هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۱۶، پاییز ۱۳۹۷، صص ۱۱۸-۱۰۱

وصول مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۳ تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۲

# شبیه‌سازی پیوسته بارش–رواناب حوضه‌ی شهرچای ارومیه با استفاده از مدل HEC-HMS

**سعید جهانبخش اصل**[۱]

**مجید رضایی بنفشه**[۲]

**هاشم رستم‌زاده**[۳]

**محمدحسین عالی‌نژاد**[*۴]

## چکیده

در محاسبات هیدرولوژیکی یک حوضه تعیین ارتباط بین بارش- رواناب بسیار مهم است. محاسبه‌ی دقیق بارش-رواناب در سطح حوضه به شناخت مؤلفه‌ها و متغیرهای شکل‌دهنده‌ی آن و همچنین استفاده از یک مدل مناسب وابسته است. در این مطالعه، بارش-رواناب پیوسته‌ی حوضه‌ی شهرچای ارومیه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS شبیه‌سازی شد. برای این منظور ابتدا مدل حوضه‌ی آبخیز با استفاده از نقشه‌ی DEM منطقه‌ی مورد مطالعه با استفاده از الحاقیه‌ی HEC-GeoHMS در محیط GIS ساخته شد. بعد از ایجاد مدل حوضه، برای محاسبه‌ی پارامترهای تأثیرگذار در مدل HEC-HMS اقدام شد و برای تلفات از روش رطوبت خاک (SMA)، برای روندیابی رودخانه از روش ماسکینگهام و برای جریان پایه از روش بازگشتی استفاده شد. با به دست آمدن مدل حوضه و ایجاد مدل‌های هواشناسی، کنترل و وارد کردن سایر پارامترهای لازم، مدل اجرا شد. شبیه‌سازی در دوره‌ی ۲۰۱۳-۲۰۰۴، انجام شد که

---

۱- استاد گروه آب و هواشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- استاد گروه آب و هواشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- استادیار گروه آب و هواشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۴- دانشجوی دکتری رشته آب‌وهواشناسی دانشگاه تبریز، تبریز، ایران (نویسنده مسئول).

Email:aalineghad63@yahoo.com

دوره‌ی پایه به دو دوره‌ی واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۴) و اعتبارسنجی (۲۰۱۳-۲۰۱۱) تقسیم شد. مدل با دقت نسبتاً بالایی شبیه‌سازی را انجام داد. به‌طوری که ضریب تعیین برای دوره‌ی واسنجی ۰/۷۲ و برای دوره‌ی اعتبارسنجی ۰/۷۸ بود. نتایج پژوهش حاضر دلالت بر توانایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوضه‌ی شهرچای و همچنین قابلیت استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی به منظور دقت در تأمین ورودی‌های مدل را دارد.

**کلمات کلیدی:** بارش-رواناب، شبیه‌سازی پیوسته، HEC-HMS، حوضه‌ی شهرچای.

## مقدمه

شبیه‌سازی پیوسته‌ی بارش-رواناب در بسیاری از مطالعات هیدرولوژیکی، از جمله بررسی اثر تغییراقلیم بر جریان رودخانه، پیش‌بینی سیلاب و برنامه‌ریزی منابع آب، از اهمیت ویژه برخوردار است. این پدیده، مستلزم شناخت مؤلفه‌ها و متغیرهای شکل دهنده‌ی آن است. یکی از مهم‌ترین محاسبات هیدرولوژیکی برای یک حوضه، تعیین ارتباط بین بارش و رواناب است (کارآموز و عراقی‌نژاد، ۱۳۹۳: ۱۸۵). میزان تبدیل آب حاصل از بارش، به حجم رواناب، وابسته به پارامترهای اقلیمی و فیزیکی حوضه است. طبق معادله‌ی پیوستگی، میزان رواناب حاصل از بارش با مجموع جبری آب سطحی، نفوذ و تبخیر برابر می‌باشد. تخمین ناصحیح هر یک از مؤلفه‌های ذکر شده، موجب عدم دستیابی به نتیجه‌ی درست در شبیه‌سازی بارش- رواناب می‌شود (مدرسی و عراقی‌نژاد، ۱۳۹۳: ۲۳). میزان ذوب برف زمانی در شرایط محیطی که بارش‌هایی به صورت برف نازل شده باشد، باید در مدل‌سازی تخمین زده شود. برای شبیه‌سازی در حوضه‌های کوهستانی که عمده‌ی بارش به صورت برف بر زمین می‌بارد، محاسبه‌ی این پارامتر ضروری است. نرم‌افزار HEC-HMS یک نرم‌افزار مدل‌سازی هیدرولوژیکی از نوع شبیه‌سازی (با قابلیت بهینه‌سازی پارامترها) است که توسط مرکز مهندسی هیدرولوژیکی ارتش آمریکا تولید شده‌است. اولین نسخه‌ی آن در سال ۱۹۶۷ ارائه شده است (Hydrologic Engineering Center, 2000: 4). همچنین این مرکز مهندسی در راستای افزایش دقت اطلاعات ورودی به نرم‌افزار HEC-HMS،

الحاقیه‌ای را با عنوان HEC-GeoHMS ایجاد کرده است (Users Manual of HEC-GeoHMS, 2010: 3). یکی از مهم‌ترین کاربردهای این نرم‌افزار کالیبره کردن و تخمین پارامترهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبخیز است. به جهت اهمیت و وسعت استفاده از این نرم‌افزار در سطح دنیا مطالعات زیادی صورت گرفته است که به بعضی از آن‌ها اشاره می‌شود.

کتول[1] و همکاران (۲۰۰۳)، به‌منظور تعیین دبی اوج و حجم رواناب در دو حوضه‌ی کشاورزی، در جنوب شرق ایالت داکوتای جنوبی با استفاده از مدل HEC-HMS، به این نتیجه رسیدند که مقدار شماره‌ی منحنی دارای حساسیت بالایی است، در صورتی که مقدار تلفات اولیه دارای حساسیت کمتری نسبت به تغییر مقدار تابع هدف در مدل HEC-HMS است. شیعه[2] و همکاران (۲۰۰۷)، از نرم‌افزارهای HEC-HMS و HEC-RAS به‌منظور شبیه‌سازی جریان و بررسی اثر احداث بند تنظیمی در حوضه‌ی تسنگون تایوان استفاده کردند. نتایج نشان داد که تأثیر احداث سازه بر خصوصیات جریان در سطح اطمینان ۹۵٪ معنادار بوده است. زی فنگ و استینمن[3] (۲۰۰۹)، در مطالعه‌ای بر روی حوضه‌ی دریاچه‌ی مونو میشیگان با مدل HEC-HMS اقدام به شبیه سازی رواناب حوضه در دو نوع پیوسته و رخدادی نمودند. آنها در شبیه‌سازی پیوسته از روش تلفات SMA[4] و در شبیه‌سازی رخدادی از روش SCS[5] استفاده کردند. در مطالعه‌ای با عنوان تأثیر تغییراقلیم بر هیدرولوژی حوضه‌ی آبخیز رودخانه‌ی تونگا در هند که توسط مینو[6] و همکاران (۲۰۱۲) انجام گرفت، از مدل HEC-HMS برای شبیه‌سازی رواناب استفاده شد. وردهن[7] و همکاران (۲۰۱۳)، در مطالعه‌ای توانایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در یکی از زیرحوضه‌های هیمالیا با استفاده از شاخص دما و

1- Kathol
2- Shieh
3- Xuefeng and Steinman
4- Soil Moisture Accounting
5- Soil Conservation Service
6- Meenu
7- Verdhen

تجزیه و تحلیل فضایی و زمانی پارامترهای مدل را بررسی کردند. نتایج شبیه‌سازی با ضریب تعیین، ۰/۷ حاکی از رضایت‌بخش بودن روش بوده است، همچنین آن‌ها نتیجه گرفتند که مدل ذوب برف HEC-HMS حساسیت زیادی به پارامتر میزان ذوب سرد (ATI Cold Melt rate functions) دارد. چودری[1] و همکاران (۲۰۱۴)، تعداد ۲۴ رخداد بارش رگباری بین سال‌های ۲۰۱۰ الی ۲۰۱۳ در حوضه‌ی آبخیز اودیشای هند را با استفاده از مدل HEC-HMS شبیه‌سازی کردند. آن‌ها برای محاسبه‌ی تلفات از روش SCS، برای محاسبه‌ی بارش به رواناب از روش هیتوگراف واحد SCS، برای محاسبه‌ی جریان پایه از روش بازگشتی[2] و برای روندیابی جریان از روش ماسکینگام[3] بهره بردند. داریان و همکاران (۲۰۱۶)، به‌منظور شبیه‌سازی سیلاب در حوضه‌ی آجی چای از مدل HEC-HMS استفاده کردند. آن‌ها همچنین مدل حوضه را از الحاقیه‌ی HEC-GEOHMS ترسیم نمودند. در ادامه برای واسنجی مدل علاوه بر دو روش موجود در نرم‌افزار شامل روش‌های نلدر مید (NM) و تک‌متغیره (UG)، با استفاده از الگوریتم ژنتیک اقدام به یک مدل خودکار نمودند که نتایج این مطالعه بیانگر دقت بالاتر روش مذکور نسبت به دو روش مرسوم بود.

مطالعات انجام شده در داخل کشور بیشتر به تعیین سیل‌خیزی زیرحوضه‌های مختلف با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک و پهنه‌بندی سیلاب با استفاده از مدل‌های هیدرولیکی پرداخته است که مطالعات شقایی فلاح (۱۳۸۰) در حوضه‌ی محمدآباد استان گلستان، خسروشاهی (۱۳۸۲) در حوضه‌ی آبخیز دماوند، جوکار (۱۳۸۱) در رودخانه‌ی شاپور با مدل HEC-HMS از مطالعاتی می‌باشد که کارایی مدل مذکور را تأیید می‌نمایند. جهانگیر و همکاران (۱۳۸۷)، در مطالعه‌ای رواناب ناشی از چند واقعه‌ی سیل در حوضه‌ی معرف کارده در استان خراسان را با دو روش شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANNs) و مدل HEC-HMS شبیه‌سازی کردند. آن‌ها در شبکه از روش پرسپترون

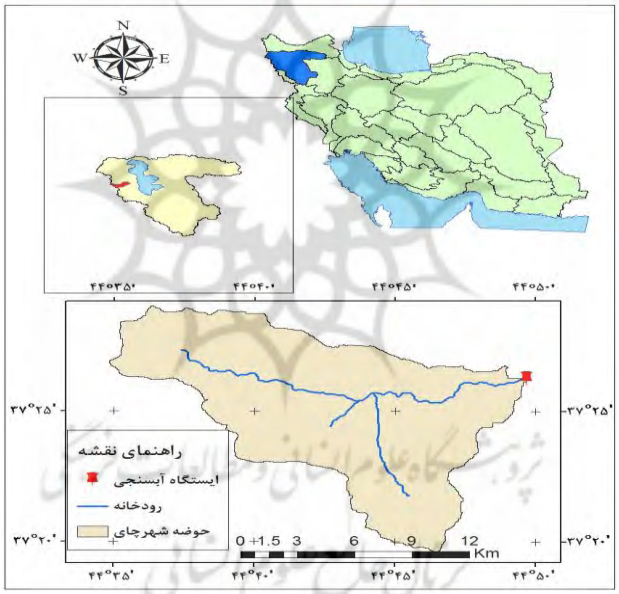
1- Choudhary
2- Recession
3- Muskingum

چند لایه و در مدل از روش SCS استفاده کردند. نتایج نشان از قابلیت هر دو روش در شبیه‌سازی داشت با این وجود شبکه‌ی عصبی مصنوعی در تمامی موارد نسبت به روش دیگر از دقت نسبتاً بالاتری برخوردار بود. کاراندیش و همکاران (۱۳۸۹) در مطالعه‌ای رواناب ناشی از ذوب برف در زیرحوضه‌ی پل شالو کارون را با مدل HEC-HMS شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که مدل مذکور قابلیت بالایی در تفکیک رواناب برف از باران را دارد. کمالی و موسوی (۱۳۸۹)، به‌منظور واسنجی مدل HEC-HMS مطالعه‌ای را در حوضه‌ی آبخیز تمر از زیرحوضه‌های سد گرگانرود انجام دادند، نتایج حاصل بیانگر اهمیت انتخاب تابع هدف در مقادیر بهینه از پارامتر مدل بود. کریمی و همکاران (۱۳۹۰)، در حوضه‌ی آبخیز چهل‌گزی سنندج با استفاده از مدل HEC-HMS، هیدروگراف ۷ واقعه سیل را با استفاده از روش‌های هیدروگراف واحد مصنوعی SCS، اشنایدر و کلارک شبیه‌سازی کردند. آن‌ها بیان کردند که نتایج بیانگر این واقعیت است که روش SCS نسبت به روش‌های کلارک و اشنایدر از قابلیت بهتری برخوردار بود. یعقوبی و مساح بوانی (۱۳۹۲)، به تحلیل حساسیت و عملکرد سه مدل هیدرولوژیکی HIV، IHARCES و HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب پیوسته پرداختند. در این بررسی، پارامترهای مربوط به روش تلفات SMA در مدل HEC-HMS به عنوان پارامترهای حساس معرفی شدند. امیراحمدی و همکاران (۱۳۹۴)، در مطالعه‌ای بر روی حوضه‌ی هونجان در استان اصفهان به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی این حوضه با استفاده از مدل HEC-HMS پرداختند. نتایج بیانگر حساسیت سه پارامتر شماره‌ی منحنی (CN)، شیب و مساحت در سیل‌خیزی حوضه بود.

رودخانه‌ی شهرچای نقش مهمی در تأمین آب مورد نیاز در بخش تأمین آب شهری، کشاورزی و صنعت منطقه ایفا می‌کند. آگاهی از میزان رواناب برای برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت منابع آب منطقه ضرورت دارد. با توجه به اینکه جریان این رودخانه نقش حیاتی در کشاورزی، صنعت و گردشگری منطقه دارد، هدف این مطالعه، شبیه‌سازی رواناب با استفاده از مدل HEC-HMS در حوضه‌ی شهرچای ارومیه است.

## مواد و روش‌ها

حوضه‌ی شهرچای ارومیه در قسمت غربی دریاچه‌ی ارومیه واقع شده است. مساحت تقریبی آن ۱۶۷/۷۵ کیلومترمربع است، موقعیت جغرافیایی آن بین ´۸۲ °۴۴ تا ´۵۸ °۴۴ طول شرقی و ´۳۲ °۳۷ تا ´۴۸ °۳۷ عرض شمالی واقع شده است. ارتفاع ایستگاه آب سنجی برده‌سور ۱۵۹۱ متر و حداکثر ارتفاع حوضه، معادل ۳۵۷۴ متر (واقع در مرز ایران و ترکیه) می‌باشد. شکل (۱) موقعیت حوضه‌ی آبخیز شهرچای ارومیه را در میان حوضه‌های آبخیز کشور و حوضه‌ی آبخیز دریاچه‌ی ارومیه نشان می‌دهد.




**شکل (۱) موقعیت حوضه‌ی شهرچای در میان حوضه‌های کشور و دریاچه‌ی ارومیه**

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی رواناب سطحی از مدل HEC-HMS و برای ترسیم مدل حوضه، از الحاقیه‌ی HEC-GEOHMS استفاده شد. برای این منظور از داده‌های دما و بارش ایستگاه سینوپتیک ارومیه و میزان دبی روزانه‌ی جریان رودخانه، در ایستگاه هیدرومتری برده‌سور (واقع در خروجی حوضه) استفاده شد.

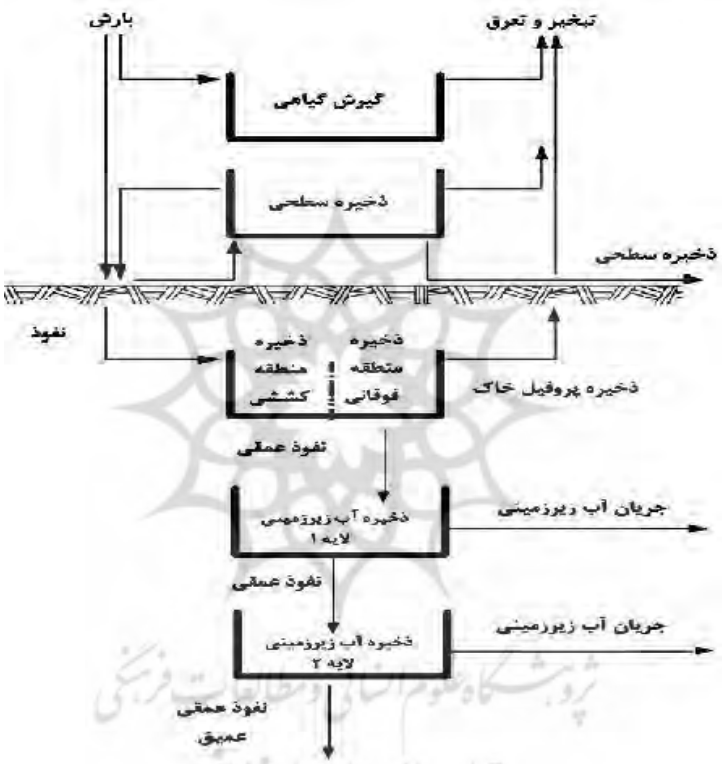
**ـ مدل HEC-HMS**

برای شبیه‌سازی در مدل HEC-HMS ابتدا مدل حوضه‌ی با استفاده از نقشه‌ی DEM منطقه‌ی مورد مطالعه، با استفاده از الحاقیه‌ی HEC-GeoHMS در محیط GIS ساخته شد. برای این منظور، ابتدا مراحل پیش پردازش مدل، شامل تهیه‌ی نقشه‌ی جهت جریان، جهت تجمعی جریان، تعیین مسیر جریان، و در نهایت استخراج زیرحوضه‌ها و استخراج لایه‌ی خطی آبراهه انجام شد. در مرحله‌ی بعد با معرفی موقعیت ایستگاه آب‌سنجی برده‌سور به عنوان خروجی حوضه، محدوده‌ی پروژه مشخص شد. برخی از پارامترهای مورد نیاز مدل‌سازی از جمله مساحت، طول و شیب رودخانه، شیب حوضه و مرکز ثقل حوضه، تعیین زمان تمرکز و زمان تأخیر حوضه توسط نرم‌افزار مذکور محاسبه شد (User's Manual of HEC-GeoHMS, 2010:35).

بعد از ایجاد مدل حوضه، برای محاسبه‌ی تلفات آب در حوضه، جریان پایه، روندیابی رودخانه و چندین پارامتر دیگر اقدام شد. برای تلفات از روش رطوبت خاک (SMA)، برای روندیابی رودخانه از روش ماسکینگهام و برای جریان پایه از روش بازگشتی استفاده شد.

مدل SMA در HMS-HEC بر اساس مدل بارندگی لیوزلی و همکاران (۲۰۰۲) طراحی شده است. این مدل حرکت آب و ذخیره آن را در گیاهان، سطح خاک و عمق خاک و لایه‌های زیرزمینی شبیه‌سازی کرده و با داشتن مقدار بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (ET) مدل جریان سطحی و جریان آب زیرزمینی، تلفات ناشی از تبخیر و تعرق پتانسیل و نفوذ را در کل حوضه محاسبه می‌کند. مدل SMA شامل یکسری لایه های ذخیره‌کننده‌ی و جریان است که در شکل (۲) نمودار مفهومی آن آورده شده است. از لحاظ مفهومی الگوریتم SMA-HMS مسیر بارش را به پنج زون در یک حوضه‌ی آبخیز تقسیم می‌کند. ۱۲ پارامتر برای مدلسازی فرایند هیدرولوژیک گیرش گیاهی، ذخیره‌ی چالابی، نفوذ، ذخیره‌ی خاک، نفوذ عمقی و ذخیره‌ی آب زیرزمینی لازم است. عمق‌های بیشینه هر زون ذخیره، درصدی که هر زون ذخیره در آغاز شبیه‌سازی پر

می‌شود و نرخ انتقال مانند نرخ نفوذ بیشینه برای شبیه‌سازی حرکت آب درون زون‌های ذخیره مورد نیاز است. تبخیر و تعرق پتانسیل است. افزون بر بارش، تنها ورودی دیگر برای الگوریتم SMA، نرخ تبخیر و تعرق پتانسیل است.




**شکل (۲) طرح کلی مفهومی الگوریتم محاسبه رطوبت خاک پیوسته**

محاسبه‌ی زمان تأخیر (CN Lag): زمان تأخیر حوضه (برحسب ساعت) عبارت است از فاصله‌ی زمانی میان مدت بارش تا زمان رخ دادن دبی اوج (که برای حوضه‌های کمتر از ۲۰۰۰ ایکرز) از رابطه‌ی زیر به دست آمد:

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8} \times (S+1)^{0.7}}{(1900 \times Y^{0.5})}$$ رابطه‌ی (۱)

که در رابطه‌ی فوق: L: طول آبراهه‌ی اصلی بر حسب فوت، Y: میانگین شیب حوضه‌ی آبخیز بر حسب درصد و S: ضریب نگهداشت سطحی است که از رابطه‌ی زیر به دست آمد.

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \qquad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

که در آن CN: شماره‌ی منحنی خاک حوضه است که بسته به نوع پوشش منطقه از ۵۰ تا ۹۵ متغیر می‌باشد. برای محاسبه‌ی زمان تمرکز (بر حسب ساعت) از رابطه‌ی زیر استفاده شد.

$$TC = 1.67 \times T_{lag} \qquad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

در شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه‌ی شهرچای به وسیله‌ی مدل HEC-HMS، در دوره‌ی ۲۰۱۳-۲۰۰۴، بهترین دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی برای به حداقل رساندن خطای شبیه‌سازی انتخاب شدند. بدین‌ترتیب که دوره‌ی پایه به دو دوره‌ی واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۴) و اعتبارسنجی (۲۰۱۳-۲۰۱۰) تقسیم شد. معیار عملکرد مدل در شبیه‌سازی‌ها بر اساس ضریب نش (NASH)، ضریب تعیین (R2) و مجذور مربعات خطای میانگین (RMS) در نظر گرفته شد. این مدل برای شبیه‌سازی نیاز به مقادیر اولیه‌ی بعضی از پارامترها را دارد و به خاطر اینکه بتوان مقادیر این پارامترها را صفر در نظر گرفت، شبیه‌سازی از اول پاییز شروع شد.

در اینجا برای جزئیات بیشتر خواننده به منبع زیر ارجاع داده می‌شود (User's Manual of HEC-GeoHMS, 2010:35).

**ـ محاسبه‌ی میزان ذوب برف**

برای تشخیص بارش برف و باران از شاخص درجه حرارت هوا استفاده شد. این شاخص یکی از ملحقات روش درجه-روز برای مدل‌سازی برف است. در این روش، حوضه به

طبقات ارتفاعی تقسیم شد و درصد مساحت هر زیرحوضه در هر کلاس ارتفاعی به مدل معرفی شد.

فاکتور درجه-روز به صورت مقدار عمق آب ذوب شده از برف به تعداد درجه- روز تعریف می‌شود و به شکل رابطه‌ی زیر بیان می‌گردد.

$$M = a.T \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

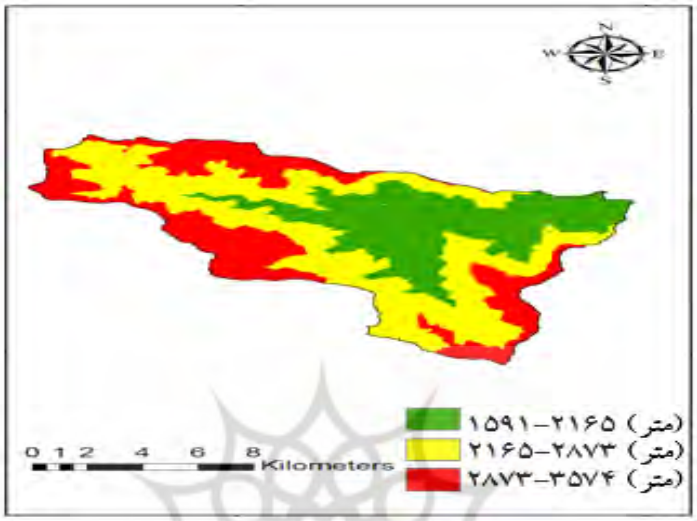
در رابطه‌ی فوق: a: عامل درجه روز ($cm.°C^{-1}.d^{-1}$)، M: عمق ذوب برف روزانه (cm)، T: تعداد درجه-روز (°C.d) است. در صورت نبودن داده، فاکتور درجه-روز می‌تواند با استفاده از رابطه‌ی تجربی زیر به دست آید.

مقدار پارامترهای لازم برای مدل ذوب برف در مطالعه‌ی جهانبخش و همکاران (۱۳۹۴)، برای حوضه‌ی شهرچای آورده شده است.

## نتایج و بحث

شکل (۳) نقشه‌ی تراز ارتفاعی[1] منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این نقشه از مدل ارتفاعی رقومی[2] منطقه‌ی مورد مطالعه با تفکیک مکانی ۳۰ متر تهیه شده است و در جدول (۱) نتایج محاسبات ارتفاعی در حوضه‌ی شهرچای ارائه شده است. به‌طوری‌که از جدول (۱) می‌توان استنباط کرد گرچه فواصل طبقات ارتفاعی در هر کلاس مساوی با طبقات دیگر است با این وجود بیشترین درصد مساحت متعلق به کلاس (۲۱۶۵-۲۸۷۳) می‌باشد، به عبارت دیگر حدود ۶۳ درصد از مساحت حوضه دارای ارتفاع متوسط (مابین ۲۸۷۳-۲۱۶۵ متر) می‌باشد. در این طبقه، مساحت اراضی حدود ۱۱۱ کیلومتر مربع است.

1- Hypsometric
2- DEM (Digital Elevation Model)



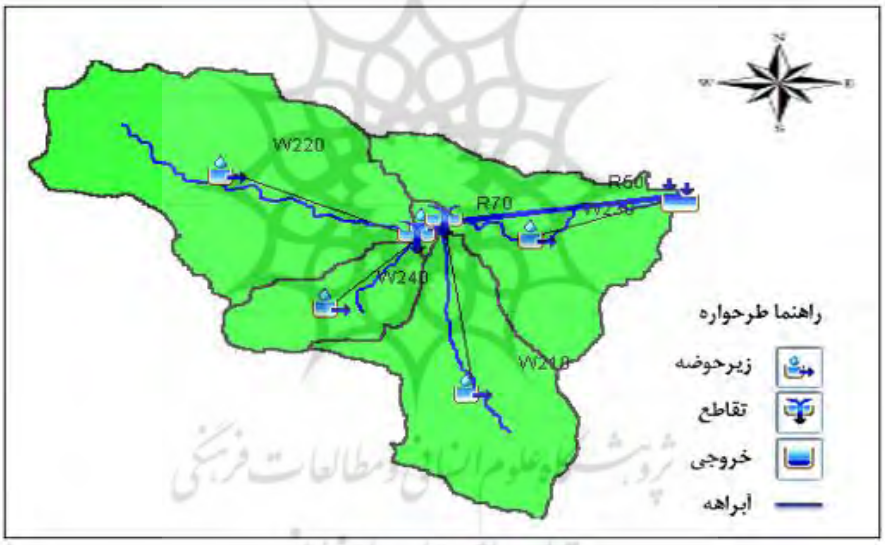

**شکل (۳) نقشه‌ی مناطق ارتفاعی حوضه‌ی شهرچای**

**جدول (۱) نتایج محاسبات ارتفاعی در حوضه‌ی شهرچای**

| طبقه‌ی ارتفاعی (متر) | مساحت(کیلومترمربع) | درصدمساحت(درصد) | ارتفاع متوسط(متر) |
|---|---|---|---|
| ۱۵۹۱-۲۱۶۵ | ۳۱/۵۵ | ۱۷/۸۵ | ۱۹۶۲ |
| ۲۱۶۵-۲۸۷۳ | ۱۱۱/۲ | ۶۲/۹۱ | ۲۵۳۴ |
| ۲۸۷۳-۳۵۷۴ | ۳۴ | ۱۹/۲۴ | ۳۰۳۸ |
| جمع | ۱۷۶/۷۵ | ۱۰۰ | ۲۵۳۰ |

در شکل (۴)، مدل حوضه در نرم‌افزار HEC-HMS نشان داده شده است. همان‌طورکه از شکل مشخص است، حوضه‌ی مورد مطالعه به ۵ زیرحوضه و ۵ آبراهه‌ی فرعی تقسیم شده است. تمامی محاسبات در مدل HEC-HMS در هر زیرحوضه و آبراهه‌ی فرعی به صورت مجزا انجام می‌شود. همچنین جدول (۲)، مشخصات فیزیوگرافی کمینه، متوسط و بیشینه برخی واحدهای هیدرولوژیکی مهم حوضه را نشان می‌دهد. جدول (۳)، مقدار پارامترهای مورد استفاده در زیرحوضه‌ی W230 در قسمت خروجی حوضه و آبراهه R70 را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که این پارامترها برای هر زیرحوضه متفاوت بوده و

همچنین می‌توان برای به دست آوردن هر کدام از پارامترهای مذکور از روش‌های مختلفی در عناصر حوضه استفاده کرد. با توجه به جدول (۳)، مقدار ثابت k در آبراهه برای روندیابی ۲۰ ساعت و مقدار ضریب X در مدل ماسکینگهام ۰/۵ در نظر گرفته شد. با این مفروضات، روندیابی جریان از ابتدای هر زیر بازه از رودخانه تا انتهای آن به انجام رسید. تعداد این زیربازه‌ها ۱۱ تا بود. پارامترهای جریان در مدل HEC-HMS در جدول (۳) آمده است. مقدار پارامترهای روش تلفات در حوضه‌ی شهرچای ارومیه نیز در جدول (۴) آورده شده است.




**شکل (۴) مدل حوضه‌ی شهرچای ارومیه در نرم‌افزار HEC-HMS**

**جدول (۲) مشخصات فیزیوگرافی زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها در حوضه‌ی شهرچای**

| واحد هیدرولوژیکی | کمینه | متوسط | بیشینه | جمع |
|---|---|---|---|---|
| مساحت زیر حوضه (کیلومتر مربع) | ۱/۷۵ | ۳۵/۷ | ۷۱/۶۲ | ۱۷۸/۴۸ |
| طول رودخانه (متر) | ۲۴۲ | ۵۴۵۹ | ۱۳۰۸۷ | ۳۸۲۱۶ |
| شیب زیرحوضه (درجه) | ۳۸/۸ | ۴۵/۹ | ۵۳/۹ | - |

**جدول (۳) پارامترهای جریان در مدل HEC-HMS در حوضه‌ی شهرچای**

| پارامتر | توضیح | واحد هیدرولوژیکی | مقدارپارامتر |
|---|---|---|---|
| Muskingum K(hr) | زمان سفر در آبراهه | آبراهه | ۲۰ |
| Muskingum X | وزن اثرگذاری جریان بر میزان ذخیره آبراهه | آبراهه | ۰/۵ |
| Subreaches | تعداد بخش‌های آبراهه | آبراهه | ۱۱ |

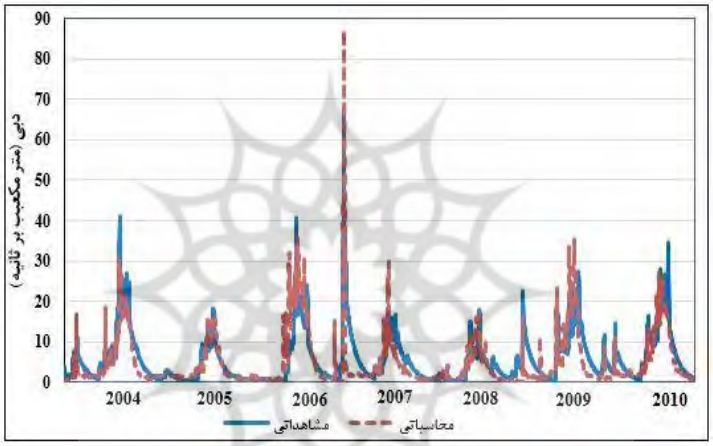
**جدول (۴) مقدار پارامترهای روش تلفات در حوضه‌ی شهرچای ارومیه**

| پارامتر (واحد) | شرح مختصر | مقدارپارامتر |
|---|---|---|
| Infiltration Max (mm/h) | حداکثر سرعت نفوذ آب در لایه‌ی بالایی به درون خاک | ۰/۵ |
| Soil Storage (mm) | کل ظرفیت ذخیره‌ی آب در لایه خاک بر حسب ارتفاع آب. | ۰/۵ |
| Tension Storage (mm) | مقدار آب ذخیره شده که تحت نیروهای کششی که از خاک جدا نمی‌شود. | ۰/۶ |
| Soil Percolation (mm/h) | بیشترین سرعت تراوش آب از لایه‌ی خاک به لایه‌ی آب زیرزمینی بالاتر. | ۰/۸ |
| GW 1 Storage (mm) | کل آب قابل ذخیره در لایه‌ی آب زیر زمینی بالاتر | ۵۰ |
| GW1 Percolation (mm/h) | بیشترین سرعت تراوش آب آز لایه‌ی بالاتر به پایین‌تر آب زیرزمینی | ۰/۸ |
| GW 1 Coefficient (hr) | مقدار تأخیر زمانی برای تبدیل شدن آب ذخیره شده به جریان | ۷۰۰ |
| GW 2 Storage (mm) | کل آب قابل ذخیره در لایه‌ی زیرزمینی پایین‌تر | ۵۰ |
| GW2 Percolation (mm/h) | بیشترین سرعت تراوش آب از لایه‌ی پایین‌تر به لایه عمیق (خارج از این سیستم) | ۰/۸ |
| GW 2 Coefficient (hr) | مقدار تأخیر زمانی برای تبدیل شدن آب ذخیره شده در یک مخزن خطی به جریان | ۶۰۰ |

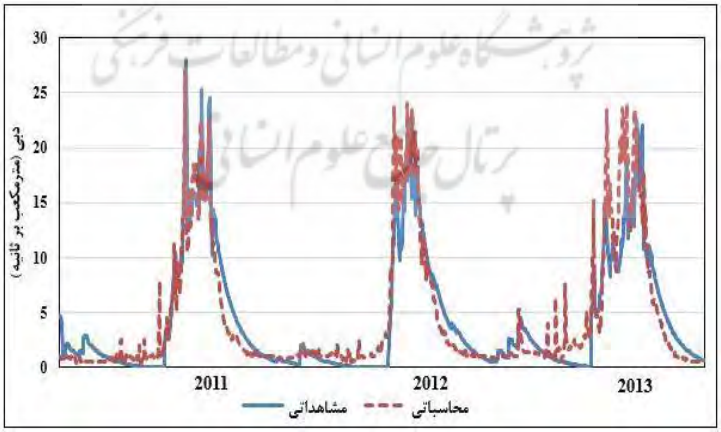
### ـ شبیه‌سازی بارش ـ رواناب در حوضه‌ی شهرچای با مدل HEC-HMS

با به دست آمدن مدل حوضه توسط الحاقیه‌ی HEC-GEOHMS در نرم‌افزار ARCGIS، و ایجاد مدل‌های هواشناسی، کنترل و وارد کردن سایر پارامترهای لازم، مدل اجرا شد. شکل‌های ۵ و ۶ نتیجه‌ی شبیه‌سازی بارش-رواناب را در دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی در محل ایستگاه هیدرومتری برده‌سور نشان می‌دهد. در این شکل‌ها جریان مشاهداتی

با رنگ آبی و جریان محاسباتی با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند. با مقایسه‌ی اختلاف روند جریان‌های مشاهداتی و محاسباتی و همچنین با توجه به شاخص‌های عملکرد مدل که در جدول (۵) آمده است که در آن ضریب تبیین بالا و ضریب خطای کم محاسبه شده است می‌توان نتیجه گرفت که مدل با دقت نسبتاً بالایی شبیه‌سازی را انجام داده است. مخصوصاً مدل دبی‌های اوج را به طور مناسب شبیه‌سازی کرده است.




**شکل (۵) مقایسه‌ی هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی در دوره‌ی واسنجی (۲۰۱۰-۲۰۰۴)**




**شکل (۶) مقایسه‌ی هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی در دوره‌ی صحت‌سنجی (۲۰۱۳-۲۰۱۱)**

جدول (۶) نتایج مقادیر محاسباتی و مشاهداتی را نشان می‌دهد. با مقایسه‌ی مقادیر مشاهداتی با محاسباتی این جدول عملکرد خوب مدل در شبیه‌سازی نشان داده شده است.

**جدول (۵) شاخص‌های عملکرد مدل HEC-HMS در دوره‌ی واسنجی و صحت‌سنجی**

| عنوان دوره | طول دوره | $R^2$ | RMSE | NASH |
|---|---|---|---|---|
| دوره‌ی واسنجی | ۲۰۰۴/۰۹/۲۲ -۲۰۱۰/۰۹/۲۲ | ۰/۷۲ | ۴/۵ | ۰/۷ |
| دوره‌ی اعتبارسنجی | ۲۰۱۰/۰۹/۲۳ -۲۰۱۳/۰۹/۲۲ | ۰/۷۸ | ۳/۸ | ۰/۶ |

**جدول (۶) نتایج ارزیابی شبیه‌سازی رواناب حوضه‌ی شهرچای با مدل HEC-HMS در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی**

| پارامتر | مقدار | واحد |
|---|---|---|
| حجم رواناب مشاهداتی در دوره‌ی واسنجی | ۱۲۴۲۴/۸ | میلیون متر مکعب |
| حجم رواناب محاسباتی در دوره‌ی واسنجی | ۱۳۲۱۴/۶ | میلیون متر مکعب |
| حجم رواناب مشاهداتی در دوره‌ی اعتبارسنجی | ۴۹۸۵/۷ | میلیون متر مکعب |
| حجم رواناب محاسباتی در دوره‌ی اعتبارسنجی | ۵۱۵۸/۶ | میلیون متر مکعب |
| میانگین دبی مشاهداتی دوره‌ی واسنجی | ۴/۸ | متر مکعب بر ثانیه |
| میانگین دبی محاسباتی دوره‌ی واسنجی | ۵/۲ | متر مکعب بر ثانیه |
| میانگین دبی مشاهداتی دوره‌ی اعتبارسنجی | ۴/۶ | متر مکعب بر ثانیه |
| میانگین دبی محاسباتی دوره‌ی اعتبارسنجی | ۴/۸ | متر مکعب بر ثانیه |

## نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج شبیه‌سازی در دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی و همچنین معیارهای ارزیابی مدل، مشخص شد که مدل HEC-HMS قابلیت بالایی در شبیه‌سازی بارش-رواناب حوضه‌ی شهرچای را داشته است. لازم به ذکر است که استفاده از الحاقیه‌ی HEC-GEOHMS در ترسیم مدل حوضه نقش زیادی در افزایش دقت مدل در شبیه‌سازی بارش-رواناب داشته است به‌طوری‌که در مطالعه یعقوبی (۱۳۹۲)، دقت این مدل در شبیه‌سازی بارش رواناب ضعیف‌تر از مدل‌های دیگر بود که احتمالاً یکی از

دلایل آن استفاده نکردن از الحاقیه‌ی HEC-GEOHMS و نبود ایستگاه سینوپتیک در منطقه‌ی مورد مطالعه بوده است. با این وجود در سایر مطالعات از جمله مطالعه‌ی وردهن و همکاران (۲۰۱۳) و برهانی داریان و همکاران (۲۰۱۶)، به علت استفاده نامبردگان از الحاقیه‌ی HECGEO-HMS نتیجه‌ی خوبی از عملکرد مدل گزارش داده‌اند که این پژوهش نیز در انطباق با آن‌ها می‌باشد. نتایج تحقیق حاضر دلالت بر توانایی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی رفتار هیدرولوژیک حوضه‌ی آبریز شهرچای دارد. همچنین قابلیت استفاده از سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی به منظور دقت در تأمین ورودی‌های مدل و مشاهده‌ی خروجی‌ها، کارایی تلفیق آن‌ها را نشان می‌دهد. ترکیب حاضر در صورتی که با داده‌های مناسب هیدرومتری و بارش همراه باشد با دقت مناسبی قادر به شبیه‌سازی پدیده بارش- رواناب می‌باشد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

## منابع


- امیراحمدی، ابوالقاسم؛ محمدنیا، ملیحه و نگار گلشنی (۱۳۹۴)، **تحلیل حساسیت متغیرهای ژئومورفولوژی موثر بر سیلاب با استفاده از مدل HEC-HMS (مورد مطالعه: زرچشمه هونجان- استان اصفهان)**، هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۳، صص ۴۲-۲۱.

- جهانبخش اصل، سعید؛ دین‌پژوهی و عالی‌نژاد محمدحسین (۱۳۹۴)، **مقایسه‌ی مدل‌های SRMو HEC-HMS در شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف حوضه‌ی آبخیز شهرچای ارومیه**، هیدروژئومورفولوژی، شماره‌ی ۵، صص ۱۱۷-۱۰۱.

- جهانگیر، علیرضا؛ رائینی، محمود و احمدی میرخالق ضیاء (۱۳۸۷)، **شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب با شبکه‌ی عصبی مصنوعی (ANNs) و مدل HEC-HMS در حوضه‌ی معرف کارده**، مجله‌ی آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، شماره‌ی ۲، صص ۸۴-۷۲.

- خسروشاهی، محمد و محمد ثقفیان (۱۳۸۲)، **بررسی نقش مشارکت زیرحوضه‌های آبخیز در شدت سیل‌خیزی**، پژوهش و سازندگی، شماره‌ی ۲۲، صص ۶۷-۷۵.

- کارآموزۀ محمد و شهاب عراقی‌نژادۀ (۱۳۹۳)، **هیدرولوژی پیشرفته**، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر(پلی‌تکنیک تهران)، چاپ سوم.

- کاراندیش، فاطمه؛ ابراهیمی، کیومرث و علی شاه‌نظری (۱۳۸۹)، **شبیه‌سازی رواناب حاصل از بارش برف و باران با استفاده از برنامه‌ی HEC-HMS مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی کارون- خروجی پل شالو**، اولین همایش ملی مدیریت منابع آب اراضی ساحلی، دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ۱۷ الی ۱۸ آذر ۱۳۸۹.

- کریمی، مریم؛ ملکی‌نژاد، حسین؛ عبقری، هیراد؛ و محمدصادق عزیزیان (۱۳۹۰)، **ارزیابی روش‌های مختلف شبیه‌سازی هیدروگراف سیل با استفاده از بسته نرم‌افزاری HEC-HMS (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز چهل‌گزی)**، مجله‌ی پژوهش آب ایران، شماره‌ی ۵(۹): ۳۸-۲۹.

ـ کمالی، بهاره و سیدجمشید موسوی (۱۳۸۹)، **کالیبراسیون خودکار مدل مفهومی HEC-HMS با رویکرد شبیه‌سازی-بهینه‌سازی، پنجمین کنگره‌ی ملی مهندسی عمران**، ۱۴ الی ۱۶ اردیبهشت ۱۳۸۹، دانشگاه فردوسی مشهد.

ـ مدرسی، فاطمه و شهاب عراقی‌نژاد (۱۳۹۳)، **آموزش کاربردی مدل‌سازی هیدرولوژکی حوضه‌ی آبخیز در HEC-HMS و HEC-GEOHMS**، تهران، نوآور، چاپ اول، ۱۳۹۳.

-Dariane, Alireza B. Javadianzadeh, M.M. James, L. Douglas. (2016), **Developing an Efficient Auto-Calibration Algorithm for HEC-HMS Program JO.**, Water Resources Management, Vol. 30, Issue 6, PP.1923-1937.

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

-Leavesley, G.H., S.L. Markstrom, P.J. Restrepo & R.J. Viger. (2002), **A Modular Approach to Addressing Model Design, Scale and Parameter Estimation Issues in Distributed Hydrological Modeling**, Hydrological Processes, No. 16, PP.173-187.

-Shieh Ch. L. Guh Y.R. & Wang Sh. O. (2007), **The application of range of variability approach to the assessment of a check dam on riverine habitat alteration**, Environ Geol., 52, PP.427-435.

-Verdhen A. Chahar B. & Sharma O. (2013), **Snowmelt Runoff Simulation Using HEC-HMS in a Himalayan Watershed**, World Environmental and Water Resources Congress, PP.3206-3215.