

## توسعه یک مدل مفهومی بارش - رواناب به منظور شبیه‌سازی رواناب سریع و آهسته

(مطالعه موردی: حوضه ناورد)

اسماعیل اسدی<sup>1</sup>، احمد فاخری فرد<sup>2</sup> و محمد علی قربانی<sup>3</sup>

تاریخ دریافت: 88/10/8 تاریخ پذیرش: 89/8/6

1- استادیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

2 و 3 - استاد و دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز

\* مسئول مکاتبه: E-mail: [esasadi@gmail.com](mailto:esasadi@gmail.com)

### چکیده

اگرچه مدل‌های متعددی برای بارش-رواناب توسط هیدرولوژیست‌ها توسعه داده شده‌اند، با این وجود روش‌های هیدروگراف واحد در بسیاری از حوضه‌ها که در آنجا داده‌های هیدرولوژیکی ثبت شده کافی جهت استفاده مدل‌های توزیعی بارش-رواناب وجود ندارد هنوز یک ابزار مفید برای تخمین سیلاب می‌باشد. هدف از مقاله حاضر استخراج توابع پاسخ پالس واحد رواناب سریع و آهسته جریان آبراهه‌ای به روش تحلیلی با استفاده از یک مدل مفهومی شامل سه مخزن سری و یک مخزن هیبریدی موازی می‌باشد. وابستگی داخلی بین مخزن‌ها با استفاده از روابط نمایی از پارامترهای مدل که منعکس‌کننده خصوصیات فیزیوگرافیکی حوضه می‌باشد نشان داده شده است. پارامترهای مدل با استفاده از روش بهینه‌سازی نلدر-مید برای منطقه مورد مطالعه تعیین گردید. کارایی و اعتبار مدل مفهومی توسعه یافته با استفاده از پارامترهای بهینه استخراج شده، برای رویدادهای مختلف مشاهداتی با استفاده از معیارهایی آماری نظیر ناش-ساتکلیف، میانگین خطای مطلق نسبی برای مقادیر دبی، دبی اوج و ارتفاع رواناب مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل توسعه داده شده از توانایی خوبی در پیش‌بینی فرایند بارش-رواناب بدون نیاز به تعریف بارش مازاد و با لحاظ کردن شرایط رطوبتی خاک قبل از رگبار برخوردار می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: بارش، رواناب، بهینه‌سازی، تابع پاسخ پالس واحد، حوضه ناورد

## Development of Conceptual Rainfall- Runoff Model for Quick and Slow Runoff Simulation (Case Study: Navrood Basin, Iran)

E Asadi<sup>1\*</sup>, A Fakheri Fard<sup>2</sup> and MA Gorbani<sup>3</sup>

Received: 29 December 2009 Accepted: 28 October 2010

<sup>1</sup> Assist. Prof., Dept. of Water Engin., University of Tabriz, Iran

<sup>2,3</sup> Prof. and Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., University of Tabriz, Iran

\*Corresponding author: E-mail: [esasadi@gmail.com](mailto:esasadi@gmail.com)

### Abstract

Although many kinds of rainfall-runoff models have been developed by hydrologists, the unit hydrograph methods are still gainful tool for flood estimation in many basins where recorded hydrological data are not sufficient to support distributed rainfall- runoff models. The aim of this paper is to derive the analytical unit pulse response functions of quick and slow runoff of stream flow using a conceptual model containing three serial tanks as well as a parallel hybrid tank. The interrelation of the tanks can be shown using exponentially structured models which their parameters reflect the physiographical characteristics of the basin. Parameters of the model were estimated using Nelder–Mead optimization method. Efficiency and validity of the developed conceptual model were evaluated for various observed events using statistical criteria such as Nash-Sutcliffe, mean relative absolute error for discharge, peak flow and runoff depth. Results showed that the developed model had good capability in predicting rainfall- runoff process considering soil moisture conditions before rainfall occurrence without the need for definition of excess rainfall.

**Keywords:** Navrood basin, Optimization, Rainfall, runoff, Unit pulse response function

### مقدمه

های ریاضی طبقه‌بندی می‌شوند (چائو 1988). مدل‌های مفهومی بارش- رواناب از جمله مدل‌های ریاضی می‌باشند که مفاهیم سیستم را در شبیه‌سازی بارش- رواناب به کار می‌گیرند. این مدل‌ها با استفاده از ترکیب مخازن خطی یا غیر خطی به صورت موازی، سری یا ترکیبی از هر دو، بر اساس معادلات دبی- ذخیره و

از آنجا که نتایج خروجی مدل‌های بارش- رواناب به طور مستقیم در مسائلی از قبیل مدیریت منابع آب، کنترل سیلاب و طراحی سازه‌های هیدرولیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل سازی فرایند بارش- رواناب از اهمیت به سزایی برخوردار می‌باشد. با توجه به نوع نگرش حاکم در ایجاد مدل‌های بارش- رواناب، این مدل‌ها به دو دسته عمده مدل‌های فیزیکی و مدل-

بارش-رواناب انجام داده‌اند. بکارگیری مدل‌های فیزیکی نیز به دلیل فقدان داده‌های مناسب و نیز نیاز به اطلاعات گسترده به خصوص برای واسنجی، همیشه با مشکلات متعددی روبرو بوده است (ذاکرمشقق و همکاران 2008، باشا 2000). از زمانیکه هیدرولوژیست-ها دریافتند با استفاده از روش‌های ریاضی می‌توان توابع پاسخ سیستم را از آنالیز داده‌های ورودی و خروجی با پارامترهای کمتر برآورد نمود، بکارگیری مدل‌های مفهومی برای توصیف پاسخ دینامیکی گردهای حوضه به یکی از ابزارهای اساسی برای پیش‌بینی سیلاب تبدیل شده است. مدل‌های ناش (1957)، دوگ (1959)، دیسکین و همکاران (1978)، مدل حوضه‌ای استانفورد (سینگ 1988)، مدل زاهو (1992) و مدل مخزن (ساگووارا 1995) از جمله مشهورترین مدل‌های مفهومی بارش-رواناب می‌باشند که از زمان معرفی تا به امروز موضوع بسیاری از تحقیقات بوده‌اند.

استخراج تابع پاسخ پالس واحد از داده‌های مشاهداتی تلاشی است جهت شبیه‌سازی بخشی از بارش کل با عنوان بارش مازاد که در خروجی حوضه به رواناب مستقیم تبدیل می‌شود. بدین منظور مفاهیم ساختگی از بارش مازاد و رواناب مستقیم ارائه می‌گردد تا برابری حجم بارش اضافی با حجم رواناب تضمین گردد (سینگ 1988). این موضوع باعث گردیده است تا روش‌های مبتنی بر هیدروگراف واحد با وجود مزایای بسیار، در کارهای عملی با محدودیت‌هایی نیز مواجه باشند. ساگووارا برای اولین بار در سال 1974 ساختار مدل مخزن را جهت شبیه‌سازی رواناب سیلاب با توجه به نقش هر یک از اجزای تشکیل دهنده آن شامل رواناب سریع (رواناب مستقیم)، زیرسطحی سریع، زیرسطحی تاخیری و رواناب زیرزمینی در قالب چهار مخزن سری با روزه‌های جانبی ارائه نمود (ساگووارا 1995). از مزایای مدل مخزن عدم نیاز به تعریف بارش مازاد و چگونگی استخراج رواناب مستقیم می‌باشد. یو و هاشینو (2000) با اقتباس از مدل اولیه مخزن ساگووارا روش جدیدی را در استخراج توابع پاسخ پالس واحد برای اجزای تشکیل دهنده جریان آبراهه‌ای با استفاده از سه مخزن سری و یک مخزن موازی پیشنهاد نموده-

معادله پیوستگی گرده‌ای<sup>1</sup> در صدد یافتن رابطه‌ای مابین ورودی و خروجی حوضه می‌باشند. در چنین مدل‌هایی توصیف ریاضی رفتار حوضه در فرایند تبدیل بارش به رواناب، در قالب یک تابع تبدیل<sup>2</sup> صورت می‌پذیرد. رایج‌ترین تابع تبدیل حوضه، تابع پاسخ پالس واحد<sup>3</sup> یا همان هیدروگراف واحد می‌باشد. شرمن در سال 1932 برای اولین بار با استفاده از مفهوم تئوری سیستم خطی، هیدروگراف رواناب مستقیم منتج از یک واحد بارش موثر با مدتی معین، در نقطه خروجی حوضه را به عنوان هیدروگراف واحد معرفی کرد (سینگ 1988). با تعیین هیدروگراف واحد یک حوضه با تداوم معین، با استفاده از دو اصل تناسب<sup>4</sup> و انطباق<sup>5</sup> می‌توان هیدروگراف کمپلکس مربوط به هر بارش را با استفاده از رابطه تطبیق زمانی در یک سیستم زمانی<sup>6</sup> ناپیوسته به صورت زیر محاسبه نمود (چائو 1988):

$$Q_n = \sum_{m=1}^{n-1} P_m U_{n-m+1} \quad n = 1, 2, \dots, N \quad [1]$$

که در آن  $Q_n$  مولفه‌های هیدروگراف رواناب مستقیم،  $P_m$  پالس‌های بارش مازاد در فواصل زمانی یکسان و  $U_{n-m+1}$  مولفه تابع پاسخ پالس واحد در  $n - m + 1$  امین فاصله زمانی می‌باشد. در صورتیکه مولفه‌های هیدروگراف رواناب مستقیم و پالس‌های بارش مازاد معلوم باشند با روش معکوس می‌توان مولفه‌های هیدروگراف واحد را به دست آورد. جین و همکاران (2005) طبقه بندی جامعی از روش‌های موجود در استخراج تابع پاسخ پالس واحد با استفاده از رابطه 1 ارائه و به محدودیت‌های موجود در بکارگیری برخی از روش‌های رایج اشاره کردند. تودینی (1988)، سینگ (1988)، سینگ و ولهایزر (2002)، اوکل و تودینی (1996) بررسی جامعی در ارتباط با روش‌های مختلف استخراج هیدروگراف واحد در قالب مدل‌های متعدد

<sup>1</sup> Lumped models

<sup>2</sup> Transfer function

<sup>3</sup> Unit pulse response function

<sup>4</sup> Principle of proportionality

<sup>5</sup> Principle of superposition

<sup>6</sup> Convolution equation

زیرسطحی سریع، زیرسطحی تاخیری و زیرزمینی، که به طور تحلیلی انجام خواهد پذیرفت، از جمله اهداف تحقیق حاضر می‌باشد.

### مواد و روش‌ها

در شکل 1 ساختار مدل مفهومی توسعه یافته، ارائه شده است که از لحاظ کلی، شبیه مدل یو و هاشینو (2000) می‌باشد. در این مطالعه، به منظور ارتقای مدل مخزن یو و هاشینو (2000)، به جای یک مخزن موازی، از یک واحد هیبرید شامل دو مخزن با ضرائب ذخیره متفاوت برای شبیه‌سازی رواناب سریع استفاده شده است. معادلات مربوط به توابع پاسخ پالس واحد بر اساس تابع پاسخ ضربه‌ای واحد با استفاده از تبدیلات لاپلاس بازنویسی شد.

در شکل 1،  $q_1$ ،  $q_2$  و  $q_3$  به ترتیب نشان‌دهنده جریان‌های زیرسطحی سریع، زیرسطحی تاخیری و رواناب زیرزمینی می‌باشند.  $f_1$  و  $f_2$  به ترتیب نشان‌دهنده نفوذ از مخزن 1 به مخزن 2 و از مخزن 2 به مخزن 3 می‌باشند. شاخص  $S_c$  معادل تلفات اولیه بارش در نظر گرفته شده است که تاثیر شرایط رطوبتی پیشین خاک را بر روی فرایند تولید رواناب نشان می‌دهد. در این مدل، هر رگبار در ابتدا مخزن 1 را پر می‌کند و رواناب سطحی سریع  $q_0$  از قسمت هیبرید زمانی اتفاق می‌افتد که ذخیره مخزن 1 از حد آستانه  $S_c$  فراتر رود، یعنی  $S_1 > S_c$ .

به ازای یک ورودی واحد لحظه‌ای  $\delta(t)$  تغییرات ذخیره (میلی‌متر بر ساعت) در مخزن 1 با استفاده از معادله پیوستگی به صورت زیر می‌باشد:

$$\frac{dS_1(t)}{dt} = d(t) - Q_1(t) \quad [2]$$

اند. یوکو و همکاران (2001) ساختار مدل مخزن ساگووارا را جهت شبیه‌سازی بارش و جریان‌های روزانه در 12 حوضه ژاپن مورد استفاده قرار دادند. آنها دریافتند که پارامترهای واسنجی شده، نه فقط توصیف‌کننده ساختار مدل بلکه منعکس‌کننده خصوصیات جغرافیایی حوضه نیز می‌باشند که برای هر حوضه تقریباً ثابت هستند. چن و آدامز (2006) به منظور افزایش توانایی مدل اولیه مخزن ساگووارا، با ایجاد یک ساختار اضافی جهت نشان دادن اثرات ذخیره رطوبت اولیه و ثانویه خاک به نتایج قابل قبولی در شبیه‌سازی رواناب در حوضه ژانگ جیانگ چین دست یافتند. ناصر و بروئن (2008) مدل‌های عصبی-فازی را جهت در نظر گرفتن تغییرات زمانی و مکانی مدل‌های بارش-رواناب گرده‌ای بکاربردند. چوا و همکاران (2009) شبکه‌های عصبی مصنوعی خطی را برای تعیین پارامترهای فیزیکی در مدل سازی بارش-رواناب مبتنی بر رگبار مورد استفاده قرار دادند. بررسی منابع و مقالات مختلف نشان می‌دهد که روشهای رایج در استخراج توابع پاسخ پالس واحد هنوز تعداد زیادی مسائل حل نشده دارد که از آن جمله می‌توان به چگونگی جداسازی اجزای رواناب از جریان پایه دائمی رودخانه (چائو و همکاران 1988)، چگونگی تعریف بارش مازاد<sup>1</sup> و نیز عدم در نظر گرفتن تاثیر شرایط رطوبتی خاک قبل از رگبار در تولید فرایند رواناب اشاره نمود (مایز و تائور 1982، تودینی 1988). موارد ذکر شده می‌تواند منجر به بروز خطاهایی گردد که تاثیر آن در اختلافات بین مقادیر رواناب مشاهداتی و محاسباتی دیده خواهد شد. مطالعه حاضر با حفظ فرضیات اساسی برآورد هیدروگراف واحد از قبیل توزیع یکنواخت بارش در سراسر حوضه و پاسخ خطی جریان به فرایند بارش، توابع پاسخ پالس واحد را برای اجزای رواناب سریع و آهسته به کمک یک مدل مفهومی توسعه داده شده استخراج می‌نماید. شبیه‌سازی فرایند بارش-رواناب با در نظر گرفتن نقش تمامی اجزای شرکت‌کننده در رواناب کل شامل رواناب سطحی،

<sup>1</sup> Excess rainfall

رشد به اندازه فواصل زمانی پالس‌های رگبار ( $\Delta t$ ) برخوردار باشد در این صورت تابع پاسخ پالس واحد به ازای یک ورودی واحد (یک میلی‌متر یا یک سانتی متر) که در مدت  $\Delta t$  ساعت اتفاق افتاده باشد به صورت زیر می‌باشد:

$$S_1(t) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t e^{-C_2(t-\tau)} d\tau \quad t \geq \Delta t \quad [7]$$

$$S_1(t) = 0 \quad t < \Delta t \quad [8]$$

حل معادله 7 که در واقع تابع پاسخ پالس واحد برای تغییرات ذخیره مخزن 1 خواهد بود، به شرح زیر می‌باشد:

$$S_1(t) = \frac{1}{\Delta t} \frac{e^{-C_2 t} (-1 + e^{C_2 \Delta t})}{C_2} \quad t \geq \Delta t \quad [9]$$

$$S_1(t) = 0 \quad t < \Delta t \quad [10]$$

مجموع خروجی‌ها از مخزن 2 متناسب با مقدار ذخیره آن به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} Q_2(t) &= f_2(t) + q_2(t) \quad [11] \\ &= b_2 S_2(t) + a_2 S_2(t) \\ &= (a_2 + b_2) S_2(t) = C_2 S_2(t) \end{aligned}$$

لذا معادله پیوستگی برای این مخزن به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{dS_2(t)}{dt} + C_2 S_2(t) = I_2(t) \quad [12]$$

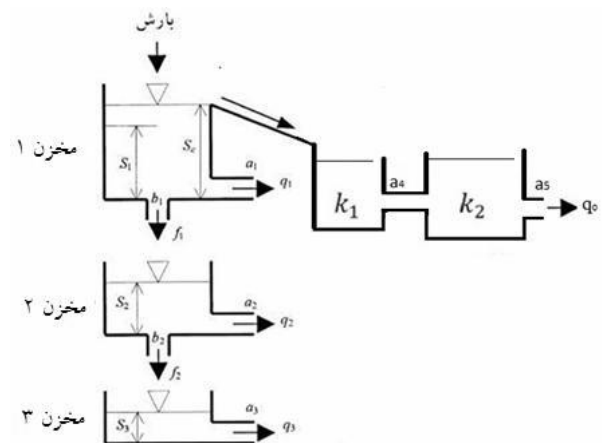
که در آن  $C_2 = a_2 + b_2$  و  $I_2(t) = f_1(t)$  مقادیر متغیر نفوذ از مخزن 1 به مخزن 2 می‌باشد. با فرض اینکه  $f_1(t) = b_1 * S_1(t)$  مقادیر نفوذ  $f_1$  به صورت معادله 13 خواهد بود:

$$f_1(t) = b_1 S_1(t) = \frac{b_1}{\Delta t} \left[ \frac{e^{-C_2 t} (-1 + e^{C_2 \Delta t})}{C_2} \right] \quad [13]$$

با جایگذاری معادله 13 در معادله 12 خواهیم داشت:

$$\frac{dS_2(t)}{dt} + C_2 S_2(t) = \frac{b_1}{\Delta t} \left[ \frac{e^{-C_2 t} (-1 + e^{C_2 \Delta t})}{C_2} \right] \quad [14]$$

استفاده از روش تبدیلات لاپلاس معادله 14 به صورت زیر خواهد بود:



شکل 1- ساختار مدل مفهومی توسعه یافته

با فرض اینکه خروجی‌ها از مخازن توابعی خطی از ذخیره باشند مقدار  $Q_1(t)$  به شرح زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} Q_1(t) &= f_1(t) + q_1(t) = a_1 S_1(t) + b_1 S_1(t) \quad [3] \\ &= (a_1 + b_1) S_1(t) = C_1 S_1(t) \end{aligned}$$

با توجه به معادله 3 می‌توان معادله 2 را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{dS_1(t)}{dt} + C_1 S_1(t) = d(t) \quad [4]$$

معادله 4 یک معادله دیفرانسیل خطی درجه اول می‌باشد که با شرط مرزی  $S(0) \big|_{t=0} = 0$  تبدیل لاپلاس آن به صورت زیر می‌باشد:

$$S_1(s) = \frac{1}{C_2 + s} \quad [5]$$

که در آن  $s$  ضریب تبدیل لاپلاس و  $S_1(s)$  تبدیل لاپلاس  $S_1(t)$  می‌باشد. با استفاده از تبدیل لاپلاس معکوس، معادله 5 به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$S_1(t) = e^{-C_2 t} \quad [6]$$

معادله 6 تابع پاسخ ضربه‌ای واحد<sup>1</sup> برای تغییرات ذخیره مخزن 1 می‌باشد. با فرض اینکه زمان  $t$  از نرخ

<sup>1</sup>Unit impulse response

با استفاده از تبدیل لاپلاس معکوس، معادله 22 به صورت زیر خواهد بود:

$$S_3(t) = \frac{-b_1 b_2}{C_1 \Delta t} \left[ \frac{(e^{C_1 \Delta t} - 1)e^{-C_1 t}}{(C_2 - C_1)(\alpha_3 - C_1)} + \frac{(1 - e^{C_1 \Delta t})e^{-C_2 t}}{(C_1 - C_2)(C_2 - \alpha_3)} - \frac{(e^{C_1 \Delta t} - 1)e^{-\alpha_3 t}}{(\alpha_3 - C_1)(\alpha_3 - C_2)} \right] \quad t \geq \Delta t \quad [23]$$

$$S_3(t) = 0 \quad t < \Delta t \quad [24]$$

بعد از محاسبه  $S_1$  و  $S_2$  و  $S_3$  با توجه به رابطه دبی و ذخیره، تابع پاسخ پالس واحد رواناب آهسته را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$U_{1-3}(t) = \sum_{i=1}^3 q_i(t) = \sum_{i=1}^3 a_i S_i(t) \quad [25]$$

$$= a_1 S_1 + a_2 S_2 + a_3 S_3$$

استخراج تابع پاسخ پالس واحد برای رواناب سریع به منظور ارتقای مدل مخزن در شبیه‌سازی فرایند رواناب سریع (مستقیم) و توصیف بهتر از خصوصیات حوضه در فرایند انتقال و تخلیه رواناب، از یک واحد هیبرید که شامل دو مخزن سری با ضرائب ذخیره متفاوت می‌باشد استفاده شده است. به ازای یک ورودی واحد لحظه‌ای  $\delta(t)$ ، پاسخ ضربه واحد مدل هیبرید یک واحدی که در واقع همان هیدروگراف واحد لحظه‌ای می‌باشد به صورت زیر خواهد بود (بونیا و همکاران 2005):

$$u(t) = \frac{1}{k_1 - k_2} \left[ e^{-\frac{t}{k_1}} - e^{-\frac{t}{k_2}} \right] \quad [26]$$

با فرض  $a_4 = \frac{1}{k_2}$  و  $a_5 = \frac{1}{k_1}$ ، تابع پاسخ پالس واحد به ازای یک ورودی واحد که در مدت  $\Delta t$  رویداده باشد از طریق رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$U_0(t) = q_0 = \frac{\alpha_4 \alpha_5}{\alpha_5 - \alpha_4} \frac{1}{\Delta t} \int_{t-\Delta t}^t \left[ e^{-\alpha_4(t-\tau)} - e^{-\alpha_5(t-\tau)} \right] d\tau \quad [27]$$

$$S_2(s) = \frac{b_2(-1 + e^{C_1 \Delta t})}{C_1(C_2 + s)\Delta t(C_1 + s)} \quad [15]$$

با استفاده از تبدیل لاپلاس معکوس، معادله 15 به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$S_2(t) = \frac{b_2}{C_2 \Delta t} \left[ \frac{(e^{C_1 \Delta t} - 1)e^{-C_2 t}}{(C_2 - C_1)} + \frac{(1 - e^{C_1 \Delta t})e^{-C_1 t}}{(C_2 - C_1)} \right] \quad t \geq \Delta t \quad [16]$$

$$S_2(t) = 0 \quad t < \Delta t \quad [17]$$

خروجی از مخزن 3 نیز متناسب با مقدار ذخیره آن می‌باشد یعنی:

$$q_3(t) = \alpha_3 S_3(t) \quad [18]$$

لذا معادله پیوستگی برای این مخزن به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{dq_3(t)}{dt} + C_3 S_3(t) = f_2(t) \quad [19]$$

که در آن  $C_3 = \alpha_3$  و  $f_2(t)$  مقادیر متغیر نفوذ از مخزن 2 به مخزن 3 می‌باشد. با فرض اینکه  $f_2(t) = b_2 * S_2(t)$  باشد مقادیر نفوذ  $f_2(t)$  به صورت معادله 20 خواهد بود:

$$f_2(t) = b_2 S_2(t) \quad [20]$$

$$= \frac{b_1 b_2}{C_1 \Delta t} \left[ \frac{(e^{C_1 \Delta t} - 1)e^{-C_1 t}}{(C_2 - C_1)} + \frac{(1 - e^{C_1 \Delta t})e^{-C_2 t}}{(C_2 - C_1)} \right]$$

با جایگذاری معادله 20 در معادله 19 خواهیم داشت:

$$\frac{dS_3(t)}{dt} + \alpha_3 S_3(t) = \frac{b_1 b_2}{C_1 \Delta t} \left[ \frac{(e^{C_1 \Delta t} - 1)e^{-C_1 t}}{(C_2 - C_1)} + \frac{(1 - e^{C_1 \Delta t})e^{-C_2 t}}{(C_2 - C_1)} \right] \quad [21]$$

با استفاده از روش تبدیل لاپلاس معادله 21 به صورت زیر خواهد شد:

$$S_3(s) = \frac{-b_2 b_2 (1 - e^{C_1 \Delta t})}{C_1 (\alpha_3 + s) \Delta t (C_1 + s) (C_2 + s)} \quad [22]$$

که در آن  $Q_0$  مقدار جریان که قبل از سیلاب وجود داشته است.

جواب معادله 27 به صورت زیر خواهد بود:

$$t \geq \Delta t \quad [28]$$

$$U_0(t) = \frac{a_5(e^{a_4 \Delta t} - 1)e^{-a_4 t}}{a_5 - a_4} - \frac{a_4(e^{a_5 \Delta t} - 1)e^{-a_5 t}}{a_5 - a_4} \quad [29]$$

$$U_0(t) = 0 \quad t < \Delta t$$

محاسبه شاخص  $S_c$

شاخص  $S_c$  با استفاده از معادله بیلان روزانه (ساکسون و لنز 1967) قابل محاسبه می‌باشد:

$$S_c = \sum_{i=1}^m [ET_{day}(i) - P_{day}(i)] \quad [32]$$

که در آن  $m$  فاصله بین آخرین رگبار سیل-ساز قبلی با رگبار فعلی بر حسب روز،  $ET_{day}$  تبخیر-تعرق روزانه بر حسب میلی متر،  $P_{day}$  مقدار بارش روزانه بر حسب میلی‌متر می‌باشد. محاسبه روزانه  $S_c$  بلافاصله پس از آخرین رگبار سیل ساز شروع می‌شود که در واقع بیانگر مقدار متوسط رطوبت اشباع خاک منطقه خواهد بود. مقادیر بارش روزانه ثبت شده در هر سه ایستگاه، با استفاده از روش تیسن به مقادیر متوسط ناحیه‌ای تبدیل شدند. مقادیر تبخیر از تشتک که به طور روزانه در هر سه ایستگاه اندازه‌گیری می‌گردد با استفاده از رابطه 33 پس از تبدیل به مقادیر تبخیر-تعرق، با استفاده از روش تیسن به مقادیر متوسط ناحیه‌ای تبدیل سپس در معادله 33 مورد استفاده واقع شده است:

$$ET_{forest} = 0.8ET_0 + \alpha_i P \quad [33]$$

که در آن  $ET_{forest}$  تبخیر-تعرق پوشش‌های جنگلی بر حسب میلی‌متر بر روز می‌باشد. عبارت اول در فرمول 33 یک تخمین از میزان تبخیر-تعرقی است که در نواحی جنگلی اتفاق می‌افتد و عبارت دوم درصدی از تلفات گیرش است که در روزهای بارانی بر میزان تبخیر-تعرق می‌افزاید. عبارت دوم معادله 33 به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_i P = \frac{0.95N_s(S+0.2\tau_s)}{N_d} \quad [34]$$

که در آن  $N_d$  یک دوره زمانی بر حسب روز،  $N_s$  تعداد رگبارهای ثبت شده در دوره زمانی  $N_d$ ،  $t_s$  متوسط تداوم رگبار بر حسب ساعت،  $S$  گنجایش ظرفیت ذخیره گیرش بر حسب میلی‌متر که

رواناب محاسباتی

از آنجا که داده‌های بارش-رواناب در عمل در فواصل زمانی مشخص  $\Delta t$  متوسط گرفته می‌شوند، بهتر است توابع پاسخ پالس واحد نیز در یک سیستم زمانی ناپیوسته نشان داده شود. با این توصیف هرگاه هیدروگراف واحد در دسترس باشد مولفه‌های جریان که در اثر رگبار به وجود آمده‌اند به صورت زیر قابل محاسبه خواهند بود:

$$Q(n) = \frac{A}{3.6} \left[ \sum_{m=1}^{n \leq M} P_m U_{1-3}(n-m+1) + \sum_{m=1}^{n \leq M} Z_0(m) U_0(n-m+1) \right] \quad n=1,2,\dots,N \quad [30]$$

که در آن  $Q(n)$  میزان دبی جریان در زمان  $t = n\Delta t$  برحسب مترمکعب بر ثانیه،  $A$  مساحت حوضه برحسب کیلومتر مربع،  $P_m$  ارتفاع بارش بر حسب میلی‌متر در مدت  $m$  امین فاصله زمانی،  $Z_0$  میزان ورودی به قسمت هیبرید بر حسب میلی‌متر. هر رگباری که در سطح حوضه رخ می‌دهد ابتدا مخزن 1 را پر می‌کند. تغییرات ذخیره مخزن 1 با استفاده از تابع پاسخ پالس واحد ذخیره مخزن 1 (رابطه 7) و رابطه تطبیق زمانی محاسبه خواهد شد. هرگاه ذخیره مخزن 1 از میزان  $S_c$  فزونی یابد ( $Z_0 = S_1 - S_c$ ) در این صورت مقادیر مازاد، ورودی به قسمت مخزن موازی هیبرید شده را تشکیل خواهند داد. در صورتی که ذخیره مخزن 1 از میزان  $S_c$  کمتر باشد  $Z_0 = 0$  خواهد بود. پس از محاسبه اجزای جدید جریان که در اثر رگبار در رودخانه بوجود آمده-اند دبی کل جریانی که از خروجی حوضه زهکشی می‌گردد معادل خواهد بود با:

$$Q_T(n) = Q_0 + Q(n) \quad [31]$$

$$\begin{aligned}
 a_4 - a_5 &> 0 \\
 a_5 - a_1 &> 0 \\
 a_1 - a_2 &\geq 0 \\
 a_2 - a_3 &\geq 0 \\
 1 - (a_1 + b_1) &\geq 0 \\
 1 - (a_2 + b_2) &\geq 0 \\
 b_1 - b_2 &> 0
 \end{aligned}
 \quad [36]$$

با تعریف یک تابع جریمه<sup>1</sup> در ساختار برنامه نوشته شده، سعی گردید مقادیر کمینه تابع هدف با احتساب شروط در نظر گرفته شده، حاصل گردد. به منظور توقف عمل تکرار در تخمین پارامترها زمانیکه حداقل مقدار تابع هدف حاصل شده باشد از معیار همگرایی<sup>2</sup>، استفاده شده است. بدین منظور با انتخاب یک سری اولیه از پارامترها، الگوریتم بهینه‌سازی تا زمانی تکرار می‌گردد که تابع هدف در دو تکرار متوالی از یک معیار متقاعد کننده نتواند بیشتر کاهش یابد. در این مطالعه معیار همگرایی 0/0001 در نظر گرفته شده است.

#### اعتبار سنجی مدل

جهت بررسی دقت مدل در پیش‌بینی جریان رواناب از سه معیار آماری شامل میانگین خطای مطلق نسبی<sup>3</sup> ( $RMAE$ )، معیار ناش-ساتکلیف<sup>4</sup> ( $E$ ) و خطای مطلق نسبی دبی اوج ( $RAE_p$ ) به صورت زیر استفاده گردید (سیواکومار و همکاران 2002):

$$RMAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)|}{Q_{obs}(t)} \quad [37]$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)]^2}{\sum_{t=1}^n [Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad [38]$$

$$RAE_p = \frac{|Q_{pobs} - Q_{pcal}|}{Q_{pobs}} \quad [39]$$

برای پوشش‌های جنگلی پهن برگ معادل 0/8 میلی‌متر توصیه شده است (شاتل 1993).

#### تخمین پارامترهای مدل

با توجه به روابط 25 و 29، توابع پاسخ پالس واحد توابعی از پارامترهای مدل مخزن ( $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_1, b_2$ ) می‌باشند که به طور ترکیبی فرایندهای ذخیره، تولید و تخلیه رواناب از حوضه را مدل‌سازی می‌کنند. با انتخاب تابع هدف 35، با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی مقادیر بهینه‌ای از پارامترها که منجر به مقادیر کمینه تابع هدف گردند برای حوضه مورد مطالعه استخراج گردید:

$$F(a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{[Q_{obs}(t) - Q_{cal}(t)]^2}{Q_{obs}(t)} \right] \quad [35]$$

که در آن  $Q_{obs}(t)$  و  $Q_{cal}(t)$  مقادیر دبی‌های مشاهده‌ای و محاسباتی در زمان  $t$ ، تعداد دبی‌های مشاهده‌ای می‌باشد.

به منظور شناسایی پارامترهای مدل‌های مفهومی بارش-رواناب، روش‌های جستجوی مستقیم به خصوص برای توابع هدف پیچیده یا توابعی که به راحتی مشتقات نسبی‌شان قابل حل به طور تحلیلی نمی‌باشد توصیه شده‌اند (جانستون و پیلگریم 1976). در مطالعه حاضر از یکی از الگوریتم‌های جستجوی مستقیم با نام نلدر-مید (لاگاریز و همکاران 1998) که در محیط نرم افزار مطلب کد نویسی گردید جهت تخمین پارامترهایی از مدل که منجر به مقدار کمینه تابع هدف گردد استفاده شده است.

به منظور جلوگیری از تخمین مقادیر غیر واقعی برای پارامترها و اطمینان از دستیابی به مقادیر صحیح برای پارامترها، محدودیت‌هایی بر اساس مفهوم فیزیکی پارامترهای به صورت در نظر گرفته شده است:

<sup>1</sup>Penalty function

<sup>2</sup>Convergence criterion

<sup>3</sup>Relative mean absolute error

<sup>4</sup>Nash-Sutcliffe



روش تیسن استخراج شده‌اند در شکل 2 نشان داده شده است.

تخمین پارامترهای مدل مخزن برای حوضه مورد مطالعه به منظور استخراج پارامترهای مدل، داده‌های بارش- رواناب سه رویداد مختلف 1375/7/9، 1378/8/10 و 1380/7/16 که مشخصات هر یک از آنها در جدول 1 ارائه شده است، مورد استفاده قرار گرفت. پارامترهای استخراج شده مدل در جدول 2 ارائه شده است. به منظور دستیابی به تابع پاسخ پالس واحد متوسط حوضه، میانگین هر یک از پارامترها محاسبه گردید و بر اساس آن، تابع پاسخ پالس واحد رواناب آهسته و سریع ترسیم و در شکل 3 نشان داده شده است. همانطور که از شکل 3 استنباط می‌گردد، دبی اوج هیدروگراف واحد رواناب سریع (0/0649 میلی متر بر ساعت) در مقایسه با دبی اوج هیدروگراف واحد رواناب آهسته (0/00301 میلی متر بر ساعت) به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگتر می‌باشد. از لحاظ زمانی، هیدروگراف واحد آهسته نسبت به هیدروگراف واحد رواناب سریع از زمان تداوم طولانی‌تری برخوردار می‌باشد.

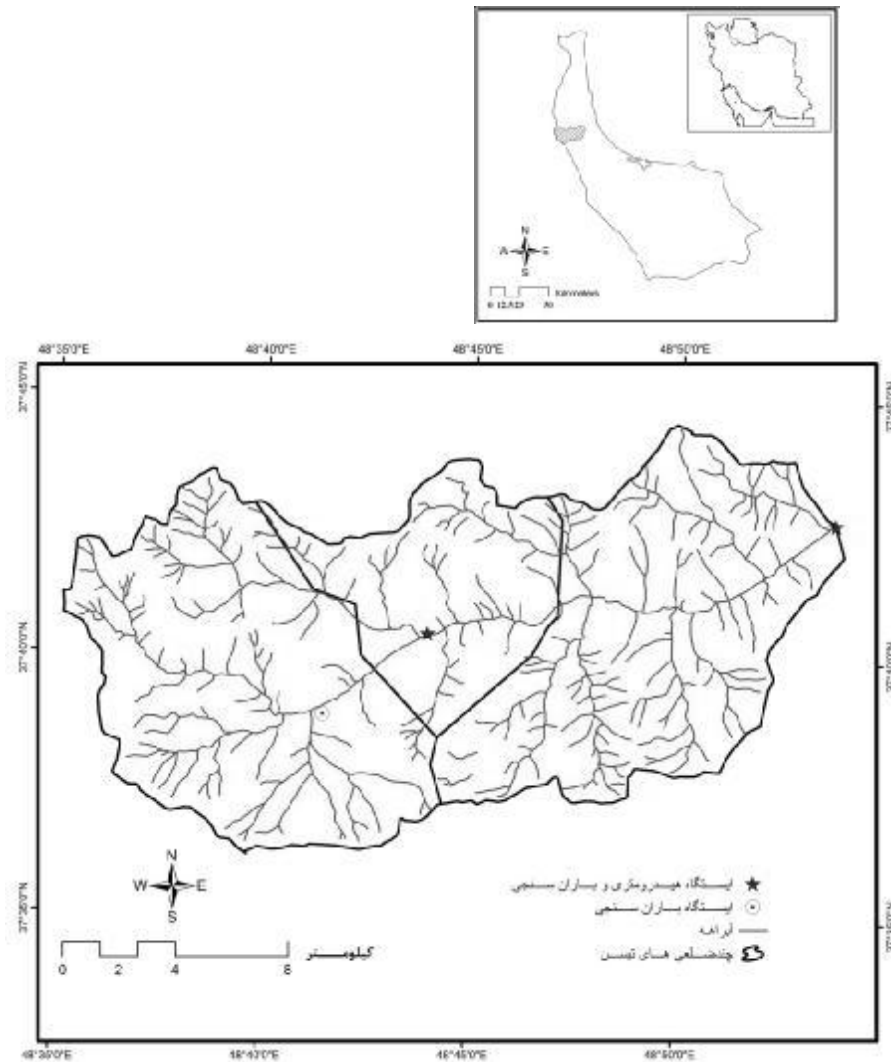
با توجه به تداوم زمانی هیدروگراف‌های واحد رواناب سریع و آهسته می‌توان نتیجه گرفت که در مطالعه حوضه‌ها، پاسخ رواناب سطحی به فرایند بارش از حساسیت بیشتری نسبت به رواناب آهسته برخوردار می‌باشد. به همین دلیل از گذشته تاکنون در اکثر مطالعات مربوط به فرایند بارش- رواناب، با تعاریف ساختگی از بارش مازاد، به منظور استخراج رواناب مستقیم، تنها به شبیه‌سازی این جزء از رواناب کل سیلاب پرداخته شده و در اکثر مواقع از تاثیر پذیری رواناب آهسته از رگبار صرف نظر شده است.

به منظور بررسی کارایی مدل در پیش بینی رواناب متأثر از رگبار، توابع پاسخ پالس واحد متوسط حوضه برای پنج رویداد متفاوت و همچنین سه رویدادی که در استخراج پارامترها استفاده شده بودند بکار گرفته شد.

که در آنها  $Q_{obs}(t)$  و  $Q_{cal}(t)$  به ترتیب جریان‌های مشاهداتی و محاسباتی در زمان‌های  $t$  می‌باشند.  $Q_{pobs}$  و  $Q_{pcal}$  به ترتیب دبی اوج مشاهداتی و محاسباتی و  $\overline{Q_{obs}}$  متوسط دبی‌های مشاهداتی می‌باشد.

#### منطقه مورد مطالعه

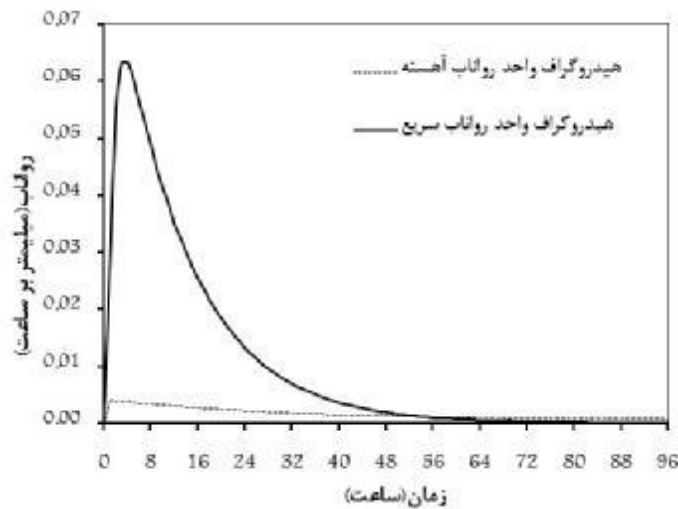
به منظور بررسی کارایی و دقت مدل، داده‌های بارش- رواناب حوضه معرف ناورود واقع در استان گیلان مورد استفاده قرار گرفته است. حوضه مورد نظر حوضه‌ای جنگلی-کوهستانی با مساحتی معادل 274 کیلومتر مربع و شیب متوسط 31/16 درصد می‌باشد. طول آبراه اصلی 32/5 کیلومتر با شیب 12/5 درصد می‌باشد. ارتفاع حوضه در نقطه خروجی معادل 130 متر و در مرتفع‌ترین نقطه حوضه 3016 متر می‌باشد. از لحاظ ساختار زمین‌شناسی بیش از 85 درصد از سطح حوضه را سنگ‌های آذرآواری و توفی همراه با سنگ‌های آتشفشانی و آهک ناخالص تشکیل می‌دهند که دارای نفوذپذیری بالایی می‌باشند. متوسط بارندگی سالیانه حوضه 852/7 میلی‌متر، متوسط درجه حرارت سالیانه 13/5 درجه سانتی‌گراد، متوسط درصد رطوبت نسبی 73/36 و متوسط سرعت باد 3/32 کیلومتر بر ساعت می‌باشد. حداکثر بارندگی این حوضه آبریز به ترتیب در فصل‌های پاییز، بهار، تابستان و زمستان اتفاق می‌افتد. داده‌های سطح آب در نقطه خروجی حوضه (ایستگاه خرجگیل) با استفاده از منحنی دبی- اشل به جریان تبدیل می‌شود. سه ایستگاه بارانسنجی ثابت در سطح حوضه به ثبت رویدادهای بارش می‌پردازند. همچنین با تجهیز ایستگاه‌های بارانسنجی پارامترهای دیگر اقلیمی نظیر دما، سرعت باد، تبخیر، رطوبت نسبی و ساعات آفتابی نیز اندازه‌گیری می‌گردد. رگبارهای ثبت شده در هر سه ایستگاه که از لحاظ زمانی متعلق به سیلاب‌های مشاهداتی بوده‌اند استخراج و با استفاده از روش تیسن پس از تبدیل به رگبار متوسط ناحیه‌ای در مدل مورد استفاده قرار گرفتند. سطح تاثیر ایستگاه‌های بارانسنجی که به



شکل 2- موقعیت جغرافیایی حوضه رودخانه ناورد

جدول 1- خصوصیات رگبارها و مقدار  $S_c$  برای سیلاب های منتخب

$S_c$ (میلی متر)	متوسط شدت رگبار (میلیمتر بر ساعت)	مدت رگبار (ساعت)	میزان رگبار (میلی متر)	میزان رواناب (میلی متر)	تاریخ سیلاب	ردیف
13 /03	1/72	23	39/63	10/85	1375/7/9	1
9/01	1/74	13	22/59	5/09	1378/8/10	2
15/45	2/45	12	29/37	6/54	1380/7/16	3
5/40	0/71	31	21/85	4/10	1374/7/19	4
12/98	1/82	30	54/48	14/74	1374/7/24	5
7/3	1/26	21	26/54	7/74	1380/8/4	6
13/77	3/44	9	30/97	11/39	1382/6/29	7
7/9	0/46	21	26/58	5/15	1384/6/15	8



شکل 3- توابع پاسخ پالس واحد رواناب آهسته و سریع حوضه ناورود

جدول 2- پارامترهای استخراج شده مدل

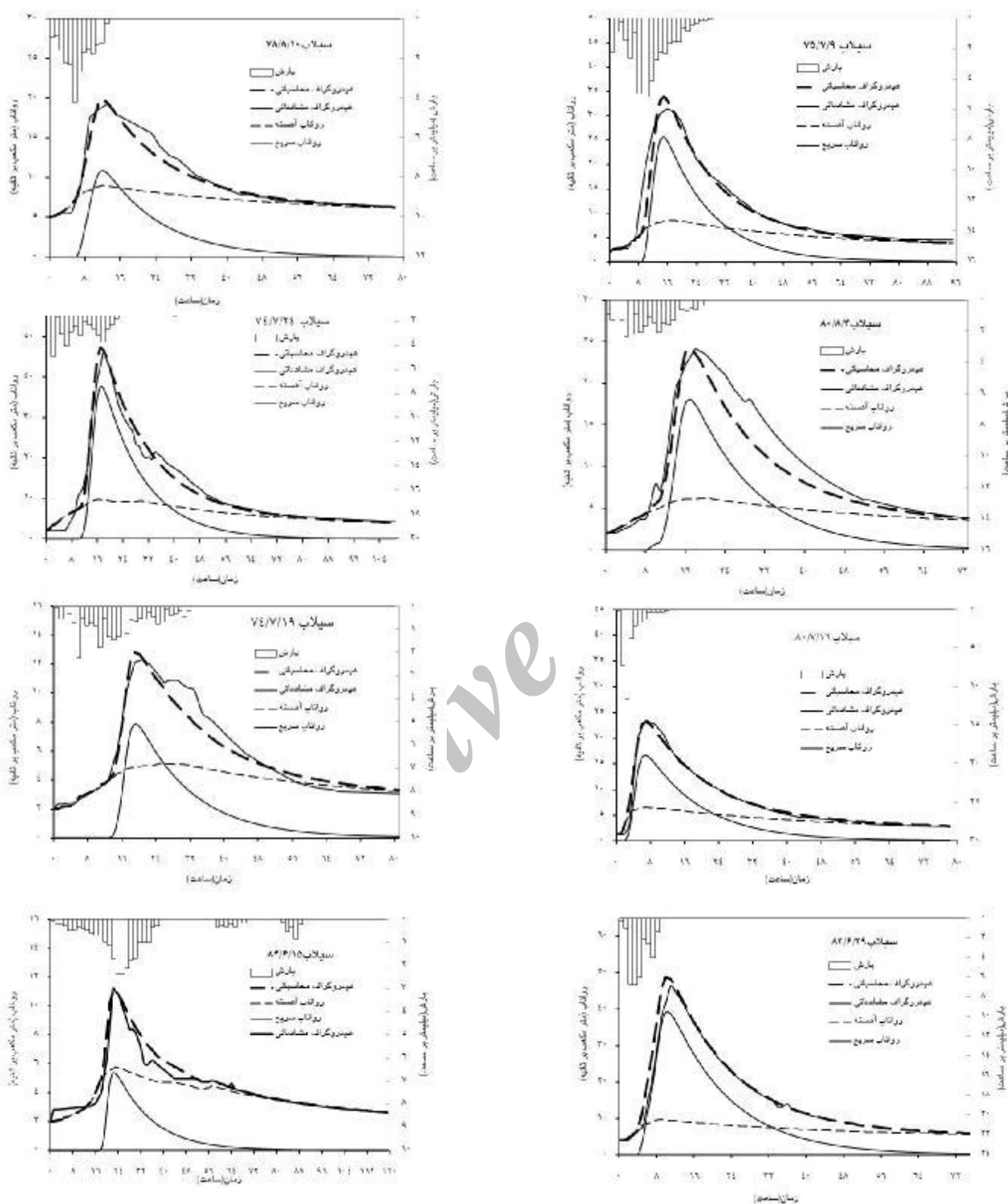
تاریخ رویدادها	$b_2$	$b_1$	$a_5$	$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	تابع خطا
1375/7/9	0/01839	0/17730	0/09103	0/89997	0/00001	0/00321	0/00321	0/00257
1378/8/10	0/01157	0/17130	0/07096	0/89990	0/00001	0/00131	0/00131	0/00095
1380/7/16	0/01932	0/17937	0/08948	0/89997	0/00001	0/00242	0/00401	0/00035
متوسط	0/01643	0/17599	0/08382	0/89995	0/00001	0/00231	0/00284	-----

\* واحد پارامترهای استخراج شده بر حسب عکس زمان (یک بر ساعت) می‌باشد.

جدول 3- شاخص‌های کمی ارزیابی مدل جهت پیش بینی رواناب

تاریخ سیلاب	دبی اوج (متر مکعب بر ثانیه) مشاهداتی محاسباتی	خطای مطلق نسبی دبی اوج <sup>1</sup>	خطای مطلق نسبی مقادیر دبی <sup>2</sup>	خطای مطلق نسبی مقادیر ارتفاع رواناب <sup>3</sup>	معیار ناش - ساتکلیف <sup>3</sup>	مقادیر سریز از مخزن 1 (میلیمتر)
1375/7/9	31/40	32/64	0/0395	0/08779	0/0958	5/10
1378/8/10	19/20	19/33	0/0068	0/05080	0/0747	2/12
1380/7/16	23/40	23/64	0/01025	0/06701	0/0275	3/41
1374/7/19	12/35	12/43	0/0065	0/1143	0/0854	1/51
1374/7/24	46/40	45/44	0/02069	0/1180	0/0326	7/4
1380/8/4	24/11	24/17	0/1029	0/1292	0/1473	4/11
1382/6/29	46/64	46/51	0/0028	0/02559	0/0184	7/79
1384/6/15	11/20	11/14	0/0054	0/05589	0/1883	1/18

1 و 2 و 3 به ترتیب از روابط 37، 38 و 39 محاسبه شده‌اند.



شکل 4- هیدروگراف‌های محاسباتی و مشاهداتی برای رویدادهای مختلف بارش حوضه ناورود

چنین نتایجی شده است. به عنوان مثال در رویداد 80/7/16 با وجود اینکه 53 درصد از مقدار رگبار صرف جبران تلفات رطوبت خاک شده است، اما به دلیل شدت زیاد رگبار، مقادیر قابل توجهی از رگبار بدون اینکه فرصت نفوذ بیابند به رواناب سریع تبدیل شده‌اند. این نتیجه برای رویداد 82/6/29 نیز قابل تعمیم می‌باشد. در رویداد 80/8/4 پایین بودن تلفات اولیه رطوبت خاک منجر به افزایش سهم رواناب سریع شده است. در رویداد 75/7/9 در مقایسه با رویداد 80/8/4، بالا بودن تلفات اولیه رطوبت خاک، سبب کاهش رواناب سریع گردیده است به طوریکه سهم رواناب سریع معادل 47 درصد رواناب کل شده است.

مدل توسعه داده شده در این تحقیق با ترکیبی از مخازن مرتبط در قالب یک مدل مفهومی که وابستگی بین مخازن آن بوسیله توابع نمائی از پارامترهای مدل توصیف می‌گردد، به خوبی توانسته است پاسخ حوضه نسبت به فرایند بارش‌ها را شبیه‌سازی نماید. پارامترهای مدل که در واقع منعکس‌کننده خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه می‌باشند، در یک حوضه تقریباً ثابت هستند و تنها تغییرات ذخیره رطوبت خاک در محاسبات رواناب متغیر می‌باشد. یوکو و همکاران (2001)، ساگورا (1995)، یو و هاشینو (2000) در تحقیقات خود در بکارگیری مدل مخزن به این نتیجه رسیدند که پارامترهای مدل مخزن در یک حوضه تقریباً ثابت بوده و تنها پارامترهای مربوط به ارتفاع ذخیره در رگبارهای متفاوت، متغیر خواهد بود. لی و چانگ (2005) در تحقیقات خود مبنی بر اصلاح هیدروگراف واحد لحظه‌ای ژئومورفولوژیکی با در نظر گرفتن نقش جریان‌های زیر سطحی به خصوص در اراضی شیبدار، دریافتند که چون جریان زیرسطحی اثر بیشتری در شاخه فروکش هیدروگراف سیلاب دارد، ترکیب فرایند جریان زیرسطحی و سطحی در مدل بندی هیدروگراف واحد لحظه‌ای بر اساس خصوصیات ژئومورفولوژی منجر به نتایج قابل قبول تری می‌گردد. شیب تند حوضه مورد مطالعه (شیب متوسط حوضه در حدود 31/16 درصد) و تراکم زهکشی (1/13 کیلومتر در کیلومتر مربع) و نسبت انشعابات (3/83) مناسب باعث می‌گردد که رگبارها اساساً در طول شیب‌های تند به سرعت

از نتایج پیش بینی رواناب که در شکل 4 نشان داده شده است استنباط می‌گردد که همبستگی خوبی بین مقادیر هیدروگراف‌های مشاهداتی و محاسباتی وجود دارد و مدل توسعه داده شده در این تحقیق به خوبی توانسته است با پارامترهای واسنجی شده برای حوضه، پاسخ حوضه را نسبت به رویداد بارش با توجه به سهم هر یک از اجزای تشکیل دهنده رواناب شبیه‌سازی نماید.

### نتایج و بحث

نتایج کارایی مدل در پیش‌بینی رواناب بر اساس رگبارها، در جدول 3 ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد مقادیر رواناب محاسباتی در مقایسه با مقادیر مشاهداتی از تطابق مناسبی برخوردار می‌باشند. شیب شاخه صعودی، مقدار دبی پیک و شکل خاص هر یک از هیدروگراف‌ها متفاوت بوده و این تفاوت‌ها به طور اساسی بوسیله الگوی رگبار، خصوصیات و ظرفیت رطوبت اولیه خاک هر یک از رگبارها ایجاد شده‌اند که مدل به خوبی توانسته است این تفاوت‌ها و خصوصیات را نشان دهد. با توجه به شکل‌های سیلاب 74/7/19 و 84/6/15 استنباط می‌گردد که سهم رواناب آهسته در مقایسه با رواناب سریع به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است به طوری که میزان سرریز از مخزن 1 ( $Z_0$ ) در سیلاب 74/7/19 معادل 1/51 میلیمتر (37 درصد رواناب کل) و در سیلاب 84/6/15 معادل 1/18 میلیمتر (23 درصد رواناب کل) می‌باشد. در سیلاب 78/8/10 هر چند رگبار از شدت بیشتری نسبت به رگبارهای 74/7/19 و 84/6/15 برخوردار می‌باشد اما به دلیل مقدار قابل توجه تلفات اولیه رگبار ( $S_c$  معادل 40 درصد)، سهم رواناب سریع تنها 36 درصد از رواناب کل را تشکیل داده است. در رگبارهای 82/6/29، 80/8/4، 80/7/16، 74/7/24 و 75/7/9 مقادیر سرریز از مخزن 1 به ترتیب 68، 53، 52، 50 و 47 درصد از رواناب کل را تشکیل می‌دهند که با توجه به شکل هیدروگراف سیلاب‌های مذکور، نقش رواناب سریع در این رویدادها به مقدار قابل توجه‌ای، رواناب کل را تحت تاثیر قرار داده است. خصوصیات رگبارها نظیر شدت و همچنین کمبود رطوبت اولیه خاک منجر به شکل‌گیری

استخراج توابع پاسخ پالس واحد منحصر به فرد با تداوم معین برای هر حوضه همانند تلاش هایی که یو و هاشینو (2000)، تری ویدی و سینگ (2005)، جین و همکاران (2005)، مایز و تائور (1982)، پرساد و همکاران (1999) و بسیاری از محققان دیگر انجام داده‌اند دور از دسترس نخواهد بود.

زهکشی شوند. شاخه صعودی تند هیدروگراف ها تایید کننده این نکته می‌باشد. شاخه نزولی نسبتاً طولانی هیدروگراف‌ها حاکی از نقش رواناب آهسته در زمان فروکش سیلاب پس از اتمام رگبار می‌باشد. بالا بودن مقادیر ضرائب  $b_1$  و  $b_2$  تایید کننده این نکته است که به دلیل بالا بودن میزان نفوذپذیری حوضه، بخش زیادی از رگبار به صورت تلفات نفوذی در حوضه ظاهر شده که در نهایت به صورت تخلیه دائمی در قالب جریان پایه در خواهد آمد. نتایج تحقیق حاضر نشان داد که

#### منابع مورد استفاده

- Basha HA, 2000. Simple nonlinear rainfall-runoff model. *J Hydrol Eng* 5: 25-32.
- Bhunya PK, Ghosh NC, Mishra, SK, Ojha, CSP and Berndtsson R, 2005. Hybrid model for derivation of synthetic unit hydrograph. *J Hydrol Eng* 10: 458-467.
- Chen J and Adams BJ, 2006. Integration of artificial neural networks with conceptual models in rainfall-runoff modeling. *J Hydrol* 318: 232-249.
- Chow VT, Maidement DR and Mays LR, 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York.
- Chua LHC, Wong TSW and Wang XH, 2011. Information recovery from measured data by linear artificial neural networks—An example from rainfall-runoff modeling. *Applid Soft Computing* 11: 373-381.
- Diskin MH and Simon E, 1977. A procedure for the selection of objective function for hydrologic simulation models. *J Hydrol* 34: 129-149.
- Doog JCI, 1959. A general theory of the unit hydrograph. *J Geophys Res* 64: 241-256.
- Hooke R and Jeeves TA, 1961. Direct search solution of numerical and statistical problems. *J Assoc Comput Math* 8: 212-229.
- Lagarias JC, Reeds JA, Wright MH and Wright PE, 1998. Convergence properties of the Nelder-Mead simplex method in low dimensions. *SIAM Journal of Optimization* 9: 112-147.
- Lee KT and Chang, CH, 2005. Incorporating subsurface-flow mechanism into geomorphology-based IUH modeling. *J Hydrol* 311: 91-105.
- Jain A, Srinivasalu S and Bhattachacharya RK 2005. Determination of an optimal unit pulse response function using real-coded genetic algorithm. *J Hydrol* 303: 199-214.
- Jain A and Indurthy SKVP, 2003. Comparative analysis of event based rainfall-runoff modeling techniques-deterministic, statistical, and artificial neural networks. *J Hydrol Eng ASCE* 8: 1-6.

- Johnston PR and Pilgrim DH, 1976. Parameter optimization for watershed models. *Water Resour Res* 12: 477-486.
- Mays LW and Taur CK, 1982. Unit hydrograph via nonlinear programming. *Water Resour Res* 18: 744-752.
- Naser A and Bruen M, 2008. Development of neuro-fuzzy models to account for temporal and spatial variations in a lumped rainfall-runoff model. *J Hydrol* 349: 277- 290.
- Nash JE, 1957. The form of the instantaneous unit hydrograph. *Hydrology Sciences Bulliten* 3: 114-121.
- O'Connell PE and Todini E, 1996. Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview. *J Hydrol* 175: 3-16.
- Prasad TD, Gupta R and Prakash S, 1999. Determination of optimal loss rate parameters and unit hydrograph. *J Hydrol Eng* 4: 83-87.
- Saxton KE and Lenz AT, 1967. Antecedent retention indexes predict soil moisture. *J Hydrol Div, ASCE* 93: 223-241.
- Shuttleworth WJ, 1993. Evaporation. Pp. 4.1-4.53. In: Maidment DR (ed). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, New York .
- Singh VP and Woolhiser DA, 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *J Hydrol Eng* 7: 270-292.
- Singh VP, 1988. *Hydrologic System Rainfall-Runoff Modeling*. Vol.1. Prentic-Hall, Englewood Cliffs.
- Sivakumar B, Jayawardena AW and Fernando TMKG. 2002. River flow forecasting: use of phase-space reconstruction and artificial neural networks approaches. *J Hydrol* 265: 225-245.
- Sugawara M, 1995. Tank model. Pp. 177-189. In: Singh VP (ed). *Computer models of watershed hydrology*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado.
- Todini E, 1988. Rainfall-runoff modeling – past, present and future. *J Hydrol* 100: 341-352.
- Trivedi HV and Singh JK, 2005. Application of Gray System Theory in development of a runoff prediction model. *Biosystems Engineering* 92: 521-526.
- Yokoo Y, Kazama S, Sawamoto M and Nishimura H, 2001. Regionalization of lumped water balance model parameters based on multiple regression. *J Hydrol* 246: 209-222.
- Yue S, and Hashino M, 2000. Unit hydrographs to model quick and slow runoff components streamflow. *J Hydrol* 227: 195-206.
- Zhao RJ, 1992. The Xinanjiang model applied in China. *J Hydrol* 135: 371-381.
- Zakermoshfegh M, Neyshabouri SAAS and Lucas C, 2008. Automatic calibration of lumped conceptual rainfall-runoff model using particle swarm optimization. *J Applied Sciences* 8: 3703-3708.