

GIS-based Identification and Preparation of Suitable Climatological Data Sources for Simulation Using Semi-Distributed Hydrological Models

EHSAN DASTJERDI¹, BARAT MOJARADI², HOSEIN ALIZADEH^{3*}

1. M.Sc. Graduate, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

2. Assistant Professor, Surveying Group, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

3. Assistant Professor, Water and Environment Group, School of Civil Engineering, Iran University of Science and Technology

(Received: June. 18, 2018- Revised: Nov. 11, 2018- Accepted: Apr. 22, 2019)

ABSTRACT

Regarding to various sources of climatological data, identification of suitable sources and investigation of their usage effects on hydrological simulation is an important issue. Moreover, given that hydrological models employ different methods for preparation of climatological data, e.g. spatial interpolation of point climatological data, evaluation of the effects of different methods on hydrological simulation's result is an important issue. Accordingly, this paper deals with different data sources and spatial interpolation of precipitation that are investigated in hydrological simulation of Mahabad Chai River Basin using SWAT model. Different climatological sources, i.e. field measurements of meteorological stations of MOE and IRIMO as well as reanalyzed data of CFSR project, and different interpolation methods, i.e. nearest neighborhood (NN) and inverse distance method (IDW) were employed and compared for preparation of inputs of SWAT model using a developed computational module in Module Builder framework of ArcMap. Then parameters sensitivity analysis, estimation and model validation were performed based on a period of 36-years monthly streamflow record. Results showed using CFSR data leads to Nash-Sutcliffe (NS) value of 0.58 as compared to climatological stations' data which leads to NS value of 0.38. Additionally, IDW method showed a better performance significantly than the NN method, so that their NS index values were 0.79 and 0.56, respectively.

Keywords: Climate Forecast System Reanalysis, Invers Distance Method, Nearest Neighborhood, Precipitation, SWAT

* Corresponding Author's Email: alizadeh@iust.ac.ir

شناسایی و آماده‌سازی منابع مناسب داده‌های هواشناسی مبتنی بر GIS برای شبیه‌سازی با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی نیمه توزیعی

احسان دستجردی^۱، برات مجردی^۲، حسین علیزاده^{۳*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۲. استادیار گروه نقشه‌برداری، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
۳. استادیار گروه آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۳/۲۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۸/۲۰ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۲/۲)

چکیده

با توجه به تنوع منابع داده‌های هواشناسی، موضوع شناسایی منابع مناسب و بررسی تأثیر به‌کارگیری آن‌ها بر شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، اهمیت دارد. همچنین از آنجا که مدل‌های نیمه توزیعی هیدرولوژیکی از روش‌های مختلف بعضاً مبتنی بر فرضیات ساده‌کننده برای آماده‌سازی داده‌های هواشناسی، برای نمونه پهنه‌ای نمودن داده‌های نقطه‌ای، استفاده می‌نمایند، بررسی اثر روش‌های مختلف موضوع مهمی است. با این توجه، در این پژوهش منابع مختلف داده‌ای و روش‌های مختلف درون‌یابی مکانی بارش با استفاده از مدل SWAT در حوضه رودخانه مهاباد چای مورد ارزیابی قرار گرفت. منابع مختلف داده‌های هواشناسی شامل اندازه‌گیری‌های زمینی بارش در ایستگاه‌های هواشناسی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی و همچنین داده‌های باز تحلیل شده CFSR در کنار روش‌های مختلف درون‌یابی مکانی، شامل نزدیک‌ترین همسایگی (NN) و وزن دهی معکوس فاصله (IDW)، جهت فراهم‌سازی داده ورودی مدل SWAT در چارچوب یک ماژول محاسباتی توسعه‌یافته در محیط ArcMap بکار گرفته شد و نتایج پس از واسنجی پارامترهای مدل SWAT مورد مقایسه قرار گرفت. شبیه‌سازی رواناب روزانه برای یک دوره ۳۶ ساله با استفاده از داده‌های بازتحلیل شده CFSR، بعد از واسنجی منجر به شاخص NS برابر با ۰/۵۷ گردید که در مقایسه با استفاده از داده‌های بارش مربوط به ایستگاه‌های زمینی که منجر به شاخص NS برابر با ۰/۳۸ شده، مطلوب‌تر است. مقایسه دو روش درون‌یابی مکانی برای پهنه‌ای نمودن داده‌های بارش نشان داد که روش IDW بر روش NN برتری قابل توجه دارد بطوریکه شاخص NS برای روش اول برابر ۰/۷۹ و برای روش دوم برابر ۰/۵۶ به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: بارش، SWAT، نزدیک‌ترین همسایگی، IDW، CFSR

مقدمه

برای مدیریت منابع آب در یک حوضه آبریز، تخمین دقیق مقدار رواناب رودخانه (سیلاب و آبدهی) بسیار حائز اهمیت است. امروزه تخمین رواناب با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر فرآیند همچون مدل SWAT بسیار پرکاربرد می‌باشد. مدل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر فرآیند به داده‌های ورودی از قبیل نقشه توپوگرافی (DEM)، نقشه کاربری اراضی، نقشه خاک و داده‌های هواشناسی نیاز دارند (Neitsch *et al.*, 2011). کیفیت داده‌های ورودی اثر قابل توجهی بر نتایج مدل‌سازی دارد. ورود داده‌های تخمینی و با دقت پایین در مدل‌های هیدرولوژیکی، بی‌شک موجب عدم قطعیت در شبیه‌سازی مدل و دور شدن نتایج از واقعیت می‌گردد. از این رو ضرورت شناسایی و به‌کارگیری داده‌های ورودی مناسب در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی کاملاً

مشخص است. به طور کلی در بهبود داده‌های ورودی انواع مدل‌های هیدرولوژیکی، تحقیقات وسیعی صورت گرفته است (Haberlandt & Kite, 1998; Maskey *et al.*, 2004; Tobin *et al.*, 2011).

در یک مدل هیدرولوژیکی پارامترهای اقلیمی مختلف شامل بارش، دما، تشعشع، رطوبت نسبی، سرعت باد و غیره بکار می‌آیند. در این بین بارش، تأثیرگذارترین پارامتر بر شبیه‌سازی رواناب است (Obled *et al.*, 1994). در مدل SWAT داده‌های هواشناسی، از جمله بارش، در مقیاس مکانی به صورت نقطه‌ای به مدل وارد می‌شوند و جهت پهنه‌ای نمودن داده‌ها به گستره واحدهای هیدرولوژیکی از روش نزدیک‌ترین همسایگی درون ArcSWAT استفاده می‌شود (Neitsch *et al.*, 2011; Wood *et al.*, 1990). این در حالی است که پهنه‌ای نمودن داده‌های

تحقیق نشان داده شد که هر چند این سه دسته داده با در نظر گرفتن شرایط توپوگرافی نتایج ضعیفی را ارائه می‌دهند اما داده‌های APHRODITE و روند-سطح در حوضه‌های نسبتاً مسطح، عملکرد مطلوبی دارند. (Radcliffe & Mukundan, 2017) اثر داده بارش ورودی دو منبع CFSR و PRISM را با استفاده از واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT مورد بررسی قرار دادند که نتایج این مطالعه نشان از برتری منبع داده‌ای PRISM نسبت به منبع داده‌ای CFSR دارد.

مرور ادبیات نشان داد که انتخاب منابع داده‌ای مناسب، به‌طور خاص بارش، ورودی به مدل‌های هیدرولوژیکی و نحوه پهنه‌ای نمودن آن‌ها بر نتایج شبیه‌سازی اثرگذار است. از آنجا که مدل SWAT در سال‌های گذشته در سراسر جهان و همچنین کشورمان ایران پرکاربرد بوده، بررسی منابع داده و روش درون‌یابی مناسب با توجه به کیفیت و تنوع داده‌های بارش کشور در این تحقیق مورد نظر است. به‌منظور ارزیابی به‌کارگیری منابع داده بارش و عملکرد روش‌های درون‌یابی، در این تحقیق یک ماژول محاسباتی در محیط ساخت ماژول در نرم‌افزار ArcMap توسعه یافت که بتواند از طریق ورودی به مدل SWAT منابع داده مناسب و روش کارا را با شاخص NS محک بزند.

مواد و روش‌ها

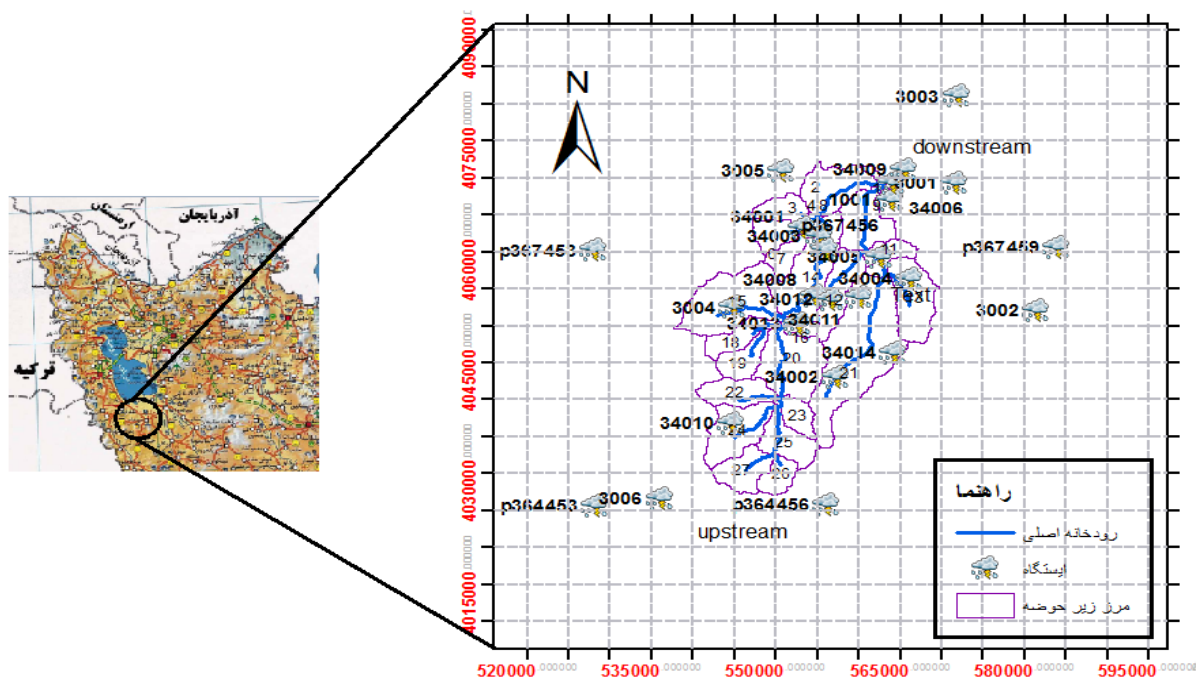
مورد مطالعاتی

حوضه مهاباد با ۱۵۱۶ کیلومترمربع مساحت در جنوب غربی دریاچه ارومیه واقع شده است. این حوضه دارای ارتفاع متوسط ۱۶۳۴ متر می‌باشد. این رودخانه به طول ۲۶ کیلومتر، از دو شاخه اصلی به نام‌های چمغوره و داغه و نیز تعدادی شاخه فرعی تشکیل شده است. دو شاخه اصلی رودخانه‌ی مهاباد چای از کوه‌های واقع در ۴۵ کیلومتری جنوب غربی شهر مهاباد سرچشمه گرفته و با طی مسیری، به دریاچه سد مهاباد وارد شده و رودخانه مهاباد را تشکیل می‌دهند. ایستگاه‌های آب‌سنجی بیطاس، کوتر و گردی‌عقوب سه ایستگاه فعال در زیرحوضه‌ی رودخانه‌ی مهاباد چای هستند. در این مطالعه بخش بالایی دریاچه سد مهاباد چای مورد توجه است بطوریکه نقطه خروجی حوضه مورد مطالعه، در واقع ورودی دریاچه سد است. مساحت قسمت حوضه بالایی دریاچه سد مهاباد ۸۱۲ کیلومترمربع است. شکل (۱) نمای کلی از موقعیت حوضه مهاباد چای است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود حوضه آبریز به ۲۷ زیر حوضه و ۸۸ واحد پاسخ هیدرولوژیکی (HRU) تقسیم شده است.

نقطه‌ای در زمینه مطالعات هواشناسی اصولاً مبتنی بر روش‌های درون‌یابی و زمین‌آمار انجام می‌گیرد و در این رابطه روش‌های بسیار زیادی در گذشته توسعه یافته‌اند و در این بین روش نزدیک‌ترین همسایگی مبتنی بر فرضیات بسیار ساده کننده بوده و می‌تواند منشأ عدم قطعیت و خطای قابل ملاحظه گردد.

در این راستا (Masih *et al.*, 2011) روش‌های مختلفی برای به دست آوردن داده‌های بارش فضایی مانند IDW و کریجینگ را مورد ارزیابی قرار دادند و نتایج خروجی مدل SWAT را با داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هیدرومتری مقایسه کردند که نشان از افزایش دقت عملکرد مدل، خصوصاً در حوضه‌های کوچک دارد. در مطالعه‌ای در حوضه مخزن Sulejów در مرکز لهستان چهار روش درون‌یابی IDW، پلیگون تیسن، کریجینگ معمولی و نزدیک‌ترین همسایگی برای درون‌یابی مکانی داده‌های ورودی بارش به مدل SWAT با هم مقایسه شد (Szcześniak & Piniewski, 2015). هرچند نتایج تحقیق نشان داد که انتخاب بهترین روش به نوع تابع هدف حساس است، در مجموع اتخاذ دو روش کریجینگ معمولی و IDW نسبت به روش نزدیک‌ترین همسایگی دارای عملکرد بهتری بود. به‌طور کلی اکثر تحقیقات گذشته، استفاده از روش‌های درون‌یابی مکانی دیگر نسبت به روش متداول نزدیک‌ترین همسایگی در مدل SWAT را برای داده بارش توصیه نمودند (Szcześniak & Piniewski, 2015; Zhang *et al.*, 2017).

موضوع استفاده از منابع مختلف داده‌های هواشناسی برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی با به‌کارگیری SWAT نیز در تحقیقات گذشته مورد توجه قرار گرفته است. (Starks & Moriasi, 2009). نتایج شبیه‌سازی مدل SWAT را با استفاده از منابع مختلف داده‌های ورودی شامل ترکیب ایستگاه‌های مختلف هواشناسی و داده‌های رادار مقایسه نموده و نشان دادند که استفاده از تراکم بیشتر ایستگاه‌های زمینی و همچنین به‌کارگیری داده‌های رادار سبب بهبود نتایج شبیه‌سازی هیدرولوژیکی می‌گردد. (Yu *et al.*, 2011)، با مقایسه داده‌های باران‌سنجی و داده‌های ماهواره‌ای TRMM ترکیب شده با داده‌های اندازه‌گیری شده بارش در شبیه‌سازی هیدروگراف‌های رودخانه با استفاده از مدل SWAT، نشان دادند که استفاده از داده‌های TRMM ترکیب شده با داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی بارش عملکرد بهتری نسبت به استفاده صرف از داده‌های زمینی دارد. همچنین (Yang *et al.*, 2014) برای شبیه‌سازی با استفاده از مدل SWAT از سه دسته داده بارش شبکه‌بندی شده‌ی CFSR^۱، APHRODITE و داده‌های بازآنالیز شده روند-سطح^۲ در چین استفاده کردند. در این



شکل ۱- نمایی از حوضه آبریز مه‌باد و زیر حوضه تحت مطالعه در بالادست سد مه‌باد. ایستگاه‌های هیدرومتری: زیر حوضه شماره ۱: زیر حوضه ورود به سد، زیر حوضه شماره ۱۱: زیر حوضه ایستگاه هیدرومتری بیطاس و زیر حوضه شماره ۱۴: زیر حوضه ایستگاه هیدرومتری کوتر (در تصویر سمت راست، نقاطی که با حرف p شروع شده‌اند نقاط داده‌ای CFSR، نقاطی که با اعداد پنج رقمی مشخص گردیده‌اند متعلق به ایستگاه‌های وزارت نیرو و نقاط با مشخصه اعداد چهار رقمی متعلق به سازمان هواشناسی می‌باشند).

داده‌ها

در این پژوهش برای نقشه خاک از نقشه جهانی خاکشناسی FAO و برای مدل رقمی ارتفاع از نقشه STRM با قدرت تفکیک مکانی ۳۰ متر استفاده شد. برای داده‌های هواشناسی از ۲۰ ایستگاه اندازه‌گیری زمینی وزارت نیرو و سازمان هواشناسی استفاده شد که ۱۲ ایستگاه در داخل حوضه و هشت ایستگاه دیگر در فاصله حداکثر ۱۵ کیلومتری حوضه انتخاب شد. همچنین پنج نقطه داده‌ای CFSR نیز در نظر گرفته شد که یک نقطه در داخل و چهار نقطه دیگر در فاصله حداکثری ۱۵ کیلومتر در نظر گرفته شد. در شکل (۱) ایستگاه‌های مذکور نمایش داده شده است. همچنین سری زمانی روزانه بارش و دما در ایستگاه‌ها مذکور برای یک دوره آماری ۳۶ ساله از ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۲ مورد استفاده قرار گرفت.

روش‌شناسی

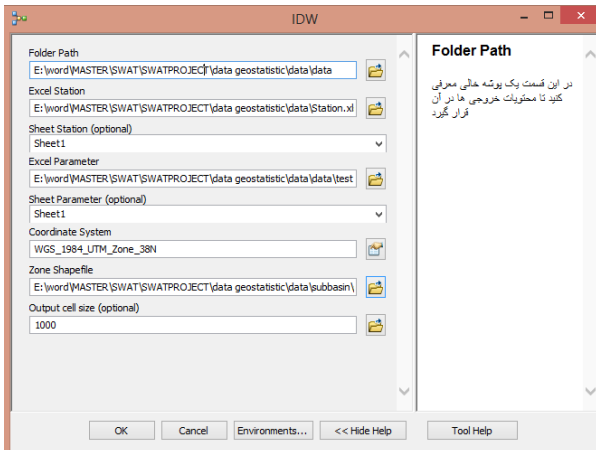
این تحقیق دارای دو هدف اصلی است که عبارت‌اند از: (۱) بررسی اثر انتخاب منابع مختلف داده‌ای بارش به عنوان ورودی شبیه-سازی هیدرولوژیکی و معرفی بهترین آن‌ها و (۲) بررسی روش‌های مختلف درون‌یابی بارش و معرفی بهترین آن‌ها. با این توجه در این پژوهش دو منبع داده بارش شامل (۱) مشاهدات زمینی وزارت

نیرو در ایستگاه‌های باران‌سنجی و تبخیرسنجی و مشاهدات زمینی سازمان هواشناسی شامل ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی و (۲) محصولات بازتحلیل شده پروژه CFSR و ترکیبات آن‌ها و همچنین دو روش درون‌یابی مکانی (۱) نزدیک‌ترین همسایگی و (۲) معکوس وزنی فاصله برای فراهم‌سازی ورودی هواشناسی (بارش) مدل هیدرولوژیکی SWAT با هم مقایسه می‌شوند.

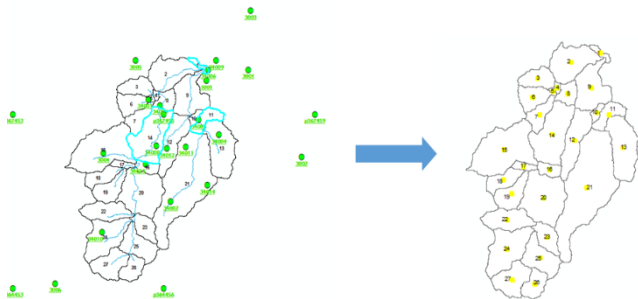
نتایج حاصله از به کارگیری دو منبع داده‌ای و دو روش درون‌یابی ذکر شده، در مدل SWAT با استفاده از الگوریتم SUFI-2 واسنجی و نتایج آن با استفاده از تابع هدف نش ساتکلیف^۱ (NS) مورد بررسی قرار گرفت. از این رو ابتدا نتایج به کارگیری داده‌های اندازه‌گیری زمینی و CFSR با هم مقایسه شد، سپس خروجی مدل در حالت استفاده از مجموع داده‌های اندازه‌گیری زمینی و CFSR با داده‌های به دست آمده از روش IDW مورد مطالعه قرار گرفت.

روش وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW)

روش وزن‌دهی معکوس فاصله براساس تابعی از معکوس فاصله بیان می‌شود (مطابق معادله ۲) که وزن آن‌ها با مخالف فاصله مشخص می‌شود، به طوری که مجموع آن برابر ۱ باشد. این روش



شکل ۲- نمایشی از ماژول توسعه داده شده در محیط نرم افزار ArcGIS10.2



شکل ۳- نمونه خروجی ایستگاه‌های مجازی به دست آمده از ماژول توسعه یافته برای محاسبه داده‌های روزانه و با حجم زیاد ایستگاه‌های هواشناسی.

برای مدل‌سازی حوضه در SWAT در ابتدا حوضه به واحد-های مکانی کوچک‌تری به نام زیر حوضه تقسیم می‌شود. این کار برای در نظر گرفتن اثرات ناهمگونی‌های مکانی انجام می‌گردد. این زیر حوضه‌ها به صورت مکانی با یکدیگر در ارتباط هستند به طوری که خروجی آن‌ها که مربوط می‌شود به جریان آب و مواد محلول، در آبراه رودخانه منتهی می‌شود و در نهایت به تدریج از بالادست به پایین‌دست، این جریان‌ها تجمیع می‌شوند. این زیر حوضه‌ها که بر اساس شرایط توپوگرافی منطقه تشکیل شده‌اند به صورت نیمه توزیعی مدل‌سازی می‌شوند به این صورت که هر زیرحوضه با توجه به پوشش گیاهی، نقشه خاک و نقشه طبقه-بندی شیب به اجزای کوچک‌تری به نام واحد پاسخ هیدرولوژیکی تقسیم می‌گردد. بسیاری از متغیرها و فرایندهای اساسی هیدرولوژیکی مانند مقادیر رواناب، تبخیر و تعرق، انتقال رسوب و وضعیت متغیرهای کیفی جریان (مانند مقدار نیترات موجود در آب) در مقیاس این واحدها محاسبه می‌شوند. در ادامه مدل SWAT، با استفاده از مقادیر محاسبه شده در مقیاس واحدهای پاسخ هیدرولوژیکی، روندیابی جریان برای خروجی هر زیرحوضه انجام می‌شود و در نهایت مقدار خروجی کل حوضه‌ی آبریز محاسبه می‌گردد.

پس از تعیین اثر وزن نقاط معلوم در نقطه مجهول با استفاده از معادله (۱) محاسبه می‌گردد.

$$F(X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i F(X_i) \quad (\text{معادله ۱})$$

$$\lambda_i = \frac{1}{d_i^k} \quad (\text{معادله ۲})$$

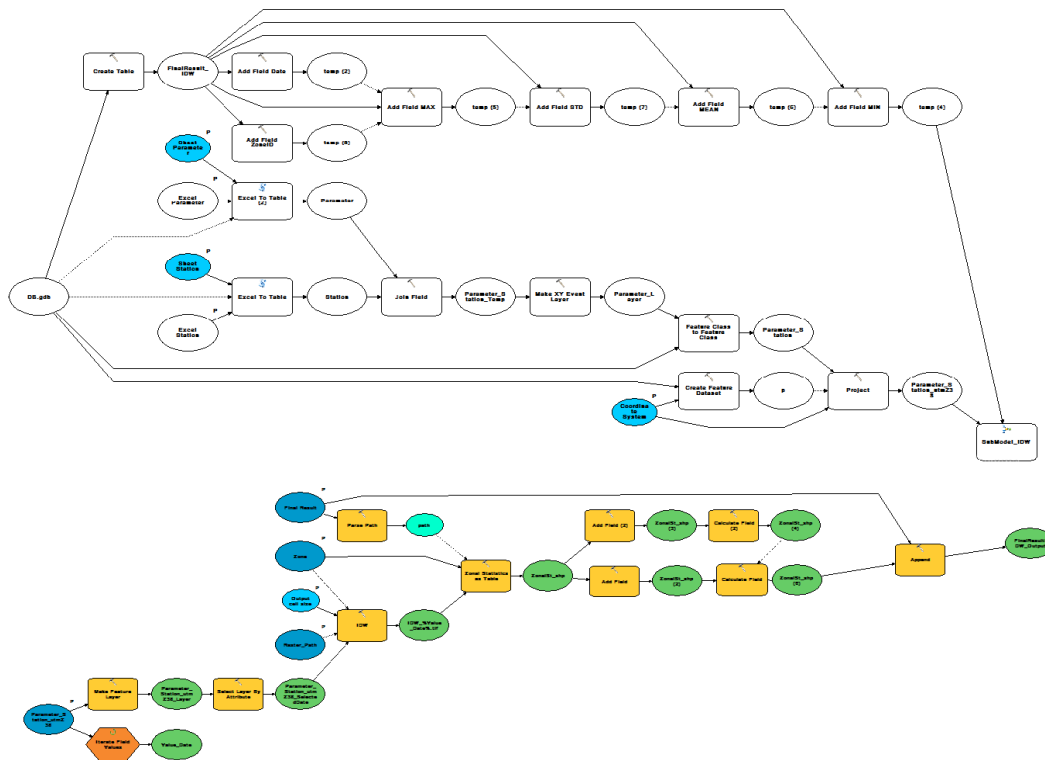
به ترتیب در معادله (۱)، $F(X)$ ، برابر است با مقدار درون‌یابی شده در نقطه مدنظر، $F(X_i)$ مقدار مشاهداتی در نقطه i ، n برابر کل نقاط مشاهداتی، و λ_i وزن نقطه مشاهداتی در نقطه مدنظر است. در معادله دوم d فاصله نقطه معلوم از مجهول و k توان وزن‌دهی روش IDW است که با توجه به پژوهش‌های دیگر در خصوص اثر همسایگی، گام زمانی و شرایط مختلف دیگر، در این پژوهش عدد دو در نظر گرفته شده است (Dirks et al., 1998; Tuo et al., 2016).

توسعه ماژول محاسباتی در محیط ArcGIS

با توجه به تعداد زیاد ایستگاه‌ها و حجم زیاد داده‌های روزانه، در محیط نرم‌افزار ArcGIS10.2 با به کارگیری Module builder، ماژولی برای محاسبه روش IDW برای این داده‌ها طراحی شد که در شکل (۴) نشان داده شده است. شکل (۲) نمایشی از GUI این ماژول را نمایش می‌دهد. این ماژول با دریافت فایل‌های موقعیت ایستگاه‌ها، داده ورودی ایستگاه‌ها، مسیر اطلاعات خروجی ماژول، سیستم مختصات مدنظر، فایل رستری زیرحوضه‌ها و اندازه پیکسلی، روش IDW را برای داده‌های ایستگاه‌های ورودی محاسبه می‌کند. به این صورت که در ابتدا شبکه‌ای منظم و متراکم از نقاط را برای حوضه تشکیل داده و برای تک‌تک این نقاط، با استفاده از نقاط ایستگاه‌های بارش و با به کارگیری روش IDW بارش محاسبه می‌گردد. سپس بارش در هر زیر حوضه با استفاده از میانگین‌گیری از بارش مربوط به نقاط شبکه که در آن زیرحوضه واقع شده به دست آمده در نهایت به نقطه مرکز زیرحوضه اختصاص می‌یابد. خروجی ماژول GIS، شبکه نقاط مرکز زیرحوضه‌ها به همراه سری زمانی بارش مربوط به هر زیرحوضه است که به عنوان ورودی مدل SWAT بجای ایستگاه‌های های اولیه بکار گرفته می‌شود. شکل (۳) نمایشی از ایستگاه‌های مجازی به دست آمده با استفاده از این ماژول را نشان می‌دهد.

مدل SWAT

SWAT یک مدل هیدرولوژیکی نیمه توزیعی و مبتنی بر فرآیند است که برای اولین بار در اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ میلادی در سرویس تحقیقات کشاورزی ایالات متحده آمریکا (ARS) توسعه داده شد.



شکل ۴- نمایی از توسعه مدل در محیط Modelbuilder برای محاسبه روش IDW و تکرار آن برای هر روز

محدوده است. به لحاظ نظری، مقدار ایده آل p-factor و r-factor به ترتیب ۱۰۰ درصد (یک) و صفر است؛ به این معنی که تمام مشاهدات در داخل محدوده‌ی مجاز عدم قطعیت خروجی قرار داشته باشند و از طرفی ضخامت این محدوده نیز برابر با صفر باشد. با توجه به اینکه در بسیاری از پروژه‌های عملی دسترسی به چنین مقادیری دور از انتظار است مقدار p-factor بزرگ‌تر از ۰/۶ یا ۰/۷ به ازای مقدار r-factor نزدیک به یک پیشنهاد شده است. این مقادیر برای واسنجی مدل به ازای مشاهدات رواناب بوده و برای سایر مشاهدات همچون رسوب مقدار p-factor کوچک‌تر به ازای r-factor بزرگ‌تر می‌تواند قابل قبول باشد.

در این تحقیق برای واسنجی مدل از داده‌های دبی به صورت ماهانه استفاده شد. بدین منظور سه سال ابتدایی (۱۹۷۹ تا ۱۹۸۱) برای دوره گرم کردن مدل، ۲۷ سال (۱۹۸۲ تا ۲۰۰۶) برای واسنجی و شش سال انتهایی (۲۰۰۷ تا ۲۰۱۲) برای اعتبار سنجی مدل در نظر گرفته شد.

در تحقیق مدنظر از معیار NS (نش ساتکلیف، ۱۹۷۰) به عنوان معیار اصلی و همچنین معیار R^2 برای بررسی دقت شبیه‌سازی‌ها استفاده گردید. نش ساتکلیف با توجه به اختلاف داده‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی به دست می‌آید و مقدار بهینه‌ای برابر ۱ دارد. R^2 نیز عددی بین ۰ تا ۱ را شامل می‌شود و روند

واسنجی، اعتبار سنجی و تحلیل عدم قطعیت مدل SWAT به منظور واسنجی، اعتبارسنجی و تحلیل عدم قطعیت حوضه‌ی آبریز مدل‌سازی شده از بسته‌ی نرم‌افزاری SWAT-CUP استفاده شد. این بسته‌ی نرم‌افزاری حاوی پنج الگوریتم بهینه‌سازی شامل SUFI-2، PSO، GLUE، ParaSol و MCMC است. در این پژوهش از الگوریتم SUFI-2 به منظور واسنجی و اعتبارسنجی مدل استفاده گردید. در این قسمت به معرفی الگوریتم مذکور پرداخته شده و سپس به شیوه واسنجی و اعتبارسنجی حوضه‌ی آبریز مورد مطالعه اشاره خواهد شد. الگوریتم SUFI-2 توسط (2007) Abbaspour *et al.* ارائه شده است. این الگوریتم به عنوان یک الگوریتم واسنجی احتمالاتی و مبتنی بر عدم قطعیت است. در SUFI2 منابع مختلف عدم قطعیت مانند خطاهای ناشی از مشاهدات، داده‌های ورودی و خطای ذاتی مدل در عدم قطعیت پارامترها تجمیع می‌شود. همچنین برای نمایش عدم قطعیت خروجی مدل از محدوده ۹۵ درصد عدم قطعیت پیش‌بینی شده یا همان 95PPU استفاده می‌شود.

در الگوریتم SUFI-2 مناسب بودن شبیه‌سازی‌ها با استفاده از دو معیار p-factor و r-factor نیز سنجیده می‌شود. p-factor نشان دهنده‌ی درصد نقاط مشاهداتی قرار گرفته در داخل محدوده 95PPU است و r-factor نماینده‌ی از ضخامت این

CFSR با توجه به در نظر گرفتن معیار NS، در دوره واسنجی بهتر از داده‌های زمینی و در دوره اعتبارسنجی دقیقاً به عکس و نتایج داده‌های زمینی مناسب‌تر می‌باشد، بطوریکه در مورد ایستگاه ورودی سد، مقدار NS مربوط به داده‌های CFSR در دوره کالیبراسیون و اعتبارسنجی به ترتیب برابر با ۰/۶۸ و ۰/۴۳ و مقدار این معیار برای داده‌های زمینی برای دو دوره مذکور به ترتیب برابر ۰/۴۴ و ۰/۶۶ می‌باشد. شایان ذکر است که در مورد روش نزدیک‌ترین همسایگی مورد استفاده در مدل SWAT هر چه تراکم ایستگاه‌ها بیشتر باشد انتظار می‌رود که دقت داده‌های ورودی بیشتر شود. این در حالی است که در این تحقیق استفاده از فقط پنج نقطه CFSR، نشان از عملکرد بهتر این منبع داده‌ای نسبت به ۲۰ ایستگاه اندازه‌گیری زمینی دارد و این به نوعی یک جنبه برتری برای داده‌های CFSR به حساب می‌آید.

در دوره واسنجی مقایسه مقادیر شاخص NS برای دو ایستگاه کوتر و بیطاس به ترتیب برابر با ۰/۶۱ و ۰/۰۶ در شرایط استفاده از داده‌های CFSR نشان می‌دهد که مدل برای ایستگاه اول بهتر کالیبره شده است. وضعیت عکس در مورد شرایط استفاده از داده‌های اندازه‌گیری زمینی وجود دارد به طوری که مقدار شاخص برای دو ایستگاه به ترتیب برابر ۰/۲۷ و ۰/۳۷ است. مقایسه نتایج ایستگاه‌ها با توجه به مقدار شاخص‌های عدم قطعیت یعنی p-factor و r-factor نشان دهنده نتایج و نکات حائز اهمیت است. در مورد ایستگاه بیطاس در شرایط استفاده از داده‌های CFSR در مقایسه با شرایط استفاده از داده‌های CFSR p-factor بیشتر یعنی بهتر (۰/۴۸ در مقابل ۰/۲۸) و مقدار r-factor کمتر یعنی بهتر (۰/۷۴ در مقابل ۱/۳۷) است. این در حالی است که معمولاً افزایش مقدار p-factor با افزایش مقدار r-factor همراه است و بدین جهت امکان مقایسه فراهم نمی‌شود. در مورد این ایستگاه می‌توان اظهار نمود که با توجه به شاخص‌های عدم قطعیت، استفاده از داده‌های زمینی منجر به نتایج بهتری از داده‌های CFSR گردیده است. با توجه به اینکه شاخص‌های عدم قطعیت مذکور در حقیقت کیفیت تخمین‌های بازه‌ای پارامترها را نشان می‌دهد و NS شاخصی است که کیفیت تخمین نقطه‌ای پارامترها را منعکس می‌نماید می‌توان نتیجه گرفت در کل، استفاده از داده‌های زمینی در مقایسه با داده‌های CFSR منجر به نتایج بهتری از جهت تخمین‌های بازه‌ای و نتایج بدتر از جهت تخمین‌های نقطه‌ای گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که تأثیرگذاری داده‌های اندازه‌گیری شده جریان، در ایستگاه هیدرومتری کوتر نسبت به بیطاس در ایستگاه ورودی به سد

بین مشاهدات و شبیه‌سازی را نشان می‌دهد. این مقدار هرچه بیشتر باشد عملکرد مدل بهتر است. (Moriassi et al., 2007). عملکرد مدل را با استفاده از معیار NS دسته‌بندی کردند: NS کمتر از ۰/۵ عملکرد نامطلوب، NS بین ۰/۵ و ۰/۶۵ عملکرد مطلوب، بین ۰/۶۵ و ۰/۷۵ عملکرد خوب و ۰/۷۵ تا ۱ عملکرد خیلی خوب.

با توجه به این که در این تحقیق هدف بررسی عملکرد ورودی بارش به مدل است، برای این که اثرات انسانی ساخت سد، روی نتایج تأثیر کمتری بگذارد و بتوان مقایسه درستی را انجام داد، حوضه بالادستی دریاچه سد انتخاب گردید. در این حوضه، زیر حوضه شماره یک (ایستگاه هیدرومتری ورودی دریاچه سد) در پایین دست دو زیر حوضه دیگر قرار گرفته است به همین علت با توجه به روندیابی جریان صورت گرفته در مدل، نتایج آن متأثر از شبیه‌سازی زیر حوضه‌های بالادستی می‌باشد و چون داده‌های ورودی سد را شبیه‌سازی می‌کند از اهمیت خاصی در مدیریت سد برخوردار است. با توجه به این موضوع مسئله مورد تحقیق یک مسئله چند مکانه^۱ است و با توجه به مساحت بالادستی هر ایستگاه هیدرومتری و معادله (۳) وزن مشخصی در کالیبره کردن برای هر ایستگاه در نظر گرفته شد که به ترتیب برای ایستگاه ورودی سد (زیر حوضه شماره ۱)، ایستگاه بیطاس (زیر حوضه شماره ۱۱) و کوتر (زیر حوضه شماره ۱۴) برابر ۰/۵۷، ۰/۱۴ و ۰/۲۹ است. این کار موجب نتایج بهتر در واسنجی مدل گردید (Bai et al., 2017).

(معادله ۳)

$$NS_{basin} = w_{11} NS_{11} + w_{14} NS_{14} + w_{dam} NS_{dam}$$

که در آن NS_{basin} تابع هدف مدنظر برای کل حوضه آبریز مورد مطالعه، NS_{11} مربوط به ایستگاه هیدرومتری حوضه بیطاس، NS_{14} مربوط به ایستگاه هیدرومتری کوتر و NS_{dam} مربوط به ورودی سد می‌باشد. وزن‌های هر ایستگاه نیز با اندیس مرتبط با حرف w نمایش داده شده است.

نتایج و بحث

مقایسه داده‌های CFSR و زمینی

نتایج دوره واسنجی و اعتبارسنجی در جدول (۱) ارائه شده است. مقایسه نتایج دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT با استفاده از دو منبع مختلف داده‌های باز آنالیز شده CFSR و داده‌های اندازه‌گیری شده زمینی، نشان می‌دهد که در کل حوضه با توجه به مشاهدات دبی در محل ورودی سد، عملکرد داده‌های

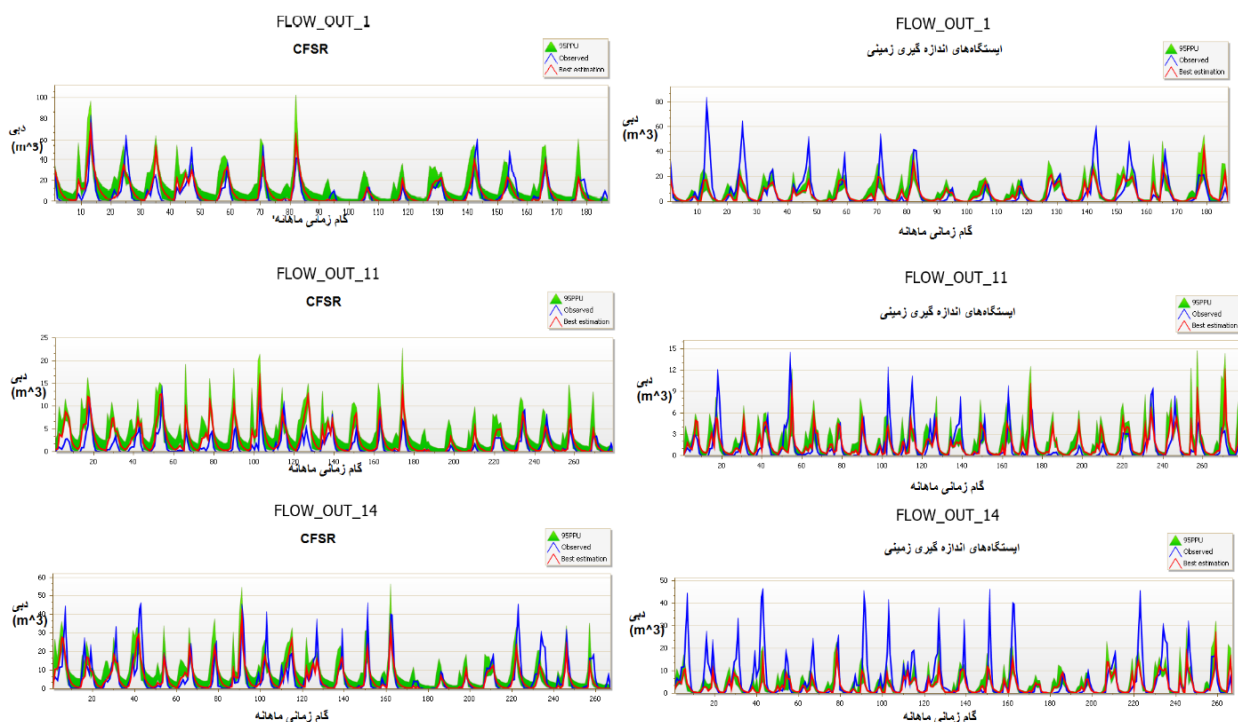
شکل (۵) هیدروگراف داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی حاصل از داده‌های ورودی بارش ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی و CFSR و همچنین محدوده باند 95PPU را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مقادیر پیک در حالت استفاده از داده‌های CFSR به مراتب بهتر تشخیص داده شده و تعداد نقاط داده‌های مشاهداتی در محدوده 95PPU در حالت استفاده از داده‌های CFSR بیشتر بوده که نشان از دقت مناسب این داده ورودی دارد.

بیشتر است و این موضوع با بزرگ‌تر بودن مقادیر رواناب ایستگاه کوتر نسبت به بیطاس و متأثر بودن سطح زهکشی مرتبط است. همچنین با توجه به معادله (۳)، NS کل حوضه با استفاده از داده‌های CFSR و داده‌های ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی برای دوره واسنجی به ترتیب برابر ۰/۵۷ و ۰/۳۸ به دست آمده است، که نشان از برتری منبع داده‌ای CFSR نسبت به ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی در کل حوضه دارد.

جدول ۱- مقادیر شاخص‌های برازش مدل به تفکیک دوره واسنجی و اعتبارسنجی و به تفکیک داده‌های CFSR و زمینی

اعتبارسنجی - داده‌های CFSR				واسنجی - داده‌های CFSR				ایستگاه/شاخص
MSE	NS	r-factor	p-factor	MSE	NS	r-factor	p-factor	
۴,۳	۰.۴۳	۱.۰۳	۰.۶۵	۶,۳	۰.۶۸	۰.۹۱	۰.۵۱	ورودی سد
۲,۹	-۰.۵۱	۱.۵۸	۰.۴۹	۵,۶	۰.۰۶	۱.۳۷	۰.۲۸	بیطاس
۳,۴	۰.۳۸	۰.۶۱	۰.۶۱	۴,۱	۰.۶۱	۰.۶۹	۰.۶۳	کوتر

اعتبارسنجی - داده‌های زمینی				واسنجی - داده‌های زمینی				ایستگاه/شاخص
MSE	NS	r-factor	p-factor	MSE	NS	r-factor	p-factor	
۲,۶	۰.۶۶	۰.۶۵	۰.۶	۱,۱	۰.۴۴	۰.۴۸	۰.۵۴	ورودی سد
۱,۳	۰.۳۱	۱	۰.۴۱	۳,۷	۰.۳۷	۰.۷۴	۰.۴۸	بیطاس
۲,۹	۰.۴۸	۰.۴۱	۰.۵۲	۷,۸	۰.۲۷	۰.۳۶	۰.۴۹	کوتر



شکل ۵- نتایج حاصل از داده‌های ورودی بارش ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی و CFSR با استفاده از هیدروگراف داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی و محدوده باند 95PPU در سه ایستگاه هیدرومتری به ترتیب از بالا به پایین، ورودی سد مهاباد (FLOW_OUT_1)، بیطاس (FLOW_OUT_11) و کوتر (FLOW_OUT_14) در دوره واسنجی.

نسبت به ۰/۱۷). NS برای کل حوضه برای حالت استفاده از روش‌های IDW و نزدیک‌ترین همسایگی به ترتیب برابر ۰/۶۹ و ۰/۴۷ به دست آمده است که با توجه به دسته‌بندی Moriasi et al. (2007) NS حاصله از روش IDW در دسته عملکرد خوب قرار می‌گیرد و NS حاصله از روش نزدیک‌ترین همسایگی در دسته عملکرد نامطلوب دسته‌بندی می‌شود که این نشان از برتری کامل استفاده از داده‌های بارش حاصل از روش IDW دارد.

با توجه به شکل (۶) که نمایش دهنده هیدروگرافی ایستگاه‌های هیدرومتری است، مشاهده می‌گردد که استفاده از روش IDW نسبت به روش نزدیک‌ترین همسایگی منجر به شبیه‌سازی بهتر پیک جریان می‌شود.

با توجه به نتایج به دست آمده، نویسندگان استفاده از روش درون‌یابی IDW را توصیه می‌نمایند. همچنین به نظر می‌رسد که در مناطق با تراکم پایین ایستگاه‌های هواشناسی روش IDW می‌تواند موجب بهبود بیشتر نتایج شبیه‌سازی گردد.

با توجه به جدول (۲) مشاهده می‌شود که شاخص p-factor در حالت استفاده از داده‌های روش نزدیک‌ترین همسایگی (p-factor برابر با ۰/۷۳) نسبت به روش IDW (p-factor برابر با ۰/۶۳) بیشتر است. این موضوع با بزرگ‌تر بودن شاخص r-factor در حالت استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی نسبت به روش IDW (۰/۵۵ نسبت به ۰/۴۷) در ارتباط است. به عبارتی با توجه به مفهوم این دو شاخص و شکل (۶) بزرگ بودن ضخامت باند 95PPU موجب شده، تعداد مشاهدات بیشتری در این باند قرار گیرد.

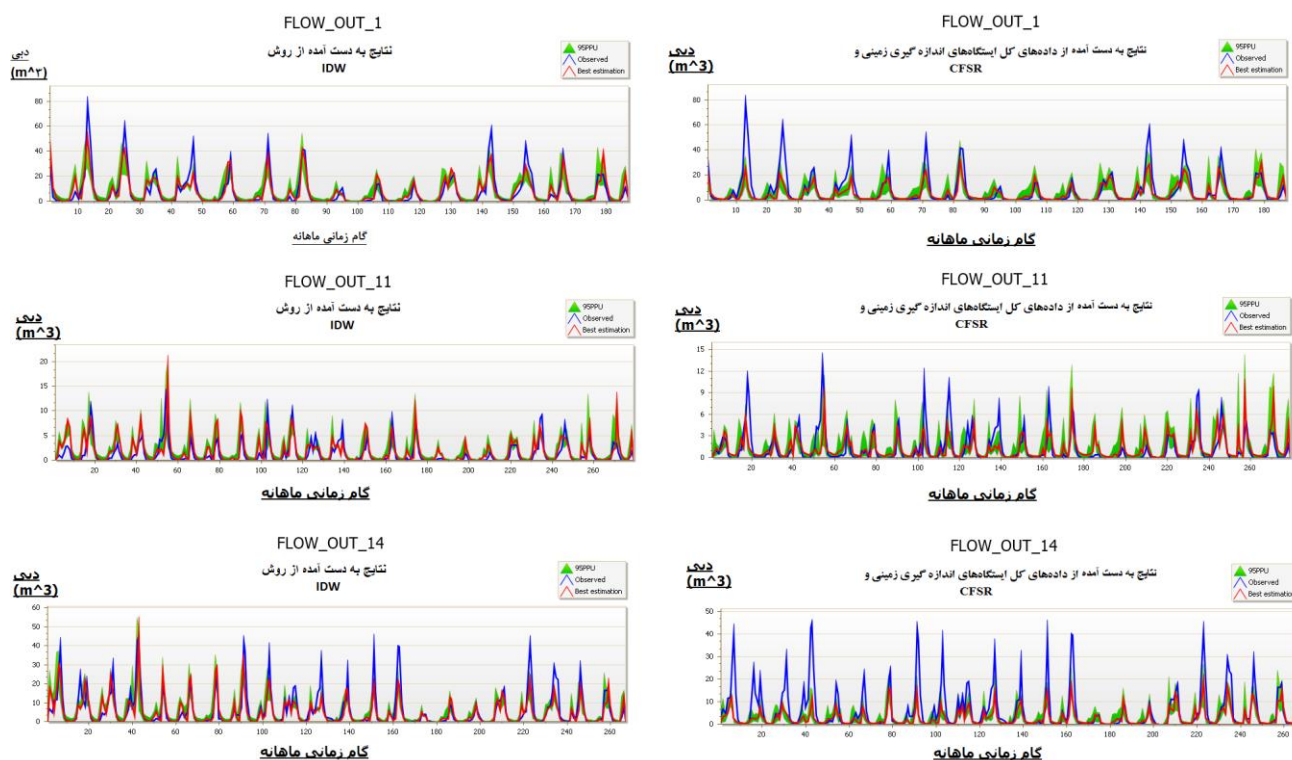
مقایسه روش‌های نزدیک‌ترین همسایگی و IDW

همان‌طور که بیان شد مدل SWAT برای درون‌یابی مکانی بارش از روش نزدیک‌ترین همسایگی استفاده می‌کند. در این بخش به مقایسه و بررسی این روش با روش درون‌یابی IDW پرداخته شد. تمامی ایستگاه‌ها و منابع مختلف برای محاسبه IDW با استفاده از ماژول توسعه یافته به کار گرفته می‌شوند.

با توجه به جدول (۲) برای دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی در ایستگاه خروجی حوضه، NS به دست آمده از داده‌هایی که با روش IDW به مدل وارد شده است به مراتب عدد بهتری را نسبت به روش نزدیک‌ترین همسایگی نشان می‌دهد. NS با استفاده از روش IDW در دوره واسنجی و اعتبارسنجی به ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۷۸ به دست آمده است، این در حالی است که NS به دست آمده با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی به ترتیب برابر ۰/۵۶ و ۰/۷۱ می‌باشد. با استفاده از روش IDW و توزیع فضایی مناسب توسط این روش، تراکم کم ایستگاه‌ها در زیرحوضه‌های مربوط به ایستگاه هیدرومتری کمتر، به خوبی برطرف شده است و مقدار NS در دوره واسنجی و اعتبارسنجی برای این ایستگاه به ترتیب برابر ۰/۷ و ۰/۶ به دست آمده است که در حالت استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی برای این دو دوره ۰/۳۵ و ۰/۵۳ است. در ایستگاه بیطاس نیز معیار NS حاصله از به کارگیری دو روش درون‌یابی در دوره واسنجی، بسیار نزدیک به هم بوده (۰/۳۸ برای روش نزدیک‌ترین همسایگی و ۰/۳۱ برای روش IDW) و در دوره اعتبارسنجی نتایج حاصله از به کارگیری IDW با توجه به جدول (۲) عملکرد بهتری را داشته است (۰/۴۷).

جدول ۲- دوره واسنجی و اعتبارسنجی با استفاده از روش نزدیک‌ترین همسایگی (جدول بالایی) و داده‌های به دست آمده از روش IDW (جدول پایینی)

اعتبارسنجی - نزدیک‌ترین همسایگی				واسنجی - نزدیک‌ترین همسایگی				ایستگاه/شاخص
MSE	NS	r-factor	p-factor	MSE	NS	r-factor	p-factor	
۲,۲	۰,۷۱	۰,۷۸	۰,۸۳	۷,۸	۰,۵۶	۰,۵۵	۰,۷۳	ورودی سد
۱,۶	۰,۱۷	۱,۱۱	۰,۶۶	۳,۶	۰,۳۸	۰,۸۲	۰,۶۷	بیطاس
۲,۶	۰,۵۳	۰,۵۱	۰,۶۲	۷	۰,۳۵	۰,۴	۰,۵۹	کوثر
اعتبارسنجی - IDW				واسنجی - IDW				ایستگاه/شاخص
MSE	NS	r-factor	p-factor	MSE	NS	r-factor	p-factor	
۱,۷	۰,۷۸	۰,۵۳	۰,۶	۴,۱	۰,۷۹	۰,۴۷	۰,۶۳	ایستگاه ورودی سد
۱	۰,۴۷	۰,۷۵	۰,۳۷	۴,۱	۰,۳۱	۰,۷۶	۰,۴۸	ایستگاه بیطاس
۲,۲	۰,۶	۰,۳۵	۰,۵۲	۳,۲	۰,۷	۰,۴۴	۰,۵۹	ایستگاه کوثر



شکل ۶- نتایج حاصل از داده‌های ورودی بارش حاصل از استفاده کل ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی و CFSR در روش نزدیک‌ترین همسایگی و داده‌های ورودی بارش مازول IDW با استفاده از هیدروگراف داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی و محدوده باند 95PPU در سه ایستگاه هیدرومتری به ترتیب از بالا به پایین، ورودی سد مهاباد (FLOW_OUT_1)، بیطاس (FLOW_OUT_11) و کوثر (FLOW_OUT_14) در دوره واسنجی.

نتیجه‌گیری

پهنه‌ای نمودن داده‌های بارش نقطه‌ای ورودی موجب بهبود شبیه‌سازی رواناب در محل ورودی سد و همچنین در محل ایستگاه‌های هیدرومتری کوثر و بیطاس شد. همچنین یافته‌های این تحقیق نشان داد که دقت ورودی بارش به مدل SWAT می‌تواند به طور قابل توجهی موجب کاهش عدم قطعیت شبیه‌سازی رواناب گردد و استفاده از روش IDW به جای روش استاندارد مورد استفاده در مدل SWAT (یعنی روش نزدیک‌ترین همسایگی) (Neitsch *et al.*, 2011; Wood *et al.*, 1990) توصیه می‌گردد.

در این تحقیق سعی بر آن شد که اهمیت داده ورودی بارش در مدل SWAT مورد بررسی قرار گیرد. نتایج نشان داد که استفاده از منبع داده‌ای CFSR می‌تواند خصوصاً در مناطق با تراکم ایستگاهی کم موجب خروجی‌های بهتر در مدل گردد. در حوضه مهاباد این مهم خصوصاً در ایستگاه کوثر کاملاً مشخص است که با توجه به سطح زیر پوشش این ایستگاه از اهمیت به خصوصی برخوردار است. همچنین استفاده از روش IDW برای درون‌یابی و

REFERENCES

- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2-4), 413-430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- Bai, J., Shen, Z., & Yan, T. (2017). A comparison of single- and multi-site calibration and validation: a case study of SWAT in the Miyun Reservoir watershed, China. *Frontiers of Earth Science*, 11(3), 592-600. <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0656-x>
- Dirks, K. N., Hay, J. E., Stow, C. D., & Harris, D. (1998). High-resolution studies of rainfall on Norfolk Island: Part II: Interpolation of rainfall data. *Journal of Hydrology*, 208(3-4), 187-193.
- Haberlandt, U., & Kite, G. W. (1998). Estimation of daily space-time precipitation series for macroscale hydrological modelling Abstract :, 1432(June 1997), 1419-1432.
- Masih, I., Maskey, S., Uhlenbrook, S., & Smakhtin, V. (2011). Assessing the Impact of Areal Precipitation Input on Streamflow Simulations Using the SWAT Model. *Journal of the American Water Resources Association*, 47(1), 179-195. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00502.x>
- Maskey, S., Guinot, V., & Price, R. K. (2004). Treatment of precipitation uncertainty in rainfall-runoff modelling: A fuzzy set approach. *Advances*

- in *Water Resources*, 27(9), 889–898.
<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.07.001>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., ... Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Williams, J. R., Documentation, T., Shekhar, S., ... Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Encyclopedia of GIS*. Texas Water Resources Institute. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_1231
- Obed, C., Wendling, J., & Beven, K. (1994). The sensitivity of hydrological models to spatial rainfall patterns: an evaluation using observed data. *Journal of Hydrology*, 159(1–4), 305–333. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90263-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90263-1)
- Radcliffe, D. E., & Mukundan, R. (2017). PRISM vs. CFSR precipitation data effects on calibration and validation of SWAT models. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 53(1), 89–100.
- Starks, P. J., & Moriasi, D. N. (2009). Spatial resolution effect of precipitation data on SWAT calibration and performance: implications for CEAP. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 52(4), 1171–1180. <https://doi.org/ISSN 0001-2351 1171>
- Szcześniak, M., & Piniewski, M. (2015). Improvement of hydrological simulations by applying daily precipitation interpolation schemes in meso-scale catchments. *Water*, 7(2), 747–779.
- Tobin, C., Nicotina, L., Parlange, M. B., Berne, A., & Rinaldo, A. (2011). Improved interpolation of meteorological forcings for hydrologic applications in a Swiss Alpine region. *Journal of Hydrology*, 401(1–2), 77–89. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.02.010>
- Tuo, Y., Duan, Z., Disse, M., & Chiogna, G. (2016). Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy). *Science of the Total Environment*, 573, 66–82. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.034>
- Wood, G. B., Wiant, H. V., Loy, J., & Miles, J. A. (1990). Centroid sampling: A variant of importance sampling for estimating the volume of sample trees of radiata pine, 36, 233–243.
- Yang, Y., Wang, G., Wang, L., Yu, J., & Xu, Z. (2014). Evaluation of gridded precipitation data for driving SWAT model in area upstream of three gorges reservoir. *PLoS One*, 9(11), e112725. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0112725>
- Yu, M., Chen, X., Li, L., Bao, A., & de la Paix, M. J. (2011). Streamflow Simulation by SWAT Using Different Precipitation Sources in Large Arid Basins with Scarce Raingauges. *Water Resources Management*, 25(11), 2669–2681. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9832-z>
- Zhang, L., He, C., Li, J., Wang, Y., & Wang, Z. (2017). COMPARISON OF IDW AND PHYSICALLY BASED IDEW METHOD IN HYDROLOGICAL MODELLING FOR A LARGE MOUNTAINOUS WATERSHED , NORTHWEST CHINA. <https://doi.org/10.1002/rra.3147>