

بررسی حساسیت پارامترهای موثر بر روندیابی هیدروگراف سیل با روش موج پخشی دیفیوژن با مدل هیدرولوژیکی توزیعی *WetSpa* در حوزه آبخیز زیارت گرگان

نرگس جاویدان^{۱*} - عبدالرضا بهره‌مند^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۷/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۴/۰۲

چکیده

روندیابی سیل در رودخانه روشی است که به‌وسیله آن و با در دست داشتن هیدروگراف ورودی در نقطه‌ای از بالادست رودخانه، می‌توان هیدروگراف خروجی را در نقطه‌ای از پایین دست محاسبه کرد. در روندیابی رواناب در حوزه‌های آبخیز بارش مازاد با تکنیک‌های روندیابی به هیدروگراف جریان در پایین دست تبدیل می‌شود. در این تحقیق با استفاده از مدل هیدرولوژیکی - توزیعی *WetSpa*، روندیابی جریان سیل در حوزه آبخیز زیارت صورت گرفت. جهت اجرای مدل از داده‌های هیدرومتئورولوژی ساعتی از سال ۱۳۸۶ تا ۱۳۹۰ شامل داده‌های بارش، تبخیر و تعرق و دما به عنوان داده ورودی مدل استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی انطباق خوبی بین هیدروگراف شبیه‌سازی شده و هیدروگراف مشاهداتی نشان می‌دهد. در این مدل روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادله خطی موج پخشی صورت می‌گیرد. در مطالعه حاضر، بررسی حساسیت پارامترهایی از قبیل: شعاع هیدرولیکی، ضریب زبری کانال، آستانه شیب حداقل و آستانه سطح برای ترسیم شبکه آبراهه انجام شد. بررسی حساسیت پارامترها نشان داد که تاثیر تغییر فراوانی سیل و ضریب زبری نسبت به آستانه شیب حداقل و آستانه سطح بر روی هیدروگراف خروجی و هیدروگراف واحد حوزه بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: آستانه شیب حداقل، داده‌های هیدرومتئورولوژی، روندیابی سیل، هیدروگراف شبیه‌سازی شده، هیدروگراف واحد

مقدمه

ارتفاع و حجم آب و نیز شدت جریان ورودی و خروجی به منظور کنترل سیل در طول زمان سیل را روندیابی می‌نامند. روندیابی سیل یکی از مسایل مربوط به جریان‌های غیر دائمی است که از اهمیت عملی خاصی برخوردار بوده است و با استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های مختلف هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، روندیابی سیل به جواب‌های دقیق منتج خواهد گردید. اولورا و میدمنت (۱۶) روشی برای روندیابی توزیعی - مکانی بارش مازاد در سرتاسر حوزه با استفاده از توابع پاسخ که از مدل رقومی زمین نتیجه می‌شود، پیشنهاد کردند. روندیابی جریان از یک سلول به سلول بعدی با استفاده از تابع پاسخ زمانی تکمیل شد. پارامترهای تابع پاسخ مسیر جریان با سرعت و ضریب پراکنش مسیر در ارتباط است.

در دهه‌های اخیر برای پیش‌بینی سیل و محاسبه بارش - رواناب به صورت فیزیکی، مدل سازی توزیعی فرایندهای هیدرولوژیکی در سطح حوزه به طور فزاینده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است. از آنجایی که سیلاب‌ها و حوادثی مثل شکست سد دارای جریان‌های غیر دائمی و غیر یکنواخت می‌باشند می‌توان از طریق معادلات کامل در زمینه مومنتوم و حرکت در کانال‌های روباز (معادلات سنت و نانت)

پیش‌بینی سیل و مدل‌سازی توزیعی فرایندهای هیدرولوژیکی حوزه از موضوعات اصلی هستند که جهت بررسی فرایندهای تبدیل بارش به هیدروگراف سیل و تئوری هیدروگراف واحد در هیدرولوژی مورد توجه هیدرولوژیست‌ها می‌باشد. تئوری هیدروگراف واحد نقش بارز و برجسته‌ای را در پیش‌بینی جریان رودخانه دارد. در این تئوری پاسخ هیدرولوژیکی حوزه نسبت به بارش ورودی به‌صورت خطی و با پایه زمانی ثابت فرض می‌شود، دبی در خروجی حوزه به‌واسطه مجموع بارش‌های ورودی و هیدروگراف واحد لحظه‌ای بدست می‌آید. یکی از مهم‌ترین حالات جریان‌های غیر دائمی که مهندسیین هیدرولیک و آبخیزداری به ناچار با آن روبرو خواهد شد، عبارت است از حرکت یک موج سیل در داخل رودخانه و تغییراتی که در اثر این حرکت در شکل و ارتفاع سیل بوجود می‌آید. به عبارت دیگر تغییرات

۱ و ۲- دانشجوی دکتری و دانشیار گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
* - نویسنده مسئول: (Email: Narges.javidan20@gmail.com)

جهت روندیابی جریان استفاده نمود تا با پیش‌بینی هیدروگراف در نقطه مورد نظر، حجم آب و دبی عبوری از آن نقطه از رودخانه یا کانال محاسبه شود (۱).

دی اسمت و همکاران (۸) روشی برای روندیابی جریان پیشنهاد کردند. در این روش مسیر رواناب در طول کل مسیر جریان در حوزه با کمک توپوگرافی و با استفاده از مدل انتقال موج پخش‌ی تعیین می‌شود. این روش، محاسبه توابع پاسخ بین هر نقطه شروع و پایان را ممکن می‌سازد. تمام این محاسبات با توابع استاندارد GIS انجام می‌شود. در مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa از این روش استفاده شده است. ساختار این مدل به گونه‌ای طراحی شده است که در آن‌ها خصوصیات حوزه از قبیل: توپوگرافی، نوع خاک، کاربری اراضی، تراکم شبکه آبراهه، درجه اشباع خاک و خصوصیات بارش به صورت توزیعی مکانی در نظر گرفته شده است و مزیت این مدل این است که داده‌های مورد نیاز آن‌ها در قالب GIS قابل استفاده می‌باشند. این مدل اولین بار توسط ونگ و همکاران (۱۷) ابداع شد سپس توسط دی اسمیت و همکاران (۸) توسعه پیدا کرده است (۵). مدل WetSpa در خارج از کشور در مناطق مختلف اجرا شده است که از آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: لیو و همکاران (۱۲)، در حوزه آلتز در لوگزامبورگ، مدل WetSpa را با داده‌های دبی و رواناب ساعتی مشاهده شده مورد آزمون قرار دادند. روندیابی جریان سطحی و زیرسطحی از روش معادلات تقریب موج پخش‌ی سنت و نانت، در مقیاس سلول صورت گرفت. ایشان حساسیت پارامترهای موثر بر روندیابی را بررسی کرده و نتایج نشان داد که فراوانی سیل و ضریب زبری تأثیر زیادی در هیدروگراف خروجی و هیدروگراف واحد حوزه دارد. بهره مند و همکاران (۲) به شبیه‌سازی جریان آبراهه با استفاده از مدل هیدرولوژیکی - توزیعی مکانی WetSpa در حوزه رودخانه هورنارد در اسلواکی پرداختند. مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای یک دوره ۱۰ ساله در منطقه نشان دهنده کارایی بالای مدل در پیش‌بینی سیلاب است. همچنین نتایج نشان دادند که مدل قابلیت پیش‌بینی هیدروگراف‌های روزانه را در منطقه با دقت ۰/۷۵-۰/۸-۰/۸۰ دارد. بهره مند و همکاران (۳) به منظور بررسی اثرات تغییر کاربری بر میزان رواناب سطحی و هیدروگراف سیل، مدل WetSpa را در حوزه آبخیز مارگسانی - هورنارد در اسلواکی به اجرا درآوردند. نتایج تحقیق نشان داد که مدل از توانایی بسیار خوبی در شبیه‌سازی هیدروگراف‌های ساعتی و روندیابی جریان رودخانه برخوردار می‌باشد. شفیی و دی اسمت (۱۵)، برای پیش‌بینی دبی رودخانه مدل WetSpa را برای رودخانه هورنارد در اسلواکی کالیبره نمودند. آن‌ها بدین منظور روش NSGA یا همان ژنتیک الگوریتم را برای یک دوره ۱۰ ساله مورد امتحان قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از این روش نیز می‌تواند به عنوان یک روش واسنجی کارا برای تعیین پارامترهای مدل مورد استفاده قرار گیرد.

بهره‌مند و دی اسمت (۴) در حوزه آبخیز توریسا در اسلواکی با استفاده از اتوکالیبراسیون، پارامترهای مدل WetSpa را تخمین زده و سپس آنالیز حساسیت و آنالیز پیش‌بینی انجام دادند. نتایج نشان داد که ضریب اصلاحی تبخیر بیشترین حساسیت را دارد و عدم قطعیت پارامترها و آنالیز پیش‌بینی بینش مناسبی از مجموعه پارامترها و بازه‌های آن‌ها به ما داده و عدم قطعیت پارامترهای مدل منجر به سطح معنی‌داری از عدم قطعیت پیش‌بینی نمی‌شود. این تحقیقات بیانگر توانایی بالای مدل WetSpa در شبیه‌سازی و روندیابی جریان است.

در داخل ایران نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: بیات (۶) با استفاده از مدل WetSpa به شبیه‌سازی و روندیابی جریان رودخانه و تحلیل اثرات تغییر کاربری حاصل از کاربرد مدل در حوزه، دقتی معادل ۷۷٪ بر اساس ضریب نش - ساتکلیف نشان می‌دهد. شبیه‌سازی جریان رودخانه تحت سناریوی کاربری بهینه نشان داد که هیدروگراف جریان رودخانه اندکی با تأخیر به اوج خود رسیده است.

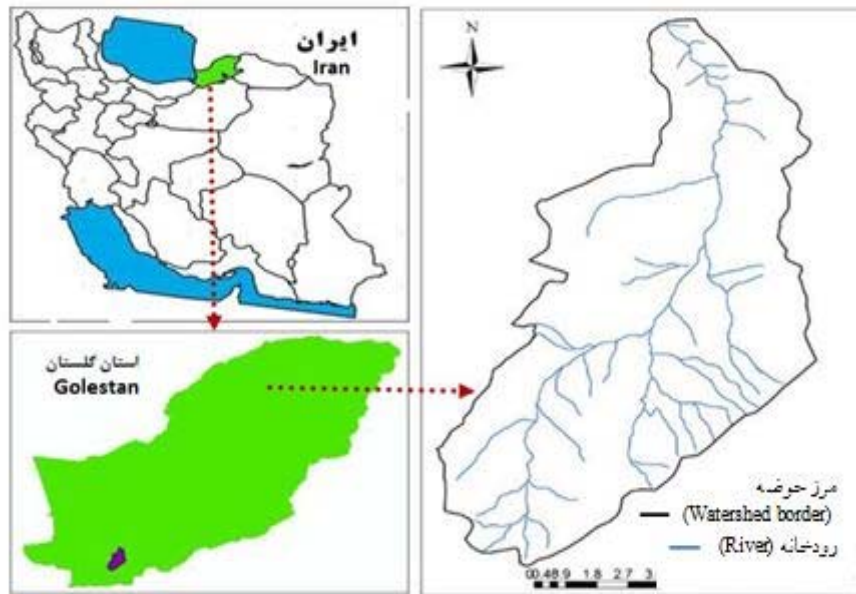
کبیر (۱۱) با استفاده از مدل WetSpa به شبیه‌سازی دبی حوزه رودخانه گرگان‌رود در استان گلستان پرداختند. نتایج واسنجی و اعتبارسنجی مدل با توجه به معیار نش - ساتکلیف ۷۱٪ بیانگر دقت خوب پیش‌بینی هیدروگراف‌های روزانه و همخوانی هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی در خروجی حوزه می‌باشد. یعقوبی (۱۸) به شبیه‌سازی جریان رودخانه حوزه آبخیز چهل‌چای با استفاده از مدل هیدرولوژیکی - توزیعی WetSpa و بررسی کارایی مدل جهت پیش‌بینی هیدروگراف جریان پرداخت. نتایج شبیه‌سازی حاکی از قابلیت مدل در پیش‌بینی هیدروگراف‌های روزانه با دقت ۶۸٪ بر اساس معیار نش - ساتکلیف می‌باشد. هدف از انجام این تحقیق بررسی حساسیت برای تعیین اختلاف در پاسخ‌های مدل با تغییر مقدار یک سری از پارامترهای موثر بر روندیابی سیل شامل شعاع هیدرولیکی، ضریب زبری کانال، آستانه شیب حداقل و آستانه سطح برای ترسیم شبکه آبراهه می‌باشد. که برای انجام آن از مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

مشخصات و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه حوزه زیارت می‌باشد که با مساحت ۹۵/۱۵ کیلومتر مربع و محیط ۴۰/۵۱ کیلومتر در استان گلستان، در شهرستان گرگان و بین طول جغرافیایی ۵۴ درجه، ۲۳ دقیقه و ۵۳ ثانیه تا ۵۴ درجه، ۳۱ دقیقه و ۱۱ ثانیه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۶ درجه، ۳۶ دقیقه و ۵۱ ثانیه تا ۳۶ درجه، ۴۳ دقیقه و ۵۹ ثانیه شمالی قرار گرفته است. حداکثر ارتفاع حوزه ۳۳۰۰ متر و بارندگی متوسط سالانه ۷۵۰

میلی متر می باشد (شکل ۱).



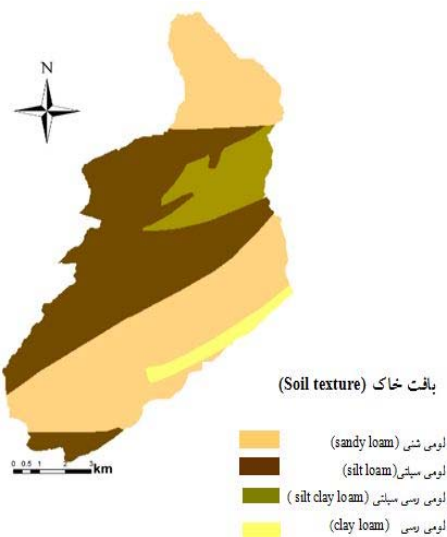
شکل ۱- موقعیت حوزه زیارت در استان گلستان و کشور

Figure 1 - Location plan showing the study area, the Ziarat watershed

۴- داده‌های اقلیمی: در بررسی هوا و اقلیم حوزه آبخیز از ۲ ایستگاه باران سنجی و یک ایستگاه دماسنجی و یک ایستگاه تبخیرسنجی استفاده شده است. در این تحقیق از آمار ۴ سال داده ساعتی (۸۶-۹۰) استفاده شده است.

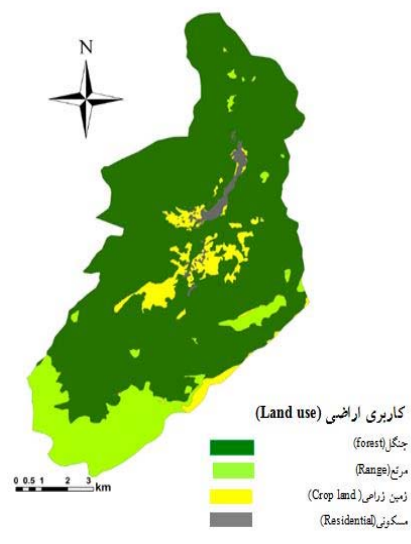
جمع‌آوری اطلاعات پایه حوزه

۱- نقشه کاربری اراضی حوزه آبخیز زیارت که این نقشه از تصاویر ماهواره‌ای لندست تهیه شده است (شکل ۲). ۲- نقشه بافت خاک حوزه آبخیز زیارت که طبق گزارشات و نقشه‌های خاک‌شناسی تهیه شده است (شکل ۳). ۳- نقشه مدل رقومی ارتفاعی (شکل ۴)



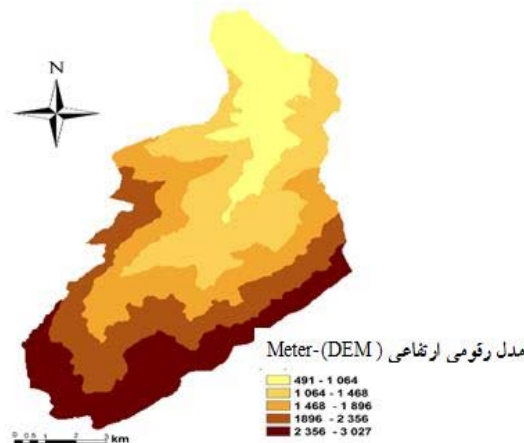
شکل ۳ - نقشه بافت خاک حوزه زیارت

Figure 3- Soil map of Ziarat watershed



شکل ۲- نقشه کاربری اراضی حوزه زیارت

Figure 2- Land use map of Ziarat watershed



شکل ۴- مدل رقومی ارتفاعی حوزه آبخیز زیارت (متر)
Figure 4 - Digital Elevation Model of Ziarat Watershed (m)

که در آن $D(L)$ عمق ریشه، $\Delta\theta(L^3L^{-3})$ تغییرات رطوبتی خاک در گام (انتروال) زمانی t و $t-1$ ، $p(LT^{-1})$ بارش، $I=I_a+D_a$ (LT^{-1}) تلفات اولیه شامل ذخیره برگابی و ذخیره چالابی در گام زمانی، $V(LT^{-1})$ رواناب سطحی یا بارش مازاد، $E(LT^{-1})$ تبخیر و تعرق، R (LT^{-1}) نرخ نفوذ عمقی از ناحیه ریشه و F (LT^{-1}) نرخ جریان زیرسطحی در زمان می‌باشد. در این مدل بارش مازاد با استفاده از روش استدلالی اصلاح شده محاسبه می‌گردد. همچنین میزان جریان زیرسطحی نیز براساس قانون دارسی و معادلات موج سینماتیکی محاسبه می‌گردد. تبخیر و تعرق شامل چهار بخش تبخیر از ذخیره برگاب، تبخیر از ذخیره چالابی، تبخیر و تعرق از خاک و آب‌های زیرزمینی می‌باشد. ظرفیت ذخیره آب‌های زیرزمینی، حجم آب‌های زیرزمینی در ناحیه اشباع است که متناوباً تحت شرایط طبیعی استخراج و جایگزین می‌گردد. که بدلیل عدم شناخت سنگ بستر، روش ساده مخزن برای تعیین دبی آب‌های زیرزمینی در مقیاس زیرحوزه‌های کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روندیابی جریان

در مدل WetSpa، روندیابی جریان سطحی و جریان آبراهه با استفاده از روش معادله خطی موج پخشی صورت می‌گیرد. از مزایای روش موج پخشی این است که از طریق جبری قابل حل بوده و نیازی به محاسبات عددی و تعیین دقیق شرایط مرزی ندارد.

پاسخ جریان در سطح سلول

با این فرض که یک سلول به صورت بازه‌ای با جریان یک بعدی

اجرای مدل WetSpa

مدل WetSpa یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی برای ارتباط آب و انرژی بین خاک گیاهان و اتمسفر است (۱۸). مدل براساس شبکه سلولی طراحی شده است و در هر شبکه‌ی سلولی با استفاده از مجموعه روابط فیزیکی و تجربی و با توجه به میزان بارندگی، دما و تبخیر و تعرق کلیه فرایندهای هیدرولوژیکی از جمله بارش، ذخیره برگابی گیاهان، ذخیره چالابی، نفوذ، رواناب سطحی، تبخیر و تعرق، جریان زیرسطحی، جریان زیرزمینی و بیلان آب در ناحیه ریشه و ناحیه اشباع را شبیه‌سازی می‌کند. همچنین دبی‌های پیک و هیدروگراف جریان در هر مکان از شبکه آبراهه را پیش‌بینی و شبیه‌سازی می‌کند. در مدل WetSpa فرض شده است که شدت باران شروع به کم شدن می‌کند تا جایی که ظرفیت ذخیره برگابی به انتها برسد، بدین صورت که چنانچه طی اولین گام زمانی مقدار بارندگی بیشتر از ظرفیت ذخیره برگابی باشد، بخشی از بارندگی مطابق با ظرفیت ذخیره برگابی دریافت و ذخیره می‌شود. در غیر این صورت کل بارندگی توسط تاج پوشش دریافت شده و هم‌چنان در بقیه گام‌های زمانی نیز ذخیره برگابی ادامه می‌یابد. تعادل آب در ناحیه ریشه مهم‌ترین بخش در نگهداشت آب محسوب می‌گردد زیرا این بخش کنترل کننده حجم رواناب سطحی، رواناب زیرسطحی، تبخیر و تعرق، دبی و دبی آب زیرزمینی می‌باشد. در مدل WetSpa تعادل آب در ناحیه ریشه برای هر شبکه سلولی با توجه به رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$\frac{D\Delta\theta}{\Delta\theta} = P - I - R - E - V - F \quad (1)$$

جریان در طول مسیر به طور پیوسته با استفاده از رابطه کونولاسیون^۱ جریان به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$U_i(t) = \prod_{j=1}^N U_j(t) \quad (7)$$

$U_i(t)$ تابع پاسخ مسیر جریان $(1/S)$

I: بیانگر سلولی است که جریان به آن وارد می‌شود و Z شماره سلول بعدی

N: تعداد کل سلول‌ها در مسیر جریان

رابطه خطی بین تابع مسیر جریان و جریان ورودی برقرار می‌باشد. با فرض اینکه تابع پاسخ مسیر جریان $U(t)$ ، همان توزیع اولین زمان عبور بوده، لیو و همکاران (۱۲) راه حل تقریبی عددی تابع پاسخ مسیر جریان را ارائه دادند که دبی در انتهای مسیر جریان را با رواناب در آغاز مسیر جریان مرتبط می‌سازد.

$$U_i(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2 t^3 / t_i^3}} \exp\left[-\frac{(t-t_i)^2}{2\sigma_i^2 t / t_i}\right] \quad (8)$$

که در آن $U(t)$ تابع پاسخ مسیر جریان، t_i زمان جریان، σ_i انحراف استاندارد زمان جریان می‌باشد. این دو پارامتر توزیعی - مکانی با استفاده از انتگرال پیچشی در طول مسیرهای جریان توپوگرافی معین به عنوان تابعی از سرعت جریان و ضریب پخش محاسبه می‌شود.

$$t_i = \sum_{j=1}^N \left(\frac{1}{C_j}\right) l_j \quad (9)$$

$$\sigma_i^2 = \sum_{j=1}^N \left(\frac{2d_j}{C_j^3}\right) l_j \quad (10)$$

در نهایت برای هر ورودی دلخواه در سلول شروع می‌توان پاسخ جریان در انتهای مسیر را با جمع کردن حجم رواناب ورودی با توجه به تابع پاسخ واحد ورودی مسیر جریان محاسبه نمود. برای هر ورودی دلخواه می‌توان هیدروگراف جریان خروجی را به صورت زیر تعیین نمود:

$$Q_i(t) = \sum_{\tau}^{t-t_i} V_i(\tau) U_i(t-\tau) \quad (11)$$

که در آن $Q_i(t)$ دبی خروجی در انتهای مسیر جریان با ورودی دلخواه در سلول i (مترمکعب بر ثانیه)، $U_i(t-\tau)$ تابع پاسخ مسیر جریان (عکس ثانیه) معادل هیدروگراف واحد لحظه‌ای و τ زمان تأخیر (ثانیه) و $V_i(\tau)$ حجم رواناب ورودی (مترمکعب) در سلول i و در زمان τ شامل رواناب سطحی، جریان زیرسطحی و رواناب آب‌های زیرزمینی (در صورتی که سلول i در خروجی زیرحوزه واقع شده باشد) می‌باشد.

پاسخ جریان در کل حوزه

با در نظر گرفتن قابلیت تجزیه مکانی در یک سیستم روندیابی خطی پاسخ جریان حوزه را می‌توان از طریق جمع کردن پاسخ‌های

غیرماندگار بوده و با صرف نظر از شرایط مانند معادله منتم سنت ونانت، فرایند جریان سلول را می‌توان با استفاده از معادله خطی موج پخشی سنت ونانت به صورت رابطه ۲ شبیه‌سازی نمود. (۱۳):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C_i \frac{\partial Q}{\partial x} - D_i \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0 \quad (2)$$

Q دبی جریان (مترمکعب بر ثانیه) در زمان t (ثانیه) و در مکان x (متر)، C_i سرعت موج سینماتیکی در سلول i (متر در ثانیه)، D_i ضریب پخش در سلول i (متر در ثانیه) می‌باشد. تابع پاسخ لحظه‌ای سلول در خروجی سلول و در سرعت جریان و ضریب پخش ثابت با استفاده از توزیع چگالی اولین زمان عبور حرکت براونی جریان به صورت رابطه ۳ خواهد بود (۷):

$$U_i(t) = \frac{l_i}{2\sqrt{\pi D t^3}} \exp\left[-\frac{(C_i t - l_i)^2}{4 D t}\right] \quad (3)$$

در معادله $U_i(t)$ تابع پاسخ لحظه‌ای سلول (عکس ثانیه)، l_i اندازه سلول (متر)، دو پارامتر C_i و D_i با استفاده از رابطه مایننگ به صورت رابطه ۴ آمده است (۱۰):

$$C_i = \frac{5}{3} v_i \quad (4)$$

و $D = (vH)/(2S_0)$ (۱۰). H شعاع هیدرولیکی و یا متوسط عمق جریان است. شعاع هیدرولیکی را می‌توان با استفاده از یک رابطه توانی با احتمال وقوع (رابطه ۵) تعیین کرد (۱۴):

$$H = a_p (A_i)^{b_p} \quad (5)$$

که در آن H شعاع هیدرولیکی، A_i سطح زهکش در بالادست سلول (کیلومتر مربع) که با استفاده از تابع تجمع جریان در GIS تعیین شده است، a_p ثابت شکل آبراهه و b_p توان مقیاس ژئومتری (که هر دو پارامتر به فراوانی دبی بستگی دارند) می‌باشد. پارامترهای a و b براساس مشخصات حوزه تخمین زده شده‌اند. مقادیر 0.47 و 0.55 به ترتیب برای پارامترهای a و b در نظر گرفته شد. همچنین سرعت جریان با استفاده از معادله مایننگ به صورت رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$V = \frac{1}{n} H^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

n ضریب زبری مایننگ ($m^{-1/3} s$) می‌باشد که بستگی به کاربری و خصوصیات آبراهه دارد. مقادیر ضریب زبری مایننگ را می‌توان با بررسی منابع جمع‌آوری نمود.

پاسخ جریان در سطح از مسیر

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 سلول محاسبه نمود. برای تعیین پاسخ در طول مسیر نیاز است که جریان در سلول‌های متوالی به سمت خروجی سیستم روندیابی شود. در این نوع روندیابی پاسخ

آستانه سطح برای ترسیم شبکه هیدروگرافی انجام شد. بررسی حساسیت در این مقاله به روشی ساده صورت گرفته است، بدین صورت که مقادیر متفاوت از هر مقدار پارامتر به مدل داده شده و با ترسیم خروجی و بررسی تغییرات آن به حساسیت هر پارامتر پرداخته شده است. نتایج بررسی حساسیت ممکن است برای حوزه‌های مختلف با اندازه، خاک، کاربری اراضی و موقعیت شیب مختلف متفاوت باشد. در این تحقیق تاثیر تغییر هر پارامتر، مورد مطالعه قرار گرفت در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شد.

بررسی تاثیر شعاع هیدرولیکی

برای تعیین شعاع هیدرولیکی از یک رابطه توانی استفاده می‌گردد که در آن شعاع هیدرولیکی به مساحت زهکشی بالادست مربوط بوده و نمایانگر رفتار تقریبی سلول و ژئومتری کانال می‌باشد. رابطه ۵ متوسط شعاع هیدرولیکی را نشان می‌دهد (۱۴). با توجه به این که شعاع هیدرولیکی در مدل برای هر نقطه از مسیر جریان بر اساس سطح حوزه زهکشی بالادست آن نقطه تعیین می‌شود بالطبع مقادیر شعاع هیدرولیکی متأثر از بزرگی جریان خواهند بود، مدل این مسئله را به صورت تعیین شعاع هیدرولیکی در دوره بازگشت‌های مختلف می‌بیند که عملاً در هر شبیه‌سازی مدل، ثابت فرض می‌شود.

بررسی تاثیر زبری کانال

از آنجایی که رواناب سطحی از هر سلول در جریان آبراهه شرکت می‌کند، زمانی که هیدروگراف سیل از حوزه رودخانه روندیابی می‌شود، ضریب زبری تاثیر مستقیمی روی زمان جریان خواهد داشت. برای روندیابی هیدرولوژیک مدل، ضریب زبری به شکل n در معادله مانینگ بوده و بر اساس ژئومتری آبراهه تخمین زده شده است. معمولاً آبراهه‌های بالادست ضریب زبری بالاتری داشته و با کاهش شیب آبراهه ضریب زبری بر اساس رتبه بندی آبراهه، کاهش می‌یابد.

تاثیر شیب حداقل

همان‌طوری که ذکر شد در این مدل تعیین سرعت جریان با استفاده از روش مانینگ صورت می‌گیرد (رابطه ۶). سرعت جریان یکی از متغیرهای وابسته به زمان است که هم به دبی و هم به مکان بستگی دارد. اما برای این که بتوان از روش معادلات موج پخشی برای تجزیه و تحلیل آن استفاده کرد فقط مرتبط به مکان در نظر گرفته می‌شود. این سرعت ممکن است به علت تغییرات شیب متغیر باشد. طی فرایند استخراج شیب، حداکثر تغییرات مکانی لایه طبقات ارتفاعی محاسبه می‌گردد. با در نظر گرفتن این موضوع که شبکه آبراهه به صورت یک لایه‌برداری می‌باشد و شیب آن با تفاوت ارتفاع و مسافت بین سلول‌های بالا و پایین مسیر جریان تعیین می‌گردد،

تمام سلول‌های شرکت کننده تعیین نمود. بنابراین پاسخ جریان در کل حوزه را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^{N_w} Q_i(t) \quad (12)$$

$Q(t)$: دبی کل حوزه در خروجی حوزه (متر مکعب بر ثانیه)؛
 N_w : تعداد سلول‌ها در کل حوزه.

بدین ترتیب روندیابی جریان، مسیریابی رواناب در طول مسیر توپوگرافی تعیین شده و برآورد جریان آب زیرزمینی به خارج از زیرحوزه را شامل می‌گردد و 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.

در این تحقیق، در شروع کار از نقشه‌ی مدل رقومی ارتفاعی حوزه زیارت با پیکسل سایز 30×30 متر استفاده شد و ویژگی‌های هیدرولوژیکی شامل شیب سطح، جهت جریان، تجمع جریان، طول جریان، شبکه آبراهه و مناطق زهکشی مشخص گردید. نقشه‌های عمق ریشه، ضریب زبری مانینگ و ظرفیت ذخیره برگابی از نقشه کاربری اراضی بدست آمد. با ترکیب نقشه‌های ضریب زبری، شعاع هیدرولیکی و شیب سطح، سرعت متوسط جریان در هر سلول با استفاده از معادله مانینگ محاسبه شد. نقشه‌های ضریب رواناب پتانسیل و ظرفیت ذخیره چالابی، از ترکیب نقشه‌های شیب، نوع خاک و کاربری اراضی حاصل شد. متوسط زمان جریان آبراهه از هر سلول به خروجی در طول مسیر ۶ ساعت محاسبه شده است. به همین نحو، انحراف استاندارد زمان جریان از هر شبکه سلول به خروجی تعیین گردید. سپس مدل با استفاده از این نقشه‌ها و نتایج حاصل از روندیابی و با استفاده از سری زمانی ساعتی بارش، تبخیر و تعرق و درجه حرارت اجرا شد.

واسنجی مدل و بهینه‌سازی نتایج

به منظور اصلاح عملکرد مدل و کاهش اثر عدم قطعیت‌ها برای شرایط مختلف، انجام فرآیند واسنجی مدل ضروری است. برای واسنجی مدل، ۱۱ پارامتر کلی در مدل WetSpa مورد استفاده قرار گرفته است. در طی این فرآیند مقادیر پارامترهای معرفی شده به مدل با هدف دسترسی به نتایج همگون با داده‌های واقعی و طبیعی تصحیح می‌شود.

بررسی حساسیت پارامترهای موثر بر روندیابی

هدف اصلی از بررسی حساسیت، تعیین اختلاف در پاسخ‌های مدل در نتیجه‌ی تغییر در مقدار یک سری از پارامترهای بخصوص و ویژه است. در مطالعه حاضر، بررسی حساسیت بر روی پارامترهایی از قبیل شعاع هیدرولیکی، ضریب زبری کانال، آستانه شیب حداقل و

توپوگرافی خیلی کوچک هستند.

نتایج و بحث

نتایج اجرای مدل

با استفاده از نقشه‌های توزیعی- مکانی پارامترهای هیدرولوژیک و آمار هواشناسی سال‌های آبی ۱۳۸۶-۱۳۹۰ مدل اجرا شد. مدل پس از جمع‌آوری اطلاعات اولیه، آزمون شده و در مرحله بعد وارد فاز واسنجی مدل می‌شود.

نتایج حاصل از مقایسه هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و

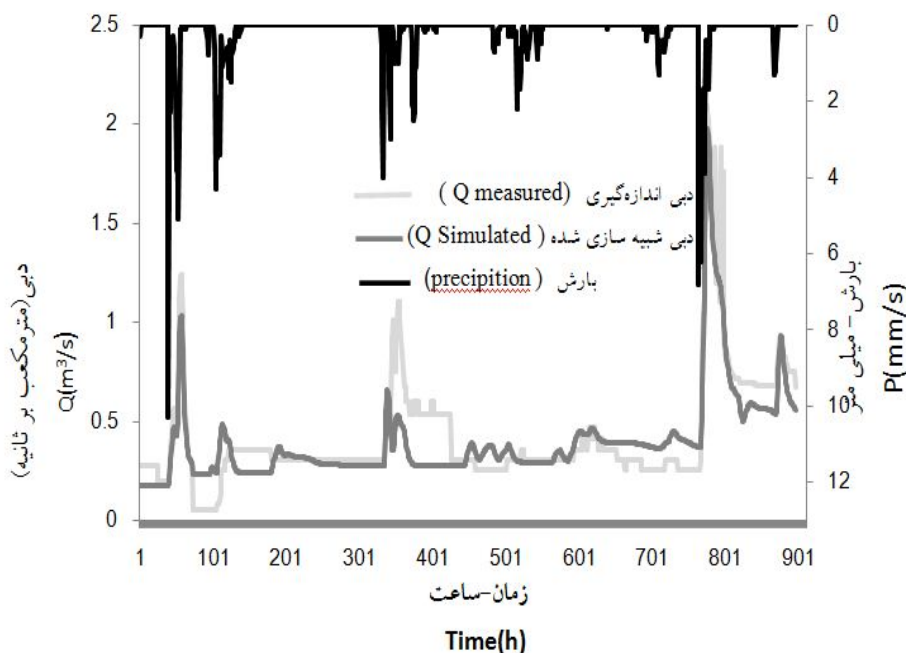
شبیه‌سازی شده برای دوره واسنجی

به منظور ارزیابی کارایی مدل WetSpa نتایج شبیه‌سازی با هیدروگراف‌های مشاهده‌ای، به صورت گرافیکی مقایسه شده است. در شکل ۵ مقایسه گرافیکی هیدروگراف‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در حوزه زیارت ارائه شده است. شکل نشان می‌دهد که هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده تطابق خوبی دارند. با توجه به معیار نش - ساتکلیف، کارایی مدل ۰/۷۰ برآورد شد.

شیب کانال مجزا از شیب زمین در نظر گرفته شده و برای تعیین آن از اطلاعات DEM و شبکه آبراهه استفاده می‌گردد. ممکن است در بعضی مناطق از جمله در دره‌های رودخانه در مناطق دشت سیلابی شیب‌های صفر اتفاق افتد. بنابراین برای کاهش تاثیر این شیب‌ها بر روی تابع پاسخ جریان وارد کردن یک مقدار آستانه برای شیب حداقل ضروری می‌باشد، یعنی زمانی که شیب سلول کمتر از مقدار آستانه محاسبه شود برابر با مقدار آستانه قرار داده می‌شود.

تاثیر آستانه سطح برای ترسیم شبکه آبراهه

در این مدل نقشه شبکه آبراهه با استفاده از نقشه تجمع جریان تهیه می‌شود. که با تعیین یک مقدار آستانه اولیه شروع شده و برای سلول‌های زیر مجموعه، که دارای جریان تجمعی بالا می‌باشند تعیین می‌گردد. در برنامه‌های کاربردی GIS، مانند ArcInfo و ArcView، آبراهه‌های حوزه بر پایه مناطق بالادست هر سلول ترسیم شده است. در سلول‌هایی که بخشی از شبکه آبراهه نیستند جریان سطحی اتفاق می‌افتد. در GIS با یک مقدار آستانه سطح کوچک، شبکه آبراهه‌ای ایجاد می‌شود که خیلی باریک هستند و ممکن است آبراهه‌های متناوب و بی‌دوام را نشان دهد که برای ترسیم روی نقشه‌های



شکل ۵- مقایسه بین جریان اندازه‌گیری و شبیه‌سازی شده ساعتی برای دوره‌ای از سال ۸۸

Figure 5- Observed and predicted stream flow

هیدروگراف شبیه‌سازی شده در اسفندماه سال ۱۳۸۸ به عنوان منبع قرار گرفت. IUH محاسبه شده حوزه با روش روندیابی موج پخشی نیز برای نشان دادن گرافیکی تاثیر تغییر پارامترها ارائه گردیده است.

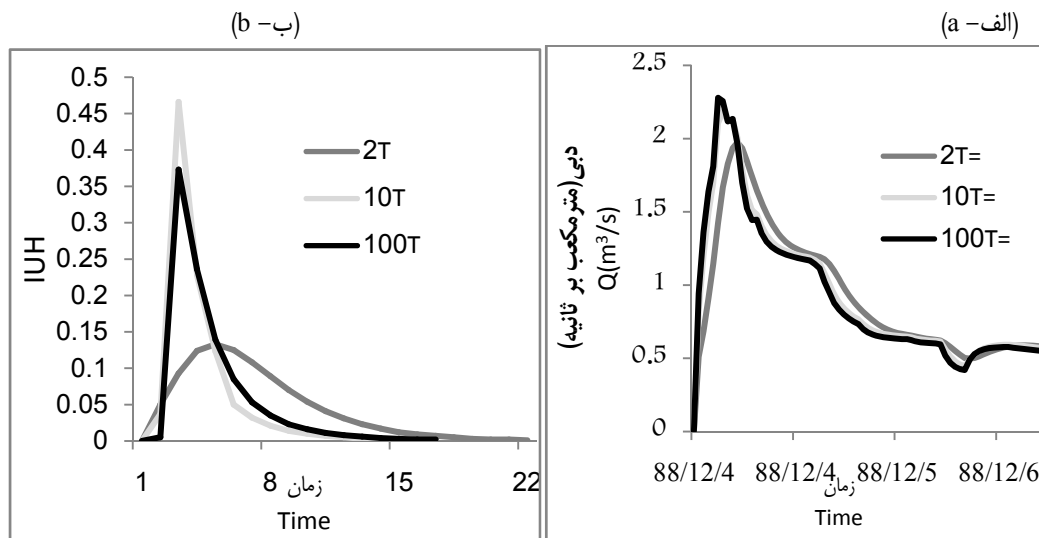
نتایج بررسی حساسیت پارامترهای موثر بر روندیابی

در این تحقیق تاثیر تغییر هر پارامتر، مورد مطالعه قرار گرفت در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شد. در همه موارد،

قابل توجه در مقدار پیک هیدروگراف شبیه‌سازی شده و IUH محاسبه شده حوزه شده است. زمانی که فراوانی سیل از ۰/۵ به ۰/۱ تغییر می‌یابد، مقدار دبی پیک از ۱/۹۷ به ۲/۱۸ متر مکعب بر ثانیه افزایش می‌یابد و زمانی که فراوانی سیل به ۰/۰۱ می‌رسد دبی پیک ۲/۲۷ متر مکعب بر ثانیه افزایش یافته است. میانگین، انحراف و چولگی زمان جریان با افزایش دوره بازگشت سیل کاهش می‌یابد، زیرا این پارامترها با سرعت موج رابطه معکوس دارند. با هر مقدار افزایش در شعاع هیدرولیکی، پاسخ موج سیل سریع‌تر خواهد بود.

نتایج تاثیر شعاع هیدرولیکی

برای مطالعه تاثیر تغییر فراوانی سیل بر روی هیدروگراف رواناب در خروجی حوزه و IUH حوزه از مقادیر ۰/۵، ۰/۱ و ۰/۰۱ استفاده شد. این فراوانی‌ها به ترتیب مطابق است با دوره بازگشت‌های ۲، ۱۰ و ۱۰۰ ساله. کاهش فراوانی سیل که به منزله افزایش بزرگی سیل می‌باشد منجر به افزایش شعاع هیدرولیکی می‌گردد و این موضوع در مدل از طریق ۳ دوره بازگشت در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل (۶) ملاحظه می‌شود تغییر در فراوانی سیل باعث یک تغییر



شکل ۶- (الف) هیدروگراف شبیه‌سازی شده، (ب) IHU محاسبه شده حوزه (تاثیر شعاع هیدرولیکی)

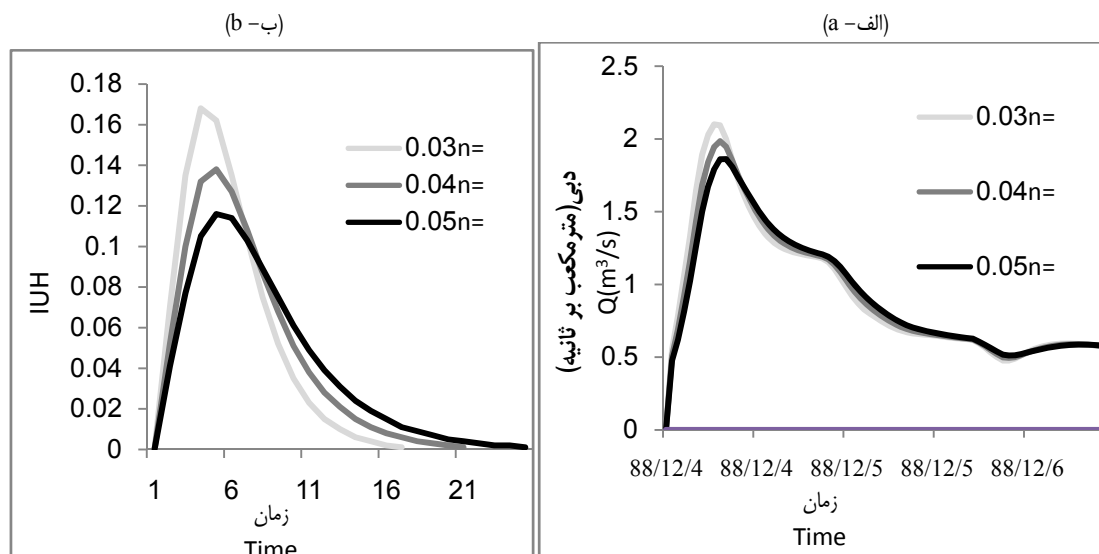
Figure 6 - (a) Simulated direct hydrographs (b) calculated watershed IUH (the effect of hydraulic radius)

نتایج تاثیر زبری کانال

در شکل ۷ هیدروگراف رواناب شبیه‌سازی شده و IUH محاسبه شده حوزه با سه مقدار متفاوت از ضریب زبری نشان داده شده است. مقدار ۰/۰۳ مطابق است با آبراهه‌های مستقیم بدون خمیدگی یا چاله‌های عمیق، ۰/۰۴ با آبراهه‌های مارپیچی با تعدادی چاله‌ها و نقاط کم عمق و ۰/۰۵ برای آبراهه‌های مارپیچی دارای سنگریزه (۷). همان‌طور که در شکل ملاحظه می‌شود دبی پیک از ۱/۸۶ متر مکعب بر ثانیه در $n = 0/05$ به ۲/۱۰ متر مکعب بر ثانیه در ضریب زبری ۰/۰۳ افزایش پیدا کرد. مقدار دبی پیک در $n = 0/04$ برابر است با ۱/۹۸ متر مکعب بر ثانیه است. به عبارت دیگر با افزایش ضریب زبری سرعت کاهش یافته و دبی پیک کم می‌شود. همچنین این موضوع در IUH محاسبه شده‌ی حوزه منعکس می‌شود که در شکل (ب) نشان داده شده است. میانگین، انحراف و چولگی زمان جریان با افزایش ضریب زبری افزایش می‌یابد، زیرا هرگونه افزایش در ضریب زبری، باعث تضعیف و آهسته شدن موج سیل می‌شود.

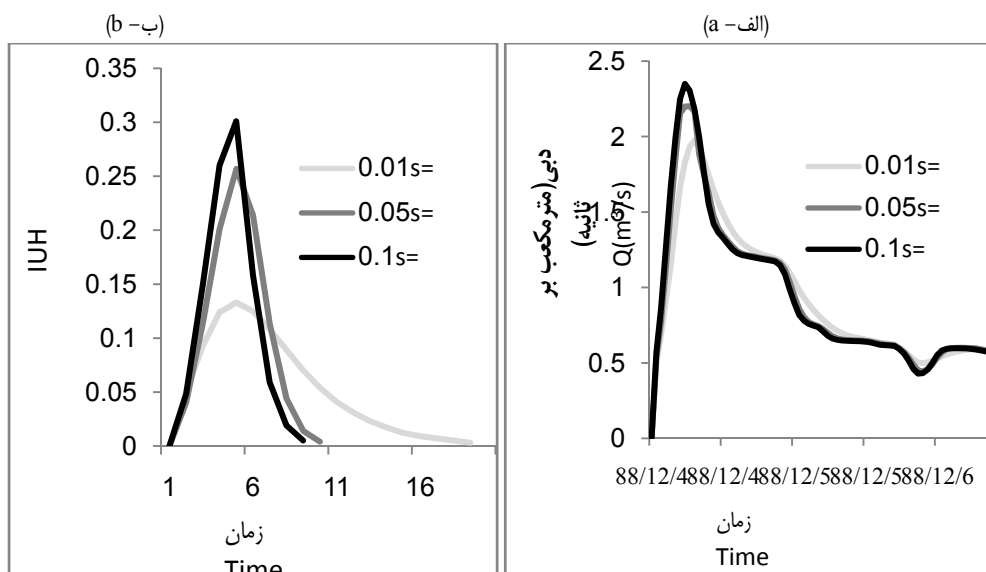
نتایج تاثیر شیب حداقل

با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها سه مقدار از شیب حداقل، یعنی ۰/۰۱، ۰/۰۵ و ۰/۱ برای مطالعه تاثیر مقدار آستانه بر روی هیدروگراف خروجی و IUH محاسبه شده حوزه در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود، دبی پیک IUH حوزه با آستانه کمتر برای شیب حداقل، کاهش می‌یابد. زیرا یک کاهش در شیب، سرعت موج سیل را کاهش خواهد داد بنابراین زمان جریان افزایش می‌یابد. اگر تعداد سلول‌های با شیب کمتر از آستانه در حوزه کم باشد، تاثیر شیب‌های حداقل بر روی دبی پیک خیلی قابل توجه نخواهد بود. در صورتی که اگر حوزه دارای شیب‌های هموارتری باشد شیب حداقل بر روی هیدروگراف خروجی تاثیر زیادی خواهد داشت.



شکل ۷- (الف) هیدروگراف شبیه‌سازی شده، (ب) IUH محاسبه شده حوزه (تاثیر ضریب زبری)

Figure 7- Simulated direct hydrographs (b) calculated watershed IUH (the effect of channel Manning's roughness coefficient)



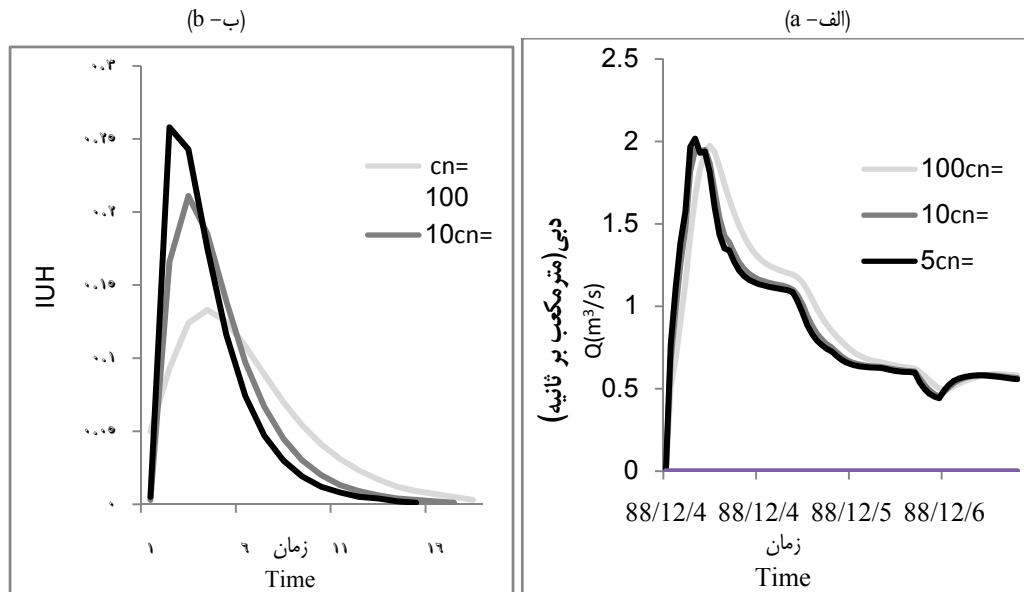
شکل ۸- (الف) هیدروگراف شبیه‌سازی شده، (ب) IUH محاسبه شده حوزه (تاثیر آستانه شیب حداقل)

Figure 8-(a) Simulated direct hydrographs (b) calculated watershed IUH (the effect of the threshold of minimum slope)

می‌دهد در حالی که سایر پارامترها ثابت نگه داشته شده است. در شکل ۱۲ ملاحظه می‌شود که این مقادیر تاثیر قابل توجهی روی دبی پیک نداشته است. این تاثیر زمانی قابل توجه خواهد بود که از مقادیر آستانه بزرگ‌تری استفاده گردد، زیرا در این مورد تاثیر دامنه‌ها بیشتر شده، و در نتیجه زمان جریان طولانی‌تر شده و پاسخ جریان در انتهای مسیر جریان به تاخیر خواهد افتاد.

نتایج تاثیر آستانه سطح برای ترسیم شبکه آبراهه

در این تحقیق تاثیر آستانه سطح برای ترسیم شبکه آبراهه روی هیدروگراف خروجی و IUH محاسبه شده حوزه با تغییر آستانه تعداد سلول‌ها با مقادیر ۵، ۱۰ و ۱۰۰ بررسی شده است. به این معنا که به ترتیب به ازای سطح زهکشی 90000 m^2 ، 9000 m^2 ، 4500 m^2 (برای این حوزه) یک آبراهه در این سطح، عمل زهکشی را انجام



شکل ۹ - (الف) هیدروگراف شبیه‌سازی شده، (ب) IUH محاسبه شده حوزه (تاثیر آستانه سطح برای ترسیم شبکه آبراهه)
 Figure 9- (a) Simulated direct hydrographs and (b) calculated watershed IUH (the effect of area threshold in delineating channel networks with cell number threshold)

آستانه شیب حداقل و آستانه سطح در ترسیم شبکه آبراهه بر روی هیدروگراف خروجی و IUH محاسبه شده‌ی حوزه انجام شد. بررسی حساسیت پارامترهای موثر بر روندیابی نشان داد که تاثیر تغییر فراوانی سیل و ضریب زبری نسبت به آستانه شیب حداقل و آستانه سطح بر روی هیدروگراف خروجی و هیدروگراف واحد حوزه بیشتر است. لیو و همکاران (۱۱)، مدل WetSpa را با داده‌های دبی و رواناب ساعتی مشاهده شده مورد آزمون قرار دادند. ایشان حساسیت پارامترهای موثر بر روندیابی را بررسی کرده و نتایج نشان داد که تاثیر تغییر فراوانی سیل و ضریب زبری نسبت به آستانه شیب حداقل و آستانه سطح بر روی هیدروگراف خروجی و هیدروگراف واحد حوزه بیشتر است که با نتایج این تحقیق همخوانی دارد. هر حال زمانی که مدل برای تمرین و اجرا بکار برده می‌شود، همه این پارامترها باید به‌طور صحیح انتخاب شوند. بطور کلی در این رویکرد بارش اضافی بطور مکانی توزیع می‌یابد و پارامترهای هیدرولوژیکی زمین به عنوان ورودی مدل استفاده می‌شوند، بویژه برای آنالیز تاثیر توپوگرافی و کاربری اراضی و پوشش خاک بر روی رفتار هیدرولوژیکی حوزه رودخانه مفید است. در این مقاله از مدل WetSpa که از موج پخش دیفیوژن برای روندیابی جریان استفاده می‌کند استفاده شده است. بهتر است در تحقیقات آینده از مدل‌های با روندیابی موج سینماتیک و موج دینامیک هم استفاده شود، با توجه به شیب زیاد رودخانه زیارت، شاید روش موج سینماتیک هم نتیجه مناسبی را ارائه کند. مدل‌های کاملاً دینامیک که رفتار جریان و نیروهای موثر بر آن را کاملاً در نظر می‌گیرند به پارامترهای بیشتر و دقیق‌تری نیاز دارند که هزینه بر است.

مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa ضمن قابلیت‌های متنوعی که دارد و اثبات پتانسیل این مدل در رابطه با شبیه‌سازی سیلاب و روندیابی در مطالعات صورت گرفته توسط لیو و همکاران (۱۲)، بهره‌مند (۲ و ۳)، کبیر و همکاران (۱۱) و یعقوبی (۱۸) می‌توان از نتایج مدل با عدم قطعیت پایین جهت تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و انتخاب سازه مناسب جهت کاهش بلایای طبیعی همچون سیل و حفظ منابع طبیعی استفاده کرد.

نتیجه‌گیری کلی

مدل WetSpa یک مدل فیزیکی و پیوسته است که فرایندهای بارش، رواناب و تبخیر و تعرق را برای عوارض زمینی ساده و پیچیده توصیف می‌کند. مدل در حوزه زیارت با داده‌های چهار ساله بارش ساعتی، دما و تبخیر و تعرق مشاهده شده تست شد. نتایج واسنجی مدل بر اساس معیار ناش- ساتکلیف حدود ۰/۷۰ برآورد گردید. شکل ۵ نشان می‌دهد، تطابق خوبی بین نتایج شبیه‌سازی و مشاهداتی در آبخیز زیارت وجود دارد. معیار نش - ساتکلیف کارایی بالای مدل را در شبیه‌سازی نشان می‌دهد. که با نتایج بهره‌مند و همکاران (۲)، کبیر و همکاران (۱۱) و یعقوبی (۱۸) و بیات (۶) که به شبیه‌سازی جریان با استفاده از مدل WetSpa پرداختند، همخوانی دارد. مدل هیدرولوژیکی توزیعی مکانی WetSpa روندیابی جریان را با استفاده از مدل انتقالی موج پخش انجام می‌دهد. این روش، محاسبه توابع پاسخ بین هر نقطه شروع و پایان را ممکن می‌سازد. همچنین بررسی حساسیت برای بررسی تاثیر شعاع هیدرولیکی، ضریب زبری آبراهه،

منابع

- 1-Azinmehr M., Bahremand A., and Kabir A. 2013. Analysis of flood flows using wave approximation (diffusion) in the spatial distribution of hydrologic model WetSpa. the International River Engineering Conference 9 shahid Chamran University, 22-24 jan 2013, Ahwaz, 1-9.
- 2-Bahremand A., Corluy J., Liu Y.B., and De Smedt F. 2006. Stream flow simulation by WetSpa model in Hornad river basin, Slovakia. In: J. van Beek, M. Taal (eds.), floods, from Defence to Management, Taylor and Francis group, London, 415-422.
- 3-Bahremand A. 2007. Simulation the effects of reforestation on floods using spatially distributed hydrologic modelling and GIS, Phd Thesis, Brussel Belgium: Vrij Universiteit, 1-150.
- 4-Bahremand A., and De Smedt F. 2010. Predictive analysis and simulation uncertainty of a distributed hydrological model, Water Resouce Management, 24: 2869-2880.
- 5-Bahremand A., Yaghubi F., and Kabir A. 2010. Introduce WetSpa Model Water and Energy Transfer between Soil, Plant and Atmosphere, the International Watershed Management Science and Engineering Conference 6 Tarbiat Modarres University, 1-8.
- 6-Bayat B. 2009. Simulated river flow and analysis Use change effects on river flow using WetSpa models in GIS environment, A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of M.Sc Remote sensing and GIS, Shahid Beheshti university, School of Geosciences, 1-142.
- 7-Chow V.T. (Ed). 1964. Handbook of Applied Hydrology, McGraw- Hill Book Company, New York, 7-25.
- 8-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, 295-304.
- 9-Eaguson P.S. 1970. Dynamic Hydrology, McGraw-Hill, New York, 1- 364.
- 10- Henderson F.M. 1966. Open Channel Flow, McMillan, New York, 1- 522.
- 11-Kabir A., Mahdavi M., Bahremand A., and Noora N. 2010. Application of the distributed hydrological WetSpa model for runoff simulation in Gorganrood river basin, Iran, the International Watershed Management Science and Engineering Conference 6 Tarbiat Modarres University, 1-8.
- 12-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 modelling, Journal of Hydrology, 91-106.
- 13-Miller W.A., and Cunge J.A. 1975. Simplified equation of unsteady flow, eds, K. Mamood & V. Yevjevich, Unsteady flow in open channels, Water Resources Publications, Fort Collins, CO.
- 14-Molnar P., and Ramirez J.A. 1998. Energy dissipation theories and optimal channel characteristics of river networks, Water Resour, Research, 34:1809-1818.
- 15-Shafii M., and De Smedt F. 2009. Multi-objective calibration of a distributed hydrological model (WetSpa) using a Genetic Algoritm. Hydrol, Earth Syst, 13: 2137-2149.
- 16- Olivera F., and Maidment D. 1999. Geographical information system (GIS)-based spatially distributed model for runoff routing, Water Resources Research, 35: 1155-1164.
- 17-Wang Z., Batelaan O., and De Smedt F. 1997. A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa), Physics and Chemistry of the Earth, 21: 189-193.
- 18-Yaghubi F. 2010. Simulated river flow using WetSpa models ,Case study Chehe Chai watershed in Golestan Province, Journal of Soil and Water Conservation, Gorgan university of agricultural sciences and natural resources, 3:185-207.

Sensitivity Test of Parameters Influencing Flood Hydrograph Routing with a Diffusion-Wave Distributed using Distributed Hydrological Model, Wet Spa, in Ziarat Watershed

N. Javidan^{1*}- A. Bahremand²

Received: 21-10-2014

Accepted: 23-06-2015

Introduction: Flood routing is a procedure to calculate flood stage and water depth along a river or to estimate flood hydrograph at river downstream or at reservoir outlets using the upstream hydrography. In river basins, excess rainfall is routed to the basin outlet using flow routing techniques to generate flow hydrograph.

A GIS-based distributed hydrological model, Wet Spa, has been under development suitable for flood prediction and watershed management on a catchment scale. The model predicts outflow hydrographs at the basin outlet or at any converging point in the watershed, and it does so in a user-specified time step. The model is physically based, spatially distributed and time-continuous, and simulates hydrological processes of precipitation, snowmelt, interception, depression, surface runoff, infiltration, evapotranspiration, percolation, interflow, groundwater flow, etc. continuously both in time and space, for which the water and energy balance are maintained on each raster cell. Surface runoff is produced using a modified coefficient method based on the cellular characteristics of slope, land use, and soil type, and allowed to vary with soil moisture, rainfall intensity and storm duration. Interflow is computed based on the Darcy's law and the kinematic approximation as a function of the effective hydraulic conductivity and the hydraulic gradient, while groundwater flow is estimated with a linear reservoir method on a small subcatchment scale as a function of groundwater storage and a recession coefficient. Special emphasis is given to the overland flow and channel flow routing using the method of linear diffusive wave approximation, which is capable to predict flow discharge at any converging point downstream by a unit response function. The model accounts for spatially distributed hydrological and geophysical characteristics of the catchment.

Determination of the river flow hydrograph is a main target in hydrology. Hydrological modeling deals with calculation of watershed hydrograph using hydro-meteorological information and terrain data, and processes of transforming rainfall into a flood hydrograph and the translation of hydrographs throughout a watershed. Flow routing subjects hydrography transformation and translation throughout a river basin. The Wet Spa model used in this study is a simple grid-based distributed runoff and water balance simulation model that runs on an hourly time step. It predicts hourly overland flow occurring at any point in a watershed, hydrography at the outlet, and provides spatially distributed hydrologic characteristics in the basin, in which all hydrologic processes are simulated within a GIS framework (Bahremand, 2007). The Wet Spa model was originally developed by Wang et al. (1997) and adapted for flood prediction by De Smedt et al. (2000) and Liu et al. (2003).

Materials and Methods: The outlet is accomplished using the first passage time response function based on the mean and variance of the flow time distribution, which is derived from the advection-dispersion transport equation. The flow velocity is location dependent and calculated in each cell by the Manning equation based on the local slope, roughness coefficient and hydraulic radius. The hydraulic radius is determined according to the geophysical properties of the catchment and the flood frequency. The total direct runoff at the basin outlet is obtained by superimposing all contributions from every grid cell.

The routing of overland flow and channel flow is implemented by the method of the diffusive wave approximation. This method has been used in some recent GIS-based flood models (Fortin et al., 2001; Olivera and Maidment, 1999). Liu et al 2003 has presented the flow routing method of the WetSpa model in detail. A two-parameter response function, based on the average flow time and the standard deviation of the flow time, is proposed in this study. The flow time and its variance are determined by the local slope, surface roughness and the hydraulic radius for each grid cell. The flow path response function at the outlet of the catchment or any other downstream convergence point is calculated by convoluting the responses of all cells located within the drainage area in the form of the probability density function (PDF) of the first passage time distribution. This

1, 2- Ph.D Student and Associate Professor of Watershed Management, Sary University of Agricultural Sciences and Natural Resources

(*- Corresponding Author Email: Narges.javidan20@gmail.com)

routing response serves as an instantaneous unit hydrograph and the total discharge is obtained by a convolution integral of the flow response from all generated spatially distributed runoff.

Starting from the continuity equation and the St. Venant momentum equation, assuming the one-dimensional unsteady flow, and neglecting the inertial terms and the lateral inflow to the flow element, the flow process can be modeled by the diffusive wave equation (Cunge et al., 1980)

In this study, flood routing is done as the main part of flow simulation of the distributed hydrological Wet Spa model in the Ziarat watershed. In order to execute the model, hourly hydrometeorological data for a period of four years (2007-2010) including rainfall, evapotranspiration, temperature, and discharge are used as inputs. Additionally, three main maps of the digital elevation model, soil map (texture), and land use are also applied and converted to digital formats. The result of the simulation shows a good agreement between the simulated hydrography and the observed one. The routing of overland flow and channel flow is implemented by the method of the diffusive wave approximation.

Results and Discussion: The Wet Spa model has been applied in several studies, e.g. the Barebeek catchment in Belgium, the Alzette river basin in Luxembourg, the Hornad watershed in Slovakia, In this study, flood routing is done as the main part of flow simulation of the distributed hydrological WetSpa model in the Ziarat watershed. In order to execute the model, hourly hydrometeorological data for a period of four years (2007-2010) including rainfall, evapotranspiration, temperature, and discharge are used as inputs. Additionally, three main maps of the digital elevation model, soil map (texture), and land use are also applied and converted to digital formats. The result of the simulation shows a good agreement between the simulated hydrography and the observed one. The routing of overland flow and channel flow is implemented by the method of the diffusive wave approximation. A sensitivity test shows that the parameter of flood frequency and the channel roughness coefficient have a large influence on the outflow hydrography and the calculated watershed unit hydrograph, while the threshold of minimum slope and the threshold of drainage area in delineating channel networks have a marginal effect.

Keywords : Flood routing, Hydrometeorological data, Hydrograph simulation, Threshold of minimum slope, Unit hydrograph