



Evaluating the Efficiency of WRF-Hydro Model for Development of Flood Forecasting Systems (Case study: Kashkan Watershed)

S. Imani^{1*}, S.A.M. Hassanoli², A.Farkhnia³,
F.Javadi², and M.S. Najafi³

Abstract

Coupling of meteorological models with distributed hydrological models and reducing uncertainties related to downscaling is one of the major challenges in flood prediction. This study with the aim of predicting floods, demonstrates the possibility of coupling the WRF model with the WRF-Hydro model which is a hydrological-hydraulic, distributional, and physical model. For calibration, the Kashkan watershed was selected as the study area due to its high flooding potential. According to observational flood hydrograph in the study area, two severe flood events in three hydrometric stations were selected for calibration. Based on sensitivity analysis, the parameters of infiltration control, surface retention depth, surface roughness, and channel Manning's roughness are considered as the most effective parameters. The use of these parameters make it possible to calibrate the volume and shape of flood hydrograph to achieve accurate results. Afterward, step by step method was used for determining the optimal values of parameters identified in the sensitivity analysis for one event in Poldakhtar station, located at the terminus of the basin. In the next step, the calibrated model was evaluated based on the optimal parameters set for other stations and events. The evaluation of the WRF-Hydro with optimized parameters verify the capability of the WRF-Hydro for simulating flood in the steep slope watershed after calibration. Moreover, the main characteristics of hydrograph like volume, timing, and peak flow rate were simulated accurately. Therefore, the percentage error for flood volume and peak flow rate was less than 20% and for peak lag-time error was less than 5 hours. The calibration results from the WRF-Hydro model with demonstrate the potential utility of this coupled atmospheric-hydrological model in forecasting heavy rain-induced flash flooding. Findings from this work can be used in other catchments with similar characteristics.

Keywords: Flood Forecast, Coupled Model, Meteorological, Hydrological, WRF-Hydro, Kashkan River.

Received: November 2, 2020

Accepted: February 23, 2021

ارزیابی کارایی مدل WRF-Hydro در توسعه سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار سیلاب (مطالعه موردی حوضه آبریز کشکان)

سمیه ایمانی^{۱*}، سید امیرمحمد حسن‌لی^۲، اشکان فرخ‌نیا^۳،
فاطمه جوادی^۲ و محمد سعید نجفی^۳

چکیده

جفت شدن مناسب مدل‌های عددی هواشناسی با مدل‌های توزیعی هیدرولوژیکی و کاهش عدم قطعیت مربوط به ریزمقیاس‌نمایی آنها یکی از چالش‌های اساسی در پیش‌بینی دقیق سیلاب است. بنابراین در این تحقیق با هدف پیش‌بینی سیلاب، امکان جفت‌شدن مدل عددی هواشناسی WRF با مدل WRF-Hydro، که مدلی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی، توزیعی و فیزیکی است، بررسی می‌شود. به منظور واسنجی مدل، حوضه آبریز کشکان بدلیل پتانسیل بالای سیل‌خیزی بعنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شده است. باتوجه به داده‌های هیدروگراف سیل مشاهداتی در محدوده مطالعاتی، دو واقعه سیلابی شدید در سه ایستگاه هیدرومتری برای واسنجی مدل WRF-Hydro انتخاب گردید. بر اساس تحلیل حساسیت مدل، پارامترهای کنترل نفوذ، عمق نگهداشت آب سطحی، ضریب زبری سطحی و ضریب زبری کانال بعنوان تأثیرگذارترین پارامترها در شبیه‌سازی جریان شناسایی شدند. استفاده از این پارامترها در فرآیند واسنجی، قابلیت واسنجی حجم و شکل هیدروگراف سیلاب را برای حصول به نتایج دقیق‌تر امکانپذیر خواهد ساخت. سپس با استفاده از روش گام به گام، مقادیر بهینه پارامترهای شناسایی شده در تحلیل حساسیت برای یکی از وقایع در ایستگاه هیدرومتری پلدختار در خروجی حوضه تعیین گردید. در گام بعدی مدل بر اساس پارامترهای بهینه تعیین شده برای سایر ایستگاه‌ها و وقایع سیلابی ارزیابی گردید. نتایج ارزیابی WRF-Hydro حاکی از قابلیت مناسب مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب و ویژگی‌های اصلی آن از جمله حجم، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج در حوضه‌های آبریز با شیب بالا پس از واسنجی مدل دارد. بطوریکه درصد خطای حجم سیلاب و دبی اوج شبیه‌سازی به مشاهداتی کمتر از ۲۰٪ و زمان رسیدن به اوج سیلاب دارای خطایی کمتر از ۵ ساعت است. نتایج حاصل از واسنجی مدل WRF-Hydro کارایی این مدل جوی-هیدرولوژیکی را در پیش‌بینی سیلاب ناشی از بارش‌های حدی نشان می‌دهد. یافته‌های حاصل از این مطالعه می‌تواند جهت تعمیم در سایر حوضه‌های آبریز با ویژگی‌های مشابه مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: پیش‌بینی سیلاب، مدل جفت‌شده، هواشناسی، هیدرولوژیکی، WRF-Hydro، رودخانه کشکان.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۸/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۱۲/۵

1- Research Fellow, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran and PhD candidate, Collage of Engineering, School of Environment, University of Tehran, Iran. Email: s.imani@ut.ac.ir

2- Research Fellow, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor, Water Research Institute, Ministry of Energy, Tehran, Iran. Email: ashkan_farkhnia@yahoo.com, m.s.najafi1367@gmail.com

*- Corresponding Author

۱- کارشناس پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران و دانشجوی دکتری، گروه مهندسی محیط‌زیست، دانشکده محیط‌زیست، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

۲- کارشناس پژوهشی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

۳- عضو هیئت علمی، مؤسسه تحقیقات آب، وزارت نیرو، تهران، ایران.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

۱- مقدمه

Xinanjiang (Zhao, 1977) تاکنون ارائه شده است. مدل‌های هیدرولوژیکی یکپارچه کل حوضه آبخیز را به عنوان یک واحد هیدرولوژیکی و بصورت متوسط در نظر می‌گیرند که عدم قطعیت مدل را در پیش‌بینی سیلاب به‌خصوص در حوضه‌های بزرگ افزایش می‌دهند چراکه توزیع بارش در حوضه‌های آبریز بزرگ بسیار نامتقارن می‌باشد. بدین منظور و با هدف بهبود نتایج مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی توسعه یافته است (Refsgaard, 1997). در این مدل‌ها حوضه آبریز به شبکه‌های کوچکتری با ویژگی‌های متمایز تقسیم می‌شود که قابلیت اتصال به نتایج مدل‌های عددی پیش‌بینی آب‌وهوا را امکان‌پذیر می‌سازد. مدل‌سازی توزیعی در حوضه‌هایی که فاقد آمار جریان مناسب می‌باشند نیز بسیار پرکاربرد است. اساس این مدل‌ها، بر فیزیک جریان متکی بوده و شامل مدل‌سازی کلیه مؤلفه‌های مؤثر در ایجاد جریان در حوضه می‌باشند (Chen et al., 2013). اولین مدل هیدرولوژیکی توزیعی توسعه یافته، مدل SHE می‌باشد (Abott et al., 1986). در حال حاضر، مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی بسیاری توسعه یافته است که تعدادی از آنها برای استفاده در سامانه‌های پیش‌بینی سیلاب توصیه شده است. تعدادی از این مدل‌های پیشنهادی بر اساس مطالعات مختلف شامل مدل‌های SHE (Abott et al., 1986)، VIC (Liang et al., 1994)، WetSpa (Wang et al., 1996)، WEHYT (Kouwen, 1988)، GSSHA (Peng et al., 2008)، TOPKAPI (al., 2004)، WRF-Hydro (Downer and Ogden, 2004) و مدل (Gochis et al., 2015) می‌باشد.

زمان محاسبه مورد نیاز برای اجرای مدل هیدرولوژیکی توزیعی با توجه به محاسبه روابط در مقیاس شبکه‌های واحد محاسباتی، بسیار بالا است. بدین منظور اجرای عملیاتی این مدل‌ها در قالب سامانه‌های پیش‌بینی سیلاب، به‌ویژه در حوضه‌های بزرگ با محدودیت مواجه است. امروزه با توسعه الگوریتم‌های محاسباتی موازی و استقرار آنها بر روی سیستم‌های کامپیوتری محاسبات سریع (HPC^2)، محدودیت زمان محاسباتی بالا در برخی از این مدل‌ها رفع گردیده است (Madsen, 2003). توسعه روش‌های بهینه‌سازی خودکار پارامترهای مهم در مدل هیدرولوژیکی توزیعی نیز با بهینه کردن پارامترهای تأثیرگذار در سیلاب، عملکرد این مدل‌ها را بهبود بخشیده است (Chen et al., 2016). با این پیشرفت‌ها، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی عملیاتی برای پیش‌بینی سیلاب در حوضه‌های آبریز بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

به‌منظور پیش‌بینی و کاهش خطر سیلاب در رودخانه سیل خیز Rhone سوئیس، مدل عددی تحت عنوان MINERVE با استفاده از مفاهیم

سیل یکی از متداول‌ترین بلایای طبیعی در جهان است که هر ساله خسارات مالی و جانی فراوانی را به همراه دارد (Frasera et al., 2010). کشور ایران نیز اگر چه به عنوان یک کشور دارای اقلیم خشک و نیمه خشک شناخته می‌شود، اما همواره شاهد وقوع سیلاب‌های مخرب بوده است بطوریکه که برخی از آن‌ها به دلیل خسارات سنگین انسانی و پیامدهای فاجعه‌بار حادث شده، در تاریخ نیز ثبت شده‌اند. با توجه به این تهدیدها، پیش‌بینی قابل اعتماد از افزایش دبی و تراز رودخانه‌ها قبل از وقوع شرایط سیلابی بسیار مهم است.

امروزه در بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه، استفاده از سیستم‌های هشدار سیلاب با هدف ارائه هشدار به‌موقع مورد توجه قرار گرفته و کارایی خود را در کاهش قابل ملاحظه خسارات مستقیم ناشی از سیلاب اثبات کرده است (Handmer et al., 1988; Meyer et al., 2005; Thieken et al., 2012; Molinari et al., 2013). این روش‌ها در کنار کارایی و عملکرد بالا، هزینه بسیار پایینی داشته و کاملاً سازگار با محیط‌زیست می‌باشند. همچنین در مقایسه با روش‌های سازهای و غیرسازهای مقابله با سیلاب، مشکلات مقبولیت طرح بین جوامع محلی واقع در سیلاب‌دشت‌ها را نداشته و از نظر اجرایی و کارایی از قابلیت بالاتری نسبت به سایر روش‌ها برخوردار هستند.

بخش پیش‌بینی سیلاب در یک سیستم هشدار سیل از نقش و جایگاه کلیدی برخوردار است. برای آنکه بتوان پیش از وقوع سیلاب هشدار داده و اقدامات لازم و مؤثر برای مقابله با آن انجام داد، باید زمان پیش‌هشدار به اندازه کافی طولانی باشد (Norouzi et al., 2009). پیش‌بینی معمولاً در دو فاز پیش‌بینی هواشناسی و هیدرولوژیکی انجام می‌شود چرا که بیشتر مدل‌های هیدرولوژیکی با بکارگیری مدل‌های پیش‌بینی عددی هواشناسی میان‌مدت و کوتاه‌مدت، آمارهای هواشناسی و مشاهدات ایستگاهی، قادر به برآورد و پیش‌بینی سیلاب خواهند بود (Yucel et al., 2015). در این بین استفاده از مدل‌های پیش‌بینی عددی آب‌وهوا (NWP^1) در پیش‌بینی بارش می‌تواند زمان پیش‌هشدار را به حداکثر زمان ممکن برساند (Anderson et al., 2002). بر اساس خروجی این مدل‌ها، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی مختلفی امکان‌پذیر است (Saedi et al., 2020).

اولین مدل‌های هیدرولوژیکی بر مبنای هیدروگراف واحد شرمین (Sherman, 1932) توسعه یافته‌اند که در دسته مدل‌های یکپارچه قرار می‌گیرند. مدل‌های هیدرولوژیکی یکپارچه بسیاری از جمله مدل Sacramento (Burnash, 1995)، NAM (DHI, 2009) و

Senatore et al. (2015) مقایسه شبیه‌سازی بارش و رواناب حاصل از کوپل یک طرفه و دو طرفه WRF/WRF-Hydro را انجام دادند. نتایج نشان داد که کوپل دو طرفه مدل‌ها می‌تواند وقایع همرفتی را با دقت بهتری تخمین بزند (Senatore et al., 2015). Ryu et al. (2017) از مدل WRF-Hydro برای پیش‌بینی سیل‌های برق‌آسا در کره استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل کوپل‌شده می‌تواند با موفقیت در پیش‌بینی سیلاب در شبه‌جزیره کره استفاده شود (Ryu et al., 2017). نتایج حاصل از کوپل دو طرفه WRF/WRF-Hydro با رواناب مشاهده شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک اسرائیل و اردن که توسط Silver et al. (2017) انجام شد حاکی از پیش‌بینی نزدیک به واقعی رواناب خروجی از مدل WRF-Hydro داشت (Silver et al., 2017).

با توجه به ساختار و پیچیدگی این مدل نسبت به سایر مدل‌های توزیعی، هدف اصلی این مقاله پیاده‌سازی و اجرای مدل WRF-Hydro در ایران و بررسی کارایی آن بر اساس اطلاعات و داده‌های در دسترس است. بدین منظور حوضه آبریز کشکان بدلیل پتانسیل بالای سیل‌خیزی جهت ارزیابی و واسنجی مدل WRF-Hydro در پیش‌بینی جریان انتخاب می‌گردد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- محدوده مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

حوضه آبریز رودخانه کشکان با وسعت ۹۵۲۴ کیلومتر مربع در ناحیه جنوب‌غربی ایران واقع شده است. این حوضه از زیرحوضه‌های درجه سه حوضه آبریز کرخه بوده و ۱۸/۵ درصد از مساحت آن را شامل می‌شود. از نظر موقعیت جغرافیایی این حوضه در محدوده ۱۲° ۴۷' تا ۵۹° ۴۸' شرقی و ۸° ۳۳' تا ۲° ۳۴' شمالی در بخش میانی کوه‌های زاگرس قرار دارد. این حوضه از لحاظ تقسیمات سیاسی در استان لرستان قرار گرفته است و ۳۳ درصد از مساحت کل استان را بخود اختصاص داده است (شکل ۱).

از رودخانه‌های مهم حوضه آبریز کشکان می‌توان به رودخانه‌های کشکان، هررود، دواب‌الشر، خرم‌آباد، چولهول و مادیان‌رود اشاره کرد که در این بین رودخانه کشکان سیل‌خیزترین رودخانه حوضه و استان لرستان نیز می‌باشد. رژیم رودخانه کشکان بارانی و پربرفی با سهم قابل توجهی از جریان زیرزمینی به‌وسیله چشمه‌های کارستی است. حداکثر بارندگی منطقه در فصل زمستان انجام گرفته و در تابستان به ندرت بارندگی قابل ملاحظه‌ای اتفاق می‌افتد.

فیزیکی و قطعی توسعه یافت. این مدل پس از مدل‌سازی فرآیند بارش-رواناب در کل حوضه، از چندین روش هیدرولیکی برای روندیابی جریان در رودخانه استفاده می‌کند. همچنین مدل قادر به بررسی تأثیر طرح‌های برقابی و مخازن و سد‌های ذخیره نیز می‌باشد. شبیه‌سازی‌های انجام شده تأثیرات قابل توجه مخازن بر روی پیک سیلاب را به‌درستی نشان داد که حاکی از پتانسیل بالای این مدل در مدیریت سیلاب و مخازن با استفاده از قوانین بهره‌برداری مناسب می‌باشد. MINERVE در حال حاضر بهبود یافته و به یک ابزار پیش‌بینی سیلاب در سوئیس تبدیل شده است که با دریافت پیش‌بینی بارش، باد و دما ۱۲ ساعته تا سه روز جهت پیش‌بینی و اعلام هشدار اجرا می‌شود (Jordan et al., 2004). در حوضه سیل‌خیز Guadalhorce کشور اسپانیا که با ضعف در اندازه‌گیری داده‌ها نیز مواجه هست، سیستم هشدار سیل (GFWS³) بعنوان مکمل در کنار سیستم هشدار سیل اروپا (EFAS⁴) توسعه یافته است. این سامانه از یک مدل هیدرولوژیکی توزیعی استفاده می‌کند که کاملاً سازگار با ورودی‌های بارش توزیعی و رادار می‌باشد. به دلیل کمبود در داده‌های مشاهداتی دبی، پارامترهای مدل ابتدا برای یک حوضه کوچک‌تر واسنجی شده و در نهایت نتایج به کل حوضه تعمیم یافته است (Versini et al., 2014).

با این وجود تاکنون در ایران سامانه هشدار سیلاب عملیاتی که در آن مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی بصورت جفت‌شده با مدل‌های عددی پیش‌بینی آب‌وهوا باشد، وجود ندارد. مؤسسه تحقیقات آب با هدف بهبود مدیریت سیلاب در کشور و عمل به اهداف نظامنامه مدیریت سیلاب وزارت نیرو، اقدام به پیاده‌سازی سامانه ملی پیش‌بینی و هشدار سیلاب کرده است. در این سامانه مدل هیدرولوژیکی توزیعی WRF-Hydro و GSSHA⁵ بر اساس خروجی مؤلفه‌های هواشناسی مدل WRF⁶ عملیاتی (۴ بار اجرا در روز) اجرا و پیش‌بینی جریان تا ۴ روز آتی ارائه می‌شود.

مدل WRF-Hydro یکی از افزونه‌های رایگان مدل WRF می‌باشد که در آن، مشکل عدم تطابق رزولوشن مدل‌های جوی با مدل‌های هیدرولوژیکی برطرف شده است. WRF-Hydro سیستم شبیه‌سازی هیدرولوژیکی سه بعدی سطح زمین، مدلی توزیعی، فیزیکی و چندمقیاسی و چند پارامتره است. این مدل در حال حاضر بعنوان مدل ملی آب (NWM⁷) اصلی ایالات متحده آمریکا به صورت عملیاتی در حال بهره‌برداری است (Gochis et al., 2015). در طول توسعه این مدل، مطالعات انجام شده با اهداف مختلف عملیاتی و تحقیقاتی، کارایی و قابلیت این سیستم مدل‌سازی را تأیید کرده است. بطور مثال

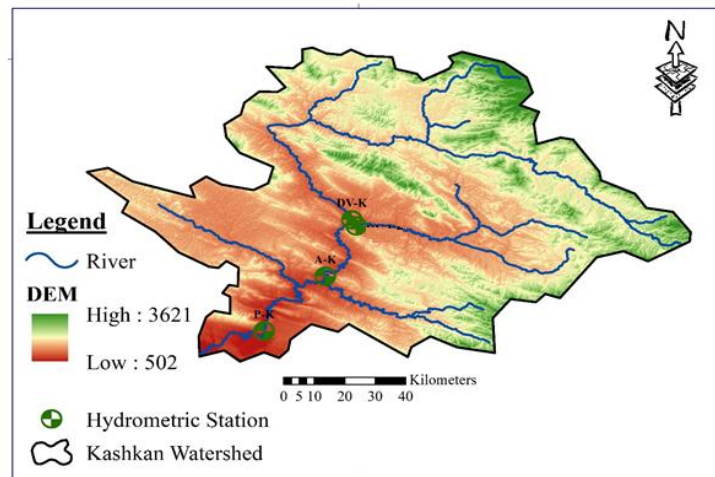


Fig. 1- Kashkan watershed with DEM, rivers and the location of Hydrometric stations
 شکل ۱- حوضه آبریز کشکان به همراه نقشه Dem، رودخانه‌ها و موقعیت ایستگاه هیدرومتری

از این اطلاعات، پوشش مکانی نامناسب ایستگاه‌های بارانشنجی، تفکیک زمانی نامناسب این اطلاعات، نواقص آماری قابل ملاحظه خصوصاً در وقایع بارش حداکثری و همچنین ماهیت اندازه‌گیری نقطه‌ای بارش در آن‌ها می‌باشد. درحالی‌که با استفاده از داده‌های بازتخلیل و اجرای مدل‌های عددی هواشناسی، داده‌های شبکه‌بندی شده منظم با تفکیک زمانی ساعتی و دوره آماری حداقل سی ساله را در اختیار ارائه می‌نمایند. هر چند قدرت تفکیک مکانی این اطلاعات معمولاً پایین‌تر از ۲۵ کیلومتر است، اما با توجه به تجارب موجود در سایر کشورهای جهان در توسعه سامانه‌های هشدار سیلاب مبتنی بر پیش‌بینی‌های هواشناسی، این داده‌ها بهترین گزینه‌های موجود برای استفاده عملیاتی در واسنجی مدل‌های بارش-رواناب بزرگ مقیاس می‌باشند (Flesch and Reuter, 2012; Givati et al., 2016; Hong and Lee, 2009; Tian et al., 2019; Yucel et al., 2015). بدین منظور برای مدلسازی بارش با استفاده از مدل WRF، محدوده مطالعاتی از دو شبکه تو در تو (لانه‌ای) با فواصل شبکه‌ای افقی ۲۵ و ۸/۳۳ کیلومتر در راستای افقی تشکیل شده است (شکل ۲).

بر اساس آمار ثبت شده از سال ۱۳۳۴ تا ۱۳۸۴ حدود ۸۰ سیلاب بزرگ درحوضه کرخه به‌وقوع پیوسته است که اکثر آنها در ماه‌های مرطوب سال یعنی آبان تا اردیبهشت اتفاق افتاده است (Sharifi et al., 2018). این سیلاب‌ها علیرغم تعداد کمتر نسبت به حوضه‌هایی مانند دز و کارون، حجم آورد بسیار بیشتری داشته و سالانه سبب خسارت قابل توجهی در این حوضه می‌گردد. در این بین برخی از سیلاب‌های به‌وقوع پیوسته در حوضه آبریز کشکان که دارای حجم آورد بیشتری می‌باشند، بعنوان وقایع با بارندگی و سیلاب شدید در منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. پس از انتخاب وقایع سیلابی، به منظور واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی تعدادی از ایستگاه‌های حوضه با داده‌های مشاهداتی سیلاب مناسب نیز تعیین گردید. مشخصات این دو واقعه به‌همراه ایستگاه‌های منتخب در جدول ۱ آمده است.

از اطلاعات مهم دیگر در شبیه‌سازی سیلاب، داده‌های هواشناسی می‌باشد که در این مطالعه از داده‌های باز تحلیل NCEP/FNL⁸ برای اجرای مدل هواشناسی WRF استفاده شده است. این مدل برای استفاده در شبیه‌سازی و پیش‌بینی گستره وسیعی از پدیده‌های جوی از مقیاس چند متر تا چند صد هزار کیلومتر مناسب است. دلیل استفاده

Table 1- Selected flood events in Kashkan watershed
 جدول ۱- وقایع سیلابی منتخب در حوضه آبریز کشکان

Station	Long	Lat	Elevation	Event #1	Flood duration	Peak (m ³ /s)	Event #2	Peak (m ³ /s)
Poldokhtar-Kashkan (P-K)	47.72	33.17	681.7	2017/03/22	Start	717 (#1)	2016/04/12	2124.9 (#2)
				2017/03/27	End		2016/04/18	
Afarineh-Kashkan (A-K)	47.90	33.33	803.7	2017/03/23	Start	572 (#1)	2016/04/12	1716.9 (#2)
				2017/03/26	End		2016/04/18	
DuabVisan-Kashkan (DV-K)	-	-	-	-	Start	-	2016/04/12	1075.9 (#2)
				-	End		2016/04/18	

۲-۲- مدل WRF-Hydro

WRF-Hydro از افزونه‌های رایگان مدل WRF است که مدل هیدرولوژیکی-هیدرولیکی توزیعی، فیزیکی و چند مقیاسی است که با هدف پیش‌بینی سیلاب بر اساس ورودی‌های بارش مدل WRF استفاده می‌شود. این مدل در سال ۲۰۱۳ با هدف تسهیل جفت‌کردن مدل‌های هیدرولوژیکی با مدل‌های جوی و سطح‌زمین توسعه یافته است. لذا WRF-Hydro یک ساختار مدل‌سازی هیدرولوژیکی مستقل نیست بلکه سیستم جفت‌شده از مدل‌های هیدرولوژیکی با مدل‌های جوی است. امروزه در مناطق مختلف دنیا از جمله آمریکا، ترکیه، اردن، اسرائیل، ایتالیا، و آفریقا توسط محققین استفاده و ارزیابی شده است (Givati et al., 2016; Lahmers et al., 2019; Naabil et al., 2017; Senatore et al., 2015; Silver et al., 2017; Yucel et al., 2015). در این بین نسخه‌های مختلف این مدل بصورت عملیاتی نیز در اسرائیل و آمریکا اجرا شده است که در آنها هشدارهای سیلاب بر اساس نتایج روزانه مدل در سطح کشوری و کلان ارائه می‌گردد.

WRF-Hydro فیزیک‌های مختلفی را شبیه‌سازی می‌کند که بسته به انتخاب هریک، مدل دارای قابلیت‌های مدل‌سازی یک‌بعدی سطح زمین (Noah, Noah-MP⁹)، جریان سطحی، جریان زیرسطحی اشباع، روندیابی در شبکه جریان، جریان پایه و روندیابی در مخزن/دریاچه می‌باشد. بسته به انتخاب و فعال کردن هریک از این ماژول‌ها در فرآیند مدل‌سازی، خروجی‌های متناسب و مهم آن در مدل شامل تبخیر و تعرق، رطوبت خاک و ذوب برف از مدل سطح زمین و عمق آب، رطوبت خاک، عمق آب زیرزمینی و مقدار جریان ورودی به شبکه جریان از مدل روندیابی سطح زمین و سرعت، مقدار جریان و عمق آب در رودخانه به همراه مقدار آب ورودی و خروجی به مخزن/دریاچه از مدل روندیابی جریان و مخزن می‌باشد. ساختار مدل WRF-Hydro در شکل ۴ نمایش داده شده است.

این مدل با استفاده از روش‌های مفهومی و فیزیکی قابلیت مدل‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی سطح زمین با دقت مکانی بالا (کمتر از یک کیلومتر) دارد. همانطور که در شکل ۳ نیز نشان داده شده است، اجزای اصلی مدل‌سازی فیزیکی مدل شامل ماژول مدل‌سازی سطح زمین (LSM¹⁰)، روندیابی جریان سطحی، جریان زیرسطحی، روندیابی جریان در رودخانه، روندیابی مخزن و ماژول جریان پایه است. بسته به فعال بودن و انتخاب روش خاص در هر یک از این بخش‌ها، داده‌های ورودی جوی و پارامترهای مورد نیاز ورودی به مدل متفاوت خواهد بود. در نسخه مورد استفاده در این مطالعه (5.0.3) امکان انتخاب هر دو مدل سطح زمین Noah-MP و Noah وجود دارد. پیکربندی LSM

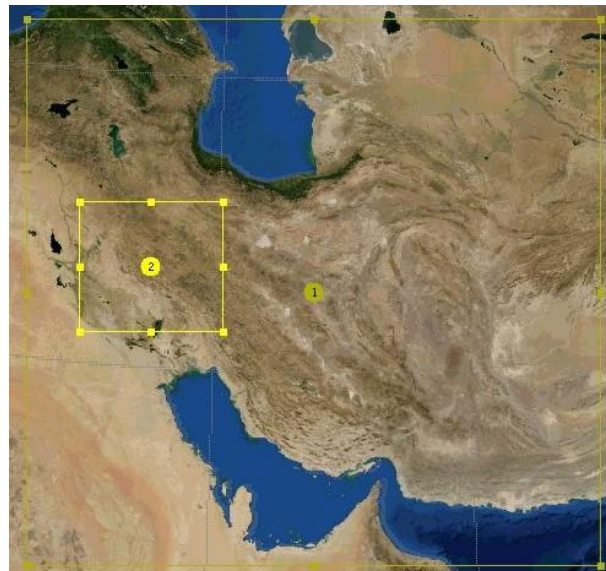


Fig. 2- The study area with nested configuration of WRF domains at 25 km and 8.3 km resolutions

شکل ۲- منطقه مورد مطالعه با پیکربندی تو در تو دامنه‌های WRF در تفکیک مکانی ۲۵ و ۸/۳ کیلومتر

داده‌های باز تحلیل NCEP/FNL با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه به عنوان داده‌های مورد نیاز برای تامین شرایط اولیه و شرایط مرزی مدل استفاده گردید. لازم به ذکر است که گام زمانی داده‌های مذکور ۶ ساعت می‌باشد. پیکره‌بندی مدل WRF به همراه جزئیات مدل‌سازی آن برای حوضه آبریز کشکان مطابق جدول ۲ می‌باشد. این پیکره‌بندی پس از بررسی‌های انجام شده درخصوص ارزیابی عملکرد مدل WRF و پیکره‌بندی بهینه آن برای بارش‌های شدید انتخاب شده است (Imani et al., 2019). بارش WRF در مقابل بارش مشاهداتی تجمعی برای وقایع منتخب در شکل ۳ آمده است.

Table 2- The experimental details of the WRF for Kashkan watershed

جدول ۲- مشخصات مدل WRF به همراه جزئیات مدل‌سازی آن برای حوضه آبریز کشکان

Subject	Chosen Option
Driving data	NCEP/FNL
Horizontal resolution	25 km, 8.3 km
Horizontal grid number	408 × 504
Projection resolution	Mercator
Simulation events	Event #1, Event #2
WRF output interval	60 min
Cumulus convection	Kain-Fritsch
Microphysics scheme	Ferrier
Planetary boundary layer	YSU
Longwave radiation	Goddard
Shortwave radiation	Goddard
Land surface scheme	Noah LSM
Land use	MODIS
Surface layer	Monin Obukhov

در هر گام زمانی که داده‌های پیش‌بینی WRF در دسترس باشد، مقدار رطوبت در هر پیکسل مدل سطح زمین Noah (منطبق بر پیکسل ۸,۳ کیلومتری مدل WRF) به شبکه مسیریابی با وضوح بالا (یک کیلومتری) با استفاده از یک شبکه فرعی مکانی و روش وزن‌دهی (Gochis and Chen, 2003) تفکیک شده و سپس به ماژول روندیابی منتقل می‌شود. پارامترهای ورودی مربوطه از Noah به ماژول روندیابی شامل حداکثر رطوبت خاک برای هر کلاس خاک، مقدار آب مازاد بر نفوذ، هدایت هیدرولیکی اشباع جانبی برای هر کلاس خاک، میزان رطوبت خاک در هر لایه می‌باشد. علاوه بر این مدل جهت روندیابی دقیق جریان سطحی و زیرسطحی و روندیابی در کانال به اطلاعاتی از جمله توپوگرافی با وضوح بالا و شبکه جریان نیاز دارد.

در تقسیم انرژی سطح و آب بسیار مهم است بنابراین در این مطالعه از مدل Noah چندپارامتره و پیکره‌بندی پیش‌فرض Noah-MP استفاده شد. مانند تمامی LSM‌های موجود در دنیا، پارامترهای سطح زمین Noah-MP به چند متغیر اجباری^{۱۱} هواشناسی نیاز دارند که شامل دمای سطحی، رطوبت ویژه، سرعت باد سطحی، فشار سطحی، تابش طول موج کوتاه و بلند و شدت بارش می‌باشد. این مدل به دو صورت جفت‌شده با یک مدل جوی (کوپل دو طرفه) و مستقل^{۱۲} (کوپل یک طرفه) اجرا می‌شود. در صورت جفت کامل این مدل با WRF داده‌های مورد نیاز هواشناسی بصورت مستقیم از این مدل جوی فراخوانی خواهد شد.

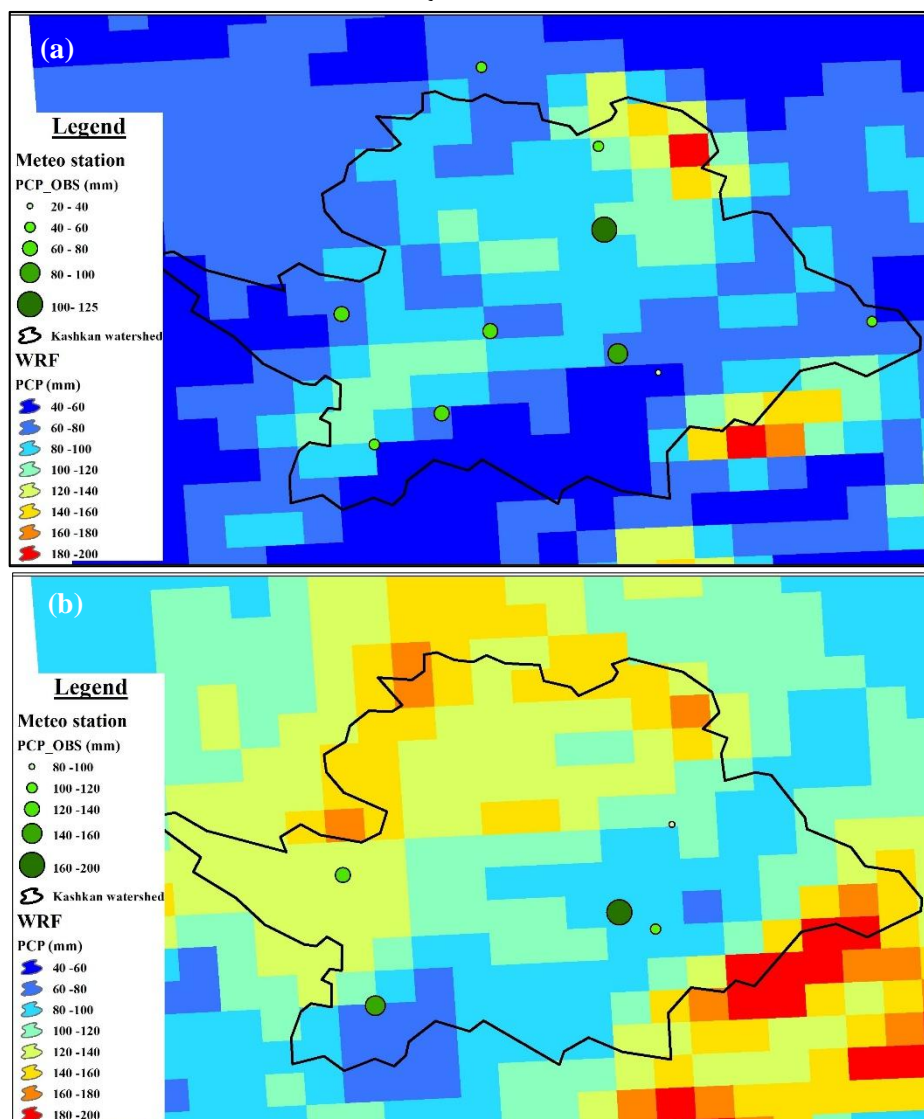


Fig. 3- Cumulative precipitation in mm from observation and WRF model for Event #1 on 22-27 March 2017 (a) and on 12-18 April 2016 (b)

شکل ۳- بارش تجمعی و WRF مشاهداتی برای واقعه شماره ۱ در تاریخ ۲۷-۲۲ مارس ۲۰۱۷ (a) و واقعه شماره ۲ در تاریخ ۱۸-۱۲ آوریل ۲۰۱۶ (b)

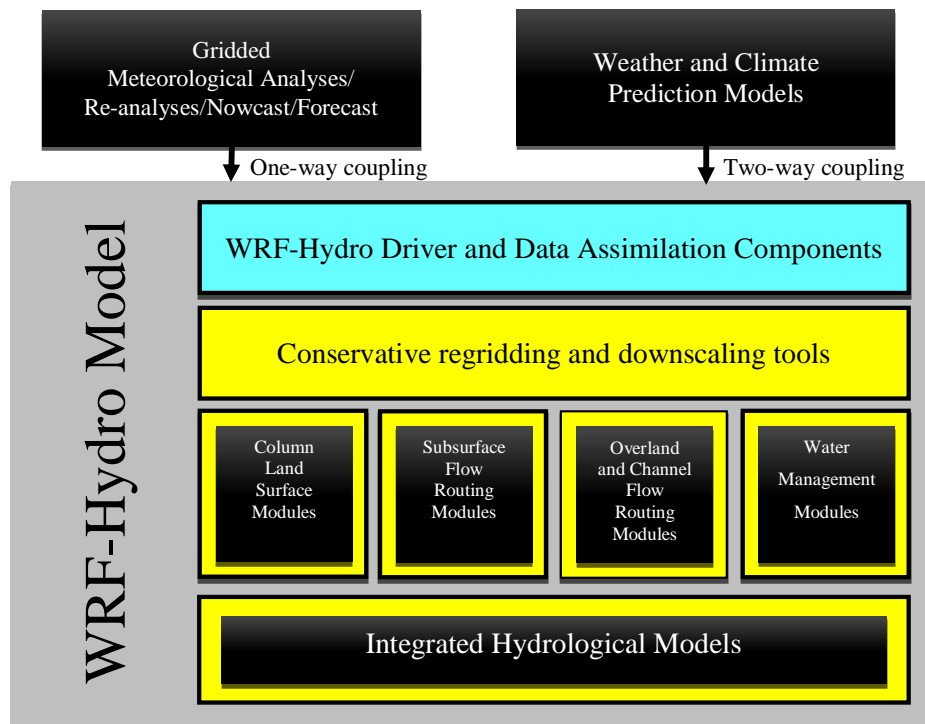


Fig. 4- Conceptual schematic of the WRF-Hydro and model components (Gochis et al., 2015)
 شکل ۴- شماتیک مفهومی ساختار و اجزای اصلی مدل WRF-Hydro (Gochis et al., 2015)

۲-۳- واسنجی مدل WRF-Hydro

جهت دستیابی به نتایج مورد قبول، WRF-Hydro هم مانند هر مدل دیگری نیازمند واسنجی بر اساس داده‌های مشاهداتی می‌باشد. این مدل شامل طیف وسیعی از پارامترها و ورودی‌ها است که تأثیر مستقیمی بر عملکرد و خروجی مدل دارند. در این مطالعه پس از آنالیز حساسیت مدل و ترکیب پارامترهای حساس با یکدیگر، واسنجی مدل و یافتن ترکیب بهینه پارامترها انجام خواهد شد. بدلیل زمان محاسباتی بالای مورد نیاز جهت واسنجی خودکار، واسنجی دستی گام به گام (Hogue et al., 2000) ضمن در نظر گرفتن مفاهیم هیدرولوژیکی در روش کالیبراسیون مورد استفاده قرار گرفت (Yilmaz et al., 2008). در این روش هنگامی که یک پارامتر واسنجی شده می‌شود مقدار آن در مرحله بعدی ثابت می‌ماند.

برای اجرای اولیه و واسنجی مدل WRF-Hydro در حالت مستقل از WRF، دو فایل جهت تنظیمات اجرای مدل سطح زمین (namelist.hrldas) و مدل‌سازی هیدرولوژیکی و روندیابی (hydro.namelist) نیازمند است. همچنین فایل‌های جدولی GENPARM.TBL جهت تنظیم مقادیر پیش‌فرض و همگن خصوصیات هیدرولوژیکی خاک، HYDRO.TBL جهت تنظیم مقادیر مرتبط با روندیابی جریان‌های جانبی مختص کلاس‌های کاربری و

مدل WRF-Hydro برای سیستم عامل‌های مبتنی بر Linux و سیستم‌های محاسباتی با کارایی بالا ساخته شده است. محدوده‌های کوچک (به عنوان مثال ۱۶ کیلومتر مربع) را می‌توان بر روی سیستم عامل ویندوز نیز اجرا کرد. فرمت‌های ورودی و خروجی در این مدل بصورت flat ASCII و netCDF است. بدین منظور netCDF یکی از نیازمندی‌های ضروری جهت اجرای مدل است. جزییات مربوط به پیکره‌بندی مدل WRF-Hydro برای حوضه آبریز کشکان در جدول ۳ آمده است.

Table 3- Specific details relevant to the WRF-Hydro
 جدول ۳- جزییات مدل‌سازی مدل WRF-Hydro در منطقه

مطالعاتی	
Subject	Chosen Option
NWP model	WRF
Land surface model	Noah MP
Subsurface flow	Boussinesq shallow saturated flow
Overland flow	Diffusive wave
Base flow	Pass-through
Channel routing	Diffusive wave
WRF-Hydro output interval	60 min
Routing grid space	1024 m
Integer divisor (aggregation factor)	8

هیدروگراف ساعتی سیلاب مطابق جدول ۱ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این مطالعه داده‌های دبی از بانک اطلاعاتی هیدروگراف سیلاب شرکت مدیریت منابع آب استخراج شده است. جهت شروع فرآیند واسنجی ابتدا پارامترهای تأثیرگذار بر جریان شناسایی شده است که در ادامه به تفصیل بیان می‌شود.

۳-۱- تحلیل حساسیت

مدل WRF-Hydro دارای پارامترهای هیدرولوژیکی پیش‌فرض بسیاری است که بسته به منطقه مورد مطالعه و رفتار هیدرولوژیکی مختص آن ممکن است تنظیم یا واسنجی شوند. با توجه به ویژگی مورفولوژی و اقلیم در هر منطقه، مقادیر پیش‌فرض پارامترها اغلب قابل استفاده نبوده و نیازمند تغییر پارامترهای کلیدی که تأثیر زیادی بر نتایج شبیه‌سازی دارند، می‌باشد. بنابراین باید پارامترها در بازه مناسب بررسی شده و یک مجموعه بهینه از پارامترها برای شبیه‌سازی مناسب منطقه مورد مطالعه انتخاب گردد. در مدل WRF-Hydro نیز مانند سایر مدل‌های هیدرولوژیکی جهت شبیه‌سازی سیلاب باید پارامترهایی که بر حجم و شکل هیدروگراف تأثیر دارند، مورد بررسی قرار گیرد (Yucel et al., 2015). بنابراین فرآیند واسنجی و آنالیز حساسیت مدل WRF-Hydro برای منطقه مطالعاتی به دو بخش کلی تقسیم گردید که شامل پارامترهای کنترل کننده حجم کل آب در کانال و شکل هیدروگراف می‌باشند. مشخصات پارامترهای تأثیرگذار بر اساس مطالعات پیشین (Liu et al., 2020; Naabil et al., 2017; Senatore et al., 2015; Yucel et al., 2015) در جدول ۴ آمده است.

به جز چهار این پارامترها که تأثیر عمده‌ای بر حجم کل رواناب و شکل هیدروگراف جریان دارند، پارامترهای دیگر به دلیل کمبود داده‌های مشاهداتی بر روی مقادیر پیش‌فرض مدل تنظیم می‌شوند.

خاک، CHANPARAM.TBL جهت تنظیم پارامترهای روندیابی جریان در کانال به روش موج پخشیدگی^{۱۳} بر اساس رده رودخانه‌ای و SOILPARAM.TBL شامل پارامترهای خاک برای کلاس‌های استاندارد خاک می‌باشد. در غیاب داده‌های ورودی مکانی شبکه‌بندی برای پارامترهای موجود در این جداول، مدل به‌سادگی مقادیر واحد را از این پرونده‌ها به طور همگن برای کل دامنه مدل‌سازی اعمال می‌کند.

در این مطالعه از نسخه مکانی شبکه‌بندی شده مدل با فعال کردن SPATIAL_SOIL در زمان کامپایل مدل استفاده شده است. بدین منظور در فرآیند واسنجی تغییرات در فایل جدولی CHANPARAM.TBL و بجای HYDRO.TBL، SOILPARAM.TBL و GENPARAM.TBL از فایل‌های مکانی hydro2dtbl.nc و Soil_properties.nc اعمال خواهد شد. علاوه بر این، فایل مکانی شبکه‌بندی شده geo_em.d0* که از آن فایل‌های روندیابی سطح زمین (FullDom_hires.nc) و روندیابی کانال استخراج می‌شود نیز نیازمند اصلاح و تغییرات جهت رسیدن به ساختار بهینه هستند. پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق در جدول ۴ آمده است. این پارامترها مختص اجرای مکانی مدل بوده و تغییر در پارامترهای گلوبال موجود در فایل‌های جدولی در این نوع از مدل‌سازی اعمال نخواهد شد.

پس از اجرای مدل، واسنجی پارامترها برای واقعه شماره ۲ در ایستگاه پلدختر-کشکان مورد بررسی قرار خواهد گرفت. سپس جهت اعتبارسنجی مدل واسنجی شده، مقادیر بهینه پارامترهای تأثیرگذار در شبیه‌سازی هیدروگراف جریان در سایر ایستگاه‌های واقعه اول و دوم ارزیابی خواهد شد.

۳- نتایج و بحث

به منظور بررسی جریان در حوضه آبریز کشکان، سری زمانی بارش و دبی مشاهده شده برای دو سیلاب تاریخی در ایستگاه‌های دارای

Table 4- The sensitive parameterizations of WRF-Hydro model for spatial calibration
جدول ۴- پارامترهای تأثیرگذار مدل WRF-Hydro برای واسنجی مکانی مدل

Name	Description	Units	Relevant files
Controlling the total water volume			
REFKDT	Infiltration factor	Unitless	Soil_properties.nc
RETDEPRTFAC	Surface retention depth scaling	Unitless	FullDom_hires.nc
Controlling hydrograph shape			
MANN	Manning's roughness coefficient	s/m ^{1/3}	CHANPARAM.TBL
OV_ROUGH2D	Overland flow roughness coefficient	s/m ^{1/3}	hydro2dtbl.nc

۳-۲- واسنجی مدل

در ابتدا، مدل WRF-Hydro با مجموعه پارامترهای پیش فرض و با استفاده از خروجی‌های مدل WRF برای وقایع منتخب (جدول ۱) اجرا می‌شود. واسنجی دستی با رویکرد گام به گام انجام شد زیرا استفاده از روش‌های خودکار به تعداد زیادی مدل با زمان محاسبات بسیار بالا نیاز دارد. گزینه‌ای که در مطالعه فعلی امکان‌پذیر نبود. بدین منظور ابتدا پارامترهای کنترل کننده حجم کل جریان یعنی پارامترهای فاکتور نفوذ (REFKDT) و عمق نگهداشت آب سطحی (RETDEPRT) واسنجی شدند. در مرحله دوم، پارامترهای کنترل کننده شکل هیدروگراف یا توزیع زمانی جریان شامل ضریب زبری سطحی (OV_ROUGH2D) و ضریب زبری کانال (MANN) در برابر هیدروگراف‌های مشاهداتی مقایسه گردید. در روش گام به گام هنگامی که مقادیر بهینه یک پارامتر انتخاب شد در مراحل بعدی در مقدار بهینه ثابت فرض می‌گردد. بدین ترتیب ابتدا توانایی مدل در شبیه‌سازی مناسب بیلان آب و سپس توزیع مناسب زمانی آن بررسی می‌گردد (Yucel et al., 2015). در این مطالعه، پارامترهای REFKDT و MANN بصورت مقادیر ثابت برای کل حوضه بررسی گردید، در حالی که پارامترهای RETDEPRT و OV_ROUGH2D برای هر پیکسل خاص قابل تغییر هستند. در مرحله آخر مقادیر بهینه پارامتر در فرآیند واسنجی با چندین معیار آماری از جمله ضریب تبیین R^2 ، شاخص میانگین مربعات NRMSE و نش-ساتکلیف NSE مقایسه خواهند شد.

۳-۲-۱- واسنجی پارامترهای کنترل کننده حجم هیدروگراف

شکل ۵ نتایج حاصل از انتخاب مقدار بهینه پارامتر REFKDT را پس از اجرای مدل WRF-Hydro با مقادیر پارامتر از ۲ تا ۴ با افزایش یک واحدی برای واقعه شماره ۲ (#2) در ایستگاه پلدختر-کشکان (P-K) را نشان می‌دهد. دلیل انتخاب این ایستگاه قرار گرفتن آن در خروجی حوضه می‌باشد. مطابق این شکل، با افزایش مقدار REFKDT، حجم هیدروگراف شبیه‌سازی شده کمتر خواهد شد. چرا که با افزایش نفوذ، میزان رواناب تولیدی کاهش خواهد یافت. بر این اساس با مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی، مقدار REFKDT در محدوده ۳/۱ بعنوان مقدار بهینه این پارامتر در حوضه آبریز کشکان انتخاب می‌شود. در این بررسی مقدار اولیه پارامتر REFKDT برابر ۳ بود. بیشترین مقدار قابل قبول برای پارامتر REFKDT ۵/۵ می‌باشد (Yucel et al., 2015).

شکل ۶ نمودار مشابهی را برای انتخاب مقدار بهینه پارامتر RETDEPRT برای واقعه شماره ۲# در ایستگاه پلدختر-کشکان (P-K) نشان می‌دهد. فاکتور مقیاس عمق نگهداشت آب سطحی (RETDEPRTFAC) بین ۰ تا ۵ با افزایش یک واحد در هر اجرا با مقدار اولیه ۱ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفت. در مدل WRF-Hydro، مقدار اولیه عمق نگهداشت آب سطحی بسته به شیب سطح زمین تنظیم می‌شود و مقدار آن در سطح صاف بیشتر از سطوح شیب‌دار خواهد بود. بنابراین انتظار می‌رود در دشت‌ها و مناطق پست، عمق نگهداشت به‌طور قابل توجهی بالا بوده و در مناطقی با شیب بین ۳۰-۴۵ درجه هیچ نگهداشت سطحی وجود نداشته باشد.

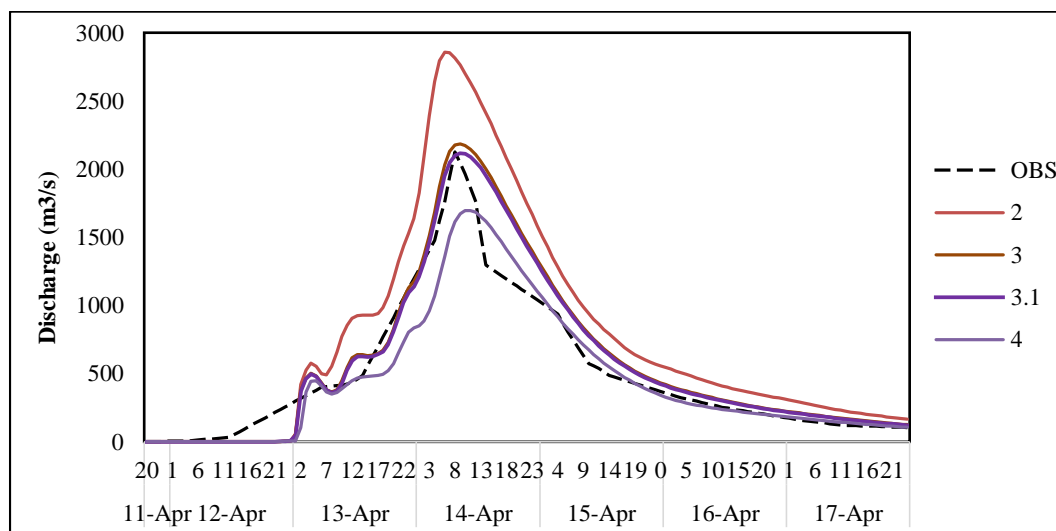


Fig. 5- Optimizing the REFKDT parameter after running the WRF-Hydro model for values ranging 2 to 4 with one increment for Event # 2 at P-K station

شکل ۵- بهینه‌سازی پارامتر REFKDT پس از اجرای مدل WRF-Hydro برای مقادیر ۲ تا ۴ با افزایش یک واحدی برای واقعه شماره ۲ در ایستگاه P-K

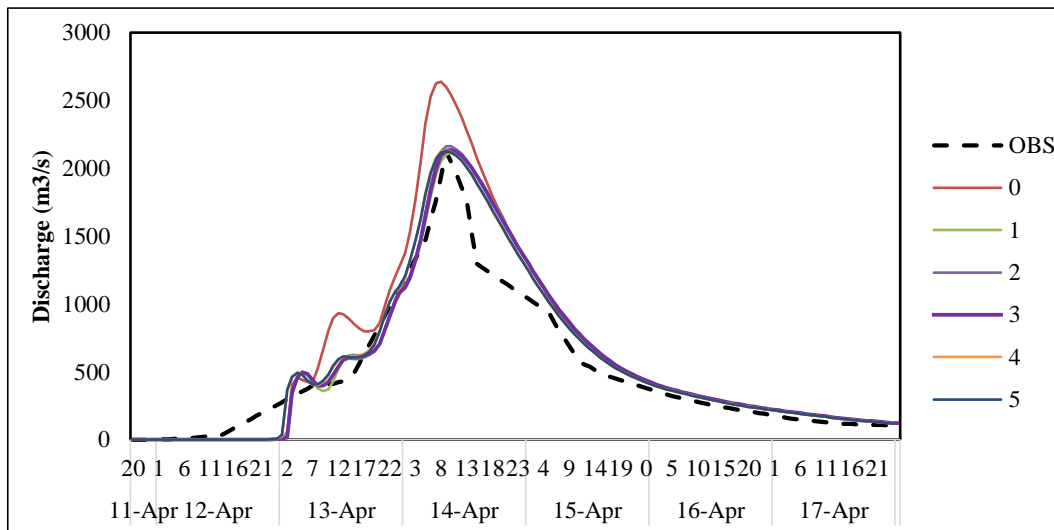


Fig. 6- Optimizing the RETDEPRT parameter after running the WRF-Hydro model for values ranging 0 to 5 with one increment for Event # 2 at P-K station

شکل ۶- بهینه‌سازی پارامتر RETDEPRT پس از اجرای مدل WRF-Hydro برای مقادیر ۰ تا ۵ با افزایش یک واحدی برای واقعه شماره ۲ در ایستگاه P-K

همانطور که در این شکل ملاحظه می‌گردد مقدار بهینه ضریب اعمال شده در OV_ROUGH2D مقدار ۳ می‌باشد که مقادیر ضریب زبری نهایی متناظر با آن در مقابل ضریب زبری سطحی اولیه در جدول ۵ آمده است. با توجه به هیدروگراف شکل ۷، با تغییر پارامتر OV_ROUGH2D در دامنه ۰/۵ تا ۳/۵، پارامتر زبری به تدریج کاهش یافته و آب با سرعت کمتری به رودخانه و در نهایت دبی اوج خواهد رسید.

پس از انتقال رواناب سطحی به شبکه جریان، نحوه انتقال آب در رودخانه نیز بر شکل هیدروگراف تأثیر گذار خواهد بود. نحوه انتقال آب در کانال بر اساس پارامترهای عرض کف کانال (Bw)، عمق اولیه آب در رودخانه (HLINK)، شیب جداره (Ch SSLp) و ضریب زبری مانینگ (MannN) که مقادیر آنها بر اساس رده رودخانه (St Order) تعیین می‌شود، مدل‌سازی می‌گردد. مقادیر پارامتر کانال پیش فرض در جدول ۶ آمده است. در این مطالعه حداکثر رده رودخانه‌ای متعلق به رودخانه کشکان با رده ۵ می‌باشد. بنابراین سایر ردیف‌های مربوط به رده‌های بالاتر در این مدل‌سازی لحاظ نمی‌گردد.

با توجه به هدف مطالعه در شبیه‌سازی سیلاب، پارامتر HLINK تمامی رده‌های رودخانه صفر می‌باشد. با صفر فرض کردن این پارامتر هیچ جریان پایه در ابتدای مدل‌سازی در نظر گرفته نمی‌شود. عرض کف رودخانه در هر رده نیز بر اساس تصاویر Google استخراج و بصورت ثابت در مدل‌سازی لحاظ گردید.

با توجه به شیب ۲۲ درصدی حوضه آبریز کشکان (Porhemat and Kazemi, 2017) مقدار بهینه پارامتر RETDEPRTFAC برابر ۳ برآورد گردید که نتایج آن در شکل ۵ و ۶ نمایش داده شده است. با صفر در نظر گرفتن این پارامتر، فرض بر این است که هیچ تجمع‌ی در یک شبکه صورت نگرفته و تمام آب مازاد بر نفوذ جهت روندیابی آن در سطح قابل دسترس است.

همانطور که در شکل ۵ و ۶ مشاهده می‌گردد، جهت کنترل و واسنجی حجم هیدروگراف پارامتر REFKDT از حساسیت بالاتری نسبت به پارامتر RETDEPRTFAC برخوردار است. این نتایج در مطالعات مشابه نیز اثبات شده است (Yucel et al., 2015; Ryu et al., 2017).

۳-۲-۲- واسنجی پارامترهای کنترل‌کننده شکل هیدروگراف

زبری سطحی (OV_ROUGH2D) نقش مهمی در انتقال آب مازاد بر نفوذ به شبکه جریان رودخانه‌ای دارد. در این مطالعه، مقادیر اولیه زبری سطح بر اساس کاربری USGS که در مدل سطح زمین NoahMP از آن استفاده می‌شود تنظیم شده است. مقدار نهایی این پارامتر عددی بین ۰ تا ۱ است. پارامتر زبری سطح در این مطالعه با ضرایب ۰/۵ تا ۳/۵ با گام ۰/۵ تغییر داده شده است که نتایج آن در شکل ۷ برای واقعه شماره ۲# در ایستگاه پلدختر-کشکان (P-K) نشان داده شده است.

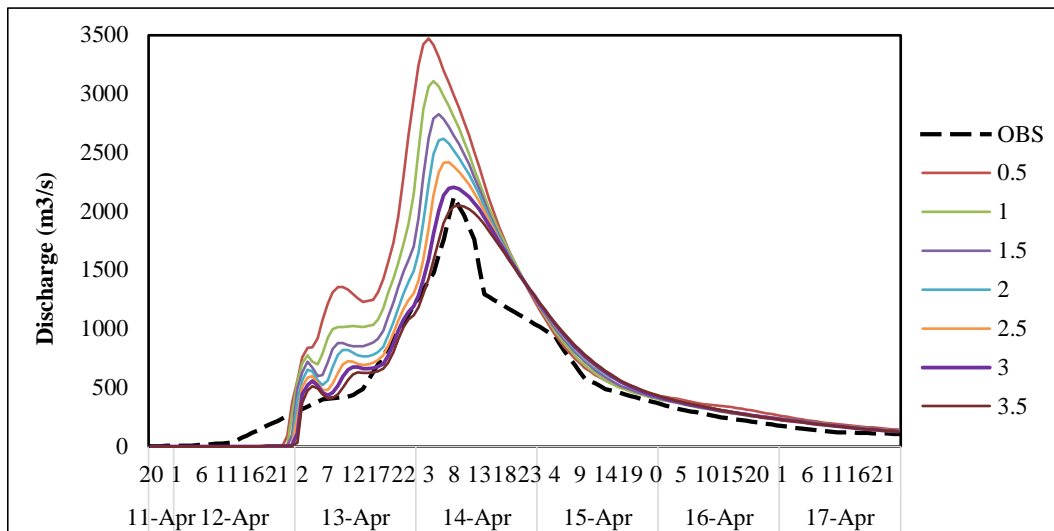


Fig. 7- Optimizing the OV_ROUGH2D parameter after running the WRF-Hydro model for multiply ranging 0.5 to 3.5 with 0.5 increment for Event # 2 at P-K station

شکل ۷- بهینه‌سازی پارامتر OV_ROUGH2D پس از اجرای مدل WRF-Hydro برای ضرایب ۰/۵ تا ۳/۵ با افزایش نیم واحدی برای واقعه شماره ۲ در ایستگاه P-K

Table 5- Default and calibrated Manning's roughness coefficients for overland flow

جدول ۵- ضریب زبری مانینگ سطحی اولیه و واسنجی شده در مدل

Land Use	Irrigated Cropland and Pasture	Dryland Cropland and Pasture	Mixed Forest
Default	0.055	0.055	0.1
Calibrated	0.165	0.165	0.3

Table 6- Channel parameter default values based on each stream order (St Order)

جدول ۶- مقادیر اولیه پارامترهای کانال بر اساس رده رودخانه‌ای

St Order	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Bw	5	10	20	30	40	60	60	60	60	60
HLINK	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.1	0.3	0.3
Ch SSlp	1	0.6	0.3	0.18	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
MannN	0.65	0.50	0.30	0.15	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03

ضریب همبستگی آمار (زمان سنجی) برای فاکتورهای مقیاس‌گذاری Manning در بازه ۰/۸ مشاهده می‌شود. در نتیجه، این مقدار به عنوان ضریب پارامتر MannN انتخاب شده و ضریب زبری مانینگ بهینه از ۰/۵۲ تا ۰/۴۸ برآورد گردید (جدول ۷). بر اساس مقادیر بهینه، فرض می‌شود که کانال‌ها نسبت به مقادیر پیش فرض داخل شبکه جریان اولیه مدل زبری کمتری داشته و اصطحاک جریان کمتر از مقادیر پیش فرض مدل است. یکی از دلایل این اتفاق ممکن است ناشی از عریض و بزرگ بودن رودخانه‌های منطقه مطالعاتی نسبت به مقادیر پیش فرض مدل باشد. در مطالعه Ryu et al. (2017) نیز مقادیر پیش فرض پارامتر MannN بیشتر از مقادیر بهینه شده در محدوده‌های مورد مطالعه آنها در کشور کره داشت.

سایر خصوصیات هندسی کانال همچون شیب جداره بدلیل در دسترس نبود اطلاعات آن بر روی مقادیر اولیه تنظیم گردید. بنابراین تنها پارامتر ضریب زبری مانینگ در این مطالعه مورد بررسی و واسنجی قرار خواهد گرفت و سایر پارامترها ثابت در نظر گرفته می‌شود.

مقادیر اولیه ضریب زبری مانینگ در جدول ۶ آمده است. برای بهینه‌سازی این پارامتر از ضریبی در بازه استفاده شد تا در نهایت مقادیر نهایی این پارامتر در بازه ۰-۱ قرار گیرد. با استفاده از ضرایب در پارامتر MannN بین ۰/۵ تا ۱/۲ با افزایش ۰/۱ در هر اجرا، نتایج در شکل ۸ برای واقعه شماره ۲ (#2) در ایستگاه پلدختر-کشکان (P-K) نشان داده شده است. با توجه به این شکل بهترین مقادیر

هیدروگراف جریان، هیدروگراف جریان در سایر ایستگاه‌های واقعه اول و دوم ارزیابی می‌گردد.

در این بخش عملکرد پارامترهای واسنجی شده در مرحله قبلی برای سایر ایستگاه‌ها و رویدادهای سیلابی ارزیابی می‌شود. بدین منظور پس از واسنجی مدل برای ایستگاه پلدختر-کشکان در واقعه شماره ۲، مدل برای واقعه شماره یک نیز اجرا گردید. هیدروگراف مشاهداتی در مقابل شبیه‌سازی برای کلیه ایستگاه‌های واقعه شماره یک در شکل ۹ و واقعه شماره ۲ در شکل شکل ۱۰ آمده است.

خلاصه‌ای از نتایج ارزیابی و واسنجی مدل برای کلیه وقایع و ایستگاه نیز در جدول ۸ آمده است.

Table 7- Optimized channel parameter values based on each stream order (St Order)

جدول ۷- مقادیر بهینه پارامترهای کانال بر اساس رده رودخانه‌ای

St Order	1	2	3	4	5
Bw	10	30	60	100	150
HLINK	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
MannN	0.52	0.4	0.24	0.12	0.048

۳-۳- صحت‌سنجی مدل برای کلیه ایستگاه‌ها و وقایع منتخب

در بخش قبلی اثر واسنجی پارامترهای مدل بر هیدروگراف شبیه‌سازی واقعه شماره ۲ در ایستگاه پلدختر-کشکان مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش با توجه به مقادیر بهینه پارامترهای تأثیرگذار در شبیه‌سازی

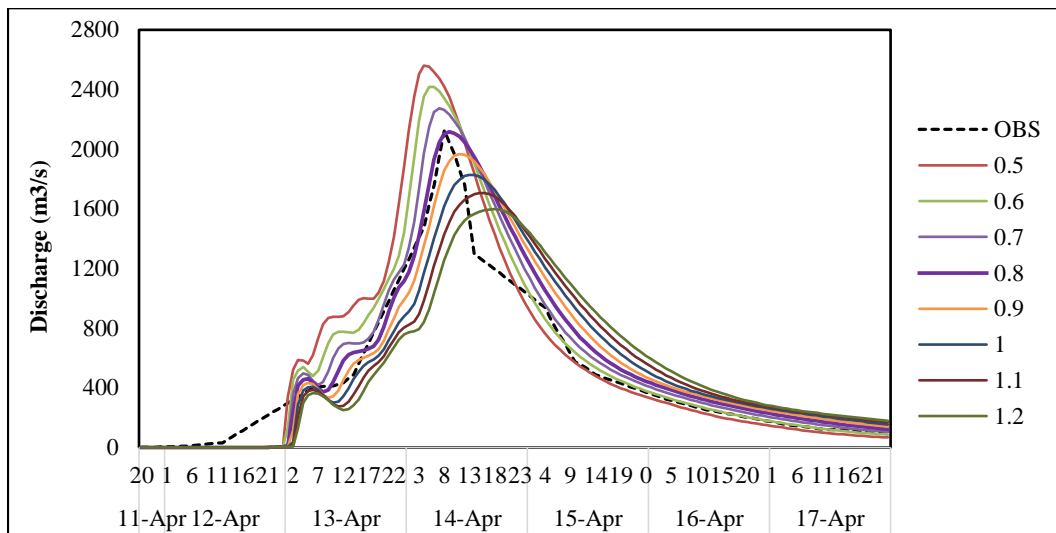


Fig. 8- Optimizing the MannN parameter after running the WRF-Hydro model for multiply ranging 0.5 to 1.2 with 0.1 increment for Event # 2 at P-K station

شکل ۸- بهینه‌سازی پارامتر MannN پس از اجرای مدل WRF-Hydro برای ضرایب ۰/۵ تا ۱/۲ با افزایش ۰/۱ واحدی برای واقعه شماره ۲ در ایستگاه P-K

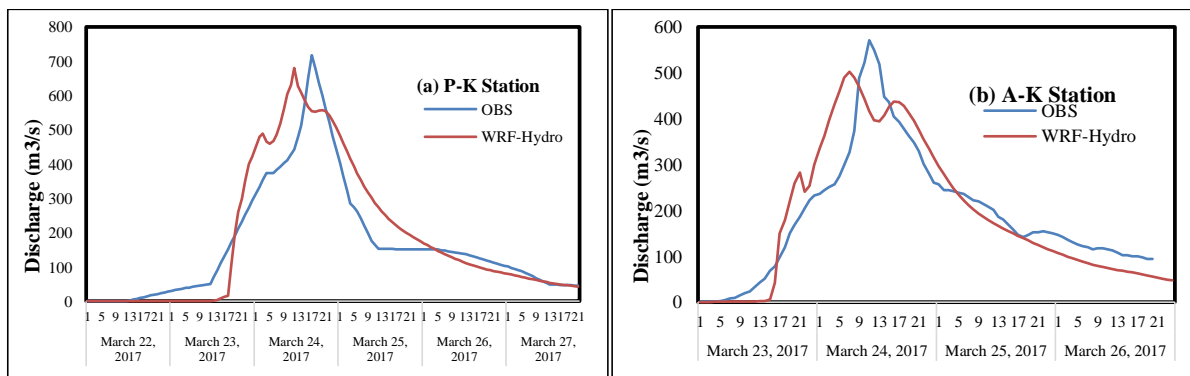


Fig. 9- Comparison of observed and simulated hydrographs for the event #1

شکل ۹- مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای واقعه شماره ۱

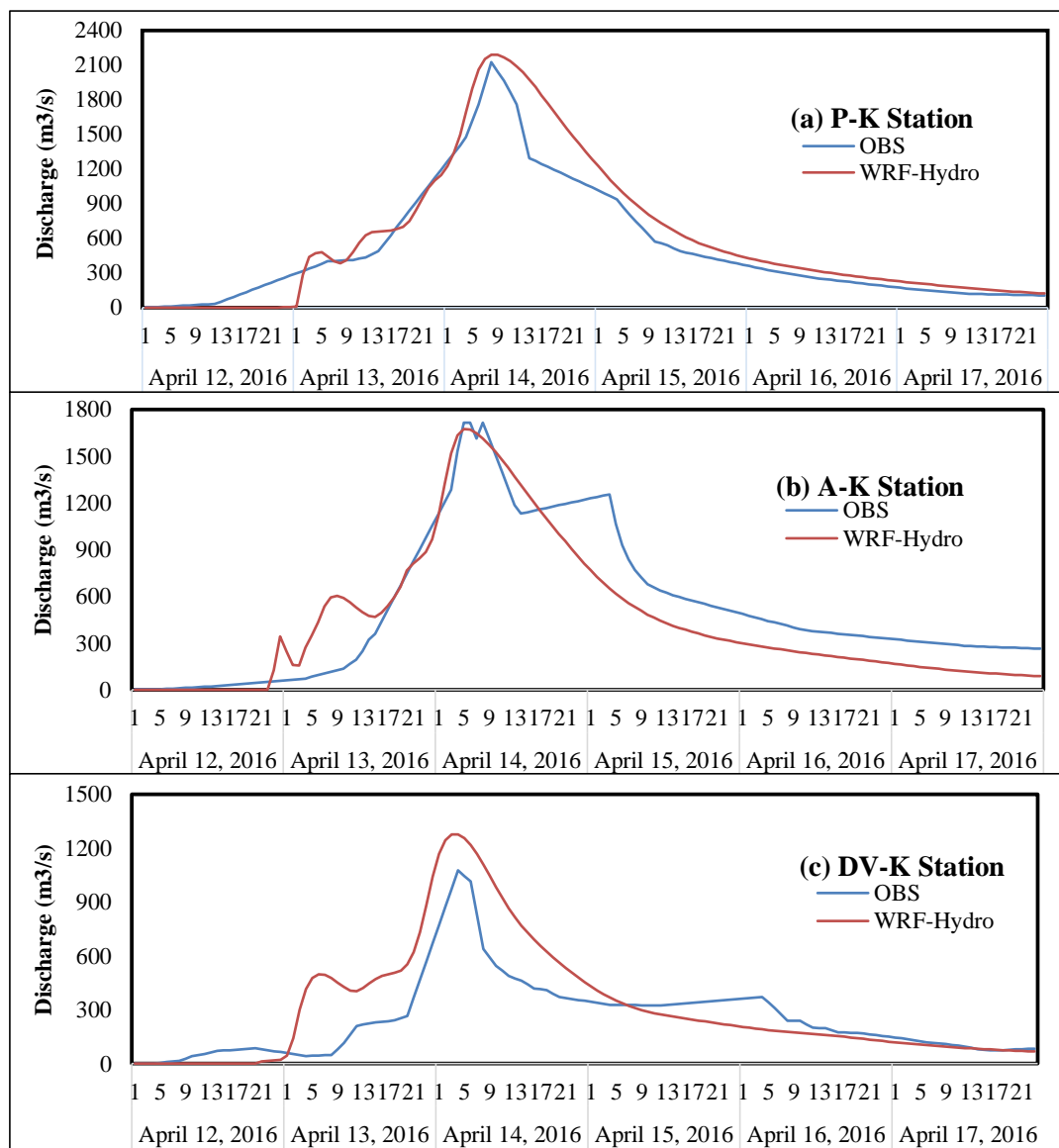


Fig. 10- Comparison of observed and simulated hydrographs for the event #2
 شکل ۱۰- مقایسه هیدروگراف مشاهداتی و شبیه‌سازی شده برای واقعه شماره ۲

Table 8- Statistics of calibration for events #1 and #2

جدول ۸- نتایج واسنجی مدل برای وقایع شماره ۱ و ۲

Station	NSE		R ²		NRMSE		VD ¹⁴ (%)		Peak lag-time (hour)		PD ¹⁵ (%)	
	Even t #1	Even t #2	Event #1	Even t #2	Even t #1	Even t #2	Even t #1	Even t #2	Even t #1	Even t #2	Event #1	Even t #2
P-K	0.76	0.88	0.87	0.96	0.11	0.08	13.24	15.42	-5.00	0.00	-11.11	3.17
A-K	0.75	0.82	0.81	0.85	0.12	0.12	3.26	14.05	-4.00	0.00	-13.66	-2.33
DV-K	-	0.32	-	0.78	-	0.17	-	20.13	-	0.00	-	18.62

بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل واسنجی شده در شبیه‌سازی زمان سیلاب، دبی اوج سیلاب و زمان رسیدن به آن و محاسبه حجم رواناب از توانایی مناسبی برخوردار است. تحلیل جدول معیارهای خطا نتایج مناسب‌تری را ارائه می‌دهد. بر اساس این جدول مدل با خطا بسیار کمی قادر به شبیه‌سازی دبی اوج سیلاب است. همچنین مدل با اختلاف کمی از مقادیر مشاهداتی زمان رسیدن به دبی اوج را

بررسی نتایج نشان می‌دهد که مدل واسنجی شده در شبیه‌سازی زمان سیلاب، دبی اوج سیلاب و زمان رسیدن به آن و محاسبه حجم رواناب از توانایی مناسبی برخوردار است. تحلیل جدول معیارهای خطا نتایج مناسب‌تری را ارائه می‌دهد. بر اساس این جدول مدل با خطا بسیار کمی قادر به شبیه‌سازی دبی اوج سیلاب است. همچنین مدل با اختلاف کمی از مقادیر مشاهداتی زمان رسیدن به دبی اوج را

حوضه‌های آبریز می‌باشد. در این مطالعه مدل‌سازی بارش در دو شبکه با فواصل ۲۵ و ۸/۳۳ کیلومتر در راستای افقی بود که تبدیل به شبکه ۱۰۴۲ متری در روندیابی هیدرولوژیکی شد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آبی براساس پیشنهاد توسعه‌دهندگان مدل WRF-Hydro از مدل WRF با تفکیک مکانی ۴ کیلومتر استفاده کرد که بتوان اقلیم‌های محلی را نیز در مدل‌سازی حوضه‌های آبریز کوچک در نظر گرفت.

۵- تقدیر و تشکر

تحقیق حاضر برگرفته از بخشی از نتایج طرح پژوهشی "توسعه سامانه پایش و پیش‌بینی هشدار سیلاب کشوری" می‌باشد. بدین وسیله نویسندگان مقاله از مؤسسه تحقیقات آب به عنوان حامی مالی پروژه قدردانی می‌نمایند.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Numerical Weather Prediction
- 2- High Performance Computing
- 3- Guadalhorce Flood Warning System
- 4- European Flood Alert System
- 5- Gridded Surface Subsurface Hydrologic Analysis
- 6- Weather Research and Forecasting
- 7- National Water Model
- 8- Final Analysis
- 9- Multi Parameters
- 10- Land Surface Model
- 11- Forcing
- 12- Stand Alone
- 13- Diffusive Wave
- 14- Differences Between Volume of Model and Observe
- 15- Differences Between Peak Discharge of Model and Observe

۶- مراجع

- Abott MB, Bathurst JC, Cunge JA, O'Connell PE, and Rasmussen J (1986) An introduction to the European Hydrologic System-Système Hydrologique Européen, SHE, 2: Structure of a physically-based, distributed modeling system. *Journal of Hydrology* 87(1-2):61-77
- Anderson ML, Chen Z-Q, Kavvas ML, and Feldman A (2002) Coupling HEC-HMS with atmospheric models for prediction of watershed runoff. *Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineers* 7(4):312-318
- Burnash RJC (1995) The NWS river forecast system-catchment modeling. *Computer Models of Watershed Hydrology* 311-366

شبیه‌سازی کرده است. مدل در خصوص برآورد حجم رواناب نیز توانسته به‌خوبی عمل کند و خطای ناشی از آن قابل صرف‌نظر کردن می‌باشد. معیارهای خطای نش-ساتکلیف، ضریب تبیین و RMSE نرمال شده نیز برای مدل واسنجی شده از دقت قابل قبول و مناسبی برخوردار است. این نتایج نشان می‌دهد که WRF-Hydro و عملکرد فرآیند واسنجی آن تطابق مناسبی با داده‌های مشاهداتی دارد.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارزیابی کارایی مدل هواشناسی-هیدرولوژی WRF-Hydro در شبیه‌سازی چندین واقعه سیلابی شدید در حوضه آبریز درجه سه کشکان است. داده‌های هواشناسی اجباری مورد استفاده در این مطالعه از نتایج اجرای مدل منطقه‌ای WRF مؤسسه تحقیقات آب بدست آمد که نتایج آن بصورت مستقل وارد مدل WRF-Hydro شد. بر اساس پیکره‌بندی انجام شده ویژگی‌های اصلی هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده از جمله حجم، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج با مقادیر مشاهداتی ارزیابی گردید. واسنجی مدل WRF-Hydro بصورت گام به گام و با تغییر و انتخاب مقادیر بهینه برای پارامترهای تأثیرگذار در کنترل حجم و شکل هیدروگراف در ایستگاه واقع در خروجی حوضه انجام شد. محدوده انتخابی برای پارامترها با در نظر گرفتن مقادیر واقع‌بینانه و با حفظ ماهیت فیزیکی هر یک از آنها بود. به طور کلی، هیدروگراف‌های شبیه‌سازی شده حساسیت بالایی به پارامترهای منتخب دارد. بر این اساس نتیجه‌گیری کلی مقاله حاضر حاکی از قابلیت مناسب مدل WRF-Hydro در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب و ویژگی‌های اصلی آن از جمله حجم، زمان‌بندی، دبی اوج و زمان رسیدن به دبی اوج در حوضه‌های آبریز با شیب بالا پس از واسنجی منطقی مدل و استفاده از داده‌های هواشناسی مناسب دارد. این مدل برای اولین بار برای پیش‌بینی سیلاب در ایران استفاده شده است. بر اساس آمار وقوع سیلاب، غالباً سیل در حوضه‌هایی گزارش می‌شود که دارای مناطق نسبتاً مسطحی هستند. بنابراین ارزیابی بیشتر مدل در این مناطق امری ضروری است. همچنین یک فرآیند بهینه‌سازی خودکار و مکانی در حوضه‌های آبریز بزرگ با ویژگی‌های متفاوت می‌تواند جهت ارزیابی دقیق‌تر مدل با استفاده از ترکیب مختلف پارامترهای حساس می‌تواند دقت مدل واسنجی را بهبود بخشد. راه‌اندازی این فرآیند نیازمند سیستم‌های موازی با سرعت بالا می‌باشد که در زمان اجرای این تحقیق در دسترس نبودند. همچنین، در دسترس بودن داده‌های هیدروگراف سیلاب مشاهداتی در ایستگاه‌های بیشتر و تعداد وقایع بیشتر نیز در افزایش دقت مدل نقش شایانی دارد که بعنوان یکی از محدودیت‌های اساسی در مطالعه حاضر نیز بود. با این وجود با پیکره‌بندی و واسنجی مناسب مدل WRF-Hydro قادر به شبیه‌سازی منطقی و مناسب سیلاب در

- Institute DH (2009) MIKE11 a modeling system for rivers and channels. Reference Manual
- Jordan F, Boillat JL, Dubois J, and Schleiss A (2004) MINERVE, a tool for flood prediction and management of the Rhone river catchment area. *Risiken bei der Bemessung und Bewirtschaftung von Fließgewässern und Stauanlagen*, 27:227-236
- Kavvas ML, Chen ZQ, Dogrul C, Yoon JY, Ohara N, Liang L, Aksoy H, Anderson ML, Yoshitani J, and Fukami K (2004) Watershed Environmental Hydrology (WEHY) model based on upscaled conservation equations: Hydrologic module. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers 9(6):450-464
- Kouwen N (1988) WATFLOOD: A micro-computer based flood forecasting system based on real-time weather radar. *Canadian Water Resources Journal*, Taylor & Francis 13(1):62-77
- Lahmers TM, Gupta H, Castro CL, Gochis DJ, Yates D, Dugger A, Goodrich D, and Hazenberg P (2019) Enhancing the structure of the WRF-hydro hydrologic model for semiarid environments. *Journal of Hydrometeorology* 20(4):691-714
- Liang X, Lettenmaier DP, Wood EF, and Burges SJ (1994) A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library 99(D7):14415-14428
- Liu Y, Liu J, Li C, Yu F, Wang W, and Qiu Q (2020) Parameter sensitivity analysis of the WRF-Hydro modeling system for streamflow simulation: A Case Study In Semi-Humid And Semi-Arid Catchments Of Northern China. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* <https://doi.org/10.1007/s13143-020-00205->
- Madsen H (2003) Parameter estimation in distributed hydrological catchment modelling using automatic calibration with multiple objectives. *Advances in Water Resources* 26(2):205-216
- Meyer V, Priest S, and Kuhlicke C (2012) Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: Examples from the Mulde River. *Natural Hazards* 62(2):301-324
- Molinari D, Ballio F, and Menoni S (2013) Modelling the benefits of flood emergency management measures in reducing damages: A case study on Sondrio, Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Citeseer 13(8):1913
- Naabil E, Lamptey BL, Arnault J, Kunstmann H, and Olufayo A (2017) Water resources management using the WRF-Hydro modelling system: Case-study of the Tono dam in West Africa. *Journal of*
- Chen Y, Dong Y, and Zhang PC (2013) Study on the method of flood forecasting of small and medium sized catchment. *Proceeding of the 2013 Meeting of the Chinese Society of Hydraulic Engineering*, 26-28
- Chen Y, Li J, and Xu H (2016) Improving flood forecasting capability of physically based distributed hydrological models by parameter optimization. *Hydrology and Earth System Sciences*, Copernicus GmbH 20(1):375
- Downer CW and Ogden FL (2004) GSSHA: Model to simulate diverse stream flow producing processes. *Journal of Hydrologic Engineering*, American Society of Civil Engineers 9(3):161-174
- Flesch TK and Reuter GW (2012) WRF model simulation of two Alberta flooding events and the impact of topography. *Journal of Hydrometeorology* 13(2):695-708
- Frasera D, Tange P, and Kama A (2010) Early warning and on-line mapping for flood events. *Geoscience and Remote Sensing: New Achievements*. BoD-Books on Demand 147
- Givati A, Gochis D, Rummeler T, and Kunstmann H (2016) Comparing one-way and two-way coupled hydrometeorological forecasting systems for flood forecasting in the mediterranean region. *Hydrology* 3(2):19
- Gochis DJ, Yu W, and Yates DN (2015) The WRF-Hydro model technical description and user's guide, version 3.0. NCAR Tech. Doc., 120 pp.
- Gochis J and Chen F (2003) Hydrological enhancements to the community Noah land surface model. University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D60P0X00
- Handmer JW, Smith DI, and Lustig TL (1988) The Sydney floods of 1986: Warnings, damages, policy and the future. *Hydrology and Water Resources Symposium 1988: Preprints of Papers*, Institution of Engineers, Australia, 206
- Hogue TS, Sorooshian S, Gupta H, Holz A, and Braatz D (2000) A multistep automatic calibration scheme for river forecasting models. *Journal of Hydrometeorology* 1(6):524-542
- Hong S-Y and Lee J-W (2009) Assessment of the WRF model in reproducing a flash-flood heavy rainfall event over Korea. *Atmospheric Research* 93(4):818-831
- Imani S, Farokhnia A, Dehban H, Hasanli SAM, Javadi F, Najafi MS, and Roozbahani R (2019) Assessing the performance of WRF and GFS models in forecasting recent heavy rainfalls in IRAN. *Seventh Comprehensive Conference on Flood Engineering and Management*, Tehran, Iran (In Persian)

- Sherman LK (1932) Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Eng. News Record* 108:501–505
- Silver M, Karnieli A, Ginat H, Meiri E, and Fredj E (2017) An innovative method for determining hydrological calibration parameters for the WRF-Hydro model in arid regions. *Environmental Modelling & Software*. Elsevier 91:47–69
- Thieken AH, Müller M, Kreibich H, and Merz B (2005) Flood damage and influencing factors: New insights from the August 2002 flood in Germany. *Water Resources Research*, Wiley Online Library 41(12)
- Tian J, Liu J, Yan D, Ding L and Li C (2019) Ensemble flood forecasting based on a coupled atmospheric-hydrological modeling system with data assimilation. *Atmospheric Research* 224:127–137
- Versini PA, Berenguer M, Corral C, Sempere-Torres D (2014) An operational flood warning system for poorly gauged basins: Demonstration in the Guadalhorce basin (Spain). *Natural Hazards* 71(3):1355-78
- Wang Z-M, Batelaan O, and De Smedt F (1996) A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Physics and Chemistry of the Earth* 21(3):189–193
- Yilmaz KK, Gupta H V, and Wagener T (2008) A process-based diagnostic approach to model evaluation: Application to the NWS distributed hydrologic model. *Water Resources Research* 44(9)
- Yucel I, Onen A, Yilmaz KK, and Gochis DJ (2015) Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall. *Journal of Hydrology*, Elsevier B.V. 523:49–66
- Zhao RJ (1977) Flood forecasting method for humid regions of China. East China College of Hydraulic Engineering, Nanjing, China
- Hydrology: Regional Studies. Elsevier 12(December 2016):196–209
- Norouzi A, Ghavasieh A, Attari J (2009) Flood warning system: An appropriate model for designing and reliability assessment. *Iran-Water Resources Research* 5(1):1-13 (In Persian)
- Peng D, Zhijia L, and Zhiyu L (2008) Numerical algorithm of distributed TOPKAPI model and its application. *Water Science and Engineering* 1(4):14–21
- Porhemat J and Kazemi R (2017) Regional modeling and evaluation of runoff coefficient in Karkhe Basin. *Journal of Watershed Management Research* 8(15):82–91
- Refsgaard JC (1997) Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 198(1–4):69–97
- Ryu Y, Lim Y-J, Ji H-S, Park H-H, Chang E-C, and Kim B-J (2017) Applying a coupled hydrometeorological simulation system to flash flood forecasting over the Korean Peninsula. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 53(4):421–430
- Saedi A, Saghafian B, Moazami S (2020) Uncertainty of flood forecasts via ensemble precipitation forecasts of seven NWP models for spring 2019 Golestan flood. *Iran-Water Resources Research* 16(1):347-359 (In Persian)
- Senatore A, Mendicino G, Gochis DJ, Yu W, Yates DN, and Kunstmann H (2015) Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central Mediterranean: Impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Wiley Online Library 7(4):1693–1715
- Sharifi A, Baharlouie D, and Abasi S (2018) Investigation of the effect of Karkheh Reservoir Dam in flood control from 2003 to 2005 in Khuzestan province. Third National Congress of Civil Engineering, Tabriz, Iran (In Persian)