



## Parameter Uncertainty Analysis by Monte-Carlo Method for Flood Forecasting Using WRF Prediction of Precipitation and Air Temperature in Dez Basin

M. A. Mehralipour<sup>1</sup>, H. Fathian<sup>1\*</sup>, A. R. Nikbakht Shahbazi<sup>1</sup>, N. Zohrabi<sup>1</sup>, and E. Mobarak hassan<sup>2</sup>

### Abstract

Parameters uncertainty of rainfall-runoff models are the main sources of uncertainty in real time flood forecasting. In this paper, the Monte Carlo method is used to estimate the uncertainty of the forecasted flood hydrograph due to uncertainty in the calibration parameters of the rainfall-runoff model in Dez Basin in southwestern Iran. Precipitation and air temperature were predicted using Weather Research and Forecasting (WRF) model. The HEC-HMS hydrological model was used to forecast the flood hydrograph corresponding to the predicted precipitation and air temperature. The SCS-CN, Clark Unit Hydrograph, and Muskingum-Cung methods were used to model losses, transform and flood routing, respectively. The results show that the best scheme in WRF model is MYJLG to predict hourly precipitation and air temperature in Dez Basin. Therefore, the MYJ boundary layer scheme, Lin cloud microphysics scheme and GODDARD radiant scheme have the best performance in flood forecasting in Dez basin. In addition, the results of this study show that considering the simultaneous uncertainty in all parameters, the uncertainty in peak discharge of the forecasted flood hydrograph is higher than the uncertainty in the volume of the hydrograph. So that the uncertainty in peak discharge and the volume of forecasted flood hydrograph due to the uncertainty of all parameters are equal to 32.5 and 21.2%, respectively. Thus, with the lack of flood forecasting and warning based on risk, quantifying uncertainty has provided additional information about forecasts that will help decision makers make better decisions.

**Keywords:** Parameters Uncertainty, Flood Forecasting, Monte-Carlo, WRF Model, HEC-HMS Model.

Received: October 6, 2019

Accepted: June 25, 2020

## تحلیل عدم قطعیت پارامترها با روش مونت-کارلو برای پیش‌بینی سیل با بکارگیری بارش و دمای هوا پیش‌بینی شده با مدل WRF در حوضه دز

محمدعلی مهرعلی‌پور<sup>۱</sup>، حسین فتحیان<sup>۱\*</sup>، علیرضا نیکبخت شهبازی<sup>۱</sup>، نرگس زهرابی<sup>۱</sup> و الهام مبارک حسن<sup>۲</sup>

### چکیده

عدم قطعیت پارامترهای مدل‌های بارش-رواناب، منابع اصلی عدم قطعیت در پیش‌بینی بهنگام سیل می‌باشند. در این مقاله از روش مونت کارلو برای تعیین عدم قطعیت هیدروگراف سیلاب پیش‌بینی شده به علت عدم قطعیت در پارامترهای کالیبراسیون مدل بارش-رواناب در حوضه دز در جنوب غربی ایران استفاده شده است. بارش و دمای هوا با بکارگیری مدل پیش‌بینی و تحقیقات آب و هوا (WRF) پیش‌بینی شد. برای پیش‌بینی سیلاب متناظر با بارش و دمای هوای پیش‌بینی شده، از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده شد. برای مدل‌سازی تلفات، تبدیل بارش به رواناب و روندیابی جریان در آبراهه‌ها به ترتیب از روش‌های شماره منحنی SCS، هیدروگراف واحد کلارک و ماسکینگام-کانج استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که بهترین طرحواره در مدل WRF برای پیش‌بینی بارش و دمای هوای ساعتی در حوضه دز MYJLG است. بنابراین طرحواره لایه مرزی MYJ، طرحواره خردفیزیک ابر Lin و طرحواره تابشی GODDARD بهترین عملکرد در پیش‌بینی سیل در حوضه دز را دارد. علاوه بر این نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن عدم قطعیت همزمان در تمام پارامترها، عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده بیشتر از عدم قطعیت در حجم هیدروگراف است. به طوری که عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده به علت عدم قطعیت تمامی پارامترها به ترتیب برابر با ۳۲/۵ و ۲۱/۲ درصد است. بنابراین با کمبود مراحل پیش‌بینی و هشدار سیل بر مبنای ریسک، به کمیت درآوردن عدم قطعیت، اطلاعات اضافی در مورد پیش‌بینی‌ها فراهم کرده که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا به نحو مناسب‌تر تصمیم بگیرند.

**کلمات کلیدی:** عدم قطعیت پارامترها، پیش‌بینی سیل، مونت کارلو، مدل WRF، مدل HEC-HMS.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۷/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۴/۵

1- Department of Water Resources Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran. Email: Fathian.h58@gmail.com

2- Department of Environment, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- گروه مهندسی منابع آب، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

۲- گروه محیط زیست، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران.

\*- نویسنده مسئول

بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان پائیز ۱۳۹۹ امکانپذیر است.

برخوردار است. در حالی که فاکتور آب زیرزمینی اولیه دارای بیشترین عدم قطعیت می‌باشد و از حساسیت کمی برخوردار است. Kahe et al. (2017) عدم قطعیت پارامتر هدایت هیدرولیکی را برای تحلیل عدم قطعیت مدل جریان آب زیرزمینی دشت علی آباد قم بررسی کردند. در این راستا، باندهای مختلف عدم قطعیت در خصوص پارامتر هدایت هیدرولیکی جهت شبیه‌سازی سطح آب زیرزمینی در محدوده اطمینان ۹۱٪ با استفاده از روش مونت کارلو بررسی کردند. به منظور کاهش حجم محاسبات و صرفه‌جویی در زمان از روش RPEM<sup>۵</sup> استفاده کردند. نتایج نشان داد که مناسب‌ترین باند غیرقطعی در تحلیل عدم قطعیت نوسانات سطح آب زیرزمینی با لحاظ نمودن پارامتر غیرقطعی هدایت هیدرولیکی با استفاده از هر دو روش مونت کارلو و RPEM، افزایش ۴۰ و کاهش ۳۰ درصدی در مقدار حاصل از واسنجی آن می‌باشد. (Karimi et al., 2018) با استفاده از داده‌های کیفیت آب، کاربری/پوشش زمین، نقشه‌ی قابلیت سرزمین و زمین‌شناسی مربوط به ایستگاه‌های هیدرومتری واقع در حوزه‌ی غربی دریای خزر، مدل‌سازی با روش گام به گام رگرسیون خطی انجام دادند. سپس عدم قطعیت مدل‌ها را با شبیه‌سازی مونت کارلو تحلیل کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که افزایش در زمین‌های کشاورزی یا کاهش در مناطق جنگلی در نهایت منجر به افت کیفیت آب خواهد شد. علاوه بر این، بررسی منحنی‌های تابع توزیع تجمعی نشان داد که مدل‌های  $Ca^{2+}$ ،  $Mg^{2+}$  و EC عدم قطعیت بالاتری از لحاظ پیش‌بینی در مقایسه با مدل  $Na^{+}$  دارند. (Wang et al., 2011) یک روش مونت-کارلو پیشرفته بنام شبیه‌سازی زیرمجموعه برای کمی‌سازی اثرات عدم قطعیت پارامترهای ورودی سطح بر خروجی مدل WRF بکاربردند. نتایج نشان داد که خروجی‌های مدل (هر دو شارهای انرژی بحرانی و دمای سطح) به عدم قطعیت در ژئومتری شهری بسیار حساس هستند، در حالی که تغییرات در انتشار و درجه حرارت داخلی ساختمان نسبتاً ناچیز است. علاوه بر این حساسیت مدل به پارامترهای سطح ورودی بسیار ضعیف وابسته به پارامترهای هواشناسی هستند. (Yang et al., 2012) از مدل WRF برای تهیه یک چارچوب انعطاف‌پذیرتر برای بررسی تعدادی از مسائل مربوط به کمیت عدم قطعیت و تنظیم پارامتر استفاده کردند. نتایج بر اساس شبیه‌سازی WRF با فاصله شبکه ۲۵ کیلومتری در دشت‌های بزرگ جنوبی نشان داد که بایاس بارش در مدل می‌تواند به طور قابل توجهی کاهش یابد وقتی که پنج پارامتر بهینه بدست آمده با الگوریتم شبیه‌سازی بازپخت خیلی سریع چندگانه<sup>۶</sup> (MVFS) استفاده شود. همچنین نتایج ضرورت مطالعات بیشتر برای ارزیابی استراتژی‌های کمی‌سازی عدم قطعیت و بهینه‌سازی پارامترها در مقیاس جهانی و منطقه‌ای ایجاد می‌کند. (Lu et al., 2016) از مدل WRF برای پیش‌بینی بارش

مدل پیش‌بینی و تحقیقات آب و هوا<sup>۱</sup> (WRF) برای پیش‌بینی بارش و دمای هوا بکار برده می‌شود که به منظور اجرای مدل هیدرولوژیکی و پیش‌بینی سیل لازم است. پیش‌بینی‌های دبی جریان به دست آمده از مدل هیدرولوژیکی برای ارزیابی دقت مدل WRF به کار برده می‌شود. بررسی‌ها نشان داده که مدل WRF یک ابزار مفید برای پیش‌بینی بارش بوده و نتایج آن نسبتاً خوب است (Hong et al., 2004; Srivastava et al., 2015).

سیل‌ها همواره به عنوان یکی از مخرب‌ترین و پرشمارترین بلایای طبیعی در سرتاسر جهان محسوب می‌شوند. از آنجایی که سیل ذاتاً یک پدیده غیرقطعی می‌باشد، اطمینان و اعتبار سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیل بدون در نظر گرفتن کامل منابع عدم قطعیت در سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار نمی‌تواند تأمین شود. منابع عدم قطعیت در عواملی هستند که منجر به افزایش عدم قطعیت در پیش‌بینی یک سیستم مدل‌سازی شده می‌شوند. در زمینه پیش‌بینی سیل منابع عدم قطعیت مربوط به عدم قطعیت مدل، ورودی‌ها، پارامترها و عوامل طبیعی و اجرایی می‌باشند. عدم قطعیت مدل به دلیل فرضیات در نظر گرفته شده در معادلات مدل، ساخت مدل و نقص در تفهیم سیستم واقعی است. عدم قطعیت پارامترها به دلیل تعیین نادرست پارامترهای مدل است (Maskey et al., 2003).

در سال‌های اخیر محققین زیادی در سراسر دنیا طرحواره‌های مختلف<sup>۲</sup> برای یک سیستم عددی متوسط مقیاس<sup>۳</sup> پیش‌بینی آب و هوا بررسی کرده‌اند (Gilliam and Pleim, 2010; Raju et al., 2011; Zeng et al., 2011; Yuan et al., 2012). نتایج نشان داده که انتخاب طرحواره‌ها برای مدل عددی متوسط مقیاس، تأثیر قابل توجه بر نتایج پیش‌بینی بارش دارد و مناطق مختلف به طرحواره‌های متفاوت نیاز دارند. بنابراین انتخاب طرحواره‌ها و ترکیبات آنها باید بر مبنای شرایط منطقه مشخص باشد (Yuan et al., 2012; Deb et al., 2008). در اکثر پیش‌بینی‌ها نیاز به اصلاح پارامترها جهت اعمال شرایط فعلی حوضه به علت شرایط فعلی هواشناسی است. لذا در فرآیند مدل‌سازی برای پیش‌بینی سیل، همواره عدم قطعیت وجود دارد که به علت وجود عدم قطعیت در پارامترهای مدل است.

(Kabir and Bahremand, 2013) عدم قطعیت پارامترهای مدل WetSpa را با روش مونت کارلو<sup>۴</sup> در حوزه آبخیز گرگان‌رود در استان گلستان بررسی کردند. نتایج بیانگر این بودند که فاکتور تصحیح تبخیر و تعرق کوتاه‌ترین دامنه را دارا بوده و در نتیجه از حساسیت بالایی

استفاده کردند. ابتدا عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها مورد بررسی قرار دادند و سپس بارش با زمان پیش‌دید ۶ ساعته و ۱۲ و ۲۴ ساعته پیش‌بینی کردند. شکل ابرها و میکروفیزیک جو برای پیش‌بینی بارش‌های سنگین مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که مساحت باران شدید توسط WRF کم برآورد می‌شود، اما میزان بارش تجمعی بیشتر برآورد می‌شود.

Liu et al. (2017) روش تحلیل فاکتوریل چند سطحی بر مبنای تئوری بیز<sup>۲</sup> (BMFA) برای ارزیابی عدم قطعیت پارامترهای شماره منحنی رواناب سازمان حفاظت خاک در شرایط رطوبتی متوسط (CN2)، ضریب هدایت هیدرولیکی خاک (SOL-K)، ظرفیت آب قابل دسترس گیاه (SOL-AWC)، عمق خاک (SOL-Z) و اثرات آن بر پاسخ مدل هیدرولوژیکی توسعه دادند. نتایج نشان داد که CN2 اثر مثبت بر دبی اوج دارد، بطوری که سهم قابل توجه بر ایجاد دبی اوج دارد. SOL-K اثر مثبت بر جریان متوسط داشته و می‌تواند منجر به افزایش ظرفیت نفوذ عمقی متوسط شود. اثر متقابل SOL-AWC و SOL-Z بر جریان اوج قابل توجه بوده و اثرات آنها وابسته به یکدیگر می‌باشد. Cannon et al. (2019) بر شناسایی منابع خطای پیش‌بینی کمی بارش West-WRF، از طریق توسعه شبیه‌سازی گروهی که عدم قطعیت حالت اولیه مدل<sup>۳</sup>، فرایندهای فیزیکی و خطای پارامتریک<sup>۴</sup> را در نظر می‌گیرد، تمرکز کردند. نتایج نشان داد که کمی‌سازی عدم قطعیت بارش West-WRF وقایع حدی یک گام مهم در زمینه تهیه اطلاعات بوده که می‌تواند برای مدیریت منطقه‌ای آب کمک کند.

هدف از این تحقیق پیش‌بینی مقادیر ساعتی بارش و دمای هوای در حوضه دز با به‌کارگیری مدل عددی WRF و سپس پیش‌بینی هیدروگراف سیلاب با مدل بارش-رواناب HEC-HMS است. همچنین عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف سیلاب پیش‌بینی شده به‌علت عدم قطعیت در پارامترهای کالیبراسیون مدل HEC-HMS ارزیابی می‌گردد.

## ۲- روش تحقیق

### ۲-۱- منطقه مورد مطالعه

رودخانه دز با حوضه آبریزی با مساحت  $16108/2$  کیلومتر مربع در محل ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ در مختصات جغرافیایی  $10^{\circ} 48'$  تا  $20^{\circ} 50'$  طول شرقی و  $31^{\circ} 30'$  تا  $5^{\circ} 34'$  عرض شمالی واقع شده است. رودخانه دز یکی از بزرگترین شاخه‌های کارون بزرگ بوده و از

دو شاخه عمده و چند شاخه کوچک دیگر تشکیل شده است. شاخه‌های بزرگ و عمده آن رودخانه بختیاری و رودخانه سزار هستند. حوضه آبریز نسبتاً وسیع رودخانه دز در شیب‌های جنوب باختری رشته ارتفاعات بلند و برفگیر زاگرس قرار دارد. بطور کلی ۹۱٪ حوضه آبریز، دارای ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر می‌باشد. این منطقه به‌علت موقعیت خاص اقلیمی جزء زاگرس مرطوب محسوب شده و دارای بارندگی قابل ملاحظه‌ای است که منشأ اصلی منابع آب رودخانه دز به شمار می‌آید. حوضه دز بر اساس نقشه‌های پایه توپوگرافی، شبکه رودخانه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری به ۱۲ زیرحوضه تقسیم شده است. شکل ۱ نقشه زیرحوضه‌بندی حوضه دز تا ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ بر مبنای نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰۰ و شماره مربوط به هر زیرحوضه و شبکه آبراهه‌ها و موقعیت ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد. ایستگاه هیدرومتری در خروجی حوضه دز، ایستگاه تله‌زنگ می‌باشد. اسامی و مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری در جدول ۱ نشان داده شده است.

### ۲-۲- مدل WRF

مدل WRF برای کاربست و استفاده در مقاصد عملیاتی پیش‌بینی عددی وضع هوا و همچنین مقاصد پژوهشی در زمینه علوم جو طراحی شده است، به‌گونه‌ای که این مدل برای استفاده در شبیه‌سازی و پیش‌بینی گستره وسیعی از پدیده‌های جوی از مقیاس چند متر تا چند صد هزار کیلومتر مناسب است (Skamarock et al., 2008). مدل WRF یک مدل غیرهیدروستاتیک (با گزینه اختیاری هیدروستاتیک در حین اجرا) است که شبکه‌بندی افقی آن شبکه آراکوا  $C^{10}$  می‌باشد. در این مدل از طرحواره‌های انتگرال‌گیری مرتبه دوم و سوم زمانی رانگ-کوتا<sup>۱۱</sup> و طرحواره‌های مرتبه دو تا شش برای فرارفت در دو راستای افقی و قائم استفاده می‌شود. این مدل از گام‌های زمانی کوچک برای مدهای اکوستیک<sup>۱۲</sup> و امواج گرانشی استفاده می‌کند.

در این مطالعه، مقادیر بارش و دمای هوا مربوط به واقعه مارس ۲۰۰۳ با فواصل زمانی ۶ ساعته پیش‌بینی شده است. زمان شروع اجرای مدل 12 UTC روز ۲۴ مارس تعیین شده و پیش‌بینی تا ۱۲ UTC روز ۲۷ مارس ادامه داشته است. مدل WRF با یک دامنه و با تفکیک مکانی افقی ۲۳ کیلومتر اجرا شده است. دامنه اول که در شکل ۲ نمایش داده شده از شرق مدیترانه تا شرق ایران و خلیج فارس در جنوب و دریای خزر در شمال ایران را در بر می‌گیرد. مدل WRF با استفاده از هشت پیکربندی متفاوت، شامل یک طرحواره همرفتی، دو طرحواره لایه مرزی سیاره‌ای، دو طرحواره خردفیزیک، یک طرحواره لایه سطحی و دو طرحواره تابش موج کوتاه اجرا شد تا پیکربندی

مناسب برای بارش مارس ۲۰۰۳ به دست آید. جدول ۲ پیکربندی پیکربندی‌ها با استفاده از حروف هر طرحواره نامگذاری شده است. بخش فیزیکی مدل WRF در هشت اجرای مختلف را نشان می‌دهد.

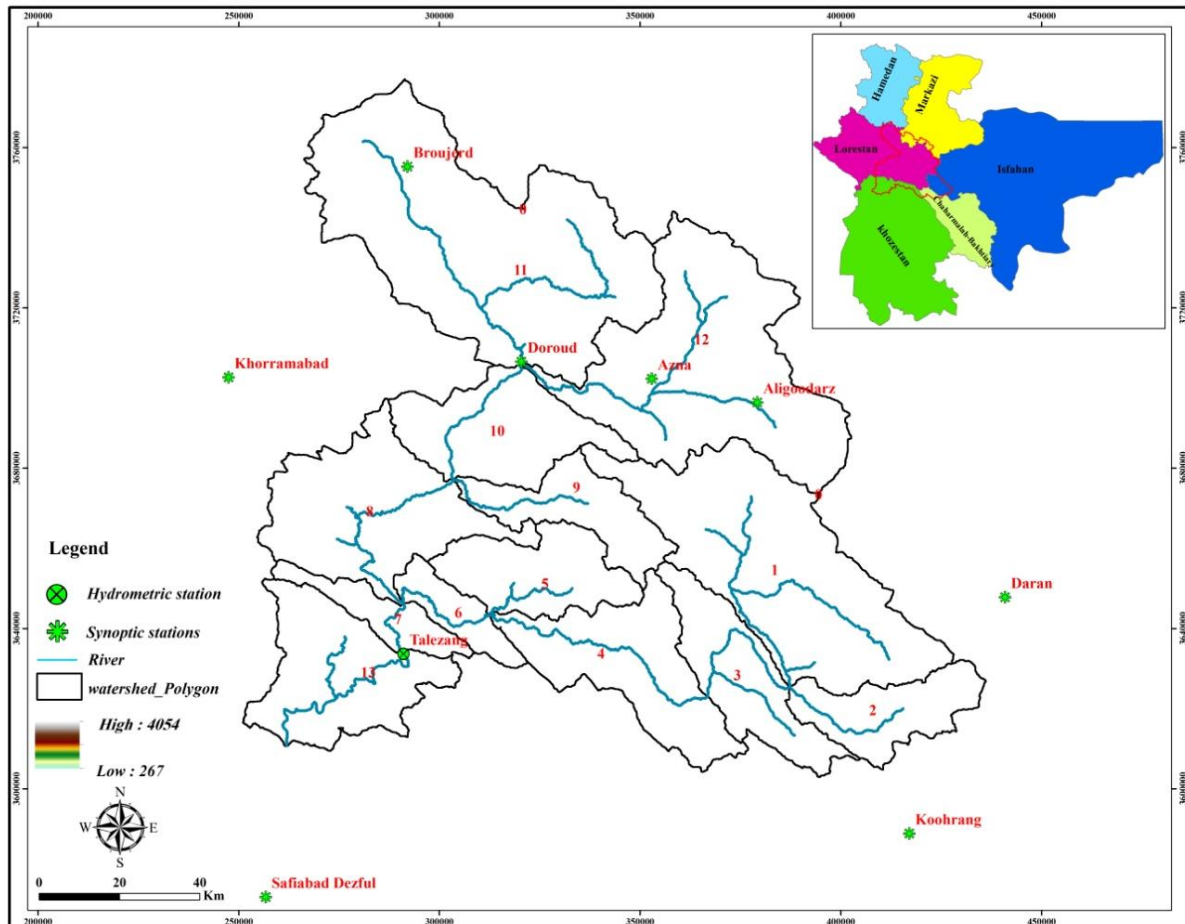


Fig. 1- Boundary and number of Dez sub-basins to Talezang hydrometric station, streams network and location of different stations

شکل ۱- مرز و شماره زیرحوضه‌های دز تا ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ، شبکه آبراهه‌ها و موقعیت ایستگاه‌های مختلف

Table 1- Characteristics of used synoptic and hydrometric stations

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری مورد استفاده

Station	Station type	Latitude (Degree/Minute)	longitude (Degree/Minute)	Elevation (m)
Khorramabad	Synoptic	33 26	48 17	1147.8
Aligodarz	Synoptic	33 24	49 42	2022
Doroud	Synoptic	33 29	49 04	1526.7
Azna	Synoptic	33 27	49 25	1871.9
Broujerd	Synoptic	33 55	48 45	1629
Koohrang	Synoptic	32 26	50 07	2285
Safiabad dezful	Synoptic	32 16	48 25	82.9
Daran	Synoptic	32 58	50 22	2290
Talezang	Hydrometric	32 49	48 46	480

منظور واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS، برای شبیه‌سازی تبدیل بارش به رواناب، تلفات نفوذ، جریان پایه و ذوب برف در زیرحوضه‌ها به ترتیب از روش هیدروگراف واحد کلارک، روش شماره منحنی (CN) سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS)، روش فروکش و روش شاخص دما (روش درجه-روز) استفاده گردید. همچنین برای روندیابی جریان در آبراهه‌ها از مدل هیدرولوژیکی ماسکینگام-کانج استفاده شد.

روش SCS-CN شامل دو پارامتر CN و تلفات اولیه ( $I_a$ ) است. CN و  $I_a$  به صورت زیر باهم مرتبط می‌باشند:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (1)$$

$$I_a = aS \quad (2)$$

که در آن S پتانسیل نگهداشت آب در حوضه به میلیمتر، CN شماره منحنی متوسط حوضه و  $I_a$  تلفات اولیه به میلیمتر و a ضریبی است که بر اساس تجربیات SCS، برابر با ۰/۲ است. ضریب a در تحقیقات مختلف مقادیر کمتر و بیشتر از آن گزارش شده است (Gao et al., 2012). شماره منحنی متوسط زیرحوضه‌ها با تلفیق نقشه کاربری اراضی و گروه هیدرولوژیکی خاک و با به‌کارگیری جدول تعیین شماره منحنی، به‌عنوان شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط بدست آمد (Mahdavi, 1999). سپس CN وارد شده در مدل HEC-HMS برای وقایع مختلف با در نظر گرفتن شرایط رطوبتی خاک قبل از وقوع بارش با محاسبه مقدار بارش ۵ روز قبل اصلاح گردید.

روش هیدروگراف واحد کلارک شامل دو پارامتر زمان تمرکز ( $t_c$ ) و ضریب ذخیره (R) است. زمان تمرکز یکی از مهمترین پارامترهای هیدرولوژیکی در روندیابی زیرحوضه‌ها است. با توجه به اینکه  $t_c$  هر زیرحوضه وابسته به مقدار CN است، از رابطه زمان تأخیر سازمان حفاظت خاک آمریکا (SCS) برای برآورد مقدار  $t_c$  متناظر با CN استفاده شد.

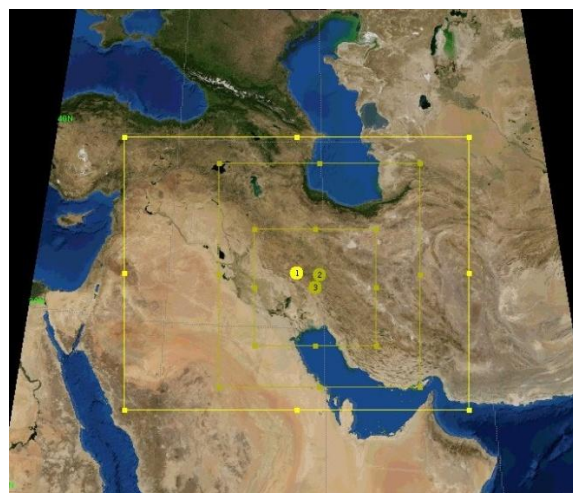


Fig. 2- The range considered in the WRF model  
شکل ۲- دامنه در نظر گرفته شده در مدل WRF

برای صحت‌سنجی، داده‌های منظم پیش‌بینی شبکه مدل، به نقاط ایستگاه‌های دیدبانی درون‌یابی شدند و با استفاده از بارش مشاهداتی، کارایی پیکربندی‌های متفاوت در پیش‌بینی کمی بارش مقایسه شد. با توجه به فاصله زمانی بین آغاز اجرای مدل و آغاز بارندگی، ۲۴ ساعت فاصله زمانی از ساعت ۱۲ UTC روز ۲۴ تا ساعت ۱۲ UTC روز ۲۵ به عنوان زمان تنظیم مدل در نظر گرفته شده و از محاسبه حذف شدند. داده‌های مشاهداتی که در این تحقیق مورد استفاده قرار می‌گیرند، شامل داده‌های مشاهداتی بارش ۶ ساعته تهیه شده از سازمان هواشناسی هستند.

### ۳-۲- معرفی مدل HEC-HMS و پارامترهای واسنجی

مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای مدل‌سازی بارش-رواناب استفاده شد. این مدل برای تحلیل سیلابهای شهری، پیش‌بینی جریان، ظرفیت سرریز مخزن سد، احیا آبراهه‌ها، فرسایش و انتقال رسوب و ارزیابی عدم قطعیت مدل می‌توان به‌کار برد (USACE, 2018). به

Table 2- Configuration of the physical part of the WRF model in eight different implementations

جدول ۲- پیکربندی بخش فیزیکی مدل WRF در هشت اجرای مختلف

Scheme	Boundary layer	Microphysics	Short wave radiation	Long wave radiation	Surface cover	Surface layer	Convective
YSULG	YSU	Lin	Goddard	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
MYJLG	MYJ	Lin	Goddard	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
YSUWG	YSU	WMS5-class(4)	Goddard	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
MYJWG	MYJ	WMS5-class(4)	Goddard	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
YSULD	YSU	Lin	Dudhia	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
MYJLD	MYJ	Lin	Dudhia	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
YSUWD	YSU	WMS5-class(4)	Dudhia	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf
MYJWD	MYJ	WMS5-class(4)	Dudhia	RRTM	Unified Noah	MM5	Kf

Y (مقادیر فاصله و رقوم) تعریف می‌شود. شکل ۵ مقطع عرضی ایستگاه‌های هیدرومتری تنگ‌پنج بختیاری، تنگ‌پنج سزار و تله زنگ را نشان می‌دهد.

در روش روندیابی ماسکینگ-کانج با استفاده از طول و شیب آبراهه، ضریب زبری مانینگ کانال اصلی و دشت‌های سیلابی سمت راست و چپ و شکل مقطع عرضی، ضرایب K و X آبراهه‌ها در هر گام زمانی محاسبه می‌شود. K زمان پیمایش موج در طول مسیر آبراهه است. X پارامتر بدون بعدی است که مقدار آن با استفاده از داده‌های مقطع عرضی محاسبه می‌شود. در روش روندیابی ماسکینگ-کانج مقادیر K و X ثابت نبوده و در هر گام زمانی محاسباتی، مقدار آنها محاسبه می‌شود.

$$K = \frac{L}{3600c_r} \quad (6)$$

$$X = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{Q}{TS_b L c_r}\right) \quad (7)$$

که در آن K بر حسب ساعت، L طول آبراهه بر حسب متر،  $c_r$  سرعت موج بر حسب متر در ثانیه، Q دبی جریان بر حسب متر مکعب در ثانیه، T عرض سطح آزاد آب و  $S_b$  شیب بستر بر حسب متر بر متر است (USACE, 2000).

برای برآورد ارتفاع رواناب ناشی از ذوب برف در باندهای ارتفاعی زیرحوضه‌ها از روش شاخص دما بصورت رابطه ۸ استفاده شد:

$$M = C(T - T_0) \quad (8)$$

که در آن M ارتفاع رواناب ذوب برف، T دمای هوا،  $T_0$  دمای آستانه ذوب برف و C ضریب ذوب برف است. برای تحلیل عدم قطعیت ذوب برف، پارامتر ضریب ذوب برف در نظر گرفته شد. برای تعیین نوع بارش شامل باران و برف در هر باند ارتفاعی مربوط به هر زیرحوضه و همچنین محاسبه رواناب ذوب برف، نیاز به دمای هوا است. نوع بارش بستگی به این دارد که مقدار دمای هوا در هر باند در مقایسه با دمای تفکیک نوع بارش چگونه است. اگر دمای هوا برابر و بیشتر از دمای تفکیک نوع بارش باشد، بارش به صورت باران است. در غیر این صورت بارش به صورت برف است. مقدار دمای تفکیک نوع بارش معمولاً تا یک درجه سانتیگراد است (USACE, 2018).

## ۲-۴- معیارهای آماری

برای مقایسه هیدروگراف مشاهداتی با هیدروگراف شبیه‌سازی‌شده، از شاخص‌های آماری سنجش خطا شامل ضریب ناش-سانکلیف (NS) <sup>۱۳</sup>، ریشه میانگین مربعات خطا <sup>۱۴</sup> (RMSE)، میانگین قدرمطلق درصد خطا <sup>۱۵</sup> (MAPE)، درصد خطای حجمی کل <sup>۱۶</sup> (PTVE) و شاخص

$$t_c = \frac{1.67(3.28L)^{0.8} \left(\frac{1000}{CN} - 9\right)^{0.7}}{1900y^{0.5}} \quad (3)$$

که در آن  $t_c$  زمان تمرکز بر حسب ساعت، L طول آبراهه اصلی بر حسب متر، CN شماره منحنی متوسط زیرحوضه و Y شیب زیرحوضه بر حسب درصد است. می‌توان به جای شیب زیرحوضه، شیب آبراهه اصلی زیرحوضه به کار برد. ضریب ذخیره یکی دیگر از پارامترهای واسنجی است که نمایانگر خصوصیات ذخیره شبکه رودخانه در هر زیرحوضه است. مقادیر  $t_c$  و R هر زیرحوضه با یکدیگر وابسته بوده که با استفاده از مقدار ثابت منطقه‌ای ( $C_s$ ) ارتباط آنها به صورت زیر تعیین می‌شود (Straub, 2000):

$$C_s = \frac{R}{R + t_c} \quad (4)$$

برای استخراج منحنی زمان-مساحت مورد استفاده در روش کلارک، زمان پیمایش هر نقطه تا خروجی حوضه در محل ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ، متناسب با طول پیمایش همان نقطه تا خروجی در نظر گرفته شد. نقشه طول پیمایش برای هر زیرحوضه در محیط نرم‌افزار ArcGIS استخراج شد. شکل ۳ نیز منحنی تجمعی طول-مساحت برای زیرحوضه‌های ۱ تا ۶ را نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز منحنی تجمعی طول-مساحت برای زیرحوضه‌های ۷ تا ۱۲ را نشان می‌دهد.

در روش روندیابی ماسکینگ-کانج نیاز به طول آبراهه، شیب آبراهه، ضریب زبری مانینگ کانال اصلی و دشت‌های سیلابی سمت راست و چپ مقطع عرضی آبراهه و شکل مقطع عرضی است. در این تحقیق عدم قطعیت ضریب زبری مانینگ کانال اصلی و دشت‌های سیلابی سمت راست و چپ آبراهه‌ها تحلیل شده است. مقدار اولیه ضریب زبری مانینگ کانال اصلی با استفاده از رابطه تجربی استریکلر برآورد شد و سپس در مرحله واسنجی مدل مقدار آن تغییر داده شد. رابطه استریکلر برای برآورد اولیه ضریب زبری مانینگ کانال اصلی بصورت زیر است:

$$n = 0.0474d_{50}^{1/6} \quad (5)$$

که در آن n ضریب زبری مانینگ و  $d_{50}$  میانگین قطر ذرات رسوب بر حسب متر است. میانگین قطر ذرات رسوب بر اساس منحنی دانه‌بندی ذرات در ایستگاه‌های هیدرومتری به دست آمد. ضریب زبری مانینگ دشت‌های سیلابی سمت راست و چپ ۲۰ درصد ضریب زبری کانال اصلی در نظر گرفته شد. برای تعریف شکل مقطع عرضی آبراهه‌ها در روش ماسکینگ-کانج از پیکربندی ۸ نقطه‌ای مقطع عرضی استفاده شد. اگر شکل کانال با یکی از مقاطع عرضی استاندارد که هندسه کانال را نمایش می‌دهند، مطابقت نکند، از مقطع عرضی ۸ نقطه‌ای استفاده می‌شود. در پیکربندی ۸ نقطه‌ای مقطع عرضی، یک مقطع عرضی نماینده برای آبراهه تحت روندیابی با استفاده از زوج‌های x و

زمانی نام،  $\bar{O}$  میانگین دبی مشاهداتی و Cov کوواریانس داده‌ها می‌باشد (Nash and Sutcliffe, 1970; Abrahart et al., 2004):

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (9)$$

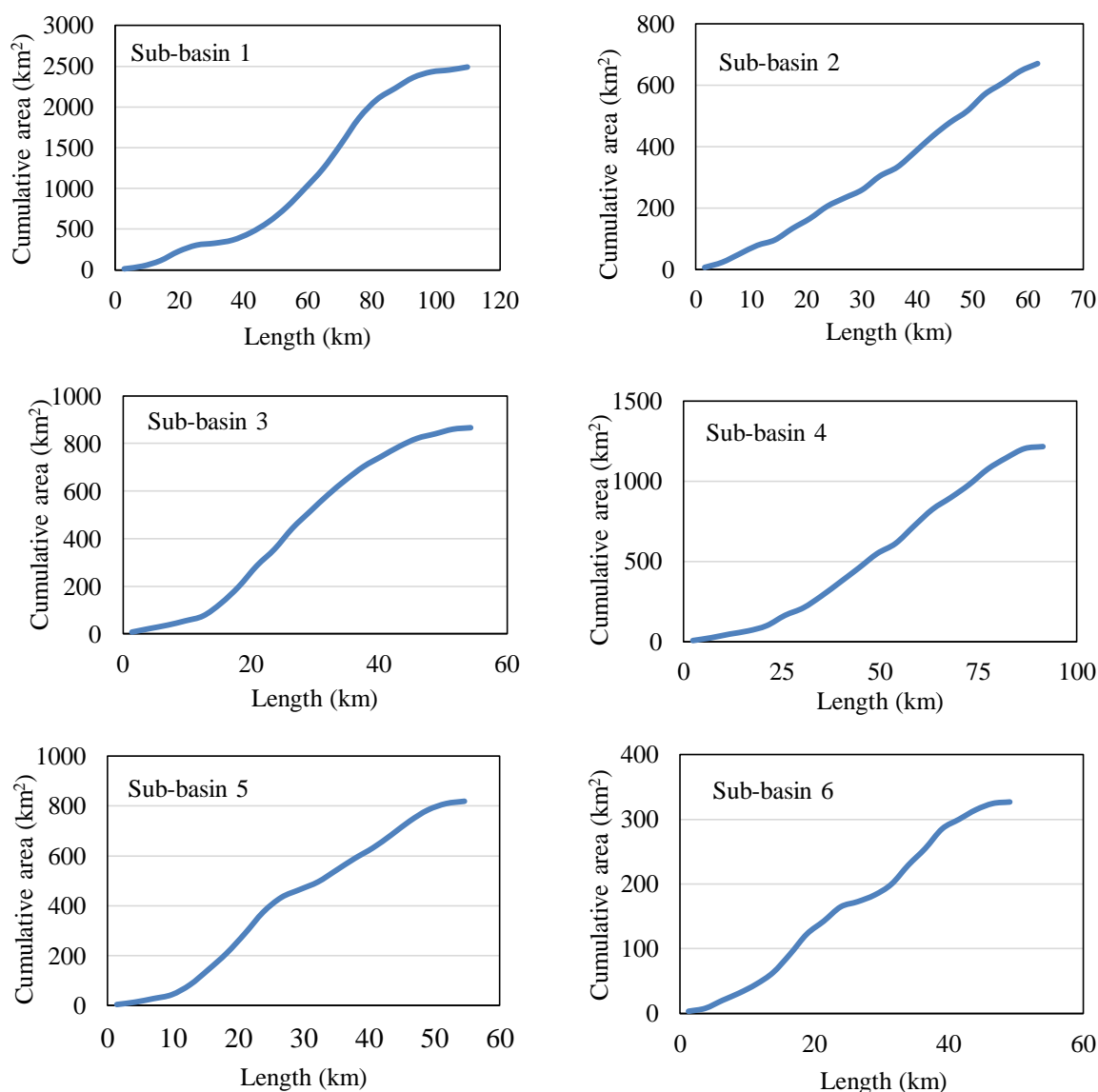
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2} \quad (10)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{S_i - O_i}{O_i} \right| * 100 \quad (11)$$

$$PTVE = \frac{\sum_{i=1}^n S_i - \sum_{i=1}^n O_i}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad (12)$$

توافق<sup>۱۷</sup> (IOA) استفاده شده است که به ترتیب در روابط ۹ تا ۱۳ آمده است. ضریب NS بیان‌گر راندمان مدل بوده که می‌تواند مقادیری از منفی بی‌نهایت تا یک را به خود اختصاص دهند که عدد یک نشان‌دهنده برازش کامل بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده می‌باشد.

شاخص IOA معمولاً برای ارزیابی مدل استفاده می‌شود (Willmott et al., 2012). شاخص IOA بین -1 و +1 تغییر می‌کند که هرچه مقدار IOA به +1 نزدیک‌تر باشد بیان‌گر عملکرد بهتر مدل است. در رابطه ۱۳، c برابر با ۲ است. در روابط ۹ تا ۱۳، n برابر با تعداد داده‌های جریان،  $O_i$  و  $S_i$  مقادیر دبی جریان مشاهداتی و شبیه‌سازی شده در گام



**Fig. 3- Cumulative length- area curve for sub-basins 1 to 6**

شکل ۳- منحنی تجمعی طول- مساحت برای زیرحوضه‌های ۱ تا ۶

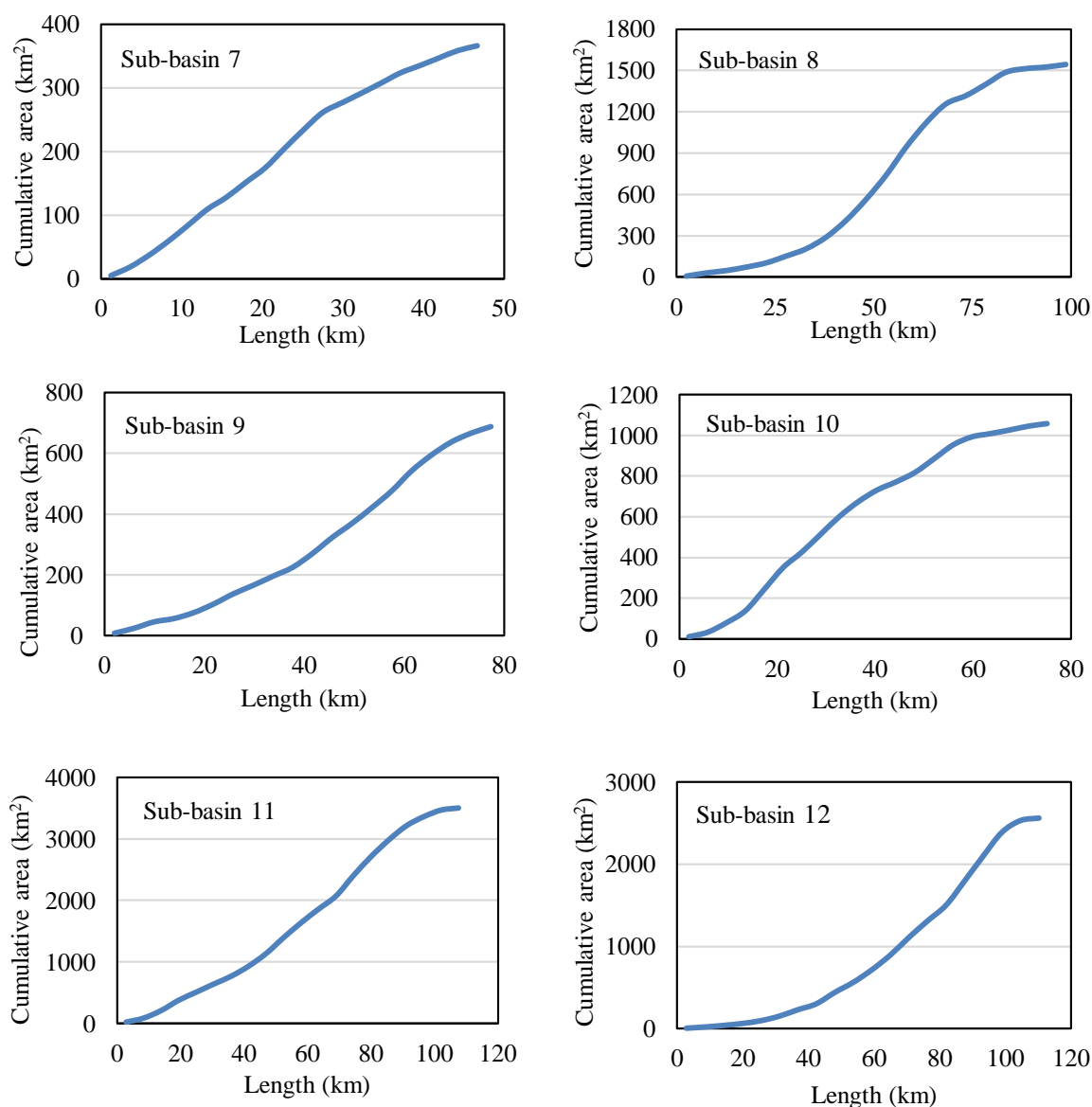


Fig. 4- Cumulative length- area curve for sub-basins 7 to 12

شکل ۴- منحنی تجمعی طول- مساحت برای زیرحوضه‌های ۷ تا ۱۲

$$IOA = \begin{cases} 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}|}, & \text{when } \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \leq c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \\ \frac{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|}{\sum_{i=1}^n |S_i - O_i|} - 1, & \text{when } \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| > c \sum_{i=1}^n |O_i - \bar{O}| \end{cases} \quad (13)$$

احتمال آن، شبیه‌سازی و سپس متناظر با آنها خروجی هر مدل محاسبه می‌گردد. این عمل بارها تکرار و سپس با استفاده از داده‌های تولید شده به تجزیه و تحلیل میزان و نحوه تغییرات نتایج مدل پرداخته می‌شود. میزان عدم قطعیت پارامتر خروجی نیز از طریق محاسبه

#### ۵-۲- عدم قطعیت پارامترها با روش مونت- کارلو

اساس کار روش شبیه‌سازی مونت کارلو، نمایش ترکیبات تصادفی با تولید آنها با توجه به حالات ممکن از عدم قطعیت‌هایی است که در یک مطالعه رخ می‌دهد. بدین صورت که هر متغیر با استفاده از تابع توزیع



شماره منحنی، ضریب تلفات اولیه (a)، مقدار ثابت منطقه‌ای ( $C_s$ )، ضریب ذوب برف زیرحوضه‌ها و ضریب زبری مانینگ آبراهه‌ها با به‌کارگیری وقایع واسنجی مدل بارش-رواناب HEC-HMS تعیین گردید. برای تعیین محدوده تغییرات پارامترهای واسنجی، ترکیبات مختلف پارامترها برای زیرحوضه‌ها و آبراهه‌ها در نظر گرفته و با اعمال ترکیب پارامترها در مدل بارش-رواناب HEC-HMS، مدل اجرا شده و ضریب ناش-ساتکلیف محاسبه گردید. آستانه قابل قبول ضریب ناش-ساتکلیف برای ترکیب پارامترها، ۰/۷ در نظر گرفته شد (Bhavsar and Patel, 2018).

جدول ۳ محدوده تغییرات پارامترهای مختلف شامل شماره منحنی، ضریب تلفات اولیه (a)، مقدار ثابت منطقه‌ای ( $C_s$ ) و ضریب ذوب برف برای زیرحوضه‌های مختلف در روش مونت کارلو را نشان می‌دهد. جدول ۴ محدوده تغییرات پارامتر ضریب زبری مانینگ آبراهه‌های مختلف در سطح حوضه دز را نشان می‌دهد. محدوده تغییرات مقدار ثابت منطقه‌ای بین ۰/۲ تا ۰/۶۵ در نظر گرفته شد (Straub, 2000; Mousavi et al., 2012; Kamali et al., 2013).

شاخص‌های آماری یا تعیین تابع توزیع آن بیان می‌گردد (Eckhardt et al., 2003). انتخاب تابع توزیع احتمال برای متغیر ورودی، یکی از مسائل موجود در روش مونت کارلو می‌باشد که به دلیل محدودیت اطلاعات و به دنبال آن در دسترس نبودن سری زمانی پارامترها، با توجه به وجود تنها یک عدد برای تمام پارامترها در تمام زیرحوضه و آبراهه‌ها، تابع توزیع یکنواخت به عنوان تابع توزیع احتمال پارامتر مذکور در نظر گرفته شد. برای تعیین عدم قطعیت پارامترها در پیش‌بینی هیدروگراف سیل با روش مونت کارلو، عدم قطعیت در هیدروگراف سیل تحت تأثیر همزمان تمام پارامترها با در نظر گرفتن اثر متقابل بین پارامترها برآورد گردید. شکل ۶ فلوچارت تحلیل عدم قطعیت هیدروگراف سیلاب پیش‌بینی شده به روش مونت کارلو با به‌کارگیری مدل HEC-HMS را نشان می‌دهد.

پارامترهای شماره منحنی (CN)، ضریب تلفات اولیه (a)، مقدار ثابت منطقه‌ای ( $C_s$ )، ضریب ذوب برف (C) زیرحوضه‌ها و ضریب زبری مانینگ ( $n$ ) آبراهه‌ها به عنوان پارامترهای واسنجی در نظر گرفته شدند. سپس حدود پایین و بالا تغییرات پارامترهای واسنجی به الگوریتم مونت-کارلو معرفی شدند. محدوده تغییرات پارامترهای

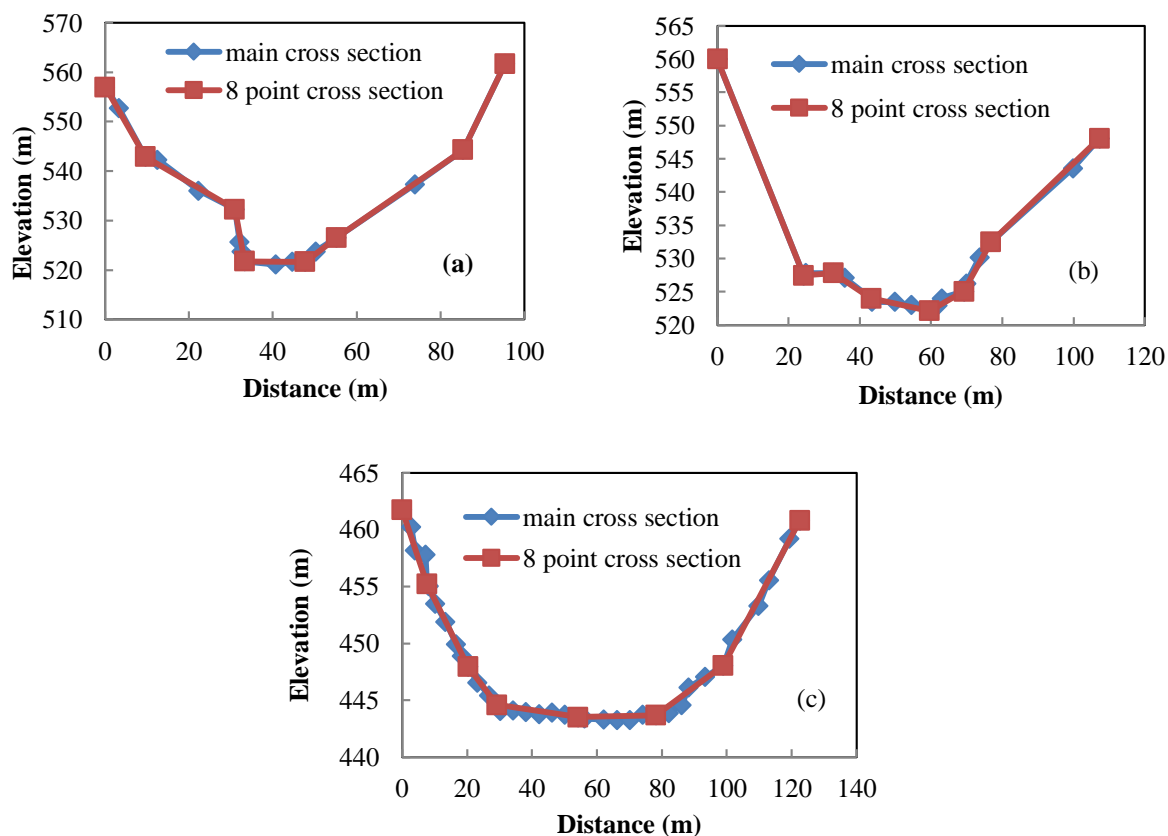


Fig. 5- Cross sections of Tange Panj-Bakhtiari (a), Tange Panj-Sezar (b) and Talezang (c) hydrometric stations

شکل ۵- مقاطع عرضی ایستگاه‌های هیدرومتری تنگ پنج بختیاری (a)، تنگ پنج سزار (b) و تله‌زنگ (c)

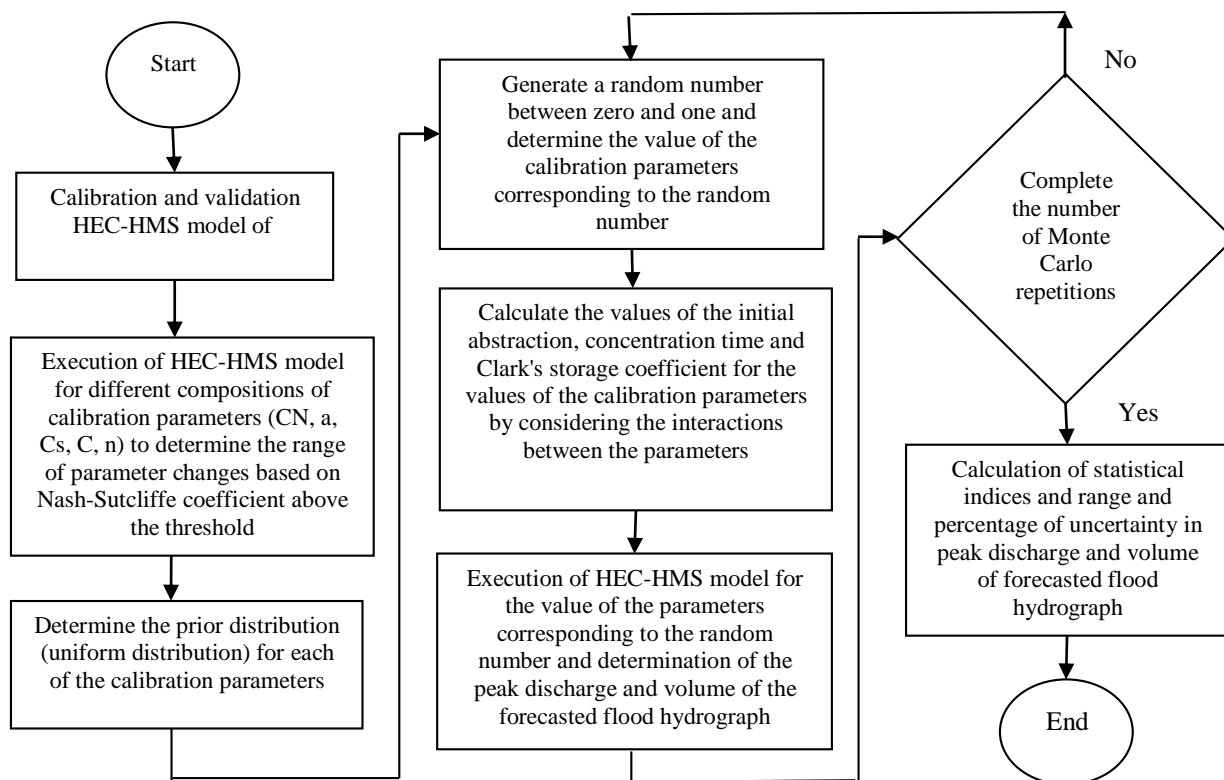


Fig. 6- Flowchart of uncertainty analysis of forecasted flood hydrograph by the Monte Carlo method using the HEC-HMS model

شکل ۶- فلوجارت تحلیل عدم قطعیت هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده به روش مونت کارلو با به کارگیری مدل HEC-HMS

Table 3- Variations Rang of parameters including curve number, initial abstractions coefficient, regional value and snowmelt coefficient for different sub-basins

جدول ۳- محدوده تغییرات پارامترهای شماره منحنی، ضریب تلفات اولیه، مقدار ثابت منطقه‌ای و ضریب ذوب برف برای زیرحوضه‌های مختلف

parameter	location	Lower bound	Upper bound
CN	Sub-basin 1	60	96
	Sub-basin 2	60	94
	Sub-basin 3	50	80
	Sub-basin 4	48	86
	Sub-basin 5	49	90
	Sub-basin 6	46	90
	Sub-basin 7	46	90
	Sub-basin 8	48	90
	Sub-basin 9	57	90
	Sub-basin 10	51	90
	Sub-basin 11	58	90
	Sub-basin 12	48	90
a	All Sub-basins	0.05	0.35
Cs	All Sub-basins	0.2	0.65
C (mm/°c-day)	All Sub-basins	2	5

**Table 4- Variations range of Manning's roughness coefficient parameter in different streams**

جدول ۴- محدوده تغییرات پارامتر ضریب زبری مانینگ در آبراهه‌های مختلف

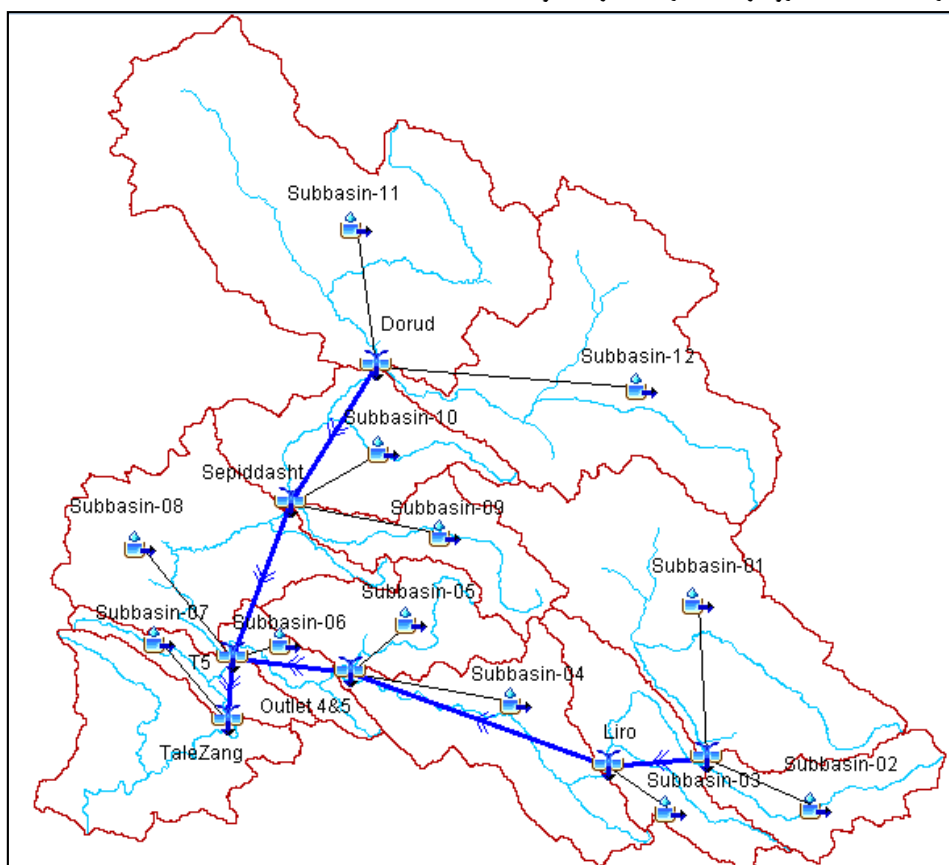
Reach	Dorud-Sepiddasht	Sepiddasht-Tange Panj	Roodbar-Liro	Liro-Outlet 4&5	Outlet 4&5-Tange Panj	Tange panj-Talezang
manning's n ( $\frac{sec}{m^{1/3}}$ )	0.018-0.053	0.017-0.05	0.019-0.056	0.018-0.053	0.018-0.053	0.016-0.048

۱Feb1993 برای مرحله صحت‌سنجی مدل نشان می‌دهد. به منظور صحت‌سنجی مدل واسنجی شده HEC-HMS، شبیه‌سازی بارش-رواناب برای دوره زمانی صحت‌سنجی با مقادیر پارامترهای نهایی حاصل از واسنجی انجام شد. با توجه به شکل ۸ (الف) و (ب) می‌توان دریافت که تغییرات هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS برای وقایع 26Mar1998 و 5Jan1993 در ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ نزدیک به هیدروگراف سیلاب مشاهداتی است و مدل HEC-HMS از لحاظ شبیه‌سازی بارش-رواناب به خوبی واسنجی شده است. همچنین با توجه به شکل ۸ (ج) می‌توان دریافت که تغییرات هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS برای واقعه 1Feb1993، تقریباً نزدیک به هیدروگراف مشاهداتی است.

### ۳- نتایج و تحلیل نتایج

#### ۱-۳- واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS

در ابتدا قبل از به‌کارگیری مدل HEC-HMS جهت پیش‌بینی هیدروگراف سیل، اقدام به واسنجی و صحت‌سنجی آن گردید. شکل ۷ شماتیک زیرحوضه‌ها و رودخانه‌های بالادست ایستگاه تله‌زنگ ساخته شده در محیط مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS را نشان می‌دهد. شکل ۸ (الف) و (ب) مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ به ترتیب برای وقایع 26Mar1998 و 5Jan1993 برای مرحله واسنجی مدل نشان می‌دهد. علاوه بر این شکل ۸ (ج) مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ برای واقعه



**Fig. 7- Schematic of the sub-basins and streams upstream of the Talezang station constructed in the HEC-HMS model**

شکل ۷- شماتیک زیرحوضه‌ها و رودخانه‌های بالادست ایستگاه تله‌زنگ ساخته شده در مدل HEC-HMS

است. با توجه به مقادیر ضریب NS برای وقایع واسنجی می‌توان دریافت که مدل به خوبی واسنجی شده است. علاوه بر این در جدول ۵، مقادیر ضریب NS، PTVE و MAPE بین هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای واقعه 1Feb1993 در مرحله صحت‌سنجی مدل به ترتیب برابر با ۰/۸۸۱، ۹/۳٪ و ۱۷/۰۷٪ است که با توجه به ضریب NS برابر با 0.881، می‌توان دریافت که مدل HEC-HMS به خوبی واسنجی شده است.

جدول ۵ معیارهای آماری نیکویی برازش برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۵، مقادیر ضریب NS، PTVE و MAPE بین هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای واقعه 26Mar1998 به ترتیب برابر با ۰/۹۷، ۳۲/۳٪ و ۸/۰۷٪ است. همچنین با توجه به جدول ۵، مقادیر ضریب NS، PTVE و MAPE بین هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای واقعه 5Jan1993 به ترتیب برابر با ۰/۹۰۴، ۷/۵۵٪ و ۱۵/۸۹٪

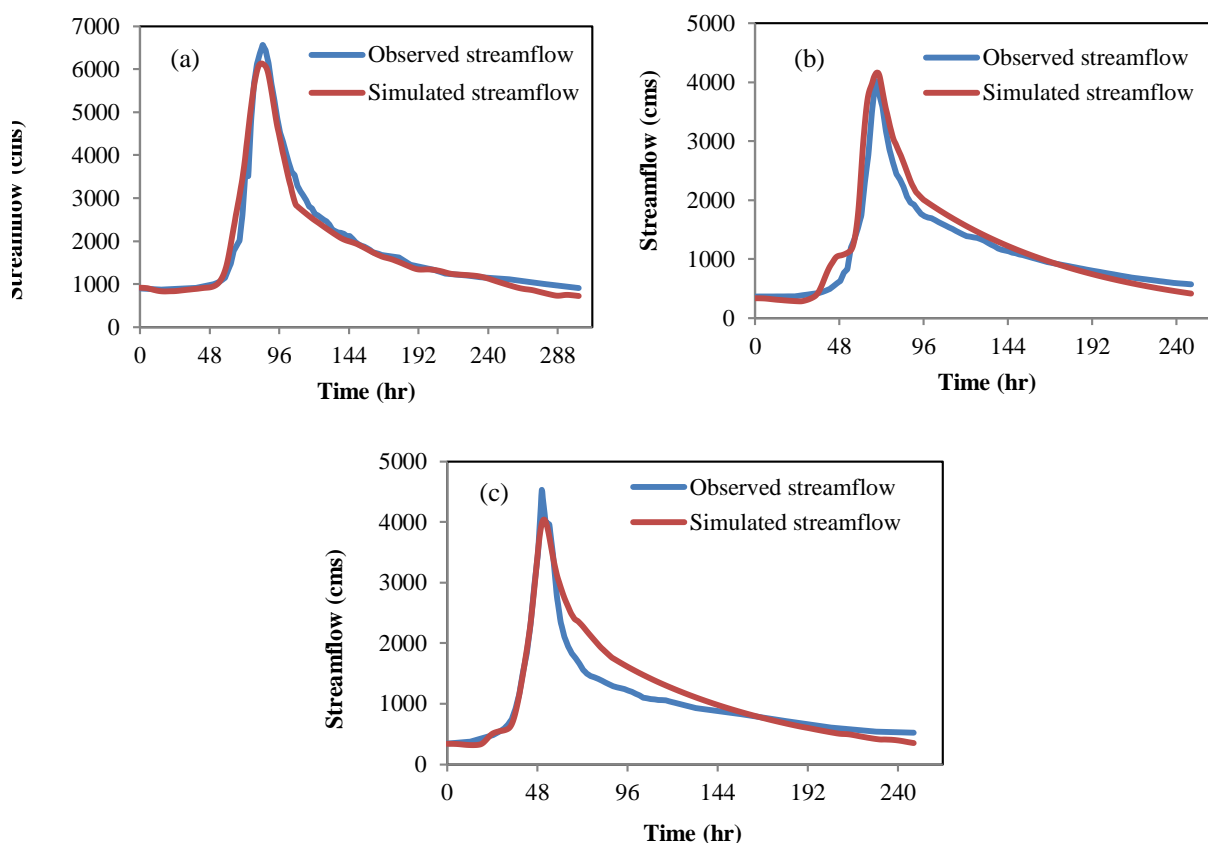


Fig. 8- Comparison of simulated and observed flood hydrograph at Talezang station for 26Mar1998 (a) and 5Jan1993 (b) events for model calibration and 1Feb1993 (c) event for model validation

شکل ۸- مقایسه هیدروگراف سیلاب مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده در ایستگاه تله‌زنگ برای وقایع 26Mar1998 (a) و 5Jan1993 (b) برای واسنجی مدل و واقعه 1Feb1993 (c) برای صحت‌سنجی مدل

Table 5- Goodness-of-fit statistical criteria for the HEC-HMS model calibration and validation period  
جدول ۵- معیارهای آماری نیکویی برازش برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی مدل HEC-HMS

Event	Stage	NS	PTVE (%)	RMSE (cms)	MAPE (%)
26Mar1998	calibration	0.970	-3.32	225.7	8.07
5Jan1993	calibration	0.904	7.55	232.7	15.89
1Feb1993	Validation	0.881	9.3	260.8	17.07

### ۳-۲- ارزیابی مدل WRF

در جدول ۷ دبی اوج، ارتفاع رواناب و حجم رواناب پیش‌بینی شده به ازای طرحواره‌های مختلف با استفاده از مدل HEC-HMS ارائه شده است. گرچه مقدار دبی اوج پیش‌بینی شده در هشت طرحواره نسبت به دبی اوج مشاهداتی کمتر است اما طرحواره‌های MYJLD، MYJWG و YSULG نزدیک‌ترین مقدار را به دبی اوج مشاهداتی دارند. ارتفاع و حجم رواناب با استفاده از دو طرحواره MYJLG و YSULG بهتر پیش‌بینی شده است. طرحواره MYJLD دبی اوج را کمتر از دبی اوج مشاهداتی پیش‌بینی می‌کند اما ارتفاع و حجم رواناب را بیشتر از ارتفاع و حجم رواناب مشاهداتی پیش‌بینی می‌کند. جدول ۸ مقایسه شاخص‌های آماری هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده برای طرحواره‌های مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۸، طرحواره MYJLD با PTVE برابر با ۰/۷۶ درصد، کمترین درصد خطای حجمی کل را دارد. در تمام طرحواره‌ها به جز MYJLD، حجم رواناب کمتر از حجم رواناب مشاهداتی پیش‌بینی شده است. طرحواره MYJLG بیشترین ضریب NS و کمترین RMSE بین دبی جریان پیش‌بینی شده و مشاهداتی دارد. بطوری که NS و RMSE برای طرحواره MYJLG به ترتیب برابر با ۰/۸۳۸ و ۲۳۳/۳ مترمکعب در ثانیه است. بنابراین بهترین طرحواره برای پیش‌بینی سیلاب در حوضه دز MYJLG است.

مقایسه هیدروگراف سیلاب پیش‌بینی شده در ایستگاه هیدرومتری تله‌زنگ حاصل از بارش پیش‌بینی شده با طرحواره‌های مختلف در مدل WRF در شکل ۹ نشان داده شده است.

در جدول ۶ شاخص IOA برای دمای ساعتی پیش‌بینی شده با به‌کارگیری هشت طرحواره مختلف ارائه شده است. بهترین ضریب توافقی ۰/۶۴۱ در ایستگاه داران به دست آمده است. ایستگاه داران در تمامی طرحواره‌ها برآورد خوبی از دما داشته است. کمترین ضریب توافقی ۰/۱۴ در ایستگاه دزفول به دست آمده است. از میان هر هشت طرحواره، چهار طرحواره MYJLD، MYJWD، YSULG و YSUWD به عنوان طرحواره‌هایی که در هر شش ایستگاه ضریب توافقی بهتری برای دمای ساعتی داشته‌اند انتخاب می‌شوند. همچنین در جدول ۶ شاخص IOA برای بارش ساعتی پیش‌بینی شده با طرحواره‌های مختلف را نشان می‌دهد. در مورد بارش ساعتی ضریب توافقی نتیجه بهتری نسبت به دمای ساعتی دارد. به طوری که بیشترین ضریب توافقی با مقدار ۰/۸۴ در ایستگاه داران تعیین شده است. گرچه کمترین ضریب توافقی برابر با ۰/۲۷ در ایستگاه کوه‌رنگ به دست آمده است اما در برخی طرحواره کمترین ضریب توافقی مقدار بیشتری دارد. از بین هشت طرحواره، MYJWD، MYJWG، YSUWD و YSUWG بهترین توافقی را برای بارش ساعتی پیش‌بینی شده و بارش ساعتی مشاهداتی دارند. با مقایسه نتایج برای بارش و دمای ساعتی دو طرحواره MYJWD و YSUWD در هر دو پارامتر توافقی خوبی دارند. به این ترتیب به نظر می‌رسد تأثیر طرحواره لایه مرزی کمتر بوده و انتخاب طرحواره میکروفیزیک WMS5 نسبت به طرحواره لین LIN و طرحواره تابشی Dudhia نسبت به GODDARD بارش ساعتی و دمای ساعتی را بهتر برآورد می‌نمایند.

**Table 6- IOA Index for hourly precipitation and temperature forecasted with different schemes in WRF model**  
جدول ۶- شاخص IOA برای بارش و دمای ساعتی پیش‌بینی شده با طرحواره‌های مختلف در مدل WRF

Station	Variable	MYJLD	MYJLG	MYJWD	MYJWG	YSULG	YSULG	YSUWD	YSUWG
Aligodarz	Precipitation	0.71	0.73	0.75	0.73	0.73	0.72	0.76	0.73
	Temperature	0.33	0.3	0.33	0.28	0.28	0.25	0.27	0.24
Brujerd	Precipitation	0.71	0.66	0.69	0.66	0.69	0.66	0.7	0.67
	Temperature	0.29	0.38	0.27	0.37	0.3	0.37	0.27	0.36
Daran	Precipitation	0.75	0.72	0.76	0.77	0.72	0.79	0.73	0.84
	Temperature	0.64	0.54	0.62	0.53	0.57	0.51	0.57	0.5
Safiabad Dezful	Precipitation	0.42	0.3	0.46	0.4	0.42	0.32	0.54	0.42
	Temperature	0.35	0.21	0.36	0.25	0.3	0.14	0.3	0.19
Khorramabad	Precipitation	0.58	0.67	0.69	0.66	0.68	0.64	0.71	0.67
	Temperature	0.35	0.43	0.36	0.43	0.37	0.42	0.38	0.43
Koohrang	Precipitation	0.27	0.32	0.47	0.43	0.3	0.3	0.39	0.29
	Temperature	0.37	0.44	0.38	0.43	0.33	0.38	0.34	0.37

**Table 7- Comparison of forecasted peak discharge, runoff, and flood hydrograph volumes for selected schemes**  
**جدول ۷- مقایسه مقادیر دبی اوج، ارتفاع رواناب و حجم هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده برای طرحواره‌های منتخب**

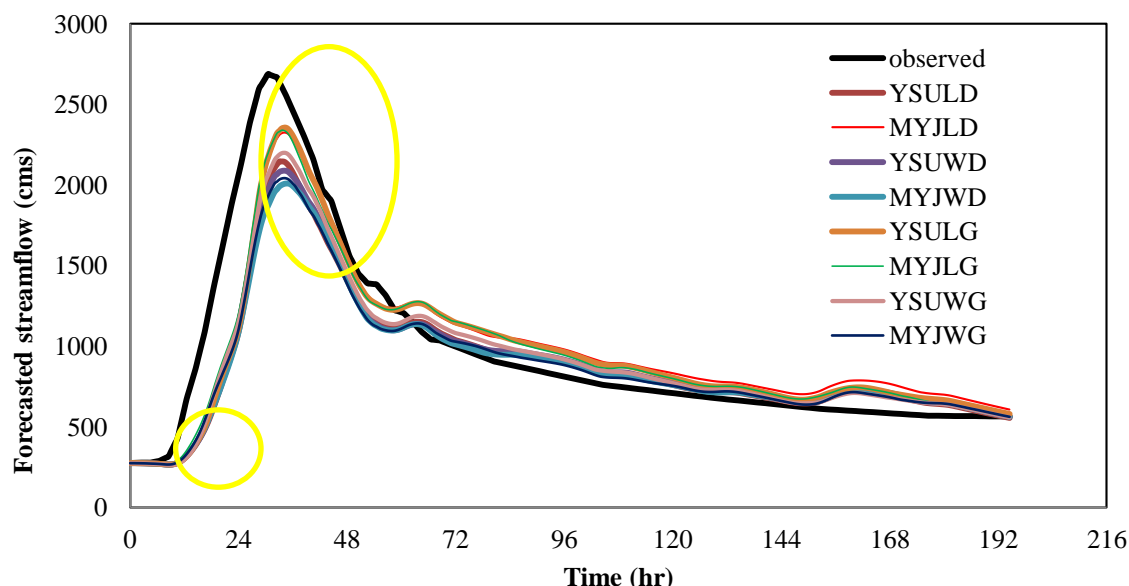
Variable	Observed	MYJLD	MYJLG	MYJWD	MYJWG	YSULD	YSULG	YSUWD	YSUWG
Peak discharge (cms)	2689	2327.1	2338.1	2010.1	2044.1	2146.8	2356.4	2087.8	2200.9
Runoff (mm)	42.23	42.55	41.64	38.58	38.55	38.95	41.7	39.17	39.91
Volume (MCM)	680.2	685.4	670.7	621.5	621.0	627.4	671.7	631.0	642.9

**Table 8- Comparison of statistical indices of forecasted flood hydrographs for different schemes**  
**جدول ۸- مقایسه شاخص‌های آماری هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده برای طرحواره‌های مختلف**

Statistical indices	MYJLD	MYJLG	MYJWD	MYJWG	YSULD	YSULG	YSUWD	YSUWG
NS	0.812	0.838	0.752	0.774	0.779	0.811	0.776	0.813
PTVE (%)	0.76	-1.39	-8.64	-8.7	-7.76	-1.26	-7.25	-5.5
RMSE (cms)	251.9	233.3	289.0	276.1	272.6	252.4	274.6	250.7
MAPE (%)	19.03	15.56	14.03	13.15	13.69	16.53	14.62	13.86

**۳-۳- تحلیل عدم قطعیت پارامترها در پیش‌بینی سیل**  
 به منظور ارزیابی تاثیرات همزمان تمام پارامترهای مربوط به زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های حوضه در ایجاد عدم قطعیت در هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده، از روش مونت کارلو استفاده گردید. بنابراین مقادیر تمام پارامترها در محدوده موردنظر تغییر داده شد و مشخصات هیدروگراف سیل شامل دبی اوج و حجم هیدروگراف به ازای هر تکرار تعیین گردید.

در بررسی تغییرات زمانی رواناب به سه مورد شامل روند تغییرات، زمان آغاز و مقدار بیشینه توجه می‌گردد. زمان آغاز رواناب ناشی از نتیجه طرحواره‌های مختلف مدل تقریباً ۵ ساعت دیرتر از رواناب مشاهده‌ای می‌باشد. تمامی طرحواره‌ها روند تغییرات مشابه‌ای داشته و با روند رواناب مشاهده‌ای تقریباً یکسان هستند. تمام طرحواره‌ها دبی اوج را کمتر از داده مشاهده‌ای پیش‌بینی کرده‌اند.



**Fig. 9- Comparison of the forecasted flood hydrograph at the Talezang station from the predicted precipitation and air temperature with different schemes in the WRF model**

**شکل ۹- مقایسه هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده در ایستگاه تله‌زنگ حاصل از بارش و دمای هوا پیش‌بینی شده با طرحواره‌های مختلف در مدل WRF**

بیشتر از عدم قطعیت در حجم هیدروگراف است. بنابراین به کارگیری روش‌های بهینه‌سازی به منظور برآورد بهینه پارامترهای واسنجی مدل بارش-رواناب تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش دقت در پیش‌بینی هیدروگراف سیل خواهد داشت. بر این اساس، با کمبود مراحل پیش‌بینی و هشدار سیل بر مبنای ریسک، به کمیت درآوردن عدم قطعیت، اطلاعات اضافی در مورد پیش‌بینی‌ها فراهم کرده که به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کنند تا به نحو مناسب‌تر تصمیم بگیرند. (Khodamorad Pour et al. (2011) در یافتن که خطای مدل WRF در پیش‌بینی بارش و خطای طرحواره سطح OSU در رابطه بارش-رواناب یا خطای موجود در پارامترهای سطحی بکاررفته در اجرای مدل به‌ویژه پارامترهای مربوط به تابع توزیع چگالی احتمال ظرفیت نفوذ خاک و خطا در شرایط اولیه ذخایر آب سطحی و زیرزمینی هر یک سهمی در برآورد دبی رودخانه دارند. (Liu et al. (2017) در بررسی عدم قطعیت پارامترها دریافتند که شماره منحنی در شرایط رطوبتی متوسط سهم قابل توجه بر ایجاد دبی اوج حوضه دارد. نتایج تحقیقات (Kumar et al. (2002) و (Mostafazade et al. (2018) در رابطه با حساسیت هیدروگراف جریان به تغییر در پارامترهای روش زمان مساحت کلارک نشان داد که تغییرات ضریب ذخیره نسبت به زمان تمرکز بیش‌ترین تأثیر را بر دبی اوج هیدروگراف داشته است.

در ادامه این تحقیق پیشنهاد می‌شود که عدم قطعیت پارامترهای واسنجی مدل بارش-رواناب در پیش‌بینی هیدروگراف سیل با الگوریتم DREAM روش مونت کارلو زنجیره مارکوف تحلیل شود و با نتایج روش مونت کارلو مقایسه گردد. همچنین عدم قطعیت در هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده بعلاوه تغییرات متغیرهای هواشناسی ورودی در مدل بارش-رواناب شامل مقادیر بارش و دمای هوا، برآورد کرده و با عدم قطعیت مربوط به پارامترها مقایسه شود.

جدول ۹ شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده بعلاوه تمام پارامترهای مربوط به زیرحوضه‌ها و آبراهه‌های حوضه را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۹، عدم قطعیت دبی اوج و حجم هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده بعلاوه تمام پارامترها به ترتیب برابر با ۳۲/۵ و ۲۱/۲ درصد است. بنابراین میزان عدم قطعیت در دبی اوج بعلاوه تمام پارامترها بیشتر از میزان عدم قطعیت در حجم هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده است. همچنین با توجه به اینکه ضریب تغییرات مربوط به دبی اوج بیشتر از حجم هیدروگراف سیلاب پیش‌بینی شده است، می‌توان دریافت که دبی اوج هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده دارای عدم قطعیت بیشتر نسبت به حجم هیدروگراف سیل است.

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

در این تحقیق به پیش‌بینی کوتاه مدت مقادیر ساعتی بارش و دمای هوا در ایستگاه‌های سینوپتیک واقع در سطح حوضه دز با به کارگیری مدل عددی WRF اقدام شده است. در ابتدا مدل WRF به ازای طرحواره‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس با اعمال مقادیر ساعتی بارش و دمای هوا در مدل بارش-رواناب، هیدروگراف سیلاب متناظر با هر طرحواره به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد. نتایج به کارگیری مدل WRF برای پیش‌بینی بارش و دمای هوای ساعتی نشان می‌دهد که بهترین طرحواره برای پیش‌بینی سیلاب MYJLG است. بنابراین به نظر می‌رسد طرحواره لایه مرزی MYJ، طرحواره خردفیزیک ابر Lin و طرحواره تابشی GODDARD بهترین عملکرد در پیش‌بینی سیل در حوضه دز را دارد. علاوه بر این نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن عدم قطعیت همزمان در تمام پارامترها، عدم قطعیت در دبی اوج هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده

**Table 9- Statistical indices of uncertainty analysis in peak discharge and volume of forecasted flood hydrograph due to uncertainty in all parameters**

جدول ۹- شاخص‌های آماری تحلیل عدم قطعیت در دبی اوج و حجم هیدروگراف سیل پیش‌بینی شده بعلاوه تمام پارامترها

Statistical criteria	پارامترها			Standard deviation	CV (%)	Uncertainty range	Uncertainty (%)
	min	max	mean				
Peak discharge (cms)	1723.5	3245.2	2566.7	96.3	3.8	1521.7	32.5
Flood volume (MCM)	578.9	863.1	734.6	21.2	2.9	284.2	21.2

4- Monte Carlo

5- Rosenblueth's Point Estimation Method (RPEM)

6- Multiple Very Fast Simulated Annealing (MVFSA)

7- Model's Initial State

8- Parameterization Error

#### ۵- پی‌نوشت‌ها

1- Weather Research and Forecasting

2- Parameterization Schemes

3- Mesoscale

- Qom). *Iran-Water Resources Research* 14(2):23-35 (In Persian)
- Karimi Sh, Jabbarian Amiri B, and Malekian A (2018) Modeling the impact of watershed physical attributes on surface water quality and uncertainty assessment of the models using the Monte Carlo simulation. *Iran-Water Resources Research* 14(3):304-317 (In Persian)
- Khodamorad Pour M, Irannejad P, and Hajjam S (2011) The evaluation of simulated discharge of coupled surface scheme and river routing in numerical weather prediction WRF (Case study Karoon river). *Journal of the Earth and Space Physics* 37(1):199-214 (In Persian)
- Kumar R, Chatterjee C, Lohani AK, Kumar S, and Singh RD (2002) Sensitivity analysis of the GIUH based Clark model for a catchment. *Water Resources Management* 16(4):263-278
- Liu YR, Li YP, Huang GH, Zhang JL, and Fan YR (2017) A Bayesian-based multilevel factorial analysis method for analyzing parameter uncertainty of hydrological model. *Journal of Hydrology* 553:750-762
- Lu T, Yamada T, and Yamada T (2016) Fundamental study of real-time short-term rainfall prediction system in watershed: Case study of Kinu Watershed in Japan. *Procedia Engineering* 154:88-93
- Mahdavi M (1999) *Applied hydrology*. Vol. 2, 2nd ed., Tehran University Press, Tehran, Iran, 410p (In Persian)
- Maskey S, Price RK (2004) Uncertainty issues in flood forecasting. In *Flood Events-Are We Prepared? Proceeding of the OSIRIS Workshop, Berlin*. 123-136
- Mostafazadeh R, Mirzaei S, Esmali Ouri A, and Zabihi M (2018) Sensitivity analysis of the flow hydrograph components due to changes in Clark's time-area model in Mohammad-Abad watershed, Gloestan Province. *Journal of Water and Soil Conservation* 49(1):91-99 (In Persian)
- Mousavi SJ, Abbaspour KC, Kamali B, Amini M, and Yang H (2012) Uncertainty-based automatic calibration of HEC-HMS model using sequential uncertainty fitting approach. *Journal of Hydroinformatics* 14(2):286-309
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models; part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290
- Raju P, Potty J, and Mohanty UC (2011) Sensitivity of physical parameterizations on prediction of tropical cyclone Nargis over the Bay of Bengal using WRF
- 9- Arakawa C-Grid
- 10- Runge-Kutta
- 11- Acoustic
- 12- Nash-Sutcliffe (NS)
- 13- Root Mean Square Error (RMSE)
- 14- Mean Absolute Percent Error (MAPE)
- 15- Percent of Total Volume Error (PTVE)
- 16- Index of Agreement (IOA)

## ۶- مراجع

Abrahart R, Kneale PE, and See LM (2004) *Neural networks for hydrological modeling*. CRC Press, 316p

Cannon F, Weihs RR, Diaz Isaac LI, and Delle Monache L (2019) An ensemble-based evaluation of WRF Precipitation forecast uncertainty in California watersheds. *AGUFM H31D-07*

Deb SK, Srivastava TP, and Kishtawal CM (2008) The WRF model performance for the simulation of heavy precipitating events over Ahmedabad during August 2006. *Journal of Earth System Science* 117(5):589-602

Eckhardt K, Breuer L, and Frede HG (2003) Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. *Journal of Hydrology* 273(1):164-176

Gilliam RC, Pleim JE (2010) Performance assessment of new land surface and planetary boundary layer physics in the WRF-ARW. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49(4):760-774

USACE (2018) *Hydrologic modeling system HEC-HMS: User manual and Applications Guide: Version 4.3*, US Army Corps of Engineers, Davis, California, 453p

USACE (2000) *Hydrologic modeling system HEC-HMS technical reference manual*. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, Davis, California, 158p

Hong S, Dudhia J, and Chen S (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Monthly Weather Review* 132(1):103-120

Kabir A, Bahremand AR (2013) Study uncertainty of parameters of rainfall-runoff model (WetSpa) by Monte Carlo method. *Journal of Water and Soil Conservation* 20(5):97-81 (In Persian)

Kahe MS, Javadi S, and Rozbahani A (2017) Uncertainty assessment of hydraulic conductivity parameter in MODFLOW model using Monte Carlo and RPEM methods (Case study: Ali Abad Plain of



- advanced Monte Carlo simulation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 50(9):1795-1814
- Willmott CJ, Robeson SM, and Matsuura K (2012) A refined index of model performance. *International Journal of Climatology* 32(13):2088-2094
- Yang B, Qian Y, Lin G, Leung R, Zhang Y, and Fu Q (2012) Some issues in uncertainty quantification and parameter tuning: a case study of convective parameterization scheme in the WRF regional climate model. *Atmospheric Chemistry & Physics* 12(5)
- Yuan X, Liang X, and Wood EF (2012) WRF ensemble downscaling seasonal forecasts of China winter precipitation during 1982–2008. *Climate Dynamics* 39(7-8):2041-2058
- Zeng X, Wu Z, Xiong S, Song S, Zheng Y, and Liu H (2011) Sensitivity of simulated short-range high-temperature weather to land surface schemes by WRF. *Science China Earth Sciences* 54(4):581-590
- model. *Meteorology and Atmospheric Physics* 113(3-4):125-137
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker DM, Duda MG, Huang XY, Wang W, and Powers JG (2008) A description of the advanced research WRF version 3 NCAR Technical Note NCAR. TN-475+ STR (Boulder, CO: NCAR)
- Srivastava PK, Islam T, Gupta M, Petropoulos G, and Dai Q (2015) WRF dynamical downscaling and bias correction schemes for NCEP estimated hydro-meteorological variables. *Water Resources Management* 29(7):2267-2284
- Straub TD, Melching CS, and Kocher KE (2000) Equations for estimating Clark unit-hydrograph parameters for small rural watersheds in Illinois. US Department of the Interior, US Geological Survey, Water-Resources Investigations Report 00-4184, 36p
- Wang ZH, Bou-Zeid E, Au SK, and Smith JA (2011) Analyzing the sensitivity of WRF's single-layer urban canopy model to parameter uncertainty using