



## ارزیابی روش ترکیبی دکانولوشن - الگوریتم ژنتیک در استخراج نمودار زمان-مساحت

محمد محمدی هاشمی<sup>۱</sup>، بهرام ثقفیان<sup>۲\*</sup>، محمود ذاکری نیری<sup>۳</sup> و محسن نجارچی<sup>۱</sup>

۱- گروه مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک، ایران

۲- گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- گروه مهندسی عمران، واحد اسلامشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، اسلامشهر، ایران.

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۲۹

بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۰۷

پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۱

ارائه آنلاین: ۱۴۰۲/۰۳/۰۲

### کلمات کلیدی:

زمان-مساحت

دکانولوشن-الگوریتم ژنتیک

بهینه سازی

بارش-رواناب

حوضه آبریز

**خلاصه:** رواناب را می‌توان به صورت ساده، حاصل رفتار حوضه در برابر رخداد بارش باران دانست. تحقیقات مختلفی به منظور استحصال روش مناسب در تعیین رفتار و تعیین دقیق‌ترین پاسخ از حوضه صورت پذیرفته است. در اکثر این تحقیقات، مدل‌های مورد استفاده، از جمله مدل‌های مبتنی بر موج سینماتیک، نیاز به داده‌های ورودی با جزئیات زیاد همچون مشخصات پوشش، مقدار شیب، رطوبت پیشین و نفوذپذیری خاک در حوضه دارد. لذا در این تحقیق با هدف تسهیل در استخراج پاسخ هیدرولوژیک حوضه، یک مدل استخراج نمودار زمان-مساحت به روش بهینه‌سازی با بهره‌گیری از روش دکانولوشن و الگوریتم ژنتیک ارایه شد و نتایج آن در حوضه‌های تئوریک و واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت. در مدل این تحقیق مجموعه رخدادهای بارش و هیدروگراف مشاهداتی متناظر در قالب ماتریس به عنوان ورودی مدل فراخوانی شده سپس با اجرای دکانولوشن و بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک، مجموعه نمودارهای زمان-مساحت متناظر حاصل شد. نتایج نشان داد که دقت مدل این تحقیق در برآورد پاسخ یک حوضه تئوریک فرضی، ۹۹ درصد بوده در حالی که روش مستقیم برابر ۷۴ درصد بوده است. دقت مدل در برآورد پاسخ حوضه هندسی وی-شکل و حوضه واقعی والنات گالچ به مقدار میانگین ۹۹ درصد رسید. از این رو با توجه به کارایی مدل معرفی شده این تحقیق در تعیین نمودار زمان-مساحت حوضه وی-شکل، پیش بینی می‌گردد می‌تواند در سایر حوضه‌ها مورد استفاده قرار گیرد.

### ۱- مقدمه

یک سری نواحی تقسیم شده که در آن‌ها زمان پیمایش رواناب تا خروجی حوضه با هم برابر است. نمودار مقدار مساحت هر یک از نواحی در مقابل زمان پیمایش، توسط هیستوگرام زمان-مساحت بیان می‌شود. با استفاده از این نمودار و هایتوگراف بارش و بهره‌گیری از انتگرال پیچیده (کانولوشن)، هیدروگراف رواناب خروجی تعیین می‌گردد.

با فرض اینکه نمودار زمان-مساحت، بیان فرآیند پاسخ حوضه به یک رخداد بارش بوده و رفتار حوضه را در تولید رواناب با توجه به هایتوگراف بارش بیان می‌کند، می‌توان به روش‌های مختلفی این تابع پاسخ را استخراج نمود. در یک مطالعه، به بررسی شش نوع از تکنیک‌های دکانولوشن پرداخته شده است. از جمله این تکنیک‌ها تبدیل فوریه، شناسایی سیستم، بهینه‌سازی محدود، بیشینه آنتروپی، الگوریتم ژنتیک بوده است. این تحقیق با بررسی ۵۰۰ سری داده و معلوم بودن تابع پاسخ و کسب خروجی هر یک از روش‌ها و در نهایت مقایسه با مقدار معلوم و تعیین خطا انجام شده است که نتایج حاصل از بررسی روش‌ها، حاکی از عملکرد بسیار ضعیف روش تبدیل فوریه است. در بررسی مذکور بهترین الگوریتم از لحاظ عملکرد کلی، روش بیشینه

یکی از پدیده‌های مهم در چرخه آب، تبدیل بارش به رواناب است. در شبیه‌سازی این پدیده مدل‌های مختلف هیدرولوژیکی ارایه شده است، به طوری که می‌توان این مدل‌ها را به دو دسته فیزیکی و مجرد طبقه بندی نمود. مدل‌های فیزیکی شامل مدل‌های مقیاسی است که نشان دهنده سیستم در مقیاس کوچکتری است و مدل‌های تشابهی از سیستم فیزیکی دیگری استفاده می‌کنند که خصوصیات مشابه نمونه اصلی را دارا است. در مدل‌های مجرد، مدل با روابط ریاضی بیان می‌گردد. در این مدل‌ها متغیرهای ورودی و خروجی می‌توانند تابع زمان و یا مکان یا هر دو باشند. همچنین متغیرها می‌توانند احتمالی یا تصادفی باشد [۱]. یکی از روش‌هایی که برای تعیین رواناب خروجی حوضه به کار برده می‌شود، روش زمان-مساحت بوده که حالت پیشرفته‌تر روش استدلالی است؛ با این تفاوت که شدت بارش در ساعت‌های مختلف، متفاوت است [۲]. در این روش حوضه به

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: b.saghafian@gmail.com



پذیری ارایه شده است که تا کنون این مفهوم مورد بررسی قرار نگرفته است. استخراج عامل انتگرال پیچیده در این تحقیق با بهره گیری از الگوریتم ژنتیک انجام شده است و نتایج آن توسط دو شاخص نش-ساتکلیف و میزان نوسان مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲-۱- انتگرال پیچیده (کانولوشن)

با فرض حوضه به عنوان یک سیستم، مطابق با پاسخ ضربه‌ای یک سیستم خطی، چنانچه سیستمی یک ورودی به میزان واحد دریافت کند که به طور لحظه‌ای به کار رفته است، پاسخ سیستم در زمان  $t$ ، با پاسخ ضربه‌ای واحد  $u(t-\tau)$  بیان می‌شود که  $t-\tau$  زمان پاسخ سیستم در زمان تاخیر از لحظه به کار گرفتن ضربه است. اگر  $I(\tau)$  ورودی سیستم و  $d\tau$  فاصله زمانی بینهایت کوچک باشد، در نتیجه خروجی سیستم که بعد از زمان  $t-\tau$  از این ورودی ناشی می‌شود، برابر با  $I(\tau)u(t-\tau)d\tau$  خواهد بود. پاسخ به ورودی کامل تابع زمانی  $I(\tau)$  را می‌توان با انتگرال از پاسخ به ضربه‌های تشکیل دهنده آن مطابق انتگرال موجود در رابطه (۱) به دست آورد. این عبارت که انتگرال کانولوشن نام دارد، معادله اصلی برای حل یک سیستم خطی بر یک مقیاس زمان پیوسته است [۱].

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

مفهوم کانولوشن را می‌توان به صورت گسسته نیز بیان نمود. بر این اساس، هنگامی که متغیر ورودی سیستم  $(P_m)$  و پاسخ سیستم  $(U_{n-m+1})$  مشخص باشد، خروجی سیستم  $(Q_n)$  از معادله کانولوشن گسسته مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱].

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{n-m+1} \quad (2)$$

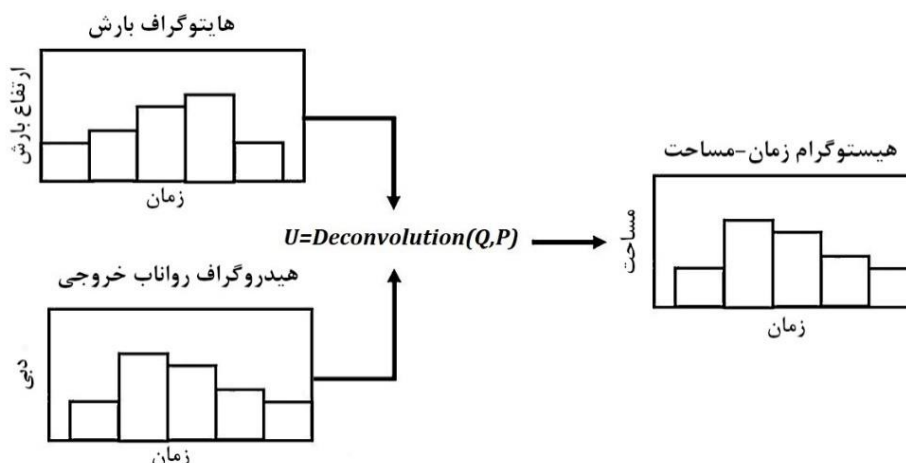
در معادله ۲، شرایط  $0 \leq n \leq P$  برقرار بوده به طوری که  $|P|$  طول است (و همچنین به طور مشابه برای  $U$  و  $Q$ ). بر این اساس توضیحات فوق، در یک حوضه می‌توان هایتوگراف بارش مازاد را به عنوان ماتریس  $P$ ، نمودار زمان-مساحت در نقش پاسخ حوضه به عنوان ماتریس  $U$  و هیدروگراف رواناب خروجی حوضه را به عنوان ماتریس  $Q$  در نظر گرفت.

آنتروپی بوده است [۳]. اخیراً استفاده از الگوریتم ژنتیک در تحقیقات بسیاری چه در بحث هیدرولوژی و چه در سایر مباحث علوم آب مورد استفاده قرار گرفته است [۴-۶]. الگوریتم ژنتیک به عنوان ابزار بهینه‌سازی با ترکیب با سایر روش‌ها همچون مدل فازی به تعیین پاسخ مدل‌های کالیبراسیون بارش-رواناب به کار رفته است [۷] و یا به تنهایی جهت کالیبراسیون معادلات موج سینماتیک به کار گرفته شده است [۸]. استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان مدل بهینه‌سازی و یک مدل تکمیلی برای سایر مدل‌های نرم‌افزاری هم توانسته با موفقیت عمل کند [۹]. انعطاف مدل‌های مبتنی بر الگوریتم ژنتیک، کاربرد فراوان آن و همچنین عملکرد مطلوب آن را به همراه داشته است، به طوری در یک بررسی در تعیین دبی سیلاب در مقایسه با سایر مدل‌ها همچون مدل شبکه عصبی و نیز مدل ترکیب خوشه بندی کاشی و مدل ANFIS عملکرد بهتری داشته است [۱۰].

با توجه به سیر پیشرفت روش زمان-مساحت تمایل محققان به این مدل، مطالعات مختلفی در ارایه روش مناسب در تعیین نمودار زمان-مساحت شده است [۱۱-۱۶]. استفاده از مدل موج سینماتیک به عنوان مبنای محاسباتی این روش، دقت و کارایی خود را نشان داده است [۱۲، ۱۷]. موج سینماتیک هم می‌تواند به منظور روندیابی جریان مشابه روش ماسکینگام-کانج عمل نماید [۱۸]. هم می‌تواند جهت تهیه رواناب مستقیم حوضه مورد استفاده قرار گیرد [۱۹]. اما نیاز اغلب این مدل‌ها به اطلاعات دقیق حوضه، کارایی مدل زمان-مساحت را وابسته به وجود پارامترهای هیدرولوژیکی حوضه نموده است [۱۶]. همچنین نیاز مدل‌های مذکور به بررسی سایر فرآیندهای موثر بر تولید رواناب، همچون پدیده نفوذ عمقی، تبخیر و تعرق و سایر فرآیندها موجب شده است کار با این نوع مدل‌ها با محدودیت و دشواری همراه گردد. از این رو وجود یک روش سریع در تعیین نمودار زمان-مساحت که با حداقل داده‌های مورد نیاز بتواند از دقت مناسب برخوردار باشد احساس گردید. لذا با استفاده از الگوریتم ژنتیک، یک مدل در تهیه نمودار زمان-مساحت با استفاده از داده‌های بارش-رواناب ارایه گردیده و مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲- مواد و روش‌ها

مدل مورد استفاده در این تحقیق بر اساس عکس روش انتگرال پیچیده بنا شده است. به بیان دیگر، در الگوریتم مدل پیشنهادی، عامل ایجاد انتگرال پیچیده که همان منحنی زمان-مساحت است، با استفاده از ورودی‌های مدل شامل هیدروگراف رواناب خروجی و هایتوگراف بارش حوضه تعیین می‌گردد. بر اساس شرح عملکرد مدل، در این تحقیق مفهومی به نام دکانولوشن



شکل ۱. روش الگوریتم اجرای مساله در تحقیق حاضر [۱۵]

Fig. 1. Research problem implementation algorithm [15]

$$U = deconv(Q, P) \quad (3)$$

روندنمای الگوریتم اجرای مدل این تحقیق در شکل ۱ ارایه شده است.

### ۲-۳- دکانولوشن پذیری

یکی از نتایج این تحقیق که در اثر بررسی دقیق تبدیل‌ها به روش مستقیم حاصل گردید، پدیده‌ای به نام دکانولوشن پذیری ماتریس‌ها به روش مستقیم است. این موضوع بیانگر این است که اگر یک ماتریس دقیقاً حاصل انتگرال کانونولوشن دو ماتریس دیگر باشد، به روش مستقیم می‌توان ماتریس پاسخ سیستم را استخراج نمود و پس از تعیین ماتریس پاسخ سیستم، با کانونولوشن آن با ورودی سیستم، ماتریس خروجی سیستم دقیقاً به شکل اولیه به دست می‌آید. اما اگر دو ماتریس فرضی را به عنوان ماتریس‌های ورودی و خروجی سیستم فرض کرد، به احتمال نزدیک به صفر می‌توان پاسخ سیستم را با روش مستقیم استخراج نمود، زیرا که از یک درایه‌ی خاص ماتریس به بعد، درایه‌های تعیین شده بعدی ناصحیح است به طوری که پس از تعیین کامل ماتریس پاسخ، با کانونولوشن آن با ورودی سیستم، ماتریس خروجی حاصل، با ماتریس خروجی فرضی اولیه یکسان نخواهد بود و در درایه‌های اولیه انطباق دقیق و در چند درایه بعدی آن تفاوت بین دو ماتریس

### ۲-۲- استخراج عامل انتگرال پیچیده (دکانولوشن)

در صورتی که رواناب خروجی حوضه ( $Q$ ) و بارش مازاد حوضه ( $P$ ) مشخص باشد، با استفاده از حاصل کانونولوشن و یکی از عوامل ایجاد کانونولوشن، تعیین هیستوگرام زمان-مساحت به عنوان پاسخ سیستم، می‌تواند صورت پذیرد که این عمل، دکانولوشن نام دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین ماتریس زمان-مساحت وجود دارد. این روش‌ها به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم شده است. در روش مستقیم، با استفاده از معادله ۲، با معلوم بودن  $Q_0$  و  $P_0$ ، درایه اول ماتریس زمان-مساحت ( $U_0$ ) به دست می‌آید. با استفاده از این درایه و جایدهی آن در جمله دوم ماتریس، درایه دوم ماتریس پاسخ به دست می‌آید. به همین ترتیب سایر درایه‌های مجهول ماتریس، تعیین می‌گردد.

با توجه به جمله اول معادله (۲)، در روش مستقیم، به علت آن که درایه اول ماتریس زمان-مساحت حاصل تقسیم درایه اول ماتریس رواناب ( $Q_0$ ) بر درایه اول ماتریس بارش ( $P_0$ ) بوده، در صورت صفر بودن مقدار  $P_0$ ، نمی‌توان پاسخی برای  $U_0$  تعیین نمود. از این جهت، این موضوع را می‌توان یکی از محدودیت‌های دکانولوشن به روش مستقیم دانست.

در نرم افزار مدل‌سازی متلب فرآیند دکانولوشن مستقیم توسط تابع (۳)، برای تعیین ماتریس زمان-مساحت ( $U$ )، با استفاده از دو ماتریس رواناب خروجی حوضه ( $Q$ ) و بارش مازاد حوضه ( $P$ ) حاصل می‌گردد.

گردید، مدل دارای نتایج یکنواخت و تقریباً ثابت در شرایط ثابت مولفه‌های ورودی است و به بیان دیگر مدل دارای جواب‌های همگرا است.

#### ۲-۵- تعیین تابع هدف

پس از تعیین الگوریتم اجرای مدل، تعریف تابع هدف بسیار مهم بوده، به طوری که با انتخاب نادرست تابع هدف، پاسخ‌های واگرا و نامعقول حاصل می‌گردد. تابع هدف در این تحقیق برابر کمینه سازی مقدار هزینه بوده که برای این منظور توابع مختلفی بررسی شد. در این تحقیق در ابتدا تابع درصد خطا در اکسترمم مورد ارزیابی قرار گرفت که با بررسی نتایج حاصل، مشخص گردید در الگوریتم ژنتیک با استفاده مستقیم از این تابع، پاسخ صحیح از مدل به دست نمی‌آید. زیرا که در این روش فقط نقاط بیشینه (اکسترمم) نمودارهای محاسباتی و مشاهداتی با هم مقایسه شده و به کل نمودار محاسباتی توجهی نمی‌گردد. لذا با توجه به نتایج به دست آمده، تصور می‌گردد تابع هدفی که کل اجزای نمودار رواناب محاسباتی را در نظر بگیرد، نمی‌تواند عامل مناسبی برای تهیه نمودار زمان-مساحت در مدل باشد. از این رو تابع مجموع قدر مطلق اختلافات (هیدروگراف مشاهداتی نسبت به هیدروگراف محاسباتی) به عنوان مناسب‌ترین تابع هدف انتخاب گردید. با انتخاب مجموع قدر مطلق اختلافات به عنوان تابع هدف، معادله (۴) حاصل شد.

$$F = \sum_{j=1}^{NQ} |Q_o^j - Q_c^j| \quad (4)$$

در معادله (۴)،  $F$  تابع هدف،  $NQ$  تعداد گام‌های هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی،  $Q_o^j$  جریان مشاهداتی و  $Q_c^j$  جریان محاسباتی است.

#### ۲-۶- شاخص نش-ساتکلیف

در تعیین نمودار زمان-مساحت حوضه، با استفاده از مدل این تحقیق، میزان نزدیکی و تشابه هیدروگراف محاسباتی متناظر با نمودار زمان-مساحت حاصل (پاسخ حوضه) به نمودار هیدروگراف مشاهداتی متناظر با شرایط هیدرولوژیکی محاسبات، دقت عملکرد مدل را نشان می‌دهد. در این تحقیق این تشابه، با شاخص نش-ساتکلیف ارایه شده است. معادله (۵)، تابع این شاخص را نشان می‌دهد.

به دست می‌آید. این تفاوت‌ها بسته به اینکه حل گام به گام معادلات از ابتدا یا انتهای ماتریس پاسخ شروع شود، می‌تواند در انتها یا ابتدای ماتریس محاسباتی خروجی سیستم نسبت به ماتریس اولیه خروجی سیستم رخ دهد. برای بررسی این موضوع، مثال ساده مورد بررسی قرار گرفته است که در بخش بحث و نتایج، نمودارهای متناظر با آن ارایه شده است.

#### ۲-۴- دکانولوشن به روش بهینه‌سازی (الگوریتم ژنتیک)

در مدل‌های هیدرولوژیکی به کارگیری روش بهینه‌سازی نیز که از الگوریتم‌های فراکاوشی همچون الگوریتم ژنتیک استفاده می‌کند، نتایج مطلوبی به همراه داشته است [۲۰، ۲۱]. از این رو الگوریتم ژنتیک به عنوان روش بهینه‌سازی در این تحقیق انتخاب گردید و با تعریف شرایط مورد نیاز آن، مدل تحقیق شکل گرفت. مشابه سایر تحقیقات با مدل الگوریتم ژنتیک، در این تحقیق نیز اجزای الگوریتم ژنتیک شامل جمعیت اولیه، تقاطع و در انتها جهش تعریف گردید.

در هر اجرای الگوریتم ژنتیک، پاسخ‌های مشخصی به دست می‌آید که بر اساس قانون دسته‌بندی بهترین جواب‌ها، بهترین آنها در صدر جواب‌ها قرار گرفته و برای تکرارهای بعدی مورد استفاده قرار می‌گیرد. تعیین این تعداد تکرار (تعداد اجرای مدل)، نرخ تقاطع (ترکیب) و جهش عوامل موثری در میزان دقت مدل است. لذا از آنجا که مقدار هر یک از مولفه‌های الگوریتم ژنتیک به طور مستقیم بر روی نتایج مدل موثر است، بنابر این لازم است تا دقیق‌ترین مقادیر انتخاب و بر اساس آن مدل‌سازی انجام شود. پیش از اجرای مدل‌سازی‌ها، این مقادیر با استفاده از سعی و خطا تعیین گردید. جمعیت اولیه برابر ۵۰۰۰، نرخ تقاطع ۰/۹، نرخ جهش ۰/۱ و تعداد اجراهای مدل برابر ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد. به طور کلی در مدل این تحقیق همواره بهترین پاسخ‌ها (دارای کمترین هزینه) انتخاب شده و ترکیب و جهش بر روی آنها اعمال شده و در نهایت با مرتب‌سازی پاسخ‌ها، بهترین پاسخ به عنوان پاسخ مدل ارایه می‌گردد. یکی از مهم‌ترین معیارهای عملکرد کلیه مدل‌ها و به طور خاص الگوریتم‌های بهینه‌سازی، همگرایی نتایج آن‌ها است. لذا در مدل پیشنهادی این تحقیق نیز این موضوع مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، با مقادیر ثابت مولفه‌ها، مدل چندین بار اجرا شده و نتایج هر اجرا ثبت گردیده است. با مقایسه کلیه نتایج، همگرایی یا واگرایی مدل حاصل می‌شود. پیش از اجرای مدل‌سازی‌ها، همگرایی مدل بررسی شد و مشخص گردید با مقادیر مشخص مولفه‌های الگوریتم ژنتیک که ذکر

مستقیم) در تعیین پاسخ حوضه بررسی شده است. سپس الگوریتم ژنتیک اجرا گردیده و نتایج حاصل با نتایج روش مستقیم مقایسه شده است.

حوضه‌های هندسی ساده نمودی از حوضه واقعی به ساده‌ترین بیان و با استفاده اشکال مختلف است. با توجه به عملکرد مناسب این نوع حوضه‌ها در ارایه پاسخ هیدرولوژیکی حوضه [۲۲، ۲۳]، در گام دوم، پاسخ حوضه در یک حوضه تئوریک با هندسه وی-شکل<sup>۲</sup> (کتاب باز<sup>۳</sup>) تعیین گردید. یک حوضه وی-شکل شامل دو دامنه و یک کانال میانی بوده که حوضه دارای سطح مقطعی وی-شکل است. طرح این حوضه مورد بررسی این تحقیق در شکل ۲ نشان داده شده است.

در شکل ۲، عرض دامنه‌ها با نماد  $W$ ، طول دامنه‌ها با نماد  $L_1$  و  $L_2$ ، شیب دامنه‌ها با نماد  $S_1$  و  $S_2$  و عرض کانال با نماد  $B$  نشان داده شده است.

با توجه به محدودیت‌های موجود در مدل‌سازی واقعی رخداد بارش-رواناب در حوضه‌های هندسی، به منظور تولید رخداد‌های مصنوعی بارش-رواناب (رخداد‌های شبیه‌سازی شده) از محیط نرم‌افزاری HEC-HMS و نیز مدل موج سینماتیک برای تولید داده‌های بارش-رواناب در شرایط مورد نظر و دلخواه بهره گرفته شد [۲۵]. این در حالی است که پیشتر دقت مدل‌سازی با نرم‌افزار HEC-HMS و به خصوص موج سینماتیک در این مدل نرم‌افزاری به اثبات رسیده است [۱۹]. از این رو در تحقیق حاضر شرایط فیزیکی حوضه وی-شکل ثابت در نظر گرفته شد و اثرات تغییر شدت بارش بر نمودار زمان-مساحت مورد مطالعه قرار گرفت. نمودارهای هیدروگراف خروجی این حوضه هندسی، به عنوان یک حوضه آزمایشگاهی، توسط نرم‌افزار HEC-HMS تولید و برای مدل الگوریتم ژنتیک این تحقیق تعریف گردید. در حوضه هندسی وی-شکل مورد بررسی در این مقاله، دامنه‌ها دارای شکل همگن و متقارن است. مشخصات فیزیکی این حوضه در جدول ۱ ارایه شده است.

پس از تعریف و تعیین مشخصات هندسی حوضه، اثرات تغییر شدت بارش بر منحنی زمان-مساحت حوضه مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور مقادیر مختلفی از شدت بارش انتخاب گردید و نمودار هیدروگراف رواناب خروجی حوضه متناظر با آن تهیه گردید. جدول ۲، مشخصات رخداد‌های مختلف بارش-رواناب و شبیه‌سازی آن را در حوضه وی-شکل این تحقیق نشان می‌دهد.

با استفاده از مدل موج سینماتیک، مجموعه رواناب خروجی حوضه نیز به

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^{NQ} (Q_o^j - Q_c^j)^2}{\sum_{j=1}^{NQ} (Q_o^j - \bar{Q}_o)^2} \quad (5)$$

در معادله (۵)،  $NSE$  شاخص نش-ساتکلیف،  $NQ$  تعداد گام‌های هیدروگراف محاسباتی و مشاهداتی،  $Q_o^j$  جریان مشاهداتی،  $\bar{Q}_o$  جریان میانگین مشاهداتی و  $Q_c^j$  جریان محاسباتی است.

## ۲-۷- شاخص میزان نوسان<sup>۱</sup> نمودار زمان-مساحت

یکی از ویژگی‌های رایج در بهینه‌سازی و استخراج نمودارها، بروز نوسان در نمودار خروجی مدل است که در نتایج اولیه این تحقیق نیز رخ داد. وجود نوسان بدون توجیه در نمودار زمان-مساحت، به عنوان خروجی مدل، مورد قبول نبوده زیرا که ماهیت خروج تدریجی رواناب از حوضه را نقض می‌کند. شایان ذکر است که با وجود این نوسان، همچنان انطباق نمودارهای محاسباتی و مشاهداتی در بالاترین شکل خود رخ می‌دهد که این موضوع می‌تواند موجب گمراهی شده و تصور می‌گردد خروجی نهایی مدل، صحیح‌ترین پاسخ مدل است. لذا به جهت اجتناب از این رخداد، در این تحقیق یک شاخص برای محاسبه میزان نوسان در کل نمودار زمان-مساحت تعریف گردید که عملکرد آن محاسبه تعداد اکسترمم‌های نسبی در طول نمودار است. با استفاده از این شاخص و مقدار تابع هدف، به انتخاب پاسخ‌ها پرداخته شد و با هر پاسخ مدل، شاخص میزان نوسان نمودار مورد ارزیابی قرار گرفت. بدیهی است که بهترین و منطقی‌ترین پاسخ مدل، دارای کمترین مقدار تابع هدف و کمترین مقدار شاخص میزان نوسان نمودار خواهد بود.

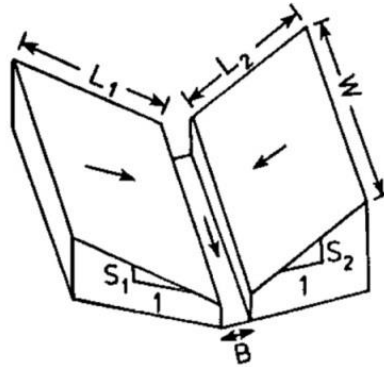
## ۲-۸- تعیین پاسخ هیدرولوژیک حوضه

به منظور بررسی عملکرد مدل پیشنهادی این تحقیق، سعی در تعیین عامل تبدیل رخداد بارش به رواناب یعنی پاسخ هیدرولوژیک حوضه گردیده است. از این رو دو نوع حوضه تئوریک مورد بررسی قرار گرفته و پس از کسب نتیجه از عملکرد مدل در این حوضه‌ها به بررسی حوضه واقعی پرداخته شده است.

در بررسی حوضه تئوریک، ابتدا یک رخداد بارش-رواناب به شکل ماتریس با تعداد محدود درایه تعریف گردیده و عملکرد روش تحلیلی (روش

2 V-shaped  
3 Open book

1 Fluctuation index



شکل ۲. حوضه وی-شکل با شیب یک طرفه ی دامنه‌ها [۲۴]

Fig. 2. V-shaped watershed with one-direction slope of planes [24]

جدول ۱. مشخصات فیزیکی حوضه وی-شکل مورد بررسی

Table 1. Physical characteristics of the studied V-shaped watershed

ردیف	مشخصه	مقدار	واحد
۱	شکل حوضه	وی-شکل	-
۲	مساحت حوضه	۱۰۰۰۰۰۰	مترمربع
۳	طول دامنه‌ها	۵۰۰	متر
۴	عرض دامنه‌ها	۱۰۰۰	متر
۵	طول کانال	۱۰۰۰	متر
۶	عرض کانال	۱	متر
۷	شیب دامنه‌ها	۰/۰۱	متر/متر
۸	شیب کانال	۰/۰۱	متر/متر
۹	زبری دامنه‌ها	۰/۰۲	-
۱۰	زبری کانال	۰/۰۲	-

جدول ۲. مشخصات رخداد‌های بارش-رواناب در حوضه وی-شکل

Table 2. Characteristics of rainfall-runoff events in the V-shaped watershed

ردیف	شدت بارش (میلیمتر بر ساعت)	شدت بارش (متر بر ثانیه)	ارتفاع بارش در مدت شش دقیقه (میلیمتر)	مدت بارش (دقیقه)	مدت زمان پایه (دقیقه)	گام زمانی کل محاسبات (دقیقه)
۱	۵۱۰	۰/۰۰۰۱۴۲	۵۱	۶	۶۰	۲
۲	۴۸۰	۰/۰۰۰۱۳۳	۴۸	۶	۶۰	۲
۳	۴۵۰	۰/۰۰۰۱۲۵	۴۵	۶	۶۰	۲
۴	۴۲۰	۰/۰۰۰۱۱۷	۴۲	۶	۶۰	۲
۵	۳۹۰	۰/۰۰۰۱۰۸	۳۹	۶	۶۰	۲
۶	۳۶۰	۰/۰۰۰۱۰۰	۳۶	۶	۶۰	۲
۷	۳۳۰	۰/۰۰۰۰۹۲	۳۳	۶	۶۰	۲
۸	۳۰۰	۰/۰۰۰۰۸۳	۳۱	۶	۶۰	۲
۹	۲۷۰	۰/۰۰۰۰۷۵	۲۷	۶	۶۰	۲
۱۰	۲۴۰	۰/۰۰۰۰۶۷	۲۴	۶	۶۰	۲
۱۱	۲۱۰	۰/۰۰۰۰۵۸	۲۱	۶	۶۰	۲
۱۲	۱۸۰	۰/۰۰۰۰۵۰	۱۸	۶	۶۰	۲
۱۳	۱۵۰	۰/۰۰۰۰۴۲	۱۵	۶	۶۰	۲

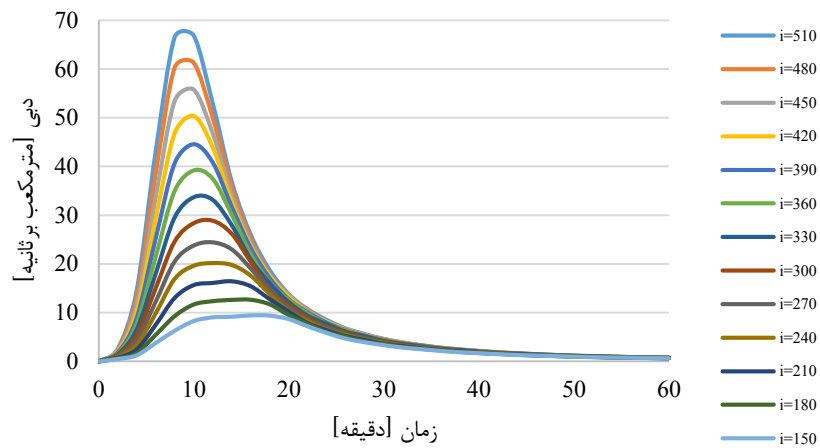
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی عملکرد الگوریتم ژنتیک

در این تحقیق به منظور مقایسه نتایج هر دو روش مستقیم و غیرمستقیم، در ماتریس‌های دکانولوشن‌پذیر، از روش بهینه‌سازی استفاده شد. آنچه که مشخص گردید، اینکه روش الگوریتم ژنتیک (به عنوان یک روش بهینه‌سازی)، قابلیت همان روش مستقیم در تعیین ماتریس پاسخ حوضه را با دقت بسیار بالایی دارا است. برای بیان عینی موضوع مورد بررسی، در مرحله اول، یک حوضه تئوریک (فرضی) بررسی شد. در حوضه مفروض به عنوان یک سیستم، ماتریس‌های  $P$  و  $Q$  به ترتیب ماتریس بارش (ورودی سیستم) و ماتریس رواناب خروجی حوضه (خروجی سیستم) بوده و سعی در تعیین ماتریس زمان-مساحت ( $TA$ ) به عنوان پاسخ هیدرولوژیک حوضه گردید. برای سادگی کار مقادیر ماتریس بارش و زمان-مساحت با تعداد درایه محدود فرض شد و همچنین جهت عمومیت بخشیدن به فرآیند استخراج ماتریس‌ها، درایه‌های ماتریس، غیر یکنواخت انتخاب گردید.

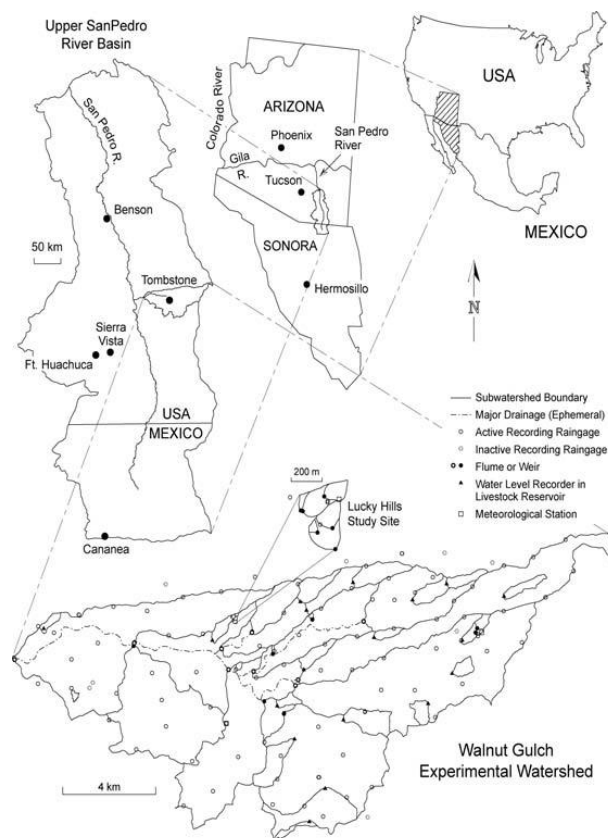
ازای شدت‌های مختلف بارش مطابق نمودارهای موجود در شکل ۳ به دست آمد. در راهنمای نمودارهای شکل ۳، شدت بارش را (بر حسب میلیمتر بر ساعت) نشان می‌دهد.

با کسب نتیجه از مدل‌سازی حوضه‌های تئوریک، در گام نهایی به بررسی حوضه واقعی و ارزیابی مدل در این نوع حوضه پرداخته شد. برای این منظور، حوضه واقعی والنات گالچ در ایالت آریزونا ایالت متحده انتخاب گردید. شکل ۴ موقعیت حوضه والنات گالچ و زیرحوضه‌های آن را نمایش می‌دهد. با توجه به وسعت حوضه، جهت بررسی دقیق‌تر فرآیند بارش-رواناب در این حوضه، زیرحوضه جنوب غربی مربوط به فلوم شماره هفت انتخاب گردید و از داده‌های مشاهداتی ثبت شده در این حوضه، هایتروگراف بارش و هیدروگراف رواناب خروجی مربوط به سه رخداد بارش-رواناب مطابق جداول ۳ و ۴ جهت استخراج پاسخ حوضه آماده‌سازی شد. همچنین هایتروگراف‌های بارش و هیدروگراف‌های متناظر با رخداد‌های بارش-رواناب فوق، مطابق شکل‌های ۵ تا ۷ ارائه شده است.



شکل ۳. مجموعه هیدروگرافهای متناظر با رخدادهای بارش-رواناب حوضه وی-شکل

Fig. 3. Total hydrographs corresponding to rainfall-runoff events in the V-shaped watershed



شکل ۴. موقعیت حوضه والنات گالچ در ایالت آریزونا [۲۶]

Fig. 4. Location of the Walnut Gulch watershed in the state of Arizona [26]



جدول ۳. مشخصات رخداد‌های بارش در حوضه والنات گالچ

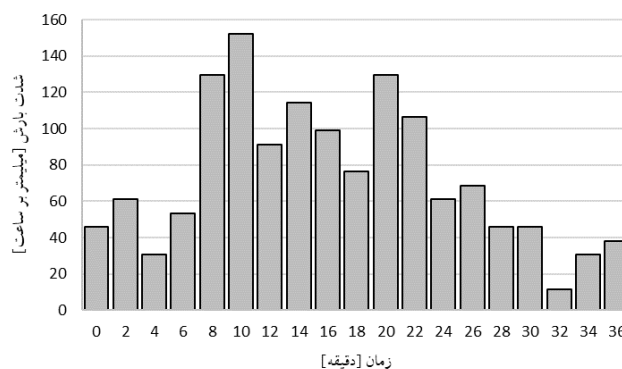
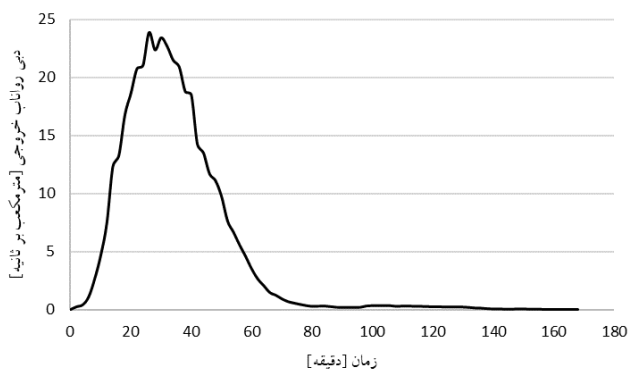
Table 3. Characteristics of rainfall events in the Walnut Gulch watershed

شماره رخداد	تاریخ رخداد بارش	زمان شروع بارش (ساعت و دقیقه)	طول مدت بارش (دقیقه)	میانگین شدت بارش (میلیمتر بر ساعت)
اول	۱۴ آگوست ۲۰۰۱	۱۵:۰۷	۳۶	۷۳
دوم	۶ سپتامبر ۲۰۱۲	۱۶:۵۰	۱۶	۵۰
سوم	۲۸ جولای ۲۰۱۷	۱۸:۱۸	۲۶	۳۲

جدول ۴. مشخصات رخداد‌های سیلاب در حوضه والنات گالچ

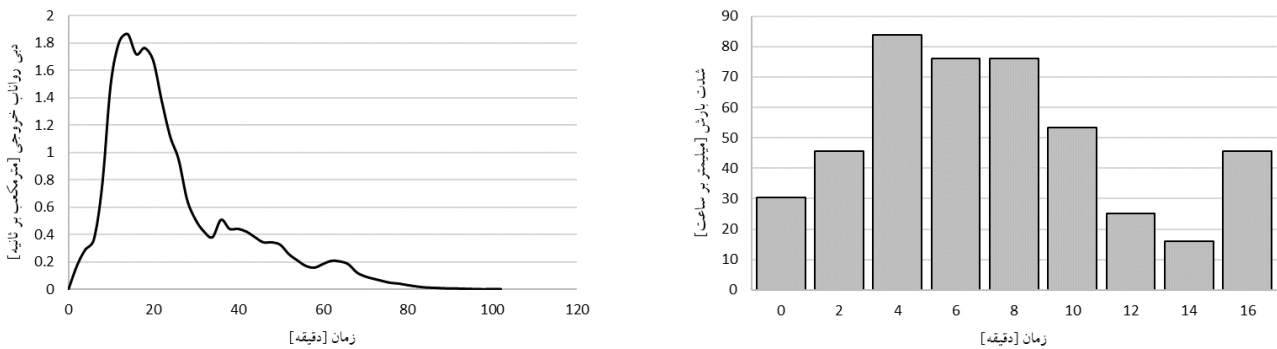
Table 4. Characteristics of runoff events in the Walnut Gulch watershed

شماره رخداد	تاریخ رخداد سیلاب	زمان شروع سیلاب (ساعت و دقیقه)	دبی پیک سیلاب (مترمکعب بر ساعت)	فاصله زمانی پیک از شروع سیلاب (دقیقه)
اول	۱۴ آگوست ۲۰۰۱	۱۵:۳۰	۲۳/۹	۲۶
دوم	۶ سپتامبر ۲۰۱۲	۱۶:۵۱	۱/۹	۲۶
سوم	۲۸ جولای ۲۰۱۷	۱۸:۰۰	۲۵/۷	۴۱



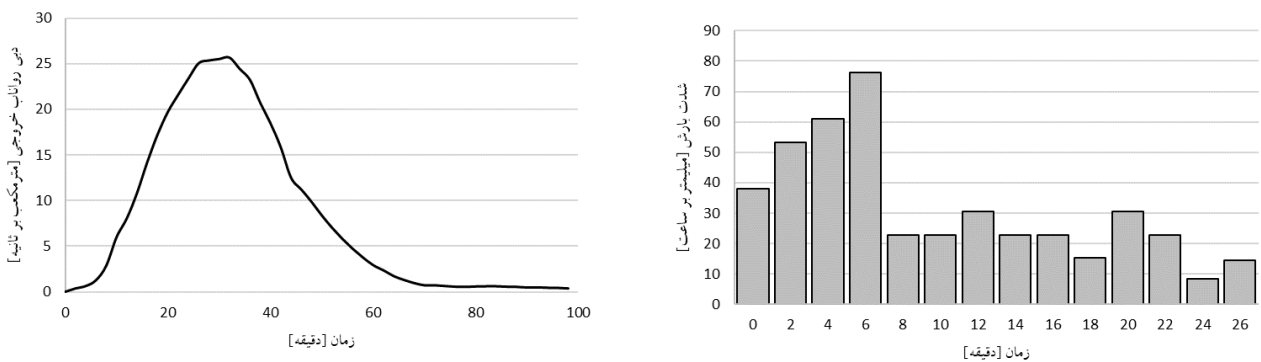
شکل ۵. هایتوگراف بارش و هیدروگراف رواناب خروجی متناظر با رخداد اول

Fig. 5. Rainfall hyetograph and outflow hydrograph corresponding to the first event



شکل ۶. هایتوگراف بارش و هیدروگراف رواناب خروجی متناظر با رخداد دوم

Fig. 6. Rainfall hyetograph and outflow hydrograph corresponding to the second event



شکل ۷. هایتوگراف بارش و هیدروگراف رواناب خروجی متناظر با رخداد سوم

Fig. 7. Rainfall hyetograph and outflow hydrograph corresponding to the third event

از همین ماتریس، برای تعیین ماتریس زمان-مساحت محاسباتی استفاده شد و با استفاده از ماتریس زمان-مساحت محاسباتی، ماتریس هیدروگراف محاسباتی حاصل گردید و نتایج آن با ماتریس اولیه رواناب خروجی حوضه مورد مقایسه قرار گرفت. جدول ۵، نتایج این مقایسه را نشان می‌دهد.

در گام دوم با تغییر آگاهانه در ماتریس خروجی سیستم، درایه‌های چهارم و پنجم ماتریس رواناب خروجی به ترتیب از مقدار ۴۴ به ۴۰ و ۵۴ تغییر پیدا نمود و مولفه‌های سیستم به شرح ذیل در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. آنچه در این بخش از بررسی مورد سوال بوده (هدف این بخش

$$P = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}, TA = \begin{bmatrix} 4 \\ 6 \\ 8 \\ 10 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 4 \\ 14 \\ 32 \\ 44 \\ 44 \\ 30 \end{bmatrix}$$

پیشتر با معین بودن مقادیر بارش و نمودار زمان-مساحت فرضی، حاصل کانولوشن آن‌ها به عنوان هیدروگراف خروجی حوضه به دست آمد و مجدداً

جدول ۵. مقایسه نتایج مدل‌سازی در حالت اول در خروجی سیستم

Table 5. Comparison of modeling results in the first case in the output of the system

زمان-مساحت محاسباتی (روش الگوریتم ژنتیک با تابع هدف نش-ساتکلیف)	زمان-مساحت محاسباتی (روش الگوریتم ژنتیک با تابع هدف مجموع قدرمطلق اختلافات)	زمان-مساحت محاسباتی (روش مستقیم)	زمان-مساحت (مشاهداتی)	زمان (دقیقه)
۴	۳/۹۹	۴	۴	۱
۵/۹۹	۶	۶	۶	۲
۸	۷/۹۹	۸	۸	۳
۹/۹۹	۱۰	۱۰	۱۰	۴
۱	۱	۱	میزان دقت (شاخص نش-ساتکلیف)	

از مقایسه نتایج موجود در جداول ۵ و ۶ دریافت گردید که تغییر در ماتریس خروجی سیستم و بالتبع تغییر شرایط کانولوشن‌پذیری سیستم، موجب شده است که با روش مستقیم نتوان به ماتریس پاسخ سیستم به صورت صحیح دست یافت گرچه درایه‌های ابتدایی ماتریس، منطبق با داده‌های مشاهداتی است، اما در چند درایه آخر ماتریس، خطای بزرگی بین درایه‌های نظیر به نظیر رخ داده است. اما در روش بهینه‌سازی، با سرشکنی خطای ناشی از کانولوشن‌ناپذیری ماتریس‌ها، بر روی کل درایه‌ها، نمودار خروجی محاسباتی به نمودار خروجی اولیه نزدیکتر شده و مقدار شاخص نش-ساتکلیف نیز به حداکثر مقدار خود رسیده است. بنابراین، چنین برداشت می‌گردد که نتایج استفاده از روش بهینه‌سازی در تعیین پاسخ حوضه (نمودار زمان-مساحت) دارای اعتبار بوده و به ماهیت آن در واقعیت نزدیک است. نمودار شکل ۸ بررسی نمودارهای بی‌بعد شده رواناب خروجی حوضه را در شرایط کانولوشن‌ناپذیری نشان می‌دهد. در راهنمای نمودار موجود در شکل ۸، نمادهای GA-NS و GA-Abs به ترتیب معرف روش‌های الگوریتم ژنتیک با توابع هدف نش-ساتکلیف و مجموع قدر مطلق اختلافات است.

۳-۲- مدل‌سازی حوضه هندسی وی-شکل

از آنجا که در الگوریتم ژنتیک دو عامل جهش و ترکیب موجب تنوع جمعیت می‌گردد [۲۷]، بنابراین باید درصدی از این دو عامل در تولید جمعیت مورد بررسی انتخاب گردد. به منظور بررسی مقادیر مختلف این مولفه‌ها

از تحقیق یافتن درایه‌های ماتریس پاسخ حوضه (ماتریس زمان-مساحت (ماتریس  $U$ )) با استفاده از دو ماتریس رواناب خروجی حوضه (ماتریس  $Q$ ) و ماتریس هایتوگراف بارش (ماتریس  $P$ ) به عنوان ورودی‌های مدل تحقیق است. از این رو، با استفاده از روش‌های مختلف سعی بر تعیین درایه‌های ماتریس زمان-مساحت (درایه‌های  $a_1$  تا  $a_4$ ) شد.

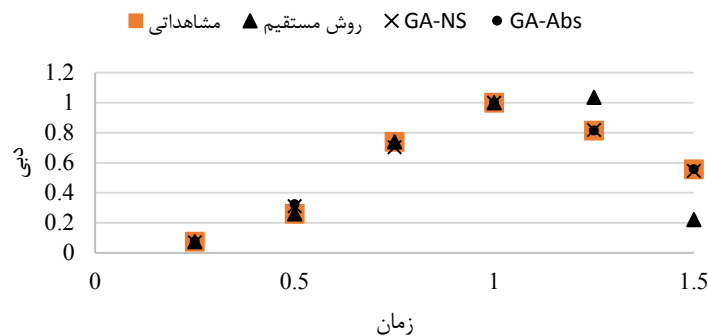
$$P = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 4 \\ 14 \\ 32 \\ 40 \\ 54 \\ 30 \end{bmatrix}$$

مطابق آنچه که پیشتر توضیح داده شد، به علت تغییر در ماتریس خروجی حوضه، این ماتریس‌ها دکانولوشن‌پذیر نبوده و حاصل آن از طریق روش مستقیم مقداری غیرقابل قبول با خطای موضعی زیاد حاصل شد. اما با استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، (با هر دو تابع هدف نش-ساتکلیف و مجموع قدر مطلق اختلافات)، این خطای ناشی از دکانولوشن‌ناپذیری سرشکن شده و نتایج حاصل به نتایج مرجع (مشاهداتی) نزدیک گردید. جدول ۶ نتایج این بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۶. مقایسه نتایج مدل‌سازی در حالت تغییر در خروجی سیستم

Table 6. Comparison of modeling results in the state of change in system output

زمان-مساحت محاسباتی (روش الگوریتم ژنتیک با تابع هدف نش-ساتکلیف)	زمان-مساحت محاسباتی (روش الگوریتم ژنتیک با تابع هدف مجموع قدرمطلق اختلافات)	زمان-مساحت محاسباتی (روش مستقیم)	زمان-مساحت مشاهداتی	زمان (دقیقه)
۴/۰۷	۳/۷۷	۴	۴	۱
۱۷/۴۶	۱۶/۸۶	۱۴	۱۴	۲
۳۸/۸۶	۳۸/۱۷	۴۰	۴۰	۳
۵۴	۵۴/۲۷	۵۴	۵۴	۴
۴۴	۴۴/۴۳	۵۶	۴۴	۵
۳۰	۲۹/۶۲	۱۲	۳۰	۶
۰/۹۹	۰/۹۹	۰/۷۴	میزان دقت (شاخص نش-ساتکلیف)	



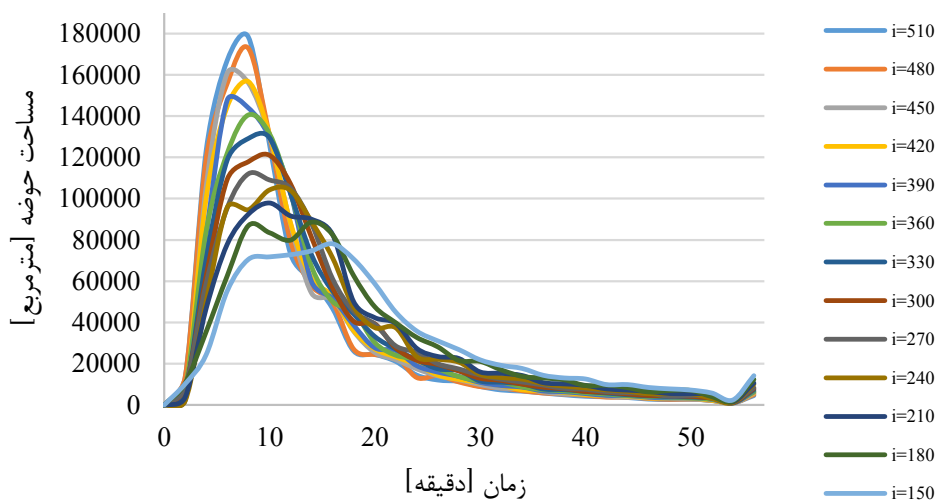
شکل ۸. نمودارهای بی‌بعد هیدروگراف خروجی حوضه

Fig. 8. Dimensionless hydrograph of watershed

بین دو ترکیب ۹۰ درصد جهش - ۱۰ درصد ترکیب و ۸۰ درصد جهش - ۲۰ درصد ترکیب، ترکیب ۹۰ درصد جهش - ۱۰ درصد ترکیب دارای شاخص نش-ساتکلیف بالاتری است. از این رو، میزان ۱۰ درصد سهم برای جهش و ۹۰ درصد سهم برای ترکیب، انتخاب گردید و با این مقادیر، ادامه مدل‌سازی‌ها شکل گرفت.

پس از تعیین مقادیر اولیه پارامترهای مورد نیاز الگوریتم ژنتیک، رخدادهای مختلف بارش-رواناب متناظر با جداول ۱ و ۲ و نیز هیدروگراف‌های موجود

بازهی متنوعی از درصد سهم هریک از دو عامل مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به نتایج به دست آمده مشخص گردید، دو ترکیب ۹۰ درصد جهش - ۱۰ درصد ترکیب و ۸۰ درصد جهش - ۲۰ درصد ترکیب، کمترین میزان نوسان در نمودار زمان-مساحت را داشته است. لذا میزان کم نوسان به عنوان یک عامل در انتخاب سهم ترکیب و جهش است. عامل موثر دیگر، شاخص نش-ساتکلیف بوده که نشان‌دهنده‌ی میزان نزدیکی نتایج مدل‌سازی به مقادیر مشاهداتی است. نتایج مورد بررسی حاکی از این موضوع است که



شکل ۹. نمودارهای زمان-مساحت با شدت بارش ۱۵۰ تا ۵۱۰ میلیمتر بر ساعت

Fig. 9. Time-Area histograms corresponding to rainfall intensity of 150 to 510 mm/hr

با در کنار هم قراردادن معادلات رگرسیون نمودارهای مقادیر ضرایب، دسته معادله (۶) حاصل گردید.

$$A(t) = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (۶)$$

در معادله (۶)، هریک از ضرایب  $a$  تا  $c$  و همچنین مقدار ثابت  $d$  خود یک تابع درجه دوم بر حسب مقدار شدت بارش است (معادلات ۷ تا ۱۰) که با قراردادن شدت بارش مشخص در این معادلات، ضرایب تعیین شده و نهایتاً می‌توان مقدار معادله (۶) را در هر  $t$  مشخص، تعیین نمود.

$$a(i) = 0.0007i^2 + 0.8455i - 98.637 \quad (۷)$$

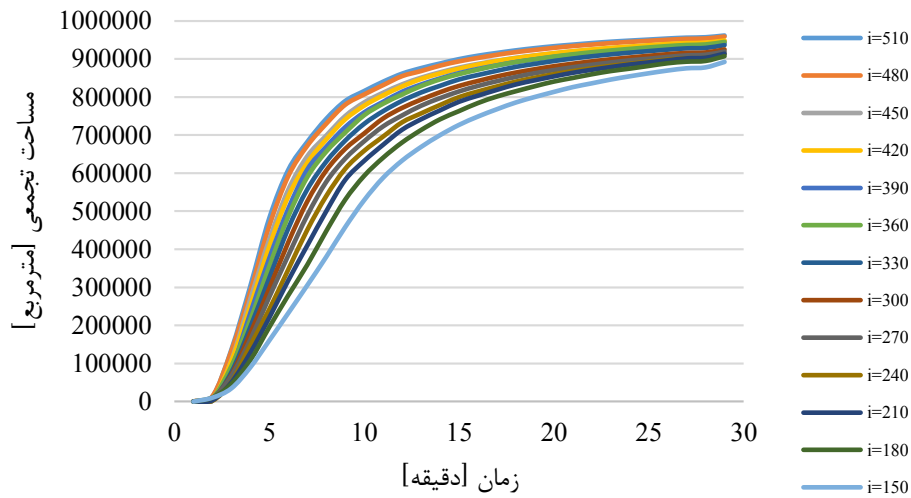
$$b(i) = -0.5647i^2 + 619.66i + 10319 \quad (۸)$$

$$c(i) = 0.0382i^2 - 44.058i + 3514.8 \quad (۹)$$

در شکل ۳ مورد مدل‌سازی قرار گرفت و نمودار زمان-مساحت هر رخداد استخراج گردید. نتایج حاصل مدل‌سازی در تعیین نمودارهای زمان-مساحت متناظر با هر شدت بارش، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده است.

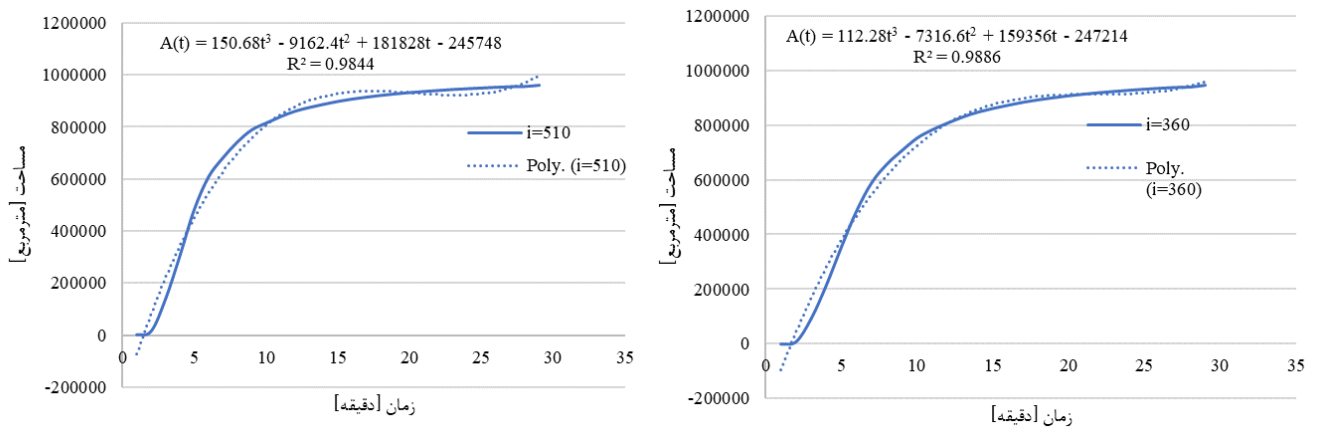
جهت سهولت در استخراج معادله منحنی زمان-مساحت، به جای برازش منحنی (مطابق شکل ۹) از نمودار تجمعی زمان-مساحت استفاده گردید. این عمل باعث شد که با یک ضریب همبستگی (حدود ۰/۹) استخراج معادله منحنی زمان-مساحت، از معادله درجه پنجم، به معادله درجه سوم ساده شده و در نتیجه عملیات استخراج منحنی به معادلات ساده‌تری ختم گردد. شکل ۱۰، حاصل نمودارهای تجمعی زمان-مساحت موجود در شکل ۹ را نشان می‌دهد.

با تعیین نمودارهای زمان-مساحت متناظر با هر رخداد بارش-رواناب (مطابق شکل ۱۰)، با فرض اولیه وجود رابطه بین شدت بارش و شکل نمودار زمان-مساحت، بررسی رگرسیون با معادله‌ی چند جمله‌ای از درجه سوم انجام شد (مطابق معادله رگرسیون موجود بر نمودار شکل ۱۱) و مشخص گردید با شدت‌های مختلف بارش، ضرایب معادله‌ی رگرسیون، به صورت منحنی با تابع از درجه دوم تغییر می‌کند. شکل ۱۲ نمودار ضرایب متغیر  $x$  در معادله منحنی‌های رگرسیون نمودارهای زمان-مساحت را نشان می‌دهد.



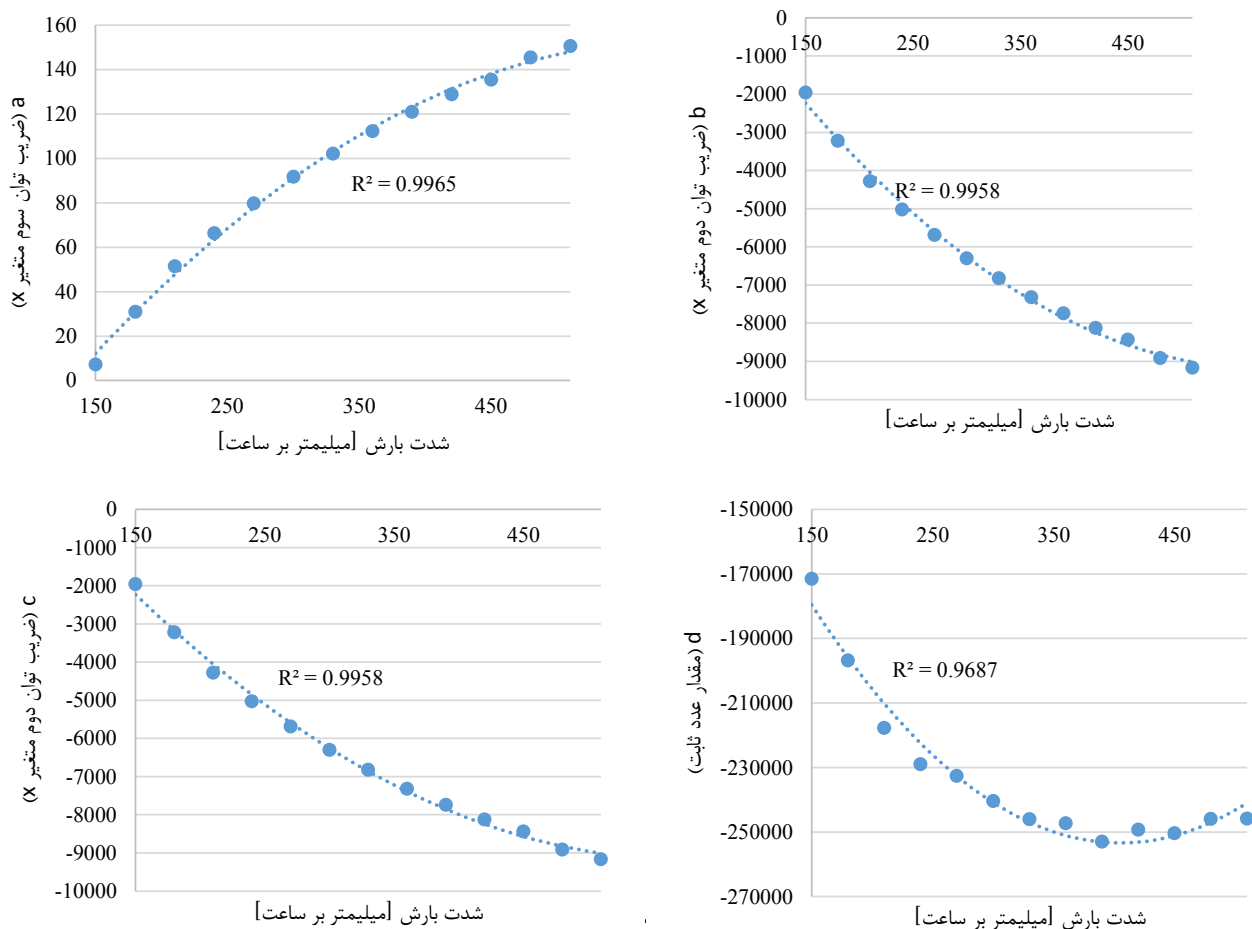
شکل ۱۰. نمودارهای تجمع‌ی زمان-مساحت با شدت بارش ۱۵۰ تا ۵۱۰ میلی‌متر بر ساعت

Fig. 10. Accumulation time-area histograms corresponding to rainfall intensity of 150 to 510 mm/hr



شکل ۱۱. نمودار منحنی اصلی و رگرسیون زمان-مساحت با شدت بارش ۳۶۰ و ۵۱۰ میلی‌متر بر ساعت

Fig. 11. The graph of the main curve and regression of time-area corresponding to rainfall intensity of 360 and 510 mm/hr



شکل ۱۲. نمودارهای تعیین معادله مقادیر a، b، c و d بر حسب متغیر شدت بارش

Fig. 12. Graphs for determining the equation of a, b, c, and d values according to the rainfall intensity variable

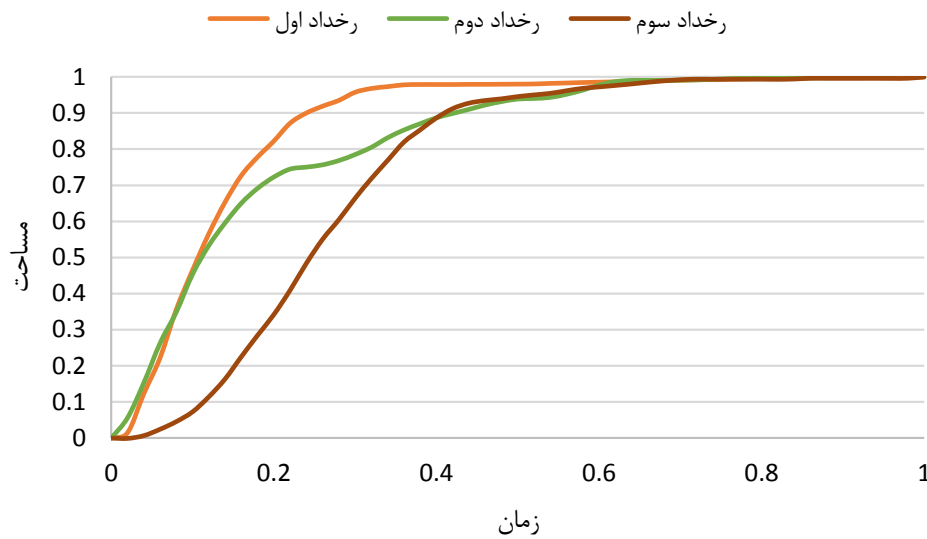
به دست آمده است ولی با توجه به اینکه نقش این جمله (با توان صفر) در شکل کلی نمودار زمان-مساحت تقریباً بی اثر است، می‌توان به پایداری مدل تحقیق در تعیین نمودارهای زمان-مساحت متناظر با هر شدت بارش دست یافت. پس از تعیین نمودار زمان-مساحت، با اعمال مجدد انتگرال پیچیده بین آن و هایتوگراف بارش، هیدروگراف محاسباتی رواناب خروجی حوضه حاصل گردید. با مقایسه این هیدروگراف با هیدروگراف مشاهداتی، دریافت گردید که با استفاده از شاخص نش-ساتکلیف، دقت مدل در برآورد پاسخ حوضه هندسی وی-شکل، به طور میانگین ۹۹ درصد است.

### ۳-۳- مدل‌سازی حوضه واقعی والنات گالچ

با بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی هایتوگراف بارش و هیدروگراف رواناب خروجی در حوضه والنات گالچ، مطابق جداول ۳ و ۴ و نیز شکل‌های

$$d(i) = 1.1338i^2 - 918.69i - 67287 \quad (10)$$

مجموعه معادلات (۶) تا (۱۰) در کنار هم، پاسخ حوضه را در تبدیل بارش به رواناب برای شدت بارش در زمان مشخص ( $t$ ) نشان می‌دهد. آنچه از دسته معادله فوق دریافت می‌گردد، روند ضرایب جمله‌های این معادله بوده که نیز خود حاصل معادله‌های غیرخطی است که توابعی از متغیر شدت بارش ( $i$ ) است. ضریب همبستگی در این پنج جمله‌ی معادله، از بیشترین مقدار (۰/۹۹) مربوط به رگرسیون ضرایب توان سوم معادله تا کمترین مقدار (۰/۹۶) مربوط به رگرسیون ضرایب توان صفر معادله قرار گرفته است که حاکی از اهمیت این ضرایب در جملات با توان‌های بیشتر است. به بیان دیگر، گرچه مقدار ۰/۹۶ به عنوان مقدار ضریب همبستگی ضرایب جمله‌ی با درجه صفر



شکل ۱۳. نمودارهای تجمعی بی‌بعد زمان-مساحت متناظر با رخداد‌های اول تا سوم در حوضه والنات گالچ

Fig. 13. Time-Area dimensionless cumulative graphs corresponding to the first to third events in the Walnut Gulch watershed

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از الگوریتم ژنتیک به عنوان یک روش بهینه‌سازی سعی در بررسی پاسخ حوضه بدون در نظر گرفتن جزئیات بسیار زیاد حوضه و فقط با استفاده از ورودی‌های هیدرولوژیکی شامل بارش و رواناب حوضه بوده که به واسطه آن نمودار زمان-مساحت حوضه استخراج گردید. با مدل‌سازی و بررسی مجموعه رخداد‌های بارش-رواناب در یک حوضه با شرایط ثابت مورفولوژیکی، می‌توان به رابطه بین منحنی زمان-مساحت با شدت بارش پی برد. این امر با مدل‌سازی مجموعه رخدادها و همچنین اجرای رگرسیون بین نتایج خروجی به دست آمد.

نتایج استخراج پاسخ حوضه نسبت به رخداد بارش در تولید رواناب، در قالب یک معادله از درجه سوم به دست آمد. این معادله یک تابع با متغیر زمان بوده که خروجی آن مساحت مشارکت‌کننده حوضه در تولید رواناب در بازه زمانی مشخص ( $t$ ) است. ضرایب جمله‌های این معادله نیز خود حاصل معادله‌های غیرخطی است که توابعی از متغیر شدت بارش ( $\bar{i}$ ) است. ضریب همبستگی در این چهار جمله‌ی معادله، از بیشترین مقدار (۰/۹۹) مربوط به رگرسیون ضرایب توان سوم معادله تا کمترین مقدار (۰/۸۶) مربوط به رگرسیون ضرایب توان صفر معادله است.

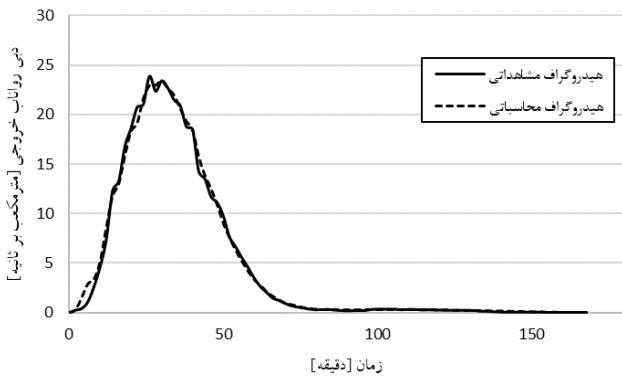
۵ تا ۷، مدل‌سازی بر روی این حوضه با استفاده از مدل پیشنهادی این تحقیق انجام شد و پاسخ حوضه به صورت نمودارهای تجمعی بی‌بعد زمان-مساحت، مطابق شکل ۱۳ حاصل گردید.

همان‌گونه که در مدل‌سازی حوضه تئوریک وی-شکل مشخص شد، شدت بارش بر روی شکل نمودار زمان-مساحت موثر است به طوری که با افزایش شدت بارش، بازوی بالارونده منحنی زمان-مساحت دارای شیب تندتر بوده و به تعبیر دیگر، مساحت بیشتری از حوضه در ابتدای رخداد بارش در تولید رواناب مشارکت نموده است.

با اجرای انتگرال پیچیده بین منحنی‌های زمان-مساحت موجود در شکل ۱۳ و هایتوگراف‌های موجود در شکل ۵ تا ۷، هیدروگراف‌های محاسباتی متناظر با سه رخداد مورد بررسی در حوضه والنات گالچ تهیه گردید که در شکل ۱۴ با هیدروگراف‌های مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفته است.

همان‌گونه که در شکل ۱۴ مشاهده می‌گردد، نمودارهای محاسباتی تقریباً با نمودارهای مشاهداتی منطبق است و این حاکی از دقت مدل پیشنهادی این تحقیق در مدل‌سازی حوضه‌های واقعی است. به عبارت دیگر، مدل الگوریتم ژنتیک پیشنهادی توانسته است هم دقت و هم پایداری خود را حفظ نماید. نتایج بررسی دقت مدل‌سازی در حوضه والنات گالچ در جدول ۷ ارائه شده است.

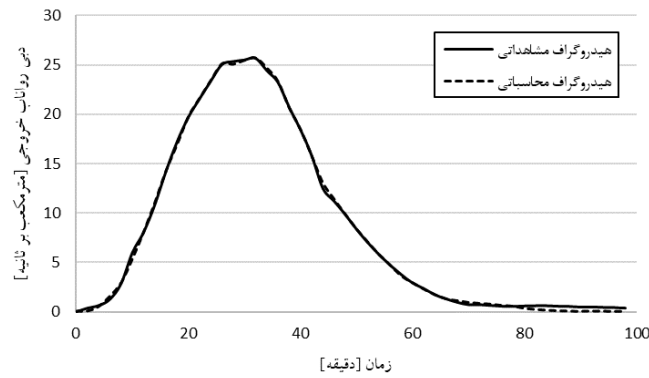




(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۴. نمودارهای هیدروگراف مشاهداتی و محاسباتی حوضه والنات گالچ متناظر با: (الف) رخداد اول، (ب) رخداد دوم و (ج) رخداد سوم

Fig. 14. Observational and computational hydrographs of the Walnut Gulch watershed corresponding to: (a) the first event, (b): the second event and (c): the third event

جدول ۷. دقت نتایج مدلسازی در حوضه والنات گالچ

Table 7. Accuracy of modeling results in Walnut Gulch watershed

مجموع قدرمطلق اختلافات	مقدار شاخص میزان نوسان	مقدار شاخص نش-ساتکلیف	شماره رخداد
۱۹/۹۶۹	۳۹	۰/۹۹۶	اول
۱/۲۷۰	۱۲	۰/۹۸۷	دوم
۸/۶۱۷	۱۷	۰/۹۹۹	سوم
۹/۹۵۲	۲۳	۰/۹۹۴	میانگین شاخص

- [6] S. Sadeghi, J. Samani, H. Samani, Optimal Design of Storm Sewer Network Based on Risk Analysis by Combining Genetic Algorithm and SWMM Model, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(5) (2022) 1903-1924. (in persian).
- [7] S.-H. Dong, Genetic algorithm based parameter estimation of Nash model, *Water resources management*, 22 (2008) 525-533.
- [8] J. Drisya, D. Sathish Kumar, Automated calibration of a two-dimensional overland flow model by estimating Manning's roughness coefficient using genetic algorithm, *Journal of Hydroinformatics*, 20(2) (2018) 440-456.
- [9] S. Farzin, H. Noori, H. Karami, Developing the performance of modern methods using multi-objective optimization in urban runoff control, *Iran-Water Resources Research*, 14(3) (2018) 45-58. (in persian).
- [10] H. Nouri, A. Ildoromi, M. Sepehri, M. Artimani, Comparing Three Main Methods of Artificial Intelligence in Flood Estimation in Yalphan Catchment, *Geography and Environmental Planning*, 29(4) (2019) 35-50. (in persian).
- [11] A.M. Melesse, W.D. Graham, J.D. Jordan, Spatially distributed watershed mapping and modeling: GIS-based storm runoff response and hydrograph analysis: Part 2, *Journal of Spatial Hydrology*, 3(2) (2003) 1-28.
- [12] B. Saghafian, A. Shokouhi, A corrected time-area technique for one-dimensional flow, *International Journal of Civil Engineering*, 4(1) (2006) 34-41.
- [13] M. Zakeri Niri, B. Saghafian, S. Golian, T. Moramarco, A. Shamsai, Derivation of travel time based on diffusive wave approximation for the time-area hydrograph simulation, *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(1) (2012) 85-91.
- [14] T. Sabzevari, S. Noroozpour, M. Pishvaei, Effects of geometry on runoff time characteristics and time-area histogram of hillslopes, *Journal of Hydrology*, 531 (2015) 638-648.
- [15] S. Sadeghi, R. Mostafazadeh, A. Sadoddin, Changeability of simulated hydrograph from a steep watershed resulted from applying Clark's IUH and different time-area

مدل پیشنهادی این تحقیق، ابتدا در حوضه‌های تئوریک مورد بررسی قرار گرفت و پس از کسب نتایج مثبت از عملکرد آن، در حوضه واقعی والنات گالچ در ایالت آریزونا ایالات متحده بررسی شد. پس از تعیین نمودار زمان-مساحت در حوضه‌های مورد بررسی، با اعمال مجدد انتگرال پیچیده بین آن و هایتوگراف بارش، هیدروگراف محاسباتی رواناب خروجی حوضه حاصل گردید. با بررسی نتایج، دریافت گردید که دقت مدل این تحقیق به عنوان یک روش بهینه‌سازی در برآورد پاسخ یک حوضه تئوریک، ۹۹ درصد بوده در حالی که روش مستقیم برابر ۷۴ درصد بوده است. دقت مدل در برآورد پاسخ حوضه هندسی وی-شکل و حوضه واقعی والنات گالچ به طور میانگین ۹۹ درصد حاصل شد. این نتایج حاکی از موفقیت روش بهینه‌سازی به خصوص الگوریتم ژنتیک در پیش‌بینی رفتار حوضه در برخورد با رخداد بارش و به تبع آن تولید رواناب است.

به عنوان موضوع قابل بررسی در تحقیقات آتی، می‌توان به استخراج نمودار زمان-مساحت با استفاده از الگوریتم ژنتیک در سایر حوضه‌های هندسی و واقعی پرداخت.

## منابع

- [1] V. Chow, D. Maidment, L. Mays, *Applied hydrology* McGraw-Hill International editions, New York, USA, (1988).
- [2] A. Alizadeh, *Principles of applied hydrology*, Mashhad: Emam Reza University, (2008). (in persian).
- [3] F.N. Madden, K.R. Godfrey, M.J. Chappell, R. Hovorka, R.A. Bates, A comparison of six deconvolution techniques, *Journal of pharmacokinetics and biopharmaceutics*, 24 (1996) 283-299.
- [4] H. Saba, M. Kamalian, I. Raeisizadeh, Determining impending slip of slop and optimized embankment operation volume of earth dams using a combination of neural networks and genetic algorithms, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 50(4) (2018) 233-234. (in persian).
- [5] F. Masoumi, S.N. Bashi-Azghadi, A. Afshar, Application of Achieve-Based Genetic Algorithm for Consequence Management of Contaminant Entering in Water Distribution Networks, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 53(8) (2021) 3593-3604. (in persian).

- 133(6) (2007) 602-608.
- [21] S.K. Singh, Optimal instantaneous unit hydrograph from multistorm data, *Journal of irrigation and drainage engineering*, 132(3) (2006) 298-302.
- [22] Y. Xiong, C.S. Melching, Comparison of kinematic-wave and nonlinear reservoir routing of urban watershed runoff, *Journal of Hydrologic Engineering*, 10(1) (2005) 39-49.
- [23] J. Liang, C.S. Melching, Experimental evaluation of the effect of storm movement on peak discharge, *International Journal of Sediment Research*, 30(2) (2015) 167-177.
- [24] D.E. Overton, M.E. Meadows, *Stormwater modeling*, Elsevier, 2013.
- [25] A.D. Feldman, *Hydrologic modeling system HEC-HMS: technical reference manual*, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000.
- [26] USDA, United States Department of Agriculture, in, *Agricultural Research Service*, 2007.
- [27] B. Zahraee, S.M. Hoseini, *Genetic Algorithm and Engineering Optimization*, Gutenberg publication, 2014.
- histograms, *Environmental Earth Sciences*, 74 (2015) 3629-3643.
- [16] Y. Her, C. Heatwole, HYSTAR Sediment Model: Distributed Two-Dimensional Simulation of Watershed Erosion and Sediment Transport Using Time-Area Routing, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 52(2) (2016) 376-396.
- [17] B. Saghafian, A.M. Van Lieshout, H.M. Rajaei, Distributed catchment simulation using a raster GIS, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2(3-4) (2000) 199-203.
- [18] J. Chabokpour, Operation of the non-linear Muskingum model in the prediction of the pollution breakthrough curves through the river reaches, *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 54(1) (2022) 21-34. (in persian).
- [19] M. Mohammadi Hashemi, B. Saghafian, M. Zakeri Niri, M. Najarchi, Applicability of Rainfall-Runoff Models in Two Simplified Watersheds, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, (2021) 1-12.
- [20] S.K. Singh, Identifying representative parameters of IUH, *Journal of irrigation and drainage engineering*,

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

*M. Mohammadi Hashemi, B. Saghafian, M. Zakeri Niri, M. Najarchi, Evaluation of Combined Method of Deconvolution- Genetic Algorithm in Extracting Time-Area Histogram, Amirkabir J. Civil Eng., 55(6) (2023) 1159-1178.*

DOI: 10.22060/ceej.2023.21068.7663



