

شبیه‌سازی بارش - رواناب با مدل ریاضی مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی برای حوزه آبریز امامه

پرویز محمد صالحی^۱، *محمود رائینی سرجاز^۲ و میرخالق ضیاءتبار احمدی^۳

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی

و منابع طبیعی ساری، ^۲استاد گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری

تاریخ دریافت: ۸۶/۴/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۸۷/۶/۲

چکیده

بررسی وقوع پدیده نابهنگام سیلاب و ویرانی‌های ناشی از آن می‌تواند نقش مهمی در بهبود مدیریت منابع آب داشته باشد. شبیه‌سازی پدیده بارش - رواناب ناشی از بارندگی و ذوب برف می‌تواند در برآورد شدت سیل کمک کند. این کار بدون شناخت پدیده‌های آبشناختی و رواناب عملی نخواهد بود. اما نبود شبکه‌های آبسنجی در بسیاری از حوزه‌های آبریز شناخت این پدیده‌ها را با دشواری‌هایی همراه می‌سازد. از این رو استفاده از روش‌های نامستقیم برای برآورد رواناب جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. هدف این پژوهش برآورد دقت یک مدل ریاضی شبه دویبعدی برای شبیه‌سازی آبنمود حوزه‌های آبریز می‌باشد. مدل می‌تواند با پردازش پارامترهای ژئومورفولوژیکی حوزه در محیط GIS آبنمود هر پیشامد بارش را تولید نماید. در این راستا ویژگی‌های توپوگرافی و هیدروژئومورفولوژیکی حوزه به صورت کمی در قالب رستری به عنوان نمایه‌های توپوگرافی تعریف می‌شوند. با استفاده از الگوریتم شبه دویبعدی ADEQUATE مسیر جریان هر سلول از مدل ارتفاع شماره‌ای (رقومی)^۱ (DEM) حوزه تا خروجی محاسبه می‌گردد. همچنین، مقدار جریان توزیع شده هر سلول به سلول‌های مجاور و در نهایت حجم کل آب تخصیصی هر سلول مشخص می‌شود. حجم آب تخصیصی سلول مورد مطالعه به عنوان موج سینماتیک^۲ از طریق مسیر مشخصه به خروجی می‌رسد. مدل زمان تعادل آن را محاسبه نموده و با انجام این فرآیند برای تمام سلول‌های حوزه، یک نقشه زمانی ایجاد می‌نماید، سپس اقدام به تولید خطوط همزمان پیمایش نموده و با استفاده از روش معروف مدت - مساحت، آبنمود سیل شبیه‌سازی می‌گردد. خروجی مدل با چهارآبنمود ثبت شده حوزه امامه مقایسه گردید که نتایج حاکی از دقت بالای مدل در شبیه‌سازی بارش - رواناب می‌باشد. خروجی مدل با چند آبنمود ثبت شده حوزه امامه مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی چهار پیشامد بارندگی - رواناب نشان داد که مدل توانایی بالایی در برآورد دبی سیل دارد. همبستگی بالا و معنی‌داری (۰/۹۸ تا ۰/۹۹ = r ؛ $P < 0/001$) میان داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های اندازه‌گیری شده دیده شد. تفاوت معنی‌داری میان داده‌ها اندازه‌گیری شده و داده‌های برآورد شده با مدل دیده نشد. در نتیجه، این مدل قادر است با دقت بالایی پیشامدهای بارندگی - رواناب را شبیه‌سازی کند.

واژه‌های کلیدی: موج سینماتیک، GIS، الگوریتم ADEQUATE، نمایه‌های توپوگرافی، روش مدت - مساحت

*مسئول مکاتبه: m.raeini@umz.ac.ir

مقدمه

و همکاران، ۱۹۹۶). این امر در مورد پیشامدهای حدی از اهمیت بیشتری برخوردار است (بوین، ۱۹۸۵). استفاده از مدل‌های توزیعی با توجه به مبنای فیزیکی آن‌ها، برون‌یابی نتایج حاصله را در زمان و مکان میسر می‌سازد. مدل‌های مورد استفاده برای پیش‌بینی مواردی همانند کیفیت آب، فرسایش یا تأثیر سناریوهای کاربری اراضی در یک منطقه، نیازمند پارامترهای آبشناختی پخشیده و نمایش دقیق فرآیندهای آبشناختی در ارتباط با پارامترهای مزبور می‌باشد (کوبین و همکاران، ۱۹۹۱). توجه به فرآیندهای آبشناختی پخشیده مشخص می‌سازد که برای کاربرد مؤثر مدل‌هایی با پایه فیزیکی، در وهله نخست باید به بررسی و تعیین ویژگی‌های توپوگرافی حوزه آبخیز پرداخت. مور (۱۹۹۲) در این باره بر این باور است که توپوگرافی نقش بسیار اساسی در پاسخ آبشناختی حوزه به بارش داشته و بیشترین نقش را در فرآیندهای آبشناختی، ژئومورفولوژیکی و زیست‌شناختی در سطح حوزه آبریز بازی می‌کند.

نحوه کار مدل‌های توزیعی بر مبنای تعیین میزان و مسیر حرکت رواناب از هر سلول به سلول‌های مجاور در جهت محاسبه زمان پیمایش هر سلول تا خروجی حوزه می‌باشد. حرکت جریان از هر نقطه وابسته به وضعیت ارتفاعی آن نقطه نسبت به نقاط پیرامونش دارد، بنابراین الگوریتم‌های روندیابی و توزیع جریان با استفاده از مدل ارتفاع شماره‌ای زمین به این مهم پرداختند. مارکی موویچ و پرودانوویچ (۱۹۹۳) شبکه‌های سلولی مدل ارتفاع شماره‌ای زمین را برای شبیه‌سازی حوزه‌های آبریز بهتر از انواع برداری دانستند. مایدمنت (۱۹۹۲) سرعت جریان را در شبکه‌ای از گره‌هایی که بر حوزه مورد مطالعه برازش داده بود، به دست آورد و با استفاده از الگوریتم هشت گره‌ای^۵ (D8) مسیری و توزیع جریان را به منظور استخراج هیستوگرام مدت-مساحت به انجام رسانید. به‌طور کلی تقرب الگوریتم‌های روندیابی جریان به آنچه که در طبیعت رخ می‌دهد، تطابق نتایج شبیه‌سازی را به

آگاهی از چگونگی ارتباط بین بارندگی و رواناب حوزه‌های آبریز بخش جدا نشدنی مطالعات طرح‌های آبی می‌باشد. نبود داده‌های کافی بارش-رواناب به دلیل نبود ایستگاه‌های آبریز مناسب، اهمیت به‌کارگیری روش‌های نامستقیم برای برآورد میزان رواناب حوزه‌های آبریز را بیش از پیش نمایان می‌سازد. آخان (۱۹۸۰) درصد برآمد تا به صورت نامستقیم رابطه بارش-رواناب را به دست آورد. وی یک مدل ریاضی را براساس حل «موج سینماتیک»^۱ (پخشی) و لحاظ پارامترهای حوزه برای محاسبه زمان تمرکز به دست داد.

هر چند با مشخص شدن زمان تمرکز می‌توان اقدام به شبیه‌سازی سیلاب نمود، اما این موجب کلان‌نگری به موضوع می‌شود، به گونه‌ای که ممکن است روند تغییرات سیل و میزان برآوردی به کلی با واقعیت متفاوت باشد، بنابراین به منظور نزدیک کردن نتایج به آنچه در طبیعت رخ می‌دهد بایستی حوزه‌های آبریز به گره‌هایی تقسیم شوند و پاسخ هر گره به پدیده بارش مشخص شود.

امروزه گرایش به استفاده از مدل‌های آبشناختی پخشیده^۲ که غالباً مدل‌هایی با پایه‌های فیزیکی محسوب می‌شوند امری فراگیر شده است. علت این گرایش بیشتر به خاطر آن است که فرآیندهایی با توزیع مکانی دارای مفاهیمی بنیادی در آبشناختی می‌باشد (مایدمنت، ۱۹۹۲). توجه به این مهم و توانایی‌های مدل‌های توزیعی در کنار پیشرفت روزافزون دانش‌های رایانه‌ای و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی^۳ سبب شده است که کیت و همکاران (۱۹۹۶) اظهار نظر نمایند: «یک مدل آبشناختی تلاشی برای تعریف فرآیندهای طبیعی تبدیل بارش به رواناب می‌باشد.» شمار بسیاری از این مدل‌ها در دسترس است، ولی یک گرایش همگانی از مدل‌های مفهومی-فله‌ای^۴ به سوی مدل‌های توزیعی با پایه فیزیکی دیده می‌شود (کیت

- 1- Kinematic wave
- 2- Distributed Hydrologic Models
- 3- Geographic Information System
- 4- Conceptual - Lumped

واقعیت بیشتر می‌سازد. مور (۱۹۹۲) گزارش نمود که الگوریتم هشت گره‌ای جریان را در جهت‌هایی که مضرری از ۴۵ درجه می‌باشند هدایت می‌کند، از این رو در عبور قطری، سطح مقطع جریان صفر در نظر گرفته می‌شود. به دلیل اشکالات الگوریتم هشت گره‌ای، لی (۱۹۹۲) الگوریتمی را مطرح نمود که بتواند به کمک آن مشکل محدود بودن مسیر جریان در الگوریتم هشت گره‌ای را برطرف کند، و جریان را در امتداد شیب دامنه واقعی هدایت نماید. در مقایسه‌ای که کوین و همکاران (۱۹۹۱) از دو روش چندسویی^۱ (MD) و هشت گره‌ای داشته‌اند، به این نتیجه رسیده‌اند که در دامنه‌های شیب‌دار روش چندسویی مقرون به واقعیت، و به همان نسبت روش هشت گره‌ای دور از واقعیت بوده است. بزرگ‌ترین مشکل روش چندسویی از نظر تاروتون (۲۰۰۰) آن بود که جریان را به تمام سلول‌های همسایه، با ارتفاع کمتر، توزیع نموده و بدین لحاظ میزان پراکندگی جریان را بیش از واقعیت به دست می‌دهد. به‌منظور افزایش تطابق بین طبیعت و الگوریتم‌های بررسی رواناب، ثقفیان و جولیان (۱۹۹۵) با تفکیک جریان روزمینی و آبراه‌ایی، مدل‌سازی آبشناختی را به واقعیت نزدیک‌تر نمودند. شکوهی (۲۰۰۱) پس از مسیریابی و توزیع جریان با فرض شکل‌گیری «موج سینماتیک» زمان تعادل سلول‌های حوزه مورد مطالعه را به‌دست آورد.

در این پژوهش، هدف طراحی الگوریتمی است که بتواند نمایه‌های توپوگرافیکی مورد استفاده در مدل آبشناختی خود را با کمترین خطای ممکن برآورد نماید. منظور از نمایه‌های توپوگرافیکی، شاخص‌هایی است که به کمک آن‌ها بتوان ویژگی‌های حوزه آبریز را به‌صورت کمی تعریف نمود. این شاخص‌ها عبارت از: شیب، زاویه شیب دامنه، مقدار جریان انباشته شده در هر سلول، جهت جریان و زمان پیمایش می‌باشند. کلیه مدل‌های آبشناختی و هیدرولیکی شبیه‌ساز رواناب نیاز به برآورد این پارامترها دارند. شدت وابستگی این مدل‌ها به این نمایه‌ها به ماهیت

مدل و نوع معادلاتی که به کمک آن‌ها به حل مسئله می‌پردازند، برمی‌گردد. سپس مدل آبشناختی مدل با بهره‌گیری از آرایه زمان پیمایش با استفاده از روش مدت - مساحت، آبنمود^۲ پیشامدهای بارندگی را به‌دست می‌دهد.

مواد و روش‌ها

در آغاز حوزه آبریز انتخاب و مدل ارتفاع شماره‌ای (DEM) آن برای استفاده در مراحل بعدی در محیط GIS ایجاد می‌شود. با بهره‌گیری از الگوریتم Adequate طبقه‌بندی شیب در حوزه، و نقشه کلاس‌های شیب حوزه از مدل ارتفاع شماره‌ای زمین تهیه می‌شود، و با استفاده از آن نقشه زاویه شیب دامنه به‌دست می‌آید. در گام بعدی برای برآورد حجم جریان سطحی و تحلیل سیل‌های ناشی از رگبارهای مختلف در حوزه آبریز امامه، گزارش‌های آماری این حوزه که توسط مرکز تحقیقات منابع آب وزارت نیرو تهیه و تدوین شده است مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت، و تعداد چهار سیل که مقادیر آنها در ایستگاه آبنجی کمرخانی به ثبت رسیده است، انتخاب گردید. با مشخص شدن آمار بارندگی و سیلاب مشاهده‌ایی، شماره منحنی^۳ (CN) حوزه که در مدل برآورد میزان نفوذ به‌کار می‌رود، تعیین شد. در مدل توزیعی تهیه شده امکان ورود اطلاعات مکانی شدت بارش و داده‌های مربوط به نفوذ، برای سه روش گرین-امپت^۴، شماره منحنی و ضریب رواناب (آگدن و ثقفیان، ۱۹۹۷) وجود دارد، به نحوی که می‌توان آن‌ها را به‌صورت لایه‌های رستری به محیط Arcview افزود، و مدل مستقیماً این اطلاعات را از محیط GIS دریافت می‌کند. تغییرات زمانی داده‌های مزبور نیز از طریق دریافت چند لایه برای بازه‌های زمانی مختلف امکان‌پذیر می‌باشد.

مدل تلفات بارش را با استفاده از روش شماره منحنی (CN) محاسبه می‌نماید و با الگوریتم روندیابی خود

2- Hydrograph

3- Curve Number

4- Green and Ampt Loss Model

1- Multiple directions

$$h_e = \left(\frac{\sqrt{i}L_c L_c}{\alpha} \right)_j^{\frac{1}{m}} \quad (7)$$

اگر Q_e دبی خروجی از سلول j -ام در حالت تعادل باشد، این دبی برابر خواهد بود با: مجموع دبی ورودی از سلول $1-j$ -ام و دبی اضافه شده از طریق جریان روزمینی. باید گفته شود که در این حالت از مقدار بارشی که به طور مستقیم روی آبراهه می ریزد به دلیل انتخاب بازه زمانی نزدیک به صفر صرف نظر شده است. بر این اساس داریم:

$$Q_e = Q_{j-1} + Q_j = \alpha h_{j-1}^m + (\sqrt{i}L_c L_c)_j \quad (8)$$

در رابطه بالا L_c برای هر سلول واقع در آبراهه همان عرض سلول می باشد. با جایگذاری مقدار α از معادله (۴) و استفاده از معادله ۲، معادله ۸ را می توان به صورت زیر نوشت:

$$(h_e)_j = \left[(h_e)_{j-1}^m + \left(\frac{\sqrt{i}L_c L_c n}{a_1 a_r^{\frac{1}{r}} S_f^{\frac{1}{r}}} \right)_j \right]^{\frac{1}{m}} \quad (9)$$

معادله ۹ برای مقطع مستطیلی عریض به صورت زیر ساده می شود:

$$(h_e)_j = \left[(h_e)_{j-1}^m + \left(\frac{\sqrt{i}L_c L_c n}{BS_f^{\frac{1}{r}}} \right)_j \right]^{\frac{1}{m}} \quad (10)$$

از طرف دیگر حل معادلات ۱ و ۲ مقدار h_j در حال تعادل را بر حسب زمان به صورت زیر به دست می دهد:

$$h_e = q_L t_e \quad (11)$$

که در آن qL مساوی است با:

$$q_L = \frac{\sqrt{i}L}{a_1 a_r^{\frac{1}{r}}} \quad (12)$$

بر این اساس زمان تعادل برابر است با:

$$t_e = \frac{a_1 a_r^{\frac{1}{r}}}{\sqrt{i}L} \left[(h_e)_{j-1}^m + \left(\frac{\sqrt{i}L_c L_c n}{a_1 a_r^{\frac{1}{r}} S_f^{\frac{1}{r}}} \right)_j \right]^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

معادله زمان تعادل یا مدت زمانی که موج سینماتیک از سلول مورد مطالعه به سلول مجاور می رسد، برای یک آبراهه مستطیلی عریض به صورت زیر در خواهد آمد:

نقشه های مقدار انباشت جریان و مسیر جریان را برای استفاده در مدول هیدرولیکی تعیین زمان پیمایش به دست می دهد. برای محاسبه زمان حرکت جریان هر سلول تا خروجی حوزه، با توجه به تغییرات مکانی و زمانی بارندگی، مدل از معادلات جریان ناپایدار بهره می گیرد. براین اساس، می توان معادلات پیوستگی و اندازه حرکت ساده شده را برای سلول j -ام در آبراهه به صورت زیر نوشت (ژین، ۲۰۰۱):

$$a_1 \frac{\partial h_j^{b_1}}{\partial t} + \frac{\partial Q_j}{\partial x} = \sqrt{i}L_c L_c \quad (1)$$

$$Q_j = \alpha h_j^m \quad (2)$$

که در آنها h_j ارتفاع جریان در سلول j -ام آبراهه، Q_j دبی جریان سلول j -ام، a_1 و b_1 ضرایب تجربی هستند که در رابطه $A = a_1 h^{b_1}$ ارتباط عمق آب با سطح مقطع جریان را مشخص می کنند، L_{0j} طول صفحه جریان روزمینی منتهی به آبراهه درجه n -ام، α پارامتر معرف مقدار جریان در منحنی دبی-اشل، t زمان، و i شدت بارش می باشد.

در صورت استفاده از فرمول مانینگ به عنوان رابطه معرف اصطکاک، دبی جریان از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Q = \frac{a_1 a_r^{\frac{1}{r}} S_f^{\frac{1}{r}}}{n} h^{b_1 + \frac{b_2}{r}} \quad (3)$$

از مقایسه معادلات (۲) و (۳) می توان ضرایب معرف مقدار جریان را به شکل زیر نشان داد:

$$\alpha = \frac{a_1 a_r^{\frac{1}{r}} S_f^{\frac{1}{r}}}{n} \quad (4)$$

$$m = b_1 + \frac{b_2}{r} \quad (5)$$

برای کانال مستطیلی در حالت تعادل، دبی هر سلول برابر است با:

$$Q_j = 2iL_0L_c \quad (6)$$

که در آن L_c طول آبراهه برای سلول j -ام است که برابر طول سلول یعنی iW می باشد. با مساوی قرار دادن معادلات ۲ و ۶ رابطه ای میان h_j و پارامترهای مرفولوژیکی و هندسی حوزه به دست می آید:

$$t_e = \frac{B}{\gamma i L} \left[(h_e)^m_{j-1} + \left(\frac{\gamma i L L_e n}{BS_f} \right)_j \right]^{\frac{1}{m}} \quad (14)$$

برای حل صریح عددی جریان به صورت سلول به سلول باید به این صورت عمل نمود: ۱- مقدار t_e از معادله (۱۳) برای سلول شماره یک با h_{j-10} را به دست آورد (شرط مرزی)، ۲- با استفاده از معادله ۶ مقدار Q_j را محاسبه کرد، ۳- مقدار h_{j-1} را از معادله (۲) به دست آورد، ۴- مقدار t_e برای سلول دوم را از معادله ۱۳ محاسبه کرد، ۵- مراحل ۲ تا ۴، تا آخرین سلول تکرار می شوند.

با توجه به معادله سنت و نانت (ژین، ۲۰۰۱) شیب اصطکاک از رابطه $S_f = S_0 - \frac{\partial h}{\partial x}$ به دست می آید و تا زمانی که ∂h از مقدار مجاز کمتر باشد این حلقه ادامه خواهد یافت.

در حالی که الگوریتم ADEQUATE توانایی تقسیم جریان را به دو سلول مجاور دارد، ولی تنها یک مسیر اصلی را برای روندیابی جریان انتخاب می کند (محمدصالحی، ۲۰۰۴). با مشخص شدن حجم آبی که باید از هر سلول به خروجی برسد، و مسیر منحصر به فردی که جریان هر سلول ناچار به پیمایش آن است را می توان از حل معادله زمان تعادل موج سینماتیک، زمان پیمایش سلول مورد مطالعه را، به دست آورد. با انجام این کار برای همه سلول های نقشه رستری حوزه، نقشه رستری نوینی به دست می آید که زمان پیمایش همه نقاط حوزه در آن مشخص می باشد. حال می توان خطوط همزمان تمرکز را استخراج و از روش مدت-مساحت، آب نمود سیل را برای حوزه آبریز امامه به دست آورد.

مشخصات حوزه برگزیده برای واسنجی مدل ریاضی:
آزمون مدل روی یک حوزه آبریز طبیعی، حوزه آبریز معرف امامه واقع در شمال شرق تهران، با مساحت تقریبی ۳۷/۵ کیلومتر مربع، در بازه $35^{\circ} 51' 50''$ و $35^{\circ} 57' 04''$ عرض شمالی و در $51^{\circ} 32' 30''$ و $51^{\circ} 38' 33''$ طول شرقی انجام شد. رودخانه امامه که از بلندی های شمالی سرچشمه می گیرد تمام طول حوزه را پیموده و در تنگ

کمرخانی (پایین دهکده کلوکان) به رودخانه جاجرود می پیوندد. آمار دبی های مشاهده ای در ایستگاه آبسنجی کمرخانی (کلوکان) اندازه گیری شده است.

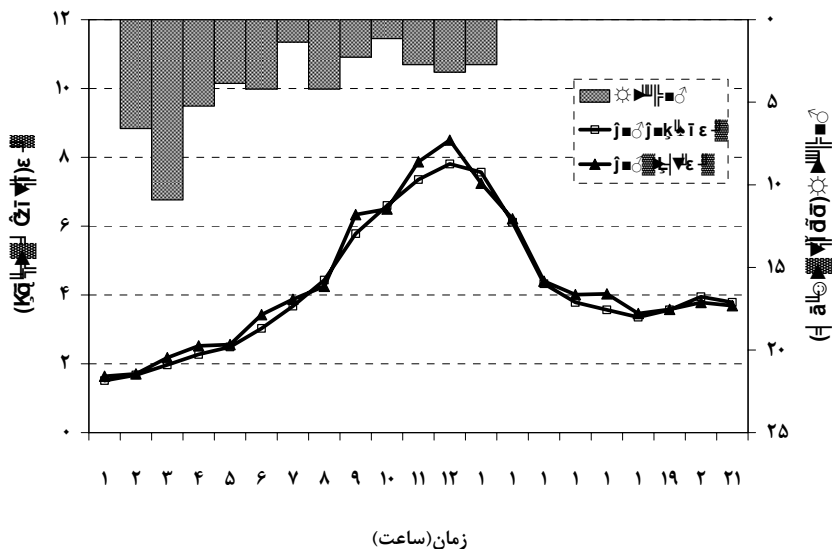
در این پژوهش داده های بارندگی و دبی چهار سیل گزارش شده در تاریخ های ۱۵ اردیبهشت ۱۳۶۵، ۷ اردیبهشت ۱۳۶۷، ۹ اردیبهشت ۱۳۷۲، و ۱۵ اردیبهشت ۱۳۷۳ مورد بررسی قرار گرفت.

صحت یابی مدل و تعیین میزان مطابقت خروجی های آن با داده های مشاهده ای با بهره گیری از آزمون های T-استودنت و همبستگی پیرسون با نرم افزار SAS انجام پذیرفت (نرم افزار SAS، نسخه ۶/۱۲).

نتایج

آب نمود مشاهده ای هر یک از چهار سیل به همراه باران نمود^۱ رگبارهای به وجود آوردنده آنها، و آب نمود شبیه سازی شده از مدل ریاضی این پژوهش، در شکل های ۱ تا ۴ آورده شده است. شکل های یاد شده نشان می دهند که روند تغییرات رواناب شبیه سازی شده همگام با مقادیر مشاهده ای می باشد و آب نمود تولید شده با آب نمود ثبت شده مشابهت دارد.

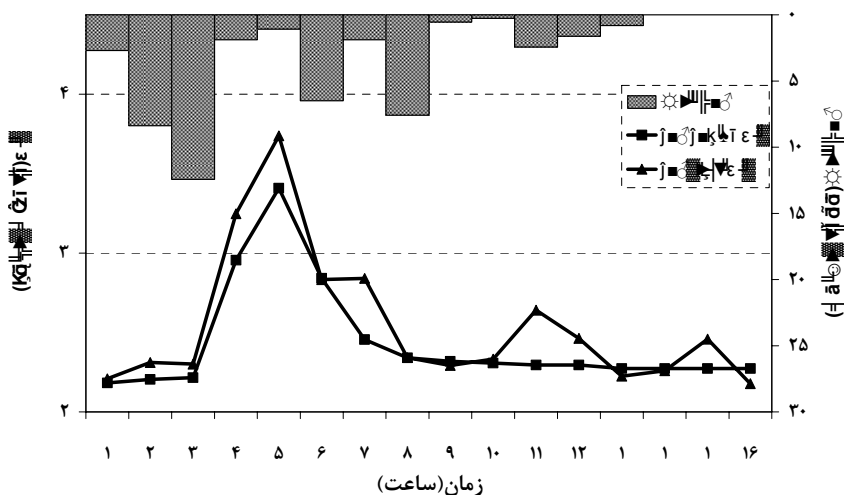
در تاریخ ۱۵ اردیبهشت ۱۳۶۵، در دو ساعت آغاز بارندگی، شدت بارش بالا بود (شکل ۱) و پس از آن به تدریج کاهش یافت و پس از ۱۲ ساعت بارندگی قطع شد ولی اوج سیلاب ۱۱ ساعت پس از آغاز بارندگی بود. در این پژوهش ۲۳ ساعت از داده های دبی سیل از ساعت صفر، یک ساعت پیش از بارندگی، تا ۸ ساعت پس از بارندگی در مدل به کار رفت. داده های شبیه سازی شده از مدل همبستگی بالایی با داده های اندازه گیری شده داشتند ($P < 0/001$; $r = 0/99$). با بهره گیری از آزمون مقایسه میانگین ها، آزمون t استیودنت، تفاوت معنی داری میان داده های اندازه گیری شده و شبیه سازی شده دیده نشد. بنابراین، با احتمال ۹۹ درصد اعتماد می توان گفت که مدل داده های واقعی را بازسازی می کند.



شکل ۱- باران نمود حوزه آبریز امامه (مستطیل‌ها)، آبنمود سیل مشاهده‌ای (خط با مستطیل تهی) و آبنمود برآورد شده (خط با مثلث توپر) برای ۱۵ اردیبهشت ۱۳۶۵.

شده تفاوت معنی‌داری دیده نشد. شکل ۲ نشان می‌دهد که حوزه پس از رسیدن به نقطه اوج مواجه با بارش‌های شدیدی می‌شود، اما به نظر می‌رسد آبنمود ثبت شده این اثرات را نادیده انگاشته است، چرا که علی‌رغم افزایش بارندگی پس از رسیدن به نقطه اوج، شاخه نزولی که به مقدار ثابتی می‌رسد را نمایش می‌دهد، در حالی که مدل این مورد را به صورت نقاط اوج موضعی شبیه‌سازی کرده است.

در سیل هفتم اردیبهشت ۱۳۶۷، شدت بارندگی در ساعت دوم و سوم بالا بود، و پس از ۱۳ ساعت بارندگی قطع شد. در این پیشامد اوج سیل در ۵ ساعت پس از آغاز بارندگی، یا دو ساعت پس از شدیدترین باران ثبت شده رخ داد. مدل، دبی سیل این پیشامد را نیز با دقت معنی‌داری شبیه‌سازی کرده است (شکل ۲). میان داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های اندازه‌گیری شده دبی همبستگی بالا و معنی‌داری دیده شد ($r = 0/95$; $p < 0/001$). بین داده‌های برآوردی مدل و داده‌های اندازه‌گیری



شکل ۲- باران نمود حوزه آبریز امامه (مستطیل‌ها)، آبنمود سیل مشاهده‌ای «خط با مستطیل توپر» و آبنمود برآورد شده (خط با مثلث توپر) برای ۷ اردیبهشت ۱۳۶۷.

در بارندگی نهم اردیبهشت ۱۳۷۲، پنج ساعت بارندگی پیوسته مشاهده شد که در نخستین ساعت شدیدترین بارندگی رخ داده است. پیشامد سیل ناشی از این بارندگی چهار ساعت پس از آغاز بارش به اوج خود رسید (شکل ۳). مدل به کار رفته برای شبیه‌سازی دبی سیل این بارندگی به خوبی این پیشامد را بازسازی کرد. ضریب همبستگی میان داده‌های پیش‌بینی شده و داده‌های اندازه‌گیری شده دبی سیل بسیار معنی‌دار ($r = 0.98$; $P < 0.001$) بود، و تفاوت معنی‌داری میان این داده‌ها دیده نشد.

مطابق شکل ۳ ملاحظه می‌شود که آبنمود مشاهده‌ای با زاویه تندی شاخه نزولی را شکل می‌دهد در حالی‌که باران نمود بارندگی نشان‌دهنده بارش چشمگیری در زمان رسیدن به اوج می‌باشد، انتظار می‌رود که شاخه نزولی دارای شیب ملایم‌تر با نقاط اوج مقطعی باشد که این چنین نشده است، اما آبنمود شبیه‌سازی شده این اثرات را لحاظ کرده است.

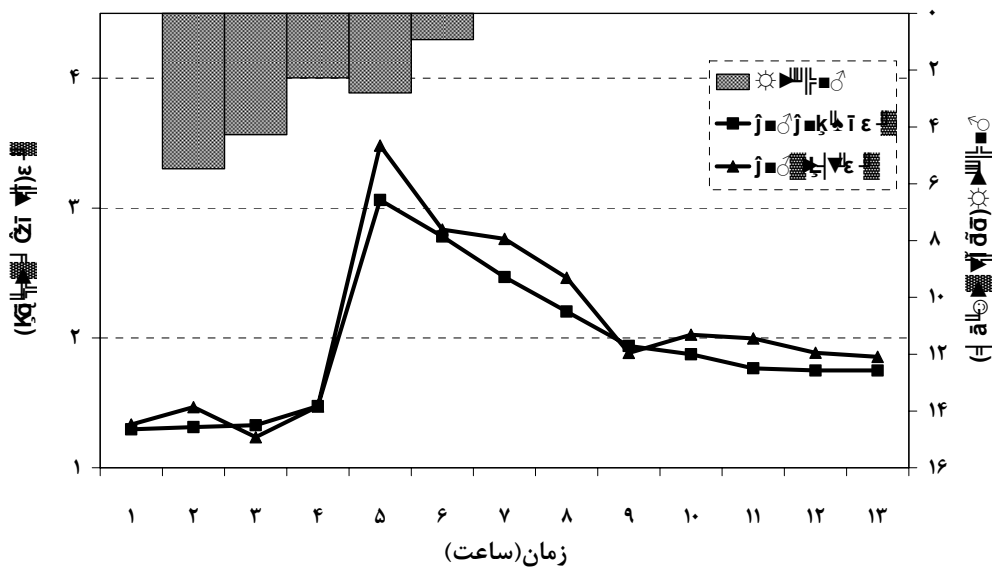
آخرین سیل مورد بررسی برای شبیه‌سازی بارش-رواناب در تاریخ پانزدهم اردیبهشت ماه ۱۳۷۳ رخ داد. در این روز پنج ساعت بارندگی سبب افزایش دبی جریان

ایستگاه کلوکان گردید. شدیدترین بارندگی در این روز در ساعت نخست رخ داد، ولی اوج دبی ایستگاه سه ساعت بعد پیش آمد. مدل به‌طور معنی‌داری دبی سیل را شبیه‌سازی نمود. بین داده‌های شبیه‌سازی شده و داده‌های اندازه‌گیری شده همبستگی بالا و معنی‌داری به‌دست آمد ($r = 0.99$; $P < 0.001$)، و تفاوت معنی‌داری میان این دو سری داده دیده نشد. مشاهده می‌شود که از اثرات بارش‌های شدید، بعد از رسیدن به اوج آبنمود ثبت شده چشم‌پوشی شده است، اما خروجی مدل نقاط اوجی را برای آن‌ها در شاخه نزولی متناسب با شدت نظیرشان ارائه می‌دهد.

جدول ۱ داده‌های حجم رواناب آبنمود هر سیل و داده‌های حجم رواناب برآورد شده، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد خطا (TE) را نشان می‌دهد. آزمون مقایسه تفاوت میان داده‌های ثبت شده و شبیه‌سازی شده تفاوت معنی‌داری را نشان نداد.

جدول ۱- حجم رواناب ثبت شده و شبیه‌سازی شده، کمترین ریشه میانگین مربعات خطا و درصد خطای کل برای چهار پیشامد سیل در ایستگاه کلوکان امامه.

شماره رخداد	تاریخ رخداد سیل	حجم رواناب سطحی		درصد خطا (TE)	کمترین ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)
		برآورد شده	اندازه‌گیری شده		
۱	۶۵/۲/۱۵	۲۶۸۰۳۶	۲۷۹۸۹۹/۳	+۴/۴	۰/۳۰۵
۲	۶۷/۲/۷	۱۹۸۹۳	۲۰۹۰۵/۹۵	+۵/۱	۰/۱۸۷
۳	۷۲/۲/۹	۳۱۱۰۴	۳۳۲۷۱/۳۳	+۷	۰/۱۹۱
۴	۷۳/۲/۱۵	۲۰۷۰۰	۲۲۰۰۶/۲	+۶/۳	۰/۱۶۵



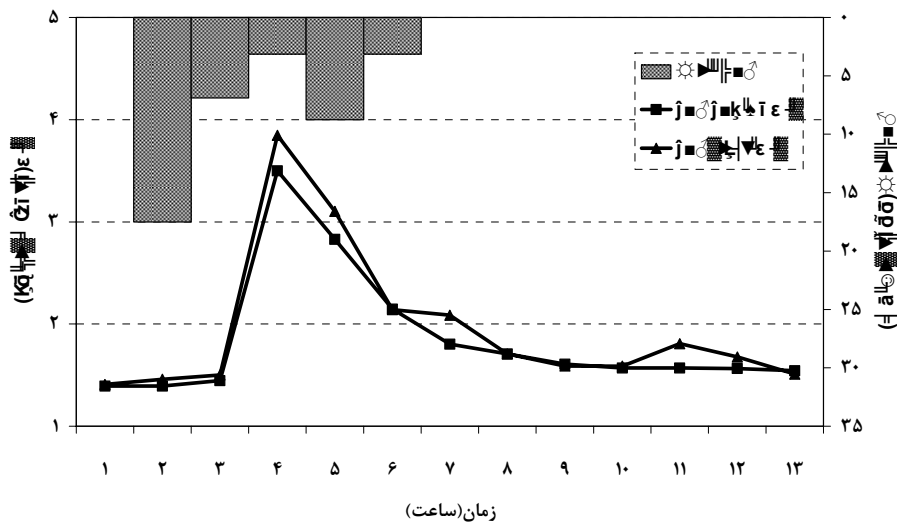
شکل ۳- باران نمود حوزه آبریز امامه (مستطیل‌ها)، آبنمود سیل مشاهده‌ای «خط با مستطیل توپر» و برآورد شده (خط با مثلث توپر) برای ۹ اردیبهشت ۱۳۷۲.

موارد یاد شده برای اطمینان از وقوع جریان یکنواخت در حوزه رعایت شد، از این رو نتایج مدل «موج سینماتیک» فقط در شرایط ویژه‌ای که تقریباً در طبیعت وجود خارجی ندارد، قابل پذیرش می‌باشد. اما مدل این پژوهش از فرض شکل‌گیری جریان پخشی در حل معادله زمان تعادل استفاده نمود، از این رو محدودیت مدل ذکر شده (شکوهی، ۲۰۰۱) را نداشته و می‌توان از آن با اطمینان کافی در برآورد رواناب حوزه‌های آبریز واقعی و ناهمگن استفاده نمود. داده‌های برآورد شده در این مدل دقت بالای شبیه‌سازی آبنمود سیل چهار پیشامد بارندگی را در یک حوزه آبریز واقعی نشان می‌دهد. در شبیه‌سازی هر چهار پیشامد سیل درصد کل خطای مدل نسبتاً پائین، بین ۴ تا ۷ درصد بود.

اثرات ذوب برف که به آهستگی انجام می‌پذیرد، با استخراج دبی پایه سیلاب‌های مشاهده‌ای در برآورد رواناب ناشی از بارش ملحوظ گردیده است. چنانچه اشاره شد سیلاب‌های مشاهده‌ای اثر بارش‌های پس از زمان اوج آبنمود را نادیده گرفته‌اند، از این رو با توجه به فرآیند شبیه‌سازی کامل مدل حجم سیل تولیدی مدل در تمام موارد بیشتر از مقدار مشاهده‌ای به دست آمد.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهندگان دیگری، با بهره‌گیری از مدل‌های دیگری سعی بر شبیه‌سازی بارش- رواناب نموده‌اند. جهانگیر و همکاران (۲۰۰۵) با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی پیشامدهای باران- رواناب حوزه آبریز کارده خراسان را با دقت بالایی شبیه‌سازی نمودند. جهانگیر (۲۰۰۵) در ارزیابی دیگری دقت برآورد بارش- رواناب توسط شبکه‌های عصبی مصنوعی را در مقایسه با مدل HEC-HMS بررسی نمود و تفاوت معنی‌داری بین آن‌ها نیافت، اگرچه نویسنده گزارش کرد که شبکه‌های عصبی مصنوعی، در برآورد رخداد‌های بارش- رواناب دقیق‌تر از مدل HEC-HMS عمل می‌کند. برای تعیین زمان تعادل، شکوهی (۲۰۰۱) مدلی را با فرض شکل‌گیری «موج سینماتیک» ارایه نمود. با توجه به ماهیت فرضیه این مدل، یعنی $S_r = S_0$ (ژین، ۲۰۰۱)، درستی نتایج مدل وابسته به شکل‌گیری جریان یکنواخت در حوزه می‌باشد. از این رو برای آزمون مدل، نویسنده مجبور به استفاده از یک حوزه آرمانی بسیار کوچک V شکل، با مساحتی در حدود ۱۵/۵ هکتار، گردید. خطوط هم‌ارتفاع این حوزه شیب یکنواختی را نشان می‌دهند و ضریب زبری جریان نیز در سراسر حوزه تقریباً ثابت است (شکوهی، ۲۰۰۱).



شکل ۴- باران نمود حوزه آبریز امامه (مستطیل‌ها)، آبنمود سیل مشاهده‌ای «خط با مستطیل توپر» و آبنمود برآورد شده (خط با مثلث توپر) برای ۱۵ اردیبهشت ۱۳۷۳.

داده‌ها و نمایش اطلاعات را در حد انتظار نداشتند، اکثر شبیه‌سازی‌های حرفه‌ای به صورت مجزا از سامانه اطلاعات جغرافیایی انجام می‌شد، چرا که آن تنها محیط یک بانک اطلاعات گرافیکی محسوب می‌شد که با افزودن مدول‌های تخصصی توسط کارشناسان به صورت فعلی درآمده است. در ادامه این روند مدل ارایه شده در این پژوهش می‌تواند با توجه به قابلیت برقراری ارتباط مستقیم با نرم‌افزار ArcView، به عنوان یک الحاقیه برای این نرم‌افزار، به منظور توسعه آن، در نظر گرفته شود، چرا که به عنوان مدولی قدرتمند و ساده، بدون نیاز به واسطه ارتباطی با سامانه اطلاعات جغرافیایی به تبادل اطلاعات می‌پردازد.

سپاسگزاری

در راستای انجام این پژوهش، از یاری دکتر درویش صفت، دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، و پشتیبانی مالی دانشگاه مازندران و کمک کارکنان گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه مازندران سپاسگزاری می‌شود.

امکان واسنجی حوزه‌های آبریز برای مدل در نظر گرفته شده است، این قابلیت از طریق کادرهای تبدیلی که امکان تغییر ضرایب مربوط به معادلات در آنها وجود دارد، به مدل داده شده است.

مدل تولید شده یک مدل توزیعی کاربرپسند می‌باشد، که پردازش داده‌ها را در محیط GIS انجام می‌دهد تا از فرضیات ساده کننده در برآورد رواناب اجتناب نماید. مدل با برآورد زمان تعادل هر سلول از طریق حل عددی و استفاده از معادله سنت و نانت (ژین، ۲۰۰۱) در برآورد زمان پیمایش جریان، روش مدت-مساحت را به یکی از قوی‌ترین و دقیق‌ترین مدل‌های آب‌شناختی بارش-رواناب بدل کرده است. اختلاف آبنمود سیل‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده‌ای ناچیز می‌باشد و این مسئله نشان‌دهنده برازش خوب خروجی مدل با داده‌های اندازه‌گیری شده می‌باشد. تطابق مناسب خروجی مدل با طبیعت موجب آن است تا در مناطق فاقد آمار امکان استخراج رواناب به صورت مصنوعی وجود داشته باشد.

بررسی تاریخچه روند انجام مطالعات آب‌شناسی نشان می‌دهد که تا اوایل سال ۱۹۹۰ توابع تحلیلی نرم‌افزارهای GIS هنوز در مطالعات منابع آب مورد استفاده قرار نمی‌گرفتند و مدل‌های آب‌شناختی نیز قابلیت مدیریت

منابع

1. Akhan, A.O. 1986. Time of concentration of overland flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 112: 284-292.
2. Beven, K.J. 1985. Distributed modeling, in M.G. Anderson and T.P. Burt' (eds). *Hydrological Forecasting*. John Wiley & son's ltd. Pp. 405-435.
3. Jahangir, A.R. 2005. Artificial neural network modeling of rainfall-runoff processes in comparison with HEC-HMS model in Kardeh watershed. MSc. Thesis. Department of Irrigation, Faculty of Agricultural Engineering, University of Mazandaran, Sari, Iran.
4. Jahangir, A.R., Raeini-Sarjaz, M., Ahmadi, M.Z., and Akbarpoor, A. 2005. Artificial neural network modeling of rainfall-runoff process in kardeh watershed. *Journal of Agri. & Natur. Resour. Sci.*, University of Mazandaran, 3 (2): 36-46.
5. Jain, S.C. 2001. Open-channel flow. John Wiley & Sons. Inc. Pp 229-261.
6. Kite, G.W., Ellehoj, E., and Dalton, A. 1996. GIS for large-scale watershed modeling. In: *Geographical Information System in Hydrology* by Singh. V.P. and Fiorentino. M.. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. Pp. 237-264.
7. Lea, N.L. 1992. An aspect driven kinematics routing algorithm. *Overland Flow. Hydraulics and Erosion Mechanics*. Edited by A. J. Pearson and A. D. Abrahams. Chapman and Hall. New York. Pp. 393-407.
8. Lee, J.E., and Walsh, J.M. 1984. Map projections for use with the geographic information system. US Fish and Wildlife Services. FWS/OBS-84/17.
9. Machmeier, R.E., and Larson, C.L. 1968. Runoff hydrographs for mathematical watershed model. *Journal of Hydraulics*. ASCE. 94: 1453-1474.
10. Maidment, D.R. 1992. Grid-based computation of runoff; a preliminary assessment. Report to U. S. Army Corp of Engineers. HEC. Under Contract DACW. 05-92-P-1983. pp 10.7-10.13.
11. Markimovic, C., and Prodonovic, D. 1993. Matching standard GIS package with urban draining simulation software processes. *HydroGIS 93*. Vienna. Pp: 151-160.
12. Mohammad-Salehi, P. 2004. Development of a mathematical model for diffusive wave in GIS. MSc. Thesis. Department of Irrigation, Faculty of Agricultural Engineering, University of Mazandaran, Sari, Iran. Pp. 97.
13. Moore, I.D. 1992. Hydrologic modeling and GIS. Center of Resources & Environmental Studis. Inst. of Advanced Studies. Australian National University. Report. Page. 13.
14. Ogden, F.L., and Saghafian, B. 1997. Green and Ampt Infiltration with Redistribution. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123(5): Pp.386-393.
15. Quinn, P., Beven, K., Chevalier, P., and Planchon, O. 1991. The Prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes*. 5: 59-79.
16. Saghafian, B., Julien, P.Y., and Ogden, F.L. 1995. Similarity in catchments response stationary rainstorm. *Water Research*. 31: 1533-1541.
17. Saghafian, B., and Julien, P.Y. 1995. Time to equilibrium for spatially variable watersheds. *Journal of Hydrology*. 172: 231-293.
18. SAS Institute Inc. SAS procedure guide, version 6.12. Cary, NC: SAS Institute Inc, 1994.
19. Shokoohi, A.R. 2001. Development of a mathematical rainfall-runoff model based on hydraulic based GIS. Ph.D. Thesis. Department of Irrigation, Faculty of Agriculture, University of Tehran, Pp 347.
20. Tarboton, D.G. 2000. Watershed and stream network delineation. *HydroGIS short course*. Utah State University. Page. 11.

Rainfall-runoff simulation using mathematical model based on geographical information system for Amameh watershed

P. Mohammad-Salehi¹, *M. Raeini-Sarjaz² and M.Kh. Ziatabar Ahmadi³

¹Former M.Sc. student, Dept. of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Iran, ²Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Iran, ³Full Prof. Dept. of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Iran

Abstract

Study of uncommon flood occurrence phenomenon and its devastating losses could have important role on water resource managements. Simulation of rainfall-runoff originating from rainfall and snow thawing could be used in estimation of flood intensity and volume. This is not doable without a knowledge of hydrological and runoff processes. Therefore, employing of indirect methods for estimating rainfall-runoff processes has gained many attentions. The aim of this research is the evaluation of a pseudo-two dimensional mathematical model to simulate the accuracy of hydrograph of watersheds. This model can produce geographical parameters of watersheds in GIS medium of each rainfall event. In this way topographical and hydrogeomorphological characteristics are defined as topographic indices within raster framework. Using pseudo-two dimensional algorithm of ADEQUATE the path of flow of each cell of DEM of watershed to outlet is calculated. The amount of distributed flow of each cell to neighboring cells, and finally the total volume of water allocated to each cell is also determined. The allocated water volume of cell under study reaches the outlet through known path, as diffusive wave. The model calculates the time of equilibrium and with this process, based on time-area method, a time map is prepared for all map cells of the watershed. Then isochrones are drawn and the area of flood hydrograph is simulated using the famous time-area method. The model output was compared with four recorded flood hydrographs of Amameh watershed. The results of simulation of the four rainfall-runoff events showed that the model has a high capability in flood discharge rate estimation. The high and significant correlations ($r = 0.98$ to 0.99 ; $p < 0.001$) between simulated and measured data were observed. No significant difference was found between measured and simulated data. In conclusion, this model could precisely predict rainfall-runoff events.

Keywords: Diffusion wave; GIS; ADEQUATE algorithm; Topography indices; Time-area method

*-Corresponding Author; Email: m.raeini@umz.ac.ir