

## کاربرد روش Grey در مدل‌سازی بارش- رواناب سال‌های بدون آمار (مطالعه موردی: حوضه آبریز شهرچای ارومیه)

ندا خان محمدی<sup>1\*</sup> و حسین رضایی<sup>2</sup>

تاریخ دریافت: 91/03/10 تاریخ پذیرش: 91/12/09

<sup>1</sup> دانشجوی کارشناس ارشد، گروه مهندسی آب، دانشگاه ارومیه

<sup>2</sup> دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه

\* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: [n.khanmohammadi@yahoo.com](mailto:n.khanmohammadi@yahoo.com)

### چکیده

برآورد سیلاب در حوضه‌های آبریز با داده‌های آماری کم، همواره مورد توجه محققین هیدرولوژیست خصوصاً در کشورهای در حال توسعه می باشد. با توجه به اهمیت این موضوع، قابلیت تئوری Grey جهت برآورد سیلاب در سال‌های بدون آمار حوضه آبریز شهرچای مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور با فرض دو حالت مختلف برای حوضه مورد مطالعه، صحت‌سنجی مدل صورت گرفت. در حالت اول با در دست داشتن آمار لیمنوگراف و باران‌سنج- ثبات برای همه رویدادهای اتفاق افتاده، گزینه‌های مختلف جهت صحت‌سنجی به کار گرفته شد. در حالت دوم صحت-سنجی مدل با فرض نبود آمار باران‌سنج ثبات در دو سال آماری انتخابی صورت گرفت. در این حالت الگوی ساعتی بارندگی مقادیر باران‌سنج تجمعی توسط سه روش، روش سازمان هواشناسی جهانی (WMO)، مقادیر منطقه‌ای روش WMO و معادله ارائه شده توسط قهرمان و آبخضر بدست آمد. نتایج حاصله نشان داد که تئوری Grey نسبت به داده-های واقعی بسیار حساس است و داده‌های حاصله از باران‌سنج ثبات نقش مهمی در تخمین پارامترهای این تئوری و در نتیجه شبیه‌سازی بهتر مقادیر دبی دارد. همچنین نتایج نشان داد که روش WMO نسبت به روش منطقه‌ای و روش قهرمان و آبخضر توانایی بالایی در پیش‌بینی هیدروگراف‌های سیل داشته و روش قهرمان و آبخضر با متوسط تغییر نسبی حجم سیلاب 12/52 درصد، در مقایسه با روش‌های WMO و منطقه‌ای از قابلیت بیشتری در برآورد حجم سیلاب برخوردار است.

واژه‌های کلیدی: برآورد سیلاب، تئوری Grey، روش قهرمان و آبخضر، روش WMO، سال‌های بدون آمار

## Application of Grey Theory Rainfall – Runoff Modeling for Years of Data Lacking (Case Study: Shahrchay Watershed, Urmia)

N Khanmohammadi<sup>1\*</sup> and H Rezai<sup>2</sup>

Received: 30 May 2012 Accepted: 27 February 2013

<sup>1-</sup> M.Sc. Student, Dept of water Engin. Urmia Univ. Iran

<sup>2-</sup> Assoc. Prof., Dept. of Water Engin., Faculty of Agric., Univ. of Urmia, Iran

\*Corresponding Author Email: [n.khanmohammadi@yahoo.com](mailto:n.khanmohammadi@yahoo.com)

### Abstract

Flood estimation in a watershed with little statistic data is of interest for hydrologists, specially in developing countries. Noting the importance of this subject, the ability of Grey theory in flood estimation was investigated in Shahrchay watershed for the years without statistic data. The model was verified by assuming two different cases in the studied watershed. In the first case, on the basis of recorded rainfall and limnograph data for all of the occurred rainfall events, different alternatives were used for the model verification. In the second case, by assuming lack of recorded rainfall gauge data in two selected years, the model verification was evaluated. In this case, hourly precipitation pattern of accumulated rainfall gauge data were estimated by three methods namely world meteorological organization (WMO) method, local amounts of WMO method and the equation presented by Ghahraman & Abkhezr. The results showed that the Grey theory was very sensitive to the actual data and the recorded rainfall gauge data played an important role in estimation of this theory parameters and consequently the Grey theory could correctly simulate the discharge values. The results also showed that WMO method had high ability in flood hydrographs prediction than local and Ghahraman & Abkhezr methods and Ghahraman & Abkhezr method with average relative flood volume variation of 12.5 %, had the most ability in flood volume prediction in comparison to WMO and local methods.

**Keywords:** Flood prediction, Ghahraman & Abkhezr method, Grey theory, WMO method, Years without data

اساس توزیع بارش آن می باشد. تعیین رواناب ناشی از بارندگی نه تنها برای پیش بینی سیلاب، بلکه برای شناخت اثرات ناشی از تغییرات مورد نظر در حوضه

مقدمه

یکی از تحلیل های رایج و کاربردی در زمینه هیدرولوژی، تخمین رواناب سطحی یک حوضه آبریز بر

از قابلیت این شبکه در مدل‌بندی رابطه بارش - رواناب بود.

وانگ و همکاران (2004) روابط بارش - رواناب را برای حوضه آبریز ودینگ<sup>3</sup> در چین بررسی نموده و مدلی تجربی برای فرآیند بارش - رواناب ارائه دادند. خیام و مولوی (1383) در تحقیقی با به کارگیری رابطه بارش - رواناب در حوضه آبریز سعیدآباد چای، آب قابل استحصال با استفاده از مقادیر بارش را به دست آوردند.

کمورانی و همکاران (2005) اثر تغییر کاربری اراضی در وقوع سیلاب حوضه رودخانه پو<sup>4</sup> را توسط یک مدل بارش - رواناب و یک مدل هیدرودینامیک مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصله تاثیر قابل توجه تغییر کاربری اراضی روی هیدروگراف شبیه‌سازی شده را نشان داد.

صادقی و همکاران (1384) مدل‌های بارش - رواناب ماهانه حوزه آبخیز هراز را با استفاده از آمار ماهانه بارندگی ایستگاه‌های باران سنجی و دبی متوسط ماهانه ایستگاه هیدرومتری کرسنگ مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. فرآیند مدل‌سازی در مطالعه آنها با استفاده از انواع رگرسیون دو و چند متغیره و با تغییر شکل مختلف داده‌ها صورت گرفت و مدل‌های بهینه هر ماه ارائه گردید. نتایج به دست آمده از تحقیق بر اختلاف مدل‌های به دست آمده در ماه‌های سال با یکدیگر دلالت داشت. همچنین نقش هر ایستگاه در تولید رواناب این حوزه در ماه‌های مختلف سال، متغیر ارزیابی گردید.

آیتک و همکاران (2008) برای مدل‌سازی فرآیند بارش - رواناب حوضه رودخانه جونتیا<sup>5</sup> در آمریکا از شبکه‌های عصبی و برنامه‌ریزی ژنتیک استفاده کردند. نتایج حاصله برتری برنامه‌ریزی ژنتیک نسبت به شبکه-

آبریز یا به طور کلی در مدیریت منابع آب مهم می‌باشد (سلطانی و همکاران 1389). مدل‌سازی بارش - رواناب یکی از موردهای کلیدی در علوم هیدرولوژی به شمار می‌رود. با توجه به روش‌های نوین در مدل‌سازی و نرم - افزارهای موجود که موجب افزایش سرعت و کاهش زمان اجرای محاسبات گردیده، پژوهش‌ها و مطالعات مرتبط با مسائل هیدرولوژی پس از دهه 1950 بگونه‌ای چشمگیر گسترش یافت (زارعی و همکاران 1388).

کمپبل و سیدل (1984) در 80 حوضه کوچک اورگان و ریگز (1990) در ایالات متحده آمریکا مدل‌هایی را با استفاده از رگرسیون چند متغیره برای این مناطق به دست آوردند که در هر یک از این مدل‌ها پارامترهای مختلفی در تعیین دبی دخالت داشته‌اند.

نتایج تحقیق ویگهام و کراپر (2001) که فرآیند بارش - رواناب را با استفاده از مدل قطعی IHACRESS و برنامه‌ریزی ژنتیک در دو حوضه تیفی<sup>1</sup> و ناموی<sup>2</sup> مدل‌سازی کردند نشان داد که برنامه‌ریزی ژنتیک دقت بهتری نسبت به مدل قطعی دارد.

اسمیت و همکاران (2004) دو نوع مدل یکپارچه و توزیعی را برای تعیین تغییرپذیری رواناب نسبت به تغییرات مکانی بارش برای حوضه‌های مختلف از نظر مساحت در آمریکا بررسی نموده و نتیجه گرفتند که مدل‌های توزیعی به علت تغییرپذیری بارش در حوضه دارای ارجحیت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها می‌باشند.

جیانگ و همکاران (2004) میزان تغییرات رواناب سالانه در حوضه آبریز رود زرد را با استفاده از رگرسیون چند متغیره با اجزای پیش‌گویی کننده دمای هوا و بارش بررسی نمودند. نتایج حاصله نشان داد که مقادیر دبی دارای ارتباط معناداری با دمای هوا و مقدار بارش می‌باشد.

لین و چن (2004) برای تهیه مدل بارش - رواناب از شبکه عصبی مصنوعی مدد گرفتند. نتایج تحقیق حاکی

<sup>3</sup> Wuding

<sup>4</sup> Po

<sup>5</sup> Juniata

<sup>1</sup> Teifi

<sup>2</sup> Namoi

رحمتی و همکاران (1389) با استفاده از منحنی رشد منطقه‌ای، آبدهی حوضه‌های آبخیز فاقد آمار شمال غرب کشور را تخمین زدند.

میر عباسی نجف آبادی و همکاران (1390) رواناب ماهانه را در حوضه کسلیان با استفاده از اطلاعات بارش و با مدل توزیع احتمالی شرطی بر اساس اصل حداکثر آنتروپی تخمین زدند. مقادیر رواناب ماهانه حوضه با استفاده از مدل توسعه داده شده، به ازای مقادیر ضریب رواناب و دوره‌های بازگشت مختلف در سطوح احتمال وقوع بارش متفاوت محاسبه شد. مدل توسعه داده شده به ازای ضریب رواناب 0/6 به طور رضایت بخشی رواناب خروجی از حوضه را برای دوره‌های بازگشت مختلف تخمین زد. همچنین نتایج حاصله نشان داد که مقدار رواناب تخمینی، در یک سطح احتمال وقوع بارش ثابت و ضریب رواناب معین، با افزایش دوره بازگشت کاهش می‌یابد.

برای ارائه مدل‌های بارش-رواناب دلایل مختلفی وجود دارد. دلیل اصلی این مسئله محدودیت در اندازه‌گیری مشخصات هیدرولوژیک می‌باشد (صادقی و دهقانی 1385). تخمین آورد سالانه در رودخانه‌هایی که دارای ایستگاه اندازه‌گیری آب می‌باشند کار چندان دشواری نمی‌باشد اما برآورد آن برای حوضه‌های فاقد ایستگاه نسبتاً مشکل است (علیزاده 1384). برای کشورهای در حال توسعه همانند ایران یکی از مهمترین مسائل، عدم دسترسی به داده‌های هیدرولوژی مطمئن و بلند مدت است. با توجه به مشکل کمبود و نقص آمار هیدرومتری در اکثر حوضه‌های آبریز کشور نیاز به استفاده از مدل‌های هیدرولوژیک ساده و مناسب که با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده کم بتواند شدت-های جریان را پیش‌بینی نماید از موارد ضروری است. تئوری Grey از جمله مدل‌های هیدرولوژیک مناسب می‌باشد که در حوضه‌هایی با داده‌های آماری محدود می‌تواند هیدروگراف سیل را در حد قابل قبولی برآورد نماید.

های عصبی مصنوعی در مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب را نشان داد.

نورانی و صالحی (1387) مدل بارش-رواناب حوضه ليقوان چای واقع در استان آذربایجان شرقی را با استفاده از سه روش شبکه عصبی، استنتاج فازی و شبکه عصبی فازی تطبیقی ارائه نمودند. بهترین مدل برای این حوضه در مطالعه آنها، توسط روش شبکه عصبی فازی تطبیقی حاصل شد. آنها با توجه به نتایج حاصله بیان داشتند که شبکه عصبی با مدل‌سازی غیرخطی و همچنین منطق فازی با ارائه توابع عضویت هرکدام به تنهایی تا حدودی قادر به بیان مدل یک حوضه هیدرولوژیک نمی‌باشد ولی در صورت تلفیق این دو روش می‌توان گفت به نتیجه مطلوب جهت مدل‌سازی خواهیم رسید.

زارعی و همکاران (1388) از مدل بارش-رواناب IHACRESS جهت شبیه‌سازی جریان حوضه آبخیز کسلیان واقع در استان مازندران استفاده کردند. نتایج بررسی آنها نشان داد که مدل، توانایی شبیه‌سازی داده‌های روزانه و ماهانه را با دقت قابل قبول دارد، ولی قابلیت شبیه‌سازی داده‌های سالانه را ندارد؛ لذا این داده‌ها را با دقتی کمتر شبیه‌سازی می‌نماید. از سوی دیگر، در مقایسه بین جریان روزانه و ماهانه، نتایج شبیه‌سازی جریان ماهانه نسبت به جریان روزانه قابل قبول‌تر بود. مصطفی زاده و همکاران (1388) با تاکید بر نقش هیدروگراف واحد به عنوان یک تکنیک کارآمد جهت برآورد رواناب سطحی از بارش‌های مختلف در حوضه-های بدون ایستگاه هیدرومتری، مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک را در پیش‌بینی هیدروگراف رواناب سطحی در حوضه آبخیز جنگلی جعفرآباد گلستان مورد ارزیابی قرار دادند.

سلطانی و همکاران (1389) فرآیند بارش-رواناب را در حوضه آبریز ليقوان با استفاده از برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) مدل‌سازی نموده و مدل مناسب را برای این حوضه پیشنهاد کردند.

محدوده  $35^{\circ} 44'$  تا  $15^{\circ} 45'$  طول شرقی و  $20^{\circ} 37'$  تا  $40^{\circ} 37'$  عرض شمالی واقع شده است (آژدان 1386).

در این تحقیق داده های سیلابی ایستگاه بند با مختصات جغرافیایی  $1^{\circ} 45'$  طول شرقی و  $30^{\circ} 37'$  عرض شمالی که دارای ارتفاع 1390 متر می باشد و همچنین داده های باران سنجی ایستگاه کمپ ارومیه با مختصات جغرافیایی  $2^{\circ} 45'$  طول شرقی و  $32^{\circ} 37'$  عرض شمالی و ارتفاع 1381 متر، مورد استفاده قرار گرفته است.

### تئوری Grey

در مواقعی که یک دسته نمونه بزرگ به سادگی در دسترس نیست، سیستم Grey در این وضعیت کمبود می تواند با اطلاعات ناقص و نامعین نسبت به رفع مشکل کمک کند (مکاریان 1389). از آنجاکه سیل تحت تاثیر فاکتورهای زیادی است، می تواند به عنوان یک فرآیند نامعلوم Grey ظاهر شود. مدل Grey بسیار انعطاف پذیر است زیرا از مدل دینامیکی بر پایه مفهوم فیزیکی استفاده می کند و همچنین می تواند فرآیند نامعلوم سیل را با واسنجی داده های مشاهداتی روشن سازد (چن و همکاران 2009). این تئوری نخستین بار در سال 1982 توسط آقای دنگ<sup>1</sup> پیشنهاد گردید (مکاریان 1389).

در تئوری Grey، سری داده های خام می توانند با روش معین به سری های تجمعی ( $AGO^2$ ) تبدیل شوند. جدول 1 بیانگر این موضوع برای دسته های مختلف می باشد. با توجه به این جدول، هر سری از داده AGO با توجه به سری پیشین خود به دست می آید.

بعد از ایجاد سری های تجمعی نوبت به تشکیل ماتریس بارش - رواناب می رسد که به صورت رابطه [1] می باشد.

تریودی و سینگ (2005) در منطقه ای واقع در شمال هندوستان تئوری Grey را به کار گرفتند. آنها ضمن محاسبه پارامترهای Grey به روش کمترین مجموع مربعات خطا، مدل Grey را واسنجی نمودند و مقدار سیلاب در مطالعه آنها با مقادیر پایینی از شاخص های خطا و مقادیر بالایی از شاخص های همبستگی پیش بینی شد.

چن و همکاران (2009) با به کار گیری تابع *self-memory* و استفاده از رابطه دیفرانسیلی *Grey (DHGM)*، سیلاب را با دقت بالایی پیش بینی نمودند.

مکاریان (1389) سیلاب را در حوضه ليقوان تبریز توسط نظریه Grey پیش بینی نمود. مقادیر بالای شاخص های همبستگی و مقادیر پایین شاخص های خطا در مطالعه او، توانایی مدل برای پیش بینی سیلاب با دقت منطقی برای منطقه ليقوان را تایید کرد.

اکثر کارهای صورت گرفته در ایران و جهان مربوط به حوضه های بدون ایستگاه هیدرومتری بوده است. در این مطالعه با رویکردی جدید سعی می شود برای اولین بار از تئوری معرفی شده در پیش بینی سیل - هایی که بنا بر شرایط مختلف در حوضه ثبت نشده اند استفاده کرد. بنابراین هدف از این تحقیق، بررسی قابلیت تئوری Grey جهت پیش بینی سیلاب در حوضه آبریز شهرچای با فرض نبود آمار در برخی سال های آماری این حوضه می باشد. در صورت حاصل شدن مقادیر قابل اعتماد می توان نسبت به هر عملی در حوضه مربوطه در رابطه با سیلاب اقدام نمود.

### مواد و روش ها

حوضه آبریز شهرچای در غرب شهرستان ارومیه واقع بوده و از شمال به حوضه آبریز نازلوچای، از جنوب به حوضه آبریز باراندوزچای، از غرب به کشور ترکیه و از شرق به دریاچه ارومیه محصور می گردد. این حوضه آبریز از نظر جغرافیایی در

<sup>1</sup> Deng

<sup>2</sup> Accumulated Generating Operation

جدول 1- تبدیل سری داده‌های خام به سری‌های تجمعی در دوره‌های مختلف.

سری داده خام	اولین دوره سری AGO	دومین دوره سری AGO	P امین دوره سری AGO
$r10$	$r11=r10$	$r12=r11$	$r1p=r1p-1$
$r20$	$r21=r10+r20$	$r22=r11+r21$	$r2p=r1p-1+r2p-1$
$r30$	$r31=r10+r20+r30$	$r32=r11+r21+r31$	$r3p=r1p-1+r2p-1+r3p-1$
/	/	/	/
/	/	/	/
$rN0$	$rN1=r10+r20+...+rN0$	$rN2=r11+r21+...+rN1$	$rNp=r1p-1+r2p-1+...+rNp-1$

خواهد بود. در پیوندهای مختلف  $k$  مقادیر برآوردی سیلاب از معادلات زیر به دست می‌آید:

$$\hat{q}(k+1) = \hat{q}^1(k+1) - \hat{q}^1(k) \quad [6]$$

$$\begin{aligned} \hat{q}(k+1) = & [q^0(1) - \hat{\otimes} b_0 r^0(1)] e^{-\hat{\otimes} a_1 k} [1 - e^{\hat{\otimes} a_1}] + \\ & \hat{\otimes} b_0 [r^1(k) - r^1(k-1)] + [\hat{\otimes} b_1 - \hat{\otimes} b_0 \hat{\otimes} a_1] \times \\ & [\sum_{i=1}^k e^{-\hat{\otimes} a_1 i} r^1(k-i+1) - \sum_{i=1}^{k-1} e^{-\hat{\otimes} a_1 i} r^1(k-i)] \end{aligned} \quad [7]$$

رابطه شماره [7] به مدل هیدرولوژی - دیفرانسیلی  $Grey$  ( $DHGM$ )<sup>1</sup> معروف است که این مدل با تعیین ضرایب مدل برای محاسبه سیلاب و رواناب در محدوده حوضه آبریز به کار می‌رود.

جزئیات بیشتر در مطالعات تریودی و سینگ (2005) بیان شده است. در این تئوری، وجود مقادیر باران و دبی در بازه‌های زمانی کوتاه مدت (همانند ساعتی) جهت حصول پارامترهای تئوری  $Grey$  و در نتیجه مقادیر شبیه‌سازی شده سیلاب ضروری است.

در این تحقیق، پس از بررسی آمار سیل‌های اتفاق افتاده در طول سال‌های 1380-1389، به تعداد شش واقعه سیلابی که همزمان مقادیر آنها به صورت هیدروگراف و هیتوگراف ثبت شده است، برای بازبینی و صحت‌سنجی این تئوری انتخاب گشته و مورد استفاده قرار گرفته است. از بین این شش رویداد، چهار رویداد جهت محاسبه پارامترهای  $Grey$  در مرحله واسنجی انتخاب گردید و پس از متوسط‌گیری پارامترهای مربوطه، صحت‌سنجی شبیه‌سازی هیدروگراف‌ها برای

$$\begin{bmatrix} q^0(2) \\ q^0(3) \\ q^0(4) \\ \vdots \\ q^0(N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[q^1(1) + q^1(2)] & r^0(2) & r^1(2) \\ -\frac{1}{2}[q^1(2) + q^1(3)] & r^0(3) & r^1(3) \\ -\frac{1}{2}[q^1(3) + q^1(4)] & r^0(4) & r^1(4) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[q^1(N-1) + q^1(N)] & r^0(N) & r^1(N) \end{bmatrix} \quad [1]$$

$$\times \begin{bmatrix} \hat{\otimes} a_1 \\ \hat{\otimes} b_0 \\ \hat{\otimes} b_1 \end{bmatrix}$$

در این بیان،  $rP$  و  $qP$  امین مرتبه از سری‌های  $AGO$  مربوط به بارش و رواناب است و به صورت زیر حاصل می‌گردد:

$$q^P(t) = \sum_{i=1}^t q^{P-1}(i) \quad [2]$$

$$r^P(t) = \sum_{i=1}^t r^{P-1}(i) \quad [3]$$

ماتریس بارش-رواناب ارائه شده به شکل ساده-تری قابل بیان می‌باشد:

$$Q = Uq \quad [4]$$

چون  $U$  یک ماتریس غیر مربعی است، مقدار پارامتر بردار  $Grey$  ( $\theta$ ) به وسیله روش مجموع کمترین مربعات قابل تعیین است:

$$\hat{q} = \begin{bmatrix} \hat{\otimes} a_1 \\ \hat{\otimes} b_0 \\ \hat{\otimes} b_1 \end{bmatrix} = [U^T U]^{-1} U^T Q \quad [5]$$

که در رابطه فوق،  $Q$ : ماتریس رواناب،  $U$ : ماتریس بارش-رواناب،  $\hat{\otimes} b_1, \hat{\otimes} b_0, \hat{\otimes} a_1$ : مقادیر برآوردی  $\hat{q}$ : مقدار برآوردی پارامتر برداری  $Grey$  و  $T$ : علامت ماتریس ترانهاده است. بنابراین برای هر یک از رویدادهای سیل، پارامترهای  $\hat{\otimes} b_1, \hat{\otimes} b_0, \hat{\otimes} a_1$  موجود

<sup>1</sup> Differential Hydrological Grey Model

سوم و چهارم 60 پیش بینی صورت گرفت (جمعا 186 پیش بینی). جدول 2 گزینه های کاربردی در این مطالعه را نشان می دهد. در حالت دوم، صحت سنجی مدل در صورت نبود آمار باران سنج ثبات در برخی سال های آماری صورت می گیرد. در این حالت نیز همانند حالت اول از نتایج حاصل از مقادیر متوسط پارامترهای به دست آمده از چهار رویداد انتخاب شده جهت صحت-سنجی مدل استفاده شده است. همچنین در این حالت از سه روش مختلف جهت تبدیل مقدار جمعی باران به هیتوگراف ساعتی آن استفاده گردیده است.

جدول 2- مشخصات گزینه های کاربردی.

شماره گزینه	پیکر بندی گزینه
1	حذف یک سیل و حصول مقدار متوسط پارامترها توسط پنج سیل باقی مانده
2	حذف دو سیل و حصول مقدار متوسط پارامترها توسط چهار سیل باقی مانده
3	حذف سه سیل و حصول مقدار متوسط پارامترها توسط سه سیل باقی مانده
4	حذف چهار سیل و حصول مقدار متوسط پارامترها توسط دو سیل باقی مانده
5	حذف پنج سیل و حصول مقدار پارامتر مربوط به سیل باقی مانده

در روش اول، مقادیر بارندگی در بازه ساعتی به وسیله الگوی توزیع بارندگی ارائه شده توسط سازمان هواشناسی جهانی (WMO) (جدول 3) حاصل شد. سپس با استفاده از مقادیر حاصله، اقدام به پیش بینی گردید. در روش دوم، ابتدا توزیع بارندگی نسبت به زمان درحوضه آبریز شهرچای برای چهار وقوع بارندگی ثبات حوضه به صورت متوسط و بر حسب درصدی از بارندگی تعیین گردید که تحت عنوان توزیع منطقه ای بارندگی لحاظ گردیده است. نتایج منطقه ای نمودن در قسمت نتایج و بحث آمده است.

دو رویداد ثبت شده انجام شد و نتایج شبیه سازی با نتایج مشاهداتی هیدروگراف ها مورد مقایسه قرار گرفت. لازم به ذکر است، دبی پایه از هیدروگراف ورودی به مدل مجزا شده است. در اکثر کارهای هیدرولوژی دبی پایه مقدار ثابتی در نظر گرفته می شود (علیزاده 1384)؛ به همین دلیل در این تحقیق، مقدار ثابت دبی پایه مربوط به هر هیدروگراف از آن کسر شد.

در دو حالت مختلف تئوری Grey در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفته است. در حالت اول که ایستگاه دارای داده های مربوط به لیمنوگراف و باران سنج ثبات بوده باشد، برای شش رویداد طغیانی به همراه داده های بارندگی ثبت شده با استفاده از تئوری Grey، مقادیر دبی های سیلاب شبیه سازی شده و مشاهداتی در مراحل واسنجی و صحت سنجی با هم مورد مقایسه قرار گرفت. این حالت جهت نشان دادن توانایی این تئوری در پیش بینی سیلاب انتخاب شده است. تاثیر تعداد ترکیب آماری بارندگی های ثبات در شبیه سازی هیدروگراف سیلابی با استفاده از تئوری Grey در گزینه های مختلف انتخاب سیل مورد ارزیابی قرار گرفته است. این گزینه ها در انتخاب سیل به ترتیب از یک رویداد سیل تا پنج رویداد برای تعیین پارامترهای تئوری Grey بمنظور پیش بینی سیلاب انجام و انواع مختلف گزینه ها مورد صحت سنجی قرار گرفته اند. در گزینه اول با حذف یک سیل و محاسبه مقادیر متوسط پارامترها توسط بقیه رویدادها، مقادیر دبی پیش بینی سیل بدست آمد. در گزینه های بعدی هر بار یک سیل از تعداد سیل ها حذف شده تا اینکه در گزینه پنجم فقط یک سیل برای پیش بینی همه رویدادهای مربوطه باقی ماند. لازم به توضیح است که هر گزینه شامل انواع ترکیب های ممکن می باشد. بدین معنی که گزینه اول و پنجم هر کدام شامل 6 ترکیب، گزینه دوم و چهارم هر کدام شامل 15 ترکیب و گزینه سوم شامل 20 ترکیب می باشد. در گزینه اول، 6 پیش بینی، در هر کدام از گزینه های دوم و پنجم، 30 و در هر کدام از گزینه های

جدول 3- توزیع بارندگی در طول بارش بر اساس روش WMO.

100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0	(%)	زمان بارندگی
100	90	90	83	78	70	60	20	13	3	0	(%)	مقدار بارندگی

$$\% VE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right|}{n} \quad [11]$$

که در این روابط:  $Y_i$ : مقدار واقعی متغیر،  $\hat{Y}_i$ : مقدار پیش‌بینی شده آن،  $n$ : تعداد متغیر مربوطه،  $\bar{Y}_i$ : مقدار میانگین مقادیر واقعی متغیر و  $\bar{\hat{Y}}_i$ : مقدار میانگین مقادیر پیش‌بینی شده آن می‌باشد. همچنین درصد تغییر نسبی حجم مربوط به دو هیدروگراف انتخابی جهت صحت‌سنجی برای هر سه روش کاربردی در حالت دوم توسط فرمول [12] محاسبه شد:

$$\Delta = \frac{|V_o - V_p|}{V_o} \times 100 \quad [12]$$

که در این رابطه،  $\Delta$ : درصد تغییر نسبی حجم مربوط به هر هیدروگراف،  $V_o$ : حجم واقعی سیلاب در رویداد مورد نظر و  $V_p$ : حجم پیش‌بینی شده سیلاب توسط روش‌های مذکور در حالت دوم می‌باشند.

### نتایج و بحث

بارندگی‌های ثابت شده در ایستگاه حوضه آبریز شهرچای دارای مشخصات به شرح جدول 4 می‌باشند

جدول 4- مشخصات بارندگی‌های ثابت شده در حوضه آبریز شهرچای.

شماره رویداد	تاریخ وقوع	مقدار تجمعی باران (mm)	مدت بارش (hr)	شدت بارش (mm/hr)
1	1385/8/4	7/8	6	1/300
2	1385/8/4	8/4	4	2/100
3	1385/8/7	22	9	2/444
4	1385/8/10	18/2	6	3/033
5	1385/8/11	12/5	4	3/125
6	1385/8/14	10/4	7	1/486

همانطور که از جدول 4 ملاحظه می‌شود، از همه سیلاب‌های ثبت شده، فقط سیلاب‌های مربوط به سال 1385 قابل کاربرد در این تحقیق بود. جداول 5 و 6 شاخص‌های آماری مربوط به حالت اول در مرحله واسنجی و

با استفاده از معادله [8]، الگوی توزیع ساعتی بارش محاسبه شد که به عنوان روش سوم در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

$$R_t^T = A t^B [a_1 + a_2 \ln(T - a_3)] R_{60}^{10} \quad [8]$$

که در این رابطه،  $R_t^T$ : مقدار باران (میلی متر) در تناوب  $T$  (سال) و تداوم  $t$  (دقیقه)،  $R_{60}^{10}$ : مقدار باران ساعتی ده ساله (میلی متر) و  $A, B, a_1, a_2, a_3$  ضرایب محلی هستند که توسط قهرمان و آبخضر (1383) ارائه شده است. جهت مقایسه بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی از شاخص‌های آماری همچون ضریب تبیین ( $R^2$ )، جذر میانگین مربعات خطا ( $RMSE$ ) و خطای درصد پیش‌بینی ( $\%VE$ ) که معادله آنها به صورت زیر ارائه می‌شوند، استفاده گردید.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)(\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}_i) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2 \times \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{\hat{Y}}_i)^2} \quad [9]$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad [10]$$

همانطور که از جدول 4 ملاحظه می‌شود، از همه سیلاب‌های ثبت شده، فقط سیلاب‌های مربوط به سال 1385 قابل کاربرد در این تحقیق بود. جداول 5 و 6 شاخص‌های آماری مربوط به حالت اول در مرحله واسنجی و



بالای 0/84 را در مرحله صحت سنجی خواهیم داشت. سیلاب می باشد. این امر حاکی از توانایی تئوری Grey در پیش بینی

جدول 5- نتایج شاخص های خطا و ضریب تبیین مدل Grey در مرحله واسنجی برای حوضه شهرچای ارومیه.

ردیف	تاریخ وقوع سیل	RMSE	%VE	R <sup>2</sup>
1	1385/8/4	0/1887	0/2111	0/9789
2	1385/8/7	0/6312	0/2110	0/9615
3	1385/8/10	1/7634	0/7564	0/9191
4	1385/8/11	0/7105	0/1837	0/9567
متوسط مقادیر شاخص ها				
		0/8235	0/3406	0/9541

جدول 6- نتایج شاخص های خطا و ضریب تبیین در مرحله صحت سنجی برای حوضه شهرچای ارومیه.

آماره	پیش بینی رویداد 1385/8/4 (رویداد دوم)	پیش بینی رویداد 1385/8/14
RMSE	0/5964	0/8018
R <sup>2</sup>	0/9266	0/8366
%VE	0/4066	0/3833

جدول 7- مقادیر شاخص های خطا و ضریب تبیین در اجرای گزینه اول.

شماره سیل های ترکیبی	RMSE	VE%	R <sup>2</sup>
2 و 3 و 4 و 5 و 6	1/8677	1/0955	0/9138
1 و 3 و 4 و 5 و 6	0/5935	0/3684	0/9389
1 و 2 و 4 و 5 و 6	3/9121	0/5468	0/6524
1 و 2 و 3 و 5 و 6	1/9078	0/9011	0/9297
1 و 2 و 3 و 4 و 6	1/4577	0/7149	0/8588
1 و 2 و 3 و 4 و 5	0/7442	0/3466	0/8459
مقدار میانگین	1/7472	0/6622	0/8566

جدول 8- مقادیر بحرانی شاخص های خطا و ضریب تبیین در اجرای گزینه دوم تا پنجم.

گزینه	حداکثر RMSE	حداکثر VE%	حداقل R <sup>2</sup>
دوم	4/1284	1/3037	0/6436
سوم	4/2717	1/7115	0/5279
چهارم	4/4109	2/6057	0/5125
پنجم	5/1280	2/7479	0/4620

در مرحله بعدی با اجرای گزینه های مختلف به بررسی قابلیت های پیش بینی تئوری Grey در به دست آوردن مقادیر سیلاب مرتبط با تعداد رخدادهای سیل و ترکیبی از آنها پرداخته شد؛ بدین منظور مقادیر شاخص های خطا و ضریب تبیین در اجرای گزینه اول و مقادیر بحرانی این ضرایب برای هر گزینه در حصول مقادیر پیش بینی مربوط به رویدادهای حذفی در جداول 7 و 8 ارائه گردیده است.

در نظر گرفتن مقادیر بحرانی شاخص ها در جدول 8 به منظور مورد ملاحظه قرار دادن بدترین شرایط در پیش بینی سیل حذفی است، در صورتی که حتی در گزینه پنجم نیز مقادیر ضریب تبیین بالا مشاهده شد. از جداول 7 و 8 کاملاً مشهود است که هر چه تعداد سیل های ترکیبی بیشتر باشد، با اطمینان بیشتری می توان مقادیر پیش بینی مربوط به سال های بدون آمار را پذیرفت؛ بدین معنی که بهتر است از تمام سیل های اتفاق افتاده در حوضه مورد نظر نسبت به پیش بینی سیل های بازه های زمانی بدون آمار اقدام کرد.

مکاریان (1389) به توانایی مدل Grey در پیش-

بینی سیلاب برخلاف سایر مدل ها، در حوضه های آبریز

حاصل از پارامترهای مربوط به همه سیل‌های ثبت شده و نیز آمار کافی، توسط این تئوری اقدام کرد در حالت دوم نیز همانطور که گفته شد، در هر سه روش با توجه به مقدار بارندگی و مدت زمان شروع و خاتمه بارندگی اقدام به پیش‌بینی گردید. جدول 9 الگوی توزیع بارندگی ارائه شده توسط سازمان هواشناسی جهانی (WMO) و مقادیر منطقه‌ای این توزیع برای حوضه شهرچای را نشان می‌دهد.

جدول 9- توزیع بارندگی در طول بارش بر اساس روش منطقه‌ای.

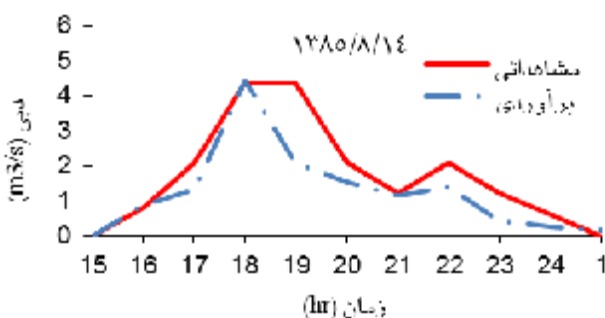
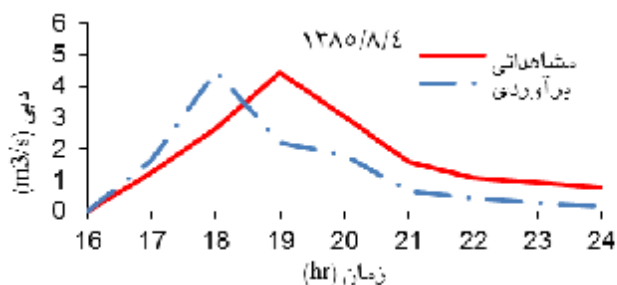
زمان بارندگی (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
مقدار بارندگی (%)	0	23	40	47	56	69	80	87	93	96	100

شده توسط WMO دارای نقطه پیک در اواسط زمان بارندگی است.

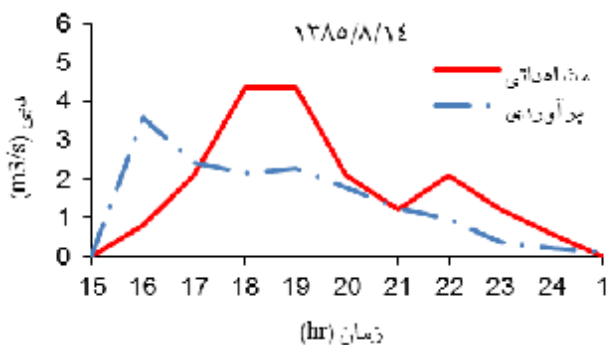
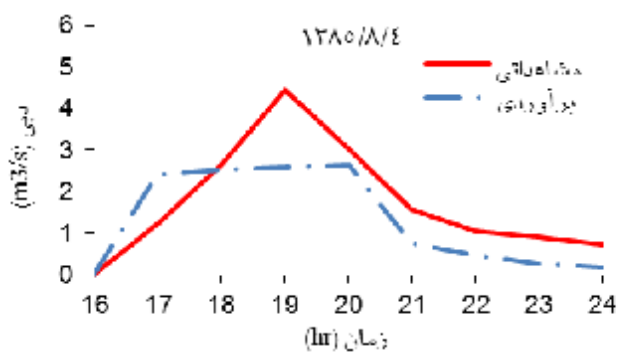
شکل‌های 1 تا 3 هیدروگراف‌های مقادیر دبی مشاهداتی و مقادیر دبی برآوردی توسط مدل در هر سه روش برآورد ساعتی باران برای دو رویداد به کار رفته در حالت اول جهت صحت‌سنجی را نشان می‌دهد.

با داده‌های کم اشاره داشت. همچنین تریودی و سینگ (2005) بیان داشتند که تئوری Grey می‌تواند به عنوان یک ابزار ارزشمند در زمینه هیدرولوژی خصوصا برای حوضه‌های با داده‌های هیدرولوژیک کم توصیه شود. بیان مکاریان و تریودی و سینگ و نیز نتایج حاصله، نشان می‌دهد که با دیدی خوش بینانه می‌توان نسبت به پیش‌بینی سیل در ایستگاه‌های بدون مقادیر دبی در برخی سال‌های آماری در صورت داشتن مقادیر متوسط

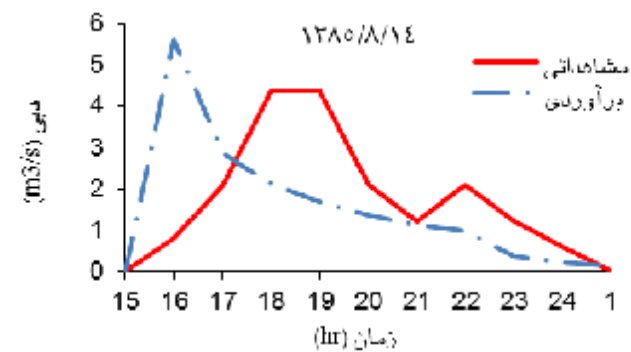
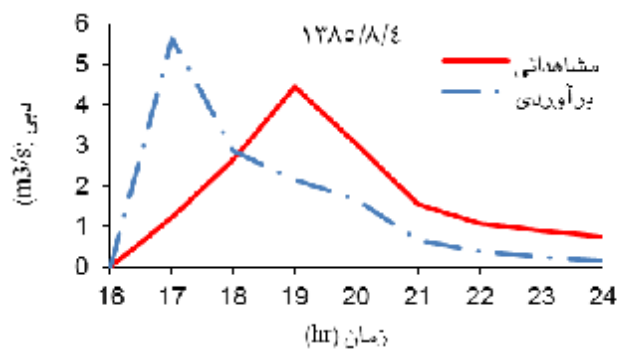
با در نظر گرفتن مقدار بارندگی در هر ساعت (تفاضل دو مقدار بارندگی جمع) در جدول 9 ملاحظه می‌شود که مقادیر روش منطقه‌ای دارای مقدار پیک در ابتدای بارندگی است؛ علت این امر، تاثیرپذیری این مقادیر از مقادیر بارندگی رویدادهای 1385/8/4 (رویداد اول) و 1385/8/11 که دارای حداکثر بارندگی در زمان ابتدایی بارش می‌باشند، است. درحالی‌که جدول ارائه



شکل 1- صحت‌سنجی دو رویداد سیل با کاربرد روش WMO جهت به دست آوردن مقادیر ساعتی بارش.



شکل 2- صحت‌سنجی دو رویداد سیل با کاربرد روش منطقه‌ای جهت به دست آوردن مقادیر ساعتی بارش.



شکل 3- صحت‌سنجی دو رویداد سیل با کاربرد روش قهرمان و آبخضر جهت به دست آوردن مقادیر ساعتی بارش.

صحیح نقطه اوج ناتوان بوده و چندین مقدار برای این نقطه حاصل نموده است. علت این امر، وارد شدن مقادیر یکسان بارش در بازه های ساعتی متفاوت به مدل است، چون توسط روش منطقه ای، برای این رویداد، مقدار ثابت بارندگی در همه بازه های ساعتی حاصل شد. البته لازم به ذکر است که توجه به میزان دقت در هدف حصول هیدروگراف سیل امری ضروری است. مقایسه مقادیر شاخص های خطا و ضریب تبیین در جدول 10 نسبت به جدول 6، از تاثیرپذیری این تئوری از مقادیر ثبت شده باران در هر ساعت حکایت دارد. این امر نشان می دهد هر چه دقت اندازه گیری باران بیشتر بوده و مدت زمان ثبت باران کوتاه تر باشد، این تئوری در پیش بینی سیلاب موثرتر خواهد بود. در نهایت، برای روشن تر شدن تفاوت کارایی سه روش مذکور از مفاهیم درصد تغییر نسبی حجم استفاده شده است. نتایج این مقادیر در جدول 11 آمده است.

نتایج جدول 11 نشان می دهد که روش قهرمان و آبخزر نسبت به دو روش دیگر، مقادیر حجم سیلاب را بهتر برآورد می کند، ولی مقادیر بالای درصد تغییر نسبی حجم در این روش نیز حاکی از این امر است که باید در کاربرد آن جانب احتیاط رعایت شود.

از شکل های 1 تا 3 بر می آید که روش WMO بهتر از دو روش دیگر، هیدروگراف سیل را خصوصاً در رویداد 1385/8/14 پیش بینی می کند. علت مشابه بودن دو هیدروگراف پیش بینی در روش قهرمان و آبخزر (1383)، مقادیر تقریباً یکسان دوره تناوب در این دو رویداد است. برای بیان کمی این تفاوت، شاخص های خطا و ضریب تبیین مربوط به پیش بینی دو رویداد مربوطه برای هر سه روش محاسبه گردید. جدول 10 بیانگر این مقادیر می باشد.

مقایسه مقادیر جدول 10 نشان می دهد که روش WMO نسبت به دو روش دیگر از توانایی بیشتری در پیش بینی هیدروگراف های سیل در مناطق بدون آمار باران سنج ثبات در برخی سال های آماری برخوردار است. روش منطقه ای نیز به دلیل تاثیرپذیری شدید از مقادیر بارش با مقدار حداکثر در ابتدای زمان بارندگی از پیش بینی باران هایی با مقدار پیک در اواسط زمان بارندگی ناتوان است. همچنین ملاحظه می شود مقدار ضریب تبیین این روش در پیش بینی رویداد 1385/8/4 بیشتر و مقدار شاخص های خطای این روش در پیش بینی این رویداد کمتر از روش WMO است، اما همانطور که از شکل 2 قابل ملاحظه است، این روش در پیش بینی

جدول 10- مقادیر شاخص های خطا و ضریب تبیین در صحت سنجی مدل با کاربرد سه روش محاسبه توزیع بارندگی.

روش قهرمان و آبخزر			روش منطقه ای			روش WMO			تاریخ وقوع سیل
$R^2$	VE%	RMSE	$R^2$	VE%	RMSE	$R^2$	VE%	RMSE	
0/1203	0/9143	3/1583	0/6679	0/5060	0/7329	0/4629	0/5804	1/3416	1385/8/4
0/0539	1/0896	4/2776	0/2697	0/7397	2/1464	0/7924	0/4181	0/8082	1385/8/14

جدول 11- مقادیر درصد تغییر نسبی حجم برای دو رویداد مورد نظر.

روش قهرمان و آبخزر	روش منطقه ای	روش WMO	تاریخ وقوع سیل
11/9732	23/7451	26/4275	1385/8/4
13/0744	19/1291	27/4323	1385/8/14

و سیدل (1984)، ریگز (1990)، مصطفی زاده و همکاران (1388) و رحمتی و همکاران (1389) در مناطق بدون

در پایان بحث می توان به وقت گیر نبودن این مدل نسبت به مدل های بارش - رواناب کاربردی توسط کمپل

منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد و در صورت ترکیب نامناسب شاهد مقادیر رضایت بخشی از این تئوری نخواهیم بود. بنابراین بهتر است در مناطق با آمار محدود، برای پیش بینی هیدروگراف های سال های بدون آمار دبی از همه سیل ها جهت تعیین پارامترهای این تئوری استفاده شود و در مناطق با آمار بسیار کم از این تئوری استفاده نگردد. مقایسه سه روش کاربردی در مطالعه برای تعیین مقادیر باران در بازه های ساعتی نیز توانایی روش *WMO* را در حصول مقادیر ساعتی باران برای ورود به مدل نسبت به دو روش دیگر نشان داد. البته نتایج در حالت کلی عدم توانایی این روش برای کاربرد در مناطق بدون آمار باران سنج ثبات را نشان داد. بنابراین لزوم تحقیقات بیشتر و کاربرد روش های دیگر در ادامه این مطالعه احساس می شود.

آمار اشاره کرد. ویژگی دیگر این مدل، استفاده از داده ورودی بارش به عنوان تنها داده ورودی و ارائه خروجی با خطای کمتر می باشد. دلایل ارائه شده می تواند دلیل کاربرد این روش توسط پژوهشگران آتی گردد.

### نتیجه گیری کلی

مقادیر شاخص های خطا و ضریب تبیین در حصول مقادیر پیش بینی در سال های بدون آمار دبی در منطقه مورد مطالعه، نشان از توانایی مدل در برخی ترکیب ها جهت محاسبه هیدروگراف های سیل مربوط به سال های بدون آمار در ایستگاه اندازه گیری واحد در حوضه های دارای آمار کم هیدرولوژیک دارد. نتایج حاصل از پیش بینی در سال های بدون آمار دبی، توانایی مدل در صورت ترکیب مناسب سیل های موجود برای

### منابع مورد استفاده

- آژدان ی، 1386. مدل بندی جریان های نسبی (سالیانه و ماهیانه) و ارزیابی روابط تجربی در حوضه های آبریز استان آذربایجان غربی. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه.
- خیام م و مولوی ا، 1383. تحلیل های کمی رواناب حوضه آبریز سعیدآبادچای. مجله جغرافیا و توسعه، سال دوم، شماره 3. صفحه های 73 تا 88.
- رحمتی س، پرهت ج، دانش کارآراسته پ و حیدری زاده م، 1389. تخمین آبدهی و همگن بندی حوزه های آبخیز فاقد آمار شمال غرب کشور با استفاده از منحنی رشد منطقه ای (استان های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، ایلام و کردستان). فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، سال اول، شماره 1. صفحه های 45 تا 56.
- زارعی م، قنبرپور مر، حبیب نژاد روشن م و شاهی ک، 1388. شبیه سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل بارش - رواناب *IHACRES* (مطالعه موردی: حوضه آبخیز کسلیان). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال سوم، شماره 8. صفحه های 11 تا 20.
- سلطانی ع، قربانی مع، فاخری فرد ا، دربندی ص و فرسادی زاده د، 1389. برنامه ریزی ژنتیک و کاربرد آن در مدل سازی فرآیند بارش - رواناب. مجله دانش آب و خاک، جلد 20، شماره 4. صفحه های 61 تا 71.
- صادقی سحر، یثربی ب و نورمحمدی ف، 1384. تهیه و تحلیل مدل های بارش - رواناب ماهانه حوزه آبخیز هراز در استان مازندران. پژوهشنامه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خزر، سال سوم، شماره 1. صفحه های 1 تا 12.
- صادقی سحر و دهقانی م، 1385. دقت روش های تخمین ضریب ذخیره آبنمود واحد لحظه ای در بازسازی آبنمود واحد سیل. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، جلد سیزدهم، شماره 3. صفحه های 152 تا 160.

- علیزاده ا، 1384. اصول هیدرولوژی کاربردی. انتشارات آستان قدس رضوی.
- قهرمان ب و آبخضر ح، 1383. اصلاح روابط شدت- مدت- فراوانی بارندگی در ایران. مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، سال هشتم، شماره 2. صفحه‌های 1 تا 14.
- مصطفی‌زاده ر، بهره‌مند ع و سعدالدین ا، 1388. شبیه سازی هیدروگراف رواناب مستقیم با مدل هیدروگراف واحد لحظه‌ای کلارک (مطالعه موردی: آبخیز جعفرآباد استان گلستان). مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، جلد شانزدهم، شماره 3. صفحه‌های 105 تا 122.
- مکاریان ر، 1389. کاربرد تئوری سیستم *Grey* در پیش‌بینی سیلاب حوضه آبریز ليقوان. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده کشاورزی دانشگاه تبریز.
- میرعباسی‌نجف‌آبادی ر، دین‌پژوه ی و فاخری‌فرد ا، 1390. مدل‌سازی بارش و رواناب با استفاده از اصل ماکزیمم آنتروپی (مطالعه موردی: حوضه کسلیان). مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی، علوم آب و خاک، سال پانزدهم، شماره 58. صفحه‌های 39 تا 51.
- نورانی و و صالحی ک، 1387. مدل‌سازی بارش- رواناب با استفاده از روش شبکه عصبی فازی تطبیقی و مقایسه آن با روش‌های شبکه عصبی و استنتاج فازی (مطالعه موردی: حوضه آبریز ليقوان چای واقع در استان آ. شرقی). چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- Aytek A, Asce M and Alp M, 2008. An application of artificial intelligence for rainfall-runoff modeling. *Earth System Science* 117: 145-155.
- Camorani G, Castellarin A and Brath A, 2005. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems. *Physics and Chemistry of the Earth* 30: 561-574.
- Campbell AJ and Sidle RC, 1984. Prediction of peak flows on small watersheds in Oregon for use in culvert design. *American Water Resources Association* 20(1): 9-14.
- Chen XD, Xia J and Xu Q, 2009. Differential hydrological Grey model (DHGM) with self-memory function and its application to flood forecasting. *Science in China Press* 52(4): 1039-1049.
- Jiang XH, Liu CM and Wang Y, 2004. The study on Sanmenxia annual flow forecasting in the Yellow River with mix regression model. *Science in China Series E-Engineering and Articles Science* 47: 118-126.
- Lin GF and Chen LH, 2004. A non-linear rainfall-runoff model using radial basis function network. *Hydrology* 289: 1-8.
- Riggs HC, 1990. Estimating flow characteristics at ungauged sites. *IAHS Publ.* 191: 159-169.
- Smith M, Koren V, Zhang Z and Reed S, 2004. Runoff response to spatial variability in precipitation an analysis of observed data. *Hydrology* 298: 267-286.
- Trivedi HV and Singh JK, 2005. Application of Grey system theory in the development of a runoff prediction model. *Biosystems Engineering* 92 (4): 521-526.
- Wang H, Wang CM, Wang JH, Zhou ZH and Chen YM, 2004. Theory of annual runoff evolution under natural-artificial dual mode and Case Study Rivers, Wuding River loosen in the middle Yellow River. *Science in China Series E-Engineering and Materials Science* 47: 51-50.
- Whigham PA and Crapper PF, 2001. Modeling rainfall-runoff using genetic programming. *Mathematical and Computer Modeling* 33: 707-721.