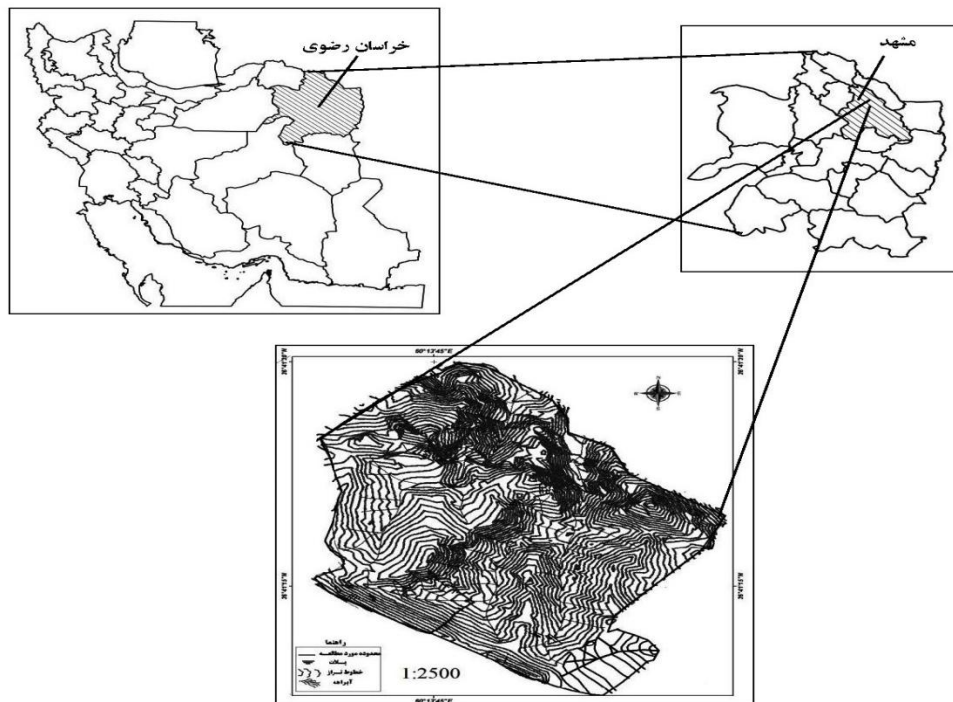
## مواد و روش‌ها

### منطقه و داده‌های مورد استفاده

پایگاه تحقیقاتی سنگانه در قسمت شرقی حوزه کپه داغ در استان خراسان رضوی قرار دارد. بخش ایرانی حوزه که به طور کلی "منطقه کپه داغ" نام دارد بین ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی، و ۵۴ درجه تا ۶۱ درجه و ۱۳ دقیقه طول شرقی قرار دارد. ارتفاع نواحی مختلف این منطقه از ۲۸ متر زیر سطح دریای آزاد تا بیش از ۳۰۰۰ متر بالای سطح دریا تغییر می‌کند. بارندگی متوسط سالانه در غرب کپه داغ بالغ بر ۸۰۰ میلی‌متر است. دمای متوسط سالانه هوا براساس گرادیان دمای ایستگاه‌های هم‌جوار ۱۵ و حداکثر مطلق آن ۴۲ و حداقل مطلق آن ۲۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. شکل (۱) موقعیت پایگاه تحقیقاتی سنگانه را در کشور نشان می‌دهد.

داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل اطلاعات مربوط به خاک (درصد رس، سیلت، ماده آلی، نفوذپذیری و ساختمان خاک)، درصد تاج پوشش گیاهی، رگبارها (مقدار، مدت، شدت متوسط و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای بارش) و مقادیر مربوط به رواناب و رسوب بوده است. این داده‌ها مجموعاً در ۹۲ پلات

داشته است. ایباز و همکاران (۱۰) در مطالعه‌ای به بررسی یک مدل برای ارزیابی جامع تخریب اراضی به وسیله فرسایش آبی در مراتع با ارزش اسپانیا پرداختند. این مدل براساس روش سیستم دینامیک ساخته شده است. گروهی از عوامل مؤثر در این مورد از لحاظ میزان اهمیت شامل فاکتورهای اقلیمی و اقتصادی و بالقوه مؤثر بر فرسایش خاک بوده است. مشخص است که ریسک تخریب در حد متوسطی بوده و اهمیت فاکتورهای اقلیمی به طور قابل توجهی زیادتر از فعالیت‌های انسانی بوده است. سامیان و همکاران (۱۲) به تشخیص فاکتورهای مؤثر بر مدیریت بهینه آب کشاورزی در منطقه همدان پرداختند. در این مطالعه، علاوه بر روش‌های کمی مانند آمارهای توصیفی و فاکتورهای تجزیه و تحلیل، روش‌های کیفی نیز جهت شبیه‌سازی دینامیکی متغیرها از طریق نرم‌افزار ونسیم به کار گرفته شده است. از نتایج به دست آمده، چهار فاکتور کلیدی به عنوان فاکتورهای مؤثر بر مدیریت بهینه آب کشاورزی در همدان شناسایی شده که این فاکتورها، فاکتورهای مربوط به قانون‌گرایی، علمی و فنی، اقتصادی و اجتماعی بوده است. کوتیر و همکاران (۱۱) به شبیه‌سازی سیستم دینامیک برای مدیریت یکپارچه منابع آبی و توسعه کشاورزی در حوزه رودخانه ولتا پرداختند. از این روش مدل‌سازی سیستم دینامیک، جهت بررسی فرایندهای بازخوردی و فعل و انفعال بین جمعیت، منابع آب و تولیدات کشاورزی زیر بخش‌های حوزه رودخانه ولتا در آفریقای غربی استفاده شده است. هدف مدل فراهم نمودن ابزار مفهومی برای تصمیم‌گیران در جهت بهبود درک رفتار دینامیکی حوزه، و فرایند تصمیم‌گیری در مورد سناریوهای مورد نیاز در مدیریت منابع آب و توسعه کشاورزی بوده است. از بین سه سناریو توسعه آب زیر بنایی (سناریو ۱)، توسعه محصولات کشاورزی (سناریو ۲) و شرایط خشکی (سناریو ۳)، سناریو ۱ حداکثر سود را برای مردمان ساکن در حوزه ارائه داده است. در مجموع، نتایج مدل می‌تواند در برنامه‌ریزی و سرمایه‌گذاری حوزه در جهت بهبود امنیت غذایی، توسعه معیشت، رشد اقتصادی اجتماعی و مدیریت



شکل ۱. موقعیت پایگاه تحقیقاتی سنگانه در کشور

در فرسایش خاک با یک عدد مشخص می‌شود. میزان فرسایش از حاصلضرب این اعداد به دست می‌آید که به صورت کمی است. در این رابطه:

A مقدار خاک فرسایش یافته به وسیله فرسایش ورقه‌ای و شیبی برحسب جرم در واحد سطح و در واحد زمان است. R عامل بارندگی است که قدرت فرساینده‌ی باران را نشان می‌دهد.

K ضریب فرسایش‌پذیری خاک است. این عددی حساسیت ذاتی خاک را مشخص می‌نماید.

L عامل طول شیب است که عبارت است از نسبت فرسایش در طول شیب به مقدار فرسایش در همان زمین و همان شیب ولی با طول ۷۲/۶ فوت (۲۲/۱ متر).

S عامل شیب زمین است که عبارت است از نسبت فرسایش در شیب موجود در زمین به مقدار فرسایش در همان زمین و همان طول ولی با شیب ۹٪ (یا ۵ درجه).

C عامل پوشش گیاهی است که عبارت است از فرسایش حاصل در زمینی با پوشش گیاهی مشخص نسبت به مقدار

آزمایشی که در شرایط مختلف پوشش گیاهی، شیب و عمق خاک احداث و در انتهای هر پلات مخزن فلزی جمع‌آوری رواناب تعبیه گردیده، اندازه‌گیری شده است. برای کسب اطلاعات شدت، مدت و مقدار مربوط به هر بارندگی، دو دستگاه باران‌نگار نیز در پایگاه نصب است. داده‌های مربوط به خاک و پوشش گیاهی نیز از طریق حفر پروفیل خاک و پلات‌های صحرایی اندازه‌گیری شده است. این داده‌ها جهت اجرای نرم‌افزار مورد استفاده قرار گرفته و از مقادیر رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده نیز در نهایت جهت مقایسه مقادیر واقعی مشاهداتی و محاسباتی از طریق مدل استفاده شده است.

#### معادله جهانی فرسایش خاک USLE

یکی از فرمول‌های تخمین فرسایش خاک، فرمول ویشمایر و اسمیت است. این معادله که به فرمول جهانی فرسایش خاک معروف است، به صورت رابطه (۱) می‌باشد (۴):

$$S.C.P.L.K.A=R \quad [1]$$

در فرمول جهانی فرسایش خاک، تأثیر هر کدام از عوامل مؤثر

است. لذا برای حل مشکلات و به‌منظور شناخت و بهبود عملکرد و تصمیم‌گیری در مورد سیستم‌ها، روش‌ها و تکنیک‌های متفاوتی به‌وجود آمده‌اند که به‌کارگیری آنها بستگی به نوع سیستم و مشکل مربوط به آن دارد. بهترین راه‌نظم بخشیدن به واکنش‌های صحیح و سریع به مسائل سیستم‌ها، ثبت و بررسی نقاط مهم عملکردی سیستم‌ها، به شکل سناریویی از آینده است که رفتار گذشته و حال محیط سیستم را ملاک قرار می‌دهد. ثبت این سناریو، نیازمند بهره‌گیری از دانش و تکنیکی است که با بهره‌گیری از نگرش سیستمی، مشکلات را به درستی شناسایی و در جهت حل معضلات پیش آمده سریع‌ترین و صحیح‌ترین واکنش را نشان می‌دهد. این دانش، سیستم دینامیک یا پویایی سیستم‌ها نام دارد که در ابتدا توسط فارستر Forrester در سال ۱۹۶۱ مطرح گردید. سیستم دینامیک روش‌های مناسبی را برای شناسایی الگوی رفتاری سیستم در پرتو تفکر سیستمی، معرفی می‌نماید و به‌علاوه کاربردهای متنوعی در تحلیل سیستم‌ها مثل سیستم‌های اقتصادی، اجتماعی، فنی مهندسی، سیاسی، فرهنگی و اجتماعی و غیره را ارائه می‌دهد.

حوزه‌های آبخیز و کلیه فرایندهایی که در طبیعت رخ می‌دهند به‌صورت پویا بوده و دارای متغیرهایی هستند که در طول زمان و در ارتباط با یکدیگر تغییر می‌کنند (۵). بنابراین، برای شبیه‌سازی کلیه فرایندهای طبیعی مانند فرسایش خاک توسط نیروهای فرساینده (که در اینجا نیروی فرساینده باران و رواناب حاصل از آن در نظر گرفته شده است)، باید با تفکر سیستمی به سایر پدیده‌ها نگرینده و تمامی عوامل دخیل در آن و روابط میان آنها را به طور کامل شبیه‌سازی نمود و نتایج را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. کلیه تجزیه و تحلیل‌های سیستمی مرحله‌ای داشته که ترتیب آنها در شکل (۲) آمده است (۷).

پارامترهایی که در مدل USLE-M به‌عنوان پارامترهای مؤثر در ایجاد فرسایش در نظر گرفته شده‌اند شامل ضریب رواناب حوزه، انرژی جنبشی بارش، حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای، خصوصیات خاک منطقه (از قبیل درصد رس، ماده آلی، سیلت،

فرسایش در شرایط پوشش و مدیریت کرت استاندارد که در جهت شیب شخم شده است.

P عامل عملیات حفاظت خاک که عبارت است از نسبت فرسایش یک زمین حفاظت شده به مقدار فرسایش همان زمین که هیچ‌گونه عملیات حفاظتی در آن انجام نگرفته است.

### معادله USLE-M

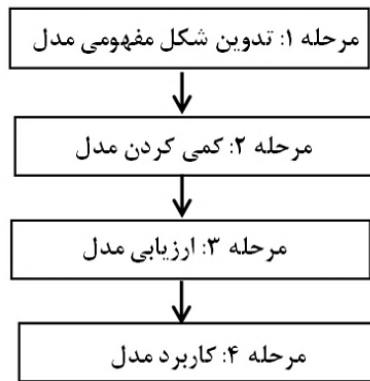
نسخه اصلاح شده USLE که USLE-M نامیده می‌شود، می‌تواند فرسایش را به شکل بهتری نسبت به USLE پیش‌بینی کند. همچنین، معادله USLE-M قادر به مدل‌سازی تأثیرات رواناب در میزان فرسایش می‌باشد. تفاوت اولیه بین USLE و USLE-M این است که در شاخص فرساینده USLE توجه چندانی به رواناب نشده، در صورتی که در USLE-M این عامل در شاخص فرساینده مورد توجه قرار گرفته است. عامل R در معادله USLE-M براساس ضریب رواناب، میزان کل انرژی جنبشی بارش در طول رگبار و حداکثر شدت بارش ثبت شده در پایه زمانی ۳۰ دقیقه به‌دست آمده که در رابطه (۲) آورده شده است (۱۳).

$$R = QR EI_p \quad [2]$$

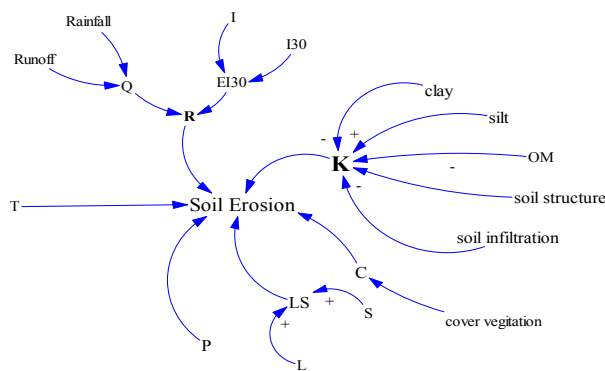
لازم به ذکر است که بقیه عوامل K, C, L, S و P از همان روش موجود در رابطه USLE به‌دست می‌آیند.

### سیستم دینامیک

واژه سیستم را به‌عنوان مجموعه‌ای از عناصر با روابط داخلی دانسته‌اند که الگویی یکپارچه تشکیل می‌دهند. تفکر سیستمی به معنای نگریندن به پدیده‌ها (اعم از ساخته دست بشر یا غیر) با نگاهی یکپارچه است و جوهر اصلی آن تغییر در نگرش می‌باشد. سیستم‌ها اعم از طبیعی و ساخته دست و فکر بشر، در طول زمان رشد و توسعه یافته‌اند و به نوبه خود مسائل و مشکلات مختلفی را نیز ایجاد نموده‌اند. از طرف دیگر پیچیدگی‌های این سیستم‌ها فرایند تصمیم‌گیری، هدایت و کنترل را برای افراد مسئول، بسیار حساس و مشکل ساخته



شکل ۲. چهار مرحله تجزیه و تحلیل سیستمی (۷)



شکل ۳. مدل ساخته شده در نرم افزار Vensim

ضریب همبستگی جهت تحلیل همبستگی بین مقادیر برآوردی و واقعی استفاده می‌گردد و پارامتر RMSE نیز با استفاده از فرمول (۳) جهت برآورد میزان اختلاف بین مقادیر واقعی و برآوردی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (S-O)^2}{N}} \quad [3]$$

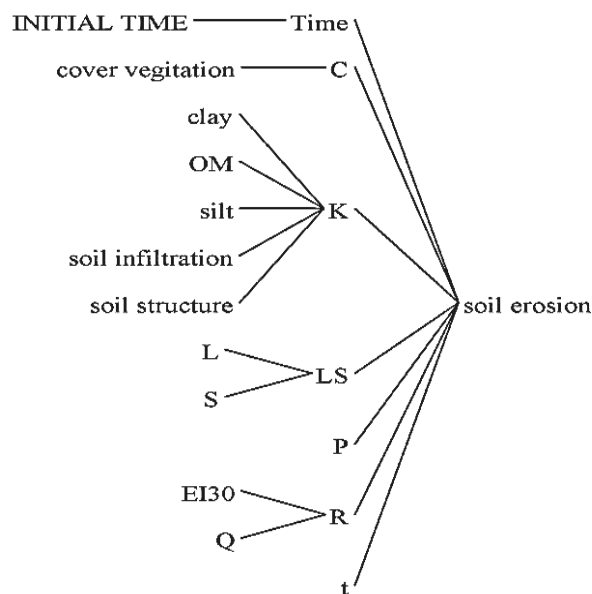
که S مقادیر برآوردی، O مقادیر واقعی و N تعداد داده‌ها است. هرچه مقدار این ضریب به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده اختلاف کم بین مقادیر برآوردی و واقعی و هرچه از صفر دورتر باشد به معنی اختلاف زیاد بین مقادیر برآوردی و واقعی می‌باشد.

### نتایج

شکل (۳) مدل ساخته شده در نرم‌افزار ونسیم را نشان می‌دهد

ساختمان خاک، نفوذپذیری)، درصد پوشش گیاهی، مقدار و طول شیب و وضعیت مدیریت و بهره‌برداری از منطقه مورد نظر است. به منظور اجرا کردن مدل، پلات‌هایی که در بارش‌های مختلف دارای رواناب بوده‌اند انتخاب و کلیه پارامترهای ذکر شده در بالا، به مدل وارد و اجرا می‌شود و در مرحله بعد مقدار رسوب واقعی و برآوردی مقایسه می‌گردد.

به منظور آنالیز حساسیت مدل و بررسی تأثیر تغییر ورودی‌ها در میزان فرسایش، مدل با تغییرات  $\pm 10\%$  و  $\pm 20\%$  درصد در ورودی‌ها اجرا و درصد تغییرات فرسایش آنها برآورد می‌شود. سپس ورودی‌های حساس به منظور واسنجی مدل شناسایی و معرفی می‌گردد و مدل با استفاده از پارامترهای واسنجی شده اجرا و مقدار فرسایش برای مرحله اعتبار سنجی به دست می‌آیند. به منظور ارزیابی مقدارهای واقعی و برآوردی، ضریب همبستگی و ضریب خطای میانگین (RMSE) محاسبه می‌شود.



شکل ۴. درختی از علت‌ها در مدل ساخته شده

علت که نمایش‌دهنده علت‌های ایجاد کننده فرسایش می‌باشد، در شکل (۴) آورده شده است.

پس از وارد نمودن پارامترها و معادلات و روابط موجود در بین آنها در نرم‌افزار ونسیم، مدل برای اولین بار با داده‌های واقعی در چند بارش و چند پلات متفاوت از نظر سایر خصوصیات خاک و هیدرولوژی و پوشش گیاهی اجرا گردیده است. جدول (۱) مقادیر واقعی و برآوردی مدل را در یک پلات و در چند بارش متفاوت، به‌عنوان نمونه نشان می‌دهد.

جهت انجام مرحله واسنجی و اعتبارسنجی مدل، آنالیز حساسیت به‌منظور تعیین پارامترهای حساس و مهم در میزان خروجی انجام گردیده، بدین صورت که ابتدا با اعمال تغییرات  $\pm 20\%$  و  $\pm 10\%$  درصد در مقادیر ورودی میزان تغییرات خروجی سنجیده شده و نمودار تحلیل حساسیت تهیه گردیده شده است تا حساس‌ترین پارامتر مؤثر در ایجاد فرسایش در شیب‌های کم و زیاد مشخص گردد که نتایج حاصل از آن در شکل (۵) نشان داده شده است.

#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل

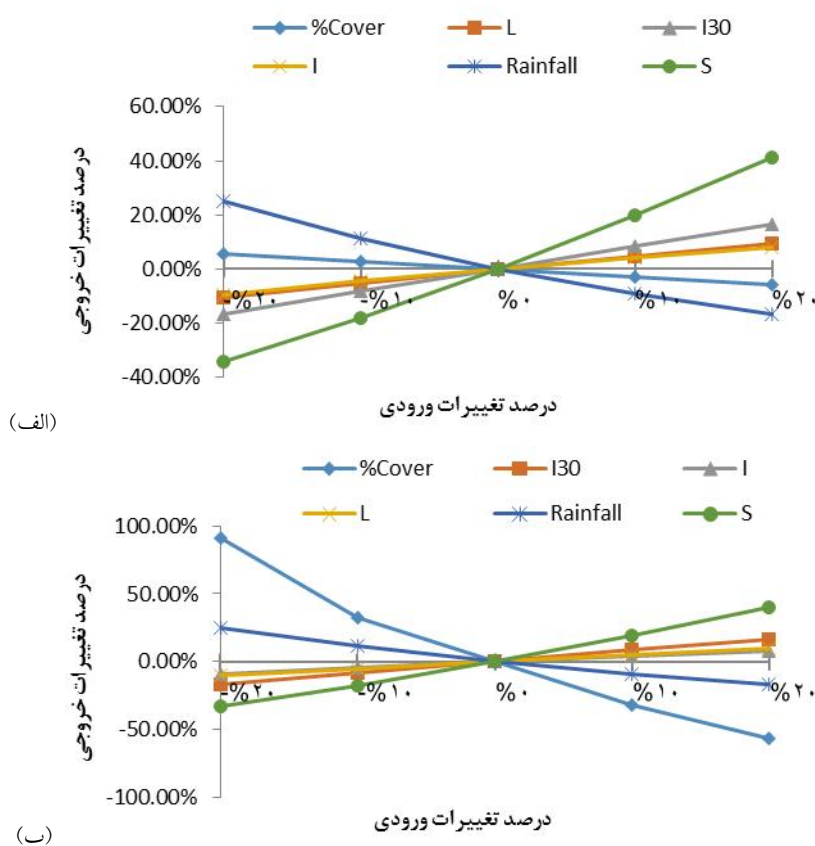
در این تحقیق، به‌منظور انجام واسنجی و اعتبارسنجی ابتدا در

که کلیه پارامترهای مؤثر در فرسایش در آن نشان داده شده است. Rainfall مقدار بارش مورد نظر (میلی‌متر)، Runoff ارتفاع رواناب حاصل از رگبار (میلی‌متر)، I شدت متوسط رگبار (میلی‌متر بر ساعت)، I30 حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای بارش (میلی‌متر بر ساعت)، Q ضریب رواناب (ارتفاع رواناب تقسیم بر مقدار بارش)، EI30 انرژی جنبشی بارش مورد نظر (مگاژول میلی‌متر بر مترمربع ساعت)، R عامل مربوط به فرسایش‌دهی بارش (مگاژول میلی‌متر بر مترمربع ساعت)، Clay درصد رس موجود در خاک پلات مورد نظر، Silt درصد سیلت موجود در خاک، OM درصد ماده آلی موجود در خاک، Soil infiltration کلاس ساختمان خاک براساس بافت، K نفوذپذیری خاک، عامل فرسایش‌پذیری خاک (بدون بعد)، Cover vegetation درصد پوشش گیاهی پلات، C عامل مربوط به پوشش گیاهی، S درصد شیب پلات، L طول شیب پلات (متر)، LS عامل مربوط به شیب و طول شیب پلات، P فاکتور مربوط به عملیات حفاظتی انجام شده در حوزه و عامل مربوط به زمان بارش اتفاق افتاده می‌باشد.

در این نرم‌افزار قابلیت نمایش روابط علت و معلولی به‌صورت درختی نیز وجود دارد. در مدل ساخته شده، درخت

جدول ۱. مشخصات تعدادی از رگبارها و مقادیر برآوردی و مشاهداتی فرسایش در یکی از پلات‌ها

مقادیر مشاهداتی (گرم بر مترمربع در ساعت)	مقادیر برآوردی (گرم بر مترمربع در ساعت)	مشخصات رگبار			تاریخ
		مدت (ساعت)	شدت متوسط (میلی متر بر ساعت)	حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای (میلی متر بر ساعت)	
۰/۰۷۴	۰/۳۷۲	۹	۱/۰۳	۵/۲	۱۳۸۵/۸/۲۵
۰/۰۶	۱	۲۶/۳	۰/۵۴	۲	۱۳۸۶/۹/۲۶
۸۷/۸۳	۳۳۸/۶۷۲	۰/۲۱	۳۰/۸۷	۳۰/۸۷	۱۳۸۷/۲/۱۵
۹/۲۱	۵/۹۶	۱/۰۳	۶/۲	۱۱/۲	۱۳۸۸/۲/۲۲



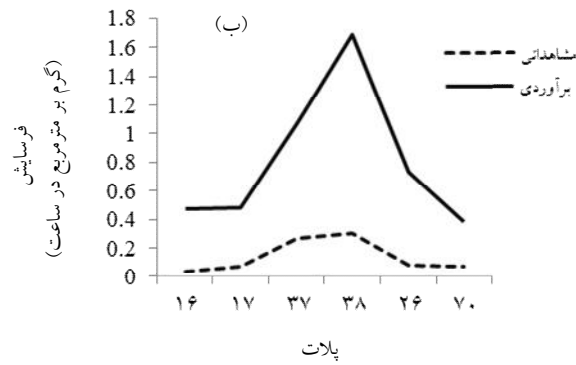
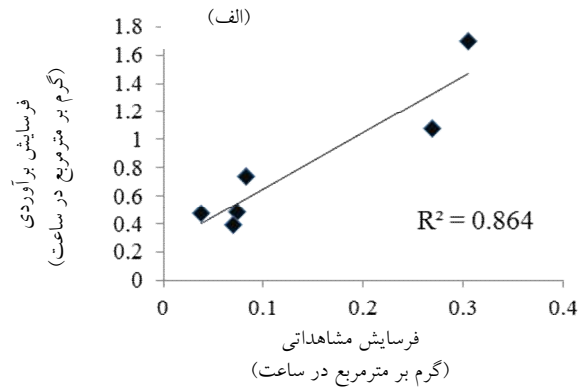
شکل ۵. نمودارهای آنالیز حساسیت، (الف) شیب ۶۰ درصد و (ب) شیب کمتر از ۶۰ درصد

### طراحی سناریوها

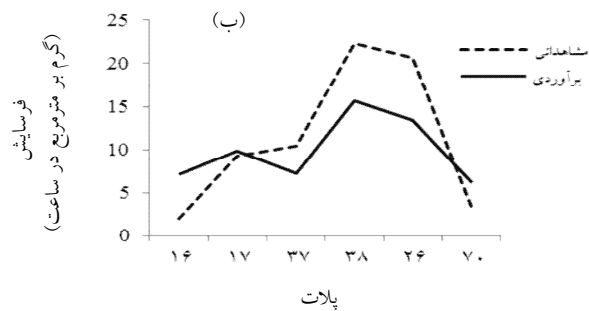
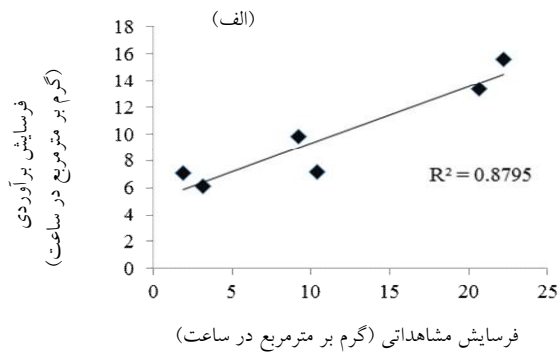
جهت طراحی سناریو و بررسی میزان تغییر مقدار فرسایش در اثر تغییر پارامترهای موجود، تغییراتی بر روی پارامترهای حساس مانند شیب، درصد پوشش گیاهی و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای که بیشترین تأثیر را در میزان خروجی داشته‌اند انجام و نتایج به صورت اشکال (۸) تا (۱۰) به دست آمده است.

۵ بارش با تغییر تک تک پارامترهای حساس در مدل در ۵ پلات مشترک که در همه بارش‌ها دارای رواناب بوده‌اند و اسنجی انجام و سپس با استفاده از ۴ بارش و اطلاعات همان پلات‌های مشترک و ضرایب به دست آمده از اسنجی، اعتبارسنجی انجام گردیده است. در شکل (۶) و (۷) نتایج حاصل از اسنجی و اعتبارسنجی نشان داده شده‌اند.

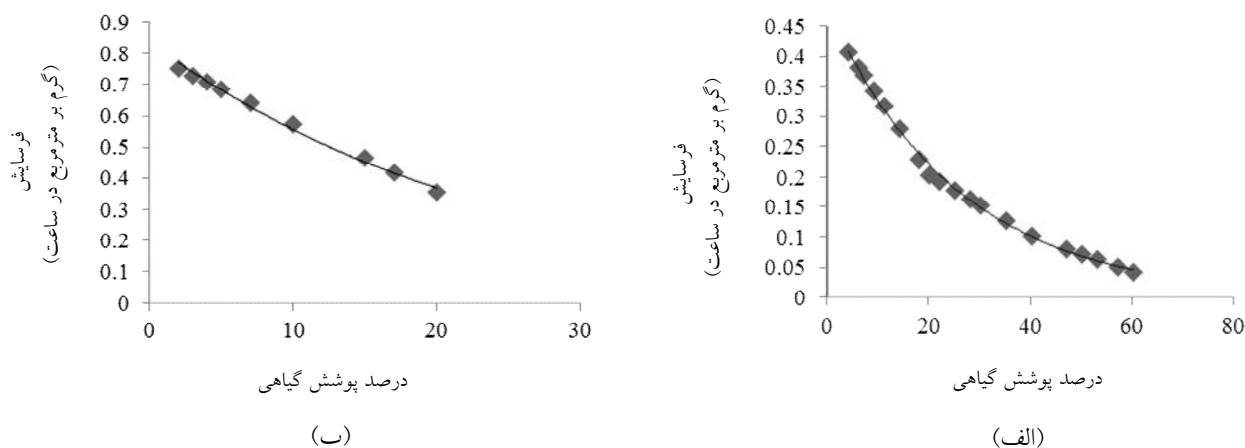




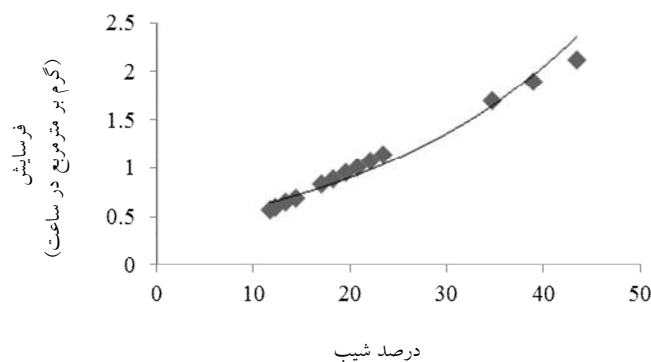
شکل ۶. نمودارهای واسنجی شده برای مقدار فرسایش



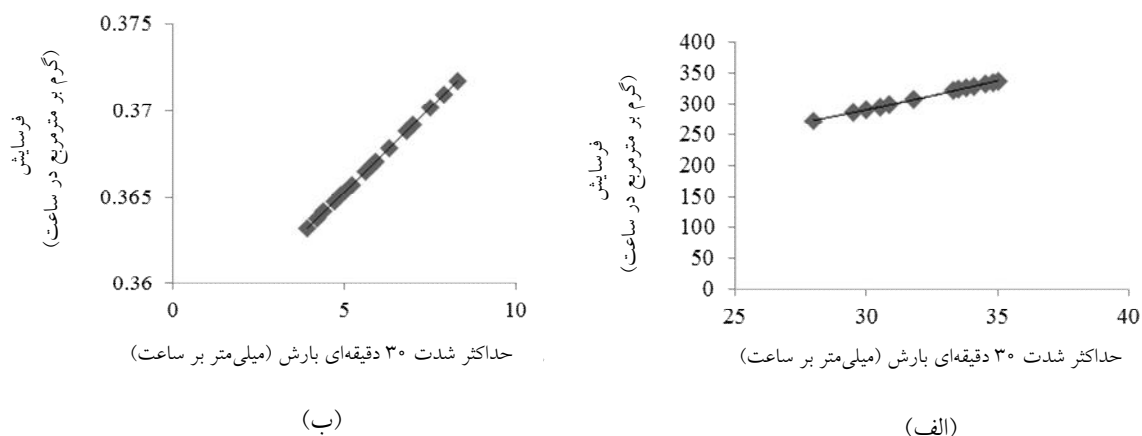
شکل ۷. نمودارهای اعتبارسنجی شده برای مقدار فرسایش



شکل ۸. بررسی روند تغییر پوشش گیاهی و تأثیر آن بر روی مقدار فرسایش، الف) پلات ۳۷ با شیب کم و ب) پلات ۱۶ با شیب زیاد



شکل ۹. بررسی روند تغییر عامل LS و تأثیر آن بر روی مقدار فرسایش



شکل ۱۰. بررسی روند تغییر عامل  $I_3$  و تأثیر آن بر روی مقدار فرسایش، الف) شدت بارش زیاد و ب) شدت بارش متوسط

جدول ۲. اولویت‌بندی عوامل مؤثر در فرسایش آبی در دو شیب متفاوت

اولویت ۴	اولویت ۳	اولویت ۲	اولویت ۱	
بقیه پارامترها	شدت بارش	مقدار بارندگی	شیب (S)	شیب < ۶۰٪
بقیه پارامترها	مقدار بارندگی	شیب (S)	پوشش گیاهی	شیب > ۶۰٪

مدل برنامه‌ریزی ژنتیک بوده و برای اکثر رویدادها ضریب همبستگی بالایی نسبت به برنامه‌ریزی ژنتیک داشته است (۳).

شبیه‌سازی در یک پلات مشخص با خصوصیات مربوطه، در بارش‌های متفاوت از لحاظ مقدار، شدت و حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای انجام شده است. برخی از این بارش‌ها بسته به شدت و مقدار خود و همچنین خصوصیات پلات مورد نظر، روانابی ایجاد نموده و ضریب رواناب آن پلات صفر و در نتیجه براساس مدل USLE-M که فرسایش براساس مقدار رواناب تخمین زده می‌شود، میزان فرسایش در آن پلات نیز صفر در نظر گرفته شده است. بنابراین، شبیه‌سازی در چندین بارش برای پلات‌هایی که رواناب داشته‌اند انجام گردیده و نتیجه آن نشان داده است که مدل برآورد بالاتری نسبت به مقادیر مشاهده‌ای دارد. لازم به ذکر است که در این تحقیق به دلیل کوچک بودن مساحت پلات‌های شبیه‌سازی شده میزان فرسایش به دست آمده (برحسب گرم بر مترمربع در ساعت) با مقدار رسوب اندازه‌گیری شده در آنها (برحسب گرم بر مترمربع در ساعت) برابر در نظر گرفته شده است.

نتایج حاصل از آنالیز حساسیت نشان داده است که در شیب‌های ۶۰ درصد میزان فرسایش تا حد زیادی به شیب و سپس به مقدار بارش بستگی داشته و تغییر این دو عامل تأثیر زیادی بر میزان خروجی دارد. در شیب‌های کمتر از ۶۰ درصد ابتدا درصد پوشش گیاهی و سپس شیب بر میزان فرسایش اثر گذاشته و سهم مهمی در تولید فرسایش در این شیب را دارند. جهت حداقل کردن اختلاف بین خروجی پیش‌بینی شده و مشاهده شده، پارامترهای ورودی مدل به نحوی که بهترین برازش را با داده‌های مشاهده‌ای داشته باشد تعدیل و اصلاح شده و تحت عنوان مرحله واسنجی نامیده می‌شود. مرحله

اولویت‌بندی عوامل مؤثر در فرسایش آبی با استفاده از کاربرد مدل USLE-M در مدل پویایی سیستم

پارامترهای موجود در معادله USLE-M، هر یک سهمی در ایجاد فرسایش در هر پلات دارند. با توجه به نتایج به دست آمده این پارامترها به شکل جدول (۲) اولویت‌بندی شده است. افزایش شدت بارش به دلیل کاهش نفوذپذیری و قدرت جذب آب توسط خاک و همچنین افزایش قطر قطرات و انرژی جنبشی آن منجر به تشدید فرسایش می‌گردد. در پلات‌های با شیب زیاد به دلیل کمبود پوشش گیاهی عامل شیب تأثیر زیادی بر فرسایش خاک دارد. در صورتی که در پلات‌هایی که شیب کمی دارند ابتدا عامل پوشش گیاهی در اولویت اول قرار داشته و سپس عامل شیب و مقدار بارندگی در اولویت‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند. در این پلات‌ها به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم و نقش مهم گیاهان در جلوگیری از فرسایش خاک، عامل پوشش از اهمیت بالایی برخوردار است. بقیه پارامترها نیز سهم یکسانی در میزان تولید فرسایش داشته و بنابراین می‌توان آنها را در اولویت‌های بعدی جای داد.

## بحث

این تحقیق با هدف اولیه بررسی کارایی و همچنین، شبیه‌سازی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر در فرسایش سطحی با استفاده از مدل ترکیبی USLE-M و پویایی سیستم انجام گرفته است. نتایج به دست آمده از این تحقیق را می‌توان با نتایج حاصل از مطالعات دیگر مطابق دانست که این نتایج حاکی از آن هستند که این مدل قابلیت خوبی در تعیین میزان فرسایش و هدررفت خاک دارد (۱۵) و همچنین، در شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب نیز، مدل پویایی سیستم دارای دقت بیشتری نسبت به

آمده می‌توان دریافت که در شیب‌های بالا، از بین پارامترهای موجود ابتدا عامل شیب و سپس مقدار بارندگی و شدت بارش به ترتیب در اولویت‌های اول تا سوم قرار می‌گیرند (جدول ۲). افزایش شدت بارش به دلیل کاهش نفوذپذیری و قدرت جذب آب توسط خاک و همچنین افزایش قطر قطرات و انرژی جنبشی آن منجر به تشدید فرسایش می‌گردد. در پلات‌های با شیب زیاد به دلیل کمبود پوشش گیاهی عامل شیب تأثیر زیادی بر فرسایش خاک دارد. در صورتی که در پلات‌هایی که شیب کمی دارند ابتدا عامل پوشش گیاهی در اولویت اول قرار داشته و سپس عامل شیب و مقدار بارندگی در اولویت‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند. در این پلات‌ها به دلیل وجود پوشش گیاهی متراکم و نقش مهم گیاهان در جلوگیری از فرسایش خاک، عامل پوشش از اهمیت بالایی برخوردار است. بقیه پارامترها نیز سهم یکسانی در میزان تولید فرسایش داشته و بنابراین می‌توان آنها را در اولویت‌های بعدی جای داد.

### نتیجه‌گیری

یکی از روش‌هایی که می‌توان جهت تخمین فرسایش در حوزه‌های آبخیز استفاده نمود، به‌کارگیری مدل‌های موجود در زمینه فرسایش خاک مانند USLE-M در مدل پویائی سیستم‌ها است. این مدل با در نظر گرفتن تمامی عوامل مؤثر در فرسایش، پدیده مورد نظر را شبیه‌سازی کرده و نتایج قابل قبولی را ارائه داده است. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت مدل نیز نشان می‌دهد که این مدل در شیب‌های بالا تأثیرپذیری زیادی از عامل شیب، مقدار بارندگی و همچنین حداکثر شدت ۳۰ دقیقه‌ای بارش دارد. در شیب‌های پایین مانند شیب ۴۰ درصد به دلیل وجود پوشش گیاهی با درصد زیاد، مقدار فرسایش وابستگی زیادی به پوشش داشته و با تغییر آن به صورت قابل ملاحظه‌ای تغییر می‌نماید. پس از این عامل نیز، شیب و مقدار بارندگی بیشترین تأثیر را بر روی فرسایش داشته است.

در این تحقیق سناریوهایی به صورت بررسی روند تغییرات

آزمون مدل نیز که جهت بررسی و ارزیابی دقت مدل کاربرد دارد تحت عنوان اعتبارسنجی نامیده می‌شود. این مرحله برای رسیدن به نتایج مورد انتظار و اینکه آیا مدل رضایت‌بخش است یا خیر ضروری است.

ضرایب تبیین ( $r^2$ ) در مراحل واسنجی و اعتبارسنجی نشان‌دهنده همبستگی قوی بین فرسایش مشاهداتی و برآورد شده است (شکل ۶ و ۷-الف). همچنین ضریب همبستگی بین مقادیر واقعی و برآورد شده در هر دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی حدود ۰/۹ بوده که طبق روندهای نشان داده شده همبستگی قوی بین این مقادیر وجود دارد. علاوه بر این مقدار RMSE برای مرحله واسنجی ۰/۷۶ و در مرحله اعتبارسنجی ۴/۸۷ بوده است که نشان‌دهنده اختلاف کم بین مقادیر واقعی و شبیه‌سازی شده است.

در شکل‌های (۸، ۹ و ۱۰) چگونگی روند تغییر درصد پوشش گیاهی، عامل LS و عامل I30 و تأثیری که بر روی مقدار فرسایش دارند، نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش درصد پوشش گیاهی تا مقداری مشخص فرسایش کاهش یافته اما بعد از آن مقدار فرسایش به صورت جزئی تغییر کرده یا به صورت ثابت باقی می‌ماند. این مقدار از پوشش گیاهی که با افزایش آن مقدار فرسایش تغییری نمی‌کند، پوشش بهینه نامیده می‌شود. در پلات ۳۷ پوشش در حدود ۶۵-۶۰ درصد و در پلات ۱۶ به دلیل شیب زیاد پوشش ۲۰-۲۵ درصد به عنوان پوشش بهینه تخمین زده شده است. با افزایش درصد شیب و به‌طور کلی عامل LS میزان فرسایش افزایش یافته تا جایی که با افزایش مقدار LS، میزان فرسایش تغییر چندانی نداشته یا ثابت می‌شود. این به دلیل عدم وجود خاک و در نتیجه فرسایش در شیب‌های بالاتر است. در بارش‌هایی با شدت بیشتر روند تغییرات میزان فرسایش بر اساس تغییر عامل I30 دارای شیب کمتر و در بارش‌های با شدت کمتر این عامل با شیب بیشتری تغییر می‌کند.

پارامترهای موجود در معادله USLE-M، هریک سهمی در ایجاد فرسایش در هر پلات دارند. با توجه به نتایج به دست

پوشش بهینه مطرح نمود. در بررسی تغییرات شیب و مقدار فرسایش هم می‌توان این نتیجه را کسب نمود که با افزایش شیب تا یک مقدار مشخص، فرسایش نیز افزایش می‌یابد. به طوری که شیب‌های ۷۰ - ۶۵ درصد شیب‌هایی هستند که به دلیل عدم وجود خاک کافی در آنها، فرسایش به صورت جزئی اتفاق می‌افتد.

عوامل مؤثر در فرسایش و تأثیری که بر روی میزان فرسایش دارند مطرح گردیده است. یکی از اهداف طراحی این سناریوها مشخص شدن درصد پوشش گیاهی بهینه در شیب‌های مختلف بوده که بعد از آن مقدار فرسایش تغییر چندانی نکرده و یا حتی ثابت می‌گردد. در شیب‌های ۴۰ درصد و کمتر پوشش گیاهی ۶۵ - ۶۰ درصد و در شیب‌های ۵۵ الی ۶۰ درصد پوشش گیاهی ۵۰ - ۳۰ درصد را می‌توان به عنوان

### منابع مورد استفاده

۱. اقری هارونی، م. ط. محمودپور و ع. باقری. ۱۳۹۰. بررسی تغییرات سطح آب زیرزمینی در وقوع فروچاله در حوضه شهرستان ابرکوه با رویکرد پویایی سیستم‌ها و بررسی گزینه‌های مدیریتی، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، سمنان، دانشگاه سمنان.
۲. ثمره هاشمی، م. ص. انوری تفتی و ع. باقری. ۱۳۸۸. بررسی مکانیزم‌های مؤثر بر کاهش سطح سفره آب زیرزمینی در استان همدان با استفاده از رویکرد پویایی سیستم‌ها. دهمین سمینار سراسری آبیاری و کاهش تبخیر. کرمان. دانشگاه شهید باهنر.
۳. دربندی، ص. ی. دین‌پژوه و ص. زینالی. ۱۳۹۳. بررسی کارایی مدل پویایی سیستم در شبیه‌سازی فرآیند بارش - رواناب. نشریه آب و خاک ۲۸(۱): ۱۳۸-۱۲۷.
۴. رفاهی، ح. ۱۳۷۸. فرسایش آبی و کنترل آن. چاپ دوم. انتشارات دانشگاه تهران. ایران.
۵. قبادی، ش. ۱۳۹۲. سیستم دینامیک. چاپ چهارم. انتشارات سازمان مدیریت صنعتی. تهران. ایران.
۶. قشقایی، م. ن. طوفان تبریزی و ح. حسینی صفا. ۱۳۸۷. بررسی تغییرات متوسط تراز آب زیرزمینی در دشت تهران با استفاده از پویایی سیستم. چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران: ۱۹۷۹-۱۹۷۱.
۷. گرت، و. ا. پدرسن و س. مارین. ۱۳۸۸. اکولوژی و مدیریت منابع طبیعی. ترجمه شهریار محمدرضائی و فردین اسکافی. چاپ دوم. انتشارات آبیژ. تهران. ایران.
۸. ملاحسینی، م. و ع. صلوی تبار. ۱۳۹۱. ارزیابی اثر ایجاد ظرفیت ذخیره در کاهش خسارت سیلاب با استفاده از مدل بهینه‌سازی شبیه‌سازی مبتنی بر پویایی سیستم. نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران. اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان.
۹. واعظی، ع. ح. بهرامی، ح. ر. صادقی و م. ح. مهدیان. ۱۳۸۷. ارزیابی شاخص‌های فرسایش‌دگی مدل‌های USLE، MUSLE، و USLE-M و RUSLE در خاک‌های ناحیه‌ای نیمه‌خشک در جنوب استان آذربایجان شرقی. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران ۲(۴): ۳۷-۲۵.
10. J. Ibáñez, J., F. Lavado Contador, S. Schnabel and M. Pulido Fernández. 2014. A model-based integrated assessment of land degradation by water erosion in a valuable Spanish rangeland. *J. Environ. Modell & Software* 55: 201-213.
11. Julius, H., C. Smith, G. Brown, N. Marshall, R. Johnstone. 2016. A system dynamics simulation model for sustainable water resources management and agricultural development in the Volta River Basin, Ghana. *J. Sci. Total. Environ* 573: 444-457.
12. Samian, M., K. Naderi Mahdei, H. Saadi and R. Movahedi. 2014. Identifying factors affecting optimal management of agricultural water. *J. Saudi. Soc. Agric. Sci.* 14: 11-18.
13. P. I. A. Kinnell. 1999. The USLE-M and Modeling Erosion within Catchments. *In: Proceeding of the 10<sup>th</sup> International Soil Conservation Organization Meeting, Purdue University, PP: 924-928.*

14. Wei, Sh., H, Yang, J. Song, K. Abbaspour and Z. Xu. 2012. System dynamics simulation model for assessing socio-economic impacts of different levels of environmental flow allocation in the Weihe River Basin, China. *J. Oper. Res.* 221: 248-262.
15. Yeh, S., Ch. Wang and H. Yu. 2006. Simulation of soil erosion and nutrient impact using an integrated system dynamics model in a watershed in Taiwan. *J. Environ. Modell & Software* 21: 937-948.

## Prioritizing the Effective Factors on Surface Erosion Using USLE-M Integrated Model and System Dynamic (A Case Study: Sanganeh Research Center, Khorasan Razavi)

S. Esmailian<sup>1</sup>, A. Talebi<sup>1\*</sup> and M. Esmailian<sup>2</sup>

(Received: March 10-2016; Accepted: April 05-2017)

### Abstract

This research was aimed to simulate and prioritize the effective factors on water erosion using USLE-M in the system dynamic model. In this integrated model, by using the system dynamic simulation software (Vensim), all variables and factors involved in erosion and soil loss were considered according to the USLE-M model. After model implementation, the estimated values and observations were compared and then sensitivity analysis was done to determine the sensitive parameters. Then, calibration was performed on the sensitive parameters. This study found that that the results of the model were acceptable for soil erosion simulation due to considering all the effective factors in soil erosion. The results of the sensitivity analysis also indicated high model sensitivity to the slope and vegetation cover in high and low slopes, respectively. By investigating the changes in various parameters such as vegetation cover and slope on erosion, the optimal vegetation cover with 67 and 40% slope, was estimated to be 20 and 60%, respectively.

**Keywords:** System dynamic, Erosion and sediment, Sensitivity analysis, VENSIM software.

---

1. Dept. of Watershed Manag. Eng., Faculty of Natural Resour., Yazd Univ., Yazd. Iran.

2. Dept. of Manag., Faculty of Administrative Sci. and Economics, Univ. of Isfahan., Isfahan. Iran.

\*: Corresponding Author, Email: talebisf@yazd.ac.ir