

## مدل سازی هیدروگراف جریان با استفاده از GIS و مدل هیدرولوژیکی توزیعی در حوزه دینور

### کرخه

مریم آذین مهر<sup>۱\*</sup>، عبدالرضا بهره مند<sup>۲</sup> و آتنا کبیر<sup>۳</sup>

- (۱) دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.  
 (۲) دانشیار، گروه آبخیزداری و مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران.  
 (۳) دانش آموخته دکتری، گروه آبخیزداری، واحد علوم تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران.

\* نویسنده مسئول: maryam.azinmehr@grad.kashanu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۶

تاریخ دریافت: ۹۳/۰۹/۲۳

### چکیده

در این مقاله اساس مدل سازی در حوزه بصورت تقسیم بندی آن بصورت شبکه ای می باشد، به طوری که هر سلول یک تابع پاسخ مستقل و منحصر به فردی نسبت به سایر سلول ها دارد. از مجموع پاسخ های جریان سلول ها، هیدروگراف جریان از سطح حوزه حاصل می شود. روش ارائه شده، پیش بینی هیدروگراف جریان حوزه رودخانه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی WetSpa است. WetSpa یک مدل هیدرولوژیکی - توزیعی بر پایه GIS می باشد که در مقیاس حوزه عمل کرده و برای پیش بینی سیلاب و مدیریت حوزه آبخیز توسعه یافته است. مدل فیزیکی بوده و قادر است فرایندهای هیدرولوژیکی بارش، ذوب برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیر سطحی، جریان آب زیر زمینی و... را به طور پیوسته در زمان و مکان شبیه سازی نموده و تعادل آب و انرژی را در هر سلول رستری برقرار نماید. مدل از لایه های توپوگرافی، کاربری و خاک و همچنین آمار هواشناسی روزانه برای پیش بینی هیدروگراف های سیل و توزیع مکانی پارامترهای هیدرولوژیکی حوزه استفاده می نماید. نقشه های رقومی توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک سه نقشه اصلی مدل بوده که در قالب GIS و با ابعاد سلولی ۱۰×۱۰ متر به مدل وارد شدند. مدل با ۷۶ ماه آمار هیدرومتئورولوژیکی اندازه گیری شده در حوزه دینور کرخه در کرمانشاه به کار برده شد. نتایج شبیه سازی حاکی از تطابق خوب بین هیدروگراف های شبیه سازی و مشاهده ای است به طوریکه مدل قادر است هیدروگراف های روزانه را با دقت خوب و بر اساس معیار ناش - ساتکلیف دوره واسنجی و کلینگ - گوپتا دوره اعتبارسنجی به ترتیب ۶۶ درصد و ۷۲ درصد پیش بینی نماید.

واژه های کلیدی: هیدروگراف جریان، پیش بینی، رودخانه کرخه، GIS و WetSpa.

## مقدمه

بررسی هیدروگراف حوزه، امکان مطالعه دبی حداکثر سیلاب، حجم سیلاب و میزان ذخیره حوزه پس از قطع بارندگی را فراهم می‌آورد که در طراحی ابعاد سازه‌های آبی نقش اساسی دارد. مهم‌ترین کاربرد هیدروگراف در تعیین ابعاد سرریز سدها، روندیابی سیل، محاسبه ابعاد کانال‌های فاضلاب و تعیین ابعاد سازه‌های مهار سیلاب می‌باشد (مهدوی، ۱۳۸۴). مدل، یک پدیده را در ساده‌ترین حالت ممکن بررسی می‌کند و در صورت موفق بودن می‌توان آن را به حالت‌های پیچیده تعمیم داد، در این حالت می‌توان پدیده‌های بسیار پیچیده را تفسیر نمود و پیشگویی‌های صحیحی به عمل آورد (رستمیان، ۱۳۸۵). یک سوال در اینجا مطرح می‌شود چرا باید فرآیندهای هیدرولوژیکی بارش - رواناب مانند هیدروگراف جریان را مدل‌سازی یا شبیه‌سازی نمود؟ پاسخ اصلی این سوال، محدود بودن روش‌های اندازه‌گیری در هیدرولوژی می‌باشد. در حقیقت یک محقق قادر نیست هر چیزی را به سیستم‌های هیدرولوژیکی بداند و اندازه‌گیری کند، زیرا تعداد محدودی از روش‌های اندازه‌گیری و همچنین دامنه محدودی از اطلاعات در اختیار اوست. بنابراین به روشی احتیاج است که بوسیله آن بتوان آمار موجود را برای حوزه‌های بدون آمار و یا مکان‌هایی که اندازه‌گیری در آن‌ها ممکن نیست تعمیم داده و به تغییرات هیدرولوژیکی آینده دست پیدا کرد که این روش مؤثر برای توسعه علم است (Beven, 2001). با پیشرفت‌های اخیر در تکنولوژی سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) امکان دسترسی، ذخیره‌سازی و مدیریت بر انبوهی از پارامترها و متغیرهای هیدرولوژیکی توزیعی مکانی، میسر شده است. مدل‌سازی بارش - رواناب و رسیدن به تخمینی از شرایط و پارامترهای هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز همواره یک نیاز مهم و مداوم برای مسائل کاربردی در زمینه‌های ارزیابی منابع آب، طراحی کانال‌های مهندسی، پیش‌بینی سیلاب و بسیاری اهداف دیگر می‌باشد. تلفیق GIS با مدل‌های توزیعی مکانی در علم هیدرولوژی در رابطه با مطالعه اثر فعالیت‌های بشری بر رفتار هیدرولوژیکی حوزه رودخانه‌ها با گسترش سریعی همراه بوده است. GIS با قدرت تحلیل مکانی بالا از یک سو و امکان تلفیق و تفریق لایه‌های اطلاعاتی به منظور ایجاد لایه‌های جدید اطلاعاتی از سوی دیگر، به عنوان ابزاری کارا و ضروری در مدیریت منابع آب تبدیل شده است. قابلیت شبیه‌سازی سیستم پیچیده هیدرولوژیکی در تمام نقاط داخل حوزه در قالب شبکه سلولی به صورت توزیعی و نیز امکان ارائه کلیه پارامترهای هیدرولوژیکی مدل به صورت نقشه از مزایای مهم استفاده از GIS در این مدل‌ها می‌باشد. گسترش مدل‌های توزیعی مکانی مرهون پیشرفت‌ها و گسترش GIS می‌باشد و بدون تردید، یک مدل توزیعی هیدرولوژیکی منهای GIS عملاً وجود خارجی نخواهد داشت (بیات، ۱۳۸۹). اساس مدل‌های توزیعی هیدرولوژیکی - فیزیکی درک ما از فیزیک فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌باشد که عکس‌العمل آبخیز را کنترل نموده و در توصیف این فرآیندها از معادلات و روابط فیزیکی استفاده می‌گردد. مدل مورد استفاده در این تحقیق مدل هیدرولوژیکی

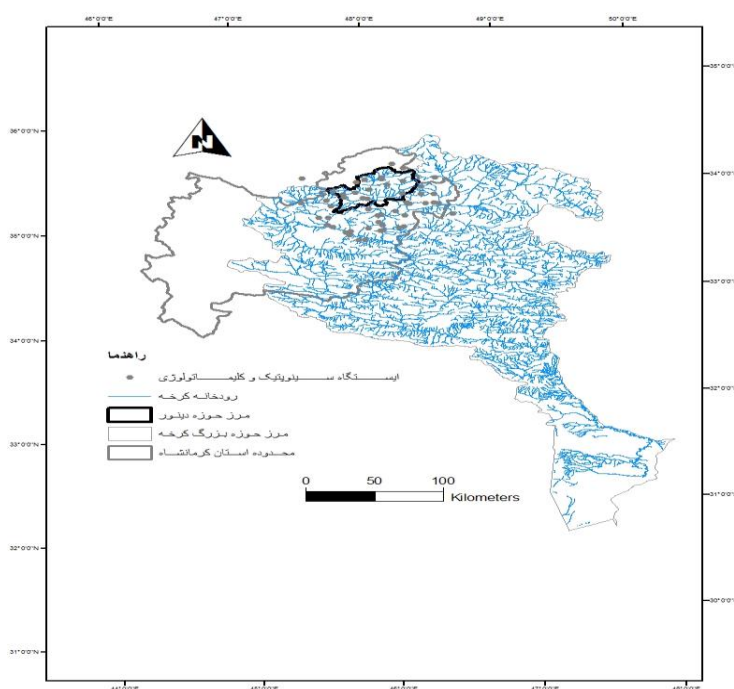
توزیعی مکانی WetSpa می‌باشد. بیشتر توانایی‌های مدل شامل پیش‌بینی سیل، بررسی اثر کاربری اراضی بر روی سیل‌ها و کاربرد آن در جهت مدیریت حوزه‌ی آبخیز می‌باشد (Bahremand, 2006). در مدل WetSpa از نقشه‌های رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی و بافت خاک، پارامترهای مختلف توزیعی مدل در سطح آبخیز استفاده می‌شود. سپس رواناب و سایر مؤلفه‌های بیلان آبی محاسبه می‌شود که در نهایت رواناب محاسبه شده، با استفاده از روش تقریب موج پخشی تا خروجی حوزه آبخیز روندیابی می‌شود (Zeinivand, 2009). از فواید مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی - مکانی یک انعکاس توزیعی مکانی از اثر پارامترهای مدل و خصوصیات فیزیکی حوزه می‌باشد، و تمام پارامتر و فرآیندهای هیدرولوژیکی را سلول به سلول شبیه‌سازی می‌کند (آذین مهر، ۱۳۹۱). در ادامه به سابقه تحقیق استفاده از مدل WetSpa پرداخته شده است. De Smedt و همکاران در سال ۲۰۰۰، با استفاده از GIS، سنجش از دور و مدل WetSpa شبیه‌سازی رواناب را بر پایه شرایط رطوبتی و خصوصیات ژئوفیزیکی ارائه نمودند. Gebremeskel و همکاران در سال ۲۰۰۲، در تحقیقی سیلاب را با استفاده از GIS و مدل WetSpa در حوزه آلتزیت شبیه‌سازی کردند. Liu and De Smedt در سال ۲۰۰۵ جریان‌های عادی و سیلابی را با گام زمانی ساعتی به کمک اطلاعات رقومی و مدل WetSpa شبیه‌سازی کردند. Bahremand و همکاران در سال ۲۰۰۵ شبیه‌سازی جریان رودخانه را با مدل WetSpa در حوزه رودخانه هورنارد مورد بررسی قرار داد. و در ایران نیز از مدل WetSpa جهت شبیه‌سازی جریان رودخانه گرگانرود (کبیر، ۱۳۸۹)، شبیه‌سازی جریان در حوزه چهل چای استان گلستان (یعقوبی، ۱۳۸۹)، در حوزه مرک کرمانشاه (بیات، ۱۳۸۹)، در حوزه طالقانرود البرز (مرادی‌پور، ۱۳۹۰)، در حوزه زیارت استان گلستان (عزیزی، ۱۳۹۱) به کار برده شد. نتایج مطلوب استفاده از مدل WetSpa جهت شبیه‌سازی جریان در حوزه‌های مختلف بر آن شد که در این تحقیق نیز جهت شبیه‌سازی هیدروگراف جریان از آن استفاده شد.

## مواد و روش‌ها

### معرفی حوزه مورد مطالعه

حوزه دینور در بالادست سد کرخه، که بین طول شرقی پنج دقیقه و ۴۷ درجه تا ۵۱ دقیقه و ۴۷ درجه و عرض شمالی ۲۳ دقیقه و ۳۴ درجه تا ۵۳ دقیقه و ۳۴ درجه واقع در شمال شرق استان کرمانشاه می‌باشد (شکل ۱). وسعت حوزه آبخیز ۱۷۱۷ کیلومتر مربع، محیط حوزه دینور برابر با ۲۵۸ کیلومتر، حداقل ارتفاع حوزه ۱۳۳۶ متر و حداکثر ارتفاع آن ۳۲۷۷ متر می‌باشد. بیشتر رودخانه‌های حوزه دائمی بوده و به رودخانه دینور ختم می‌شوند. مقدار متوسط سالانه بارندگی، ۵۴۹/۱ میلی‌متر در سال، و متوسط دمای سالانه ایستگاه‌های منطقه از ۱۰/۷ تا ۱۹/۸ درجه سانتی‌گراد متغیر است. به‌طور کلی در منطقه مطالعاتی گرم‌ترین ماه‌ها، تیر و مرداد و سردترین ماه‌ها دی و بهمن می‌باشند. مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل به روش

بلانی کریدل در کل حوزه مورد مطالعه برابر ۱۶۲۳ میلی‌متر در سال بوده است، اقلیم منطقه مطالعاتی با استفاده از اقلیم نمای دومارتن اصلاح شده، نیمه خشک سرد تا خیلی مرطوب می‌باشد. انواع کاربری در این حوزه شامل تپه‌های مرتعی، تپه‌های جنگلی، زراعت آبی و دیم، باغات، مخلوط باغات و زراعت آبی، اراضی بایر، اراضی شهری، بستر سیلابی رودخانه‌ها و برونزدگی‌های سنگی است. منطقه مورد مطالعه از نظر خاک‌شناسی دارای دو بافت خاک می‌باشد، که ۹۶/۷۹ درصد از حوزه دارای بافت رسی لوم و ۴/۱ درصد از مساحت حوزه دارای بافت شنی رسی لومی می‌باشد.



شکل ۱: محدوده آبخیز دینور در استان کرمانشاه بالادست سد کرخه

### تشریح مدل WetSpa

WetSpa، یک مدل هیدرولوژیکی، فیزیکی، پیوسته و توزیعی که بر پایه GIS جهت انتقال آب و انرژی بین خاک گیاه و اتمسفر است، این مدل توزیعی در بسیاری از حوزه‌های آبخیز کشورهای مختلف برای شبیه‌سازی کلیه مؤلفه‌های هیدرولوژیکی از جمله شبیه‌سازی جریان رودخانه و اثر تغییر کاربری اراضی در سطح سلول بکار برده شده است. این مدل اولین بار توسط Wang و همکاران در سال ۱۹۹۶ ابداع و سپس در سال ۲۰۰۰ توسط De Smedt و همکاران و در سال ۲۰۰۳ توسط Liu و همکاران توسعه پیدا کرده است. مدل WetSpa نمونه‌ای از مدل‌های با مبنای فیزیکی است، زیرا بر اساس راه حل معادلات اساسی فیزیک به شبیه‌سازی در مقیاس بزرگ و مطالعه فرآیندهای اصلی سیستم می‌پردازد. اکثر روابط موجود در این مدل مبنای فیزیکی دارند و نیز در گروه مدل‌های توزیعی قرار می‌گیرد زیرا که در آن اطلاعات مکانی به صورت واحدهایی در سطح سلول در کنار داده‌های هیدرولوژیکی قرار می‌گیرند و همچنین حوزه و شبکه آبراهه را به

صورت شبکه‌ای به هم پیوسته در نظر می‌گیرد که هر شبکه توسط پارامترهای خاص خود، شرایط اولیه و ورودی‌های بارش شرح داده می‌شود. در نتیجه پیش‌بینی مکانی فرآیندهای هیدرولوژیکی در هر نقطه از آبخیز امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین این مدل پیوسته بوده زیرا دارای اجزایی می‌باشد که تبخیر و تعرق و حرکت آب در خاک را بین رگبارها (یعنی در زمانی که بارش صفر است، مدل بصورت پیوسته از طریق رطوبت خاک محاسبه می‌نماید)، توصیف می‌نماید و بنابراین قادر به برقراری تعادل آب و انرژی بین رگبارها می‌باشد. در این مقاله از توضیح جزئیات مدل صرف‌نظر می‌شود و علاقه‌مندان می‌توانند جهت اطلاعات بیشتر به وبسایت مدل ([www.vub.ac.be/WetSpa](http://www.vub.ac.be/WetSpa)) و کتاب مدل WetSpa (دستورالعمل و کاربرد) رجوع نمایند (کبیر و همکاران، ۱۳۹۱).

### فرمولاسیون مدل WetSpa در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در سطح سلول

جریان در خروجی سلول را می‌توان با استفاده از تابع چگالی احتمال معکوس

$$u_i(t) = \frac{l_i}{2\sqrt{\pi d_i t^3}} \exp\left[-\frac{(c_i t - l_i)^2}{4d_i t}\right] \quad \text{گوس به صورت زیر بیان نمود:}$$

رابطه ۱:

که در آن  $u_i(t)$  تابع پاسخ جریان سلول (1/s) و  $l_i$  اندازه سلول (m) می‌باشد. دو پارامتر  $c_i$  و  $d_i$  که برای تعیین تابع پاسخ سلول مورد نیاز می‌باشند را می‌توان با استفاده از روابط مانینگ به صورت زیر محاسبه نمود:

$$c_i = \frac{5v_i}{3} \quad \text{رابطه ۲:}$$

$$d_i = \frac{v_i R_i}{2S_i} \quad \text{رابطه ۳:}$$

$R$ : شعاع هیدرولیکی سلول  $i$  (m)،  $S_i$ : شیب سلول (m/m)،  $v_i$ : سرعت جریان در سلول  $i$  (m/s)

### پاسخ جریان در یک سطح از مسیر آن

با فرض سیستم روندیابی خطی، می‌توان پاسخ جریان در انتهای هر مسیر را که خود ناشی از جریان واحد به سلول منفرد می‌باشد، بدون در نظر گرفتن ورودی‌های سایر سلول‌ها محاسبه نمود. پاسخ جریان در طول مسیر به‌طور پیوسته با استفاده از رابطه کونولاسیون جریان<sup>۱</sup> به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$U_i(t) = \prod_{j=1}^N u_j(t) \quad \text{رابطه ۴:}$$

$U(t)$ : تابع پاسخ مسیر جریان (1/s)،  $i$ : بیانگر سلولی است که جریان به آن وارد می‌شود،  $j$ : شماره سلول بعدی و  $N$ : تعداد کل سلول‌ها در طول مسیر جریان است. از آنجایی که تابع پاسخ جریان واحد در سلول‌های مختلف دارای پایه‌های زمانی

ثابت می‌باشند، نتایج (رابطه ۴) نیز از نظر پایه‌های زمانی برای همه سلول‌ها یکسان بوده و بنابراین یک رابطه خطی بین تابع مسیر جریان و جریان ورودی برقرار می‌باشد. De Smet و همکاران (۲۰۰۰) یک راه حل عددی تقریبی از تابع پاسخ مسیر جریان با توزیع معکوس گوس را برای (رابطه ۲) ارائه نمودند که دبی در انتهای مسیر جریان را به رواناب حاصل شده در شروع مسیر جریان مربوط می‌سازد:

$$U_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2 t^3 / t_i^3}} \exp\left[-\frac{(t-t_i)^2}{2\sigma_i^2 t / t_i}\right] \quad \text{رابطه ۵:}$$

$t_i$ : متوسط زمان جریان از سلول ورودی تا انتهای مسیر جریان (s)،  $\sigma_i^2$ : واریانس زمان جریان (s<sup>2</sup>)، پارامترهای  $t_i$  و  $\sigma_i^2$  دارای توزیع مکانی بوده و در طول مسیر توپوگرافیکی جریان به صورت تابعی از سرعت موج جریان و ضریب پخشیدگی تعیین می‌گردند:

$$t_i = \sum_{j=1}^N \left( \frac{l_j}{c_j} \right) \quad \text{رابطه ۶:}$$

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^N \left( \frac{2d_j}{c_j^3} \right) l_j \quad \text{رابطه ۷:}$$

برای هر ورودی دلخواه می‌توان هیدروگراف جریان خروجی را به صورت زیر تعیین نمود:

$$Q_i(t) = \sum_{\tau=0}^{t-\tau} V_i(\tau) U_i(t-\tau) \quad \text{رابطه ۸:}$$

$Q_i(t)$ : جریان خروجی در انتهای مسیر جریان که با هر ورودی دلخواه در سلول  $i$  تولید می‌شود (m<sup>3</sup>/s)،  $U_i(t-\tau)$ : تابع پاسخ مسیر جریان که مربوط به هیدروگراف واحد لحظه‌ای (IUH) که در هر هیدرولوژی مرسوم است می‌باشد (1/s).  $\tau$ : زمان تأخیر (s)،  $V_i(\tau)$ : حجم رواناب ورودی در سلول  $i$  و در زمان  $\tau$  بر حسب (m<sup>3</sup>)، که شامل رواناب سطحی و جریان زیرسطحی بوده و چنانچه سلول  $i$  در خروجی زیر حوزه واقع شده باشد شامل جریان آب زیرزمینی نیز می‌شود.

### پاسخ جریان در کل حوزه

با در نظر گرفتن قابلیت تجزیه مکانی در یک سیستم رندیبایی خطی، پاسخ جریان حوزه را می‌توان از طریق جمع کردن پاسخ‌های تمام سلول‌های شرکت‌کننده تعیین نمود. بنابراین پاسخ جریان در کل حوزه را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{N_w} Q_i(t) \quad \text{رابطه ۹:}$$

$Q(t)$ : دبی کل در خروجی حوزه  $(m^3/s)$ ،  $N_w$ : تعداد سلول‌ها در کل حوزه بدین ترتیب دبی کل عبارت است از مجموع جریان سطحی، جریان زیرسطحی و جریان آب زیرزمینی و از تلفیق پاسخ جریان کل سلول‌های موجود در شبکه تعیین می‌گردد.

### معرفی معیارهای کارایی و ارزیابی مدل

به منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa در شبیه‌سازی هیدروگراف مشاهده‌ای، یک سری روش‌های آماری مورد استفاده قرار می‌گیرد. علاوه بر مقایسه چشمی، جهت ارزیابی بهترین برازش بین هیدروگراف‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای، سایر معیارها از قبیل معیار ناش - ساتکلیف برای برآورد کارایی در مدل WetSpa وجود دارند، که مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. این اندازه‌گیری‌های آماری، یک ارزیابی کمی از میزان برازش مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده ارائه داده و نمایانگر درجه انطباق مشاهده و پیش‌بینی می‌باشد. بر مبنای نتایج حاصل از این معیارها، قابلیت پیش‌بینی مدل تعیین می‌گردد. در زیر به تعدادی از معیارهای ارزیابی اشاره شده است:

#### معیار ارزیابی کلینگ-گوپتا<sup>۱</sup>

این معیار (KGE) جدیدترین معیار ارزیابی برای مقایسه هیدروگراف‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای می‌باشد. گوپتا و همکاران (۲۰۰۹) ضمن معرفی این شاخص به مقایسه و بررسی مزیت‌های آن با معیار معروف ناش-ساتکلیف پرداخته‌اند. این معیار توسط Kling و همکاران (۲۰۱۲) بصورت بازبینی شده (KGE) بکار گرفته شد.

$$KGE = \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2} \quad \text{رابطه ۱۰:}$$

در فرمول مذکور  $r$  ضریب همبستگی بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهده‌ای می‌باشد.  $\alpha$  نسبت انحراف معیار مقادیر شبیه‌سازی به انحراف معیار مقادیر مشاهده‌ای است.  $\beta$  نسبت میانگین مقادیر شبیه‌سازی به میانگین مقادیر مشاهده‌ای است. بهترین مقدار برای معیار ارزیابی کلینگ-گوپتا عدد یک می‌باشد که نشان دهنده تطابق کامل هیدروگراف‌ها می‌باشد. در معیار بازبینی شده کلینگ-گوپتا بجای  $\alpha$  از  $\gamma$  استفاده می‌شود که نسبت ضریب تغییرات مقادیر شبیه‌سازی به ضریب تغییرات مقادیر مشاهده‌ای می‌باشد (Kling et al., 2012).

<sup>1</sup> Kling-Gupta Efficiency

### معیار کارایی ناش - ساتکلیف<sup>۲</sup>

ضریب ناش - ساتکلیف نشان می‌دهد که دبی‌های جریان تا چه حد توسط مدل درست شبیه‌سازی شده‌اند. همین طور این فاکتور تعیین کارایی، به طور معمول برای ارزیابی انواع مدل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد زیرا که این معیار، واریانس باقیمانده‌ها را استاندارد می‌نماید و مقدار عددی آن با طول دوره و یا میزان رواناب تغییر نمی‌کند و معادله آن به شرح زیر می‌باشد.

$$CR_3 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \quad \text{رابطه ۱۱:}$$

CR<sub>3</sub>: ضریب کارایی ناش - ساتکلیف که برای ارزیابی سری زمانی جریان آبراهه به کار می‌رود. مقدار CR<sub>3</sub> می‌تواند از یک مقدار منفی تا یک متغیر باشد و در یک پیش‌بینی کامل CR<sub>3</sub> برابر با یک می‌باشد.

### معیار کارایی ناش - ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی جریان‌های کم<sup>۳</sup>

فاکتور ناش - ساتکلیف لگاریتمی که در (رابطه ۱۲) ارائه شده است، تأکید بر ارزیابی شبیه‌سازی جریان‌های کم دارد.

$$CR_4 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{s_i} + \varepsilon) - \ln(Q_{o_i} + \varepsilon)]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{o_i} + \varepsilon) - \ln(\bar{Q}_o + \varepsilon)]^2} \quad \text{رابطه ۱۲:}$$

CR<sub>4</sub>: ضریب کارایی ناش - ساتکلیف لگاریتمی برای ارزیابی کارایی سری زمانی داده‌های کم،  $\varepsilon$ : مقدار بسیار کوچک اختیاری برای اجتناب از مشکلات ناشی از دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده مساوی با صفر. میزان  $\varepsilon$  خطای مدل در محاسبه بیلان آبی به اندازه کافی کم بوده و دبی‌های مشاهده‌ای کمتر از  $\varepsilon$  قابل صرف‌نظر کردن هستند. در غیر این صورت فاکتور CR<sub>4</sub> باعث ایجاد خطای مدل در محاسبه بیلان آبی می‌گردد. همانند CR<sub>3</sub> در یک شبیه‌سازی کامل، CR<sub>4</sub> نیز برابر با یک خواهد بود.

### معیار کارایی ناش - ساتکلیف برای ارزیابی جریان‌های بالا<sup>۴</sup>

این معیار کارایی ناش - ساتکلیف در (رابطه ۱۳) نشان داده شده است.

<sup>2</sup> Nash-Sutcliffe efficiency

<sup>3</sup> Logarithmic version of Nash-Sutcliffe efficiency for low flow evaluation

<sup>4</sup> Adapted version of Nash-Sutcliffe efficiency for high flow evaluation



$$CR_5 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} + \bar{Q}_o)(Q_{s_i} - Q_{o_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{o_i} + \bar{Q}_o)(Q_{o_i} - \bar{Q}_o)^2} \quad \text{رابطه ۱۳:}$$

که در آن  $CR_5$ : معیار کارایی ناش- ساتکلیف برای ارزیابی جریان‌های شدید می‌باشد. همان طور که در فرمول نیز مشاهده می‌گردد به دبی‌های بالا نسبت به دبی‌های پایین وزن بیشتری داده می‌شود. در یک شبیه‌سازی کامل،  $CR_5$  برابر با یک خواهد بود.

### شاخص کارایی یا معیار جمعی<sup>۵</sup>

برای ارزیابی کارایی مدل طی دوره‌های واسنجی و اعتبارسنجی عامل جدیدی معرفی شده است که جنبه‌های مختلف هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهده‌ای را مورد مقایسه قرار می‌دهد و در حقیقت نشان دهنده میزان تفاوت‌هایی از قبیل اندازه، شکل و حجم بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده است که به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$AM = \frac{r_{mod} + NS + (1 - |MB|)}{3} \quad \text{رابطه ۱۴:}$$

$$r_{mod} = \left[ \frac{\min\{\delta_o, \delta_s\}}{\max\{\delta_o, \delta_s\}} \right] \quad \text{رابطه ۱۵:}$$

که در آن  $R_{mod}$  عبارت است از ضریب همبستگی اصلاح شده<sup>۶</sup> که خود نیز نشان دهنده تفاوت اندازه‌های هیدروگراف و شکل آن می‌باشد.  $MB$ : خطای مدل در محاسبه بیلان آبی مدل که نمایانگر تعادل آبی مدل می‌باشد و  $NS$  معیار کارایی ناش - ساتکلیف که برای ارزیابی توانایی تولید هیدروگراف جریان به کار می‌رود و نحوه محاسبه آن‌ها قبلاً شرح داده شده است.  $\delta_o, \delta_s$  به ترتیب انحراف معیار دبی‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی هستند و  $R$  ضریب همبستگی بین هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی می‌باشد.

جدول ۱: طبقه بندی کارایی مدل برای تعیین درجه تطابق (Anderson et al., 2001 ; Henriksen et al., 2003)

کلاس	عالی	خیلی خوب	خوب	ضعیف	خیلی ضعیف
معیار جمعی (شاخص کارایی)	> 0/۸۵	0/۷-0/۸۵	0/۵۵-0/۷	0/۴-0/۵۵	< 0/۴

<sup>5</sup> Aggregated Measure

<sup>6</sup> Modified correlation coefficient

### ضریب همبستگی وزنی (ضریب همبستگی اصلاح شده با اعمال شیب خط رگرسیون)

$$\omega r^2 = \begin{cases} |b|.r^2 \dots \dots \dots \text{for } b \leq 1 \\ |b|^{-1}.r^2 \dots \dots \dots \text{for } b > 1 \end{cases} \quad \text{رابطه ۱۶:}$$

که در آن  $r^2$  ضریب تبیین بین مقادیر شبیه سازی و اندازه گیری شده و  $b$  شیب خط رگرسیون است.

### تهیه داده‌های مورد نیاز

اطلاعات اولیه مورد نیاز اجرای مدل شامل آمار بارش، دما، تبخیر و دبی (جهت ارزیابی مدل) در طول دوره ۶ سال با گام زمانی روزانه و همچنین در محیط GIS سه نقشه پایه مدل رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی و بافت خاک با ابعاد سلولی ۱۰۰ متر تهیه شد.

### روش تحقیق

#### اجرای مدل و شبیه‌سازی هیدروگراف جریان

مدل هیدرولوژیکی توزیعی - مکانی WetSpa با استفاده از سه نقشه پایه مدل رقومی ارتفاعی، بافت خاک و کاربری اراضی با فرمت رستری و با ابعاد سلولی ۱۰۰ متر در حوزه دینور از سرشاخه‌های رود کرخه و بالادست سد کرخه در طول دوره آماری ۶ سال آبی (۸۳-۸۹) اجرا شد. که در انتهای این مرحله هیدروگراف جریان برای حوزه دینور شبیه‌سازی شد.

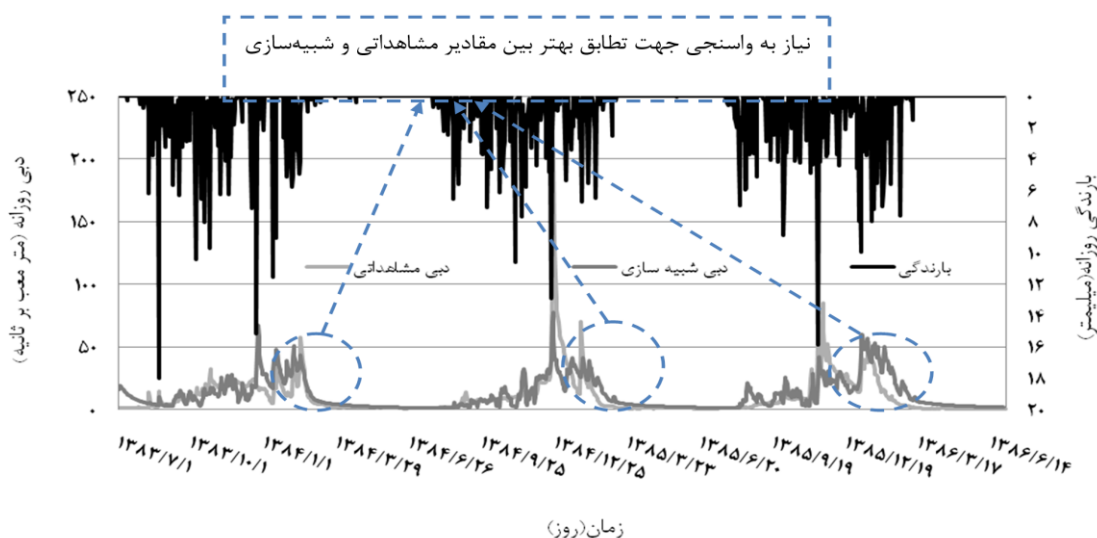
#### واسنجی و اعتبارسنجی مدل WetSpa

واسنجی مدل در طول دوره آماری سه سال ۸۳-۸۶، انجام شد. همچنین در این تحقیق جهت بررسی صحت مجموعه پارامترهای بهینه شده در مرحله واسنجی، اعتبارسنجی مدل با دسته پارامتر بهینه در طول ۳ سال دوره آماری ۸۶-۸۹ بررسی شد.

### نتایج

#### نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف جریان حوزه بعد از اجرای اولیه مدل

برای بررسی کارایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف‌های دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده (که از خروجی‌های مدل می‌باشد)، مقایسه شدند (شکل ۲). در (شکل ۲) با مقایسه گرافیکی بین مقادیر دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در بعضی موارد اختلافاتی بین شبیه‌سازی و مقادیر مشاهده‌ای ملاحظه شد. که در این تحقیق سعی شده با عمل واسنجی میزان این اختلافات به حداقل برسد.



شکل ۲: مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده قبل از واسنجی

نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل

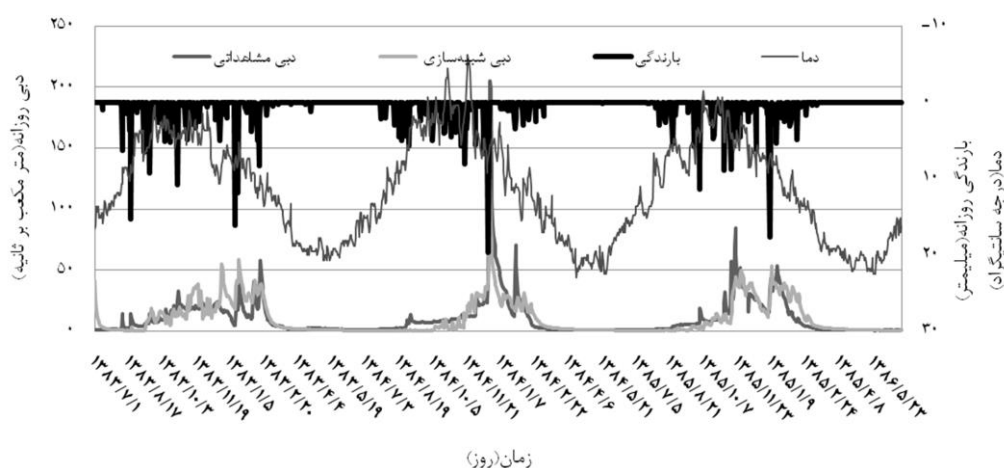
برای سهولت واسنجی مدل WetSpa، ۱۱ پارامتر کلی در نظر گرفته شده است. که این ۱۱ پارامتر دارای ماهیت فیزیکی بوده، و در کنترل رواناب و هیدروگراف خروجی حوزه نقش مهمی دارند. بنابراین برای دخالت اثر این پارامترها در شبیه‌سازی، سعی شده است با انتخاب مقادیری متناسب با شرایط فیزیوگرافی هیدرولوژی حوزه برای پارامترها ضمن انجام مرحله واسنجی مدل، واسنجی پارامترها در مقابل داده‌های دبی مشاهده‌ای ترجیح داده شود. لازم به ذکر است که این پارامترها توسط توسعه دهندگان مدل جهت انطباق نتایج شبیه‌سازی با توجه به شرایط فیزیکی حوزه‌های مورد استفاده در نظر گرفته شده است (جدول ۲).

جدول ۲: پارامترها، مقادیر اولیه و محدوده تغییرات به جهت واسنجی

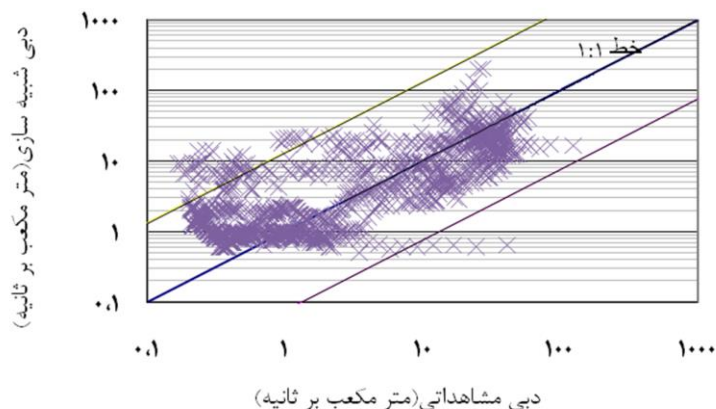
علامت	پارامتر	حداقل	مقدار اولیه	حداکثر
$K_i$	فاکتور جریان زیرسطحی	۰/۱	۶/۷۷۸	۱۰
$K_g$	ضریب افت آب زیرزمینی ( $d^{-1}$ )	$10^{-5}$	۰/۰۹۹۹	۰/۱
$k_{ep}$	رطوبت اولیه خاک (درصد)	۰/۱	۰/۶۵۱	۲
$K_{ss}$	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل (درصد)	۰/۳	۰/۱۲۴	۲
$G_0$	ذخیره آب زیرزمینی اولیه (mm)	۰	۱۰/۶۶	۱۰۰
$G_{max}$	حداکثر ذخیره آب زیرزمینی (mm)	۱۰۰	۲۵۵/۹۹	۳۰۰۰
$T_0$	ضریب درجه حرارت آستانه ( $^{\circ}C$ )	-۳	۱/۵۴۲	۲
$k_{snow}$	ضریب روز درجه حرارت ( $mm^0C^{-1}d^{-1}$ )	-۳	۰/۲۷۳	۳/۲
$k_{rain}$	ضریب روز درجه بارش ( $mm\ mm^0C^{-1}d^{-1}$ )	$10^{-4}$	۰/۳	۰/۳
$k_{run}$	توان رواناب سطحی	۴	۷/۶۷۷	۷
$p_{max}$	حداکثر بارش (mm)	۱۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰۰

### نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی دوره واسنجی و اعتبارسنجی

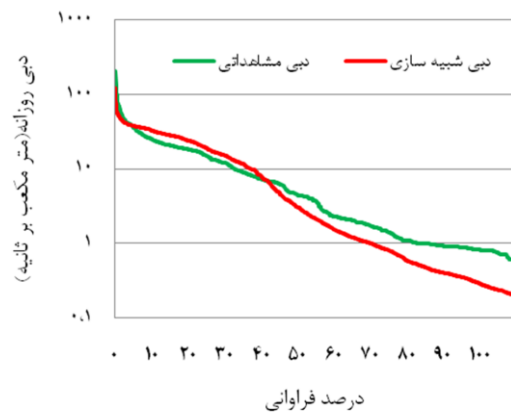
به منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa نتایج شبیه‌سازی با هیدروگراف مشاهده‌ای، به صورت گرافیکی و آماری بررسی شد. در (شکل ۳ و ۶) مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در دو دوره واسنجی و اعتبارسنجی، (شکل ۴) نمودار پراکنش ابر نقاط جهت ترسیم بهترین برازش و (شکل ۵) مقایسه دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده بر اساس درصد فراوانی (دبی مرتب شده) در مرحله واسنجی در حوزه آبخیز دینور در بالادست سد کرخه را نشان می‌دهد. همچنین در (شکل ۷) نمودار مقایسه بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در مرحله واسنجی در ایستگاه‌های هیدرومتری بر سرشاخه‌های اصلی رود دینور ارائه شده است. نتایج ارزیابی مدل در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی بر اساس معیار ناش - ساتکلیف برای جریان‌های عادی، کم و زیاد و سایر معیارها در (جدول ۳) ارائه شده است.



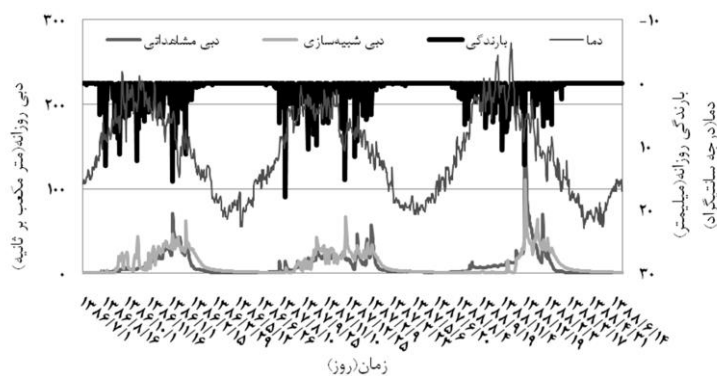
شکل ۳: مقایسه بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در سال ۸۶-۸۳ برای دوره واسنجی حوزه دینور



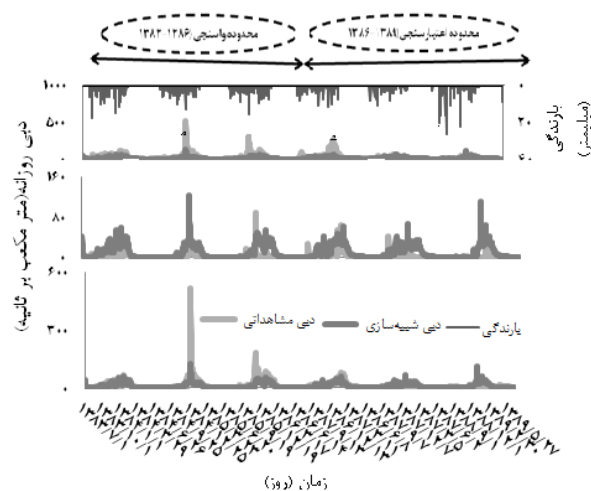
شکل ۴: نمودار رگرسیون برازش بین دبی روزانه شبیه‌سازی در دوره واسنجی در سطح اطمینان ۹۵٪



شکل ۵- مقایسه دبی شبیه‌سازی و مشاهده‌ای و شبیه‌سازی در دوره واسنجی مرتب شده (دبی‌های کلاسه) در مرحله واسنجی



شکل ۶: مقایسه بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روزانه سال ۸۶-۸۹ برای دوره اعتبارسنجی حوزه دینور



شکل ۷: مقایسه بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روزانه در سرشاخه‌های اصلی مریم نگار، ارمنی جان، جامیشان

جدول ۳: مقادیر معیارهای ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

اعتبارسنجی	واسنجی	معیار
۰/۷۲	۰/۵۴	کلینگ-گوپتا
۰/۵۲	۰/۶۶	ناش - ساتکلیف
۰/۶۲	۰/۵۹	ناش - ساتکلیف برای جریان‌های کم
۰/۵۶	۰/۷۲	ناش - ساتکلیف برای جریان‌های زیاد
۱۳/۵۶	۹/۸	میانگین حداقل مربعات خطا ( $m^3/s$ )
۰/۴۴	۰/۴۴	ضریب همبستگی وزنی
۰/۵۲	۰/۶۴	ضریب همبستگی اصلاح شده
۰/۴۹	۰/۷۱	معیار جمعی

### بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی - مکانی WetSpa، هیدروگراف جریان با به کارگیری سه نقشه مدل رقومی ارتفاعی، کاربری اراضی و بافت خاک در محیط GIS شبیه‌سازی شد. در این تحقیق ضمن تبدیل سطح حوزه به یک شبکه سلولی، برای هر سلول رواناب سطحی (بخشی از کل جریان) بر اساس شدت بارش و رطوبت موجود در خاک و همچنین ضریب رواناب پتانسیل با ترکیب سه نقشه شیب، بافت خاک و کاربری اراضی با استفاده از مدل WetSpa محاسبه شد. در مرحله بعد با توجه به خاصیت توزیعی - مکانی بودن تابع پاسخ واحد هر سلول و روندیابی این توابع تا خروجی حوزه، بارش مازاد یا در واقع هیدروگراف جریان برای کل حوزه محاسبه شد. با توجه به ویژگی خاص مدل WetSpa در محاسبه رواناب واقعی بر اساس ویژگی‌های فیزیکی سلول و به کمک پارامترهای نسبتاً کم مدل در مقایسه با سایر مدل‌های پیشرفته مبتنی بر GIS، به کاربر این امکان را می‌دهد که از مدل در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی استفاده شود. هر چند که با استفاده از تکنیک‌های GIS در مدل WetSpa، یک‌سری پارامترها روند ثابتی خواهند داشت ولی به کمک یک‌دسته دیگر از پارامترها (۱۱ پارامتر کلی) می‌توان مدل را در شرایط مختلف واسنجی کرد و جهت شبیه‌سازی مورد استفاده قرار داد. مدل WetSpa در این تحقیق در حوزه ۱۷۱۷ کیلومتری دینور از زیر حوزه‌های حوزه بزرگ کرخه واقع در استان کرمانشاه با استفاده از ۷۲ ماه آمار هیدرومتئورولوژیکی به کار برده شد. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل در این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از این مدل در این حوزه کاملاً رضایت بخش بوده است به طوری که طبق معیار ناش - ساتکلیف ۶۶ درصد و مقادیر حاصل شده سایر معیارها (ناش ساتکلیف برای جریان‌های کم و زیاد، معیار جمعی و ضریب همبستگی اصلاح شده) شبیه‌سازی هیدروگراف جریان نسبتاً خوب ارزیابی شده است. همچنین

از نتایج این تحقیق می‌توان جهت مطالعات پایه هیدرولوژیکی و شناخت از شرایط حوزه برای ساخت سازه‌ها و بندها در مدیریت منابع آب استفاده کرد. از سویی دیگر نتایج این تحقیق با نتایج مطالعاتی که از این مدل استفاده کرده‌اند از جمله Bahremand (۲۰۰۶)، Zeinivand (۲۰۰۹)، Safari (۲۰۰۹)، در خارج از کشور و در ایران با نتایج تحقیقاتی همچون کبیر (۱۳۸۹)، یعقوبی (۱۳۸۹)، بیات (۱۳۸۹)، مرادی‌پور (۱۳۹۰) مطابقت داشته است که در نتیجه آن می‌توان به این نکات مهم در رابطه با مدل اشاره کرد که مدل WetSpa از نظر مساحتی و گام زمانی اطلاعات مورد استفاده هیچ‌گونه محدودیتی ندارد. بنابراین مدل WetSpa جهت شبیه‌سازی و ارزیابی هیدروگراف جریان در این حوزه و حوزه‌های با شرایط مشابه جهت شبیه‌سازی هیدروگراف جریان و پیش بینی سیل مناسب می‌باشد.

### منابع

- آذین مهر، م. (۱۳۹۱). شبیه‌سازی اثر سناریوهای تغییر کاربری اراضی بر هیدروگراف جریان حوزه آبخیز دینور با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی - مکانی WetSpa. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. ۱۷۵ص.
- بیات، ب.، متکان، ع.، زینی‌وند، ح.، غفوری، ع. و باقری نژاد، ا. (۱۳۸۹). شبیه‌سازی بیلان آبی حوزه آبخیز با استفاده از مدل WetSpa در محیط جی آی اس (مطالعه موردی: حوزه آبخیز مرک، استان کرمانشاه). دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
- رستمیان، ر. (۱۳۸۵). تخمین رواناب و رسوب در حوزه بهشت آباد در کارون شمالی با استفاده از مدل SWAT2000. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده آبیاری و زهکشی دانشگاه صنعتی اصفهان.
- کبیر، آ. (۱۳۸۹). کاربرد و توسعه مدل هیدرولوژیکی توزیعی - مکانی WetSpa برای شبیه‌سازی رواناب در حوزه آبخیز گرگانرود، استان گلستان. رساله دکتری آبخیزداری، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.
- کبیر، آ.، بهره مند، ع. آذین مهر، م. (۱۳۹۱). مدل WetSpa (دستورالعمل و کاربرد)، چاپ اول، انتشارات ارسطو مشهد.
- مرادی‌پور، ش. (۱۳۹۰). شبیه‌سازی بیلان آب با مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی WetSpa، نهمین همایش آبخیزداری. دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران.
- مهدوی، م. (۱۳۸۴). هیدرولوژی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ پنجم. جلد دوم.
- یعقوبی، ف.، بهره‌مند، ع.، نورا، ن. (۱۳۸۹). بررسی بیلان آبی حوزه آبخیز چهل‌چای با استفاده از شبیه‌سازی جریان روزانه با مدل WetSpa، اولین همایش ملی تحقیقات منابع طبیعی ایران، دانشگاه کردستان. ۱۳۸۹.

- Bahreman, A., Corluy, j., Liu, Y. B. and De Smedt, F. (2005).** Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad river basin, Slovakia, Floods, from Defence to Management–Van Alphen, van Beek & Taal (eds), Taylor & Francis Group, London. Water Resource Management. 21, pp: 1373-1391.
- Bahreman, A. (2006).** Simulating the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modeling and GIS. PhD Thesis. Brussel Belgium: Vrije Universiteit.
- Beven, K. J. (2001).** Rainfall-runoff modelling: the primer, Wiley, Chichester, UK.
- De Smedt, F., Liu, Y. B. and Gebremeskel, S. (2000).** Hydrological modeling on a catchment scale using GIS and remote sensed land use information, in: C.A. Brebbia (ed.), Risk Analysis II, WTI press, Boston, pp: 295-304.
- Gebremeskel, S., Liu, Y. B. and De Smedt, F. (2002).** GIS based distributed modeling for flood estimation, proceeding of th Twenty-Second Annual American Geophysical Union Hydrology Days.
- Liu, Y. B. and De Smedt, F. (2005).** Flood modeling for complex terrain using GIS and Remote Sensed Information. Water Resour Manag. 19, pp:605-624.
- Liu, Y. B., Gebremeskel, S., De Smedt, F., Hoffmann, L. and Pfister, L. (2003).** A diffusive transport approach for flow routing in GIS-based flood modeling. Hydrol, 283, pp: 91-106.
- Safari, A., De Smedt, F. and Moreda, F. (2009).** WetSpa model application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). Hydrology.
- Wang, Z. M., Batelaan, O. and De Smedt, F. (1996).** A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). J. Phys. Chem. Earth. 21, pp: 189-193.
- Zeinivand, H. (2009).** Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for Snowmelt, Soil Erosion, and Sediment Transport PhD Thesis. Brussel Belgium: Vrije Universiteit.