

## توسعه و کاربرد شبه توزیعی GFHM در شبیه‌سازی آبنمای سیلاب، مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز جعفر آباد، استان گلستان

مجتبی محمدی<sup>1\*</sup>، واحد بردی شیخ<sup>2</sup>، امیر سعدالدین<sup>3</sup>  
تاریخ دریافت: 1391/6/12 تاریخ پذیرش: 1391/9/10

### چکیده

شبیه‌سازی آشناسی یک ابزار اصلی برای پیش‌بینی وقایع سیلابی و عکس‌العمل آشناسی حوضه‌های آبخیز برای سناریوهای مختلف مدیریتی می‌باشد. در این مطالعه شبه GFHM (GIS-based Flood Hydrograph Modeling) برای شبیه‌سازی آبنمای سیل حوضه‌ی جعفرآباد با استفاده از زبان شبیه‌سازی محیط زیستی PCRaster تهیه و توسعه داده شد. شبه GFHM یک شبه آشناسی توزیعی مکانی و زمانی می‌باشد. نقشه‌های DEM، کاربری اراضی، نوع خاک، همچنین آمار بارش حوضه‌ی آبخیز، داده‌های اصلی مورد نیاز شبیه می‌باشند. این شبیه قابلیت شبیه‌سازی آبنمای‌های سیلاب را با گامهای زمانی در حد ثانیه و دقیقه داشته، و با توجه به هدف محقق قابل تنظیم می‌باشد. برای توسعه‌ی این شبیه، ابتدا شبیه مفهومی، روشها و روابط مورد استفاده جهت شبیه‌سازی فرایندهای آشناسی، فرضیات و محدودیتهای روابط مورد استفاده تدوین گردیدند. این شبیه جهت محاسبه‌ی بارش مازاد از روش شماره‌ی منحنی سازمان حفاظت منابع ملی، و جهت روندیابی از روش موج جنبشی بهره برد. جهت انجام واسنجی از روش واسنجی دستی استفاده گردید، و دو فراسنج شماره‌ی منحنی و ضریب مانینگ واسنجی شدند. از روش یک "فراسنج در هر بار"<sup>4</sup> که یکی از ساده‌ترین و متعارف‌ترین روشهای تحلیل حساسیت می‌باشد جهت بررسی تحلیل حساسیت فراسنجهای استفاده گردید. به منظور ارزیابی کارایی شبیه در دو مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی از شاخصهای ارزیابی متعددی بهره‌وری شد. برای دوره‌ی واسنجی متوسط ضریب ناش - ساتکلیف 0/718، و برای دوره‌ی اعتبارسنجی 0/777 به‌دست آمد. اختلاف مرحله‌ی زمانی میان آبنمای‌های شبیه‌سازی شده و آبنمای‌های مشاهداتی دلیل اصلی پایین بودن نسبی شاخصهای ارزیابی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آشناسی، شبیه‌سازی، GFHM، PCRaster، حوضه‌ی جعفرآباد

<sup>1</sup> - دانشجوی کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

<sup>2</sup> - استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

<sup>3</sup> - استادیار دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

\* - نویسنده مسئول: [Mohamadi613@gmail.com](mailto:Mohamadi613@gmail.com)

<sup>4</sup> - OAT: one factor-at-a-time

## مقدمه

امروزه افزایش و رشد شمار سیلابها در مناطق مسکونی، و بویژه آبخیزهای شهری قابل مشاهده می باشد، و انتظار می رود که در آینده افزایش یابد (آماگوچی و همکاران، 2012)، که یکی از دلایل اصلی آن رشد گروه شهرسازی در بیشتر مناطق جهان است، بطوری که از سال 2010 بیش از نیمی از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می کنند (سازمان ملل، 2010)، که معمولا رشد شهرسازی با ظرفیت نهرهای زهکشی همخوانی ندارد. یکی دیگر از دلایل آن، افزایش فراوانی بارشهای شدید در نتیجه تغییرات اقلیمی می باشد (IPCC, 2007؛ توماس و همکاران، 2011). استفاده از روشهای سازه ای و غیر سازه ایی یکی از راهبردهای مهم جهت مدیریت سیلابهاست که در بیشتر کشورها در حال انجام می باشد (آندجلکوچ، 2001؛ جنووز، 2006). این در حالی است که پیش بینی سیلابها و فرایند آنها کمتر پایش و مطالعه شده اند، مطالعات صورت گرفته نیز بیشتر در آبخیزهای کوچک دارای ایستگاههای آسنجی بوده اند. بهر حال ایستگاههای آسنجی نیز هنگام وقوع سیلابها تخریب شده و یا آسیب می پذیرند، که در نتیجه آن، داده های اندازه گیری شده ناقص و رضایت بخش نیستند؛ بنابراین، سیلابها در بیشتر موارد بطور ضعیف ثبت می شوند؛ لذا، جهت مطالعه رفتار آنها می بایست از داغاب سیلابهای گذشته، و یا از شبیه سازی بارش-رواناب استفاده کرد (کارتس و همکاران، 2012).

شبیه های آشناسی ارائه ی ساده یک سامانه ی آشناسی می باشد که برای شبیه سازی جریان های سطحی یا زیرزمینی، و مدیریت و مهار کردن منابع آب به کار می رود. علاوه بر آن، شبیه های آشناسی درک و دانش ما را نسبت به جریان آب در طبیعت افزایش می دهند (رید و همکاران، 2007).

شبیه های آبخیز را برای اهداف مختلف می توان در دو طبقه ی یکپارچه و توزیعی طبقه بندی کرد (سینگ، 1995). در شبیه های یکپارچه، همچون HEC-1 (HEC, 1998)، Tank (ســوگوارا، 1974) و SSARR (اسپیرز، 1995)، AWBM (بوگتون و چو، 2007)، بعضی فرایندها به وسیله ی قانون های آبی ساده شده، و بقیه آنها به وسیله ی معادلات جبری تجربی بیان

می شوند (آماگوچی و همکاران، 2012). شبیه های یکپارچه به داده های ورودی کمی نیاز دارند، اما با این نوع شبیه ها نمی توان تغییرات مکانی را مورد بررسی قرار داد. در مقابل این شبیه ها، شبیه های توزیعی قرار دارند که حوضه را به تعداد زیادی سلول های مربعی تقسیم می کنند (بون، 2001)، از آن جمله می توان به شبیه هایی همچون شبیه SHE (آبوت و همکاران، 1986)، Topmodel (بون و کیرک بی، 1979)، Japanese ones (تاکاسو و همکاران، 1989؛ لو و همکاران، 1989)، Wetspa (لویی و د اسمیت، 2004)، BEACH (شیخ، 2009) و HEC-HMS (اسچارفبرگر و فلمینگ، 2010) اشاره نمود. شبیه های توزیعی مقادیر صریحی از تغییرات مکانی فرایندها، ورودیها، شرایط مرزی و ویژگیهای آبخیز را نشان می دهند. شبیه های توزیعی در صورتی که بطور مناسب فراسنجی شوند، توانایی شبیه سازی واقع گرایانه تر، و پیش بینی پاسخ آشناسی نسبت به تغییرات اقلیم و کاربری اراضی را دارند (کارتس و همکاران، 2012).

شبیه سازی فیزیکی، توزیعی-فضایی آشناسی در مقیاس کل حوضه نیازمند داده های ورودی زیادی می باشد؛ بنابراین، سامانه ی اطلاعات جغرافیایی (GIS) محیط بسیار مفیدی برای شبیه سازی می باشد، زیرا ذخیره، نمایش، حفظ و مدیریت داده ها را تسهیل می بخشد (دی رو و همکاران، 1996؛ بورگ، 1996).

سه رویکرد پیوند ضعیف (loose coupling)، پیوند قوی (tight coupling) و پیوند بطنی (embedded coupling) برای شبیه سازی در محیط GIS وجود دارند (وسلینگ و همکاران، 1996؛ بهره مند، 2006). در اتصال ضعیف، GIS در پیش پردازش داده های فضایی ورودی برای شبیه مورد نظر استفاده می شود، همانند شبیه های استفاده شده به وسیله ی دی رو و همکاران، 1989 و کایت و همکاران، 1996). در رویکرد اتصال قوی، یک پیوند قوی بین شبیه ها و GIS برقرار است، بطوری که ورودیها و خروجیهای شبیه می توانند مستقیما به وسیله ی GIS هدایت شوند. از این نوع شبیه ها می توان به SWAT اشاره نمود (آرنولد و همکاران، 1998)، که اکنون بطور گسترده در سرتاسر جهان مورد استفاده قرار می گیرد. باید توجه داشت که

همکاران، 2009) و PCR-XAJ (ژو و همکاران، 2011) اشاره نمود.

نظر به این آبنمای سیل نتیجه‌ی پاسخ آشناسی حوضه‌ی آبخیز به تغییرات شرایط حوضه و متغیرهای عکس العمل آن می‌باشد، بنابراین، در مطالعه‌ی حاضر سعی گردید تا شبیه‌ی را برای حوضه‌ی آبخیز جعفرآباد در محیط GIS با استفاده از زبان برنامه‌نویسی PCRaster تهیه گردد، تا بتوان از آن در شبیه‌سازی آبنمای سیل، پیش بینی و مدیریت جامع آبخیز مزبور استفاده کرد.

### مواد و روشها

#### موقعیت حوضه‌ی مورد مطالعه

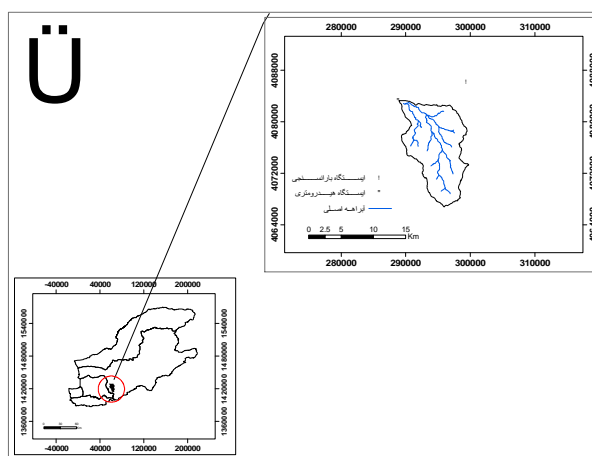
حوضه‌ی آبخیز جعفرآباد از زیرحوضه‌های گرگانرود با مساحتی حدود 110 کیلومتر مربع، و رودخانه‌ای به طول 21 کیلومتر، در 25 کیلومتری جنوب شرق گرگان و در محدوده‌ی جغرافیایی  $37^{\circ} 48'$  تا  $45^{\circ} 48'$  طول شرقی و  $36^{\circ} 43'$  تا  $36^{\circ} 52'$  عرض شمالی در استان گلستان واقع شده است. میانگین دمای سالانه 15/45 درجه‌ی سانتی گراد، متوسط بارش سالانه 566 میلی متر، و ارتفاع مبه وسیله‌ی منطقه 1300 متر است. بخش قابل توجهی از حوضه‌ی را مناطق کوهستانی پوشیده از جنگل با شیب زیاد تشکیل داده خاک منطقه مربوط به گروه‌های آشناسی B و C بوده، و زمین شناسی بیشتر مربوط به سازندهای خوش ییلاق، جیروود و خاک بادآورده است. در این پژوهش از آمار بده‌ی ساعتی ایستگاههای آبنجی تقی‌آباد در خروجی آبخیز، و آمار 15 دقیقه‌ای بارش ایستگاه بارانسنجی فاضل‌آباد در نزدیکی مرکز ثقل آبخیز، استفاده شده است. رود اصلی آن پس از تجمع انشعابات فرعی از روستای تقی‌آباد گذشته، و با پیوستن به گرگانرود به دریای خزر می‌ریزد. شکل (1) موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

هر دو روش پیوند ضعیف و قوی محدودیت ذاتی جهت شبیه‌سازی دارند (کریمی و هوستون، 1997)؛ لذا، رویکرد سومی به نام پیوند بطنی توسعه یافته است. در پیوند بطنی، شبیه در یک سامانه برنامه‌نویسی مجتمع برنامه‌نویسی و اجرا می‌گردد. مزیت رویکرد سوم در آن است که کاربر می‌تواند شبیه شخصی مورد نظر خود را طراحی، اجرا و تغییرات آتی را اعمال کند (وسلینگ و همکاران، 1996).

در شبیه‌سازهای زیست محیطی استفاده از زبانهای برنامه‌نویسی سطح بالا به‌وسیله‌ی محققین و همانندسازان بدون داشتن دانش برنامه‌نویسی تخصصی ترجیح داده می‌شود (وان درسون و همکاران، 2000؛ کارسنبرگ، 2002؛ کارسنبرگ و همکاران، 2010). بایتارت و همکاران (2008) پیشنهاد دادند که شاخصهای یک شبیه می‌بایست قابل دسترس، پیمانه‌ای و قابل حمل باشد. تلفیق این ویژگیها شرایطی را به وجود خواهند آورد تا امکان ایجاد شبیه شخصی جهت آزمایش فرضیات مختلف وضعیت جریان و پاسخ به سوالهای مختلف، و درنهایت تهیه‌ی شبیه مناسب منطقه‌ای را فراهم کند (کرفت و همکاران، 2011).

در راستای حل این نیاز، زبان برنامه‌نویسی شبیه‌سازی زیست محیطی PCRaster طراحی و تدوین گردیده است. PCRaster یک محیط GIS و شبیه‌سازی پویا عمومی است، که برخلاف سایر محیطهای GIS، مثل ArcView و ArcGIS که محیط پایا می‌باشند، قابلیت پویا محیط آن امکان ساخت شبیه‌های پویا زیست محیطی توزیعی پیوسته را فراهم می‌کند (شیخ و همکاران، 2009).

از این نوع شبیه‌ها، که در زبان برنامه‌نویسی شبیه‌سازی زیست محیطی PCRaster طراحی و تدوین گردیده‌اند، می‌توان به RHINEFLOW1 (ون دیک، 2000)، LISEM (دی رو و همکاران، 1996)، LISFLOOD (دی رو و همکاران، 2006)، EUROSEM (مورگان، 1996)، BEACH (شیخ و



شکل ۱- موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه.

روندیابی انتقال مواد (آب و رسوب) در داخل حوضه‌ی آبخیز است. علاوه بر این همانند دیگر سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی، توابع جبری<sup>5</sup> نیز به‌سادگی بر روی نقشه‌ها قابل اعمالند (PCRaster team, 2011).

ساختار سامانه PCRaster اجازه‌ی اعمال توابع شبیه‌سازی زیست محیطی را با توابع سنتی GIS فراهم می‌نماید (ژو و همکاران، 2011). شبیه‌سازی نقشه‌کشی و پویا با زبان برنامه نویسی سطح بالا این امکان را فراهم می‌کند که هم برای عملیات GIS، و هم توابع شبیه‌سازی از یک زبان برنامه نویسی واحد استفاده کرد.

### محاسبه‌ی رواناب مستقیم در طول رگبار

برای به‌دست آوردن رواناب در طول رگبار می‌بایست از رویکردهای نفوذ استفاده کرد. معادله‌ی رواناب شماره‌ی منحنی یک معادله‌ی نفوذ نمی‌باشد (اسمیت، 1976؛ چن، 1982؛ و هیمفلت، 1980)، اما می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (1) به عنوان جانشین معادلات نفوذ استفاده کرد (NRCS, 2004):

$$Q = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (1)$$

که در آن Q رواناب مستقیم تجمعی، P بارش تجمعی، S بیشترین توان نگهداری مربوط به برگاب و نفوذ در خاک و ذخیره‌ی سطحی مقدار S، به‌وسیله‌ی رابطه

### سامانه همانندسازی PCRaster

بسته‌ی نرم‌افزاری شبیه‌سازی زیست محیطی PCRaster یک زبان شبیه‌سازی زیست محیطی برای ساختن شبیه‌های زیست محیطی فضایی پویا بویژه شبیه‌های آشناسی می‌باشد (وان درسون، 1995؛ وسلینگ و همکاران، 1996). این بسته‌ی نرم‌افزاری، که تلفیقی از یک سامانه اطلاعات جغرافیایی و یک زبان برنامه نویسی سطح بالاست به‌وسیله‌ی عده‌ای از محققین دانشگاه یوترخت<sup>1</sup> توسعه داده شده است، شامل مجموعه‌ای از ابزارهای رایانه‌ای جهت ذخیره، مدیریت، تجزیه و تحلیل و بازیابی اطلاعات جغرافیایی است که امکان شبیه‌سازی نقشه‌کشی و پویا عرصه‌های طبیعی را برای محققان و کارشناسان رشته‌های علوم محیطی که بیشتر آنها تخصص برنامه نویسی را کامپیوتری ندارند، فراهم می‌نماید (کارسنبرگ، 1996).

در حالی سایر محیطهای GIS پرکاربرد مثل ArcGIS و ArcView پایا می‌باشند، قابلیت پویا محیطی PCRaster امکان ساختن شبیه‌های پویا زیست محیطی توزیعی پیوسته<sup>2</sup> را فراهم می‌کند. این نرم‌افزار یک بسته غنی از توابع زمین ریخت شناسی و آشناسی است که آنرا از دیگر سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی متمایز می‌کند. این توابع شامل تحلیل قابلیت دید<sup>3</sup>، تحلیل حوضه‌ی آبخیز<sup>4</sup>، و

1 - Utrecht

2 - Iterative spatio-temporal environmental models

3 - visibility analysis

4 - watershed analysis

5 - algebraic functions

$$\frac{dQ}{dX} + \frac{dA}{dt} = q \quad (5)$$

که در آن  $Q$ ، جریان (مترمکعب بر ثانیه)؛  $X$ ، فاصله در جهت جریان؛  $A$ ، سطح مقطع عرضی (مترمربع)؛  $t$ ، زمان (ثانیه)؛  $q$ ، جریان عرضی ورودی (مترمکعب بر ثانیه بر متر).

### معادله اندازه‌ی حرکت

$$S_o = S_f \quad (6)$$

که در آن  $S_o$ ، نیروی گرانش؛  $S_f$ ، نیروی جاذبه معادله اندازه‌ی حرکت را می‌توان به صورت رابطه‌ی (7) بیان داشت:

$$A = aQ^b \quad (7)$$

با ترکیب معادله‌ی (7) و معادله مانینگ نوشته شده با  $R=A/P$  و  $S_o=S_f$  (8) به دست می‌آید:

$$A = \left( \frac{nP^{2/3}}{\sqrt{S_o}} \right) \quad (8)$$

که در آن  $P$ ، محیط خیس شده (متر) است. و در این مورد:

$$a = \left[ \frac{nP^{2/3}}{\sqrt{S_o}} \right]^{0.6} \quad (9)$$

$$b = 0.6 \quad (10)$$

متغیرهای  $q$ ،  $\alpha$  و  $\beta$  ورودیه‌های عملگر "Kinematic" در PCRaster می‌باشند.

### ضریب منینگ

فراسنج زبری یکی از مهمترین فراسنجهای آبراهه‌ها، رودخانه‌ها، سواحل و دامنه‌ها می‌باشد (دانکر و همکاران، 2009)، که در آشناسی تحت عنوان ضریب منینگ نیز استفاده می‌شود. ضریب منینگ را عموماً در دو قسمت ضریب منینگ در دامنه و آبراهه مورد بررسی قرار می‌دهند. معمولاً، جهت محاسبه‌ی ضریب منینگ دامنه از ویژگی‌های پوشش گیاهی و کاربری اراضی استفاده می‌شود، که در نشریات مختلف به‌وسیله‌ی محققین مختلف انتشار یافته است. در این مطالعه از جدول (1) که به‌وسیله‌ی لال (1964)، زینکی (1967)، رو (1983) و لویی و داسمت (2004) در نشریات گزارش شده است استفاده گردید. در رودخانه‌های طبیعی، معمولاً ضریب

(2)، با یک عامل بدون بعد با نام شماره منحنی (CN) به دست می‌آید.

$$s = \frac{2540}{CN} - 2.54 \quad (2)$$

مقدار CN بین صفر تا 100 متغییر است. در CN برابر با صفر روانابی از بارندگی حاصل نیامده، و در CN برابر با 100، تمامی بارش در سطح زمین جریان یافته و ارتفاع رواناب برابر با ارتفاع بارندگی خواهد بود.

### روندیابی در PCRaster

در این مطالعه، جهت روندیابی رواناب از عملگر موج جنبشی با عنوان Kinematic استفاده گردید. رابطه‌ی این عملگر در PCRaster به صورت رابطه‌ی (3) می‌باشد.

$Q_i = \text{Kinematic}(Ldd, Q_{i-1}, q, a, b, T, DCL)$   
Ldd، نقشه‌ی Ldd می‌باشد که از روی نقشه Dem، و با استفاده از عملگر Ldd در PCRaster تهیه می‌گردد.

$Q_{i-1}$ ، نقشه بدهی در گام زمانی قبلی می‌باشد (مترمکعب بر ثانیه)؛  $Q_{in}$ ، نقشه با افزایش یا کاهش آب از آبه جریان؛  $\alpha$ ، نقشه‌ی ضریب؛  $\beta$ ، نقشه‌ی ضریب (ضریب اندازه حرکت، برابر با 0/6)؛  $T$ ، گام زمانی (روز، ثانیه)؛  $DCL$ ، نقشه مسافت جریان به پایین دست در جهت نقشه Ldd؛  $Q_i$ ، نقشه بدهی جریان در گام زمانی موج جنبشی روندیابی رواناب را در راستای جهت جریان با معادله‌ی منینگ انجام می‌دهد.

معادله منینگ به صورت رابطه‌ی (4) می‌باشد (چو، 1959):

$$V = \frac{R^{2/3} S^{1/2}}{n} \quad (4)$$

که در آن  $R$ ، شعاع آبی (متر)؛  $S$ ، شیب (متر/متر)؛  $n$ ، ضریب مانیتگ؛  $V$ ، سرعت جریان (متر بر ثانیه).

شبهه موج جنبشی به وسیله‌ی دو معادله‌ی پیوستگی و اندازه‌ی حرکت تعریف شده است. واحدهای موجود همان واحدهای استفاده شده در عملگر Kinematic در PCRaster می‌باشند.

### معادله‌ی پیوستگی

## پیاده سازی شبیه GFHM در سامانه‌ی همانندسازی PCRaster

**شبیه** (GIS-based Flood Hydrograph Modelling) GFHM جهت شبیه سازی آبنمای سیلاب حوضه‌ی جعفرآباد با استفاده از زبان شبیه سازی محیط زیستی Pcraster تهیه و توسعه داده شد. شبیه GFHM یک شبیه آشناسی توزیعی مکانی و زمانی می باشد که بر اساس نقشه های DEM، کاربری اراضی، نوع خاک و همچنین، داده های بارش حوضه ی آبخیز جعفر آباد توسعه داده شده است. این شبیه قابلیت شبیه سازی آبنمای های سیلاب را با گامهای زمانی در حد ثانیه و دقیقه داشته، و با توجه به هدف محقق قابل تنظیم می باشد. پس از تعیین شبیه مفهومی، و همچنین روشها و روابط مورد استفاده جهت شبیه سازی فرایندهای آشناسی، فرضیات و محدودیتهای شبیه تعیین گردید.

### شبیه مفهومی GFHM

نخستین گام در ساخت هر شبیه آشناسی تهیهی شبیه مفهومی می باشد که بر پایه ی آن فرایندهای آشناسی مورد نظر شاخص نویسی می شوند. در این مطالعه نیز با توجه به هدف مورد مطالعه، داده، اطلاعات و محدودیتهای موجود، شبیه مفهومی GFHM به صورت زیر تهیه گردیدند (شکل 2).

میننگ در آبراهه های رتبه ی بالاتر کمتر از مقدار آبراهه های رتبه ی پایینتر می باشد (لویی و داسمیت، 2004). با توجه به این مورد، یک رابطه ی خطی بین ضریب زبری میننگ و رتبه ی آبراهه ها در شبیه ها به صورت رابطه ی (11) فرض می شود (لویی و داسمت، 2004):

$$n_r = n_{r,max} - \left( \frac{O - O_{min}}{O_{max} - O_{min}} \right) (n_{r,max} - n_{r,min})$$

که در آن  $n_r$  ضریب میننگ ( $m^{-1/3}s$ ) برای آبراهه با رتبه ی  $O$ ،  $O_{min}$  و  $O_{max}$  آبراهه با رتبه بیشترین و کمترین،  $n_{r,max}$  و  $n_{r,min}$  بیشترین و کمترین مقدار ضریب میننگ در ارتباط با  $O_{min}$  و  $O_{max}$  ( $m^{-1/3}s$ ) می باشند.

در این رابطه، بیشترین مقدار ضریب میننگ در آبراهه متعلق به آبراهه ی با رتبه ی حداقل، و کمترین مقدار متعلق به آبراهه ی با رتبه ی حداکثر می باشد. مقدار  $n_{r,max}$  و  $n_{r,min}$  را می توان بر اساس ویژگیهای آبراهه، و از منابع مختلف به دست آورد. در این مطالعه مقدار 0/065 برای آبراهه با رتبه ی حداقل و 0/0245 برای آبراهه با رتبه ی حداکثر بر اساس جداول (چو، 1959) و تصاویر (کوان، 1956) به دست آمد.

### جدول 1- مقادیر فراسنج ضریب میننگ دامنه بر اساس کاربری اراضی.

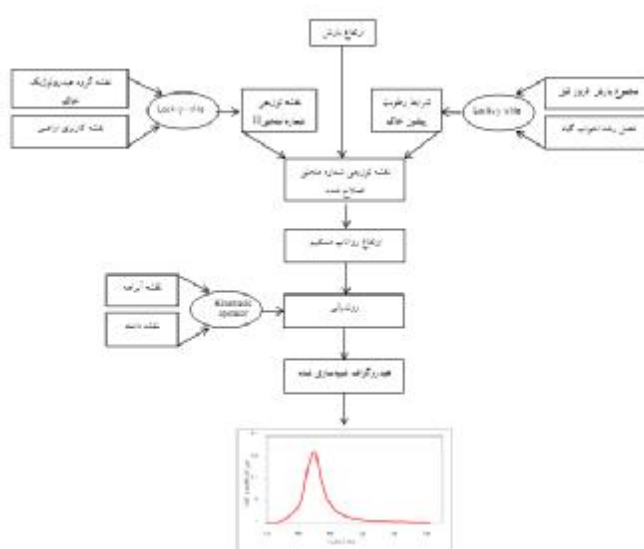
ضریب میننگ ( $m^{-1/3}s$ )	کاربری اراضی
0/4	اراضی مرتعی خزان کننده
0/8	اراضی جنگلی خزان کننده
0/15	زراعت دیم
0/2	زراعت آبی

1- بارش در سطح کل حوضه به صورت یکنواخت و برابر با مقدار اندازه گیری شده در ایستگاه بارانسجی در نزدیکی خروجی آبخیز فرض گردید. البته در صورت وجود چندین ایستگاه در داخل حوضه، کاربر می تواند نقشه توزیع مکانی بارندگی را با استفاده از عملگر Spreadzone تهیه و در شبیه مورد استفاده قرار دهد. حتی در صورت تهیهی نقشه توزیعی بارندگی،

### فرضیات شبیه GFHM

پس از تعیین شبیه مفهومی، و همچنین روشها و روابط مورد استفاده جهت شبیه سازی فرایندهای آشناسی، می بایست فرضیات شبیه تعیین گردد. با توجه به روشها و روابط استفاده شده، فرضیات شبیه GFHM به صورت زیر می باشند:

مقدار بارندگی برای هر سلول به صورت همگن فرض می‌شود.



شکل 2- چهارچوب شبیه مفهومی شبیه GFHM

شبیه‌سازی آبخش‌شناسی تلاش می‌کند تا با استفاده از ویژگی‌های فیزیکی به عنوان داده‌های ورودی، با استفاده از مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها، تبدیل داده‌های ورودی به خروجی‌های مناسب، و فرضیات ساده‌سازی مورد نظر، فرایندهای واقعی آبخش‌شناسی را شبیه‌سازی کند. محدودیت‌های شبیه می‌بایست در طول اجرای شبیه و تفسیر خروجی‌ها مد نظر قرار گیرند. موارد زیر جزء محدودیت‌های اصلی شبیه GFHM می‌باشند.

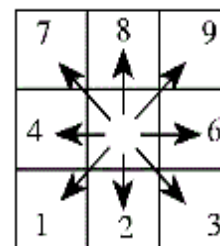
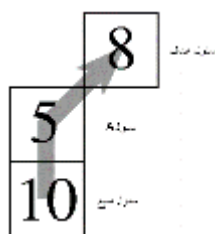
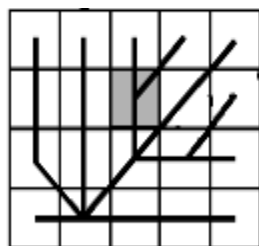
- 1- گام زمانی خروجی شبیه دست کم برابر با گام زمانی بارش ورودی می‌باشد، و نمی‌تواند گام‌های زمانی کوچکتر از گام زمانی بارش ورودی را شبیه‌سازی کند.
- 2- فرایند ذوب برف و اثر آن بر سیلاب در این شبیه شبیه‌سازی نگردیده است، که این فرایند زمانهایی که پوشش برف در منطقه وجود دارد بر رواناب تأثیر می‌گذارد. این موضع می‌بایست در مناطق کوهستانی و برف‌خیز مورد توجه قرار گیرد.
- 3- جهت محاسبه بارش مازاد از روش شماره‌ی منحنی استفاده می‌شود، که این روش خود دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. به عنوان نمونه، این روش جریان زیر قشری را محاسبه نمی‌کند.

- 2- تمامی مقادیر فراسنجه‌ها و ورودی‌ها برای هر سلول به صورت همگن فرض می‌شود.
- 3- رواناب در صورتی ایجاد می‌شود که مقدار بارش بزرگتر از  $0/2S$  باشد،  $S$  اندازه‌ی تلفات اولیه است.
- 4- شرایط رطوبتی پیشین خاک تابع مجموع بارش 5 روز قبل در نظر گرفته می‌شود.
- 5- برای در نظر گرفتن اثر تغییرات پوشش گیاهی بر مقدار CN، پوشش گیاهی به یکی از دو حالت فصل خواب و فصل رشد گیاه فرض می‌شود.
- 6- از نفوذ عمقی در طول رگبار صرف نظر می‌شود.
- 7- هدر رفت انتقالی<sup>1</sup> صفر در نظر گرفته شد.
- 8- نیم‌رخ عرضی رودخانه به صورت مستطیلی فرض گردید.
- 9- رواناب هر سلول فقط به یک سلول مجاور پایین دست منتقل می‌گردد. برای این منظور، از نقشه‌ی Ldd استفاده می‌شود (شکل 3).
- 10- فرض می‌گردد که شیب سطح جریان برابر با شیب کف آن می‌باشد.

#### محدودیت‌های شبیه

<sup>1</sup> - transmission loss

توسعه‌ی شبیه GFHM شبیه‌سازی آبنمای سیل حوضه‌ی آبخیز است، بنابراین، اصلیت‌ترین خروجی شبیه، آبنمای شبیه‌سازی شده حوضه آبخیز می‌باشد. خروجی‌های شبیه دره سه نوع و گروه زمانی، گروه نقشه‌ای و نقشه قرار می‌گیرند. گروه نقشه نقشه‌هایی با قابلیت توزیعی مکانی و زمانی می‌باشند که برای هر سلول، و در هر گام زمانی، در سطح حوضه تهیه می‌شوند. نقشه‌ی توزیعی مکانی - زمانی ارتفاع رواناب و بده‌ی شبیه‌سازی شده جزء مهمترین خروجی‌های این گروه می‌باشند. Map نقشه‌های خروجی می‌باشند که در طول اجرای شبیه یک بار ساخته شده و تا انتهای اجرای شبیه از آنها استفاده می‌گردد؛ نقشه‌های Ldd، شیب، شماره‌ی منحنی و ضریب منینگ جزو این گروه می‌باشند.



شکل 3- سمت راست: جهت‌های جریان ممکن در یک سلول، وسط: طرح‌واره جریان در یک مسیر، سمت چپ: نقشه Ldd

وقوع هر رخداد، از مقدار بهینه شده در فصل مربوطه استفاده شد.

### تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت شبیه اطلاعات مفیدی را درباره‌ی مجموعه داده‌های ورودی مناسب، و همچنین اعتمادپذیری نتایج شبیه‌سازی شده، مهیا می‌نماید (شیخ، 2006؛ شیخ و همکاران، 2010)؛ همچنین، به کاربرد موثر شبیه و برنامه‌ریزی در مورد تحقیقات و اندازه‌گیری‌های آینده کمک می‌کند (سیبرا و اولنبرگ، 2005). در این مطالعه از حساست نسبی، SR که به صورت رابطه‌ی (12) بیان می‌شود، استفاده گردید:

$$SR = \frac{\frac{\partial O}{\partial O}}{\frac{\partial P}{\partial P}} = \frac{\partial O}{\partial P} \frac{P}{O} \quad (12)$$

که در آن SR درصد تغییر در خروجی شبیه را برای یک درصد تغییر در فراسنج به دست می‌آورد. ضریب حساسیت

### ورودی‌ها و خروجی‌های شبیه

ورودی‌های شبیه GFHM را می‌توان در سه گروه نقشه‌ها، جداول و مقادیر عددی فراسنجه طبقه‌بندی کرد. شبیه توسعه داده شده در این مطالعه همچون بیشتر شبیه‌های توزیعی فیزیکی همچون KINEROS (اسمیت و همکاران، 1995)، SHE (آبووت و همکاران، 1986)، TOPKAPI (لویی و همکاران، 2005) بر اساس ترکیب اطلاعات کاربری اراضی، خاک و پستی و بلندی توسعه داده شده است؛ لذا، نقشه‌هایی همچون نقشه‌ی رقومی ارتفاع، کاربری اراضی و گروه آشناسی خاک جزو مهمترین ورودیها از نوع نقشه؛ گروه زمانی بارش جزو مهمترین ورودی از نوع جدول؛ مقادیر بیشترین و کمترین ضریب منینگ آبراهه از مهمترین ورودی‌های مقادیر عددی شبیه می‌باشند. با توجه به این هدف اصلی از طراحی و

### فرایند واسنجی

فرایند منظم تنظیم فراسنجه‌های شبیه را تا هنگامی که داده‌های خروجی انطباق قابل قبولی با داده‌های مشاهداتی داشته باشند واسنجی شبیه می‌نامند. این انطباق قابل قبول به وسیله‌ی تابع هدف مشخص می‌شود. عمل واسنجی را می‌توان به دو حالت دستی یا خودکار انجام داد. شبیه آشناسی برنامه‌نویسی شده در این مطالعه دارای دو فراسنج شماره‌ی منحنی و ضریب منینگ جهت واسنجی می‌باشد. جهت انجام واسنجی در این مطالعه از واسنجی دستی استفاده گردید؛ با توجه به این شماره‌ی منحنی تابع پوشش گیاهی، و خود پوشش گیاهی خود نیز تابع فصل می‌باشد، لذا بر اساس تاریخ هر رخداد، عمل واسنجی در چهار فصل بر اساس درصدی از مقدار اولیه واسنجی گردیدند، بطوری که در مراحل بعدی، بر پایه‌ی



جهت انجام تحلیل حساست از روش یک "فراسنج در هر بار" (OAT)، که ساده‌ترین و متعارف‌ترین روش برای تحلیل حساسیت می‌باشد، استفاده گردید. در این روش حساسیت فراسنج مورد نظر به‌وسیله‌ی تغییر در دامنه‌ی ممکن، در حالتی که بقیه‌ی فراسنجهای ثابت باشند، محاسبه می‌شود (سالتلی و همکاران، 2000؛ شیخ و همکاران، 2010). این روش اثرات متقابل و اثرات غیر خطی فراسنجهای را مدنظر قرار می‌دهد (شیخ، 2006).

### شاخص‌های ارزیابی کارایی شبیه

با توجه به این‌که استفاده از تابع هدفهای مختلف در فرایند واسنجی آبنمای‌ها می‌تواند نتایج واسنجی را بهبود بخشد (یابو و همکاران، 1998؛ دوس و رینجس، 2007؛ افترشیدس و کوتسویامی، 2010؛ کرفت و همکاران، 2011). لذا، در این مطالعه، به منظور ارزیابی کارایی شبیه در دو مرحله واسنجی و اعتبارسنجی از شاخصهای ارزیابی مختلف استفاده گردید (جدول 2).

نسبی بی بعد بوده، و اهمیت نسبی فراسنج در برابر خروجی در مقایسه با دیگر فراسنجهای را نشان می‌دهد (شیخ و همکاران، 2010)؛ بنابراین، می‌توان جهت مقایسه فراسنجهای استفاده گردد. از آن‌جا که راه حل تحلیلی معادله (12) برای شبیه‌های آشناسی مشکل و طاقت فرسا می‌باشد (شیخ و همکاران، 2010)، رویکرد عددی (رابطه‌ی 13) ارائه گردید (کومر و همکاران، 2002):

$$SR = \frac{P}{O} \left( \frac{O_2 - O_1}{P_2 - P_1} \right) \quad (13)$$

که در آن  $P_1$  و  $P_2$  دو مقدار متفاوت از فراسنج یا متغیر ورودی،  $O_1$  و  $O_2$  به ترتیب خروجیهای مرتبط با  $P_1$  و  $P_2$  در حالتی که دیگر فراسنجهای ثابت در نظر گرفته شده باشند. مقادیر  $P$  و  $O$  نیز به‌صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$P = \frac{P_1 + P_2}{2} \quad (13)$$

$$O = \frac{O_1 + O_2}{2} \quad (14)$$

جدول 2- مشخصات شاخصهای ارزیابی استفاده شده.

مقدار مطلوب	معادله	شاخصهای ارزیابی
یک	$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_{oi})^2}$	ضریب ناش-ساتکلایف
صفر	$\% RE_V = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N Q_{si}}{\sum_{i=1}^N Q_{oi}} - 1$	ارایی شبیه در برآورد حجم جریان
صفر	$\% RE_{QP} = 100 \left  \frac{Q_{si}(peak) - Q_{oi}(peak)}{Q_{oi}(peak)} \right $	درصد خطا در بدهی اوج
یک	$C_{VAR} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{si} - \bar{Q}_o)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2}$	ضریب واریانس
یک	$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} - \bar{Q}_o)(Q_{si} - Q_{oi})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{oi} + \bar{Q}_o)(Q_{oi} - \bar{Q}_o)^2}$	کارایی شبیه در شبیه‌سازی بدهی‌های بالا
یک	$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P - \bar{P})_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$	ضریب تبیین
یک	$wr^2 = \begin{cases}  b  \times r^2 & \text{for } \dots b \leq 1 \\  b ^{-1} \times r^2 & \text{for } \dots b > 1 \end{cases}$	ضریب تبیین وزنی

جهت تهیه‌ی آمار سیلاب و بارش متناظر، برگه‌های ثبت سیلاب (ایستگاه آبنجی تقی‌آباد) و ثبت بارش (ایستگاه بارانسنجی فاضل‌آباد) در دوره‌ی آماری

### نتایج و بحث

#### نتایج حاصل از بررسی آمار سیلابها

زمان تا اوج وجود داشته باشد. از دسته‌ی اول جهت اجرا و واسنجی، و از دسته‌ی دوم برای اعتبارسنجی شبیه آشناسی تهیه شده استفاده گردید. مشخصات وقایع انتخاب شده در جدول (3) درج گردیده‌اند.

(1369-1389) از شرکت آب منطقه‌ای استان گلستان تهیه شد. پس از تحلیل داده‌ها، تعداد 18 واقعه‌ی نسبتاً مناسب انتخاب گردیدند. رویدادهای مذکور به دو دسته‌ی نه تایی به نحوی تقسیم گردیدند که در هر گروه پراکنش مناسبی از لحاظ تاریخ رخداد، حجم سیل، بدهی اوج و

جدول 3- مشخصات وقایع انتخاب شده جهت اجرا، واسنجی و اعتبارسنجی شبیه.

مجموع بارش 5 روز قبل (میلی‌متر)	زمان تا اوج (ساعت)	حجم سیلاب (متر مکعب)	بدهی اوج (متر مکعب بر ثانیه)	فراسنج	
				رویداد	
12	18	188/28	6/484	1369/8/11,10	مرحله‌ی واسنجی
27	14	241/42	5/175	1370/3/4,2	
3	28	3094/78	61/66	1373/2/18,17,16	
6/5	18	500/15	12/497	1376/7/16,15	
15/5	20	487/87	16/42	1376/8/2	
5	28	451/60	9/799	1382/4/4,3	
3/5	24	279/28	5/111	1383/12/17,16,15	
0/5	22	1826/9	15/35	1386/2/25,26	
3/5	19	603/72	7/9	1388/1/11,12	
8	18	148/39	4/92	1372/8/24,23	
1	30	454/67	6/97	1373/2/29,28,27	
4	28	698/69	16/70	1382/3/5,4,3	
0	26	156/53	13/82	1383/1/14,13,12	
0	14	978/35	3/85	1383/12/5	
6	18	200/38	4/38	1384/2/18,17,16	
37	20	2359/44	96/54	1384/2/31,30	
1	22	711/489	18/17	1385/8/17,18	
0	21	1570/5	35/85	1388/3/29,30	

فراسنج مزبور برای اجرای بعدی و اعتبارسنجی شبیه در نظر گرفته شدند. جدول (4) مقادیر اولیه‌ی و بهینه شده‌ی این فراسنجها را نشان می‌دهد.

سپس با استفاده از شاخصهای معتبر مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه‌ای از آبنمای‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده پس از انجام واسنجی در شکل‌های 4 تا 7 ارائه شده است. جدول (5) نیز مقادیر بدهی اوج، حجم سیل و زمان تا اوج آبنمای‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را نشان می‌دهد. به منظور نمایش بهتر کارایی شبیه در شبیه‌سازی جریان، داده‌های آبنمای‌های جریان در اطراف خط 1:1، شکل (8) ارائه شده‌اند. همان‌طور که در این شکلها مشاهده می‌شود، شبیه تهیه شده، بدهی‌های حدکثر و زمان تا اوج آبنمای را به خوبی شبیه‌سازی نموده است، ولی در

### نتایج ارزیابی و واسنجی شبیه

پس از تکمیل و نهایی شدن شبیه آشناسی برنامه‌نویسی شده، شبیه برای رویدادهای دسته‌ی اول اجرا، و واسنجی انجام گردید. همان‌طور که اشاره گردید، شبیه آشناسی برنامه‌نویسی شده دارای دو فراسنج شماره‌ی منحنی و ضریب مانینگ برای واسنجی می‌باشد. در این مطالعه، جهت انجام واسنجی از واسنجی دستی استفاده گردید، بدین صورت که با توجه به این که شماره‌ی منحنی تابع پوشش گیاهی و خود پوشش گیاهی خود نیز تابع فصل می‌باشد، لذا بر اساس تاریخ هر رخداد، عمل واسنجی در چهار فصل جداگانه انجام گردید، بطوری که فراسنجهای شماره منحنی و ضریب مانینگ بر اساس درصدی از مقدار اولیه‌ی واسنجی شدند، که مقادیر

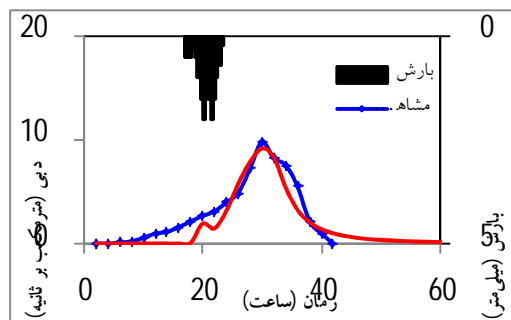
مورد حجم سیلابها، بطور کلی، مقادیر شبیه سازی شده کمتر از مقادیر مشاهداتی می‌باشند.

جدول 4- مقادیر اولیه و بهینه شده‌ی فراسنج شماره‌ی منحنی و ضریب مانینگ.

ضریب مانینگ	شماره‌ی منحنی					اولیه	گروه آشناسی	کاربری اراضی
	بهینه شده	بهینه شده			اولیه			
		زمستان	پاییز	تابستان				
0/36	0/4	77/42	79	79/79	77/82	79	C	مرتع
0/72	0/8	58/8	60	60/60	59/10	60	B	جنگل نیمه
		71/54	73	73/73	71/91	73	C	متراکم
0/72	0/8	53/90	55	55/55	54/18	55	B	جنگل متراکم
		68/6	70	70/70	68/95	70	C	
0/135	0/15	74/48	76	76/76	74/86	76	B	کشاورزی دیم
		84/32	84	84/84	82/74	84	C	
0/18	0/2	70/56	72	72/72	70/92	72	B	کشاورزی آبی

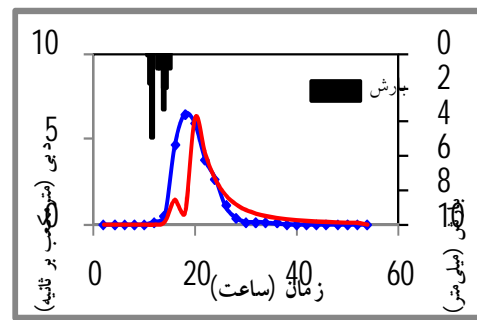
جدول 5- مقایسه‌ی فراسنجهای آبنمای‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی رویدادهای انتخابی.

فراسنج	بدی اوج (متر مکعب بر ثانیه)		حجم سیل (هزار متر مکعب)		زمان تا اوج (ساعت)	رویداد
	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده		
10 و 11 و 8 و 1369	6/484	6/720	188/28	161/93	18	20
2 و 3 و 4 و 1370	5/175	6/680	241/42	163/98	14	20
16 و 17 و 18 و 1373	61/66	61/467	3094/78	1973/79	28	28
15 و 16 و 7 و 1376	12/497	11/070	500/15	466/02	18	20
2 و 8 و 1376	16/42	12/6	487/87	428/98	20	20
3 و 4 و 4 و 1382	9/799	9/758	451/60	230/50	28	30
15 و 16 و 17 و 1383	5/111	5/647	279/28	166/41	24	28
25 و 26 و 2 و 1386	15/35	11/19	1826/5	862/016	22	26
12 و 11 و 1 و 1388	7/2	9/2	603/72	410/61	19	23



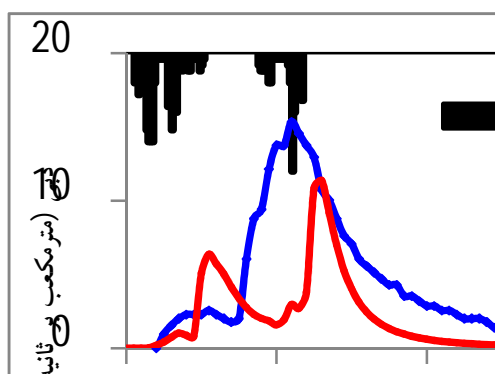
شکل 5- آبنمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده‌ی رویداد

1382/4/4/3

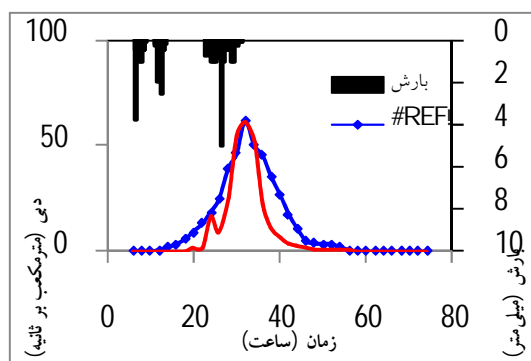


شکل 4- آبنمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده‌ی رویداد

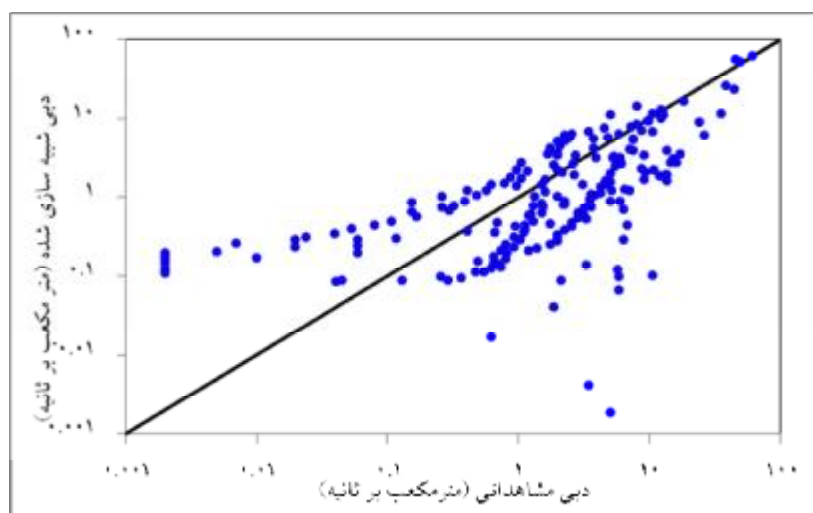
1369/8/11/10



شکل 7- آبنمای مشاهداتی و شبیه سازی شده‌ی رویداد  
1386/02/26 و 25



شکل 6- آبنمای مشاهداتی و شبیه سازی شده‌ی رویداد  
1373/2/18 و 16 و 17



شکل 8- نمودار لگاریتمی پراکنش داده های بدهی مشاهداتی و شبیه سازی شده در مرحله‌ی واسنجی.

و زمان تا اوج آبنمای‌های شبیه سازی شده و مشاهداتی را نشان می‌دهد.

همان‌طور که اشاره گردید، به منظور ارزیابی کارایی شبیه در دو مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی از شاخصهای ارزیابی متعددی استفاده گردیده که مقادیر آنها در جدول (7) نشان داده شده اند.

### نتایج اعتبارسنجی شبیه

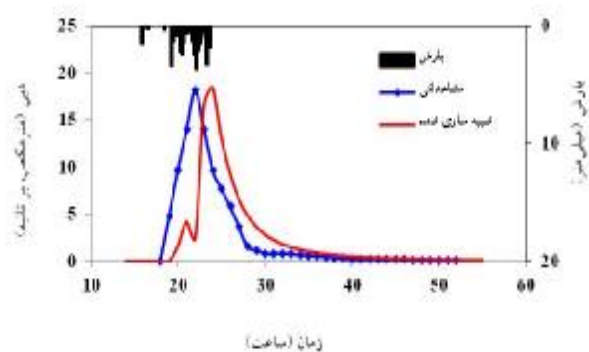
پس از فرایند واسنجی شبیه آبنمایی، به منظور اعتبارسنجی آن از 9 رویداد دیگر استفاده شد. نمونه‌هایی از نتایج اعتبارسنجی شبیه در شکل‌های 9 و 10 نمایش داده شده اند. جدول (6) نیز مقادیر بدهی اوج، حجم سیل

جدول 6- نتایج اعتبارسنجی شبیه‌آشناسی برنامه نویسی شده با رویدادهای مرحله‌ی اعتبارسنجی.

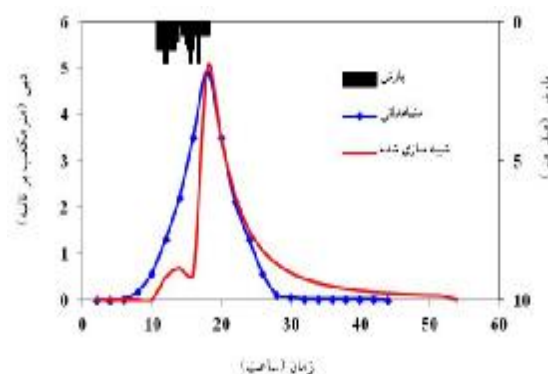
فراسنج رویداد	بدهی اوج (متر مکعب بر ثانیه)		حجم سیل (هزار متر مکعب)		زمان تا اوج (ساعت)	
	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده	مشاهداتی	شبیه‌سازی شده
1372/8/24 و 23	4/92	4/97	148/39	134/63	18	18
1373/2/29 و 28 و 27	6/97	8/34	454/67	230/47	30	26
1382/3/5 و 4 و 3	16/70	18/43	698/69	591/30	28	30
1383/12/5	3/85	3/83	156/53	110/92	14	18
1383/1/14 و 13 و 12	13/82	12/77	978/35	489/28	18	20
1384/2/18 و 17 و 16	4/38	4/13	200/38	144/57	18	20
1384/2/31 و 30	96/54	101	2359/44	917/93	20	16
1385/8/17 و 18	18/17	18/31	711/49	737/259	22	20
1388/3/29 و 30	35/85	35/08	1570/5	1112/06	21	24

جدول 7- مقادیر شاخص کارایی شبیه‌سازی در دوره‌ی واسنجی و اعتبارسنجی شبیه‌آشناسی برنامه نویسی شده.

شاخص کارایی	مرحله واسنجی	مرحله اعتبارسنجی
ضریب ناش - ساتکلیف	0/718	0/777
اریبی شبیه‌سازی در برآورد حجم جریان	-0/389	-0/226
درصد خطا در بدهی اوج	0/313	0/211
ضریب واریانس شبیه‌سازی	0/741	0/844
کارایی شبیه‌سازی در شبیه‌سازی بدهی‌های بالا	0/831	0/792
ضریب تبیین	0/751	0/794
ضریب تبیین وزنی	0/547	0/644



شکل 10- اعتبارسنجی شبیه‌سازی با رویداد مورخ 18 و 17/8/1385



شکل 9- اعتبارسنجی شبیه‌سازی با رویداد مورخ 23 و 24/8/1372

### نتایج تحلیل حساسیت شبیه‌سازی

تحلیل حساسیت یک ابزار اساسی و مهم در ساختن، استفاده و ادراک همه‌ی شبیه‌هاست؛ بنابراین، یکی از گامهای اصلی شبیه‌سازی آشناسی می‌باشد. در این مطالعه جهت بررسی تحلیل حساسیت از رابطه‌ی (13) و روش یک "فراسنج در هر بار" (OAT)، که یکی از ساده‌ترین و متعارف‌ترین روش برای تحلیل حساسیت

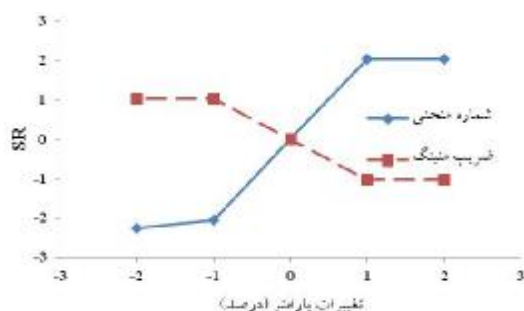
می‌باشد، استفاده گردید. در این روش حساسیت فراسنج مورد نظر به وسیله‌ی تغییر در دامنه‌ی ممکن در حالتی که بقیه فراسنجهای ثابت باشند محاسبه می‌شود. در این مطالعه فراسنجهای شماره‌ی منحنی و ضریب منینگ به میزان 1 و 2 درصد مقدار بهینه شده کاهش و افزایش داده شدند، سپس حساسیت این فراسنجهای در مورد اوج و حجم سیلاب بررسی گردید. نتایج نشان دادند که مقادیر

جدول (8) نتایج تحلیل حساسیت را نشان می‌دهند.

حساسیت نسبی فراسنج شماره‌ی منحنی تقریباً دو برابر فراسنج ضریب منینگ می‌باشد. شکل‌های 11 و 12، و

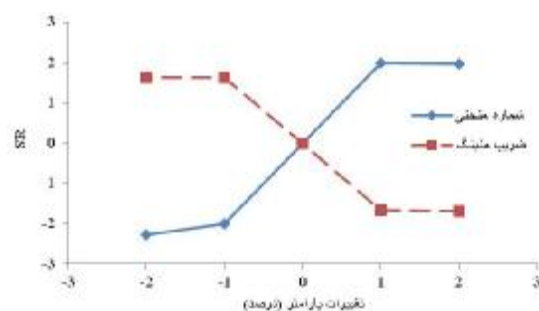
جدول 8- حساست نسبی فراسنجه‌ها بر بدهی اوج و حجم سیل.

فراسنج	درصد تغییرات	2	1	-1	-2
شماره‌ی منحنی	بدهی اوج	1/978	1/996	-1/993	-2/28
ضریب منینگ	بدهی اوج	-1/694	-1/658	1/643	1/627
حجم سیل	حجم سیل	-1/032	-1/031	1/031	1/030



شکل 12- حساسیت نسبی فراسنجه‌های شماره منحنی و

ضریب منینگ بر حجم سیل



شکل 11- حساسیت نسبی فراسنجه‌های شماره منحنی و

ضریب منینگ بر بدهی اوج.

## نتیجه گیری

می‌باشد که با استفاده از زبان شبیه‌سازی محیط زیستی PCRaster بر اساس نقشه‌های DEM، کاربری اراضی، نوع خاک، و همچنین داده‌های بارش حوضه‌ی آبخیز جعفرآباد توسعه داده شده است.

با توجه به نتایج حاصل از ارزیابی کارایی شبیه در دو مرحله‌ی واسنجی و اعتبارسنجی با این شاخصها، می‌توان بیان داشت که شبیه‌آبشناسی برنامه نویسی شده دقت قابل قبولی در شبیه‌سازی آبنمای سیل دارد، ولی در مورد حجم سیلابها، بطور کلی، مقادیر شبیه‌سازی شده کمتر از اندازه‌های مشاهداتی می‌باشند. میزان ضریب ناش- ساتکلیف 0/718 در مرحله‌ی واسنجی و 0/777 در مرحله‌ی اعتبارسنجی دقت قابل قبول این شبیه را شبیه‌سازی آبنمای سیل تصدیق می‌کند. مصطفی زاده (1387) نیز با استفاده از شبیه HEC-HMS نتایج مشابهی را در شبیه‌سازی آبنمای سیل حوضه‌ی جعفرآباد به‌دست آورده است (ضریب ناش- ساتکلیف 0/67 در مرحله‌ی واسنجی و 0/78 در مرحله‌ی اعتبارسنجی). البته میزان ضریب ناش- ساتکلیف به‌دست آمده در آن مطالعه نسبتاً کم بود. نامبرده علت پایین

بحث همانندسازی آبنماسی برای مدیریت منابع آب، مدیریت حوضه‌ی آبخیز و افزایش درک و دانش نسبت به چرخه‌ی آبنماسی یک نیاز اجتناب ناپذیر است. شبیه‌سازی آبنماسی از دهه‌های گذشته در بیشتر مناطق دنیا شروع شده و ادامه دارد؛ متأسفانه در ایران به این موضوع کمتر پرداخته شده، و بیشتر در مورد اجرا و ارزیابی شبیه‌های وارداتی تمرکز نموده اند. با توجه به اینکه این نوع از شبیه‌ها بر اساس داده‌های منطقه خاصی توسعه داده می‌شوند، استفاده و کاربرد آنها برای مناطق مختلف ایران مشکلاتی را به وجود می‌آورد؛ لذا، اقدام و تلاش برای ساخت و توسعه‌ی شبیه‌های توزیعی مکانی و زمانی سازگار با مناطق ایران، و با آگاهی از امکانات و محدودیت‌های ناحیه‌ای/ منطقه‌ای/ کشوری، یک ضرورت به‌شمار می‌رود. لذا، در این مطالعه با توجه به امکانات و محدودیت‌های حوضه‌ی جعفرآباد اقدام به توسعه و ساختن شبیه توزیعی آبنماسی گردید. شبیه (GIS) based Flood Hydrograph Modeling، یک شبیه آبنماسی توزیعی مکانی و زمانی

- ssment. Part I: Model development. J. of the Am. Water Resour Assoc. 34: 73-89.
- 6- Bahremand, A. 2006. Simulation the effect of reforestation on floods using spatially distributed hydrology modeling and GIS. Ph.D. thesis. Vrije Universiteit Brussel. Belgium, 150 p.
  - 7- Beven, K. 2001. Rainfall-runoff modelling. The primer. John Wiley and Sons. Chichester, UK.
  - 8- Beven, K., and Kirkby, M. 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrol Sci. Bull. 24: 43-69.
  - 9- Boughton, W., and Chiew, F. 2007. Estimating runoff in ungauged catchments from rainfall, PET and the AWBM model. Environ. Model. & Software 22: 476-487.
  - 10- Burrough, P. A., 1998. Dynamic Modelling and Geocomputation. In: Longley, P.A., Brooks, S .M., McDonnel, R., MacMillan, B. (Eds.), Geocomputation: A Primer. Wiley, Chichester, pp. 165–191.
  - 11- Buytaert, W., Reusser, D., Krause, S. and Renaud, J. P. 2008. Why can't we do better than Topmodel? Hydrol. Proc 22: 4175-4179.
  - 12- Chao, V. T. 1959. Open channel hydraulics. McGrawHill, New York.
  - 13- Chen, C. L. 1982. Infiltration formulas by curve number procedure. J. Hydr. Div., ASCE 108: 823–829.
  - 14- Cowan, W. L., 1956, Estimating hydraulic roughness coefficients. Agricultural Engineering. 37: 473-475.
  - 15- Cuartas, L., Tomasella, J., Nobre, A., Nobre, C., Hodnett, G., Waterloo, J., Oliveira, S., de Cássia, R., Trancoso, R. and Ferreira, M. 2012. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. J. of Hydrol. 462–463:15–27.
- بودن نسبی ضریب ناش - ساتکلیف را در مطالعه‌ی خود به اختلاف مرحله‌ی زمانی میان آبنمای‌های شبیه‌سازی شده و آبنمای‌های مشاهداتی نسبت داده است. نتایج این مطالعه نیز همانند مطالعه‌ی مصطفی زاده (1387) نشان دادند که یک اختلاف مرحله‌ای زمانی میان آبنمای‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی، بویژه در زمان تا اوج‌ها آبنما وجود دارد. نتایج تحلیل حساسیت شبیه نشان دادند که مقادیر حساسیت نسبی فراسنج شماره‌ی منحنی تقریباً دو برابر فراسنج ضریب منینگ می‌باشند.
- در پایان، با توجه به ویژگی‌های شبیه، قابلیت تهیه‌ی نقشه‌های توزیعی زمانی و مکانی بارش و رواناب، و با توجه به فرضیات و محدودیت‌های شبیه، به نظر می‌رسد که شبیه GFHM جهت شبیه‌سازی آبنمای سیل رگبارها و مدیریت یکپارچه‌ی آبخیزها مناسب است. البته، باید در آینده در بهبود محدودیت‌ها و افزایش کارایی‌های شبیه کوشید.
- ### منابع
- 1- مصطفی زاده، ر. 1387. شبیه‌سازی تأثیرات آبشناسی سازه‌های اصلاحی به منظور ارزیابی ستاریوهای سازه‌ای کنترل سیل در آبخیز جعفرآباد. پایان نامه کارشناسی ارشد آبخیزداری. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. 108 صفحه
  - 2- Abbott, MB., Bathurst, JC., Cunge, JA., O'Connell, PE., Rasmussen, EA . 1986. An introduction to the European Hydrological Model "SHE" – System Hydrology Europe. Journal of Hydrology. 87:45-77.
  - 3- Amaguchi, H., Kawamura, A., Olsson, J. and Takasaki, T. 2012. Development and testing of a distributed storm runoff event model with a vector-based catchment delineation. Hydrol. 420–421: 205–215.
  - 4- Andjelkovic, I. 2001. Guidelines on non-structural measures in urban flood management. Inter Hydrolo Progr. Technical Document in Hydrology. 50.
  - 5- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S. and Williams, J. R. 1998. Large area hydrologic modeling and asse-

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pp. 11.
- 25- Karimi, H. A., and B. H. Houston. 1997. Evaluating strategies for integrating Environmental models with GIS: Current trends and future needs. Computer, environment and urban systems. Elsevier Science Ltd. 20: 413-425.
- 26- Karssenberg, D. 2002. The value of environmental modelling languages for building distributed hydrological models. *Hydrol. Processes*, 16: 2751–2766.
- 27- Karssenberg, D., O. Schmitz, P. Salamon, K. De jong, and M. Bierkens. 2010. A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation. *Environ, Model. & Software* 25: 489–502.
- 28- Karssenberg, D.J. 1996, Manual PCRaster version2, Dept. Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, Netherlands.
- 29- Kite, G., E. Ellehoj, and A. Dalton. 1996. GIS for large-scale watershed modelling. In: Singh, V.P. and Fiorentino, M. (eds.). *Geographical Information Systems in Hydrology*. Kluwer, p 443.
- 30- Kraft, P., B. Kellie, Frede, H. and Breuer, L. 2011. CMF: A hydrological programming language extension for integrated catchment models. *Environ. Model. & Software*. 26(6): 828-830.
- 31- Kumar, R., Chatterjee, C., Lohani, A. K., Kumar, S. and Singh, R.D. 2002. Sensitivity analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. *Water Resour. Manage.* 16: 263–278.
- 32- Liu, Y. B., and De Smedt, F. 2004. WetSpa Extension, documentation and user manual, department of hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel, Brussels.
- 33- Lull, H.W. 1964. Ecological and silvicultural aspects 6.1- 6.30, In: Ven
- 16- De Doncker, Troch, L., Verhoeven, P. R., Buis, K., Desmet, N. and Meire, P. 2009. Importance of Manning's coefficient for the calibration of the coupled Strive model. *River Res Appl.* 9: 549-567.
- 17- De Roo, Hazelhoff, A., L. and Burrough, P. A. 1989. Soil erosion modelling using 'ANSWERS' and Geographical Information Systems. *Earth Surface. Processes and Landforms* 14: 517-532.
- 18- De Roo, A., Wesseling, C. and Ritsema, C. 1996. LISEM: a single event physically-based hydrologic and soil erosion model for drainage basins. I: Theory, input and output. *Hydrol. Processes*. 10: 1107-1117.
- 19- De Roo, A., Wesseling, C. and Van Deursen, W. P. A. 2006. Physically-based river basin modelling within a GIS: The LISFLOOD Model. [http://www.geocomputation.org/1998/06/gc\\_06.htm](http://www.geocomputation.org/1998/06/gc_06.htm)
- 20- De Vos, N.J. and Rientjes, T.H.M., 2007. Multi objective performance comparison of an artificial neural network and a conceptual rainfall-runoff model. *Hydrological Sciences Journal*, 52(3):3 97–413
- 21- Genovese, E., 2006. A Methodological approach to land use-based flood damage assessment in urban areas: Prague Case Study. Mission of the Institute for Environment & Sustainability, European Commission. Pp. 39.
- 22- Hjelmfelt, A. T. 1980. Curve-number procedure as infiltration method. *J. Hydr. Div, ASCE* 106: 1107–1110.
- 23- Hydrologic Engineering Center (HEC). 1998. HEC-1 Flood Hydrograph Package. User's Manual. CPD-1A. Version 4.1. US Army Corps of Engineers, Davis. CA. 434 p.
- 24- IPCC. 2007. Summary for policymakers. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment



- catchment model to verify the model structure. *J. of hydrol.* 310: 216–235.
- 45- Singh, V. P. 1995. Watershed modeling. (Chapter 1) In: Singh, V.P. (ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Colorado. US.
- 46- Smith, R. E. 1976. Approximations for vertical infiltration. *Trans. ASAE* 19: 505–509.
- 47- Smith, R.E., Goodrich, D.C., Woolhiser, D.A., and Unkrich, C.L., 1995, KINEROS - A kinematic runoff and erosion model. Chap. 20 of *Computer Models of Watershed Hydrology*, Singh, V. J., Ed., Water Resources Pub., Highlands Ranch, Colo., pp. 697-732.
- 48- Spears, D. D. 1995. SSARR model. (Chapter 11). In: Singh, V. P. (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications. Colorado. US
- 49- Sugawara, M., 1974. Tank Model with snow component. National Research Center for Disaster Prevention. Japan . 293p.
- 50- Takasao, T., Shiiba, M., Tachikawa, Y. 1989. Quasi-three-dimensional slope runoff model taking account of Topography of a natural watershed and automatic generation of a basin(in Japanese), *Proc. Japanese Conf. on Hydraul.*, 33, 139-144.
- 51- Thomas, M., D. King, D. Keogh, A. Apan, and S. Mushtaq. 2011. Resilience to climate change impacts: a review of flood mitigation policy in Queensland, Australia. *The Aust J. Emergency Manage.* 26: 8-17.
- 52- United Nations. Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2010. *World Urbanization Prospects: The 2009 Revision*. <http://esaun.org/unpd/wup/index.htm>. Data in digital form (POP/DB-/WUP/Rev.2009) (last consulted March 2012).
- Te Chow (ed.), *Handbook of applied hydrology*, McGraw-Hill. New York.
- 34- Morgan, R. P. C. 1995. *Soil erosion and conservation*. 2nd ed, Longman Group Unlimited, London, UK. 198p.
- 35- NRCS. 2004. Estimation of direct runoff from storm rainfall. Part 63. *Hydrology National Engineering Handbook*. United States Department of Agriculture. Pp. 51.
- 36- PCRaster Team, 2011. PCRaster documentation. Release 3.0.1. Dept. Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, the Netherlands.
- 37- Reed, S., Schaake, J. and Zhang, Z. 2007. A distributed hydrologic model and threshold frequency method for flash flood forecasting at ungaged locations. *J. Hydrol.* 337: 402-420.
- 38- Rowe, L. K. 1983. Rainfall interception by an evergreen beech forest. *J. Hydrol.* 66: 143-158.
- 39- Saltelli, A., Chan, K. and Scott, E. M. 2000. *Sensitivity analysis Wiley series in probability and statistics*. John Wiley & Sons. Chichester, England. 427p.
- 40- Scharffenberg, W., and Fleming, M. 2010. *Hydrologic modeling system HEC-HMS v3.2 user's manual*. Davis, USA, USACE-HEC.
- 41- Sheikh, v., 2006. *Soil Moisture Prediction: Bridging Event and Continuous Runoff Modelling*. Phd Thesis. Wageningen-UR. The Netherlands. 192pp.
- 42- Sheikh, V., Van Loon, E., Hessel, R. and V. Jetten. 2010. Sensitivity of LISEM predicted catchment discharge to initial soil moisture content of soil profile. *J. Hydrol.* 393: 147-185.
- 43- Sheikh, V., Visser, S. and L. Stroosnijder. 2009. A simple model to predict soil moisture bridging eEvent and continuous Hydrological (BEACH) modeling. *Environ. Model. and Software* 24: 542 – 556.
- 44- Sieber, A., and Uhlenbrook, S. 2005. Sensitivity analyses of a distributed

- 56- Wesseling, C. G., Karssenber, D., Burrough, P. A. and W. P. A. Van Deursen. 1996. Integrated dynamic environmental models in GIS: The development of a dynamic modelling language. *Trans. GIS.1*: 40-48.
- 57- Worboys, M., 1996. GIS: A computing perspective. Taylor and Francis. London, UK.
- 58- Yapo, P.O., Gupta, H.V. and Soroshian, S., 1998. Multi-objective global optimization for hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 204, 83-97.
- 59- Zhao, G., Hormann, G., Fohrer, N., Gao, J., Li, H. and Tian, P. 2011. Application of a simple raster-based hydrological model for stream flow prediction in a humid catchment with polder systems. *Water Resour: Manage.* 25: 661-676.
- 60- Zinke, P.J, 1967. Forest interception studies in the United States. pp.137-161. In: W.E. Sopper and H.W. Hull (eds.). *International Symposium on Forest Hydrology*, Pergamon Press, Oxford
- 53- Van Deursen, W.P.A., C. Wesseling, and D. Karssenber. 2000. How do we gain control over GIS technology? In: Parks, B.O., Clarke, K.M., Crane, M.P. (Eds.), *Int. Conf. Integrating G. I. S. and Environ. Model. Problems, Prospectus, and Needs for Research*. Boulder: University of Colorado – Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences, Denver: US Geologic Survey – Center for Biological Informatics, and Boulder: NOAA National Geophysical Data Center - Ecosystem Informatics. Banff, Canada.
- 54- Van Dijck, S. 2000. Effects of agricultural land use on surface runoff and erosion in a Mediterranean area. PhD Thesis. Utrecht University. the Netherlands. *Netherlands Geographic Studies Issue*: 256-263.
- 55- Wan Deursen, WPA. 1995. *Geographical Information Systems and Dynamic Models: Development and application of a prototype spatial modelling language*. PhD Thesis, Utrecht University, The etherlands. *Netherlands Geographic Studies, Issue 190*, p206.