ارزیابی کارایی مدل WetSpa در شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب معلق در آبخیز طالقان

شهین مرادی‌پور[۱*]، حسین زینی‌وند[۲]، عبدالرضا بهره‌مند[۱] و علی نجفی‌نژاد[۱]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۷/۱۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۷/۲۳)

چکیده

ارزیابی رفتار هیدرولوژی و بررسی فرسایش‌خاک به‌عنوان یک بحران زیست‌محیطی، به منظور حفظ امنیت اکولوژیکی حوزه آبخیز در سطح مطلوب، ضرورت دارد. در این تحقیق سعی بر این است که با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی- مکانی WetSpa، رسوب‌گراف آبخیز طالقان را شبیه‌سازی نموده و از این طریق میزان کارایی مدل جهت پیش‌بینی فرسایش و رسوب مشخص گردد. نقشه‌های رقومی پایه و سری‌های زمانی پیوسته در گام زمانی روزانه ورودی‌های اصلی مدل می‌باشند. واسنجی پارامترهای مدل برای ۵ سال ابتدای دوره آماری و اعتبارسنجی مدل برای دوره ۴ ساله بعدی و با لحاظ کردن دوره سه ماهه آماده‌سازی (گرم شدن) مدل در آغاز هر دوره انجام شد. نتایج ارزیابی مدل، صحت شبیه‌سازی دبی جریان را براساس معیار نش- ساتکلیف ۸۲/۷ درصد در دوره واسنجی و ۷۹ درصد در دوره اعتبارسنجی نشان می‌دهد. در ادامه به‌منظور شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب، واسنجی بخش (ماژول) فرسایش و رسوب صورت گرفت. نتایج، معیار نش- ساتکلیف ۶۰ و ۶۴ درصد را به‌ترتیب برای غلظت و انتقال رسوب معلق نشان داد. نتایج ارزیابی مدل WetSpa در آبخیز طالقان، نشان می‌دهد مدل مؤلفه‌های هیدرولوژیک از جمله رواناب و هم‌چنین کنش خاک توسط قطرات باران و جریان‌سطحی، هدررفت خاک و غیره را در مکان و زمان با دقت قابل‌قبول برآورد می-کند.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی، مدل هیدرولوژیکی- توزیعی، WetSpa، فرسایش و انتقال رسوب، آبخیز طالقان

۱. گروه آبخیزداری دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۲. گروه مرتع و آبخیزداری دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان
* : مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: shahin_moradipour@yahoo.com

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]

مقدمه

فرسایش و تولید رسوب، تابع عوامل پیچیده‌ای است که با هدررفت بخش حاصل‌خیز خاک، کاهش کیفیت آب‌های سطحی و انتقال موادمغذی و رسوب در دریاچه‌ها، مصب و سواحل رودخانه منجر به کاهش باروری خاک و در نهایت مشکلات اقتصادی می‌شود (۱۵). کمی کردن فرسایش خاک، یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های اساسی در مدیریت و حفاظت خاک و طبعا مطالعات منابع طبیعی و طرح‌های محیط‌زیست می‌باشد (۱). مدل‌های فرسایش در برنامه‌ریزی حفاظت و فرسایش خاک و طراحی پروژه، ابزار پیش‌بینی قلمداد شده و فرآیندهای فرسایش، زمان و میزان فرسایش محتمل در نواحی مستعد را برآورد می‌کنند(۵، ۱۸). ونگ و همکاران در سال ۱۹۹۷ برای اولین بار مدل توزیعی WetSpa را برای پیش‌بینی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر در حوزه آبخیز توسعه دادند. مدل در آبخیز ترکلپ- مولنبیک در بلژیک مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل قابلیت خوبی در پیش‌بینی رواناب دارد و ترکیب مدل‌سازی رواناب سطحی و آب زیرزمینی، شبیه سازی واقعی‌تری از آب پایه را ارائه می‌دهد (۱۷). لیو و همکاران مدل توزیعی WetSpa را در حوزه آبخیز مارگسانی اسلواکی برای شبیه‌سازی رواناب و انتقال فسفر توسعه دادند (۱۰). آنها توسط آمار روزانه سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰، هیدروگراف سیلاب و تجمع فسفر در خروجی حوزه را محاسبه نمودند و پیشنهاد دادند که تلاش‌های بیشتری باید در زمینه چرخه فسفر و عکس‌العمل بیوشیمیایی آن صورت گیرد. بهره‌مند و همکاران در حوزه آبخیز توریسا در اسلواکی با استفاده از اتوکالیبراسیون، پارامترهای مدل WetSpa را تخمین و سپس آنالیز حساسیت و آنالیز پیش‌بینی انجام دادند. نتایج نشان داد که ضریب اصلاحی تبخیر بیشترین حساسیت را دارد و عدم‌قطعیت پارامترها و آنالیز پیش‌بینی بینش مناسبی از مجموعه پارامترها و بازه‌های آنها به ما داده و عدم‌قطعیت پارامترهای مدل منجر به سطح معنی‌داری از عدم قطعیت پیش‌بینی نمی‌شود (۴). زینی‌وند و زینی‌وند و دسمت با توسعه مدل WetSpa، به شبیه‌سازی توزیع مکانی فرسایش و رسوب در مقیاس حوزه پرداخته و با استفاده از بخش (ماژول) فرسایش خاک و معادلات فیزیکی مربوط به اثرات قطرات باران برروی خاک و نیروی برشی رواناب، فرسایش خاک حوزه هورناد اسلواکی را شبیه‌سازی نمودند. نتایج مقایسه دبی و غلظت رسوب شبیه‌سازی شده با مقادیر اندازه‌گیری شده در خروجی این حوزه‌ها در دوره های آماری مختلف، نشان داد که مدل توانایی شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب را با دقت مناسب دارد (۱۸، ۱۹). هدش در حوزه رودخانه جیبا واقع در اتیوپی شمالی با اقلیم نیمه‌خشک مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیک را با استفاده از مدل WetSpa انجام داد. به‌منظور شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب حوزه با استفاده از بخش فرسایش و رسوب مدل، داده‌های مشاهداتی روزانه غلظت رسوب معلق مربوط به دو فصل تابستان در سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷ واسنجی و اعتبارسنجی شد. مقایسه‌های آماری و گرافیکی داده‌ها در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی، تطابق معقول مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها را نشان می‌دهد. استفاده از یک مدل کوچک‌مقیاس و پیش‌بینی مدل WetSpa در دوره آماری ۱۹۶۱ تا ۲۰۱۰ نیز نشان داد که گرم‌تر شدن تدریجی دمای هوا و کاهش میزان بارش در آینده منجر به تغییرات چشمگیری در جریان رودخانه و سایر پارامترهای هیدرولوژیک حوزه و تنش‌های آبی بیشتر خواهد شد (۶). صفری و دسمت در حوزه آبخیز میسوری ایالات متحده آمریکا مدل کالیبره شده WetSpa را در یک حوزه بزرگ برای کاربرد در زیرحوزه‌های کوچک‌تر فاقد آمار به‌کار بردند و متوجه شدند که بسته به نوع زیرحوزه ممکن است جواب‌های مختلفی ارائه شود و هم‌چنین برای ارزیابی مدل می‌توان از یک معیار تجمعی (Aggregated Measure) که جنبه‌های مختلف هیدروگراف شبیه‌سازی شده مانند شکل، ابعاد و حجم را اندازه‌گیری می‌کند، استفاده نمود (۱۶). مرادی‌پور و همکاران به شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آبی در حوزه آبخیز طالقان با استفاده از مدل هیدرولوژیک توزیعی WetSpa پرداختند. نتایج نشان داد که با

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]

توجه به معیارهای آماری از جمله معیار نش- ساتکلیف و معیار تجمعی به ترتیب برابر با ۸۳/۵ و ۸۵/۶ درصد، مدل قابلیت خیلی خوبی در شبیه‌سازی مؤلفه‌های بیلان آبی داراست (۱۲).

با توجه به اهمیت موقعیت آبخیز طالقان (در بالادست سد طالقان و سد سفیدرود) و هم‌چنین لزوم بررسی فرآیند فرسایش و رسوب و استفاده از رویکردهای با پاسخ نزدیک‌تر به واقعیت آبخیز، در این تحقیق سعی بر این است که با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی- مکانی WetSpa، رسوب‌گراف آبخیز طالقان (بخش سراب و میانی) را شبیه‌سازی نموده تا از این طریق میزان کارایی مدل جهت پیش‌بینی فرسایش و رسوب مورد ارزیابی قرار گرفته و روشی برای برآورد مقدار کمی فرسایش و رسوب تولید شده ارائه شود.

مواد و روش ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

آبخیز طالقان یکی از مهم‌ترین زیرحوزه‌های آبخیز سفیدرود به‌شمار می‌رود که در دامنه جنوبی رشته کوه‌های البرز در استان البرز واقع شده است. منطقه مورد مطالعه قسمتی از آبخیز طالقان با مساحت ۸۰۹ کیلومترمربع است که بخش سراب و میانی حوزه را در برگرفته و بین عرض‌های شمالی ″۴۸ ′۲۰ °۳۶ و ″۲۳ ′۵ °۳۶ و طول‌های شرقی ″۳۵ ′۳۹ °۵۰ و ″۷ ′۱۱ °۵۱ واقع شده است حوزه کوهستانی طالقان با ۵۹۱ میلی‌متر متوسط بارندگی در سال و ۱۱/۶ درجه سانتی‌گراد متوسط دمای سالانه، دارای شیب متوسط ۴۰/۵ ٪ می‌باشد (۲). شکل ۱ موقعیت و محدوده آبخیز طالقان را در ایران و استان البرز نشان می‌دهد.

تئوری و ساختار مدل

مدل پیوسته و توزیعی- مکانی WetSpa، مدلی جهت پیش‌بینی سیلاب و شبیه‌سازی بیلان‌آبی(۱۷) و فرسایش خاک در مقیاس حوزه آبخیز است که قابلیت پیش‌بینی هیدروگراف سیل و رسوب‌گراف در نقطه خروجی و یا هر نقطه در یک آبخیز با گام‌های زمانی متفاوت دقیقه‌ای، ساعتی، روزانه و غیره را داراست (۲ و ۱۸). برای دریافت اطلاعات و جزئیات بیشتر در زمینه تئوری مدل به راهنمای کاربر مدل مراجعه شود(۸). شکل ۲ ساختار مدل WetSpa در مقیاس سلولی را نشان می‌دهد. به‌منظور شبیه‌سازی فرسایش، انتقال رسوب و رسوب‌گذاری، بخش (ماژول) فیزیکی، توزیعی- مکانی توسط زینی‌وند به‌ساختار مدل توزیعی WetSpa اضافه گردید.

بخش فرسایش و رسوب، شبیه‌سازی دینامیکی و توزیعی فرآیندهای فرسایش را با شبیه‌سازی کنش ذرات خاک توسط قطرات باران و جریان سطحی انجام می‌دهد. بخش (ماژول) فرآیندهای بارش، تبخیر و تعرق پتانسیل، برگاب، چکاب (تروفال)، بارش مستقیم، زهکش‌برگ، ساقاب، ذخیره چالابی، نفوذ، رواناب سطحی، فرسایش ناشی از قطرات باران و جریان رواناب سطحی را شامل می‌شود.

رواناب سطحی

در مدل WetSpa، یک روش اصلاحی مبتنی بر رطوبت خاک برای برآورد فرآیند رواناب سطحی ارائه شده که در آن، عوامل توپوگرافی، پوشش زمین، رطوبت خاک و شدت بارش را در ایجاد رواناب مؤثر برشمرده است(۸) :

$$PE_i(t) = C_i(P_i(t) - I_i(t) + M_i)(\frac{\theta_i(t)}{\theta_{s_i}})^{\alpha} \quad [۱]$$

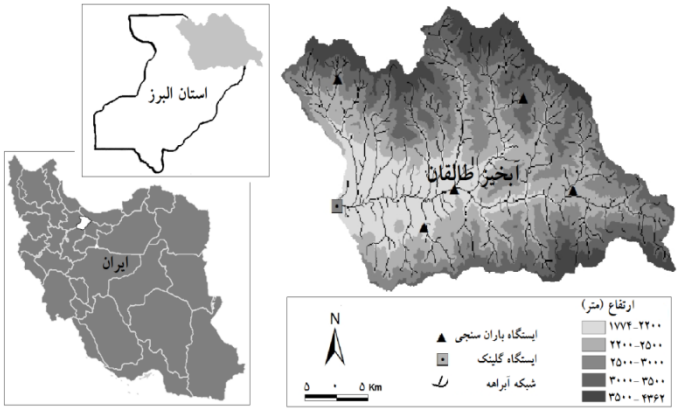
$PE_i(t)$ رواناب سطحی در سلول i (میلی‌متر)، $P_i(t)$ بارش در سلول i (میلی‌متر)، $I_i(t)$ هدررفت برگاب (میلی‌متر)، $\theta_i(t)$ محتوای رطوبت خاک در سلول i و زمان t (مترمکعب در مترمکعب)، θ_{si} خلل و فرج خاک در سلول i (مترمکعب در مترمکعب)، M_i مقدار ذوب برف (میلی‌متر)، α ضریب متغیر با شدت بارش و C_i ضریب رواناب پتانسیل سلول i که در شرایط رطوبت اشباع تقریبا ثابت است.

کنش خاک توسط قطرات باران

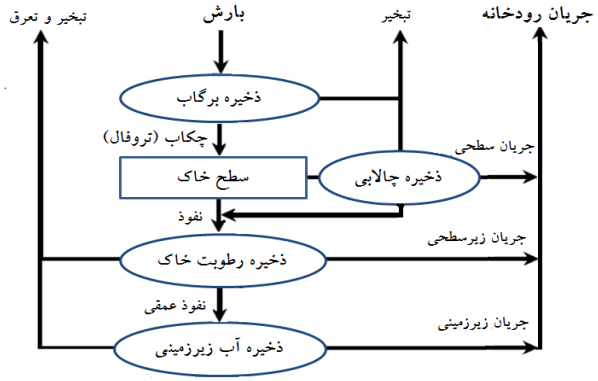
مدل WetSpa، کنده شدن ذرات خاک ناشی از قطرات باران شامل بارش مستقیم و زهکش‌برگ (Leaf Drainage) که بخشی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]



شکل ۱. موقعیت آبخیز طالقان در ایران و استان البرز



شکل ۲. ساختار مدل WetSpa در مقیاس سلولی

از بارش است که پس از برخورد با برگ‌ها به سطح زمین می‌رسد را با توجه به انرژی جنبشی باران شبیه‌سازی می‌کند. به این ترتیب امکان شبیه‌سازی اثرات اختلاف در ارتفاع، تاج پوشش و لاشبرگ گیاهان را فراهم می‌سازد. مقدار انرژی جنبشی باران که به سطح زمین می‌رسد به صورت زیر محاسبه می‌شود (۷، ۱۳):

$$KE_r = Max(۸.۹۵ + ۸.۴۴ \log I_r, ۰)(۱ - \lambda_c) p_r \quad [۲]$$

$$KE_l = Max(۱۵.۸\sqrt{H_c} - ۵.۸۷, ۰)\lambda_c LD \quad [۳]$$

در معادله (۲) KE_r انرژی جنبشی بارش مستقیم که به‌سطح خاک برخورد کرده (ژول در مترمربع در ثانیه)، I_r شدت بارش (میلی‌متر در ساعت)، P_r مقدار بارش (میلی‌متر)، λ_c بخشی از سطح زمین پوشیده شده توسط تاج پوشش (بدون واحد) و در معادله (۳) KE_l انرژی جنبشی زهکش برگ از تاج پوشش (ژول در مترمربع در ثانیه)، H_c ارتفاع تاج گیاه (متر) و LD زهکش‌برگ (میلی‌متر) می‌باشد. با تلفیق فرآیندهای مذکور، معادلات محاسبه کنش ذرات خاک به وسیله قطرات باران به صورت زیر آمده است (۷، ۱۳):

$$DR = k(KE_r + KE_l)\exp(-Z_s h) \quad [۴]$$

که در آن DR فرسایش قطره بارانی (گرم در مترمربع در ثانیه)، k شاخص فرسایش‌پذیری خاک (گرم در ژول) که مقادیر آن به صورت تجربی به‌دست می آید، Z_s پارامتر وابسته به بافت خاک که مقدار آن بین ۳/۱ –۰/۹ (عکس میلی‌متر) متغیر بوده و مقدار

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]

متوسط برابر با ۲ (عکس میلی‌متر) برای دامنه وسیعی از شرایط (از جمله در این منطقه) درنظر گرفته می شود و h عمق متوسط لایه آب سطحی (میلی‌متر) می‌باشد (۱۸).

کنش خاک توسط جریان سطحی

جریان رواناب سطحی به‌واسطه تنش برشی به‌عنوان عامل شکست پیوستگی بین ذرات، موجب کنده شدن و فرسایش خاک می‌شود. جریان رواناب سطحی شامل جریان کم‌عمق در یک سطح وسیع (جریان ورقه‌ای) و جریان متمرکز در کانال‌های فرسایش‌یافته کوچک (شیارها) می‌باشد. فرسایش خاک توسط عامل جریان رواناب سطحی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود(۳):

$$DF = K_f \max\left[0, \frac{\tau}{\tau_c} - 1\right] \qquad [۵]$$

که در آن DF فرسایش خاک توسط جریان رواناب سطحی (گرم در مترمربع در ثانیه)، K_f فرسایندگی جریان رواناب سطحی (گرم در مترمربع در ثانیه)، τ تنش‌برشی (نیوتن در مترمربع) و τ_c تنش‌برشی بحرانی (نیوتن در مترمربع) که بر اساس دیاگرام شیلدز اصلاح شده محاسبه می‌شود (۱۱) می‌باشد. نرخ بار رسوب در یک مکان مشخص در حوزه L(x,t) بر حسب گرم در مترمربع در ثانیه از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$L(x,t) = DF(x,t) + DR_r(x,t) \qquad [۶]$$

معادله انتقال رسوب و ته‌نشست رسوب

انتقال رسوب در یک آبراهه معمولاً با استفاده از معادله موج سینماتیک و سینماتیک مرتبه اول برآورد می‌شود. معادله دیفرانسیل جزیی برای انتقال مواد در آب در طول مسیر جریان یک بعدی به‌صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D(x)\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V(x)\frac{\partial C}{\partial x} - \lambda(x)C \qquad [۷]$$

که در آن C غلظت رسوب معلق (گرم در مترمکعب)، x مسافت طی شده در مسیر جریان (متر)، D(x) ضریب انتشار طولی (مترمربع در ثانیه)، V(t) سرعت انتقال (متر در ثانیه) و $\lambda(x)$ ضریب ته‌نشست (عکس ثانیه) می‌باشد. این رابطه در واقع سه فرآیند انتقال، انتشار و ته‌نشست مؤثر در وضعیت و حمل مواد معلق در آبراهه را با هم تلفیق کرده است. جهت سهولت تجزیه و تحلیل، با ضرب معادله دیفرانسیل جزیی انتقال مواد در آب در دبی جریان، متغیر وابسته غلظت رسوب به نرخ رسوب انتقال یافته یا همان تولید رسوب تبدیل می‌شود (۹).

$$\frac{\partial q_c}{\partial t} = D(x)\frac{\partial^2 q_c}{\partial x^2} - V(x)\frac{\partial q_c}{\partial x} - \lambda(x)q_c \qquad [۸]$$

q_c نرخ رسوب انتقال‌یافته (گرم در ثانیه) و حاصل‌ضرب غلظت در دبی جریان آب می‌باشد. مقدار کل انتقال رسوب در خروجی حوزه با انتگرال پیچشی کل پاسخ‌های شبکه سلولی محاسبه می‌شود:

$$Q_{sh}(t) = \int_A \int_0^t L(x,t')U(x,t-t')dt'dA \qquad [۹]$$

که در آن $Q_{sh}(t)$ نرخ انتقال رسوب خروجی (گرم در ثانیه)، $L(X,t')$ نرخ بار رسوب در یک مکان مشخص در حوزه (گرم در مترمربع در ثانیه)، t' زمان تأخیر (ثانیه)، U تابع پاسخ واحد مسیر جریان (عکس ثانیه) و A مساحت حوزه آبخیز (مترمربع) می‌باشد(۸، ۱۸).

ورودی مدل

نقشه‌های رقومی مدل ارتفاع رقومی، بافت‌خاک و کاربری اراضی حوزه و سری‌های زمانی بارش، تبخیر و دما (در صورتی که بارش به‌صورت برف باشد) ورودی‌های اصلی مدل هیدرولوژیکی WetSpa می‌باشند.کاربری اراضی غالب حوزه به مرتع، ۸۸/۵٪ و بافت خاک غالب به بافت شنی‌لوم، ۵۰/۱٪ اختصاص دارد. سری‌های زمانی ورودی مدل دارای گام زمانی روزانه و به‌صورت پیوسته و همزمان مربوط به دوره آماری ۱۳۸۱-۱۳۷۳ می‌باشند. داده دبی و غلظت رسوب معلق به‌صورت انتخابی برای واسنجی مدل مورد نیاز می‌باشد.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]

واسنجی پارامترهای مدل برای ۵ سال ابتدای دوره آماری و اعتبارسنجی مدل برای دوره ۴ ساله انتهای دوره آماری انجام می‌شود. برای شبیه‌سازی فرسایش و رسوب، دوره آماری ۱۳۷۶-۱۳۷۳ با دارا بودن ۱۱۱ نمونه رسوب اندازه‌گیری شده انتخاب شد.

واسنجی و اعتبارسنجی مدل

پس از تهیه داده‌های ورودی و استخراج و پردازش پارامترهای توزیعی مکانی مورد نیاز مدل از سه نقشه ورودی اشاره شده، در محیط *GIS* (۴، ۸، ۹ و ۱۸) و اجرای مدل توسط کاربر، واسنجی پارامترهای مدل به دو روش دستی و اتوکالیبراسیون، ابتدا برای دبی و سپس برای شبیه‌سازی رسوب انجام شد. به‌عبارتی دیگر واسنجی دبی جریان پیش‌نیاز واسنجی غلظت رسوب می‌باشد. در جدول ۱ پارامترهای عمومی مدل WetSpa و بخش فرسایش و انتقال رسوب آمده است.

ارزیابی مدل در شبیه‌سازی دبی جریان و رسوب

برای تعیین کارآیی مدل و ارزیابی کیفی و کمی نتایج شبیه‌سازی و پیش‌بینی‌های آن (جریان رودخانه و رسوب‌گراف‌های حاصل) از دو روش گرافیکی و آماری استفاده می‌گردد. در روش گرافیکی، هیدروگراف و رسوب‌گراف‌های شبیه‌سازی‌شده با هیدروگراف و رسوب‌گراف‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار می‌گیرد و در روش آماری نیز با استفاده از معیارهای آماری از جمله انحراف‌مدل، قابلیت اعتماد مدل، معیار نش- ساتکلیف و غیره مقادیر دبی رودخانه، غلظت و بار رسوبی شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهداتی آنها مورد مقایسه و ارزیابی قرار می‌گیرند.

نتایج و بحث

با استفاده از نقشه‌های توزیعی- مکانی پارامترهای هیدرولوژیک و سری‌های زمانی دوره آماری پنج‌ساله ۱۳۷۷-۱۳۷۳ مربوط به نه ایستگاه بارندگی و سه ایستگاه هواشناسی، مدل اجرا و سپس واسنجی شد. دوره چهارساله ۱۳۸۱-۱۳۷۸ برای اعتبارسنجی مدل انتخاب شد. طبق نتایج آزمون، داده‌های بارش و دبی مشاهداتی غیرنرمال و ناهمگن می‌باشد. به‌منظور پیش‌بینی بهتر پارامترهای رطوبت اولیه و ذخیره آب زیرزمینی، سه ماه اول هر دوره به‌عنوان دوره آماده‌سازی (گرم شدن) مدل درنظر گرفته شد. جهت واسنجی مدل از دو روش آزمون و خطا (دستی) و خودکار (با استفاده از PEST) استفاده شد.

نتایج مقایسه‌های گرافیکی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده جریان در دوره واسنجی در شکل ۳ آورده شده است. نتایج مقایسه‌های گرافیکی رسوب‌گراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۴ آمده است. نمودار پراکنش غلظت رسوب معلق در سطح اطمینان ۹۵ درصد و مقایسه گرافیکی ۱۱۱ نمونه انتقال رسوب معلق مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی در شکل ۵ آورده شده است.

دوره آماری ۱۳۸۰-۱۳۷۸ با وجود ۱۵ نمونه رسوب اندازه‌گیری شده به عنوان دوره اعتبارسنجی انتخاب شد. نتایج مقایسه‌های گرافیکی هیدروگراف جریان و پلات پراکنش غلظت رسوب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی دوره اعتبارسنجی در شکل ٦ و رسوب‌گراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در شکل ۷ آورده شده است.

براساس معیار نش- ساتکلیف کارایی مدل در برآورد دبی جریان در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی به‌ترتیب ۸۲/۷ درصد و ۷۹ درصد می‌باشد. با توجه به معیار تجمعی (۸۲/۴ درصد و ۸۵/۵ درصد) سطح عملکرد مدل در شبیه‌سازی دبی جریان در طبقه خیلی خوب قرار می‌گیرد. در جدول ۲ نتایج ارزیابی مدل در شبیه-سازی فرسایش و انتقال رسوب در آبخیز طالقان آمده است.

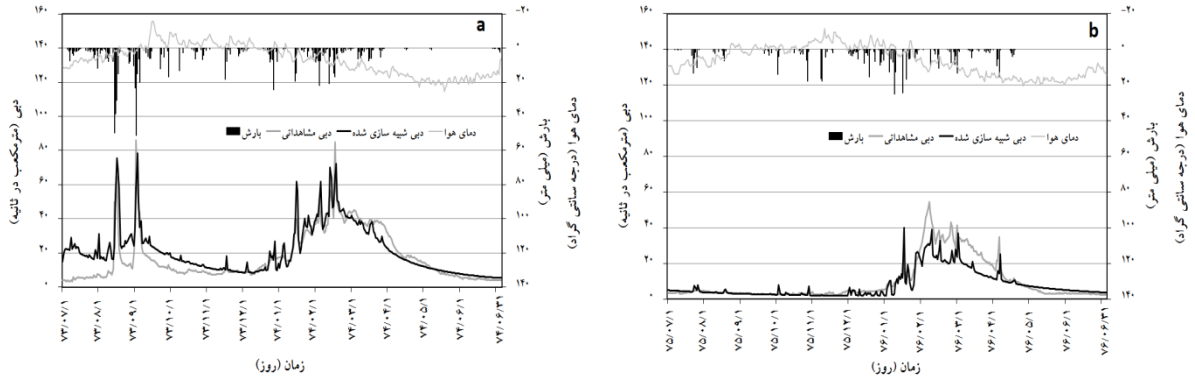
در جدول ۳ نتایج شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب در حوزه مورد مطالعه آورده شده است. از آنجایی که بیشترین بارش در طول دوره شبیه‌سازی، در تاریخ ۱۳۷۳/۹/۲ رخ داده و میزان غلظت رسوب معلق یک روز بعد (۱۳۷۳/۹/۳) اندازه‌گیری شده است میزان هدررفت خالص خاک، کنده شدن خاک توسط قطرات باران و رواناب سطحی در این روز با بیشترین مقدار انتقال رسوب اندازه‌گیری شده به صورت نقشه (شکل ۸) آمده است.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

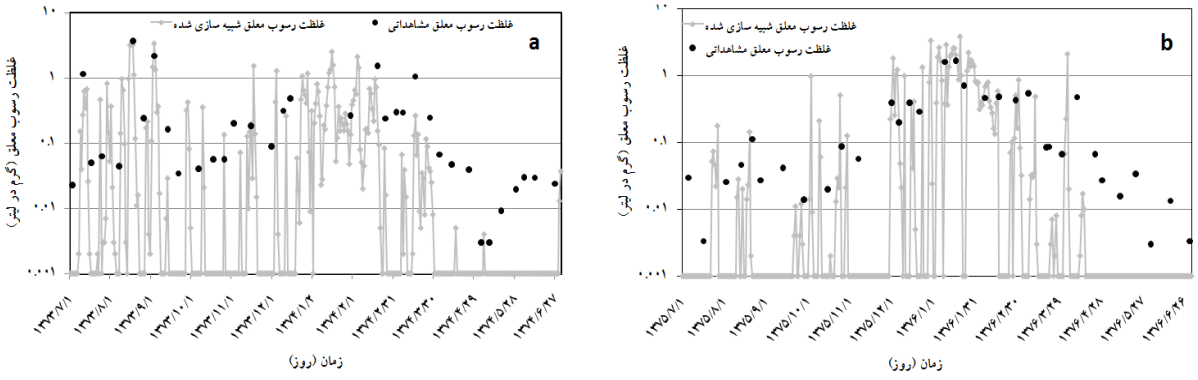
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]

جدول ۱. پارامترهای عمومی مدل WetSpa و بخش فرسایش و انتقال رسوب (۸)

ردیف	پارامترهای عمومی مدل	علامت اختصاری	واحد
۱	فاکتور بی‌بعد جریان زیر سطحی	Ki	–
۲	ضریب افت آب‌های زیرزمینی	Kg	d^{-1}
۳	مقدار رطوبت نسبی اولیه	K_ss	mm
۴	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل	K_ep	-
۵	ذخیره فعال آب زیرزمینی	G0	mm
٦	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی	G_max	mm
۷	دمای آستانه ذوب	T0	^oC
۸	ضریب دما درجه- روز	K_snow	$mm\,^oC^{-1}d^{-1}$
۹	ضریب باران درجه- روز	K_rain	$^oC^{-1}d^{-1}$
۱۰	مؤلفه رواناب سطحی برای شدت بارندگی نزدیک صفر	K_run	-
۱۱	شدت بارندگی متناظر با توان رواناب سطحی	P_max	mmd^{-1}
۱۲	شاخص فرسایش‌پذیری خاک (در اثر قطرات باران)	K_det	gJ^{-1}
۱۳	فرسایندگی جریان رواناب‌سطحی	K_f	$gm^{-2}s^{-1}$



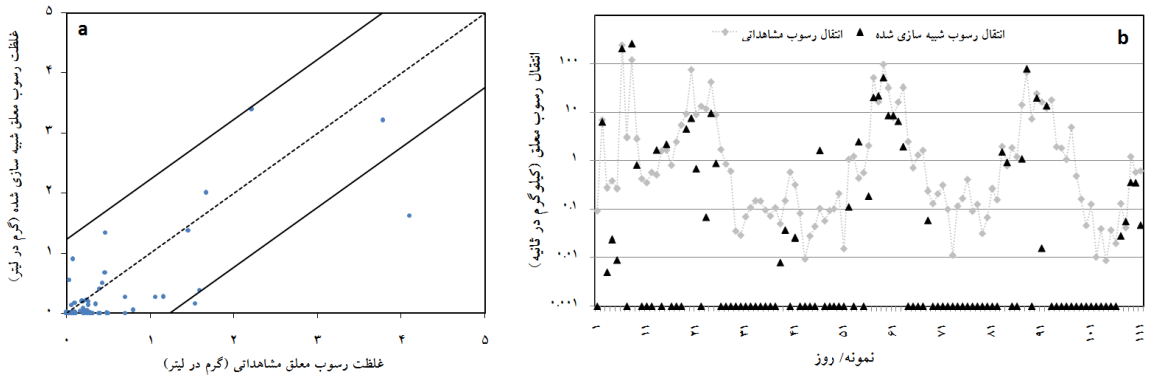
شکل ۳. مقایسه گرافیکی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ۱۳۷۴-۱۳۷۳ (a) و ۱۳۷۶-۱۳۷۵ (b) در دوره واسنجی



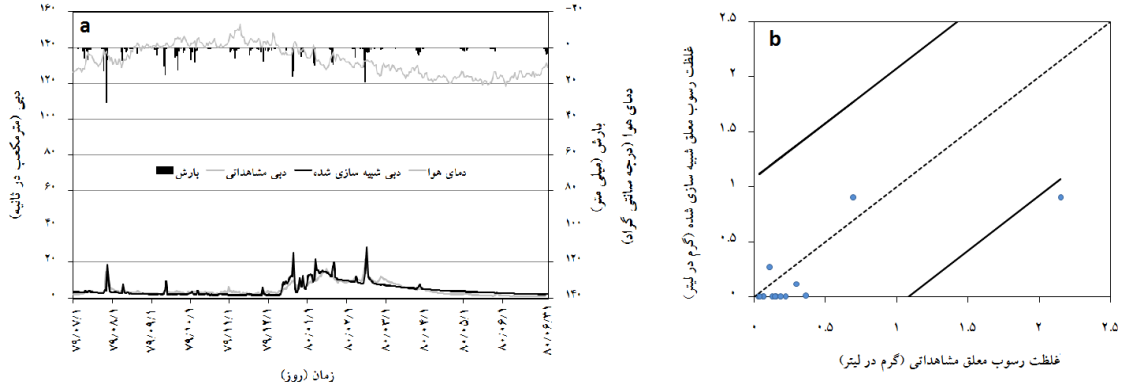
شکل ۴. مقایسه گرافیکی غلظت رسوب معلق مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ۱۳۷۴-۱۳۷۳ (a) و ۱۳۷۶-۱۳۷۵ (b) در دوره واسنجی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

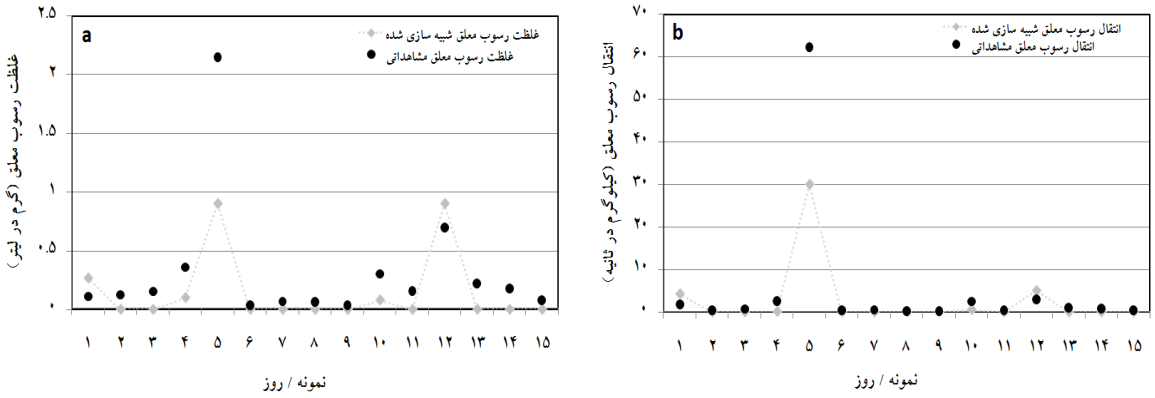
[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]



شکل ۵. نمودار پراکنش غلظت رسوب معلق مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی (۱۳۷۶-۱۳۷۳) در سطح اطمینان ۹۵ درصد (a) و مقایسه گرافیکی ۱۱۱ نمونه انتقال رسوب معلق مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره واسنجی(b)



شکل ۶. مقایسه گرافیکی دبی مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ۱۳۸۰-۱۳۷۹ در دوره اعتبارسنجی (a) و پلات پراکنش غلظت رسوب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی ۱۳۸۰-۱۳۷۸ در سطح اطمینان ۹۵ درصد (b)



شکل ۷. مقایسه گرافیکی غلظت (a) و انتقال رسوب معلق (b) مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در دوره اعتبارسنجی

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]

جدول ۲. نتایج ارزیابی مدل در شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب در آبخیز طالقان

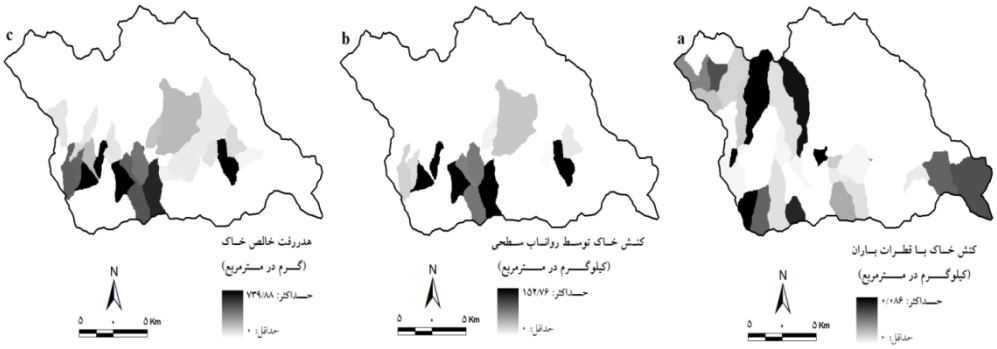
مؤلفه / معیار (٪)	غلظت رسوب معلق		انتقال رسوب معلق	
	واسنجی	اعتبارسنجی	واسنجی	اعتبارسنجی
انحراف مدل	-۴۱/۵	-۵۳/۲	-۲۶	-۵۲/۴
قابلیت اعتماد مدل	۷۵/۷	۴۵/۸	۱۲۶	۲۵/۷
معیار نش- ساتکلیف	۶۰	۵۲/۴	۶۴/۲	۶۹

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی فرسایش و انتقال رسوب در دوره واسنجی (۱۳۷۶-۱۳۷۳)

مؤلفه (واحد)		۱۱۱ نمونه رسوب	
		مشاهداتی	شبیه‌سازی شده
کنش‌خاک (تن در سال)	قطرات باران	-	۵۱۲۷
	رواناب سطحی	-	۶۲۰۴۲۱/۸
انتقال رسوب (تن در سال)		۲۹۴۵۸۰/۶	۲۲۴۸۳۲/۲
فرسایش ویژه (تن در هکتار در سال)		-	۷/۷
رسوب ویژه (تن در هکتار در سال)		۳/۶	۲/۸

جدول ۴. دبی جریان، غلظت رسوب معلق و انتقال رسوب مشاهداتی و شبیه سازی شده در تاریخ ۱۳۷۳/۹/۳

مؤلفه / تاریخ	دبی (مترمکعب در ثانیه)		غلظت رسوب معلق (گرم در لیتر)		انتقال رسوب (کیلوگرم در ثانیه)	
	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده
۱۳۷۳/۹/۳	۵۵/۸	۷۹/۲	۲/۲	۳/۴	۱۲۳/۵	۲۷۱/۲



شکل ۸. نقشه توزیعی مکانی کنش خاک توسط قطرات باران (a)، کنش خاک توسط جریان سطحی (b) و هدررفت خالص خاک (c) در تاریخ ۱۳۷۳/۹/۳

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]

. جدول ۴ دبی جریان، غلظت رسوب معلق و انتقال رسوب شبیه‌سازی شده و مشاهداتی مربوط به تاریخ ۱۳۷۳/۹/۳ را نشان می‌دهد.

بیشترین مقدار هدررفت خاک در این تاریخ در دو زیرحوزه با بافت خاک رسی و رسی‌لوم و رسی و سیلتی‌لوم، با کاربری اراضی غالبا اراضی کشاورزی دیم و آبی در اطراف رودخانه طالقان‌رود و نزدیک به خروجی حوزه رخ داده است.

نتیجه‌گیری

با توجه به هیدروگراف حاصل از اجرای اولیه، در خصوص آب پایه با برقرار کردن بالانس آب با استفاده از کالیبره کردن پارامترها به‌خصوص پارامترهای K_{ep} (کنترل‌کننده تبخیر و تعرق) و G_0 (ذخیره فعال آب‌های زیرزمینی) در بهبود شبیه‌سازی مقادیر پایین هیدروگراف اقدام شد. در مورد شاخه نزولی هیدروگراف با کالیبره کردن پارامترهای K_g (نسبت شاخه افت را کنترل می‌کند)، G_0 و هم‌چنین K_i (فاکتور مقیاس جریان زیرسطحی) تطابق بین مشاهدات و شبیه‌سازی‌ها صورت می‌گیرد. تعداد نسبتا کم پارامترهای عمومی در واسنجی از مزایای مدل محسوب می‌شود که اجرای بهتر در زمان کمتر، عدم قطعیت کمتر و عدم نیاز به انجام آنالیز حساسیت پارامترها قبل از اجرا برای گزینش پارامترهای حساس را به دنبال خواهد داشت. در حوزه آبخیز طالقان، مدل WetSpa قابلیت خیلی خوبی در شبیه‌سازی دبی جریان از خود نشان داده که با تحقیق‌های لیو و همکاران (۹)، زینی‌وند (۱۸)، بهره‌مند و دسمت (۴) و هدش (٦) همسو می‌باشد. کم‌تر بودن میزان فرسایش توسط قطرات باران به‌دلیل پوشش برف در بخش اعظمی از سال به‌خصوص در ارتفاعات زیاد می‌باشد که مانند مانعی در برابر برخورد قطرات باران عمل می‌کند. مدل قابلیت نسبتا خوبی در شبیه‌سازی دبی‌های پیک و مقادیر حداکثر غلظت و تولید رسوب معلق نشان داده است که با تحقیق‌های زینی‌وند (۱۸) و هدش (٦) همسو می‌باشد. دلیل کمتر بودن معیار نش- ساتکلیف در برآورد غلظت رسوب معلق در دوره اعتبارسنجی به نمونه‌های اندازه‌گیری شده رسوب به عبارتی به تعداد محدود نمونه‌ها (۱۵ نمونه) و مقادیر پایین غلظت رسوب معلق اندازه‌گیری‌شده مربوط می‌شود. از منابع خطا در شبیه‌سازی رسوب می‌توان به شبیه‌سازی نامناسب جریان رواناب سطحی در درجه اول، عدم صحت و عدم پیوستگی اندازه‌گیری رسوب معلق اشاره کرد که با تحقیق مولیتا و نیکلاو (۱۴) و هدش (٦) همسو می‌باشد. تأثیر تعداد زیرحوزه در مقدار تولید رسوب بررسی و این نتیجه حاصل شد که با افزایش تعداد زیرحوزه‌ها تولید رسوب برآورد شده بیشتر خواهد بود. تولید رسوب به تعیین آستانه سلولی برای زیرحوزه‌ها حساسیت نسبتا زیاد و جریان رواناب حساسیت خیلی کم ولی همسو با تولید رسوب نشان داد. به‌طوری که با کاهش آستانه سلولی، تعداد زیرحوزه‌ها و تولید رسوب برآورد شده افزایش یافته و به‌دنبال این تغییر، معیار ارزیابی نش- ساتکلیف برآورد غلظت و تولید رسوب افزایش می‌یابد. از قابلیت‌های مدل WetSpa تخمین زمانی و مکانی هدررفت خالص خاک، کنش خاک در اثر قطرات باران و جریان رواناب‌سطحی به‌صورت توزیعی در واحد پیکسل و زیرحوزه می‌باشد.

سپاسگزاری

نگارندگان مراتب قدردانی و تشکر خود را از شرکت تماب به‌خاطر همکاری در دسترسی به آمار هیدرومتری و باران‌سنجی حوزه آبخیز طالقان و آقای دکتر مجید حسینی از مرکز تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری کشور به‌خاطر ارائه نقشه‌های پایه و اطلاعاتی راجع به حوزه مذکور اعلام می‌دارند.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]

منابع مورد استفاده

۱- صادقی، س. ح. ر. ۱۳۸۹. *مطالعه و اندازه‌گیری فرسایش آبی*. انتشارات دانشگاه تربیت مدرس. چاپ اول، ۲۰۰ صفحه.

۲- مرادی‌پور، ش. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی فرسایش خاک و انتقال رسوب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی- توزیعی WetSpa در حوزه آبخیز طالقان، استان البرز. پایان‌نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، ۱۴۹ صفحه.

3. Adams, R. and S. Elliott. 2006. Physically based modelling of sediment generation and transport under a large rainfall simulator, Hydrol. Process, 20: 2253–2270.
4. Bahremand, A. and F. De Smedt. 2010. Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model. Water Resource Management 24: 2869–2880.
5. Chmelová, R. and B. Šarapatka. 2002. Soil erosion by water: Contemporary research methods and their use. Geographica 37: 23-30.
6. Haddush, G. A. 2012. Modeling of hydrological processes in the Geba river basin, Ethiopia. PhD. Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
7. Koo, B. K., S. M. Dunn and R. C. Ferrier. 2005. A distributed continuous simulation model to identify critical source areas of phosphorus at the catchment scale- model description, Hydrol. Earth. Sys. Sci. Discuss, 2: 1359–1404.
8. Liu, Y. B. and F. De Smedt. 2004. WetSpa Extension, a GIS-based hydrologic model for flood prediction and watershed management and erosion and sediment transport simulation (2010), documentation and user manual. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije universiteity Brussel, Brussels, Belgium. 155 p.
9. Liu, Y. B., O. Batelaan, F. De Smedt, N. T. Hong and V. T. Tam. 2005. Test of distributed modeling approach to predict flood flows in the karst Suoimuoi catchment in Vietnam, Environ. Geology, 48(7): 931-940.
10. Liu, Y. B., J. Y. B. Corluy, A. Bahremand, F. De Smedt, J. Poorova and L. Velcicka. 2006. Simulation of runoff and phosphorus transport in a Carpathian catchment, Slovakia. River Res. and Applications J. 22: 1009–1022.
11. Madsen, O. S. and W. D. Grant. 1976. Sediment transport in the coastal environment. In: Report No. 209, Ralph M. Parsons Laboratory for Water Resources and Hydrodynamics, Department of Civil Engineering. 105 p.
12. Moradipour, Sh., A. Bahremand, H. Zeinivand and A. Najafinejad. 2013. Simulation of water balance components using a distributed hydrological model in Taleghan watershed. The International J. of Environ.l Resour. Res., 1(1): 51-64.
13. 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. V. Folly. 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University. 124 p.
14. Muleta, M. K. and J. W. Nicklow. 2004. Sensitivity and uncertainty analysis coupled with automatic calibration for a distributed watershed model. J. of Hydrol. 306: 127–145
15. Rosenmund, A., R. Confalonieri, P. P. Roggero, M. Toderi and M. Acutis. 2005. Evaluation of the EUROSEM model for simulating erosion in hilly areas of central Italy. Rivista Italiana di Agrometeorologia 2: 15-23.
16. Safari, A., F. De Smedt and F. Moreda. 2012. WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). J. of Hydrol., 418-419: 78-89.
17. Wang, Z., O. Batelaan and F. De Smedt. 1997. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa), Physics and Chemistry of the Earth 21: 89-193.
18. Zeinivand, H. 2009. Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, soil erosion and sediment transport. PhD. Thesis, Vrije Universiteit Brussel, Belgium.
19. Zeinivand, H. and F. De Smedt. 2009. Spatially distributed modeling of soil erosion and sediment transport at watershed scale. In Starrett, S. (Ed.), Proceedings World Environmental and Water Resources Congress, May 17-21, American Society of Civil Engineers, Kansas City, Missouri 6499-6508.

[Downloaded from jstnar.iut.ac.ir on 2026-11-12]

[DOR: 20.1001.1.24763594.1393.18.69.16.3]