محاسبه‌ی نمودار زمان– مساحت حوضه‌های آبخیز با استفاده از آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش

تورج سبزواری*[۱]، شبنم نوروزپور[۲]، مهدی جامیشی[۳]

تاریخ دریافت:۹۲/۱۲/۱۳ تاریخ پذیرش:۹۳/۲/۲۲

چکیده

پیش‌بینی رواناب حوضه‌های فاقد آمار جهت طراحی سازه‌های هیدرولیکی بسیار اهمیت دارد. شبیه‌های بارندگی رواناب مانند کلارک و روش آب‌نگار زمان- مساحت نیازمند نمودار زمان- مساحت حوضه‌های آبخیز می‌باشند. در این تحقیق روشی جدید برای محاسبه‌ی نمودار زمان- مساحت حوضه‌ها با استفاده از شبیه‌های آب‌نگار واحد لحظه‌ای ارائه شده است. در این تحقیق از روش آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش استفاده گردید. روش زمان- مساحت ناش محاسبه شده با معادله‌ی زمان- مساحت ارائه شده به‌وسیله‌ی سازمان USACE(1990) مقایسه شد و مقادیر n=4.7 و $k = \frac{t_c}{7.4}$ به عنوان فراسنجهای شبیه ناش برای حوضه‌های فاقد آمار پیشنهاد گردید. جهت صحت‌سنجی روش، اطلاعات مربوط به نمودار زمان- مساحت حوضه‌های کسیلیان و جعفرآباد در ایران، و آجای و گودآوری در هندوستان با نتایج به‌دست آمده در این تحقیق مقایسه گردیدند. نمودارهای زمان- مساحت محاسبه شده برای حوضه‌ی کسیلیان و آجای با استفاده از شبیه کلارک به آب‌نگار رواناب مستقیم تبدیل گردیده و نتایج آنها با رواناب مشاهداتی مقایسه شدند. مقادیر متوسط ضریب کارایی نمودار محاسباتی در حوضه‌های آجای و گود آوری ۰.۹۶، و برای حوضه‌های کسیلیان و جعفرآباد ۰.۷۸ به‌دست آمدند. خطای اوج رواناب برای حوضه‌ی کسیلیان بین ۱۴ تا ۲۲ درصد، و برای حوضه‌ی آجای ۴ تا ۱۷.۵ درصد محاسبه گردید، که مقادیر قابل قبولی به‌شمار می‌روند.

واژه‌های کلیدی: زمان- مساحت، آب‌نگار واحد لحظه‌ای، شبیه ناش

[۱]- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، گروه مهندسی عمران، استهبان، ایران

[۲]- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، گروه مهندسی عمران، استهبان، ایران

[۳]- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد استهبان، گروه مهندسی عمران، استهبان، ایران

*- نویسنده مسوول مقاله: T_Sabzevari@iauest.ac.ir

مقدمه

روش زمان- مساحت برای اولین بار به‌وسیله‌ی کلارک در سال ۱۹۴۵ به عنوان یک روش ساده و مناسب که می‌تواند تغییرات مکانی حوضه‌ی آبخیز و تغییرات زمانی رگبار را شبیه‌سازی نماید معرفی گردید. مهمترین مشکل این روش در آن زمان تولید خطوط همزمان حوضه بود که امروزه با پیشرفت سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی GIS این مشکل حل شده است. در این روش منحنی زمان- مساحت به عنوان ورودی شبیه در حوضه روندیابی می‌گردد و نتیجه آن آب‌نگار واحد لحظه‌ای کلارک می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان آب‌نگار واحد حوضه را با تداوم‌های مختلف محاسبه کرد و در نهایت با پیچیده کردن آن در بارش مازاد مقادیر رواناب ناشی از بارندگیهای طراحی را محاسبه نمود. نرم‌افزار HEC-HMS نیز به عنوان یک وسیله‌ی پرکاربرد در شبیه‌سازی بارندگی- رواناب، قابلیت استفاده از دو روش کلارک و مود کلارک را نیز داراست. در این نرم‌افزار نمودار زمان- مساحت حوضه براساس معادله‌ی ارائه شده به‌وسیله‌ی USACE(1990) به تخمین آب‌نگار واحد می‌پردازد.

پونس (۱۹۸۹) و میدمنت (۱۹۹۳) و سینگ (۱۹۹۶) روندیابی زمان- مساحت را در جریان سطحی به‌کار گرفتند که از مزایای آن دخالت فراسنجهای آبشناسی به صورت نیمه‌توزیعی بود. در توسعه‌ی تدریجی شبیه کلارک در روش کلارک اصلاح شده این روند کاملتر شده و به یک الگوریتم کاملاً توزیعی جهت تبدیل بارش به رواناب گردید. شبیه کلارک بر پایه‌ی خطوط همزمان پیمایش بنا شده است. این خطوط حوضه را به مساحتهایی مجزا تقسیم می‌کنند که هر کدام با اختلاف زمانی، که معمولاً به اندازه‌ی بازه‌ی زمانی خطوط همزمان منظور گردیدند، به نوبت تخلیه شده و نمودار ستونی انتقالی، یا زمان- مساحت را می‌ساختند. شکل ۲- الف خطوط همزمان یک حوضه را نشان می‌دهد.

شیوه‌ی زمان ــ مساحت یک روش خطی بوده و می‌توان گفت که حاصل توسعه‌ی نیمه‌توزیعی روش شناخته شده استدلالی می‌باشد. بعضی از نسخه‌ها کاملاً توزیعی بوده و تمامی فراسنجها در مکان متغیر بودند. مخزن خطی فرضی هم تأثیرات کاهشی جریان را در قالب جزء دوم روش آب‌نگار واحد کلارک مشخص می‌ساخت.

به کارگیری و استفاده از شبیه کلارک احتیاج به اطلاعات فیزیکی یا مفهومی از خصوصیات حوضه شامل زمان تمرکز و نمودار ستونی زمان- مساحت (TAH)[1] و ضریب مخزن خطی داشت. در محاسبات توزیعی، معمولاً به جای زمان تمرکز کل حوضه، زمان پیمایش هر سلول تا خروجی مورد نیاز است، که خود چالشی جدید تلقی می‌شود. روش سرعتهای مساوی برای تمامی مناطق حوضه اولین بار به‌وسیله‌ی پیلگریم (۱۹۷۷) مطرح شد که طی آن TAH بر اساس سرعت پیمایش برابر در جریان سطحی برای تمامی حوضه قابل استخراج بود. این روش مبنای توسعه‌های بعدی بود که به‌وسیله‌ی میدمنت (۱۹۹۳) و ملیسه و همکاران (۲۰۰۳) انجام شد. ثقفیان و جولین (۱۹۹۵)، طی یک رویکرد هیدرولیکی توانستند زمان پیمایش را بر اساس سرعت موج پویایی در دو مرحله‌ی سطحی و آبراهه‌ای مورد بررسی قرار داده و روشی تحلیلی را برای محاسبه این زمان معرفی نمایند.

بعد از شکل بسیار ساده و ابتدایی TAH، که به‌وسیله‌ی کلارک مطرح گردید، میدمنت (۱۹۹۳) نمودار ستونی زمان- مساحت را در بستر GIS به‌گونه‌ای گسترش داد که فراسنجها و خصوصیات حوضه را به صورت توزیعی در نظر می‌گرفت. متعاقباً، آجوارد و موزیک (۲۰۰۰) روشی را بر اساس روش میدمنت (۱۹۹۳) جهت استخراج آبنمود واحد در حوضه‌ی آبخیز ابداع نمودند. آنها روش خود را «شبیه‌سازی مستقیم هیدرولیکی» نامیدند. مطابق با آمارهای موجود، حدود ۴۰ تا ۶۰ درصد از طرحهای مهندسین ارتش آمریکا با استفاده از شبیه زمان- مساحت و نسخه‌های مختلف آن در قالب سایر روشها مورد استفاده قرار می‌گیرد (کال و فلدمن، ۱۹۹۸).

شکوهی و ثقفیان (۱۳۸۵) روشهای موجود را برای تعیین موقعیت خطوط همزمان پیمایش در مقایسه با روش تحلیلی موج پویایی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این تحقیق با بررسی طیفی از توانها نشان داده شده است که در صورت در نظر گرفتن جهت صحیح حرکت موج، و تعیین موقعیت خطوط هم پیمایش از بالادست حوضه به

[1]- time area histogram

سمت پایین دست، توان مناسب برای آن‌که استفاده از روش زمان- مساحت نزدیکترین آب‌نگار را به راه حل تحلیلی موج پویایی به‌دست دهد کدام است.

شکوهی و ثقفیان (۱۳۸۶) به بررسی روشهای موجود برای تعیین موقعیت خطوط همزمان پیمایش در جریانهای همگرا در مقایسه با روش تحلیلی موج پویایی پرداخته‌اند. در آن تحقیق، با بررسی طیفی از توانها، نشان داده شده است که استفاده از توان مورد استفاده در معادله موج پویایی نزدیکترین جواب را به حل تحلیلی برای تعیین شاخه‌ی صعودی آب‌نگار سیل به‌دست خواهد داد. نتایج حاصل برای جریانهای همگرا موید نتایج حاصله در مورد جریانهای موازی می‌باشند.

در کاربرد روش کلارک مقادیر زمان- مساحت حوضه‌ی آبخیز در طول آن روندیابی شده و مقادیر آب‌نگار واحد لحظه‌ای کلارک محاسبه می‌گردند که براساس آنها می‌توان آب‌نگار واحد حوضه، و آب‌نگار سیلاب ناشی از هر بارش را محاسبه کرد. انگاره‌ی جدید در این تحقیق از این‌جا برگرفته شد که چگونه می‌توان به صورت معکوس از دیگر روشهای آب‌نگار واحد لحظه‌ای بهره برد و نمودار زمان- مساحت حوضه را محاسبه نمود. در این تحقیق از روش آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش استفاده گردید است. تخمین سیلاب در حوضه‌های فاقد آمار دارای اهمیت بسیار بوده و ارائه‌ی روشهایی که بتوانند به سهولت فراسنجهای شبیه‌های بارندگی- رواناب را برای این گونه حوضه‌ها به‌دست آورد حائز اهمیت است. در این تحقیق، روش آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش برای حوضه‌های فاقد آمار توسعه یافته و از طریق آن مقادیر نمودار زمان- مساحت برای چهار حوضه‌ی آبخیز معرف محاسبه گردیده و با نتایج واقعی مورد مقایسه قرار داده شده است.

مواد و روش‌ها

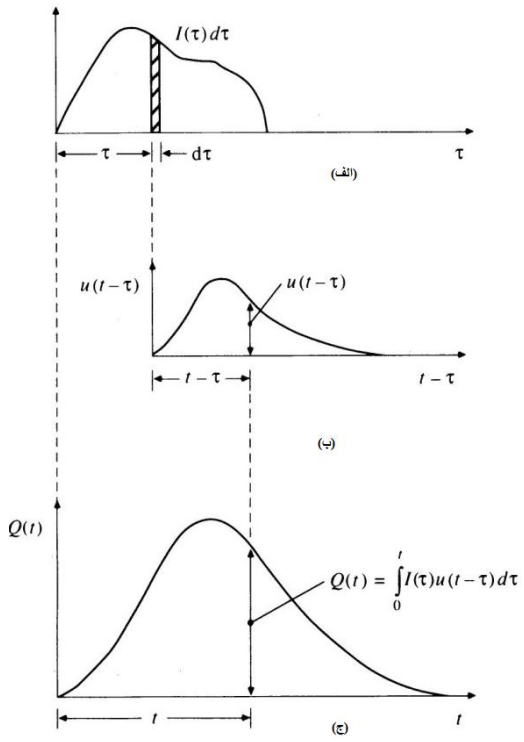
شبیه ریاضی نمودار زمان– مساحت

حوضه‌های آبخیز یک سامانه‌ی آبشناسی به حساب می‌آیند که رواناب آنها پاسخ آبشناسی به بارندگی می‌باشد. چنانچه یک حوضه‌ی آبخیز، یک ورودی را به میزان واحد به عنوان بارندگی دریافت کند، که این بارندگی را به عنوان یک ضربه‌ی واحد لحظه‌ای در نظر بگیریم، پاسخ کل حوضه در زمان مشخص تابعی از پاسخ ضربه‌ای واحد[1] حوضه، یا آب‌نگار واحد لحظه‌ای حوضه می‌باشد.

مطابق شکل ۱- الف اگر یک بارش مازاد $I(\tau)$ در زمان τ برروی حوضه ببارد، مقدار رواناب مستقیم حاصل از این بارندگی در زمان t به صورت تابع انتگرال پیچیدگی زیر است:

$$Q(t)=\int_0^t I(\tau)u(t-\tau)d\tau \qquad (1)$$

که در آن $u(t-\tau)$ تابع آب‌نگار واحد لحظه‌ای حوضه می‌باشد. شکل ۱- ب آب‌نگار واحد لحظه‌ای یک سامانه‌ی آبشناسی می‌باشد (نجفی ۱۳۸۱).



شکل۱-پیچیدگی‌های پیوسته یک حوضه‌ی آبخیز.

[1]- unit impulse

شکل ۱ نمودارهای زمان- مساحت توزیع زمان پیمایش نقاط مختلف حوضه را نشان می‌دهد. شکل ۲- الف منحنی خطوط همزمان یک حوضه را عرمی‌نماید. در شکل ۲- ب، نمودار زمان- مساحت حوضه قابل مشاهده است. بنپار[1] مساحت dA بعد از زمان $\tau-1$ رواناب خودش را در خروجی تخلیه کرده و واضح است که $0 \le \tau - 1 \le T_C$ و $0 \le A(\tau) \le A(T_C)$ طابق شکل ۲- الف یک بنپار dA دارای زمان پیمایش $t-\tau$ می‌باشد؛ لذا، اگر یک بارندگی موثر با شدت $I(\tau)$ برروی این بنپار ببارد، مقدار رواناب حاصل از آن در زمان t به صورت زیر می‌باشد:

$$dQ(t) = I(\tau)\,dA(t-\tau) \qquad (۱)$$

با انتگرال‌گیری از معادله‌ی بالا با شرط مرزی Q(0)=0 می‌توان نوشت:

$$Q(t) = \int_0^t \frac{dA(t-\tau)}{d\tau} I(\tau)\,d\tau \qquad (۲)$$

با مقایسه‌ی معادله ۳ و ۱ می‌توان نوشت:

(۳)

$$u(t-\tau) = \frac{dA(t-\tau)}{d\tau} \quad or \quad u(t) = h(t) = \frac{dA(t)}{dt}$$

که در آن A مساحت تجمعی مطابق با TAD[2] می‌باشد.

معادله‌ی ۴ نشان دهنده‌ی این است که مشتق نمودار زمان- مساحت یک حوضه آبخیز همان پاسخ حرکت واحد[3] حوضه، یا به عبارتی دیگر آب‌نگار واحد لحظه‌ای می‌باشد. حرکت واحد همان تابع دیراک یک ضربان با طول مدت خیلی کوتاه می‌باشد که مساحت آن یک واحد است. مطابق شکل ۴- ج می‌توان گفت که منحنی زمان- مساحت (TAC[4]) همان آب‌نگار واحد لحظه‌ای بوده و نمودار زمان- مساحت پاسخ گام واحد یک سامانه‌ی آبشناسی می‌باشد. پاسخ گام واحد، پاسخ یک بارش واحد با تداوم بی‌نهایت است که در آبشناسی آب‌نگار مجموع S نیز دارای همین خاصیت می‌باشد (نجفی ۱۳۸۱).

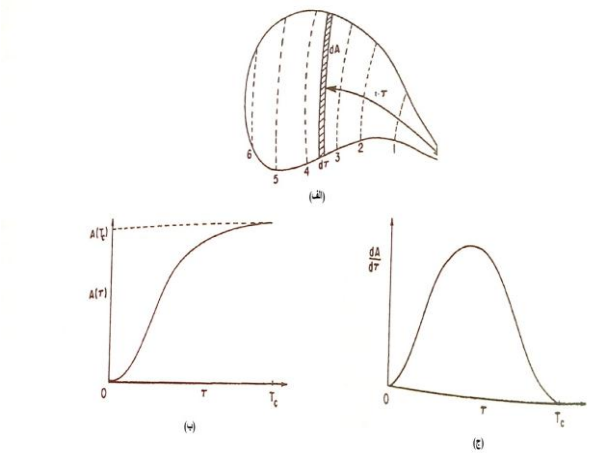
براساس معادله‌ی ۴ می‌توان گفت:

$$A(t) = \int_o^t u(\tau)\,d\tau \qquad (۴)$$

مطابق معادله‌ی۵ می‌توان گفت که نمودار زمان- مساحت (TA[5]) حوضه برابر سطح زیر نمودار آب‌نگار واحد لحظه‌ای است.

بطور کلی، در روش آب‌نگار واحد لحظه‌ای کلارک منحنی زمان- مساحت در داخل حوضه روندیابی شده و آب‌نگار واحد لحظه‌ای حوضه محاسبه می‌گردد و با تبدیل آن به آب‌نگار واحد حوضه و پیچیدگی آن در بارش مازاد می‌توان رواناب حوضه را محاسبه کرد. در روش مزبور نمودار زمان- مساحت به عنوان ورودی و آب‌نگار واحد لحظه‌ای به عنوان خروجی است.

در این تحقیق می‌توان از معادلات آب‌نگار واحد لحظه‌ای استفاده نمود و آنها را به نمودار زمان- مساحت تبدیل کرد؛ این موضوع نوآوری اصلی این پژوهش است. برای این منظور از روش آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش استفاده شده، و معادلات زمان- مساحت برای آن توسعه یافته است.



شکل۲- (الف) همزمان‌های حوضه (ب) نمودار مدت- مساحت (TA)(ج) منحنی زمان - مساحت(TAC)، (نجفی ۱۳۸۱).

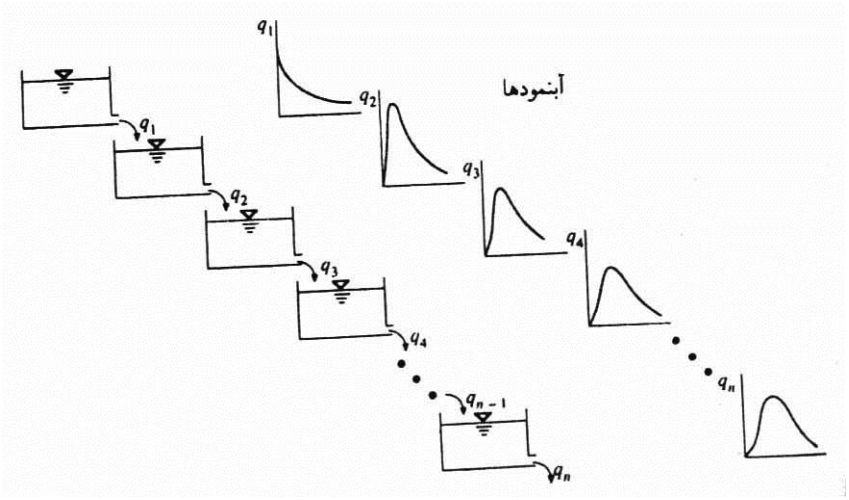
[1]- element
[2]- TAD
[3]- unit impulse response
[4]- TAC
[5]- time area

محاسبه‌ی نمودار زمان– مساحت با استفاده از آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش

ناش (۱۹۵۷) فرض نمود که حوضه‌های آبخیز از گروهی مخازن خطی متوالی مطابق شکل ۳ تشکیل گردیده‌اند، که خروجی هر مخزن به عنوان ورودی مخزن بعدی در نظر گرفته می‌شود. مقدار خروجی از مخزن nام همان آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش (NIUH) است که به صورت زیر می‌باشد:

$$u(t)=\frac{1}{k\Gamma_n}e^{(\frac{-t}{k})}\left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} \qquad (۵)$$

که در آن t زمان، n و k فراسنجهای شبیه ناش و Γ_n تابع گاما به‌شمار می‌رود.



شکل (۳) – مخازن پی در پی در شبیه ناش.

یکی ازمشکلات شبیه ناش محاسبه‌ی فراسنجهای n و k برای یک حوضه‌ی آبخیز است که معمولا از رویدادهای مشاهداتی، یا روش‌های زمین ریخت‌شناسی محاسبه می‌گردند. در این تحقیق پیشنهادهایی برای سهولت محاسبه این دو فراسنج در حوضه‌های فاقد آمار ارائه شده‌اند.

اگر مقادیر آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش مطابق معادله‌ی ۶ محاسبه گردد، براساس معادله ۵، و با کاربرد روش ذوزنقه‌ای می‌توان نمودار زمان- مساحت را از معادله‌ی زیر محاسبه کرد:

$$A(t)=\sum\frac{u(t-\Delta t)+u(t)}{2}\,\Delta t \qquad (۶)$$

Δt گام زمانی انتخاب شده در آب‌نگار واحد ناش می‌باشد.

تعیین فراسنج‌های شبیه ناش

برای محاسبه‌ی آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش باید فراسنجهای n و k برای حوضه محاسبه گردند. در زمینه‌ی تعیین این فراسنجها تحقیقات وسیعی انجام شده است. اگر مقادیر این فراسنجها برای حوضه‌های دارای آمار با استفاده از روش گشتاور محاسبه گردند، می‌توان از آنها در محاسبه‌ی NIUH[1]، و به دنبال آن نمودار زمان- مساحت استفاده نمود. در حوضه‌های فاقد آمار نیز می‌توان از روشهای دیگر، مانند شیوه‌های آب‌نگار واحد لحظه‌ای زمین ریخت‌شناسی[2] استفاده کرد (باس‌کار و همکاران، ۱۹۹۷؛ کومار و همکاران، ۲۰۰۷) یکی از روشهای تعیین نمودار زمان- مساحت حوضه‌های آبخیز استفاده از معادله‌ی مصنوعی زمان- مساحت ارائه شده به‌وسیله‌ی سازمان USACE(1990) است، که از این معادله در شبیه HEC- HMS نیز جهت محاسبه رواناب با کاربرد روش کلارک بهره‌وری می‌گردد. روش مزبور کاربرد وسیعی را در مطالعات آبشناسی داشته، و نتایج خوبی را در بیشتر حوضه‌های آبخیز عرضه می‌دارد. در این تحقیق نتایج کاربرد این شیوه را با نتایج روش ناش مقایسه کرده، و فراسنجهای ناش را بر اساس آن محاسبه می‌نماییم.

[1]- NIUH
[2]- GIUH

مقایسه‌ی نمودار زمان– مساحت با کاربرد روشهای NIUH و USACE (1990)

نمودار زمان- مساحت ارائه شده به‌وسیله‌ی USACE (1990) به صورت زیر است:

(۷)

$$\frac{A_t}{A}=\begin{cases}1.414(\frac{t}{t_c})^{1.5} & t\le\frac{t_c}{2}\\ 1-1.414(1-\frac{t}{t_c})^{1.5} & t\ge\frac{t_c}{2}\end{cases}$$

که درآن A_t مقدار مساحت تجمعی در زمان t و A مقدار مساحت کل حوضه و t_c زمان تمرکز حوضه می‌باشد.

مطابق معادله‌ی ۴، مقدار آب‌نگار واحد لحظه‌ای از مشتق معادله‌ی ۸ به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

(۸)

$$h(t)=\frac{\partial A(t)}{\partial t}=\begin{cases}2.12(\frac{t}{t_c})^{0.5} & t\le\frac{t_c}{2}\\ 2.12(\frac{1}{t_c})(1-\frac{t}{t_c})^{0.5} & t\ge\frac{t_c}{2}\end{cases}$$

که در آن $h(t)$ همان آب‌نگار واحد لحظه‌ای می‌باشد. مطابق معادله‌ی ۹ مقدار آب‌نگار واحد لحظه‌ای در زمان اوج $t_p=t_c/2$ به مقدار بیشترین $h_p=1.5$ می‌رسد. اگر معادله‌ی ۹ را با معادله‌ی ناش (معادله ۶) مقایسه گردد، می‌توان مقادیر n و k را محاسبه کرد.

مقدار زمان اوج در روش ناش برابر با $t_p=k(n-1)$ می‌باشد؛ اگر این زمان را در معادله‌ی ۶ قرار دهیم، مقدار بیشترین بده‌ی آب‌نگار واحد لحظه‌ای به محاسبه $h_p=\frac{1}{k(n-1)!}\left[(n-1)^{n-1}e^{-(n-1)}\right]$ می‌گردد. چنانچه مقادیر این دو روش با هم مساوی قرار گیرند، می‌توان نوشت:

$$t_p=k(n-1)=t_c/2 \qquad (۸)$$

$$h_p=\frac{1}{k(n-1)!}\left[(n-1)^{n-1}e^{-(n-1)}\right]=1.5 \qquad (۹)$$

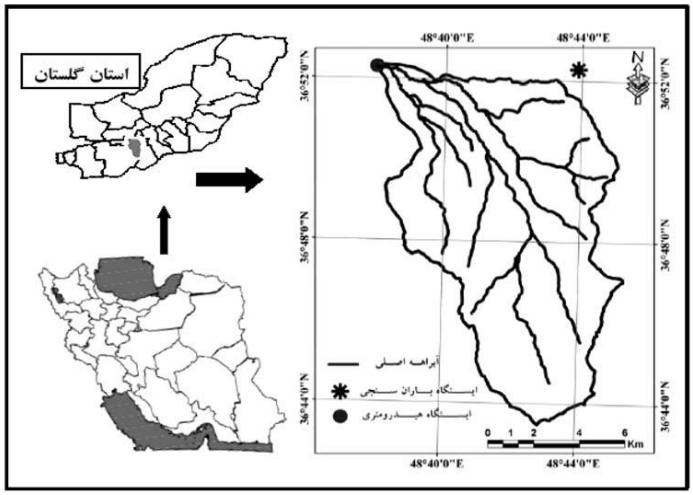
اگر مقدار $k=\frac{t_c}{2(n-1)}$ را از معادله‌ی ۱۰ در معادله ۱۱ قرار داده و معادله‌ی نهایی را حل کنیم، مقدار n=4.7 حاصل می‌گردد. با قرار دادن n=4.7 در معادله‌ی ۱۰ مقدار $k=\frac{t_c}{7.4}$ به‌دست می‌آید.

قابل توجه است که Hann et al. (1994) و Singh (2000) با مقایسه توزیع دو فراسنجی گاما با آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش مقدار n=4.71 را محاسبه نموده‌اند. در این تحقیق نشان داده می‌شود که مقادیر n=4.7 و $k=\frac{t_c}{7.4}$ نتایج مناسبی را در پیش‌بینی آب‌نگار واحد لحظه‌ای، و به دنبال آن نمودار زمان- مساحت خواهند داشت. قابل توجه است که نتایج به‌دست آمده براساس مقایسه مقادیر زمان و بده‌ی اوج بوده، و شکل آب‌نگار و نمودار زمان- مساحت در نظر گرفته نشده‌اند؛ لذا، در ادامه‌ی تحقیق، نتایج مربوط به شکل نمودار زمان مساحت در دو روش ناش و USACE(1990) نیز باهم مقایسه گردیده‌اند.

مطالعات موردی

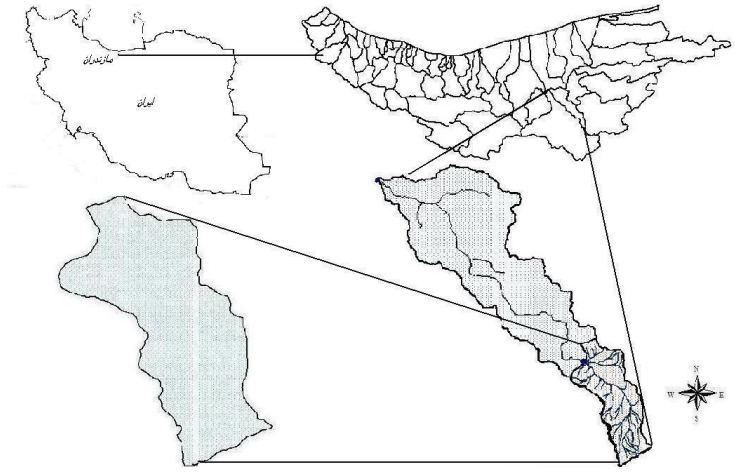
در ادامه‌ی تحقیق از اطلاعات و آمار مربوط به حوضه‌های آبخیز کسیلیان، جعفرآباد، و شورندیکا در ایران، و حوضه‌های آبخیز آجای (Ajay) و گودآوری (Godavar) در هندوستان استفاده شده، و منحنی زمان- مساحت محاسبه گردیده یا با کاربرد شبیه ناش برای این حوضه‌ها با نتایج نمودار زمان- مساحت حوضه‌های مزبور مقایسه می‌شود. از آن‌جا که نمودار زمان- مساحت به‌دست آمده از GIS دارای خطاست، در تحقیق حاضر این روش به عنوان مبنا در نظر گرفته می‌شود تا بتوانیم مقایسه‌ای را بین شیوه‌ی ناش و این روش داشته باشیم.

حوضه‌ی آبخیز جعفرآباد از زیرحوضه‌های گرگان رود با مساحتی در حدود ۱۱۰ کیلومتر مربع و رودخانه‌ای به طول ۲۱ کیلومتر، در ۲۵ کیلومتری جنوب شرق گرگان واقع بوده و در محدوده‌ی جغرافیایی طول $54^\circ45'$ و $54^\circ34'$ و عرض $36^\circ52'$ و $36^\circ42'$ قرار داشته،و دارای اقلیم مدیترانه‌ای با باران بهاره است. شکل ۴ موقعیت حوضه‌ی مزبور را نشان می‌دهد.



شکل(۴) : موقعیت حوضه‌ی جعفرآباد.

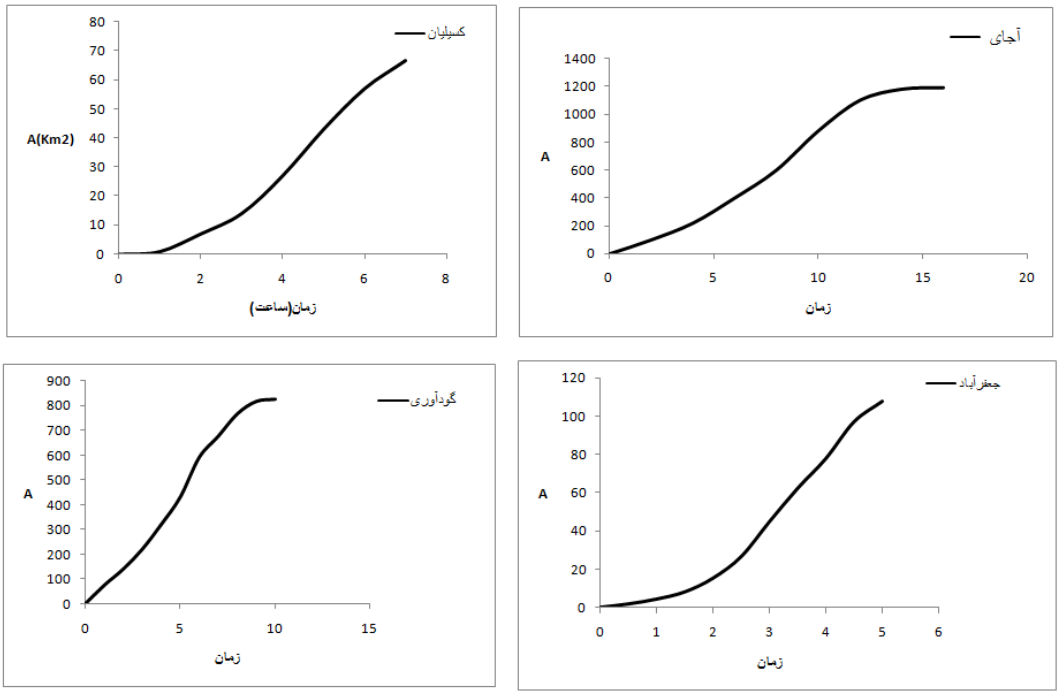
حوضه‌ی آبخیز کسیلیان با مساحت ۶۶/۷ کیلومتر مربع در استان مازندران و در حدود مختصات جغرافیایی طول ′53°10 و ′53°18 و عرض ′35°07 و ′35°58 قرار داشته، در منطقه‌ی زمین ساختی البرز واقع شده، اقلیم آن بر اساس نقشه‌ی اقلیمی ایران معتدل خزری بوده، و رودخانه‌ی اصلی آن تالار سربند است. شکل ۵ موقعیت حوضه‌ی کسیلیان را نشان می‌دهد (سبزواری و همکاران، ۲۰۱۳).



شکل(۵) : موقعیت حوضه‌ی کسیلیان.

حوضه آبخیز گودآوری در مرکز هندوستان قرار داشته و مساحتی را برابر با ۸۲۴/۷ کیلومتر مربع دارد؛ رودخانه اصلی آن گودآوری با طول ۶۴.۲۵ در مرکز آن کشور است.. حوضه‌ی آبخیز آجای در هندوستان و حد فاصل جغرافیایی: طول ′50°23 و ′06°24 و عرض ′16°86و ′05°87 قرار داشته، و مساحتی را برابر با ۱۱۹۱/۴ کیلومتر مربع دارد. رودخانه‌ی اصلی آن آجای در شمال شرقی هند است (کومار و همکاران ۲۰۰۲).

شکل ۶ نمودار زمان- مساحت‌های حوضه‌های تحقیقاتی مزبور را نشان می‌دهد. این نمودارها با استفاده GIS محاسبه شده اند.



شکل۶- نمودارهای زمان- مساحت حوضه‌های جعفر آباد، کسیلیان، گودآوری و آجای.

کومار و همکاران (۲۰۰۷) تحقیقات وسیعی را در حوضه‌ی آبخیز آجای انجام داده، و با استفاده از روشهای ناش و زمین ریخت‌شناسی کلارک به تخمین فراسنج‌های شبیه و سیلاب این حوضه پرداخته‌اند. براساس اطلاعات ارائه شده در حوضه‌های تحقیقاتی مقادیر فراسنج‌های شبیه ناش بر اساس روش گشتاور و زمین ریخت‌شناسی در جدول شماره‌ی ۱ ارائه گردیده‌اند.

جدول(۱): فراسنج‌های شبیه ناش برای حوضه‌های تحقیقاتی.

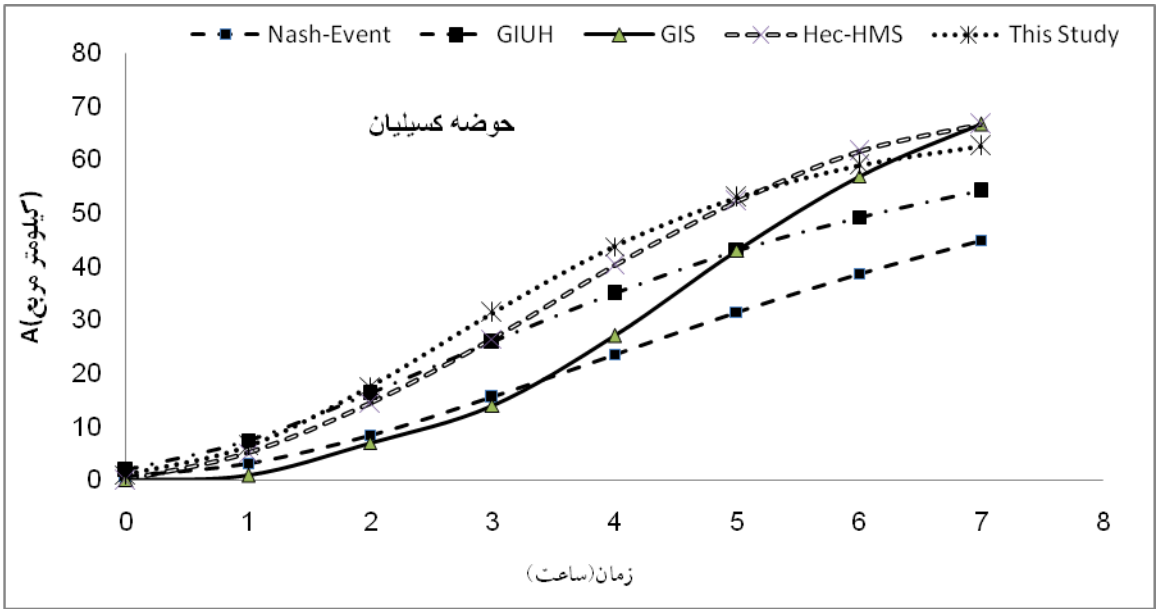
	Nash-GIUH		Nash-Event		$A(km^2)$	t_c
	n	k	n	k		
آجای	۴.۲۶۵	۲.۹۲	۴.۴۱۶	۲.۳۹	۱۱۹۱.۴	۱۶
گودآوری	۳.۶۳۷	۱.۹	۴.۰۵۷	۱.۹۳	۸۲۴.۷	۱۰
کسیلیان	۲.۸۳	۲.۷۳	۳.۳۹	۲.۰۴	۶۶.۷	۷
جعفرآباد	۳.۶۲	۰.۹۵	۳	۱.۱۹	۱۰۹.۴۸	۵

تخمین نمودار زمان– مساحت با کاربرد روش ناش

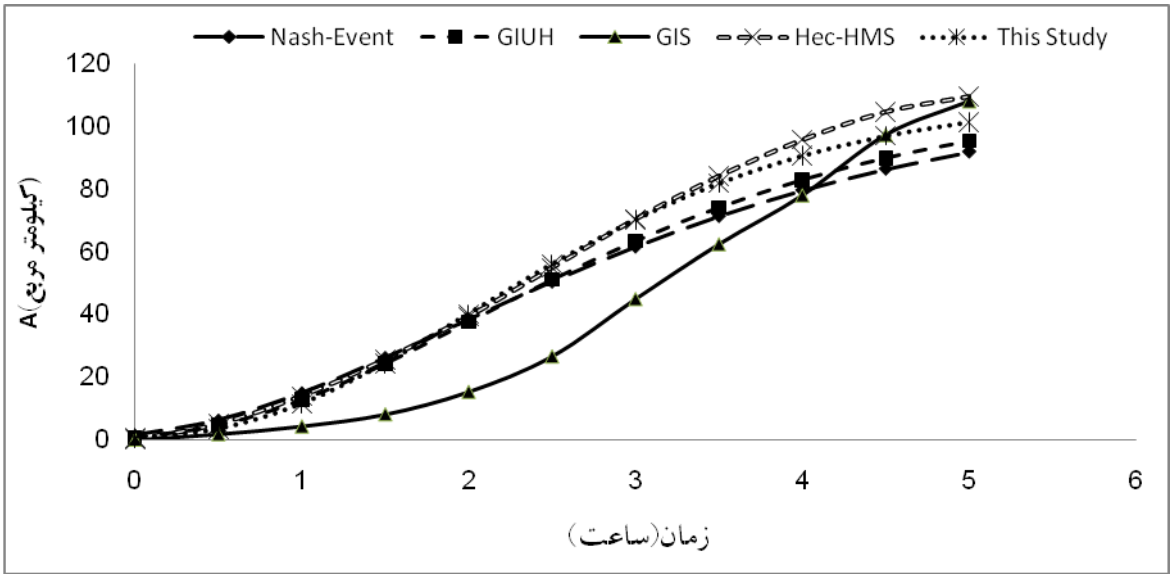
در این قسمت از تحقیق نمودار زمان- مساحت حوضه‌های آبخیز طرح مطالعاتی با کاربرد روش ناش محاسبه شده و با نتایج اصلی حوضه‌ها مقایسه می‌گردد. در روش ناش از سه سامانه‌ی فراسنجی برای محاسبه‌ی آب‌نگار واحد لحظه‌ای استفاده می‌شود، در گام نخست از اطلاعات زمین ریخت‌شناسی مطابق جدول ۱ استفاده می‌گردد که به آن Nash-GIUH می‌گوییم؛ در روش دوم از فراسنجهای به‌دست آمده با کاربرد روش گشتاور بهره‌وری گردیده (Nash-Event) ، و در روش سوم مقادیر n=4.7 و $k=\frac{t_c}{7.4}$ به عنوان فراسنج‌های ورودی شبیه ناش در نظر گرفته می‌شوند. در روش گشتاور نیازمند آب‌نگار سیلاب مشاهداتی، و همچنین باران‌نگار بارش مشاهداتی در حوضه می‌باشیم، که این مقادیر در حوضه‌های فاقد آمار موجود نیستند. در روش دوم فراسنجهای شبیه

براساس آب‌نگار واحد لحظه‌ای زمین ریخت‌شناسی ناش محاسبه می‌گردند که بسیار وقت‌گیر بوده و محاسبات پیچیده‌ای را دارد. مقادیر پیشنهادی در روش سوم قابل استفاده در حوضه‌های فاقد آمار می‌باشند، و تابعی از زمان تمرکز حوضه به‌شمار می‌روند که روشی ساده و کاربردی می‌باشد.

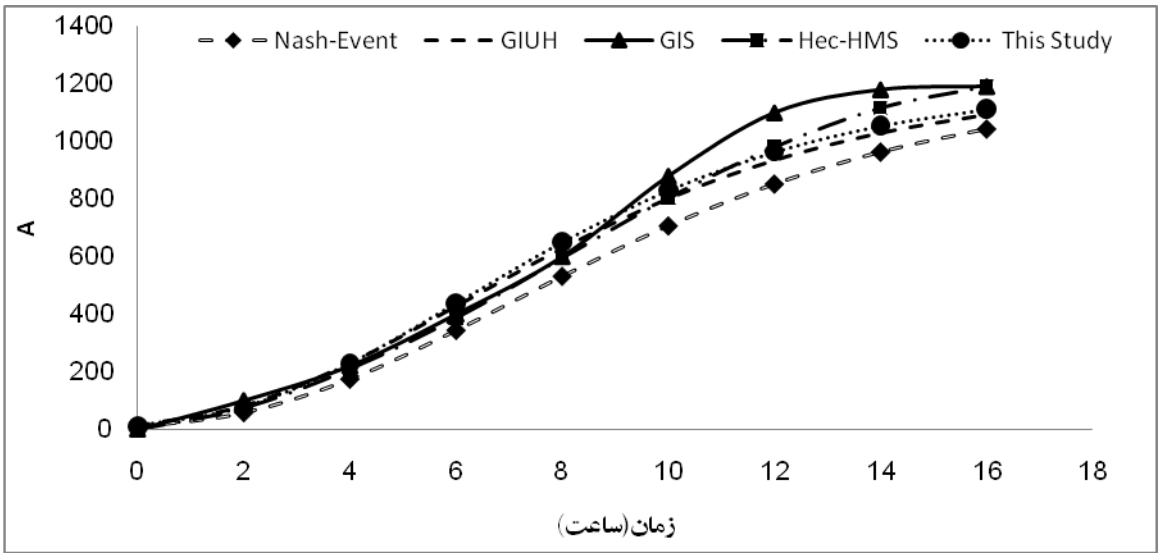
شکل‌های ۷ تا ۱۰ نتایج مربوط به پیش‌بینی نمودار زمان- مساحت را برای حوضه‌های تحقیقاتی با کاربرد روشهای مختلف نشان می‌دهند.



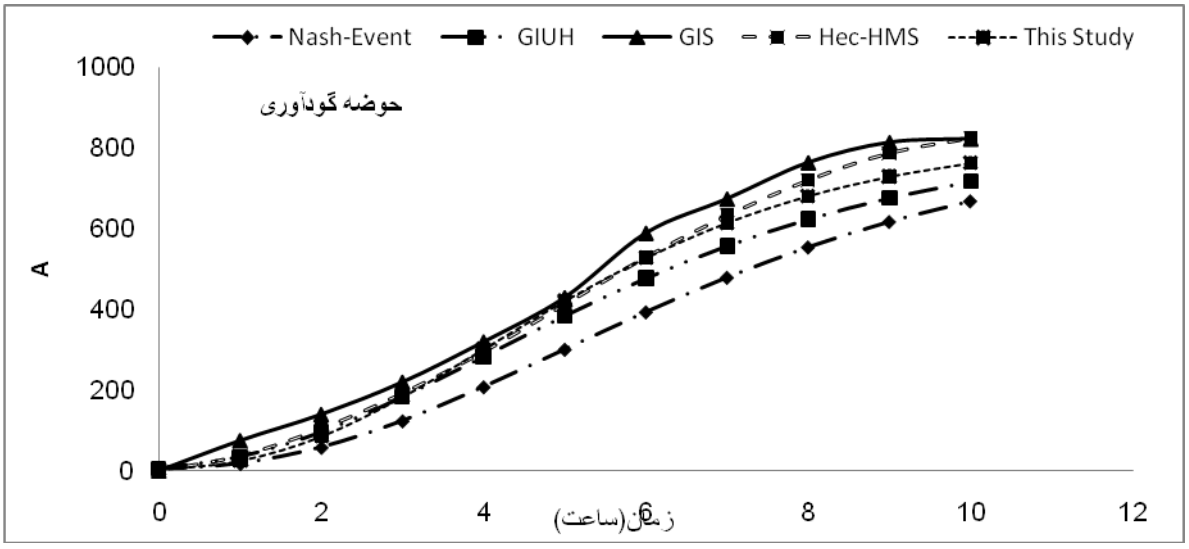
شکل۷- نمودار زمان- مساحت حوضه‌ی آبخیز کسیلیان.



شکل۸- نمودار زمان- مساحت حوضه‌ی آبخیز جعفراباد.



شکل۹- نمودار زمان- مساحت حوضه‌ی آبخیز آجای.



شکل۱۰- نمودار زمان- مساحت حوضه‌ی آبخیز گودآوری.

تعیین میزان خطای محاسباتی نمودار زمان- مساحت

برای تعیین میزان خطای هر روش، نمودار زمان- مساحت به‌دست آمده از GIS را به عنوان مبنا قرار داده و شکل آب‌نگار زمان- مساحت را با یکدیگر مقایسه می‌نماییم. برای این منظور از عامل کارایی ناش به صورت زیر استفاده می‌گردد:

$$CE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n}[A_o - A_s]^2}{\sum_{t=1}^{n}[A_o - \overline{A_o}]^2} \quad (۱۰)$$

که در آن CE ضریب کارایی شبیه، A_O مساحت حوضه‌ی مبنا، A_S مساحت حوضه‌ی محاسبه شده، و $\overline{A_o}$ متوسط مساحت حوضه‌ی مشاهداتی در طول زمان، و n تعداد مساحت‌ها، و t زمان است.

جدول (۲) : شاخص کارایی روش‌های مختلف تعیین نمودار زمان- مساحت.

روش / حوضه	آجای	گودآوری	کسیلیان	جعفرآباد	متوسط
پژوهش حاضر	0.965	0.957	0.782	0.788	0.873
GIUH	0.949	0.885	0.858	0.848	0.885
Hec-HMS	0.982	0.983	0.869	0.772	0.902
Nash-Event	0.752	0.686	0.752	0.838	0.757

ستون ششم جدول ۲ متوسط ضریب کارایی را برای هر روش نشان می‌دهد. نتایج شبیه پیشنهادی ناش بر اساس مقادیر n=4.7 و $k=\frac{t_c}{7.4}$ برای حوضه‌های آجای و گودآوری بسیار مناسب بود، و فراسنجهای شبیه نسبت به روش گشتاور و GIUH جوابهای را مناسبتری نشان داد. در حوضه‌های کسیلیان و جعفرآباد، نتایج حدود ۰.۷۸ می‌باشند، که این مقدار به ضریب کارایی روشهای دیگر بسیار نزدیک بود.

یکی از ایرادهای روش ارائه شده در این تحقیق، محاسبه‌ی کمتر که مساحت در زمان تمرکز، از مساحت کل حوضه می‌باشد.

در ادامه تحقیق به ارزیابی نمودار زمان- مساحت ناش پرداخته می‌شود. برای این منظور باید از یک شبیه بارندگی- رواناب برای تبدیل نمودار زمان- مساحت به رواناب استفاده کرد. بهترین شبیه برای این منظور شبیه کلارک باشد چون می‌توان آن نمودار زمان- مساحت را به راحتی به رواناب مستقیم حوضه تبدیل کرد.

معادله‌ی روندیابی نمودار زمان- مساحت داخل حوضه با کاربرد روش کلارک به صورت زیر است:

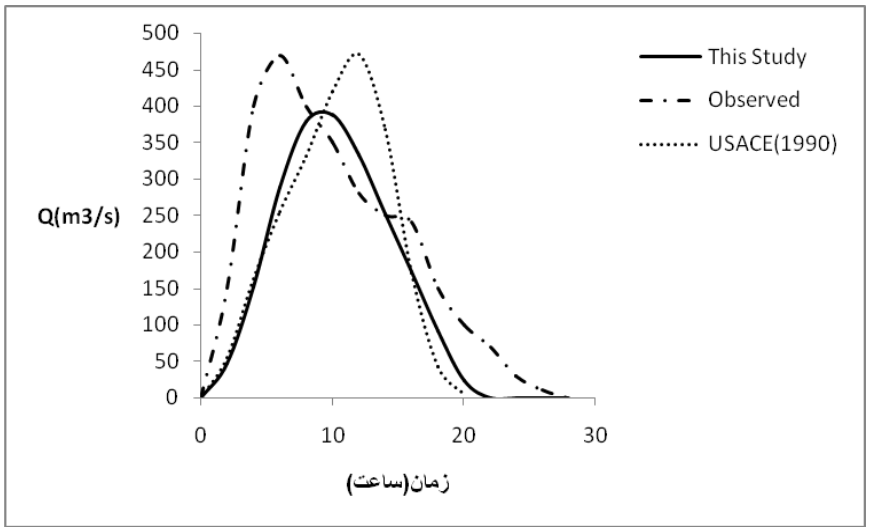
$$Q_i = c(\bar{I}_i) + (1-c)Q_{i-1} \quad (۱۱)$$

که در آن Q بده‌ی آب‌نگار واحد لحظه‌ای کلارک، $\bar{I}_i$ مقادیر نمودار زمان- مساحت، و c از طریق معادله زیر محاسبه می‌گردد:

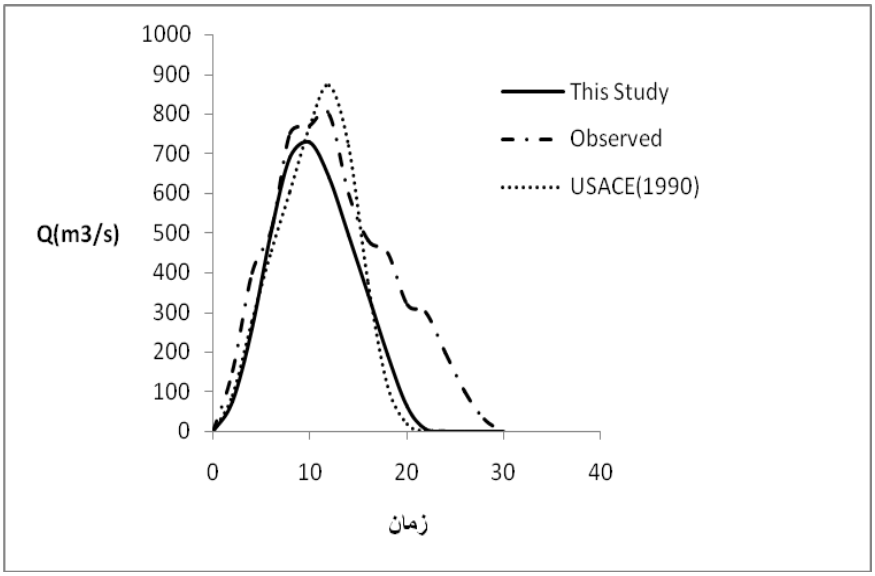
$$c = \frac{2\Delta t}{2k + \Delta t} \quad (۱۲)$$

که در آن k ضریب ذخیره‌ی کلارک می‌باشد. با توجه به‌وجود اطلاعات در ایستگاه آبسنجی در حوضه‌ی کسیلیان و آجای به پیش‌بینی رواناب مستقیم این حوضه پرداخته می‌شود.

شکل ۱۱ و ۱۲ آب‌نگار رواناب ناشی از نمودار زمان- مساحت ناش را برای حوضه‌ی آبخیز آجای نشان می‌دهد.

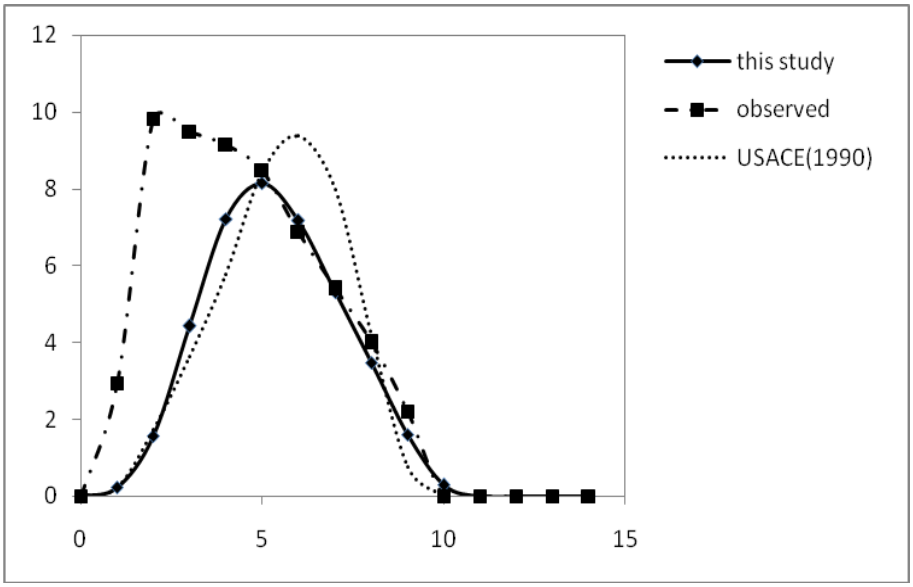


شکل۱۱- مقایسه آب‌نگارهای رواناب محاسباتی و مشاهداتی حوضه‌ی آبخیز آجای- رویداد ۲.



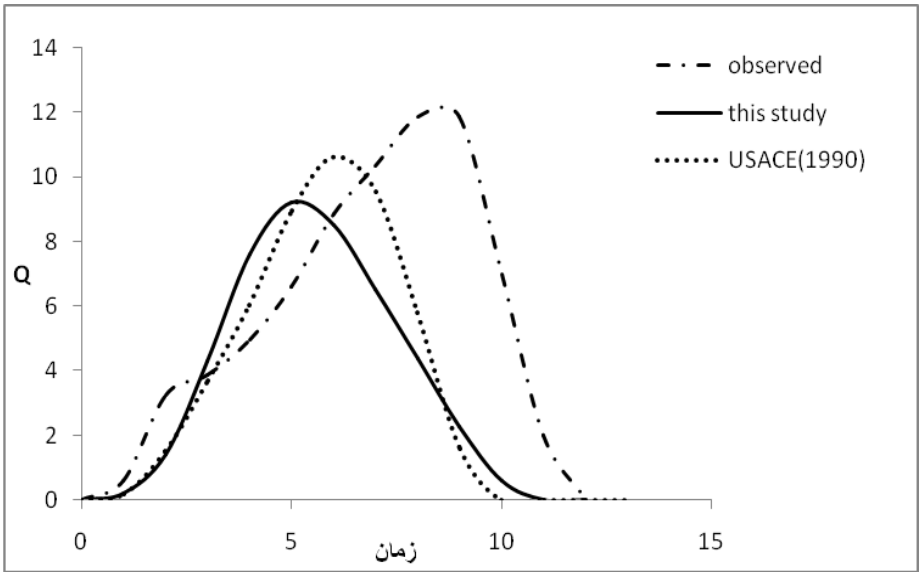
شکل۱۲- مقایسه آب‌نگارهای رواناب محاسباتی با مشاهداتی حوضه‌ی آبخیز آجای- رویداد۳.

مطابق این دو شکل، نمودار زمان- مساحت ناش و USACE(1990) با استفاده از روش کلارک به رواناب مستقیم حوضه تبدیل گردیده، و با مقادیر بده‌ی مشاهداتی مقایسه شده است. شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مقادیر رواناب مستقیم حوضه‌ی کسیلیان را در تاریخ‌های ۱۳۷۰/۳/۳ و ۱۳۷۳/۷/۳ نشان می‌دهند.



شکل۱۳-مقایسه‌ی آب‌نگارهای رواناب حوضه‌ی کسیلیان.

تاریخ: ۱۳۷۰/۳/۳



شکل۱۴- مقایسه‌ی آب‌نگارهای رواناب حوضه‌ی کسیلیان.
تاریخ: ۱۳۷۳/۷/۳

نتیجه‌گیری

مهمترین هدف این تحقیق ارائه‌ی شیوه‌ای بود که بتوان برپایه‌ی کلیه روشهای آب‌نگار واحد لحظه‌ای نمودار زمان- مساحت را محاسبه کنیم. برای این منظور روش ناش انتخاب گردید. فراسنجهای شبیه ناش نیز تنها توابعی از زمان تمرکز حوضه می‌باشند. روش مزبور برای حوضه‌های آبخیز کسیلیان و جعفر آباد در ایران، و حوضه‌های آجای و گودآوری در هندوستان به کار گرفته شد.

در تبدیل آب‌نگار واحد لحظه‌ای ناش به نمودار زمان- مساحت اثر ذخیره منظور نگردیده است. مقادیر n=4.7 و $k=\frac{t_c}{7.4}$ به عنوان فراسنجهای شبیه ناش برای حوضه‌های فاقد آمار در نظر گرفته شدند. گرچه نتایج به‌دست آمده از این روش در مقایسه با نمودار زمان- مساحت حوضه‌های آبخیز از دقت بسیار مناسبی برخوردارند، یکی از ایرادهای آن این است که مقدار مساحت تجمعی محاسبه شده در زمان تمرکز کمتر از مساحت کل حوضه می‌باشد؛ این امر یکی از دلایل کاهش ضریب کارایی بود. ضریب کارایی نمودار محاسباتی برای حوضه‌های آجای و گورآوری حدود ۰.۹۶ برآورد گردید که بسیار مناسب بودند؛ این مقدار برای حوضه‌های کسیلیان و جعفر آباد ۰.۷۸ بود که قابل قبول بودند. عدد n=4.7 قبلا در این تحقیق به‌وسیله‌ی عده‌ای از دانشمندان به عنوان یک پیشنهاد شده است؛ این مقدار از مقایسه‌ی روش ناش با شیوه‌ی نمودار USACE(1990) به‌دست آمده است. مقایسه نتایج تنها برپایه‌ی زمان اوج و بده‌ی اوج بوده، ولی نتایج به‌دست آمده برای ترسیم نمودار زمان- مساحت در هر دو روش بسیار به هم نزدیک بودند. فراسنجهای شبیه ناش با کاربرد روش زمین ریخت‌شناسی نتایج بهتری را در محاسبه‌ی نمودار زمان- مساحت نسبت به فراسنجهای روش گشتاور داشتند. این نتیجه نشان دهنده‌ی اهمیت روشهای زمین ریخت‌شناسی در حوضه‌های فاقد آمار است. آب‌نگار رواناب مستقیم حوضه‌های آجای و کسیلیان نیز با کاربرد روش کلارک محاسبه گردید. نتایج آب‌نگار سیلاب روش ناش با با کاربرد شیوه‌ی USACE(1990) به هم نزدیک بودند. خطای اوج آب‌نگار محاسباتی در حوضه‌ی کسیلیان در تاریخ ۷۳/۷/۳۰ برابر با ۰.۲۲، و برای تاریخ ۷۰/۳/۳ برابر با ۰.۱۴ بود که مقادیر مناسبی به‌شمار می‌روند. این خطا برای دو رویداد در حوضه‌ی آجای برابر با ۴ تا ۱۷.۵ درصد بودند. پیشنهاد می‌گردد که این روش برای حوضه‌های آبخیز دیگری مورد بررسی قرار گیرد .

تشکر و قدردانی

مقاله مزبور نتیجه طرح تحقیقاتی با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد استهبان بوده است.

منابع

۱. سبزواری، ت.، ۱۳۸۹، پیش‌بینی آب‌نگار واحد لحظه‌ای زمین ریخت‌شناسی حوزه‌های آبخیز بر اساس روش همانند سازی پاسخ جریان سطحی و زیر سطحی دامنه-های مرکب، پایان نامه دکترای عمران آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران.

۲. شکوهی، ع . وب. ثقفیان . ۱۳۸۵. مقایسه روش‌های استخراج خطوط همزمان پیمایش برای استفاده در روش روندیابی زمان- مساحت، مجله تحقیقات منابع آب ایران، زمستان ۱۳۸۵; ۲(۳ (مسلسل ۶)):۳۹-۵۰.

۳. شکوهی، ع . وب. ثقفیان . ۱۳۸۶ . تولید خطوط همزمان پیمایش جریان های همگرا به منظور استفاده در روش زمان - مساحت، مجله تحقیقات منابع آب ایران، زمستان ۱۳۸۶; ۳(۳ (مسلسل ۹)):۲۰-۲۹.

۴. نجفی، محمد رضا.۱۳۸۱. سیستم های هیدرولوژیکی، شبیه سازی بارندگی- رواناب، جلد۲ و۱، انتشارات دانشگاه تهران

5. Ajward, M.H., and I. Muzik. 2000. A spatially varied unit hydrograph model. J. Environ. Hydrol. 8: 1-8.
6. Bhaskar, N.R., B.P. Parida, and A.K. Nayak. 1997. Flood estimation for ungauged catchments using the GIUH. J. Water Res. Pl. Asce. 123: 228–238.
7. Clark, C.O.1945. Storage and the unit hydrograph. Trans. Am. Soc. civil Eng. 110: 1419-1488.
8. Kumar, R., C. Chatterjee, R.D. Singh, A.K. Lohani, and S. Kumar .2007. Runoff estimation for an ungauged catchment using geomorphological instantaneous unit hydrograph (GIUH) models. Hydrol. Process. 21: 1829–1840.
9. Kumar, R, C. Chatterjee, A.K. Lohani, and S. Kumar. 2002. Sensitivity analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. Water Resour. Manag. 16: 263–278
10. Maidment, D.R. 1993. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS. Proc. of HydroGIS 93, IAHS Publ. No. 211.
11. Nash, J.E. 1957. The form of instantaneous unit hydrograph. Int. Assoc. Sci. Hydrol. Public. 45:114–121.
12. Ponce, V.M. 1989. Engineering hydrology: Principle and Practice. Prentice Hall.
13. Pilgirim, D.H. 1977. Isochrones of travel time and distribution of flood storage from a tracer study on a small watershed. J. Water Resour. Res. 13: 587-595.
14. Sabzevari, T., M.H. Fattahi, R. Mohammadpour, and S. Noroozpour. 2013. Prediction of catchment's surface and subsurface flow using GIUH model. J. Flood Risk Manage. 6: 135–145.
15. Singh, V.P. 1996. Kinematic wave modeling in water resources. Surface water Hydrol. p.28-33.
16. Saghafian, B., and P.Y. Julien. 1995. Time to equilibrium for spatially variable watersheds. J. Hydrol. 172: 231-245.
17. Saghafian, B., P.Y. Julien, and F.L. Ogden. 1995. Similarity in catchment response. 1. Stationary rainstorms. Water Resour. Res. 31:1533–1541.
18. USACE (2003), User's Manual, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, HEC-HMS, V, U.S.Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, California, USA, www.hec. usace. army. mill