مرتع و آبخیزداری، مجله منابع طبیعی ایران
دوره ۷۰، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۶
ص ۹۷۶-۹۶۵

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۴
تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۰۹/۲۳

مقایسه کارایی مدل‌های هیدرولوژیکی IHACRES و HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل

❖ **محمد گلشن؛** دانشجوی دکترای آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

❖ **اباذر اسمعلی؛** دانشیار آبخیزداری، دانشکدهٔ کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

❖ **علی افضلی*؛** کارشناس گروه آموزشی مدیریت مناطق بیابانی، مرکز تحقیقات بین‌المللی بیابان، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

❖ **افشین جهانشاهی؛** دانشجوی دکترای آبخیزداری، دانشکدهٔ منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

چکیده

شناخت حوزه‌های آبخیز جهت حفاظت آب و خاک و ارائهٔ برنامه‌ریزی مناسب در سطح حوزهٔ آبخیز از اهمیت بالایی برخوردار است. شبیه‌سازی حوزه‌های آبخیز با استفاده از مدل‌های رایانه‌ای به‌طور سریع در حال توسعه است و این مدل‌ها ابزارهای ضروری برای فهم انسان از حوزهٔ آبخیز و فرآیندهای هیدرولوژیکی هستند. در این تحقیق مدل‌های بارش-رواناب HEC-HMS و IHACRES برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در حوزهٔ آبخیز کسیلیان با مساحت ۶۷/۸ کیلومتر مربع مورد استفاده قرار گرفت. برای تهیهٔ نقشه‌های مورد نیاز برای اجرای مدل HEC-HMS از الحاقیهٔ HEC-GeoHMS استفاده شد. داده‌های هیتوگراف بر پایهٔ گام زمانی ۱۵ دقیقه و هیدروگراف مربوط به آن بر پایهٔ گام زمانی یک ساعته به هر دو مدل وارد شد. سپس شبیه‌سازی هیدروگراف سیل بر پایهٔ گام زمانی ۱۵ دقیقه انجام شد. ضرایب آماری CP و RE% برای ارزیابی کارایی مدل‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر این ضرایب با استفاده از مدل HEC-HMS برای سیلاب ۲۶ نوامبر ۱۹۹۴ به‌ترتیب ۰/۷۲ و ۱۱۸/۲۶ و برای سیلاب ۶ اکتبر ۱۹۹۶ به‌ترتیب ۰/۸۱ و ۲۴/۶۳- و با استفاده از اجرای مدل IHACRES برای سیلاب اول به‌ترتیب ۰/۶۳ و ۱۵۲/۴ و برای سیلاب دوم به‌ترتیب ۰/۷۹ و ۳۵/۶- محاسبه شد. نتایج نشان داد که مدل‌های مورد استفاده برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل منطقه از عملکرد قابل قبولی برخوردار هستند و مدل HEC-HMS در مقایسه با مدل IHACRES از عملکرد بهتری برخوردار است.

کلید واژگان: فرآیند بارش-رواناب، شبیه‌سازی، هیدروگراف سیل، حوزهٔ آبخیز کسیلیان، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS.

۱. مقدمه

مطالعات پیچیدگی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه‌های آبخیز اساساً بر اساس درک ویژگی‌های بارش و خصوصیات حوضه هستند [۳]. در راستای مدیریت حوزهٔ آبخیز و جلوگیری از بروز ناسازگاری در اقدامات طراحی شده در سطح حوزهٔ آبخیز به مدلی نیاز است که با توجه به اطلاعات و شرایط موجود کارایی شبیه‌سازی دبی جریان خروجی از منطقه را داشته باشد [۴۲]. ارزیابی دقیق جریان، اثرات اقتصادی چشمگیری دارد به‌طوری‌که در

* نویسنده مسئول: شماره تماس: ۹۸۹۱۲۳۳۱۷۷۸+
Email: aliafzali61@ut.ac.ir

مسائل مربوط به مدیریت منابع آب کنترل آلودگی، طرح‌های مهندسی آب، مصارف کشاورزی، خسارت ناشی از سیل و حفظ و بهره‌وری مناسب از منابع طبیعی ضروری به‌نظر می‌رسد [۲۲]. روش‌های نوین در مدل‌سازی و نرم‌افزارهای موجود باعث افزایش سرعت و کاهش زمان اجرای محاسبات گردیده، به‌طوری‌که پژوهش‌ها و مطالعات مربوط به مسائل آب از دهۀ ۱۹۵۰ به‌گونۀ چشمگیری افزایش یافته است [۴۵، ۱۱، ۸]. مدل‌های مفهومی اجزاء هیدرولوژیکی را از طریق ساده‌سازی مفاهیم فیزیکی مرتبط با چرخۀ هیدرولوژیکی توصیف می‌کنند [۳۵]. مدل‌های مختلفی با این مفهوم توسعه یافته‌اند، که می‌توان به سرویس حفاظت خاک (SCS) توسعه یافته به‌وسیلۀ USDA [۳۹]، NAM [۲۹]، TANK [۳۶]، HEC-HMS [۱۸]، SWAT [۲۷]، TOPMODEL [۷، ۶] و IHACRES [۱۳] اشاره کرد. مدل‌های یکپارچه نسبت به مدل‌های توزیعی و نیمه‌توزیعی به اطلاعات کمتری نیاز دارند و از سوی دیگر مدل‌های یکپارچه نسبت به مدل‌های دیگر سریع‌تر اجرا می‌شوند [۱۶]. مدل IHACRES یک مدل مفهومی یکپارچه است که شامل مدل کاهشی غیر خطی و مدل روندیابی خطی است. علی‌رغم توسعۀ نسبتاً اخیر IHACRES، این مدل در بین مدل‌های هیدرولوژیکی به‌طور گسترده و فزاینده‌ای پذیرفته شده است [۳۵]. تعداد پارامترهای مدل IHACRES کم است، در حالی که به‌طور همزمان در مقایسه با مدل‌های توزیعی سعی شده جزئیات بیشتری از فرآیندهای داخلی ارائه شود [۱۲]. این مدل در مناطق مختلف دنیا شامل استرالیا [۹]، تایلند [۳۷]، شمال آفریقا [۱۴] و ایران [۴۶] به‌منظور بررسی پاسخ هیدرولوژیکی به‌طور موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیقی چهار مدل یکپارچۀ SMARG، SACRAMENTO، SIMHYD و IHACRES به‌منظور ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر روند هیدرولوژیکی ۶۱ حوزه در جنوب شرق استرالیا به‌کار گرفته شد و نتایج نشان داد که مدل IHACRES مطابقت بیشتری با داده‌های مشاهداتی دارد [۴۱]. مدل HEC-HMS مانند مدل IHACRES یک مدل مفهومی یکپارچه است اما این قابلیت را دارد که در سطح زیر حوضه نیز مورد استفاده قرار گیرد در واقع مدل نیمه توزیعی در سطح زیرحوضه است [۲۵]. مدل HEC-HMS[1] با داشتن تنوع زیر مدل‌های مدل‌های موجود در آن کارایی و کاربرد وسیعی در بسیاری از نقاط دنیا دارد [۳۳]. این مدل نسخۀ توسعه یافتۀ HEC-1 تحت ویندوز است که توسط مهندسان هیدرولوژی مرکز مهندسی ارتش آمریکا[2] برای شبیه سازی رواناب سطحی یک حوزۀ آبخیز نسبت به بارندگی معین طراحی شده است [۱]. این مدل حوزۀ آبخیز را به‌عنوان یک سیستم بهم‌پیوسته با مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی نمایش می‌دهد. مدل HEC-HMS در زمینۀ تجزیه و تحلیل سیلاب شهری، دورۀ بازگشت سیل، مقادیر دبی اوج، ظرفیت سرریز مخزن و نگه‌داشت رودخانه کاربرد دارد [۳۸]. مطالعات انجام شده در داخل کشور بیشتر در زمینۀ تعیین پتانسیل سیل‌خیزی زیرحوضه‌های گوناگون با استفاده از شبیه‌ساز آبشناسی بوده است که کارایی این مدل‌های شبیه‌سازی بارش-رواناب را تؤیید می‌کنند [۳۲، ۳۱، ۱]. در زمینۀ مدل‌سازی هیدرولوژیک با استفاده از مدل HEC-HMS در خارج از کشور نیز پژوهش‌هایی انجام گرفته که به تعدادی از آن‌ها اشاره می‌شود، کاکتول [۲۰] به منظور تعیین دبی اوج و حجم رواناب در دو حوضۀ کشاورزی در جنوب شرق ایالت داکوتای جنوبی، مکول و آگت [۲۴] به‌منظور پیش‌بینی الگوی کاربری اراضی در سال‌های ۲۰۱۵، ۲۰۲۵ و ۲۰۵۰ در حوزۀ آبخیز کیتاتیس در واشنگتن[1]، یوشیکاوا و همکاران [۴۴] با استفاده از این مدل پروژۀ سد Paddy Field را در بخش کامیهایاشی[2] در ژاپن مورد ارزیابی قرار دادند. با توجه به مطالب ذکر شده مدل‌های HEC-HMS و IHACRES در شبیه‌سازی دبی جریان از قابلیت بالایی برخوردار هستند. هر دو مدل

[1] Hydrological Modeling System

[2] Hydrologic Engineering Center (HEC)

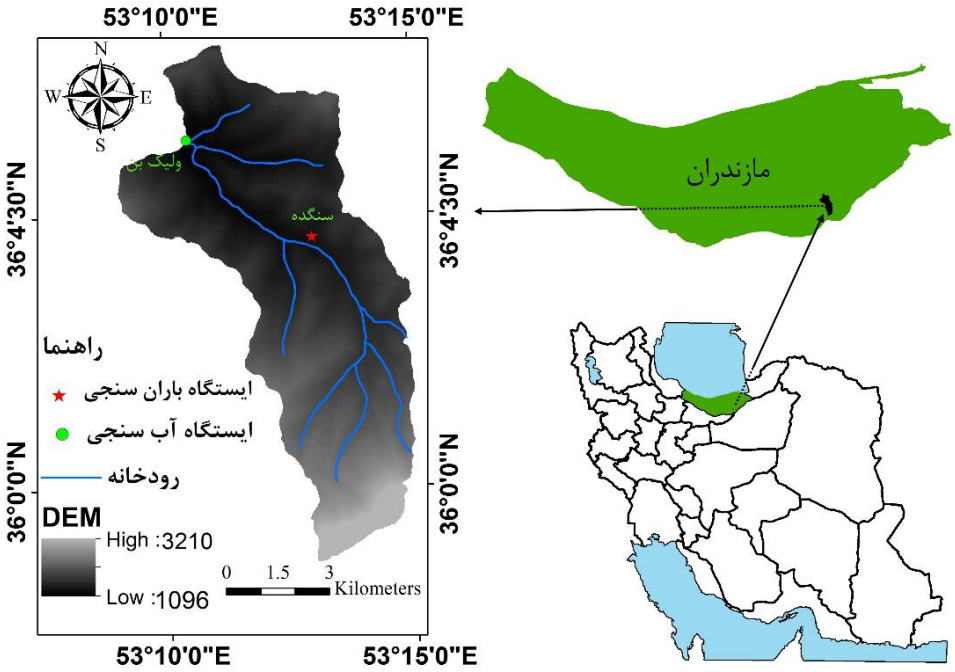
قابلیت شبیه‌سازی رواناب در سه مقیاس زمانی دقیقه، ساعت و روزانه را دارند [۳۸، ۱۲].

هدف از این تحقیق، ارزیابی کارایی مدل‌های HEC-HMS و IHACRES در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در حوزهٔ آبخیز کسیلیان است. در این مطالعه، مدل IHACRES برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با مقیاس زمانی دقیقه مورد استفاده قرار گرفته و کارایی این مدل در مقایسه با کارایی مدل HEC-HMS مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲. روش‌شناسی

۱,۲ معرفی منطقهٔ مورد مطالعه

در این پژوهش برای اجرای مدل‌های رایانه‌ای به‌منظور شبیه‌سازی هیدروگراف سیل نیاز به برداشت‌های آماری مربوط به هر واقعه است. لذا حوزهٔ آبخیز کسیلیان که یک حوزهٔ آبخیز معرف است برای مدلسازی انتخاب شد. حوزهٔ آبخیز کسیلیان با مساحت ۶۷/۸ کیلومترمربع در محدودهٔ ۱۸ °۵۳ تا ۳۰ °۵۳ درجهٔ طول شرقی و ۵۸ °۳۵ تا ۷ °۳۶ درجهٔ عرض جغرافیایی است که در ارتفاعات مرکزی سلسله جبال البرز در شرق استان مازندران واقع شده است (شکل ۱). حداقل ارتفاع حوضه ۱۱۰۵ و حداکثر ارتفاع حوضه ۳۱۶۳ متر است. میانگین شیب آبراههٔ اصلی ۱۳ درصد و طول آبراههٔ اصلی ۱۶/۴ کیلومتر است. میانگین بارندگی منطقه ۷۹۱ میلی‌متر و میانگین دمای حوضه ۱۱ درجهٔ سانتی‌گراد است. کل سطح حوضه دارای پوشش‌های جنگل، مرتع و زمین‌های زراعی است [۳۱].



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

۲،۲. داده‌های بارش-رواناب

برای واسنجی مدل‌های HEC-HMS و IHACRES لازم است که داده‌های مشاهده‌ای بارش و سیلاب متناظر آن آماده گردند. بنابراین هیتوگراف مربوط به رویدادهای سیل با مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه با استفاده از ایستگاه باران‌سنجی و هیدروگراف مربوط به هر سیلاب با مقیاس زمانی ساعتی با استفاده از ایستگاه آب‌سنجی تهیه شد (جدول ۱). لازم به ذکر است که برای جداسازی هر سیلاب از سیلاب قبلی از روش ۰/۲ حجم دبی اوج استفاده شد. پس از بررسی آمار هواشناسی و آب‌سنجی و شرایط حوضه در این تحقیق ، هر یک از مدل‌ها در مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه برای ۴ سیلاب رخ داده در منطقه اجرا گردید. سیلاب رخ داده در تاریخ‌های ۲۶ نوامبر ۱۹۹۴ و ۶ اکتبر ۱۹۹۶ به‌منظور واسنجی مدل‌ها و سیلاب تاریخ‌های ۱۱ آگوست ۲۰۰۵ و ۱۷ جولای ۲۰۰۷ به منظور اعتبارسنجی مدل‌ها انتخاب شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های مورد استفاده در این تحقیق

ایستگاه	نوع	طول دورهٔ آماری (سال)	سال‌های آماری	درجهٔ طول شرقی	درجهٔ عرض شمالی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
سنگده	باران‌سنجی	۴۸	۹۵-۱۳۹۴	۵۳/۱۱	۳۶/۴	۱۳۳۷
ولیک‌بن	آب‌سنجی	۴۸	۹۵-۱۳۹۴	۵۳/۱۳	۳۶/۵	۱۱۰۶

۳،۲. مدل هیدرو لوژیکی IHACRES

مدل IHACRES[۳] مخفف تشخیص هیدروگراف واحد و اجزاء جریان ناشی از بارندگی، تبخیر و تعرق و دبی جریان است. مدل IHACRES یک مدل بارش-رواناب در مقیاس حوزهٔ آبخیز است که با هدف تشخیص رابطه بین بارش و رواناب توسعه یافته است [۳۵]. چارچوب مدل‌سازی IHACRES بر اساس مدل‌های خطی و غیر خطی است. مدل کاهشی غیر خطی، بارندگی (rk) را به‌وسیلهٔ در نظر گرفتن نسبت نفوذ و تبخیر به بارش مؤثر (Uk) تبدیل می‌کند. به‌منظور به‌دست آوردن بارش مؤثر شاخص رطوبتی حوزه یا شاخص رطوبت پیشین، شاخص اشباع حوزهٔ آبخیز برای هر گام زمانی محاسبه می‌شود [۲]:

$$u_k = [c(\Phi_k - l)]^p r_k \qquad (۱)$$

که در آن c ضریب تعادل حجم بارش، l آستانه شاخص رطوبت خاک، p فاکتور واکنش غیر خطی و r_k بارش مشاهداتی است. Φ_k شاخص رطوبت خاک است که با استفاده از رابطهٔ (۲) محاسبه شد.

$$\Phi_k = r_k + \left(1 - \frac{1}{t_k}\right)\Phi_{k-1} \qquad (۲)$$

در مدل خطی تبدیل بارش مؤثر به رواناب با استفاده از روابط خطی محاسبه شد. دو مؤلفه در روندیابی جریان سریع و آهسته وجود دارد. این دو مؤلفه می‌توانند به‌صورت موازی و یا سری متصل باشند. در مطالعات انجام شده توصیه شده است تا دو فرآیند به‌صورت موازی استفاده شود به جز در مناطق نیمه خشک و یا مناطقی که دارای جریان پایهٔ فصلی هستند [۴۳]. ترکیب مؤلفه‌های جریان سریع $X_k^{(q)}$ و آهسته $X_k^{(s)}$ منجر به تولید رواناب X_k می‌شود که طبق روابط زیر محاسبه

[۱] Washington
[۲] Kamihayashi
[۳] - Identification of Hydrographs and Components for Rainfall, Evapotranspiration and Stream Flow Data

می‌شوند [۴۳].

$$X_k = X_k^q + X_k^s \quad (۳)$$

$$X_k{}^{(q)} = -\alpha_q X_{k-1}^{(q)} + \beta_q u_k \quad (۴)$$

$$X_k{}^{(s)} = -\alpha_s X_{k-1}^{(s)} + \beta_s u_k \quad (۵)$$

که α_q، β_q پارامترهای ثابت زمانی برای جریان سریع و α_s، β_s پارامترهای ثابت زمانی برای جریان آهسته هستند. محاسبهٔ پاسخ دینامیک هیدروگراف واحد (DRCs) برای جریان‌های سریع و آهسته در روابط زیر ارائه شده است.

$$\tau_q = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_q)} \quad (۶)$$

$$\tau_s = \frac{-\Delta}{\ln(-\alpha_s)} \quad (۷)$$

که در آن: Δ بازهٔ زمانی، τ_q و τ_s ثابت زمانی افت جریان‌های روزانه سریع و آهسته است. حجم نسبی جریان سریع و جریان آهسته با استفاده از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$V_q = 1 - V_s = \frac{\beta_q}{1+\alpha_q} = 1 - \frac{\beta_s}{1+\alpha_s} \quad (۸)$$

که، V_q نسبت جریان سریع به جریان کل $(1 - V_s)$ و V_s حجم نسبی از جریان آهسته است.

۴,۲. مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS

مدل HEC-HMS از انواع مدل‌های ریاضی رایانه‌ای بوده که توانایی شبیه سازی بارش-رواناب و روندیابی جریان را دارد. خود مدل دارای چندین زیر مدل در بخش‌های رواناب، جریان سطحی و آب پایه است و برای شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوزهٔ آبخیز به‌کار می‌رود. مدل HEC-HMS برای اجرا در یک منطقه به سه بخش اصلی به نام‌های مدل حوزه، مدل اقلیمی و شاخص‌های کنترل نیاز دارد [۲۹]. در بخش زیر مدل حوزه از روش شماره منحنی جهت برآورد تلفات و از روش هیدروگراف SCS برای انتقال رواناب استفاده شده است و روندیابی سیل در مدل HEC-HMS در این مطالعه با استفاده از روش زمان تأخیر صورت گرفته است. در بخش اقلیمی از مقادیر بارش و هیدروگراف سیل به‌ترتیب بر پایهٔ مقیاس‌های زمانی ۱۵ دقیقه و یک ساعتهٔ ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی و آب‌سنجی منطقهٔ مورد مطالعه استفاده شد. در بخش کنترل دورهٔ زمانی شبیه‌سازی مدل مشخص می‌شود که شامل تاریخ و زمان شروع و پایان شبیه‌سازی است. برای واسنجی پارامترهای برخی مدل‌ها مانند مدل نیمه‌توزیعی SWAT از برنامهٔ جداگانه‌ای به نام SWAT-CUP استفاده می‌شود [۱۶]. درصورتی‌که مدل‌هایی مانند HEC-HMS و IHACRES به‌صورت دستی و با استفاده از سعی و خطا واسنجی می‌شوند. با واسنجی مدل برای رویدادهای مختلف، ارزش متوسط پارامترهای مدل به‌عنوان مقادیر بهینه برای شبیه‌سازی مدل تعیین می‌شود.

۵,۲. تعیین شماره منحنی زیرحوزه‌ها

این پارامتر که بیانگر پتانسیل تولید رواناب حوزهٔ آبخیز است، بر اساس مشخصات خاک، کاربری زمین و عوامل پوشش گیاهی تعیین می‌شود. شماره منحنی برای هر ترکیب پوششی و خاک مقادیر متوسطی هستند که خیلی دقیق نبوده و بیانگر حالت متوسطی برای یک حوضه هستند، دلیل دقیق نبودن آن است که شدت بارندگی در تخمین این پارامتر نادیده گرفته می‌شود [۴۰]. بنابراین برای تخمین شماره منحنی و مقایسهٔ آن با شماره منحنی واقعی حوضه علاوه بر داشتن نقشهٔ کاربری اراضی، نقشهٔ گروه‌های هیدرولوژیکی خاک لازم است. با استفاده از جداول مربوط به تعیین CN [۱۸]، شماره منحنی در هر واحد چند ضلعی حاصل از تلفیق نقشهٔ کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک، تعیین شد و شمارهٔ منحنی متوسط برای کل حوضه محاسبه شد.

۶،۲. شبیه‌سازی هیدروگراف سیل

در این پژوهش روش SCS (انجمن حفاظت خاک آمریکا) برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل مورد استفاده قرار گرفت. دو پارمتر شماره منحنی و زمان تأخیر از مهم‌ترین پارامترها هستند که در روش SCS مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای محاسبهٔ زمان تأخیر در زیرحوزه‌ها از رابطهٔ زیر استفاده می‌شود [۱۰]:

$$t_l = \frac{L^{0.8}\,[(1000/CN)-9]^{0.7}}{1900S^{0.5}} \qquad (۹)$$

که در این معادله: CN شماره منحنی، L طول حوزهٔ آبخیز بر حسب فوت و S درصد شیب حوضه است.

۷،۲. معیارهای ارزیابی کارایی مدل

در مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف [۳۰، ۱۹، ۱۷، ۴] مجموع مربع اختلافات بین مقادیر مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده (CPA) را به‌عنوان یک روش مناسب برای ارزیابی گام‌های زمانی پیشنهاد کرداند. در مطالعات مربوط به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی این ضریب به‌طور رایج مورد استفاده قرار می‌گیرد (رابطهٔ ۱۰). آن‌ها همچنین تقسیم معیار CPA بر طول سری را پیشنهاد کرداند تا مقدار خطای انفرادی اندازه‌گیری شده را به‌دست آورند که به‌عنوان ضریب کارایی (CPA') شناخته شده است (رابطهٔ ۱۱). معادلات مربوط به محاسبهٔ CPA و CPA′ در زیر نشان داده شده است.

$$CP_A = \sum_{i=1}^{N}[S_i - O_i]^2 \qquad (۱۰)$$

$$CP_{A'} = \frac{CP_A}{\sum_{i=1}^{N}[O_{(i)} - O_{avg}]^2} \qquad (۱۱)$$

که در این رابطه: S_i مقدار شبیه‌سازی شده، O_i مقدار مشاهداتی، O_{avg} میانگین مقادیر مشاهداتی و N تعداد کل داده‌ها است.

علاوه بر آن، دقت مدل با استفاده از معیار خطای نسبی (RE) ارزیابی شد [۴، ۱۷]. مقدار این معیار اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را نشان می‌دهد که هر چه به صفر نزدیک‌تر باشد نشان می‌دهد که به‌طور نسبی اختلاف کمی بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده وجود دارد [۵]، درصد خطای نسبی در رابطهٔ (۱۲) مشخص شده است. درصد خطای نسبی برای کم برآورد منفی و برای بیش برآورد مثبت است.

$$RE\% = \left[\frac{Simulated - Observed}{Observed} * 100\right] \qquad (۱۲)$$

۳. نتایج

واسنجی مدل‌های بارش-رواناب با توجه به داده‌های مشاهداتی، توانایی شبیه‌سازی مدل‌ها را افزایش می‌دهد [۲۳]. وقتی نتایج مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت پیدا کرد، کاربر به کارایی مدل برای منطقه می‌تواند اطمینان داشته باشد [۲۶]. پس از اجرای مدل IHACRES برای منطقهٔ مورد مطالعه، واسنجی مدل به‌صورت دستی از طریق سعی و خطا با استفاده از آمار مشاهداتی ایستگاه آب‌سنجی انجام شد. مقادیر بهینه به‌دست آمده توسط مدل برای پارامترهای واسنجی شده در جدول (۲) ارائه شده است.

جدول۲. نتایج واسنجی مدل IHACRES

پارامتر		C(mm)	$\tau_w(day)$	f(c°)	I	P
غیرخطی	معرفی پارامتر	ظرفیت ذخیرهٔ رطوبت	زمان خشک شدن	تعدیل حرارت حوزه	ضریب آستانه رطوبت	شدت رطوبت خاک
	مقدار	۰/۲۳	۲	۰/۵۶	۰/۰۲	۱
خطی		a(s)	B(s)	τ^s	v(s)	
	معرفی	نرخ خشکیدگی	شاخص اوج	کاهش جریان	نسبت حجم	

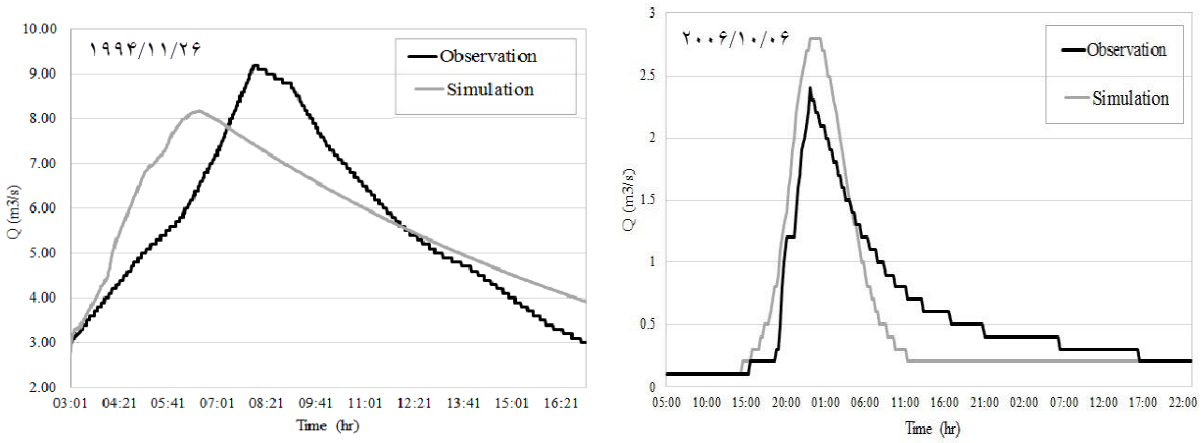
پارامتر			آهسته	
مقدار	۰/۰۸	۰/۰۴۵	۳۷	۱

واسنجی مدل HEC-HMS همانند مدل IHACRES در یک منطقه بر پایهٔ روش آزمون و خطا است که در آن کارشناس با توجه به وضعیت منطقه و اطلاعات به‌دست آمده از منطقه مقادیر پارامترهای مدل را تعیین می‌کند تا بهترین انطباق بین نتایج شبیه‌سازی مدل و مقادیر مشاهده‌ای به‌دست آید [۲۹]. هر جزء از مدل HEC-HMS جنبه‌ای از فرآیند بارش-رواناب را در نظر می‌گیرد، بازنمایی یک جزء برای تعیین روابط ریاضی توصیف کنندهٔ ویژگی‌های حوزه، نیاز به مجموعه‌ای از پارامترها دارد [۳۴]. تحلیل حساسیت پارامترهای مدل با روش سعی و خطا انجام شد و پارامترهای حساس انتخاب شدند، مقادیر بهینه‌سازی شده برای پارمترهای مدل HEC-HMS برای منطقهٔ مورد مطالعه در جدول (۳) ارائه شده است.

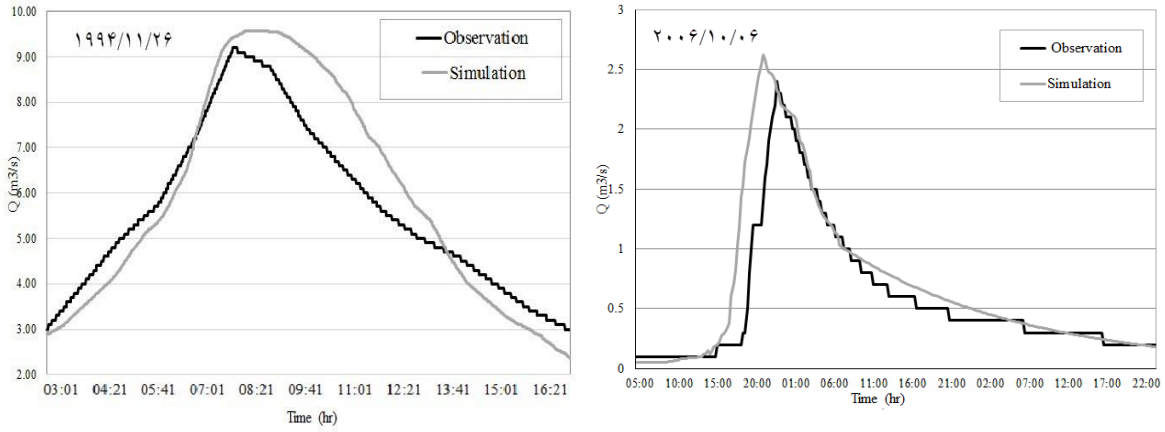
جدول ۳. پارامترهای واسنجی شده برای حوزهٔ آبخیز کسیلیان

شماره منحنی	میزان جذب اولیه (میلی متر)	زمان تأخیر (دقیقه)	مساحت (کیلومتر مربع)
۷۲	۶	۱۲	۶۷/۸

نتایج واسنجی مدل برای سیلاب تاریخ ۲۶ نوامبر ۱۹۹۴ و ۶ اکتبر ۱۹۹۶ در شکل (۲) برای مدل یکپارچه IHACRES و در شکل (۳) برای مدل نیمه‌توزیعی HEC-HMS نشان داده شده است. مقایسه هیدروگراف سیل شبیه‌سازی شده با هیدروگراف سیل مشاهداتی نشان می‌دهد که انطباق خوبی بین آن‌ها وجود دارد و مدل‌های مورد استفاده به‌خوبی هیدروگراف سیل و زمان وقوع دبی اوج را شبیه‌سازی کرده است. نتایج ارزیابی کارایی مدل با استفاده از معیارهای آماری برای رویدادهای انتخابی برای واسنجی مدل های هیدرولوژیکی در جدول (۴) ارائه شده است.



شکل ۲. شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل IHACRES در دورهٔ واسنجی

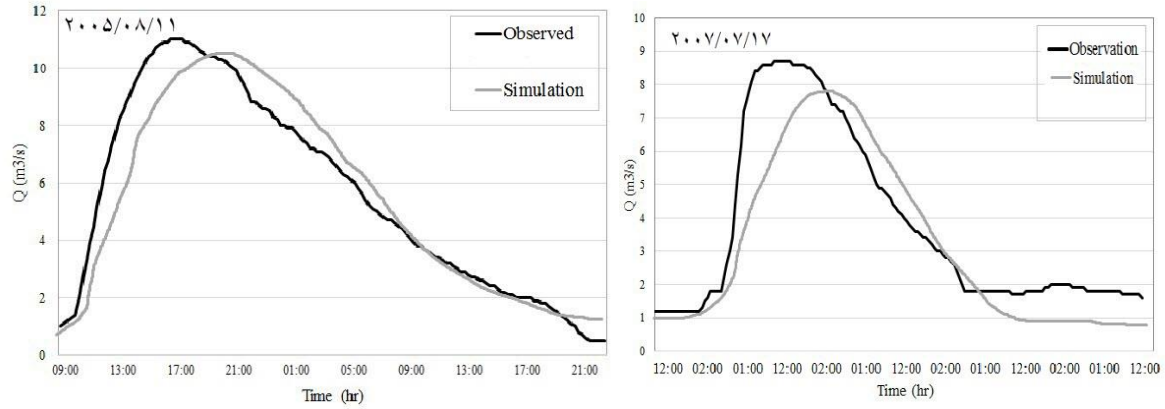


شکل ۳. شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل HEC-HMS در دورهٔ واسنجی

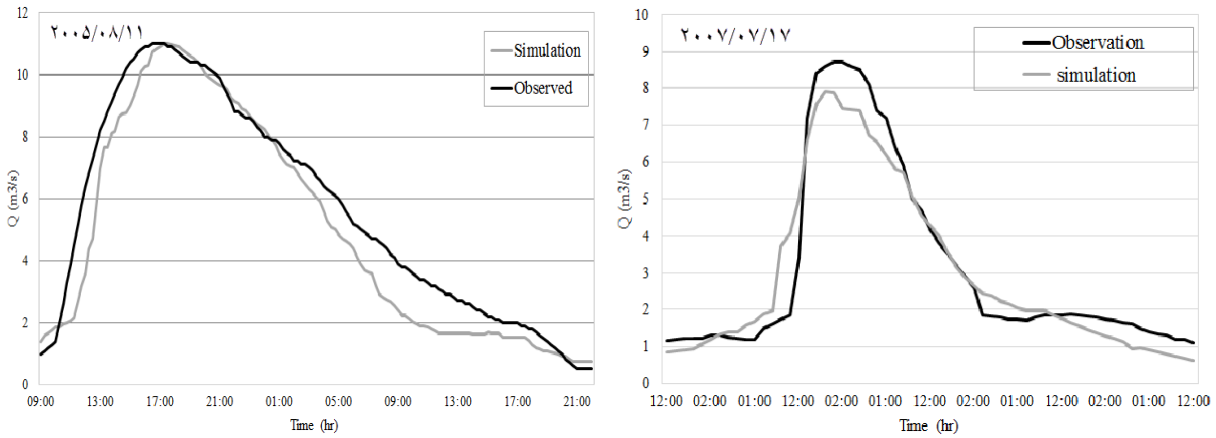
جدول ۴. واسنجی مدل IHACRES و HEC-HMS برای حوزهٔ آبخیز کسیلیان

مدل	تاریخ رویداد سیل	دبی شبیه‌سازی	دبی مشاهداتی	درصد خطای نسبی	Δt(min)	CP
IHACRES	۲۶نوامبر۱۹۹۴	۸/۱۸	۹/۲	۱۵۲/۴	۹۴	۰/۶۳
	۶ اکتبر ۱۹۹۶	۲/۸	۲/۴	-۳۵/۶	-۶	۰/۷۹
HEC-HMS	۲۶نوامبر۱۹۹۴	۹/۵	۹/۲	۱۱۸/۲۶	-۲۶	۰/۷۲
	۶ اکتبر ۱۹۹۶	۲/۶۳	۲/۴	-۲۴/۶۳	۳۲	۰/۸۱

اعتبارسنجی مدل یک بخش مهم در ارزیابی کارایی مدل برای یک منطقهٔ مطالعاتی است که سطح اعتماد کاربر در قابلیت شبیه‌سازی مدل را افزایش می‌دهد [۱۶]. در این تحقیق از رویکرد رایج اعتبارسنجی مدل‌ها استفاده شد، به‌طوری‌که از پارامترهای واسنجی شده برای شبیه‌سازی دو رویداد سیلاب ۱۱ آگوست ۲۰۰۵ و ۱۷ جولای ۲۰۰۷ استفاده شد. هیدروگراف‌های شبیه سازی شده برای اعتبارسنجی مدل‌های مورد استفاده در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. نتایج ارزیابی کارایی مدل‌ها برای دورهٔ اعتبارسنجی نیز نشان می‌دهند که دقت مدل‌ها برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل بر پایهٔ مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه مورد قبول هستند. همچنین در جدول (۵) مقادیر ارزیابی کارایی مدل‌ها ارائه شده است.



شکل ۴. شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل IHACRES در دورهٔ اعتبارسنجی



شکل ۵. شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب با استفاده از مدل HEC-HMS در دورهٔ اعتبارسنجی

جدول ۵. اعتبارسنجی مدل HEC-HMS و IHACRES برای حوزهٔ آبخیز کسیلیان

مدل	تاریخ رویداد سیل	دبی شبیه‌سازی	دبی مشاهداتی	درصد خطای نسبی	Δt(min)	CP
IHACRES	۱۱ آگوست ۲۰۰۵	۱۰/۸	۱۱/۲	۱۲۵/۹۳	-۸۳	۰/۷۶
	۱۷ جولای ۲۰۰۷	۷/۹	۸/۸۶	-۶۳/۶	-۶۲	۰/۶۹
HEC-HMS	۱۱ آگوست ۲۰۰۵	۱۱/۱	۱۱/۲	۸۱/۹	-۲۷	۰/۸۳
	۱۷ جولای ۲۰۰۷	۷/۹	۸/۸۶	-۴۰/۶	۱۸	۰/۷۸

۴. بحث و نتیجه‌گیری

واسنجی مدل‌های بارش-رواناب با توجه به داده‌های مشاهداتی قابلیت شبیه‌سازی آن‌ها را افزایش می‌دهد [۲۳، ۳]. وقتی نتایج مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده مطابقت پیدا کرد کاربر به کارآیی مدل برای منطقه می‌تواند اطمینان داشته باشد [۲۶]. نتایج حاصل از تحلیل حساسیت نشان داد که در منطقهٔ مطالعاتی پارامتر شمارهٔ منحنی نسبت به پارامترهای زمان تمرکز و تلفات اولیه از حساسیت بالایی برخوردار است و با تغییر این پارامتر، مقدار دبی شبیه‌سازی شده به‌طور قابل توجهی تغییر می‌یابد. بالا بودن حساسیت شمارهٔ منحنی با اکثر مطالعاتی که با مدل HEC-HMS و یا سایر مدل‌های فیزیکی انجام شده، مطابقت دارد [۲۱، ۱۵].

مقادیر دبی اوج مشاهداتی در دورهٔ واسنجی به‌ترتیب ۹/۲ و ۲/۴ مترمکعب بر ثانیه است که مدل HEC-HMS مقادیر دبی‌های اوج را به‌ترتیب ۹/۵ و ۲/۶۳ مترمکعب بر ثانیه و مدل IHACRES به ترتیب ۸/۱۸ و ۲/۸ متر مکعب بر ثانیه شبیه‌سازی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که هر دو مدل با دقت قابل قبولی مقدار دبی اوج را شبیه‌سازی کرده‌اند که با نتایج مطالعات انجام شده مطابقت دارد [۱۱، ۱۴، ۱۷، ۲۳]. مقایسهٔ نتایج ارزیابی کارایی مدل‌ها و هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با مقیاس زمانی ۱۵دقیقه‌ای از عملکرد بهتری نسبت به مدل IHACRES برخوردار است که در مطالعه‌ای در لبنان [۲] نیز به بالا بودن کارایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیل بر پایهٔ گام زمانی ساعتی نسبت به مدل IHACRES اشاره شده است. تعداد پارامترهای ورودی هر دو مدل مشابه می‌هستند، بنابراین اختلاف کارایی مدل‌ها

می‌تواند به‌دلیل متفاوت بودن پارامترهای واسنجی مدل‌ها باشد. به‌طوری‌که با توجه به واسنجی پارمترهای مدل‌های مطالعاتی در حوزهٔ آبخیز کسیلیان مدل HEC-HMS از کارایی بهتری برخوردار است. بالا بودن کارایی مدل HEC-HMS در مناطق مرطوب در سایر مطالعات نیز بیان شده است [۱۷، ۲۹]. همچنین نتایج نشان داد که اختلاف زمان وقوع دبی اوج شبیه‌سازی در مدل IHACRES نسبت به مدل HEC-HMS بیشتر است. بالا بودن اختلاف زمان دبی اوج مشاهداتی نسبت به دبی اوج شبیه‌سازی شده توسط مدل IHACRES در مطالعات گلشن و همکاران [۱۶] و دیه و کروک [۱۴] نیز بیان شده است. به‌طورکلی ارزیابی کارایی مدل‌های مطالعاتی نشان داد که این مدل‌ها از قابلیت مناسبی برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در حوزهٔ آبخیز کسیلیان برخوردار هستند.

مدل‌های هیدرولوژیکی از دامنهٔ بسیار وسیعی برخوردار هستند که انتخاب مناسب‌ترین مدل برای هر کاربرد به‌خصوص، به‌دلیل افزایش بهره‌وری دشوار است. بنابراین نیاز است تا یک ارزیابی مقایسه‌ای برای یک هدف مشخص بین مدل‌های مختلف انجام شود. دقت نتایج حاصل از اجرای مدل‌های هیدرولوژیکی بستگی به فرضیه‌سازی مدل و در دسترس بودن اطلاعات دارد. در این مطالعه یک مدل هیدرولوژیکی کاملاً پیوسته (IHACRES) و یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی با واحد کاری زیرحوضه (HEC-HMS) به‌منظور شبیه‌سازی هیدروگراف سیل در یک حوزهٔ آبخیز کوچک واقع در شمال کشور مورد استفاده قرار گرفت. با واسنجی کردن مدل‌ها برای منطقه مقادیر پارامترهای هر مدل مشخص شد. هیدروگراف‌های حاصل از مدل‌های مورد استفاده، نتیجهٔ پاسخ هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز به وقایع بارندگی هستند.

نتایج شبیه‌سازی هر دو مدل در برابر وقایع رواناب اندازه‌گیری شده واسنجی شد. مقایسهٔ بین دبی هیدروگراف‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده نشان دهندهٔ میزان تناسب مدل‌ها در منطقهٔ مورد استفاده است. هر دو مدل زمان رخداد دبی‌های اوج و مقادیر دبی اوج را در حد قابل قبولی شبیه‌سازی کردند و هیدروگراف دبی حاصل از بارندگی‌های یکسان در دو مدل با یکدیگر تشابه دارند و زمان شروع اوج و خشکیدگی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده با یکدیگر مطابقت دارند. با استفاده از ضرایب آماری CP و RE در مرحلهٔ واسنجی و ارزیابی مدل به‌طورکلی می‌توان چنین بیان کرد که دقت شبیه‌سازی مدل HEC-HMS در مقایسه با مدل IHACRES بالاتر است. البته مدل HEC-HMS یک مدل توزیعی است و نسبت به مدل IHACRES نیاز به ورودی‌های بیشتری دارد که با در نظر گرفتن این موضوع و میزان هزینه و صرف زمان می‌توان مدل مناسب با هدف مورد نظر را مشخص کرد. با توجه به این‌که مدل‌های یکپارچه مانند IHACRES نیاز به ورودی‌های کمتری دارند پیشنهاد می‌شود که کارایی این مدل‌ها و مدل‌های دیگر در حوضه‌هایی با اقلیم و مقیاس مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد.

References

[1] Abbasi, M., Mohseni Saravi, M., Kheirkhah, M.M., Khalighi Sigaroudi, SH., Rostamizadeh, GH. and Hosseini, M. (2010). Assessment of Watershed Management Activities on Time of Concentration and Curve Number using HEC-HMS Model (Case study: Kan Watershed, Tehran). Journal of Range and Watershed Management, 63(3), 375-385.

[2] Abushandi, E. and Merkel, B. (2013). Modeling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain event in an arid region of Jordan. journal of Water Resource Management, 27, 2391-2409.

[3] Abushandi, E. (1980). Rainfall-runoff modeling in arid catchment, the faculty for Geosciences, Geotechnique and mining of the technische University Bergakademie Freiberg.

[4] Babel, M.S., Najim, M.M.M. and Loof, R. (2004). Assessment of agricultural nonpoint source model for a watershed in tropical environment. Journal of Environment Engineering, 130 (9), 1032-1041.

[5] Bennett, N.D., Croke, B.F.W., Guariso, G., Guillaume, J.H.A., Hamilton, S.H., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L.T.H., Norton, J.P., Perrin, C., Pierce, S.A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A.A., Fathi, B.D. and Andreassian, V. (2013). Characterising performance of environmental models. Environmental Modelling and Software, 40, 1-20.

[6] Beven, K. and Kirkby, J.M. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. Hydrology Science, Bull, 24, 43–69.

[7] Beven, K., Lamb, R., Quinn, P., Romanowicz, R. and Freer, J. (1995). TOPMODEL, pp.627–668. In V. P. Singh, (ed.). Computer Models of Watershed Hydrology. Water Resources Publications. Colorado, USA.

[8] Boughton, W. (2006). Calibrations of a daily rainfall runoff model with poor quality data. Environmental Modelling and Software, 21,1114-1128.

[9] Carlile, P.W., Croke, B.F.W., Jakeman, A.J. and Lees, B.G. (2004). Development of a semidistributed catchment hydrology model for simulation of land-use change streamflow and groundwater recharge within the Little river catchment, NSW, In I.C. Roach (ed.). Regolith, CRC LEME, pp. 54–56.

[10] Chow, V.T., Maidment, D.R. and Mays, L.W. (1988). Applied hydrology. 1ed Edition, McGraw-Hill Science.

[11] Croke, B.F.W., Andrews, F., Jakeman, A.J., Cuddy, S.M. and Luddy, A. (2006). IHACRES Classic Plus: Aredesign of the IHACRES rainfall runoff model. Environment Modelling & Software, 21, 426-427.

[12] Croke, B.F.W., Andrews, F., Kasetsart, S., Cuddy, J. and Luddy, A. (2005). Redesign of the IHACRES rainfall-runoff model. In 29th Hydrology and Water Resources Symposium. 21–23 Febuary , Canberra, pp. 333-339.

[13] Croke, B.F.W., Merritt, W.S. and Jakeman, A.J. (2003). A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. Journal of Hydrology, 291, 115–131.

[14] Dye, P.J. and Croke, B.F.W. (2003). Evaluation of streamflow predictions by the IHACRES rainfall-runoff model in two South African catchments. Environmental Modelling and software, 18, 705–712.

[15] Golshan, M. (2013). Predict flow and sediment yield in Mazandaran Haraz watershed using the SWAT model, a master's degree thesis, Department of Natural Resources, University of Agricultural Sciences and Natural Resources Surrey.

[16] Golshan, M., Esmali ouri, A., Shahedi, K. and Jahanshahi, A. (2016). Performance Evaluation of SWAT and IHACRES Models to Simulate Runoff in Khorramabad Watershed. Soil and water Science, 26 (2), 29-42.

[17] Halwatura, M.M. and Najim, M. (2013). Application the HEC-HMS model for runoff simulation in a tropical catchment. Environmental Modelling and software, 46, 155-162.

[18] Hydrologic Engineering Center (HEC). (2000). User's Manual HEC-HMS Hydrologic Modeling System Version 2.0. US Army Corps of Engineers, USA. 427 pp.

[19] James, L.D. and Burgess, S.J. (1982). Selections, calibration and testing of hydrologic models, Hydrologic Modelling of Small Watersheds. American Society of Agricultural Engineers, Michigan, pp. 437-472.

[20] Kathol, J.P., Werner H.D. and Trooien, T.P. (2003). Predicting Runoff for Frequency based Storm using a Prediction Runoff Model. A.S.A.E South Dakota, U.S.A.

[21] Kavian, A., Gulshan. M., Rouhani, H. and Esmali, A. (2015). Runoff and sediment load simulation using the pattern SWAT in Mazandaran Haraz watershed. Physical Geography Researches, 47 (2), 197-211.

[22] Kisi O. (2004). River flow Modeling using Artificial Neural Networks. Journal of Hydrologic Engrg, 9, 60-63.

[23] Laouacheria, E. and Mansouri, R. (2015). Comparison of WMNM and HEC-HMS for runoff Hydrograph predication in a small urban catchment. Water Resource Management, (29), 2485-2501.

[24] McColl, Ch. and Aggett, G. (2006). Land use forecasting and hydrologic model integration for improved land use decision support. Journal of Environmental Management, 84 (4), 494-512.

[25] Mosavi Nadoshani, S.S. (2006). Hydrological modeling system (HEC-HMS), Debagaran, pp 296.

[26] Muthukrishnan, S., Harbor, J., Lim, K.J., Bernard, A.E. (2006). Calibration of a simple rainfall-runoff model for long-term hydrological impact evaluation. Urban and Regional Information Systems Association (URISA), 18 (2), 35-42.

[27] Neitsch, S.L., Arnold, J.G. Kiniry J.R. and Williams, J.R. (2005). Soil Water Assessment Tool Theoretical Document, Version 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Service, TX, USA.

[28] Nielsen, S.A. and Hansen, E. (1973). Numerical simulation of the rainfall runoff process on a daily basis. Nordic Hydro, 4, 171–190.

[29] Oleyiblo, J.O. and Li, Z.J. (2010). Application of HEC-HMS for flood forecasting in Misia and Wan'an catchments in china. Water Science and Engineering, 3(1), 14-22.

[30] Perrone, J. and Madramootoo, C.A. (1997). Use of AGNPS for watershed modelling in Quebec. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 40 (5), 1349-1354.

[31] Sabzevari, T., Ardakanian, R., Shamsai, A. and Talebi, A. (2009). Hydrograph estimated basins without data using HEC-HMS simulation and geographic information system (GIS). Journal of Water Resources Engineering, 2, 1-11.

[32] Saghafian, B. and Farazjou, H. (2007). Determined prioritiy areas and causing floods in Golestan dam Watershed subbasins. Journal of Iran Watershed Management Science & Engineering, 1(1): 1-11.

[33] Shokri, S., Behnia, A.A., Radmanesh, F. and Akhond Ali, A.M. (2012). Watershed Flood Hydrograph Estimation Using HEC-HMS and Geographic Information System (Case study: Idanak Watershed). Journal of Watershed Management Research, 3(5), 63-80.

[34] Singh, V. P. (1982). Applied Modeling in Catchment Hydrology. Littleton, CO: Water Resources Publications.

[35] Sriwongsitanon, N. and Taesombat, W. (2011). Estimation of the IHACRES model parameters for Flood Estimation of Ungauged catchments in the upper ping river basin. Journal Kastsart (natural science), 45, 917-931.

[36] Sugawara, M. (1974). Tank model and its application to Bird Creek, Wollombi Brook, Bikin Rive, Kitsu River, Sanaga River and Namr Mune. Research Note of the National Research Center for Disaster Prevention, 11, 1–64.

[37] Taesombat, W. and Sriwongsitanon, N. (2010). Flood investigation for the upper Ping river basin using the mathematical models. Journal Kastsart, 44, 152–166.

[38] U.S. Army Corps of Engineers. (2008). Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) Applications Guide: Version 3.1.0. Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.

[39] United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (USDA). (1972). Hydrology. In National EngineeringHandbook. Section 4. Washington DC. US Govt. Printing office.

[40] Vahabzadeh, G., Navidifar, Y., Habibnejad, M. and Abghari, H. (2014). Investigating of the Effect of Land Use Changes on Daily River Discharge Using the HEC-HMS Model (Case study: Ajerloo Watershed, West Azerbaijan Province). Journal of Soil and Water, 24 (4), 227-236.

[41] Vaze, J., Post, D.A., Chiew, F.H.S., Perraud, J.M., Viney, N.R. and Teng, J. (2010). Climate non-stationarity-validity of calibrated rainfall–runoff models for use in climate change studies. Hydrology, 394, 447-457.

[42] Yang, T.H., Ho, J.Y., Hwang, G.D. and Lin, G.F. (2014). An indirect approach for discharge estimation: a combination among micro-genetic algorithm, hydraulic model, and in situ measurement. Flow Measurement and Instrumentation, 39, 46-53.

[43] Ye, W., Jakeman, A.J. and Young, P.C. (1997). Identification of improved rainfall runoff models for an ephemeral low-yielding Australian catchment, Environmental Modelling and Software, 13, 59-74.

[44] Yoshikawa, N., Nagao, N. and Misawa, S. (2010). Evaluation of the flood mitigation effect of a Paddy Field Dam project. Agricultral Water Management, 97(2), 259-270.

[45] Young, P.C. and Garnier, H. (2006).Identification and estimation of continuous time, data-based mechanistic (DBM) models for environmental systems. Environmental Modelling and Software, 21, 1055-1072.

[46] Zarei, M., Habibnezhad Roshan, M., Shahedi, K. and Ghanbarpour, M.R. (2010). Calibration and Evaluation of IHACRES Hydrological Model for Daily Flow Simulation. Journal of Water and Soil, 25 (1), 104-114.