

# ارزیابی کارایی مدل HSPF در شبیه‌سازی متوسط ماهانه دبی جریان و تولید رسوب در حوضه‌ی آبریز آبرو واقع در استان همدان

مرتضی علوی‌نیا<sup>۱</sup>، فرزین نصیری صالح<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار دانشکده‌ی مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

nasiri\_f@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۴/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۵/۲۶

**چکیده-** امروزه استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی به منظور درک بهتر فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز بسیار گسترش یافته و تحقیقات بسیاری در این خصوص گزارش شده است. مدل هیدرولوژیکی HSPF با پارامترهای یکپارچه، قطعی و بر پایه‌ی فیزیکی برای شبیه‌سازی پیوسته‌ی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز و شبکه‌ی رودخانه‌ها طراحی شده است. این مدل که به اطلاعات هواشناسی با گام زمانی ساعتی نیاز دارد، تاکنون در بسیاری از نقاط جهان استفاده شده است. این تحقیق به منظور ارزیابی مدل HSPF به‌عنوان مدلی با مبنای فیزیکی و پارامترهای یکپارچه و قطعی، در شبیه‌سازی دبی جریان و تولید رسوب در حوضه‌ی آبریز آبرو، با مساحتی حدود ۴۱۴۲ هکتار در استان همدان، انجام شده است. از داده‌های رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی این حوضه در سال‌های ۱۹۹۶-۱۹۹۷ برای کالیبراسیون مدل و از داده‌های سال‌های ۱۹۹۸-۱۹۹۹ برای اعتبارسنجی آن استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که در حوضه‌ی آبریز آبرو، مدل HSPF بر خلاف شبیه‌سازی تولید رسوب، دبی جریان را با دقت بالاتری شبیه‌سازی می‌کند.

**کلیدواژگان:** HSPF، دبی جریان، رسوب، حوضه‌ی آبریز آبرو

## ۱- مقدمه

توجه محققان قرار گرفته، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی است که در سال‌های اخیر توسعه‌ی زیادی یافته‌اند. مدل HSPF<sup>۱</sup> به‌عنوان یک مدل بر پایه فیزیکی با پارامترهای یکپارچه، قطعی، برای شبیه‌سازی پیوسته‌ی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز و شبکه‌ی

به منظور برنامه‌ریزی بلند مدت منابع آب، تعیین مقدار رسوباتی که در اثر فرسایش خاک حوضه‌های آبریز و با رواناب سطحی وارد مخازن سدها می‌شوند، بسیار مهم است. روش‌های مختلفی برای برآورد رواناب و رسوب وجود دارد. یکی از روش‌های نوینی که امروزه بسیار مورد

1- Hydrological Simulation Program Fortran

همکاران (۲۰۰۲) حوضه‌ی آبریز اوهایو<sup>۴</sup> واقع در ایالات متحده را با استفاده از مدل HSPF شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان داد رسوبات خروجی از این حوضه‌ی آبریز در حدود ۱۷٪ کم‌تر از مقدار واقعی شبیه‌سازی شده‌اند [۷]. جانسون و همکاران (۲۰۰۳) حوضه‌ی آبریزی به مساحت ۱۰۲ کیلومتر مربع واقع در ایالات متحده را با استفاده از دو مدل HSPF و SMR<sup>۵</sup> برای یک دوره هفت ساله (۱۹۹۸-۱۹۹۱) شبیه‌سازی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در فصل زمستان مدل HSPF رواناب خروجی از حوضه را بهتر از مدل SMR شبیه‌سازی می‌کند. این محققان علت را در شبیه‌سازی بهتر ذوب برف در مدل HSPF اعلان کردند [۸]. ماین آلبک و همکاران (۲۰۰۴) با هدف بررسی تأثیر سناریوهای مختلف روی پاسخ هیدرولوژیکی حوضه‌ی آبریز، با استفاده از مدل HSPF حوضه‌ی آبریز سیدی سویواواقع در کشور ترکیه را شبیه‌سازی کردند. سناریوی اول افزایش دمای حوضه، ناشی از تغییرات آب و هوایی و سناریوی دوم، تغییرات پوشش سطح حوضه بود. نتایج مدل HSPF به‌عنوان اطلاعات پایه با نتایج حاصل از این دوسناریو مقایسه شد و نشان داد که رواناب خروجی از حوضه‌ی آبریز با افزایش دمای سالیانه و پوشش گیاهی در سطح حوضه کاهش می‌یابد [۹]. میتسوا و وانگ (۲۰۰۷) با استفاده از مدل HSPF انتقال بار معلق رسوب را در یکی از رودخانه‌های ایالات متحده با مساحت حوضه‌ی آبریز ۱۳۱۰ کیلومتر مربع بررسی کردند. آن‌ها پس از بهینه‌سازی مقادیر هر یک از پارامترهای مدل و صحت‌سنجی مقادیر شبیه‌سازی شده با استفاده از روش مونت کارلو<sup>۶</sup> احتمال وقوع غلظت‌های مختلف بار معلق را برآورد کردند [۱۰]. میشر و همکاران (۲۰۰۷) از مدل HSPF برای مطالعه رواناب و رسوب در

رودخانه‌ها طراحی شده است. این مدل که به اطلاعات هواشناسی با گام زمانی ساعتی نیاز دارد، تاکنون در بسیاری از نقاط جهان استفاده شده است [۱]. مور و همکاران (۱۹۸۸) با استفاده از این مدل رواناب و رسوب خروجی از حوضه‌ی آبریز تنسی<sup>۱</sup> واقع در کشور ایالات متحده را شبیه‌سازی کردند. نتایج این شبیه‌سازی، در دوره‌ی ۱۹ ماهه، رواناب خروجی را ۱۵٪ کم‌تر از رواناب واقعی و رسوب را ۱۲٪ بیش‌تر از مقدار اندازه‌گیری شده، نشان داد [۲]. چو و همکاران (۱۹۹۱) نیز با استفاده از این مدل رواناب و رسوب خروجی از حوضه‌ی آبریز ریل فوت<sup>۲</sup> واقع در ایالات متحده را شبیه‌سازی کردند. نتایج مطالعه‌ی ایشان، حاکی از دقت بالاتر مدل HSPF در شبیه‌سازی رواناب نسبت به شبیه‌سازی رسوب بود [۳]. جاکومینو و فیلدز (۱۹۹۷) ضمن استفاده از مدل HSPF برای شبیه‌سازی رواناب در حوضه‌ی آبریزی واقع در کشور ایالات متحده، کالیبراسیون رواناب خروجی از این حوضه را با استفاده از آنالیز حساسیت و بهینه‌سازی عددی در دوره‌ی چهارساله (۱۹۹۳-۱۹۹۰) انجام دادند. آن‌ها ۱۳ پارامتر مؤثر بر تولید رواناب را بررسی کردند [۴]. فونتاین و همکاران (۱۹۹۷) حساسیت پارامترهای مؤثر مدل HSPF را در شبیه‌سازی رسوب در حوضه‌ی آبریز وایت‌اواک<sup>۳</sup> مطالعه کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها آنالیز حساسیت پارامترهای مدل در دو سناریوی جریان عادی و جریان سیلابی انجام و مدل مذکور کالیبره شده است [۵]. کاروبا (۲۰۰۰) کارایی مدل HSPF در شبیه‌سازی جریان را در سه حوضه‌ی آبریز مختلف در ایالات متحده بررسی کرد و نتیجه گرفت بر خلاف شبیه‌سازی جریان سیلابی، مدل مذکور در شبیه‌سازی جریان پایه دقت مطلوبی دارد [۶]. انگلمان و

4- Ohio

5- Soil Moisture Routing

6- Monte Carlo

1- Tennessee

2- Reel Foot

3- White Oak

شبییه‌سازی دبی جریان و رسوب در حوضه‌ی آبریز آبروست. این حوضه‌ی آبریز با مساحتی حدود ۴۱۴۲ هکتار در استان همدان واقع شده است. از داده‌های رواناب و رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری واقع در خروجی این حوضه در سال‌های ۱۹۹۶-۱۹۹۷ برای کالیبراسیون (واسنجی) مدل و از داده‌های سال‌های ۱۹۹۹-۱۹۹۸ برای اعتبارسنجی (صحت‌سنجی) آن استفاده شد. معرفی مدل HSPF، مشخصات حوضه‌ی آبریز، تجزیه و تحلیل و در نهایت نتایج تحقیق به ترتیب در بخش‌های بعدی مقاله ارائه می‌شود.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- معرفی مدل HSPF

مدل HSPF با پارامترهای یکپارچه، قطعی و با اساسی فیزیکی، برای شبیه‌سازی پیوسته (از نظر زمانی) فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز و شبکه‌ی رودخانه‌ها طراحی شده است [۱]. برای بیان فرایندهای مذکور در مقیاس حوضه‌ی آبریز، مدل HSPF از سه بخش اصلی تشکیل شده است: ۱- بخش شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در نواحی نفوذپذیر حوضه، که در این بخش، حرکت آب از طریق سه مسیر جریان سطحی، جریان زیر سطحی و جریان آب زیرزمینی، شبیه‌سازی می‌شود. همچنین فرسایش و انتقال رسوبات به صورت شسته شدن رسوبات موجود در سطح زمین و آبشستگی ناشی از جریان سطحی، شبیه‌سازی می‌شوند؛ ۲- بخش شبیه‌سازی فرایندهای هیدرولوژیکی در نواحی نفوذناپذیر حوضه، که عمده فرایندهای هیدرولوژیکی در این بخش تبخیر، رواناب و انتقال رسوبات با رواناب به سمت خروجی حوضه است؛ ۳- بخش روندیابی و شبیه‌سازی فرایندهایی که در رودخانه‌ها رخ می‌دهد. در

حوضه‌های آبریز کوچک مناطق نیمه مرطوب استوایی، واقع در کشور هند استفاده کردند. نتایج تحقیق آن‌ها حاکی از دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب و رسوب است [۱۱]. ونسپ و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از مدل HSPF تأثیرات تغییرات کاربری اراضی را روی رواناب جریان خروجی از حوضه‌ی آبریز کیشواوکی<sup>۱</sup>، واقع در ایالات متحده را بررسی کردند و دریافتند تلفیق مدل‌های تغییر کاربری اراضی با مدل HSPF می‌تواند به ایجاد سیستم پشتیبان تصمیم‌گیری مناسب منجر شود [۱۲]. العابد و الشریف (۲۰۰۸)، از مدل HSPF برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه‌ی آبریز رودخانه زرقا<sup>۲</sup>، واقع در کشور اردن استفاده کردند. هدف آن‌ها مطالعه‌ی کالیبراسیون پارامترهای مؤثر بر چرخه‌ی هیدرولوژیکی بزرگ‌ترین حوضه‌ی آبریز کشور اردن با مساحت ۳۳۰۰۰۰ هکتار بود. نتایج آن‌ها حاکی از دقت قابل قبول مدل در شبیه‌سازی رواناب ماهانه است [۱۳]. میشر و همکاران (۲۰۰۹) برای افزایش دقت مدل‌سازی رواناب، رسوب و انتقال آلودگی‌های غیرنقطه‌ای در حوضه‌ی آبریز کوچک دامودار<sup>۳</sup> در کشور هندوستان از مدل HSPF استفاده کردند. نتایج آن‌ها بیانگر توانایی این مدل در شبیه‌سازی رواناب، رسوب و آلودگی‌های غیرنقطه‌ای در حوضه‌ی آبریز مذکور است [۱۴]. لیو و تانگ (۲۰۱۱) با استفاده از مدل HSPF، اثر تغییرات کاربری اراضی نواحی مجاور رودخانه‌ها را روی فرایندهای هیدرولوژیکی به صورت کمی و کیفی در حوضه‌ی آبریز کوچک، واقع در ایالات متحده مطالعه کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در مدل‌سازی آلودگی‌های غیرنقطه‌ای، مدل HSPF ابزاری مفید و مؤثر است [۱۵].

هدف اصلی این پژوهش ارزیابی مدل HSPF در

1- Kishwaukee  
2- Zarqa  
3- Damodar

۱ نشانگر موقعیت حوضه‌ی آبریز آبرو و شبکه آبراهه‌های آن است. مساحت این حوضه حدود ۴۱۴۲ هکتار و کاربری بیش‌تر اراضی حوضه از نوع مراتع است. سطح عمده‌ی حوضه از خاک‌های با گروه هیدرولوژیکی C و D (با پتانسیل بالای تولید رواناب) پوشیده شده است. نزدیک‌ترین ایستگاه تبخیرسنجی و ایستگاه سینوپتیک به این حوضه به ترتیب ایستگاه‌های سد اکباتان و فرودگاه همدان می‌باشند. میانگین بارندگی سالیانه (۲۰۰۸-۱۹۷۱) در حوضه‌ی آبریز سد اکباتان ۳۱۲/۹ میلی‌متر است. حداکثر ارتفاع آن برابر ۳۵۸۰ متر و حداقل ۱۹۵۷ متر است.

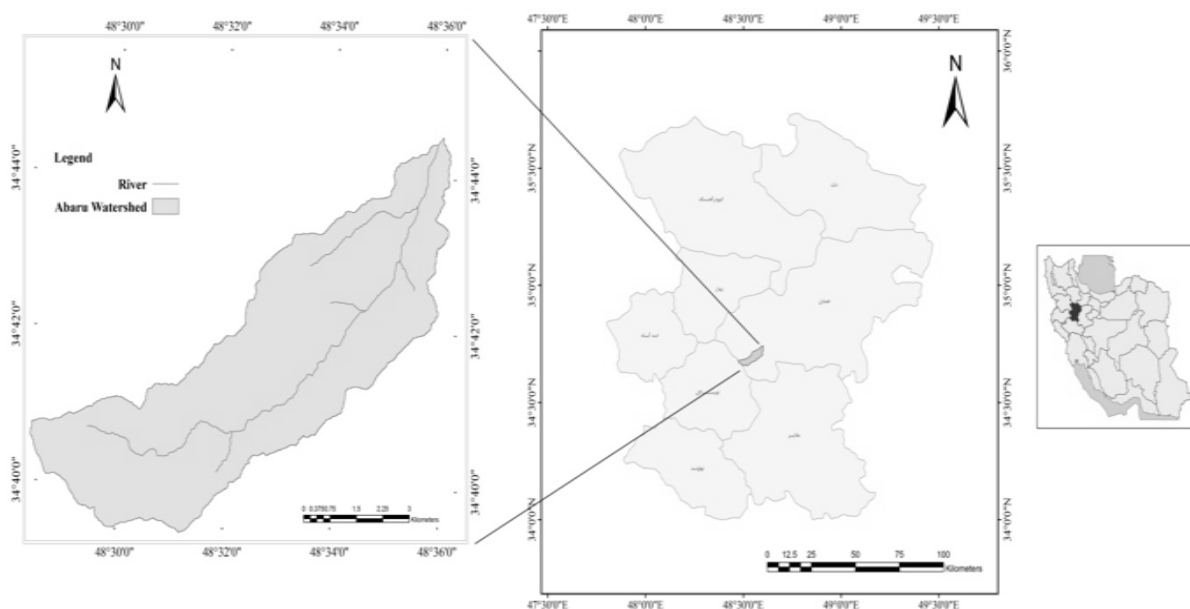
### ۲-۳- داده‌های ورودی مدل HSPF

مدل HSPF به اطلاعاتی نظیر مشخصات شبکه‌ی آبراهه‌ها، مشخصات زیرحوضه‌ها، مختصات مکانی نقطه‌ی خروجی حوضه‌ی آبریز و مختصات ایستگاه‌های هیدرومتری نیاز دارد.

این بخش روندیابی جریان به صورت یک بعدی و با استفاده از معادله‌ی موج سینماتیکی محاسبه و انتقال رسوبات در رودخانه‌ها نیز با استفاده از توازن بین ظرفیت ته‌نشینی جریان و ظرفیت آبخستگی جریان انجام می‌شود [۱].

### ۲-۲- معرفی حوضه‌ی آبریز آبرو

منبع اصلی تأمین آب شرب شهرستان همدان، آب ذخیره شده در مخزن سد اکباتان است که حوضه‌ی آبریز آن با مساحتی حدود ۲۲۰۰۰ هکتار شامل دو رودخانه‌ی اصلی آبرو و یالفان بوده و در محدوده بین  $34^{\circ}34'$  و  $34^{\circ}45'$  عرض شمالی و  $48^{\circ}28'$  و  $48^{\circ}42'$  طول شرقی واقع شده است. مطالعه‌ی زیر حوضه‌های سد اکباتان و مطالعه‌ی رواناب و رسوب تولید شده‌ی آن‌ها، که وارد مخزن سد اکباتان می‌شود، به منظور انجام برنامه‌ریزی منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار است. این مطالعه در حوضه‌ی آبریز رودخانه‌ی آبرو به عنوان یکی از زیرحوضه‌های اصلی حوضه‌ی آبریز سد اکباتان انجام شده است. شکل



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی حوضه‌ی آبریز آبرو

باشد، از گرادیان حرارتی حاکم در منطقه بالادست سد اکباتان [۱۶] استفاده شده است. پس از اصلاح داده‌های دما نسبت به ارتفاع، تقلیل گام زمانی دما از ۱ روز به ۱ ساعته ضروری است تا امکان استفاده آن‌ها در مدل HSPF فراهم شود. برای این منظور از مدل WDMUtil<sup>۲</sup> استفاده شده است. مدل مذکور با فرض وقوع دمای حداکثر روزانه در ساعت ۱۶ و دمای حداقل روزانه در ساعت ۶ و با استفاده از درون‌یابی، دمای هوا را به گام زمانی ساعتی تقلیل می‌دهد. مدل HSPF علاوه بر بارش و دمای ساعتی به پتانسیل تبخیر و تعرق ساعتی نیز نیاز دارد. در این تحقیق برای تهیه داده‌های مربوط به پتانسیل تبخیر و تعرق ساعتی از مدل WDMUtil و روش هامون<sup>۳</sup> استفاده شده است. روش هامون، روشی مبتنی بر دماست که برای تخمین پتانسیل تبخیر روزانه به حداکثر و حداقل دمای روزانه نیاز دارد [۱۸].

نقشه‌ی کاربری اراضی حوضه‌ی آبریز از روی نقشه‌های کاربری اراضی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ و نقشه‌ی خاک از روی نقشه‌های خاک‌شناسی با مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ اداره کل منابع طبیعی استان همدان، تهیه شده‌اند. تنها ایستگاه هیدرومتری به نام ایستگاه شاخه‌ی دوم سد اکباتان، روی رودخانه‌ی آبرو و در خروجی این حوضه قرار دارد. در این ایستگاه غلظت رسوبات به صورت موردی اندازه‌گیری شده، از این رو برای دستیابی به آمار بلندمدت غلظت رسوبات از رابطه‌ی نمایی بین دبی جریان و دبی رسوب در ایستگاه هیدرومتری شاخه دوم سد [۱۹] استفاده شد.

## ۲-۴- کالیبراسیون و صحت‌سنجی

مدل HSPF، اساسی فیزیکی دارد، از این رو باید پیش از کالیبراسیون مدل برای شبیه‌سازی رسوب، آن را برای شبیه‌سازی بهینه‌ی جریان، کالیبره کرد [۷، ۳، ۲، ۱۰]. پارامترهای

می‌توان اطلاعات فوق را از روی نقشه DEM<sup>۱</sup> حوضه‌ی آبریز اصلی با سیستم مختصات جغرافیایی مشخص، تهیه کرد. در مدل HSPF با توجه به DEM ابتدا حوضه‌ی آبریز اصلی به تعدادی زیرحوضه تقسیم می‌شود. سپس هر یک از زیرحوضه‌ها بر مبنای کاربری اراضی و جنس خاک سطح حوضه به واحدهای نفوذپذیر و نفوذناپذیر تقسیم می‌شوند [۱]. بر این اساس در این تحقیق سطح حوضه‌ی آبریز آبرو به ۹ واحد نفوذپذیر تقسیم شده است.

حداقل اطلاعات هواشناسی مورد نیاز این مدل برای شبیه‌سازی رواناب و رسوب، شامل بارندگی، دمای هوا و تبخیر و تعرق پتانسیل با گام زمانی ساعتی است. اطلاعات مربوط به بارش از روی اطلاعات ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان تهیه شدند. در این ایستگاه بارندگی با گام زمانی ۶ ساعته اندازه‌گیری می‌شود. به دلیل وجود اختلاف ارتفاع بین مرکز حوضه‌ی آبریز آبرو و ایستگاه سینوپتیک فرودگاه همدان و همچنین بدین منظور که بارندگی ثبت شده در این ایستگاه بتواند معرف مناسبی از بارندگی واقعی در سطح حوضه‌ی آبریز آبرو باشد، از رابطه‌ی بارش - ارتفاع حاکم بر منطقه در بالادست سد اکباتان [۱۶] استفاده شده است. پس از اصلاح داده‌های بارش نسبت به ارتفاع باید گام زمانی بارش را از ۶ ساعته به ۱ ساعته تقلیل داد تا امکان استفاده آن‌ها در مدل HSPF فراهم شود. از روش تقلیل ساده برای تقلیل گام زمانی بارش از ۶ ساعته به ساعتی استفاده شده است [۱۷]. اطلاعات مربوط به دمای روزانه از روی اطلاعات ایستگاه تبخیرسنجی سد اکباتان تهیه شده‌اند. در این ایستگاه حداقل و حداکثر دمای هوا به صورت روزانه اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. به دلیل وجود اختلاف ارتفاع بین مرکز حوضه و ایستگاه تبخیرسنجی سد اکباتان و همچنین بدین منظور که دمای ثبت شده در این ایستگاه بتواند معرف مناسبی از دمای واقعی در سطح حوضه

2- Watershed Data Management Utility  
3- Hamon

1- Digital Elevation Model

کالیبراسیون به ۰/۹۲ در دوره‌ی صحت‌سنجی، غیرمنطقی به نظر برسد. ذکر این نکته ضروری است که چون مدل HSPF، امکان تولید اطلاعات هواشناسی را ندارد؛ لذا نمی‌توان برای آن دوره‌ی گرم کردن<sup>۱</sup> مدل را اجرا کرد. به عبارت دیگر در مدل HSPF، شرایط اولیه‌ی حوضه‌ی آبریز در زمان شروع شبیه‌سازی، باید به‌وسیله‌ی کاربر و با سعی و خطا تعریف شود. در این تحقیق، دوره‌ی کالیبراسیون برای دوره‌ی صحت‌سنجی به نوعی دوره‌ی گرم کردن مدل محسوب شده و شرایط اولیه‌ی حوضه در شروع دوره‌ی صحت‌سنجی واقعی‌تر بوده و به تبع آن شبیه‌سازی دبی جریان با دقت بالاتر انجام شده است. مقایسه‌ی دبی واقعی و شبیه‌سازی شده با مدل HSPF در دوره‌های کالیبراسیون و صحت‌سنجی نشان می‌دهد مدل HSPF در آغاز ماه‌های گرم سال، دبی جریان ماهانه را بیش‌تر از مقدار واقعی شبیه‌سازی می‌کند. از آنجا که در مدل HSPF، امکان در نظر گرفتن رشد گیاهان، نوع پوشش گیاهی و رشد ریشه‌ی آن‌ها در طی سال وجود ندارد [۱]، شبیه‌سازی تبخیر و تعرق در مدل HSPF با خطا همراه بوده و این خطا در شبیه‌سازی جریان پایه، به‌ویژه طی فصل رشد گیاهان، مؤثر است.

### ۳-۲- شبیه‌سازی تولید رسوب ماهانه

شکل ۳ (الف) و (ب) نشانگر متوسط دبی رسوب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی مدل به ترتیب در دوره‌ی کالیبراسیون و دوره‌ی صحت‌سنجی است. برای بررسی میزان کارایی مدل HSPF در شبیه‌سازی تولید ماهانه‌ی رسوب در دوره‌ی کالیبراسیون (واسنجی) و دوره‌ی صحت‌سنجی (اعتبارسنجی) معیارهای آماری جدول ۱ محاسبه و نتایج در جدول ۳ ارائه شده است. بررسی مقادیر ارائه شده در جدول ۳ و شکل ۳ (الف) و (ب) نشان

مرتبط با شبیه‌سازی برف نیز با توجه به شبیه‌سازی بهینه‌ی جریان، کالیبره شدند. پس از بهینه‌سازی مدل در تولید رواناب در شرایط خاص منطقه‌ی مطالعاتی، باید کالیبراسیون دوباره‌ی مدل برای شبیه‌سازی رسوب، انجام شود. با توجه به آمار هواشناسی موجود با دقت زمانی مورد نیاز مدل HSPF در انجام شبیه‌سازی، از آمار دبی و رسوب اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری شاخه‌ی دوم سد اکباتان (آبرو) برای کالیبراسیون (سال‌های ۱۹۹۶ و ۱۹۹۷) و صحت‌سنجی مدل (سال‌های ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹) استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

برای برآورد دقت و تعیین خطای مدل HSPF در شبیه‌سازی دبی جریان و تولید رسوب، از برخی معیارهای آماری متداول استفاده شده، که در جدول ۱ ارائه شده‌اند.

### ۳-۱- شبیه‌سازی متوسط دبی ماهانه‌ی جریان

شکل ۲ (الف) و (ب) نشانگر متوسط دبی جریان ماهانه‌ی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده‌ی مدل به ترتیب در دوره‌ی کالیبراسیون و دوره‌ی صحت‌سنجی است. برای بررسی میزان کارایی مدل HSPF در شبیه‌سازی دبی جریان ماهانه در دوره‌ی کالیبراسیون (واسنجی) و دوره‌ی صحت‌سنجی (اعتبارسنجی)، معیارهای آماری جدول ۱ محاسبه و نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. بررسی مقادیر ارائه شده در جدول ۲ و شکل ۲ (الف) و (ب) نشان می‌دهد که مدل HSPF توانسته است هم در مرحله‌ی کالیبراسیون و هم در مرحله‌ی صحت‌سنجی به‌خوبی مقدار و زمان وقوع دبی حداکثر را شبیه‌سازی کند؛ اگرچه در دوره کالیبراسیون، مقدار حداکثر دبی ماهانه جریان در آوریل ۱۹۹۶ کم‌تر از مقدار واقعی و در آوریل ۱۹۹۷ بیش‌تر از مقدار واقعی شبیه‌سازی شده است.

ممکن است افزایش ضریب همبستگی از ۰/۸ در دوره‌ی

دانست؛ چرا که در این تحقیق برای کاهش گام زمانی ۶ ساعته‌ی بارش به ساعتی، از روش تقلیل ساده، استفاده شده و شدت بارش فرضی از شدت بارش واقعی متفاوت است.

#### ۴- نتیجه‌گیری

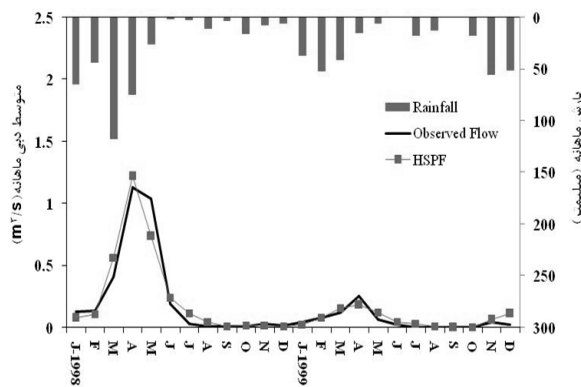
مدل HSPF با پارامترهای یکپارچه‌ی قطعی و به‌عنوان مدلی فیزیکی، برای شبیه‌سازی پیوسته‌ی فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه‌های آبریز و شبکه‌ی رودخانه‌ها، توسعه یافته است. در این تحقیق قابلیت استفاده از این مدل در شبیه‌سازی متوسط ماهانه‌ی دبی جریان و تولید رسوب در حوضه‌ی آبریز آبرو، در استان همدان ارزیابی شد.

می‌دهد که مدل HSPF توانسته است علی‌رغم نبود قطعیت‌های بسیار در تعیین رسوب در رودخانه‌ها، زمان وقوع حداکثر آورد رسوب را به‌خوبی شبیه‌سازی نماید، اگر چه در آوریل ۱۹۹۶ مقدار رسوب را کم‌تر از مقدار واقعی و در آوریل ۱۹۹۸ مقدار رسوب را بیش‌تر از مقدار واقعی شبیه‌سازی کرده است. علاوه بر این مدل HSPF در شبیه‌سازی تغییرات نسبی رسوب در ماه‌های مختلف سال، دقت مناسبی ندارد؛ از این‌رو استفاده از مدل HSPF برای شبیه‌سازی رسوب در رودخانه‌های فصلی، به تأمل بیش‌تری نیاز دارد. این موضوع را می‌توان با نقش مستقیم شدت بارش در شبیه‌سازی رسوب، در مدل HSPF مرتبط

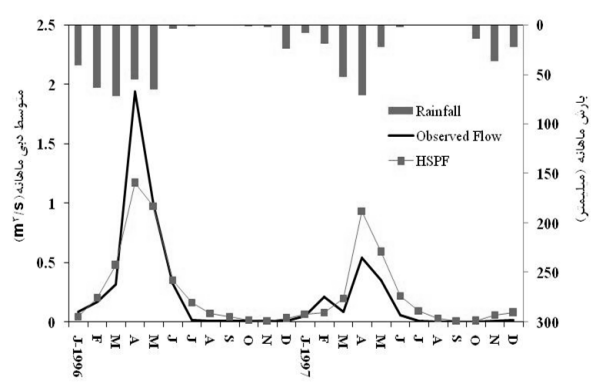
جدول (۱) معیارهای آماری ارزیابی مدل HSPF برای شبیه‌سازی دبی جریان و رسوب

معیار	روش محاسبه
NSE	$1 - \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2}$
R	$\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})(s_i - \bar{s})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (o_i - \bar{o})^2 \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2}}$
ME	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - o_i)$
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - o_i)^2}$

$S_i$ : خروجی مدل،  $O_i$ : مقدار مشاهده‌ای،  $\bar{O}$ : متوسط مقادیر مشاهده‌ای،  $\bar{S}$ : متوسط خروجی‌های مدل و n: تعداد مقادیر مشاهده‌ای یا تعداد خروجی‌های مدل



(ب) دوره‌ی صحت‌سنجی (۱۹۹۸-۱۹۹۹)

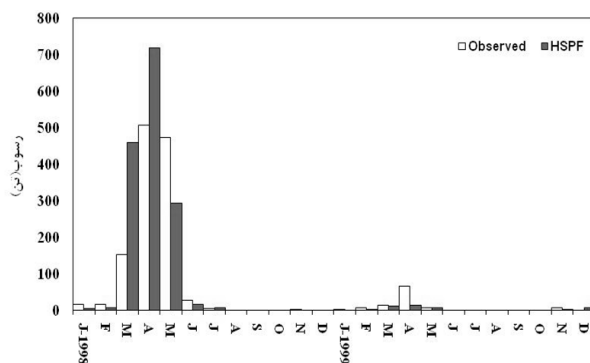


(الف) دوره‌ی کالیبراسیون (۱۹۹۶-۱۹۹۷)

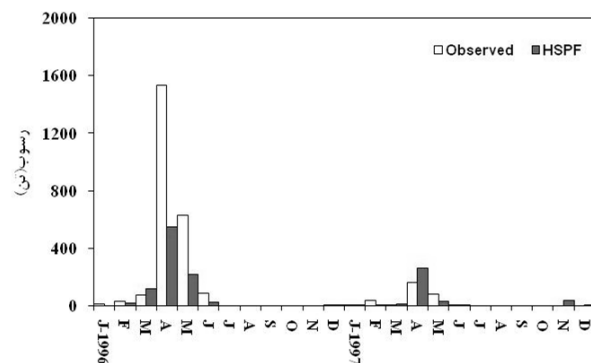
شکل (۲) مقایسه‌ی دبی ماهانه‌ی جریان مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل

جدول (۲) مقادیر معیارهای آماری ارزیابی مدل HSPF در شبیه‌سازی متوسط دبی ماهانه جریان (مترمکعب بر ثانیه)

سال	متوسط دبی ماهانه ( $m^3/s$ )		NSE	R	ME ( $m^3/s$ )	RMSE ( $m^3/s$ )
	مدل	مشاهده				
کالیبراسیون	۱۹۹۶	۰/۳	۰/۸۳	۰/۹	-۰/۰۳	۰/۲۳
	۱۹۹۷	۰/۲	۰/۱۱	۰/۱۲	۰/۸۹	۰/۱۵
صحت‌سنجی	۱۹۹۸	۰/۲۶	۰/۹۲	۰/۹۲	۰/۰۰۳	۰/۱۱
	۱۹۹۹	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۶۶	۰/۷۱	۰/۰۴



(ب) دوره‌ی صحت‌سنجی (۱۹۹۸-۱۹۹۹)



(الف) دوره‌ی کالیبراسیون (۱۹۹۶-۱۹۹۷)

شکل (۳) مقایسه‌ی تولید رسوب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده با مدل

جدول (۳) مقادیر معیارهای آماری ارزیابی مدل HSPF در شبیه‌سازی متوسط تولید رسوب ماهانه (تن در ماه)

سال	مقدار رسوب (تن در سال)		متوسط رسوب (تن در ماه)		NSE	R	ME (تن در ماه)	RMSE (تن در ماه)
	مدل	مشاهده	مدل	مشاهده				
کالیبراسیون	۱۹۹۶	۲۵۴۱/۴۵	۲۳۷۱/۵۸	۲۱۱/۷۹	۰/۸۵	۰/۸۲	۱۴/۱۶	۱۸۸/۱۹
	۱۹۹۷	۱۴۱۷/۴۵	۲۹۳/۸۴	۱۱۸/۱۲	۰/۷۷	۰/۸۸	۹۳/۶۳	۲۸۲/۸۸
صحت‌سنجی	۱۹۹۸	۱۵۰۷/۵۴	۱۱۹۸/۳۵	۱۲۵/۶۳	۰/۶۶	۰/۷۴	۲۵/۷۷	۱۱۹/۶۶
	۱۹۹۹	۴۸/۲۶	۱۰۶/۵۳	۴/۰۲	۰/۴۱	۰/۵۹	-۴/۸۶	۱۵/۲۶

همکاران (۱۹۹۱) [۳]، فونتاین و همکاران (۱۹۹۷) [۵]، جانسون و همکاران (۲۰۰۳) [۸] و العابد و الشریف (۲۰۰۸) [۱۳] مطابقت دارد. در مدل HSPF فرسایش ناشی از باران، مستقیماً با توجه به بارندگی ساعتی شبیه‌سازی می‌شود [۱]، تقلیل زمانی داده شده، به غیر واقعی شدن شدت بارش و از این رو به شبیه‌سازی رسوب با دقت

نتایج نشان داد نبود اطلاعات هواشناسی با گام زمانی کوچک در ایستگاه‌های هواشناسی کشور، نباید به نادیده گرفتن مزایای مدل HSPF منجر شود. در این تحقیق با استفاده از داده‌های تقلیل مقیاس داده شده‌ی بارش، برخلاف شبیه‌سازی تولید رسوب، شبیه‌سازی دبی جریان با دقت قابل قبول، امکان‌پذیر شد که با نتایج مطالعات چو و



- [8] Johnsona, M.S., Coon, W.F., Mehta, V.K., Steenhuisa, T.S., Brooks, E.S., and Bol, J., "Application of two hydrologic models with different runoff mechanisms to a hill slope dominated watershed in the northeastern US: a comparison of HSPF and SMR", *Journal of Hydrology*, 285, pp. 57-76, 2003.
- [9] Albek, M., O'g'u'tveren, U., and Albek, E., "Hydrological modeling of SeydiSuyu watershed (Turkey) with HSPF", *Journal of Hydrology*, 285, pp. 260-271, 2004.
- [10] Mitsov, B.D., and Wang, X., "Exploring the Variability in Suspended Sediment Yield Using BASINS-HSPF and Probabilistic Modeling: Implications for Land Use Planning", *Journal of Environmental Informatics*, 9(1), pp. 29-40, 2007.
- [11] Mishra, A., Kar, S., and Singh, V.P., "Determination of runoff and sediment yield from a small watershed in sub-humid subtropics using the HSPF model", *Hydro Process*, 21, pp. 3035-3045, 2007.
- [12] Woonsup, C., and Deal, B.M., "Assessing hydrological impact of potential land use change through hydrological and land use change modeling for the Kishwaukee River basin (USA)", *Journal of Environmental Management*, 88, pp. 1119-1130, 2008.
- [13] Al-Abed, N., and Al-Sharif, M., "Hydrological Modeling of Zarqa River Basin - Jordan Using the Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF) Model", *Water Resource Manage*, 22, pp. 1203-1220, 2008.
- [14] Mishra, A., Kar, S., and Raghuvanshi, N., "Modeling Nonpoint Source Pollutant Losses from a Small Watershed Using HSPF Model", *Journal of Environmental Engineering*, 135(2), pp. 92-100, 2009.
- [15] Liu, Z. and Tong, S. T. Y., "Using HSPF to Model the Hydrologic and Water Quality Impacts of Riparian Land-Use Change in a Small Watershed", *Journal of Environmental Informatics*, 17(1), pp. 1-14, 2011.

[۱۶] فرهادی، ع.ا.، «ارزیابی اثر مدیریت حوضه‌ی آبریز بر رسوب‌گذاری و عمر مفید سد اکباتان»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی‌ارشد مهندسی کشاورزی، گرایش سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۷۷.

پایین‌تر منجر شد. از جمله محدودیت‌های تحقیق حاضر کمبود داده‌های هواشناسی با گام زمانی ساعتی و داده‌های دبی رسوب با گام زمانی روزانه است. برای دقت و استفاده‌ی بیش‌تر از مدل HSPF در حوضه‌های آبریز کشور، توسعه‌ی اندازه‌گیری داده‌های هواشناسی و هیدرومتری با گام زمانی کوچک‌تر پیشنهاد می‌شود.

## ۵- مراجع

- [1] Bicknell, B.R., Imhoff, J.C., Kittle, J.L., Jobs, T.H., and Donigian, A.S., "HYDROLOGICAL SIMULATION PROGRAM FORTRAN: Version 12.2" User's Manual, 2005.
- [2] Moore, L.W., Matheny, H., Tyree, T., Sabatini, D., and Klaine, S.J., "Agricultural Runoff Modeling in a Small West Tennessee Watershed", *Research Journal of Water Pollution Control Federation*, 60 (2), pp. 242-249, 1988.
- [3] Chew, C.R., Moore, L.W., and Smiths, R.H., "Hydrological Simulation of Tennessee's North Reelfoot Creek Watershed", *Research Journal of Water Pollution Control Federation*, 63(10), pp. 10-16, 1991.
- [4] Jacomino, V.M.F., and Fields, D.E., "A Critical Approach to the Calibration of a Watershed Model", *Journal of American Water Resource Association*, 33(1), pp. 143-154, 1997.
- [5] Fontaine, T.A., and Jacomino, V.M.F., "Sensitivity Analysis of Simulation Contaminated Sediment Transport", *Journal of American Water Resource Association*, 33(2), pp. 313-326, 1997.
- [6] Carrubba, L., "Hydrological Modeling at the Watershed Scale Using NPSM", *Journal of American Water Resource Association*, 36 (6), pp. 1237-1246, 2000.
- [7] Engelmann, C.J.K., Ward, A.D., Christy, A.D., and Bair, E.S., "Application of the BASINS Database and NPSM Model on a Small Ohio Watershed", *Journal of American Water Resource Association*, 38 (1), pp. 289-300, 2002.

[۱۹] گنجی‌نوروزی، ز.، «بررسی عدم قطعیت حجم مخازن سدها: مطالعه موردی سد اکباتان»، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد مهندسی کشاورزی، گرایش سازه‌های آبی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.

[۱۷] نصیری صالح ف، علوی‌نیام، «مقایسه‌ی دو روش تقلیل مقیاس زمانی بارش برای شبیه‌سازی رواناب با استفاده از یک مدل سطح خشکی»، هشتمین کنگره‌ی بین‌المللی مهندسی عمران، دانشگاه شیراز، ۱۳۸۸.

[18] Hummel, P., Kittle, J., Jr., and Gray, M., "A Tool for Managing Watershed Modeling Time-Series Data WDMUtilVersion 2.0", User's Manual, AQUA TERRA Consultants, 2001.