



## آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل WetSpa در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از PEST در حوزه آبخیز دینور کرخه

مریم آذین‌مهر<sup>۱</sup>، عبدالرضا بهره‌مند<sup>۲</sup> و آتنا کبیر<sup>۳</sup>

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان و عضو باشگاه پژوهشگران جوان دانشگاه آزاد

اسلامی واحد دزفول، (نویسنده مسوول: mary.azin@yahoo.com)

۲- دانشیار، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

۳- دکتری، دانشگاه علوم تحقیقات تهران

تاریخ دریافت: ۹۲/۱/۳۰ تاریخ پذیرش: ۹۳/۶/۱۱

### چکیده

در این تحقیق مدل هیدرولوژیکی توزیعی- مکانی WetSpa در حوزه دینور با مساحت ۱۷۱۷ کیلومتر مربع واقع در بالادست سد کرخه به کار برده شد. آمار هیدرومتئورولوژیکی با گام زمانی روزانه و در طول دوره آماری ۱۳۸۳ تا ۱۳۸۹ شامل آمار بارش از نه ایستگاه، آمار دما و تبخیر اندازه‌گیری شده از چهار ایستگاه، برای ورودی مدل استفاده شدند. هم‌چنین، ویژگی‌های مکانی حوزه در قالب سه نقشه، با ابعاد سلولی ۱۰۰ متر در محیط GIS تهیه شدند. نتایج نشان می‌دهد که هیدروگراف خروجی طبق هیدروگراف‌های مشاهداتی در خروجی حوزه به خوبی شبیه‌سازی شده است و مدل هیدروگراف روزانه را طبق معیار ناش- سانکلیف ۶۶ درصد، با صحت قابل قبولی پیش‌بینی می‌نماید. آنالیز حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای مؤثر در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از نرم‌افزار PEST انجام شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد پارامتر  $K_p$ ، که شاخص افت هیدروگراف و محاسبه آب زیرزمینی را کنترل می‌کند دارای بیش‌ترین حساسیت و پارامترهای  $k_{ep}$  و  $k_{ss}$  در رتبه دوم و سوم حساسیت قرار دارند. طبق نتایج آنالیز عدم قطعیت پارامترهای  $k_p$ ،  $k_{ss}$  و  $k_{ep}$  با حدود اطمینان خیلی کم (قطعیت بالا) و پارامترهای  $k_{rain}$  و  $k_{max}$  با حدود اطمینان بالا (قطعیت کم) شناسایی شدند.

واژه‌های کلیدی: مدل WetSpa، PEST، آنالیز حساسیت، عدم قطعیت، شبیه‌سازی جریان، حوزه دینور، سد کرخه

### مقدمه

هدف از شبیه‌سازی پارامترها، مؤلفه‌ها و نمودارهای هیدرولوژیکی در بحث مدل‌سازی و استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی، شبیه‌سازی وضعیت آینده در اثر تغییرات احتمالی است که در آن حوزه ایجاد می‌شود، که در نهایت می‌توان با استفاده از نتایج این‌گونه تحقیقات در بحث‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی برای آمایش سرزمین، فعالیت‌های مؤثر را با خطر کم‌تر و توسعه پایدار بیش‌تر در حوزه و منطقه انتخاب کرد. به‌گونه‌ای که هر چه نتایج شبیه‌سازی با واقعیت اختلاف کم‌تری داشته باشد، یک مدیر با قطعیت بیش‌تری می‌تواند از نتایج در سطح حوزه، برای تصمیم‌گیری در مدیریت حوزه استفاده کند. ضمن این که بررسی آنالیز حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی و تمرکز بر پارامترهای حساس به درک بهتر و تخمین دقیق‌تر مقادیر مشاهداتی منجر شده، بنابراین سبب کاهش نبود قطعیت در نتایج مدل می‌گردد (۱۹).

### تعریف و اهمیت آنالیز حساسیت

میزان تغییر خروجی مدل به ازای تغییر در میزان ورودی‌های مدل را آنالیز حساسیت گویند. آنالیز حساسیت کاربردهای مختلفی دارد: (۱) برای بهینه کردن مدل (۲) آسان‌سازی و تسریع واسنجی با تمرکز بر پارامترهای حساس و مهم (۳) شناسایی بهتر مدل و

پارامترها (۴) تعیین منابع خطا (۵) قبل از کاربرد مدل به‌منظور پیش‌بینی و شبیه‌سازی اثر سناریوها (۳۰۱).  
با شناخت از این کاربردها، اهمیت آنالیز حساسیت در شبیه‌سازی‌ها بیش از پیش آشکار می‌گردد.  
**تعریف عدم قطعیت و هدف از آنالیز عدم قطعیت**  
خطا در قالب عدم قطعیت در مدل‌های هیدرولوژیکی بررسی می‌شود، برای بهینه‌سازی مدل باید خطا و منشاء ایجاد آن تا جایی که امکان دارد، بررسی شود. عمده عدم قطعیت شبیه‌سازی مدل‌ها ناشی از ساختار مدل و عدم تعریف صحیح پارامترها است. بنابراین برای یک شبیه‌سازی صحیح، عدم قطعیت پارامترها و بالطبع قطعیت شبیه‌سازی‌ها باید در نظر گرفته شود (۶). به‌طور کلی می‌توان هدف از آنالیز عدم قطعیت را چنین بیان کرد چون هدف استفاده از مدل، شبیه‌سازی شرایط آینده در اثر اعمال تغییرات در حوزه است در نتیجه بررسی خطای مدل ضروری به نظر می‌رسد (۳۰۱).

### سابقه تحقیق استفاده از مدل WetSpa

این مدل در حوزه‌های با شرایط مختلف فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی در خارج و داخل کشور مورد استفاده قرار گرفته است که به اختصار به چند تحقیق با استفاده از مدل WetSpa در زیر اشاره شده است. برای اولین بار ونگ و همکاران (۲۱)، مدل توزیعی WetSpa را برای

مدل PEST اشاره شده است. بهره‌مند و دسمت (۳)، در تحقیقی برای بررسی آنالیز حساسیت و عدم قطعیت شبیه‌سازی سیل مدل WetSpa از مدل PEST در حوزه تروپا استفاده کردند. نتایج نشان داد که فاکتور تصحیح برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر پتانسیل، بیش‌ترین حساسیت نسبی را دارد (۱). بهره‌مند و دسمت (۴)، مدل‌سازی هیدرولوژیکی توزیعی و آنالیز حساسیت، با استفاده از PEST در حوزه آبخیزی از اسلواکی مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر این است که فاکتور تصحیح برای محاسبه تبخیر و تعرق واقعی از تبخیر پتانسیل بیش‌ترین حساسیت نسبی و پارامتر  $K_{gm}$  که میزان تبخیر و تعرق از آب‌های زیرزمینی را کنترل می‌کند، کم‌ترین حساسیت را دارد. بهره‌مند و دسمت (۵)، با استفاده از مدل PEST، آنالیز عدم قطعیت شبیه‌سازی مدل WetSpa را در حوزه تروپا بررسی کردند. طبق نتایج این تحقیق ضریب اصلاحی داده‌های تبخیر اندازه‌گیری شده، بیش‌ترین حساسیت را دارد. در تحقیقات ذکر شده مشخص می‌شود که مدل PEST به‌خوبی می‌تواند در بحث آنالیز حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای مدل WetSpa مورد استفاده قرار گیرد.

#### مواد و روش‌ها

##### منطقه مورد مطالعه

حوزه دینور در بالادست سد کرخه، که بین  $47^{\circ}51'$  تا  $34^{\circ}23'$  طول شرقی و  $34^{\circ}53'$  عرض شمالی واقع در شمال شرق استان کرمانشاه است 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 است شکل (۲). مقدار ماز سوی بارندگی،  $549/1$  میلی‌متر در سال و ماز سوی دمای سالانه ایستگاه‌های منطقه از  $10/7$  تا  $19/8$  درجه سانتی‌گراد متغیر است. انواع کاربری در این حوزه شامل تپ‌های مرتعی، تپ‌های جنگلی، زراعت آبی و دیم، باغات، مخلوط باغات و زراعت آبی، اراضی بایر، اراضی شهری، بستر سیلابی رودخانه‌ها و برونزدگی‌های سنگی در قلمرو مطالعاتی قابل ملاحظه است شکل (۳).

##### تشریح مدل WetSpa

مدل هیدرولوژیکی توزیعی- مکانی WetSpa در سازمان مهندسی هیدرولوژی و هیدرولیک دانشگاه وریچ بروکسل به دلیل شبیه‌سازی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و اتمسفر از سوی ونگ و همکاران در سال ۱۹۹۶ در مقیاس منطقه‌ای حوزه و با گام زمانی روزانه توسعه یافت و سپس در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴ از سوی دسمت و لیو به‌برای شبیه‌سازی سیلاب آن را

شبیه‌سازی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاهان و اتمسفر در حوزه آبخیز ترکلپ- مولنیک<sup>۱</sup> در بلژیک<sup>۲</sup> اجرا کردند. نتایج بیانگر این بود که مدل به‌خوبی قابلیت شبیه‌سازی رواناب سطحی را داراست. دسمت و همکاران (۹)، با استفاده از GIS، سنجش از دور و مدل توزیعی WetSpa شبیه‌سازی رواناب بر پایه شرایط رطوبتی خاک و ویژگی‌های ژئوفیزیکی را در حوزه آبخیزی در بلژیک ارزیابی نمودند. گبرمسکل و همکاران (۱۰)، از مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی WetSpa در حوزه رودخانه آلتیت در بخش ارتباطی بین سه کشور بلژیک، فرانسه و لوگزامبورگ بررسی کردند. در این تحقیق میزان معیار ناش- ساتکلیف برای کل دوره و جریان‌های کم و زیاد به ترتیب ۷۴، ۷۱ و ۸۶ درصد به دست آمد (۱۰). لیو و همکاران (۱۴، ۱۵)، در مطالعه‌ای روند مدل‌سازی توزیعی سیل با مدل WetSpa را اصلاح کردند و هم‌چنین این مدل به دلیل شبیه‌سازی شکل‌ها و فرآیندهای کارستی در حوزه سوئی‌مویی<sup>۳</sup> با گام زمانی ساعتی در شمال شرق ویتنام مورد استفاده قرار گرفت. معیار ناش- ساتکلیف ۶۹ درصد و برای جریان‌های کم و زیاد به ترتیب ۸۵ و ۷۰ درصد به دست آمد. لیو و همکاران (۱۶)، به‌منظور شبیه‌سازی کاهش سیلاب در اثر اصلاح طبیعی رودخانه از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa، استفاده نمودند. نتایج نشان داد پس از اصلاح طبیعی رودخانه، دبی پیک ۱۴ درصد کاهش یافته و زمان تمرکز ۲ ساعت دیرتر اتفاق می‌افتد. بهره‌مند و همکاران (۲)، شبیه‌سازی جریان رودخانه را با استفاده از مدل WetSpa، حوزه رودخانه هورناد<sup>۴</sup> اسلواکی مورد بررسی قرار دادند مدل با توجه به معیار ناش- ساتکلیف هیدروگراف‌های روزانه را با دقت ۸۵-۷۵ درصد پیش‌بینی کرد (۲). هم‌چنین طی تحقیقی زینی‌وند در حوزه مارگسانی (۲۴، ۲۳) و صفری (۱۹) با استفاده از مدل WetSpa نتایج خیلی خوب در شبیه‌سازی جریان به دست آوردند و در ایران نیز کبیر (۱۱) از مدل WetSpa در حوزه آبخیز گرگان‌رود برای شبیه‌سازی جریان استفاده کرد. نتایج این تحقیق و سایر تحقیقات انجام شده در حوزه‌های دیگر ایران حاکی از کاربرد خوب این مدل برای شبیه‌سازی رواناب و هیدروگراف جریان است.

##### سابقه تحقیق استفاده از مدل PEST برای آنالیز مدل WetSpa

برای آنالیز حساسیت و عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیکی از مدل‌ها و نرم‌افزارهای مختلفی از جمله PEST<sup>۵</sup>، GLUE<sup>۶</sup>، ParaSol<sup>۷</sup>، مونتو کارلو<sup>۸</sup>، SUFI-2<sup>۹</sup>، SCE<sup>۱۰</sup> و ... استفاده می‌شود که در تحقیق حاضر به دلیل تناسب نرم‌افزار PEST با مدل WetSpa، این نرم‌افزار برای بررسی آنالیز حساسیت و عدم قطعیت انتخاب گردید، در زیر به چند مورد تحقیق انجام شده با

1- Terclap-Molenbic

2- Belgium

3- Souiemoi

4- Hornad

5- Model-Independent Parameter ESTimator

6- Generalized Likelihood Uncertainty

7- Parameter Solution

8- Mont carlo

9- Sequential Uncertainty Fitting

10- Shuffled Complex Evolution

اصلی، با استفاده از معادلات تقریب موج پخشی سنت و نانت روندیابی می‌شود و در خروجی هر زیر حوزه آب زیرزمینی هم به آنها اضافه شده و سپس کل جریان به سمت خروجی کل حوزه روندیابی می‌گردد. مدل WetSpa از روش ضریب رواناب اصلاح شده (که تغییرات رطوبت خاک را نیز در نظر می‌گیرد) به صورت زیر برای محاسبه رواناب در هر شبکه سلولی استفاده می‌کند:

$$S = c_i (P - I) \left( \frac{a}{S} \right) \quad \text{رابطه (۲)}$$

که S: رواناب سطحی یا بارش مازاد (میلی‌متر)، P: شبکه بارش (میلی‌متر)، I(t): تلفات برگابی (میلی‌متر)،  $\theta$ : محتوای رطوبتی خاک (مترمکعب بر مترمکعب) و  $\theta_s$ : رطوبت اشباع خاک (مترمکعب بر مترمکعب)، a: توانی است درباره‌ی شدت بارندگی و  $C_i$ : ضریب بارش مازاد پتانسیل یا ضریب رواناب پتانسیل در سلول i است. در منابع مختلف با توجه به شیب، نوع خاک و کاربری زمین، ضرایب متفاوتی برای این پارامتر ارائه گردیده است (۸،۷). جریان آب سطحی که از معادله ۱ به دست آمده و جریان آب زیرسطحی ابتدا در هر شبکه سلولی به سوی کانال اصلی روندیابی می‌شوند و در خروجی هر زیر حوزه به آب زیرزمینی می‌پیوندند و سپس کل جریان به سمت خروجی حوزه روندیابی می‌گردد. روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادلات تقریب موج پخشی سنت و نانت انجام می‌گیرد.

لیو و همکاران (۱۵)، برای محاسبه میزان دبی در انتهای مسیر جریان از رابطه زیر-که یک تابع پاسخ خطی سنت و نانت است - استفاده نمودند:

$$U(t) = \frac{1}{u\sqrt{2}} \exp\left[-\frac{(t-t_0)^2}{2t/t_0}\right] \quad \text{رابطه (۳)}$$

$$t_0 = \int \frac{1}{c} dx \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$= \sqrt{\int \frac{2d}{c^3} dx} \quad \text{رابطه (۵)}$$

که در آن U(t) تابع پاسخ مسیر جریان برای تعیین هیدروگراف واحد لحظه‌ای جریان به کار می‌رود و روندیابی مسیر جریان تا خروجی حوزه را ممکن می‌سازد.  $t_0$  زمان پیمایش (ساعت) و انحراف استاندارد زمان جریان است که هر یک به ترتیب طبق رابطه ۵ محاسبه می‌شوند. در نهایت هیدروگراف رواناب مستقیم در خروجی حوزه یا هر نقطه که در پایین دست که جریان به هم می‌پیوندند از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

رابطه (۶)

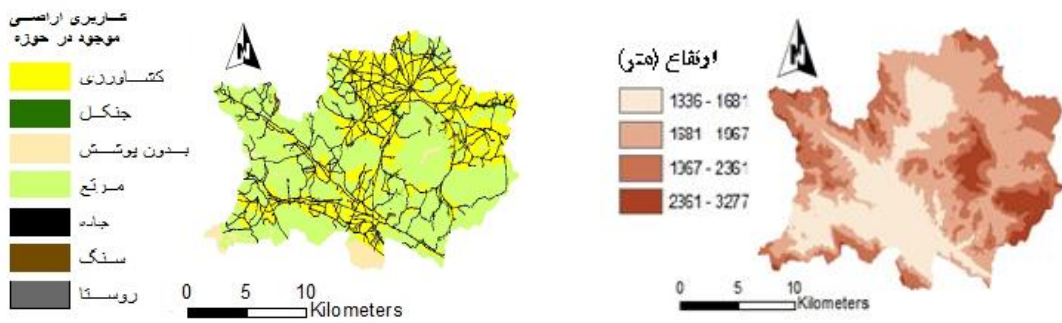
$$Q(t) = \int A_i^t V(t) U(T - ) d A$$

انطباق دادند (۲۲،۱۷،۹). مدل WetSpa، یک نوع مدل هیدرولوژیکی و فرسایش خاک است که باران اصلی‌ترین ورودی قسمت هیدرولوژیکی مدل است. از آنجایی که مدل بر اساس شبکه‌ی سلولی طراحی شده، سیستم هیدرولوژیکی حوزه برای هر شبکه سلولی از ۴ لایه در برای عمودی تشکیل شده است، که عبارتند از: لایه تاج پوشش، لایه سطح خاک، ناحیه ریشه و ناحیه اشباع مدل در هر شبکه سلولی با توجه به میزان بارش، دما و تبخیر و تعرق، فرآیندهای هیدرولوژیکی ذوب برف، ذخیره برگابی، ذخیره چالابی، رواناب سطحی، نفوذپذیری، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی، جریان زیرسطحی، جریان آب زیرزمینی را شبیه‌سازی می‌نماید شکل (۴). ورودی‌های مدل شامل مدل رقومی ارتفاعی، تیپ خاک، کاربری اراضی و سری‌های زمانی بارش و تبخیر و دبی (برای ارزیابی) با گام زمانی روزانه یا ساعتی است و خروجی‌های اصلی مدل WetSpa، هیدروگراف جریان روزانه و یا ساعتی و توزیع مکانی خصوصیات هیدرولوژیکی حوزه است. تعادل آب در زون ریشه مهم‌ترین بخش در نگهداشت آب محسوب می‌گردد، زیرا این بخش کنترل‌کننده حجم رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی، تبخیر و تعرق و دبی آب زیرزمینی است. در مدل WetSpa تعادل آب در زون ریشه برای هر شبکه سلولی با توجه به رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

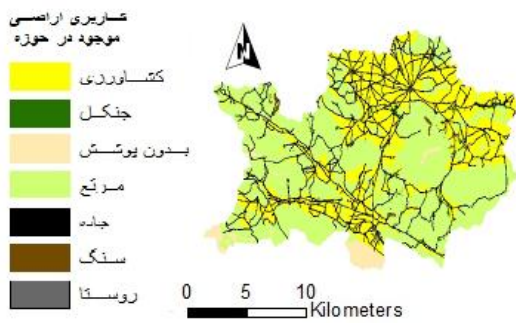
$$D - P - I - V - E - R - F \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن D عمق ریشه (متر)، تغییرات رطوبتی خاک (مترمکعب/ مترمکعب)، t گام زمانی (روز)، P بارش (متر/ روز)،  $I = I_a + D_a$  تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی ( $I_a$ ) و ذخیره چالابی ( $D_a$ ) در گام زمانی (متر/ روز)، V رواناب سطحی یا بارش مازاد (متر/ روز)، E تبخیر و تعرق (متر/روز)، R نرخ نفوذ عمقی از زون ریشه (متر/ روز) و F نرخ جریان زیرسطحی در زمان (متر/ روز) محسوب می‌شود. ضریب پتانسیل رواناب بر اساس جداول پیش فرض تعیین می‌شود که این جداول بر اساس نقشه‌های شیب، کاربری و تیپ خاک تهیه می‌شوند. بر اساس روابط بسط داده شده تورنوایت و میسر (۲۰)، تبخیر و تعرق پتانسیل خاک و پوشش گیاهی محاسبه می‌شود، که تابعی از تبخیر و تعرق، نوع پوشش گیاهی، مرحله رشد و مقدار رطوبت خاک است. میزان نفوذ عمقی به خارج از زون ریشه به صورت تابعی از محتوای رطوبتی خاک، پروزیتته خاک و میزان هدایت هیدرولیکی اشباع بیان می‌گردد. هم‌چنین میزان جریان زیرسطحی نیز بر اساس قانون دارسی و معادلات موج سینماتیکی محاسبه می‌گردد. جریان آب سطحی و زیرسطحی ابتدا در هر شبکه سلولی به سوی کانال

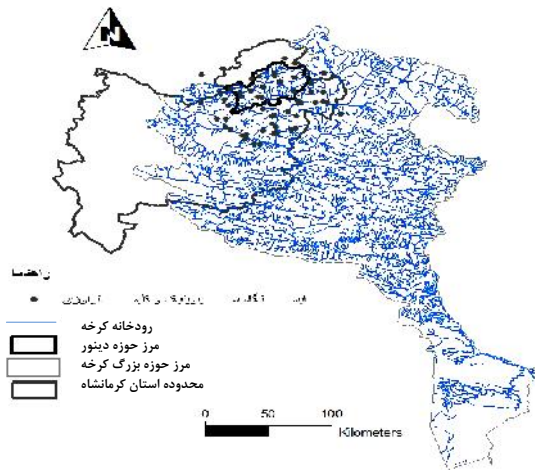
که در این معادله  $Q(t)$  میزان دبی خروجی،  $U(t)$  تابع پاسخ مسیر جریان،  $T$  تاخیر زمانی و حجم رواناب



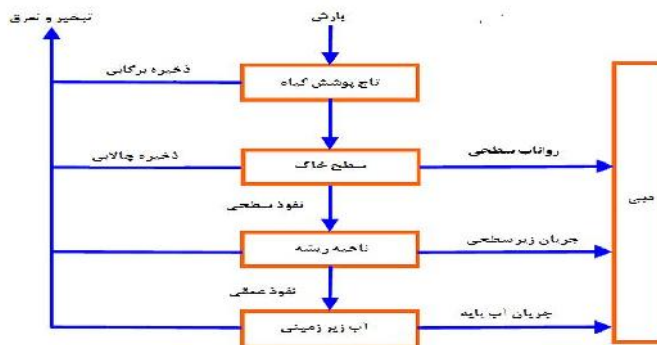
شکل ۱- مدل رقمی ارتفاعی آبخیز دینور



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوزه دینور



شکل ۳- محدوده آبخیز دینور در استان کرمانشاه بالادست سد کرخه.



شکل ۴- شماتیکی از دیاگرام مدل WetSpa در مقیاس سلول (۱۶).

کاربری اراضی، بافت خاک و مدل رقمی ارتفاعی در قالب نقشه‌های توزیعی مکانی تهیه می‌شوند که از این نقشه‌ها می‌توان برای داده‌ی ورودی سایر مدل‌های هیدرولوژیکی استفاده نمود.

#### ۲- پارامترهای عمومی یا کلی

به‌منظور واسنجی بهتر مدل WetSpa، ۱۱ پارامتر کلی در آن تعبیه شده است. اکثر این پارامترها دارای

#### پارامترهای مدل

به‌طور کلی مدل WetSpa دارای دو دسته پارامتر است که در زیر شرح داده می‌شود:

#### ۱- پارامترهای توزیعی مکانی

این دسته از پارامترها مانند ضریب رواناب پتانسیل، ضریب زبری مانینگ و غیره در بخش Arc View با اجرای منوهای مختلف و با استفاده از سه نقشه پایه

۶- حداکثر ذخیره آب زیرزمینی ( $k_{gmax}$ )  
فاکتور حداکثر ذخیره آب زیرزمینی برحسب میلی‌متر که کنترل‌کننده میزان تبخیر و تعرق از آب زیرزمینی است.

۷- درجه حرارت پایه برای ذوب برف ( $T_0$ )  
این فاکتور برای محاسبه ذوب برف به کار می‌رود که در آن درجه، بارش از حالت باران به حالت برف تبدیل می‌گردد.

۸- ضریب روز- درجه حرارت ( $K_{snow}$ )  
به طور کلی، در شرایطی که بارندگی وجود ندارد، محدوده ضریب روز- درجه بین  $3/7$ - $1/8$  (میلی‌متر بر درجه سانتی‌گراد بر روز) است و برای محاسبه ذوب برف به کار می‌رود.

۹- ضریب روز- درجه بارش ( $K_{rain}$ )  
ضریب روز- درجه بارش، نرخ ذوب برف ناشی از تراکم هوای مرطوب بر سطح برف و همچنین گرمای انتقال یافته به برف‌پشته از سوی بارندگی را تعیین می‌کند و در حقیقت تعیین‌کننده نرخ ذوب برف ناشی از بارش است.

۱۰- توان رواناب سطحی برای زمانی که شدت بارش به سمت صفر میل می‌کند ( $K_{run}$ )  
این پارامتر در مدل WetSpa متغیر بوده و توانی است که منعکس‌کننده تأثیر شدت بارندگی بر ضریب رواناب سطحی در زمانی است که شدت بارندگی بسیار کم است، از یک مقدار بالا برای شدت بارش نزدیک به صفر شروع شده و به طور خطی با شدت بارش تغییر می‌کند و زمانی که به حداکثر شدت بارش از پیش تعیین شده به یک می‌رسد.

۱۱- شدت بارش مربوط به 1 ( $P_{max}$ )  
این پارامتر به یک شدت بارش آستانه با واحد میلی‌متر بر روز یا میلی‌متر بر ساعت مربوط می‌گردد که به گام زمانی مدل‌سازی بستگی دارد. به طوری که در آن توان رواناب سطحی برابر با یک بوده و ضریب رواناب واقعی به صورت تابع خطی با محتوای رطوبت نسبی خاک در می‌آید. در حقیقت، این پارامتر توزیعی بوده به خصوصیات سلول مانند بافت خاک، کاربری، شیب و ... بستگی دارد.

نحوه آنالیز حساسیت پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از مدل PEST  
در این تحقیق برای انجام آنالیز حساسیت از نرم‌افزار PEST که بر روی تأثیر مکانی پارامترها بر مدل، تمرکز نموده و معمولاً با محاسبات مشتق جزئی توابع خروجی نسبت به متغیرهای ورودی محاسبه می‌گردد. توانایی محاسبه مشتق هر یک از مشاهدات درباره‌ی هر پارامتر بر اساس الگوریتم گوس- مارکوارت- لونبرگ

تعاریف فیزیکی بوده که در کنترل رواناب و هیدروگراف خروجی حوزه نقش مهمی دارند. اما تعیین نمودن آنها در مقیاس شبکه سلولی مشکل است (تهیه نقشه توزیعی مکانی از این پارامترها مشکل است). بنابراین برای کسب نتایج بهتر در مدل و بهینه‌سازی مدل، واسنجی این پارامترها در مقابل داده‌های مشاهده‌ای ترجیح داده می‌شود. در زیر شرح مختصری از این ۱۱ پارامتر ذکر شده است:

۱- فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق ( $k_{ep}$ )  
مقادیر تبخیر و تعرق واقعی بستگی به فاکتورهای محلی دارد که این روش‌ها در برگیرنده آنها نیستند، به عنوان مثال ممکن است یک شبکه از نظر نوع کاربری، ارتفاع و همچنین شرایط هواشناسی تفاوت بارزی با محل ایستگاه اندازه‌گیری داشته باشد. برای در نظر گرفتن تأثیر این عوامل نیاز به یک فاکتور تصحیح در محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل است.

۲- فاکتور جریان زیرسطحی ( $k_i$ )  
برای در نظر گرفتن تعداد اثرات بر هدایت هیدرولیکی، این فاکتور در مدل در نظر گرفته شده است که در محاسبه جریان زیرسطحی به کار می‌رود. این فاکتور در واقع نماینده تأثیر مواد ارگانیک و سیستم ریشه در لایه بالای خاک روی هدایت هیدرولیکی محسوب می‌شود

۳- ضریب افت آب زیرزمینی ( $k_g$ )  
در مدل WetSpa جریان آب زیرزمینی در مقیاس زیر حوزه محاسبه گردیده و ضریب افت آب زیرزمینی نماینده رژیم افت جریان آب زیرزمینی در کل حوزه است. برای ساده‌سازی مدل، یک مقدار کلی برای ضریب افت جریان آب زیرزمینی در خروجی حوزه در نظر گرفته می‌شود.

۴- رطوبت اولیه خاک ( $k_{ss}$ )  
محتوای رطوبت خاک که در واقع نرخ رطوبت خاک نسبت به ظرفیت مزرعه است یکی از عناصر کلیدی کنترل‌کننده فرایند هیدرولوژیکی تولید رواناب سطحی، تبخیر و تعرق، نفوذ عمقی و جریان زیرسطحی به حساب می‌آید. انتخاب مناسب رطوبت اولیه خاک زمینه را برای تعیین دقیق شروع شبیه‌سازی فراهم می‌سازد.

۵- ذخیره آب زیرزمینی اولیه ( $k_{g0}$ )  
در مدل WetSpa تعادل آب زیرزمینی در مقیاس زیر حوزه و در مورد ذخیره آب زیرزمینی فعال در نظر گرفته می‌شود. ذخیره آب زیرزمینی فعال که در واقع ارتفاع ذخیره آب زیرزمینی اولیه برحسب میلی‌متر است، آن بخش از ذخیره را شامل می‌شود که در سفره آب زیرزمینی کم عمق بوده و در جریان سطحی شرکت دارد.

برای تعیین حدود اطمینان از مقادیر مختلف هر پارامتر است، هم‌چنین PEST ارزیابی بهینه‌ای بر اساس انحراف معیاری که برای هر پارامتر محاسبه می‌کند، به دست می‌آورد و بنابراین حدود معنی‌دار برای هر پارامتر به صورت،  $m \pm t_{n,S}$  که  $m$  برابر میانگین پارامترها و  $S$  برابر انحراف از معیار مقادیر پارامترها،  $t_{n}$  آزمون t-student است که حدود احتمال و  $n$  برابر درجه آزادی است. در این تحقیق مقدار  $n$  از تعداد داده‌ها منهای یک استخراج شده و نیز میزان  $\alpha = 0.05$  انتخاب شد. که در نهایت با اجرای مدل PEST برای هر پارامتر حدود اطمینانی برابر ۹۵٪ حاصل می‌گردد.

### نتایج و بحث

مقادیر پارامترهای کلی مدل برای شبیه‌سازی هیدروگراف جریان مقادیر ۱۱ پارامتر کلی برای مرحله واسنجی بر اساس شرایط هیدرولوژیکی حوزه و دستورالعمل مدل انتخاب شده‌اند در جدول ۱ ارائه شده است.

است که در این نرم‌افزار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مشتقات برای تعیین آنالیز حساسیت به ماتریس ژاکوب وارد می‌شوند. ماتریس ژاکوب شامل  $m$  ردیف (برای هر مشاهده) و  $n$  ستون (برای هر پارامتر)، هر ردیف عبارتند از مشتقات هر مشاهده در رابطه با هر یک از  $n$  پارامتر میزان حساسیت هر پارامتر به صورت حساسیت نسبی بیان می‌شود که از تقسیم حساسیت مطلق در میزان عددی آن پارامتر حاصل می‌گردد. قابل ذکر است که استفاده از حساسیت نسبی کمک می‌کند تا بتوان پارامترهای مختلف مدل که از انواع مختلف بوده و مقادیر عددی آنها اختلاف زیادی با هم دارند را مورد مقایسه قرار داد.

نحوه آنالیز عدم قطعیت پارامترهای مؤثر بر شبیه‌سازی هیدروگراف جریان با استفاده از مدل PEST در این تحقیق عدم قطعیت یا قابلیت اعتماد ارزیابی‌ها با استفاده از تعیین حدود اطمینان برای پارامترهای واسنجی شده مشخص می‌شود، که در این روش نرم‌افزار PEST با ارائه حدود اطمینان ۹۵ درصد، ابزار مناسبی

جدول ۱- پارامترهای کلی مدل، مقادیر اولیه و محدوده تغییرات آن‌ها

علامت	پارامتر	حداقل	مقدار اولیه	حداکثر
$K_i$	فاکتور جریان زیرسطحی	۰/۱	۶/۷۷۸	۱۰
$K_g$	ضریب افت آب زیرزمینی ( $d^{-1}$ )	۱۰ <sup>-۵</sup>	۰/۰۹۹۹	۰/۱
$k_{ep}$	رطوبت اولیه خاک (-)	۰/۱	۰/۶۵۱	۲
$K_{ss}$	فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق پتانسیل (-)	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 ( $mm^{\circ}C^{-1}d^{-1}$ )	-۳	۰/۲۷۳	۳/۲
$k_{rain}$	ضریب روز درجه بارش ( $mm\ mm^{\circ}C^{-1}d^{-1}$ )	۱۰ <sup>-۴</sup>	۰/۳	۰/۳
$k_{run}$	توان رواناب سطحی (-)	۴	۷/۶۷۷	۷
$p_{max}$	حداکثر شدت بارش (mm)	۱۰۰	۱۰۰۰	۵۰۰۰

آزمون کارایی مدل در دوره‌های آماری دیگر، آزمون اعتبارسنجی مدل صورت گرفت. در این مرحله از ۳ سال آبی آماری ۸۹-۸۶ استفاده شد. شکل ۶ دبی شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در دوره اعتبارسنجی را نمایش می‌دهد.

### ارزیابی کارایی مدل WetSpa

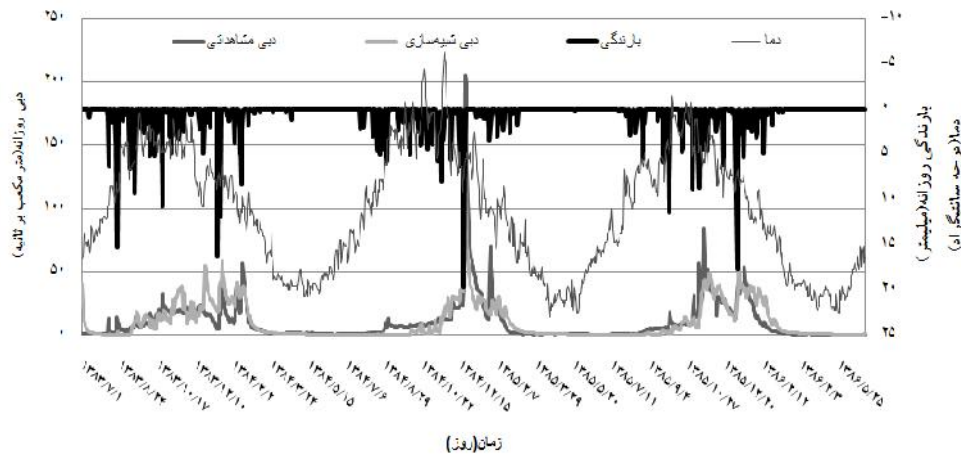
هم‌چنین در این تحقیق میزان کارایی مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان بر اساس چند معیار بررسی شده است که نتایج آن در جدول ۲ ذکر گردیده است.

### نتایج دوره واسنجی مدل WetSpa

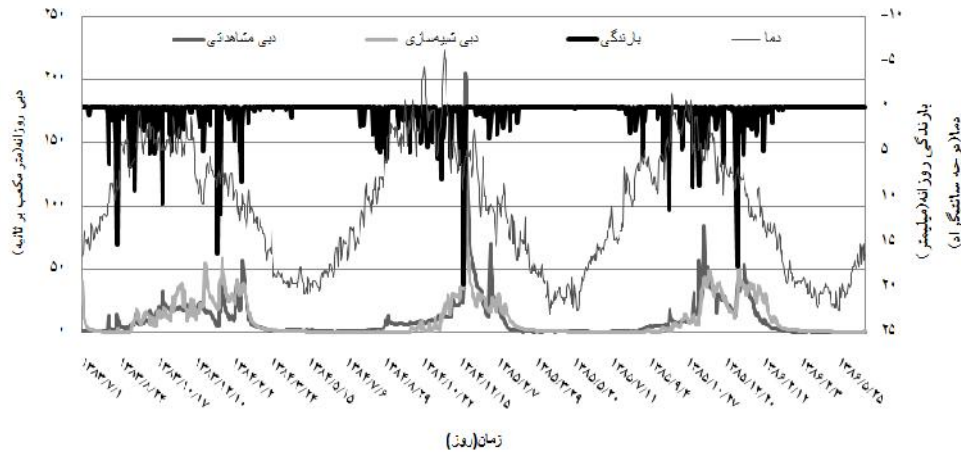
به‌منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa نتایج شبیه‌سازی با هیدروگراف مشاهده‌ای، به صورت گرافیکی و آماری بررسی شد. در شکل (۵) مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده، حوزه دینور در مرحله واسنجی ارائه شده است.

### نتایج اعتبارسنجی مدل WetSpa

برای آزمون مناسب بودن پارامترهای واسنجی شده مدل در دامنه‌های به دست آمده در مرحله واسنجی و



شکل ۵- مقایسه بین دبی مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده روزانه دوره آماری ۸۶-۸۳ برای دوره واسنجی



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

جدول ۲- مقادیر معیارهای ارزیابی کارایی مدل در مرحله واسنجی و اعتبارسنجی

معیار	واسنجی	اعتبارسنجی
ناش- ساتکلیف	۰/۶۶	۰/۵۲
ناش- ساتکلیف برای جریان‌های کم	۰/۵۹	۰/۶۲
ناش- ساتکلیف برای جریان‌های زیاد	۰/۷۲	۰/۵۶
خطای مدل در محاسبه بیلان آبی (درصد)	-۰/۰۰۳	۰/۵۵
معیار جمعی	۰/۷۱	۰/۴۹

شاخه آب زیرزمینی را کنترل می‌کند دارای بیش‌ترین حساسیت و پارامترهای  $k_{ep}$  و  $k_{ss}$  در رتبه دوم و سوم حساسیت قرار دارند و به این دلیل که پارامتر  $k_{ep}$  کنترل‌کننده تبخیر و تعرق واقعی از خاک و ذخیره آب زیرزمینی است و پارامتر  $k_{ss}$  نیز به این دلیل که در این دوره شبیه‌سازی در ابتدای هیدروگراف شبیه‌سازی همیشه به وسیله شرایط رطوبتی اولیه خاک تحت تأثیر قرار می‌گیرد، اثر حساس بیش‌تری نسبت به سایر پارامترها خواهند داشت. هم‌چنین نتایج آنالیز حساسیت

**نتایج آنالیز حساسیت پارامترهای مدل WetSpa**  
 ذکر این نکته ضروری است که نتایج آنالیز حساسیت با مدل PEST در تکرارهای بهینه ۲۰ تا ۳۰ قابلیت اطمینان بالایی خواهد داشت (۱۲). نتایج حاصل از آنالیز حساسیت با ۲۲ تکرار از پارامترهای مدل WetSpa در حوزه دینور با استفاده از نرم‌افزار PEST در جدول (۳) ارائه شده است. طبق این جدول حساسیت نسبی از ۱۱ پارامتر واسنجی شده در حدود ۰/۰۰۰۰۰۱۹۱ تا ۱/۶۶۲۲۴ است. پارامتر  $k_g$  که افت

اطمینان یا عدم قطعیت متغیرها به وسیله فواصل یا حدود اطمینان ارائه می‌شود. نمایش حدود اطمینان ۹۵ درصد، یک ابزار مناسب برای مقایسه بین مقادیر قطعیت پارامترهای مختلف که به وسیله PEST محاسبه می‌شوند، است (جدول ۴). با تعیین حدود اطمینان در واقع حدود عدم قطعیت برای پارامترهای واسنجی شده مشخص می‌شود. همان‌گونه که در نمودار (۷) قابل ملاحظه است حدود عدم قطعیت به صورت یک سری باند مشخص شده است.

نشان می‌دهد که پارامتر  $G_{max}$  کمترین حساسیت را دارد. البته این نوع از حساسیت، نسبی است و به این صورت که حساسیت مطلق پارامترهای کلی مدل نسبت به میزان بهینه آن در مدل PEST محاسبه می‌شود (جدول ۳).

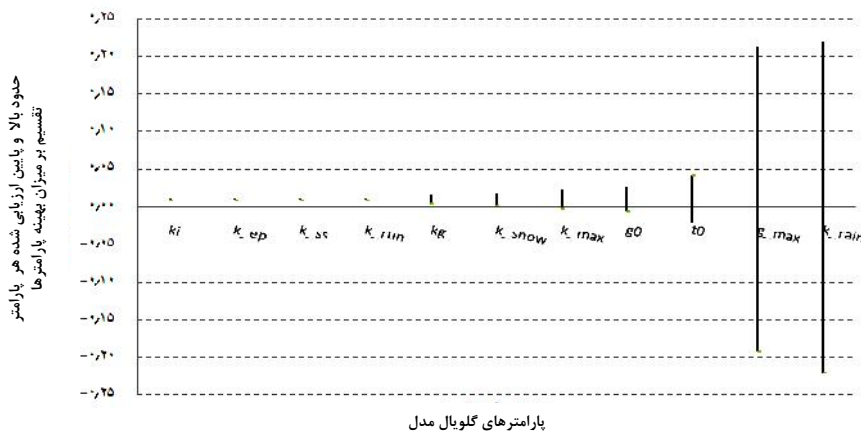
**نتایج آنالیز عدم قطعیت پارامترهای مدل WetSpa**  
مدل PEST از طریق ارزیابی نقطه‌ای به دنبال بهترین ارزیابی از پارامترهای کلی (پارامترهای مورد استفاده در واسنجی) است که در این نوع ارزیابی قابلیت

جدول ۳- نتایج آنالیز حساسیت نسبی پارامترهای مدل WetSpa با استفاده از مدل PEST در آبخیز دینور در بالادست سد کرخه

علامت	حساسیت نسبی	رتبه (حساسیت نسبی)
$K_i$	۰/۰۱۷۸	۸
$K_g$	۱/۶۶۲۲۴	۱
$k_{ep}$	۰/۲۵۳۸۶۷	۳
$K_{ss}$	۰/۹۳۲۷۰۲	۲
$G_0$	۰/۰۰۱۳۱	۹
$G_{max}$	$۱/۹۱ \times ۱۰^{-۷}$	۱۱
$T_0$	۰/۰۲۸۳	۶
$k_{snow}$	۰/۰۴۲۲	۵
$k_{rain}$	۰/۱۸۴	۴
$k_{run}$	۰/۲۰۳۱۷	۷
$p_{max}$	$۵/۸۱ \times ۱۰^{-۵}$	۱۰

مشاهده می‌شود. ولی در این تحقیق به نظر می‌رسد که مقدار این پارامترها به درستی با توجه به شرایط حوزه و ماهیت این پارامترها در نظر گرفته شده است بنابراین طبق نمودار (۷) مقدار آنها کاملاً قطعیت داشته است. میزان انحراف از معیار هر پارامتر و حدود اطمینان ۹۵ درصد برای پارامترهای واسنجی شده در جدول (۴) و نیز باند عدم قطعیت برای هر یک از ۱۱ پارامتر کلی در شکل ۷ ارائه شده است.

مفهوم این باندها بدین صورت است که: پارامترهای  $G_0$ ,  $k_{snow}$ ,  $T_0$ ,  $G_{max}$ ,  $p_{max}$ ,  $k_{rain}$  قطعیت بالا، پارامترهای غیر حساسی هستند که تعیین مقدار واقعی آنها در فرآیند واسنجی با خطای زیاد همراه است و به طور طبیعی منبع مهمی در خطای نتایج مدل می‌باشند در صورتی که پارامترهای  $K_i$ ,  $K_g$ ,  $k_{ep}$ ,  $K_{ss}$  با حدود عدم قطعیت کم (قطعیت بالا)، که با اندک خطا در میزان این پارامترها، خطای خیلی زیادی در نتایج



شکل ۷- محدوده عدم قطعیت هر یک از پارامترهای مدل WetSpa



جدول ۴- محدوده پارامترهای در نظر گرفته شده برای تعیین عدم قطعیت در مدل WetSpa

علامت	انحراف از معیار هر پارامتر	حداکثر	حداقل
$K_i$	۰/۱۸۴۷۶۶	۸/۲۸۸۲	۶/۱۲۹۸
$K_g$	۰/۰۰۳۹۶۴	۰/۰۳۶۸	۰/۰۹۶۶
$k_{ep}$	۰/۰۰۴۵۵۸	۰/۵۱۷۵۲۶	۰/۳۶۹۲۴
$K_{ss}$	۰/۰۱۲۰۶۸	۰/۱۶۰۶۶۵	۰/۱۱۴۳۳۷
$G_0$	۳/۷۹۲۶۸۶	۲۲/۵۹۲۹	۴/۹۷۱۵۲
$G_{max}$	۲۲۰۲/۶۱	۱/۶۰۳۸	۰۹۶/۳۸
$T_0$	۰/۰۵۶۲۷۷	۰/۴۲۹۷۷۸	۰/۸۳۲۳۸
$k_{snow}$	۰/۰۶۳۱۰۵	۰/۹۴۶۵۴۸	۰/۰۷۴۲
$k_{rain}$	۰/۰۰۳۱	۰/۰۹۷۴	۰/۰۹۷۳
$k_{run}$	۰/۱۰۷۰۵	۷/۳۸۶۷۸	۵/۱۲۰۷۸
$P_{max}$	۵۲/۲۲۷۷۳	۷۱۶/۴۵۱	۸۰/۵۵۷۳

PEST، طی اجراهای متوالی و محاسبه انحراف از معیار مقادیر تغییر یافته پارامترهای کلی در این تکرارها و با انجام آزمون t-student در سطح اطمینان ۹۵ درصد حدود اطمینانی برای ۱۱ پارامتر کلی مدل محاسبه شد. نتایج آنالیز حساسیت نشان می‌دهد که پارامترهای  $k_g$ ،  $k_{ss}$  و  $k_{ep}$  به ترتیب رتبه یک تا سه حساسیت را دارند و پارامتر  $g_{max}$  به عنوان پارامتر غیرحساس در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان شناسایی شد. با توجه به نتایج آنالیز حساسیت در اجرای مدل WetSpa می‌توان در تحقیقات بعدی در این حوزه و یا در حوزه‌های با شرایط فیزیوگرافی و هیدرولوژیکی مشابه با این حوزه پارامترهای  $g_{max}$  و  $P_{max}$  را از دسته پارامترهای کلی برای اجرای مدل حذف نمود که در نتیجه این عمل، مدل با تعداد پارامترهای کمتر، در زمان کم‌تر و با دقت بیشتر اجرا خواهد شد. پارامترهای با درجه حساسیت بالا پارامتر حساس شناسایی شده و ضروری است که محققین در انتخاب مقادیر این نوع پارامترها در اجرای مدل به‌دقت کافی را داشته باشند تا در نهایت نتایجی با کم‌ترین میزان خطا حاصل شود. طبق نتایج آنالیز نبود قطعیت پارامترهای  $k_i$ ،  $k_{ep}$  و  $k_{ss}$ ،  $k_g$  با حدود اطمینان خیلی کم (قطعیت بالا) و پارامترهای  $k_{rain}$  و  $k_{max}$  با حدود اطمینان بالا (قطعیت کم) شناسایی شد. در این تحقیق نتایج آنالیز حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای کلی مدل با استفاده از نرم‌افزار PEST با نتایج تحقیقات بهره‌مند (۱)، بهره‌مند و دسمت (۴)، بهره‌مند و دسمت (۵) مطابقت و مشابهت دارد. به طوری که این نتایج بیانگر کارایی بالای مدل PEST برای آزمون آنالیز حساسیت و عدم قطعیت پارامترهای کلی مدل WetSpa محسوب می‌شود.

#### تشکر و قدردانی

در این تحقیق لازم است به سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری و نیز سازمان مدیریت منابع آب به برای همکاری لازم به منظور ارائه آمار و اطلاعات حوزه دینور کرخه، مراتب سپاس گذاری و قدردانی به عمل می‌آید.

مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی WetSpa با استفاده از سه نقشه پایه مدل رقمی 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 و در طول دوره آماری ۶ سال آبی (۸۳-۸۹) (۳سال برای دوره واسنجی و ۳ سال برای دوره اعتبارسنجی) اجرا شد. نتایج شبیه‌سازی هیدروگراف خروجی حوزه دینور با استفاده از مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی WetSpa خیلی خوب ارزیابی می‌شود و این مؤید قابلیت بسیار خوب این مدل فیزیکی هیدرولوژیکی برای شبیه‌سازی جریان و رواناب در خروجی حوزه دینور در بالادست سد کرخه است. همچنین نتایج مدل در شبیه‌سازی جریان و هیدروگراف خروجی با نتایج و قابلیت مدل در تحقیقاتی در خارج از کشور هم‌چون دسمت و همکاران (۹)، گمبرمسکل و همکاران (۱۰)، لیو و همکاران (۱۲)، بهره‌مند و همکاران (۲)، لیو و همکاران (۱۳)، بهره‌مند (۱)، صفری و همکاران (۱۹) و زینی‌وند و همکاران (۲۴،۲۳) و در داخل کشور با نتایج تحقیق کبیر (۱۱) مطابقت دارد. همچنین نتایج کارایی مدل طبق معیار جمعی با نتایج تحقیقات صفری و همکاران (۱۹)، زینی‌وند و همکاران (۲۴،۲۳)، در خارج از کشور و کبیر (۱۱) مطابقت داشته است. در این تحقیق به دلیل بهینه‌سازی مدل و تعیین پارامترهای حساس و غیرحساس و نیز به سبب بررسی حدود اطمینان برای پارامترهای کلی مدل و میزان خطای مدل ناشی از تغییرات مقادیر پارامترهای کلی آزمون آنالیز حساسیت و عدم قطعیت با استفاده از نرم‌افزار PEST انجام شد. در مدل PEST بر اساس الگوریتم گوس-مارکورات-لونبرگ و تشکیل ماتریس ژاکوب در هر تکرار، اجرای مدل با تغییر مقادیر پارامترهای کلی تأثیر این تغییر را بر میزان تابع هدف و نتایج شبیه‌سازی در مدل بررسی نموده و با مقایسه بین میزان تغییر هر پارامتر با پارامترهای دیگر در نتایج مدل نسبت به مقدار بهینه آن پارامتر یک مقدار حساسیت نسبی از هر ۱۱ پارامتر را ارائه داده است و نیز نرم‌افزار

## منابع

1. Bahremand, A. 2006. Simulating the Effects of Reforestation on Floods Using Spatially Distributed Hydrologic Modeling and GIS. PhD Thesis. Vrije University Brussel Belgium. 150 pp .
2. Bahremand, A., J. Corluy, Y.B. Liu and F. De Smedt. 2006. 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 67-74.
3. Bahremand, A., F. De Smedt, J. Corluy, Y.B. Liu, J. Poorova, L. Velcicka and E. Kunikova. 2007. WetSpa Model Application for Assessing Reforestation Impacts on Floods in Margecany-Hornad Watershed, Slovakia. *Journal of Water Resources Management*, 22: 393-408.
4. Bahremand, A. and F. De Smedt. 2008. Distributed hydrological modeling and sensitivity and uncertainty analysis in Torysa watershed, Slovakia. *Journal of Water Resources Management*, 22: 393-408.
5. Bahremand, A. and F. De Smedt. 2010. Predictive Analysis and Simulation Uncertainty of a Distributed Hydrological Model. *Journal of Water Resources Management*, 24: 2869-2880.
6. Beven, K.J. and A. Binley. 1992. The Future of Distributed Models: Model Calibration and Uncertainty Prediction. *Journal of Hydrological Processes*, 6: 279-298.
7. Browne, F.X. 1990. Stormwater Management, Standard Handbook of Environmental Engineering, R.A. Corbitt (ed.), McGraw-Hill, The McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN: 9780070131606.
8. Chow, V.T., D.R. Maidment and L.W. Mays. 1988. Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York. 136 pp.
9. De Smedt, F., Y.B. Liu, S. Gebremeskel. 2000. Hydrological Modeling on a Catchment Scale Using GIS and Remote Sensing Land Use Information, in: C.A. Brebbia (ed.), Risk Analysis II, WIT press, Boston, 137: 295-304.
10. Gebremeskel, S., Y.B. Liu and F. De Smedt. 2002. GIS Based Distributed Modeling for Flood Estimation, Proceeding of the Twenty-Second Annual American Geophysical Union Hydrology Days. 11 pp.
11. Kabir, A. 2011. Application and Development of a Spatially Distributed Hydrologic Model WetSpa for Stream Flow Simulation in Gorganrood River Watershed, Golestan Province. PhD Thesis, Islamic Azad University of Tehran, Sciences and Research Branch, 300 pp.
12. Liu, Y.B., O. Batelaan and F. De Smedt. 2005. Automated Calibration Applied to a GIS-Based Flood Simulation Model Using PEST. Taylor & Francis Group, London, ISBN 0 415 38050 2. 317-326.
13. Liu, Y.B., J. Corluy, A. Bahremand, F. De Smedt and J. Poórová. 2006. Simulation of Runoff and Phosphorus Transport in a Carpathian Catchment, Slovakia. *Journal of River Research and Applications Journal* (accepted), pp: 317-326.
14. Liu, Y.B., O. Batelaan, F. De Smedt, N.T. Huong and V.T. Tam. 2005b. Test of a Distributed Modelling Approach to Predict Flood Flows in the Karst Suoimuoi Catchment in Vietnam. *Journal of Environmental Geology*. 48: 931-940.
15. Liu, Y.B., S. Gebremeskel, F. De Smedt, L. Hoffmann and L. Pfister. 2003. A Diffusive Transport Approach for Flow Routing in GIS-Based Flood modeling. *Journal of hydrology*, 283: 91-106.
16. Liu, Y.B. 2004. Development and Application of a GIS-Based Hydrological Model for Flood Prediction and Watershed Management. PhD Thesis. Brussel Belgium: Vrije University Brussel Belgium. 185 pp.
17. Liu, Y.B. and F. De Smedt. 2004. WetSpa Extension, Documentation and User Manual, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering. Brussel. Brussels: Vrije University Brussel Belgium. 200 pp.
18. Lenhart, T., K. Eckhardt, N. Fohrer and H.G. Frede. 2002. Comparison of Two Different Approaches of Sensitivity Analysis, *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 27: 645-654.
19. Safari, A., F. De Smedt and F. Moreda. 2009. WetSpa Model Application in the Distributed Model Intercomparison Project (DMIP2). *Journal of Hydrology*, 419: 78-79.
20. Thornthwaite and J.R. Mather, 1955. The water balance. *Publications in Climatology*, Vol. 8, No. 1, pp: 5-86.
21. Wang, Z.M., O. Batelaan and F. De Smedt. 1996. A Distributed Model for Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa). *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 21: 189-193.
22. Wang, Z., O. Batelaan and F. De Smedt. 1997. A distributed Model for Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere (WetSpa). *Journal of Physics and Chemistry of the Earth*, 21: 189-193.
23. Zeinivand, H. 2009. Development of Spatially Distributed Hydrological WetSpa Modules for Snowmelt, Soil Erosion and Sediment Transport PhD Thesis. Brussel Belgium: Vrije Universiteit. 150 pp.
24. Zeinivand, H. and F. De Smedt. 2009. Prediction of snowmelt floods with a distributed hydrological model using a physical snow mass and energy balance approach. *Journal of Natural Hazards*, DOI 0.1007/s11069-009-9478-9.

## Parameter Sensitivity and Uncertainty Analysis of the Model WetSpa in the Flow Hydrograph Simulation Using PEST, in Dinvar Basin, Karkheh

Maryam Azinmehr<sup>1</sup>, Abdolreza Bahremand<sup>2</sup> and Atena Kabir<sup>3</sup>

1- Graduated M.Sc., Young Researcher and Elite club, Dezful Branch, Eslamic Azad University, Khouzestan, Iran (Corresponding author: mary.azin@yahoo.com)

2- Associate Professor, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

3- Ph.D., Sciences and Research Branch Islamic Azad University of Tehran

Received: April 19, 2013

Accepted: September 2, 2014

### Abstract

The spatially distributed hydrologic model WetSpa is applied to the Dinvar river basin (1717 km<sup>2</sup>) located in upstream of the Karkheh Dam. Daily hydrometeorological data from 1382 to 1389, including precipitation data from 9 stations, temperature and evaporation data measured at 4 stations are used as input to the model. The spatial characteristic of the basin is described by three base maps, i.e. DEM, land use and soil type, in GIS form using 100 m cell size. Results of the simulations show a good agreement between calculated and measured hydrographs at the outlet of the basin. The model predicts the daily discharge values with a good accuracy, i.e. about 66% according to the Nash-Sutcliff criterion. Sensitivity and uncertainty analysis of the model parameters is performed using a model-independent parameter estimator, PEST. It is found that the correction factor for calculating the groundwater flow recession coefficient has the highest relative sensitivity and the parameters kss and kep located in two and three ranks of the relative sensitivity. Parameter uncertainty analysis shows that parameters ki, kep, kss and kg have high certainty and as well as parameters krain, kmax have low certainty.

**Keywords:** Dinvar Basin, Flow Simulation, Karkheh Dam, PEST, Sensitivity Analysis, Uncertainty, WetSpa Model