تحلیل حساسیت، واسنجی و اعتبارسازی مدل یوروسم برای پیش‌بینی رواناب در حوزه آبخیز کارون جنوبی

محسن حمیدپور[۱*]، احمد جلالیان[۲]، مجید افیونی[۳] و بهزاد قربانی[۴]

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۹/۲۰ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۲/۲۴)

چکیده

برای حفاظت حوزه‌های آبخیز، استفاده از مدلی که توانایی برآورد رواناب، فرسایش و رسوب را در زمان‌ها و مکان‌های معین داشته باشد، ضروری است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی تحلیل حساسیت مدل یوروسم (Eurosem) و واسنجی و اعتبارسازی آن در شبیه‌سازی رواناب و دبی اوج رواناب در زیرحوزه تنگ رواق از حوزه آبخیز کارون جنوبی بود. بدین منظور، منطقه‌ای به وسعت یک هکتار انتخاب و رواناب عبوری در فواصل زمانی مشخصی در شش رخداد جمع‌آوری شد. تحلیل حساسیت مدل به روش ساده، با افزایش و کاهش ۱۰ درصدی پارامترهای دینامیک مدل (چسبندگی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، حرکت موینگی خالص، ضریب زبری مانینگ، درصد حجمی رطوبت قبل از بارندگی و جداپذیری ذرات خاک) انجام شد. بهترین واسنجی رواناب با کاهش هدایت هیدرولیکی و حرکت موینگی و افزایش رطوبت اولیه صورت گرفت. نتایج اعتبارسازی مدل نشان داد که مدل قادر است میزان کل رواناب و دبی اوج رواناب را به خوبی شبیه‌سازی نماید ولی در شبیه‌سازی زمان شروع رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج رواناب موفق نبود. نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که کل رواناب بیشترین حساسیت را به هدایت هیدرولیکی اشباع نشان داد. با افزایش ۱۰ درصدی هدایت هیدرولیکی اشباع، کل رواناب ۱۱ درصد کاهش و با کاهش ۱۰ درصدی این پارامتر، کل رواناب ۱۴ درصد افزایش نشان داد. این مدل نسبت به چسبندگی خاک هیچ‌گونه حساسیتی نشان نداد. نتایج نشان داد که حساسیت مدل یوروسم به موقعیت و محل ارزیابی مدل بستگی دارد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل حساسیت، رواناب، مدل یوروسم

۱. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان

۲. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه آزاد واحد اسلامی، واحد خورسگان

۳. گروه علوم خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان

۴. گروه آبیاری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد

* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mohsen_hamidpour@yahoo.com

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]

مقدمه

فن‌آوری پیش‌بینی میزان رواناب و رسوب، ابزار قدرتمندی است که بیش از نیم قرن است که برای توسعه طرح‌ها و برنامه‌های حفاظت آب و خاک و طرح‌های مهندسی به‌کار می‌رود. این فن‌آوری شامل یک سری از معادلات ریاضی است که میزان رواناب و بار رسوب را با استفاده از پارامترهای ورودی برای خاک، اقلیم، پستی و بلندی و کاربری اراضی محاسبه می‌کند (۱۹). مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی رواناب، رسوب و فرسایش خاک وجود دارد که هر کدام دارای ساختار، ورودی‌ها و خروجی‌های متفاوت، سهولت استفاده، کارآیی و محدودیت‌های خاصی هستند. پژوهشگران در سراسر جهان از دیرباز در پی این بوده‌اند که با استفاده از روش‌های مختلف بتوانند میزان رواناب، رسوب و فرسایش را در اراضی محاسبه نمایند. برای حفاظت در حوزه‌های آبخیز، استفاده از مدلی که توانایی برآورد رواناب، فرسایش و رسوب را در زمان‌ها و مکان‌های معین داشته باشد، ضروری به نظر می‌رسد. مطالعات مختلف نشان داده است که در طول سال، تعداد محدودی از رخدادها (Events) فرساینده هستند (۶، ۸ و ۹). بر این اساس، مدل یوروسم در سال ۱۹۹۱ توسط مورگان و همکاران(۱۰) ابداع گردید. این مدل قادر است میزان رواناب، رسوب، حداکثر دبی رواناب و رسوب و فرسایش خاک در هر رخداد را در مزارع و حوزه‌های آبخیز کوچک شبیه‌سازی نماید (۱۷).

مدل یوروسم یک مدل پخشی، دینامیک و تک رخداد است که قادر است رواناب، رسوب و فرسایش خاک را به‌طور مکانی و زمانی در هر رخداد در فواصل زمانی یک دقیقه‌ای پیش‌بینی نماید (۱۱ و ۱۳). از آنجا که مدل یوروسم یک مدل پیش‌بینی فرسایش خاک است باید به یک مدل هیدرولوژیک متصل شود تا میزان رواناب را محاسبه کند. بدین منظور، این مدل به مدل KINEROS مرتبط شده است و این مدل با استفاده از نظریه موج جنبشی به حل معادله پیوستگی (معادله ۱) برای محاسبه مقدار رواناب می‌پردازد (۱۸ و ۲۳).

$$\frac{\delta A}{\delta t}+\frac{\delta Q}{\delta x}=r(t)-f(t) \qquad [1]$$

که در این معادله، A سطح مقطع جریان (m^2)، Q دبی جریان (m^3/s)، x فاصله (m)، t زمان (s)، r(t) شدت بارندگی پس از کسر ذخیره برگاب و f(t) سرعت نفوذ موضعی است.

حساسیت مدل‌های اساساً فیزیکی به موقعیت و محل ارزیابی مدل بستگی دارد. بنابراین لازم است قبل از کاربرد مدل، تحلیل حساسیت مدل به منظور فهم رفتار مدل نسبت به پارامترهای مختلف و اطمینان از نتایج قابل قبول انجام شود (۱۹). میزان تغییر خروجی‌های مدل (هدررفت خاک، بار رسوب، رواناب و سایر خروجی‌های مهم) به ازای تغییر معین در میزان ورودی‌های مدل را آنالیز حساسیت گویند. تحلیل حساسیت شامل وارد کردن یک محدوده از مقادیر برای ورودی‌های خاص و مشاهدهٔ تغییرات در مقادیر خروجی مدل است (۱۹ و ۲۰). متغیری که تغییرات کم آن باعث تغییرات زیادی در میزان خروجی‌های مدل شود، متغیر حساس نامیده می‌شود. به‌دلیل تأثیر زیاد این نوع از متغیرها بر پیش‌بینی‌های (خروجی‌های) مدل، باید توجه زیادی در محاسبه و اندازه‌گیری آنها صورت گیرد (۱۹). تحلیل حساسیت روش مناسبی برای تعیین رفتار مدل در مقابل ورودی‌های آن است. اگرچه، مدل‌سازان بایستی مدل‌ها را اعتبارسازی و تأیید نمایند، اما کاربران نیز برای اطمینان از نتایج قابل قبول، باید مدل را مورد تحلیل حساسیت قرار دهند (۱۹). مطالعات کوینتون وهمکاران (۱۳، ۱۴ و ۱۵) نشان داد که دو گروه از پارامترهای ورودی مدل یوروسم، بیشترین تأثیر را بر خروجی‌های مدل که شامل رواناب، هدررفت خاک، دبی اوج رواناب، دبی اوج رسوب، زمان شروع رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج رواناب و رسوب هستند، می‌گذارند. گروه اول، پارامترهایی هستند که بر سرعت نفوذ تأثیر دارند و گروه دوم، آنهایی هستند که بر حداکثر غلظت رسوب تعادلی در جریان مؤثرند. کوینتون (۱۴ و ۱۵) حساسیت خروجی‌های مدل را در برابر پارامترهای ورودی مدل به چهار گروه خیلی حساس، نیمه حساس، با حساسیت کم و غیرحساس تقسیم‌بندی کرد. پارامترهای حرکت مویینگی، هدایت هیدرولیکی و درصد حجمی رطوبت اولیه در

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]

گروه خیلی حساس، پارامترهای ضریب زبری مانینگ و قطر میانه ذرات خاک در گروه نیمه حساس، پارامترهای شیب و عرض شیار در گروه حساسیت کم و ارتفاع پوشش گیاهی جزو گروه غیرحساس قرار گرفتند.

در حوزه آبخیز کارون جنوبی، شدت فرسایش خاک بسیار بالا است (۱). در این حوزه، زیرحوزهٔ تنگ رواق به‌دلیل جنگل‌تراشی زیاد، وابسته بودن اقتصادی منطقه به دامداری، تنوع زمین‌شناسی حوزه و حساسیت بالای بعضی از خاک‌های حوزه آبخیز به فرسایش، یکی از بحرانی‌ترین حوزه‌های آبخیز کشور به لحاظ فرسایش خاک و تولید رواناب می‌باشد. فرسایش خاک در این منطقه سبب بروز خسارات درون مکانی عمده‌ای مثل کاهش حاصل‌خیزی خاک، رانش زمین و کاهش عمق خاک و هم‌چنین خسارات برون مکانی نظیر جاری شدن سیل و پرشدن سدها و مخازن شده است. بنابراین برای انجام کارهای حفاظتی در این منطقه، داشتن یک مدل پویا که بتواند رواناب، دبی اوج رواناب و زمان شروع رواناب و مدت زمان رسیدن به دبی اوج را به‌طور مکانی و زمانی تعیین نماید، نقش مهمی در حفظ منابع آب و خاک خواهد داشت. اهداف این تحقیق عبارت بودند از:

۱. واسنجی و اعتبارسازی مدل در شبیه‌سازی رواناب و دبی اوج رواناب در منطقه مورد مطالعه

۲. تحلیل حساسیت مدل یوروسم در زیر حوزه تنگ رواق از حوزه آبخیز کارون جنوبی

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در بخشی از زیرحوزه تنگ رواق واقع در حوزه آبخیز کارون جنوبی است که در استان کهگیلویه و بویر احمد، شهرستان یاسوج، بخش پاتاوه در عرض جغرافیایی ′۳۱°۲ و طول جغرافیایی ′۵۱°۲۵ واقع شده است. در داخل این حوزه، زیرحوزه‌ای به وسعت یک هکتار در نزدیکی روستای تنگ رواق به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب گردید و مطالعات ارزیابی مدل یوروسم در این زیرحوزه انجام شد. کاربری اراضی در این منطقه شامل جنگل، دیمکاری و جنگل توأم با دیمکاری است. بخش عمده‌ای از این گیاهان جنگلی دراثر بهره‌برداری بی‌رویه، دیمکاری و چرای بیش از حد از بین رفته، و منطقه از شکل جنگلی خارج شده است.

واحدبندی حوزه مورد مطالعه

در مدل یوروسم، یک حوزه آبخیز براساس اطلاعات نقشه پستی و بلندی زمین، کاربری اراضی، پوشش گیاهی، شیب و نقشه موقعیت جاده‌ها و کانال‌ها به اجزایی همگن به‌نام واحد تقسیم‌بندی می‌شود (۹، ۱۰ و ۱۱). واحدها شامل سطوح مسطح، سطوح شیبدار و کانال‌ها می‌باشند. هر واحد باید از لحاظ خواص خاک، شیب، پوشش گیاهی و نوع کاربری یکنواخت و کاملاً همگن باشد. واحدها باید طوری مرتب شوند که طبق روال طبیعی به‌صورت ناودانی عمل کنند و جریان‌های سطحی و رسوبات از بالاترین واحد به پایین‌ترین آن هدایت شوند. منطقه مورد مطالعه براساس دستورالعمل کاربران مدل به ۹ واحد تقسیم‌بندی شد. عامل‌های ورودی مدل برای هر واحد در صحرا و آزمایشگاه اندازه‌گیری گردید.

پارامترهای ورودی

این پارامترها در قالب دو فایل اقلیمی و حوزه به مدل وارد می‌شوند. ورودی‌های اقلیمی شامل میزان بارش در هر رخداد، مدت زمان بارندگی، دما، و حداکثر جفت داده‌های عمق – زمان بارندگی بودند که با نصب یک دستگاه باران سنج معمولی در زیر حوزه مورد مطالعه برای ۶ بارش مختلف اندازه‌گیری گردید. ورودی‌های مربوط به حوزه شامل خصوصیات هندسی حوزه، خصوصیات فیزیکی خاک و خصوصیات پوشش گیاهی می‌باشد. خصوصیات خاک وارد شده به مدل عبارتند از: تخلخل خاک، متوسط قطر ذرات خاک، حداکثر عمق خاک قابل فرسایش، وزن مخصوص ذرات رسوب کرده، چسبندگی خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع، حرکت مویینگی خالص،

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]

ضریب زبری مانینگ، درصد حجمی رطوبت قبل از بارندگی، درصد حجمی رطوبت پس از بارندگی، فرسایش‌پذیری خاک به‌وسیله قطرات باران، زبری در جهت شیب غالب و شیب کانال می‌باشد (۹، ۱۰ و ۱۱).

رطوبت خاک به روش استاندارد وزنی و هدایت هیدرولیکی اشباع خاک در نمونه‌های دست نخورده به روش آزمایشگاهی بار ثابت تعیین شد. جرم مخصوص ظاهری خاک به روش سیلندر و سپس با در نظر گرفتن وزن مخصوص حقیقی مقدار تخلخل خاک در هر واحد محاسبه شد. بافت خاک به روش پیپت و از نمونه‌های ۱۵-۰ سانتی‌متری سطح خاک تعیین شد. پس از تعیین درصد اندازه ذرات به‌وسیله روش پیپت، با رسم منحنی توزیع اندازه ذرات، متوسط قطر ذرات خاک تعیین شد. برای اندازه‌گیری چسبندگی خاک از دستگاه برش پره‌ای استفاده شد (۱۰). حرکت مویینگی خالص مؤثر(Effective net capillary drive) خاصیتی از خاک است که با واحد طول بیان می‌شود و بیان‌کننده رابطه بین پتانسیل ماتریک خاک با هدایت هیدرولیکی غیراشباع خاک است (۳). این پارامتر به قابلیت جذب و دفع آب بستگی دارد. برای اندازه‌گیری حرکت مویینگی خالص، از روش زمان ماندابی استفاده شد. برای تعیین این پارامتر، به حداقل دو زمان ماندآبی که در دو شدت بارندگی مختلف حاصل شده‌اند، نیاز است. برای این منظور، دستگاه نفوذسنج بارانی (Sprinkler infiltrometer) طراحی شد (۲۴). با استفاده از معادله یانگ، حرکت مویینگی محاسبه شد (۳).

$$t_p = \frac{G \times Ks}{R(R - Ks)} \qquad [۲]$$

که در این رابطه، t_p زمان ماندآبی، Ks هدایت هیدرولیکی اشباع، R شدت بارندگی و G، حرکت مویینگی است. با رسم R در مقابل $\frac{۱}{(t_p.R)}$، ضرایب معادله یعنی Ks و G به‌دست می‌آید. بدین منظور اگر معادله فوق را برای دو زمان ماندآبی در دو شدت بارندگی متفاوت بنویسیم خواهیم داشت:

$$R_۱ = \frac{GKs}{tp_۱ \times R_۱} + Ks \qquad [۳]$$

$$R_۲ = \frac{GKs}{tp_۲ \times R_۲} + Ks \qquad [۴]$$

از تفاضل این دو معادله، معادله زیر حاصل می‌شود:

$$GKs = \frac{R_۱ - R_۲}{(\frac{۱}{tp_۱R_۱} - \frac{۱}{tp_۲R_۲})} \qquad [۵]$$

مقادیر R_1، R_2، tp_1 و tp_2 مستقیماً در صحرا تعیین گردید. لذا مقدار GKs را می‌توان از معادله بالا و مقدار Ks به‌وسیله یکی از دو معادله قبل حساب کرد و در نهایت مقدار حرکت مویینگی (G) محاسبه می‌شود. با وارد کردن مقدار G برای هر واحد در فایل ورودی حوزه، نرم‌افزار مدل ظرفیت نفوذ خاک را محاسبه می‌کند.

مدل یوروسم از شش خصوصیت پوشش گیاهی استفاده می‌کند. این خصوصیات شامل درصد پوشش گیاهی، سطح مقطع پایه پوشش، متوسط زاویه ساقه گیاه با افق، ارتفاع پوشش مؤثر، حداکثر ذخیره برگابی و ضریب شکل برگ می‌باشد (۱۰). درصد تاج پوشش گیاهی برای واحدهایی که کاربری اراضی آنها، گندم بود به‌وسیله کوادرات‌هایی به مساحت یک مترمربع تخمین زده شد. در واحدهایی که پوشش گیاهی از نوع گیاه جنگلی بلوط بود این پارامتر به‌طور چشمی از تصویر قائم تاج پوشش روی زمین تخمین زده شد. حداکثر ذخیره برگابی از روی جداول پوشش گیاهی معرفی شده در راهنمای کاربران مدل اروپایی تخمین زده شد. ضریب شکل برگ برای تشخیص گیاهان پهن برگ از سوزنی برگ در مدل استفاده می‌شود. برای گیاه گندم عدد ۱ و برای درختان بلوط عدد ۲ از جداول راهنمای کاربران مدل انتخاب شد (۱۰). سطح مقطع پایه پوشش به‌وسیله شمردن تعداد درختان در هر واحد و اندازه‌گیری قطر ساقه و با فرض مدور بودن ساقه محاسبه شد. این پارامتر بیان‌کننده کل مساحت ساقه درختان در هر مترمربع می‌باشد. ارتفاع گیاهان، به‌وسیله متر نواری مستقیماً در صحرا اندازه‌گیری گردید.

اندازه‌گیری رواناب واقعی

برای اندازه‌گیری مقدار رواناب واقعی، یک سرریز مثلثی شکل در نقطه خروجی منطقه مورد مطالعه نصب شد. دبی رواناب

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]

حاصل از ۶ رخداد از فرمول زیر محاسبه گردید (۲).

$$Q = ۱۴/۱۷H^{\frac{۵}{۲}} \qquad [۶]$$

که در این رابطه، Q دبی رواناب برحسب لیتر در ثانیه و H ارتفاع آب روی تاج سرریز برحسب سانتی‌متر است.

تحلیل داده‌ها

برای تحلیل داده‌ها از نرم‌افزار EUROSEM 98 نسخه ۳/۶ که به زبان فرترن تدارک گردیده و در محیط MS-DOS قابل اجرا می‌باشد، استفاده شد. برای محاسبه سطح زیر منحنی‌های رواناب- زمان (Hydrograph) مشاهده‌ای از نرم‌افزار Table Curve استفاده شد. پس از جمع‌آوری و اندازه‌گیری پارامترهای ورودی مدل، نرم‌افزار مدل برای ۶ بارش اجرا گردید.

تحلیل حساسیت

برای تحلیل حساسیت مدل، از بین ۶ رخداد شبیه‌سازی شده، رخداد ۸ فروردین ماه ۱۳۸۲، به‌دلیل شبیه‌سازی بهتر نسبت به سایر رخدادها انتخاب شد. تحلیل حساسیت مدل با ۱۰ درصد افزایش و کاهش پارامترهای دینامیک مدل (حرکت موییننگی خالص، هدایت هیدرولیکی اشباع، درصد حجمی رطوبت اولیه، جداپذیری ذرات خاک توسط باران، چسبندگی خاک و ضریب زبری) و مشاهدهٔ درصد تغییر خروجی‌های مدل (کل رواناب، دبی اوج رواناب) انجام شد. طبقه‌بندی کیفی حساسیت مدل با استفاده از شاخص حساسیت (Sensitivity index) انجام گردید(۵ و ۱۳). این شاخص عبارت است از:

$$SI = \frac{[(O_۲-O_۱)/\overline{O}]}{[(I_۲ - I_۱)/\bar{I}]} \qquad [۷]$$

که در آن، SI= شاخص حساسیت، O_1= مقدار اولیه پارامتر خروجی، O_2= مقدار ثانویه پارامتر خروجی، I_1= مقدار اولیه پارامتر ورودی، I_2= مقدار ثانویه پارامتر ورودی، $\overline{O}$ = متوسط مقادیر پارامتر خروجی و $\bar{I}$ = متوسط مقادیر پارامتر ورودی می‌باشد.

برطبق این روش، حساسیت خروجی‌های مدل نسبت به پارامترهای ورودی به چهار گروه حساس، نیمه حساس، با حساسیت کم و غیرحساس تقسیم‌بندی می‌شود (۵ و۱۳). اگر میزان این شاخص ۱-۰/۵ باشد، مدل به آن پارامتر ورودی نیمه حساس است. درصورتی‌که میزان این شاخص ۰/۵-۰ باشد، مدل به آن پارامتر ورودی حساسیت کمی دارد و درصورتی‌که تغییرات پارامتر ورودی هیچ تأثیری بر خروجی مدل نداشته باشد، مدل به آن پارامتر غیرحساس است (۵ و ۱۳).

کارآیی مدل (Model Efficiency)

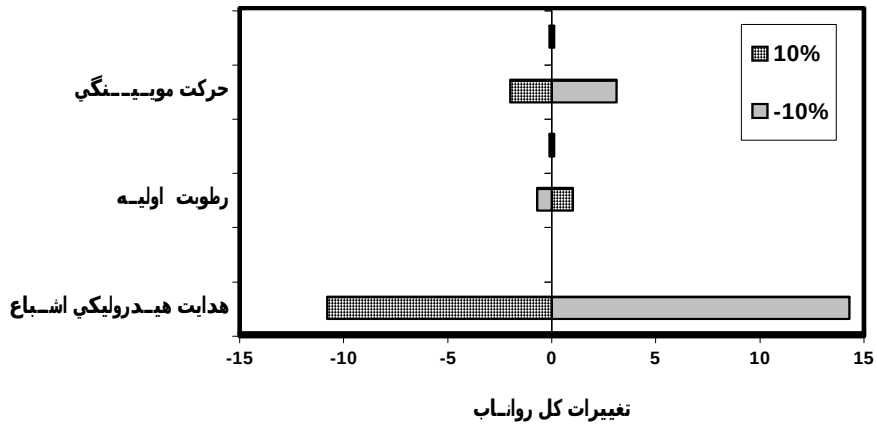
پس از تعیین حساسیت رواناب به داده‌های دینامیک مدل، برای واسنجی مدل از نتایج تحلیل حساسیت استفاده شد. برای واسنجی مدل، دو رخداد ۵ و ۲۵ فروردین ماه ۱۳۸۲ در نظر گرفته شدند. پس از واسنجی، ارزیابی مدل در پیش‌بینی رواناب ۴ رخداد (۸ فروردین ماه، اول و ۱۶ اسفند ماه و اول اردیبهشت ماه) صورت گرفت. خروجی‌های دینامیک مدل (عمق رواناب نسبت به زمان، زمان رسیدن به اوج شدت جریان و اوج شدت جریان رواناب) با داده‌های واقعی مقایسه گردید. برای مقایسه بین خروجی‌های مدل و مقادیر مشاهده‌ای از شاخص کارآیی مدل استفاده شد. این شاخص معیاری است که اختلاف نسبی بین مقادیر مشاهده شده و شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد. محققین مختلف از جمله کوینتون (۱۳) قربانی (۵)، ناش و ساتکلیف (۱۲) برای تحلیل آماری نتایج مدل‌های مورد استفاده، از این شاخص استفاده کردند. کارآیی مدل، به‌صورت زیر بیان می‌شود (۱۳):

$$ME = \frac{[\sum_{i=۱}^{N}(O_i - \overline{O})^۲ - \sum_{i=۱}^{N}(P_i - O_i)^۲]}{[\sum_{i=۱}^{N}(O_i - \overline{O})^۲]} \qquad [۸]$$

که در این رابطه، ME= کارآیی مدل، O_i= مقادیر مشاهده شده، P_i= مقادیر شبیه‌سازی شده و $\overline{O}$ = میانگین مقادیر مشاهده‌ای است. مقدار کارآیی مدل بین یک تا منفی بی‌نهایت تغییر می‌کند. مقدار بهینهٔ این شاخص یک است. اگر میزان آن بیشتر از ۰/۵ باشد، مدل شبیه‌سازی خوبی داشته است و در صورت

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]



شکل ۱. حساسیت کل رواناب به پارامترهای دینامیک مدل

منفی شدن آن بهتر است که به نتایج مدل بسنده نشود و از متوسط مقادیر مشاهده‌ای استفاده شود (۱۳).

نتایج و بحث

حساسیت کل رواناب

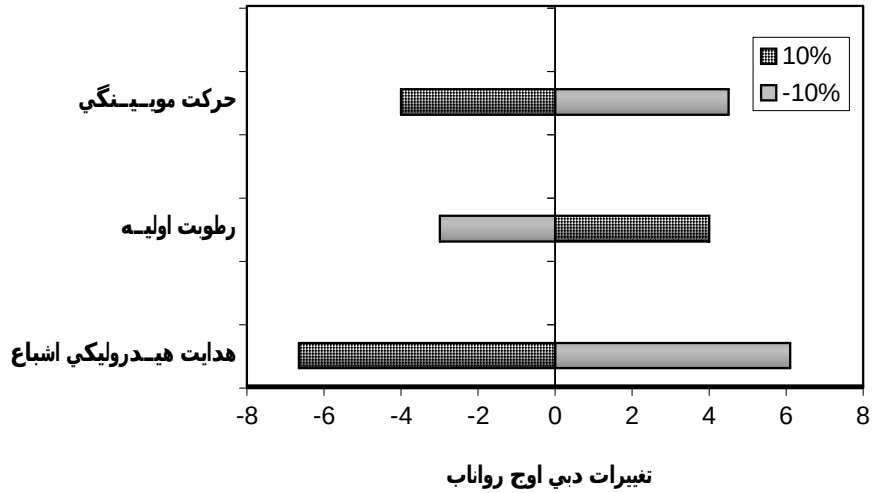
شکل ۱ نتایج درصد تغییرات کل رواناب را نسبت به پارامترهای دینامیک ذکر شده نشان می‌دهد. کل رواناب، بیشترین حساسیت را به هدایت هیدرولیکی اشباع و کمترین حساسیت را به چسبندگی ذرات خاک نشان داد. با افزایش ۱۰ درصدی هدایت هیدرولیکی اشباع، کل رواناب ۱۱ درصد کاهش و با کاهش ۱۰ درصدی این عامل، کل رواناب ۱۴ درصد افزایش نشان داد و نسبت به تغییرات چسبندگی خاک هیچگونه تغییری نشان نداد. کل رواناب بعد از هدایت هیدرولیکی اشباع به‌ترتیب به پارامترهای حرکت مویینگی و رطوبت اولیه خاک حساسیت نشان داد و به پارامترهای جداپذیری ذرات خاک توسط باران و ضریب زبری مانینگ حساسیت کمی را نشان داد. فولی و همکاران (۴) حساسیت مدل یوروسم را در حوزهٔ آبخیز کاتسوپ هلند بررسی کردند. مطالعات آنها نشان داد که با افزایش و کاهش ۱۰ درصدی پارامترهای دینامیک ذکر شده، کل رواناب بیشترین حساسیت را به رطوبت اولیه و کمترین حساسیت را به چسبندگی خاک و جداپذیری ذرات خاک توسط باران نشان داد. با مقایسه نتایج تحقیق فولی و همکاران(۴) با این تحقیق، مشاهده می‌شود که حساسیت مدل یوروسم نسبت به موقعیت و محل مورد آزمایش تغییر می‌کند و لزوم انجام تحلیل حساسیت قبل از مراحل واسنجی و اعتبارسازی مدل تأیید می‌شود.

حساسیت دبی اوج رواناب

حساسیت دبی اوج رواناب به پارامترهای دینامیک ذکر شده در شکل ۲ نشان داده شده است. دبی اوج رواناب بیشترین حساسیت را به‌ترتیب به هدایت هیدرولیکی اشباع، حرکت مویینگی و رطوبت اولیه نشان داد و نسبت به تغییرات چسبندگی خاک، جداپذیری ذرات خاک توسط باران و ضریب زبری مانینگ هیچگونه تغییری نشان نداد. دبی اوج رواناب با افزایش ۱۰ درصدی هدایت هیدرولیکی اشباع و حرکت مویینگی به‌ترتیب ۶/۵ و ۴/۵ درصد کاهش، و با کاهش ۱۰ درصدی این دو پارامتر، به‌ترتیب ۶ و ۴ درصد افزایش یافت. هم‌چنین، با افزایش ۱۰ درصدی رطوبت اولیه ۴ درصد افزایش و با کاهش ۱۰ درصدی آن، ۳ درصد کاهش یافت. نتایج مطالعه فولی و همکاران (۴) نشان داد که بیشترین حساسیت دبی اوج رواناب به ضریب زبری مانینگ و کمترین حساسیت آن به چسبندگی خاک بود. نتایج کلی تحلیل حساسیت مدل یوروسم به‌صورت کیفی در جدول ۱ نشان داده شده است. براساس این جدول، کل رواناب، به هدایت هیدرولیکی اشباع حساس است.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]



شکل ۲. حساسیت دبی اوج رواناب به پارامترهای دینامیک مدل

جدول ۱. طبقه‌بندی حساسیت خروجی‌های مدل یوروسم به پارامترهای دینامیک

پارامتر	کل رواناب	دبی اوج رواناب
هدایت هیدرولیکی اشباع	حساس	نیمه حساس
چسبندگی خاک	غیرحساس	غیرحساس
درصد حجمی رطوبت اولیه	نیمه حساس	نیمه حساس
جداپذیری ذرات خاک توسط باران	حساسیت کم	غیرحساس
حرکت موبینگی	نیمه حساس	نیمه حساس
ضریب زبری مانینگ	حساسیت کم	غیرحساس

قربانی (۵) گزارش کرد که کل رواناب و دبی اوج رواناب به هدایت هیدرولیکی اشباع، نیمه حساس است. دبی اوج رواناب به حرکت موبینگی حساسیت کمی نشان می‌دهد. با مقایسه این دو تحقیق، باز هم دیده می‌شود که حساسیت مدل یوروسم نسبت به موقعیت و محل مورد آزمایش تغییر می‌کند.

واسنجی مدل

خاک محیطی است پویا که خواص آن با زمان و مکان تغییر می‌کند. واسنجی یعنی تعدیل اصولی در میزان پارامترهای ورودی مدل، به نحوی که مدل بهترین برازش را بر داده‌های مشاهده‌ای داشته باشد (۷ و ۱۹). برای واسنجی مدل، دو رخداد ۵ و ۲۵ فروردین ماه ۱۳۸۲ در نظر گرفته شدند. برای واسنجی مدل از نتایج تحلیل حساسیت مدل استفاده شد. نتایج تحلیل حساسیت مدل نشان داد که درصد تغییرات رواناب کل و حداکثر دبی رواناب نسبت به پارامترهای هدایت هیدرولیکی اشباع، حرکت موبینگی و رطوبت اولیه بیش از سایر عوامل می‌باشد. بهترین واسنجی مدل در پیش‌بینی رواناب با کاهش هدایت هیدرولیکی (۱۲ تا ۱۵ درصد)، حرکت موبینگی (۱۰ تا

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]

جدول ۲. نتایج واسنجی مدل یوروسم در پیش‌بینی رواناب رخدادهای ۵ و ۲۵ فروردین ماه

رخداد	کل رواناب (mm)		دبی اوج رواناب (mm/h)		زمان شروع رواناب (min)		زمان رسیدن به اوج رواناب (min)	
	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده
۵ فروردین ماه	۲۱۰۱	۱۹۵۴	۱۸/۱	۱۶/۵۳	۱۱۶	۱۰	۲۸۴	۱۸۰
۲۵ فروردین ماه	۱۲۹۱/۴	۱۱۵۷	۱۳/۰۲	۱۱/۱	۱۷۵	۲۵	۳۶۰	۳۲۶

۱۲ درصد) و افزایش رطوبت اولیه (۱۸ تا ۲۵ درصد) صورت گرفت. جدول ۲ نتایج واسنجی رواناب و پارامترهای مربوط به آن را نشان می‌دهد. نتایج واسنجی نشان می‌دهد که مدل، کل رواناب و دبی اوج رواناب رخدادهای انتخاب شده را به خوبی پیش‌بینی کرده اما در پیش‌بینی زمان شروع رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج رواناب ناموفق بوده است.

اعتبارسازی مدل

اعتبارسازی عبارت است از ارزیابی مدل با عواملی که از طریق واسنجی اصلاح شده‌اند. با عمل اعتبارسازی است که چگونگی شبیه‌سازی رخدادهای آینده به‌وسیله مدل معین می‌شود. اگر مدلی شبیه‌سازی خوبی در مرحله اعتبارسازی داشته باشد، این مدل قادر است رخدادهای آینده را به خوبی شبیه‌سازی نماید (۱۹). جدول ۳ نتایج اعتبارسازی مدل در پیش‌بینی رواناب و پارامترهای مربوط به آن برای رخدادهای ۸ فروردین ماه،اول و ۱۶ اسفند ماه و اول اردیبهشت ماه را نشان می‌دهد. مدل، کل رواناب و دبی اوج رواناب را به خوبی شبیه‌سازی کرد، ولی در شبیه‌سازی زمان شروع رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج رواناب ناموفق بود. این مطلب در منحنی رواناب- زمان (هیدروگراف) همهٔ رخدادها قابل مشاهده بود. شکل ۳، منحنی رواناب- زمان رخداد ۱۶ اسفند ماه را نشان می‌دهد. سطح زیر منحنی شبیه‌سازی شده و منحنی مشاهده‌ای به هم نزدیک است. این موضوع نشان‌دهندهٔ این است که مدل کل رواناب را به خوبی شبیه‌سازی کرده ولی در شبیه‌سازی زمان شروع رواناب و زمان رسیدن به حداکثر دبی رواناب ناموفق بوده است. هم‌چنین اوج رواناب شبیه‌سازی شده از مشاهده‌ای کمتر است. هم‌چنین این شکل نشان می‌دهد که شبیه‌سازی مدل از شدت بارندگی پیروی می‌کند و منحنی شبیه‌سازی شده توسط مدل در شدت‌های بارندگی زیاد بیش از شدت‌های کم، با روند تغییرات بارندگی همراه است. مطالعات فولی و همکاران (۴) نیزدر حوزهٔ کاتسوپ هلند نشان داد که شبیه‌سازی مدل نسبت به مقادیر مشاهده شده از شدت بارندگی پیروی می‌کند. به‌طورکلی، به‌دلیل وجود شخم و شیار در خلاف جهت شیب و عملیات سنگ‌چینی در برخی از واحدهای منطقه مورد مطالعه، مدت زمان قابل توجهی طول کشید که رواناب مناطق بالا دست به آبراهه خروجی زیر حوزه مورد مطالعه برسد. به این دلیل، مدل در شبیه‌سازی زمان شروع رواناب همهٔ رخدادها ناموفق بوده است. ویه و همکاران (۲۰، ۲۱ و ۲۲)، قربانی (۵)، کوینتون و رودریگز (۱۶) و خلیل مقدم (۱) نیز به این نتیجه رسیدند که مدل، زمان شروع رواناب را خوب شبیه‌سازی نمی‌کند.

آنالیز آماری

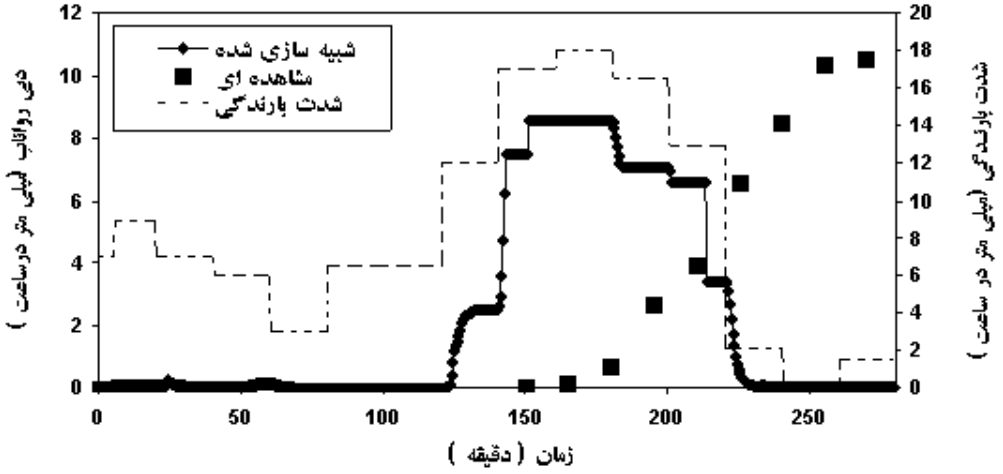
در این تحقیق از شاخص‌های کارآیی مدل جهت تحلیل آماری شبیه‌سازی‌های مدل یوروسم استفاده شد. نتایج کلی تحلیل آماری مدل در جدول ۴ نشان داده شده است. باتوجه به بالا

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی رواناب رخدادهای معتبر شده

رخداد	کل رواناب (mm)		دبی اوج رواناب (mm/h)		زمان شروع رواناب (min)		زمان رسیدن به اوج رواناب (min)	
	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده	مشاهده شده	شبیه‌سازی شده
۸ فروردین ماه	۷۶۵	۷۰۲	۱۱	۹/۵	۱۴۸	۱۰	۳۰۰	۱۵۰
۱۶ اسفند ماه	۷۹۵	۷۶۹	۱۰/۵	۸/۵	۱۵۵	۳۵	۲۸۰	۱۶۵
۱ اردیبهشت ماه	۱۰۱۷/۵	۸۵۸	۱۶/۱	۱۰/۴	۲۳۰	۲۲	۳۸۰	۱۸۹
۱ اسفند ماه	۱۳۲۵	۱۴۳۰	۱۸/۷	۱۰	۲۳۸	۳۰	۴۶۰	۱۹۵



شکل ۳. منحنی رواناب- زمان رخداد ۱۶ اسفند ماه

جدول ۴. نتایج کارآیی مدل در پیش‌بینی رواناب

پارامتر	کارآیی مدل
زمان رسیدن به دبی اوج رواناب	-۳/۵۰
زمان شروع رواناب	-۰/۱۰
دبی اوج رواناب	۰/۶۰
کل رواناب	۰/۹۰

بودن مقدار کارآیی مدل برای کل رواناب و دبی اوج رواناب، مدل در شبیه‌سازی این پارامتر هم موفق عمل کرده است. همان‌طورکه جدول ۴ نشان می‌دهد مقدار شاخص کارآیی مدل در شبیه‌سازی زمان شروع رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج رواناب بسیار کم است. این موضوع نشان‌دهندهٔ این است که مدل زمان شروع رواناب و زمان رسیدن به دبی اوج رواناب را خوب شبیه‌سازی نکرده است.

[Downloaded from jstmar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]

نتیجه‌گیری

۱. حساسیت مدل یوروسم به موقعیت و محل ارزیابی مدل بستگی دارد و لزوم انجام تحلیل حساسیت، قبل از انجام مراحل واسنجی و اعتبارسازی تأیید شد. ۲. کل رواناب، بیشترین حساسیت را به هدایت هیدرولیکی اشباع و کمترین حساسیت را به چسبندگی ذرات خاک نشان داد. دبی اوج رواناب بیشترین حساسیت را به‌ترتیب به هدایت هیدرولیکی اشباع، حرکت مویینگی و رطوبت اولیه نشان داد و نسبت به تغییرات چسبندگی خاک، جداپذیری ذرات خاک توسط باران و ضریب زبری مانینگ هیچگونه تغییری نشان نداد. ۳. نتایج ارزیابی مدل یوروسم در زیر حوزه مورد مطالعه نشان داد که مدل قادر است میزان کل رواناب، و دبی اوج رواناب را به خوبی شبیه‌سازی نماید ولی در شبیه‌سازی زمان شروع رواناب، زمان رسیدن به دبی اوج رواناب موفق نیست. ۴. منحنی رواناب- زمان شبیه‌سازی شده از شدت بارندگی پیروی می‌کند. ۵. بهتر است این مدل در حوزه‌های آبخیز شمال ایران که تعداد رخداد بیشتری قابل ثبت است، مورد ارزیابی قرار گیرد و پیشنهاد می‌شود که با ترکیب این مدل با سیستم اطلاعات جغرافیایی، کارآیی این مدل در حوزه‌های آبخیز بزرگ‌تر مورد بررسی قرار گیرد.

منابع مورد استفاده

۱. خلیل مقدم، ب. ۱۳۸۱. ارزیابی مدل اروپایی محاسبه فرسایش خاک (EUROSEM) در زیر حوزه طبرک از حوزه رودخانه بازفت در حوزه آبخیز کارون شمالی، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد خاک‌شناسی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان.

۲. فرداد، ح. ۱۳۶۹. *آبیاری عمومی*، جلد دوم: انتقال و توزیع آب. انتشارات دانشگاه تهران.

۳. قربانی، ب. ۱۳۸۰. روش‌های کاربردی تعیین نفوذپذیری خاک تحت شرایط آبیاری بارانی، نشریه فنی شماره ۱، دانشگاه شهرکرد.

4. Fully, A., J. N Quinton and R. E. Smith. 1999. Evaluation of the EUROSEM model using data from the Catsop watershed, The Netherlands. Catena 37: 507-519.
5. Ghorbani, B. 1997. A mathmatical model to predict surface runoff under sprinkler irrigation conditions. Ph. D. Thesis, Silsoe College, Cranfield University, Bedford, UK.
6. Morgan, R. P. C. 1980. Field studies of sediment transport by overland flow. J. Earth Surface Proc. and Landforms 5: 307-316.
7. Morgan, R. P. C. 1986. Soil Erosion and Conservation. Longman Group limited, UK.
8. Morgan, R. P. C., K. McIntyre, A. W. Vickers and J. N. Quinton. 1997. A rainfall simulation study of soil erosion on rangeland in Swaziland. J. Soil Technol. 11: 291-299.
9. Morgan, R. P. C., J. N. Quinton, R. E. Smith, G. Govers, J. W. A. Poesen, K. Auerswald, G. Chisci, D. Torri, M. E. Styczen and A. J. W. Folly. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University, UK.
10. Morgan, R. P. C., J. N. Quinton and R. J. Rickson. 1991. EUROSEM: A User Guide. Silsoe College, Cranfield University, UK.
11. Morgan, R. P. C., J. N. Quinton, R. E. Smith and G. Govers. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): A process-based approach for predicting sediment transport from field and small catchments. J. Earth. Surface Proc. and Landforms 23: 527-544.
12. Nash, J. E. and J. V. Sutcliffe. 1970. River flow forecasting through conceptual models. J. Hydrol. 10: 282-290.
13. Quinton, J. 1994. The validation of physically based erosion models. PhD. Thesis, Silsoe College, Cranfield University.
14. Quinton, J. 1994. The validation of physically - based erosion model particular reference to EUROSEM. *In:* Rickson, R. (Ed.), Conserving Soil Resources: European Perspective. CAB Intl. Wallingford.
15. Quinton, J. N 1997. Reducing predictive uncertainty in model simulations: a comparison of two methods using the European Soil Erosion Model (EUROSEM). Catena 30: 101-117.
16. Quinton, J. and F. Roodriguez. 1999. Modeling the impact of live barriers on soil erosion in the Pairumani sub-catchment, Bolivia. J. Mountain Res. and Develop. 19: 292-299.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]

17. Quinton, J., R. E. Smith and A. Fully. 1999. EUROSEM: A dynamic approach to erosion simulation. PP. 41-52. *In:* W. Mitteilungen. (Ed.), Experiences with erosion models. Vienna, Austria.
18. Smith, R. E., D. C. Goodrich and J. N. Quinton. 1995. Dynamic, distributed simulation of watershed erosion: The KINEROS2 and EUROSEM models. J. Soil and Water Conserv. 50: 517-520.
19. Toy, T. J., G. R. Foster and K. G. Renard. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement and control. John Wiley and Sons Pub., N Y.
20. Veihe, A. and J. Quinton. 2000. Sensitivity analysis of EUROSEM using Monte Carlo simulation I: Hydrological, soil and vegetation parameters. J. Hydrol. Proc. 14: 915-926.
21. Veihe, A., J. Quinton and J. Poesen. 2000. Sensitivity analysis of EUROSEM using Monte Carlo simulation II: the effect of rills and rock fragments. J. Hydrol. Proc. 14: 927-939.
22. Veihe, A., J. Rey, J. N. Quinton, P. Strauss, F. M. Sancho and M. Somarriba. 2001. Modelling of event-based soil erosion in CostaRica, Nicaragua and Mexico: Evaluation of the EUROSEM model. J. Catena 44: 187-203.
23. Woolhiser, D. A., R. E. Smith and D. C. Goodrich. 1990. KINEROS: A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. USDA Agricultural Research Service, ARS-71.
24. Zegelin, S. J. and I. White. 1982. Design for a field sprinkler infiltrometer. Soil Sci. Soc. Amer. J. 46: 1129-1133.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-30]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1391.16.62.5.4]