

Estimating Flood Economic Damages through Integrated Hydro-Meteorological Modeling and Hydraulic Simulation: A Novel Approach for Flood Management and Damage Reduction (Case Study: Poldokhtar Basin)

S. Koochi¹, A. Azizian^{2*}, M. S. Najafi³

Abstract

In recent years, the growing frequency of flood events and their associated damages has underscored the critical need to enhance flood risk management strategies, particularly in identifying flood-prone areas and assessing the extent of damage they incur. Recognizing the pivotal role of depth-damage functions in flood damage evaluation, this study focuses on Poldokhtar basin as a case study. It develops a regional model for estimating flood damage in residential areas while evaluating the potential of utilizing outputs from the WRF numerical weather model combined with HEC-HMS and HEC-RAS models to estimate hydrological, hydraulic, and damage components of flood. The study employs the WRF model for precipitation prediction, the HEC-HMS hydrological model for flood simulation, and the two-dimensional HEC-RAS hydraulic model for flood inundation simulation. The findings demonstrated that the WRF model combined with HEC-HMS and HEC-RAS models performs effectively in hydrological and hydraulic modeling, with minimal errors: approximately 1.47% in estimating peak flood discharge, 2.98% in simulating flood depth, and 1.93% in WSE. Additionally, the developed damage model exhibited strong accuracy, with a relative error of less than 10% in estimating flood damages in residential areas. The study also highlighted that improving spatial accuracy in calculating building areas and applying reconstruction/renovation cost coefficients for shallow floods resulted in more precise damage estimates. Integrating these models and methodologies into an online platform could serve as a comprehensive and practical forecasting system, offering significant value to researchers and policymakers at the national level. Such a system would play a crucial role in mitigating and managing flood-related damages.

Keywords: Flood Damage, Integrated Meteorological-Hydrological Modeling, Depth-Damage Functions, Reconstruction/Renovation Cost Factor, Economic Flood Analysis.

Received: March 14, 2025

Accepted: June 11, 2025

تخمین خسارات اقتصادی سیلاب با تلفیق مدل سازی هیدرومتئورولوژیکی و شبیه سازی هیدرولیکی - رویکردی نوین برای مدیریت و کاهش خسارات سیل (مطالعه موردی: حوضه پلدختر)

سکینه کوهی^۱، اصغر عزیزیان^{۲*} و محمد سعید نجفی^۳

چکیده

در سال های اخیر افزایش فراوانی سیلاب و خسارات ناشی از آن، نیاز فوری به بهبود در مدیریت ریسک سیلاب را پررنگ نموده است تا به واسطه آن مناطق مستعد وقوع سیل مشخص و میزان خسارت سیلاب در آن ها تعیین شود. با توجه به نقش مهم توابع خسارت در مطالعات ارزیابی خسارت سیلاب، در این پژوهش که بطور موردی بر روی حوضه آبخیز پلدختر به انجام رسیده است؛ ضمن توسعه مدل منطقه ای برای تخمین خسارت سیلاب در مناطق مسکونی، پتانسیل کاربرد خروجی مدل عددی هواشناسی WRF در تلفیق با مدل های HEC-HMS و HEC-RAS برای تخمین مؤلفه های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و خسارت سیلاب مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این پژوهش، از مدل های عددی هواشناسی WRF برای پیش بینی بارش، مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای شبیه سازی رواناب و مدل هیدرولیکی دو بعدی HEC-RAS برای شبیه سازی پهنه سیلاب استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل WRF با خطای در حدود ۱/۴۷ درصد در تخمین دبی اوج سیلاب، ۲/۹۸ درصد در شبیه سازی عمق سیلاب و ۱/۹۳ درصد در شبیه سازی عرض سطح آب از عملکرد مناسبی برای کاربرد با هدف مدل سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی برخوردار است. همچنین، مدل خسارت توسعه یافته با خطای نسبی کمتر از ۱۰ درصد، قابلیت خوبی در تخمین خسارات سیلاب در مناطق مسکونی نشان داد. علاوه بر این، بررسی روش های تبدیل خسارات نسبی به ریالی حاکی از آن است که افزایش دقت مکانی در محاسبه مترای ساختمان ها و استفاده از ضریب هزینه بازسازی/نوسازی برای سیلاب های با عمق کم، منجر به تخمین دقیق تری از خسارات می شود. بنابراین، تلفیق این مدل ها و مفاهیم با یکدیگر و ارائه آن ها در یک بستر آنلاین، می تواند به عنوان یک سامانه پیش بینی جامع و کاربردی در سطح ملی مورد توجه محققین و مدیران قرار گیرد و نقش مؤثری در مدیریت و کاهش خسارات سیلاب ایفا نماید.

کلمات کلیدی: خسارت سیلاب، مدل سازی یکپارچه هواشناسی-هیدرولوژیکی،

توابع عمق-خسارت، ضریب هزینه بازسازی/نوسازی، تحلیل اقتصادی سیل.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۳/۲۱

1- Ph.D. in Water Engineering, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2*- Associate Professor, Water Engineering Department, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran. Email: azizian@eng.ikiu.ac.ir

3- Assistant Professor, Water Resources Research (WRR) Department, Water Research Institute (WRI), Ministry of Energy, Tehran, Iran. Email: asghar.azizian.ikiu@gmail.com

*- Corresponding Author

Doi: [10.22034/iwrr.2025.512419.2840](https://doi.org/10.22034/iwrr.2025.512419.2840)



در سال‌های اخیر وقوع سیلاب‌های مخرب به دلایلی از جمله تغییرات آب و هوایی، افزایش تمرکز مردم و دارایی‌ها در مناطق مستعد سیلاب در بخش‌های مختلف جهان و به‌ویژه در کشورمان در حال افزایش است (Bayat-Afshary and Danesh-Yazdi, 2023). بنابراین ضروری است ضمن پیش‌بینی سیلاب، مناطق تحت خطر و دارای پتانسیل آسیب‌پذیری بالا مشخص شده و برای مدیریت این واقعه به‌منظور کاهش خسارات برنامه‌ریزی شود، که اخیراً نیز مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است (Alfieri et al., 2018, 2020; Martínez-Gomariz et al., 2020; He et al., 2021; Sairam et al., 2021; Paulik et al., 2022; Steinhausen et al., 2022). با توجه به اهمیت تعیین خسارت سیلاب در افزایش آگاهی عمومی درخصوص خطر سیلاب، پیش‌بینی و ارزیابی سیل و خسارت آن جزء مهمی از فرآیندها و استراتژی‌های غیرسازه‌ای کاهش و مدیریت خطر سیلاب است (Dottori et al., 2016; Koochi et al., 2025). مهم‌ترین موضوعات در تخمین خسارت سیلاب، برآورد ویژگی‌های جریان همچون عمق، سرعت، زمان ماندگاری جریان در هر نقطه، دسته‌بندی مناسب خسارات سیل با توجه به ماهیت آن‌ها و ایجاد رابطه بین ویژگی‌های سیلاب و خسارت برای انواع مختلف از خسارات است (Duttaa et al., 2003). مدل‌های مختلفی نیز با هدف مدل‌سازی ریسک و خسارت سیلاب توسعه یافته‌اند که برخی از آن‌ها ساده بوده و تعداد متغیرهای کم‌تری را طی فرآیند مدل‌سازی در نظر می‌گیرند. در مقابل، برخی دیگر از مدل‌ها جزئیات و پارامترهای ورودی بسیاری از عوامل خطر و آسیب‌پذیری را لحاظ می‌نمایند. این مدل‌ها می‌توانند در صورت دسترسی به داده‌ها و جزئیات بیشتر، برآوردهای قابل اطمینان‌تری از میزان ریسک سیلاب را نیز ارائه دهند (Thieken et al., 2008; Amadio et al., 2019; Molinari et al., 2020). درعین حال عدم وجود داده‌های مشاهداتی و جزئیات زیاد، ضمن تبدیل مدل‌سازی ریسک سیلاب به چالشی بزرگ، منجر شده است تا مدل‌های ساده از کاربرد بیشتری برای محاسبه خسارات سیلاب برخوردار شوند. در این میان منحنی‌های عمق-خسارت که تعیین‌کننده میزان خسارت برای هر عمق از جریان است از کاربرد گسترده‌ای برای تخمین خسارات سیلاب برخوردار می‌باشند (Cammerer et al., 2013; Ferguson and Ashley, 2017; Kefi et al., 2018; Paulik et al., 2022). این منحنی‌ها علی‌رغم در نظر نگرفتن برخی از پارامترهای تأثیرگذار بر خسارت همچون سرعت جریان، رسوبات یا زمان ماندگاری جریان، همچنان روش مورد قبول در سطح جهانی برای تخمین خسارت محسوب می‌شوند. تعدادی از مدل‌های

تخمین خسارت نیز براساس همین منحنی‌ها توسعه یافته‌اند (Duttaa et al., 2003; Arrighi et al., 2013a; Huizinga et al., 2017).

در تحقیقات مختلف نیز نشان داده شده است که مدل‌های ساده همچون توابع عمق-خسارت می‌توانند به ابزار بسیار مفیدی در زمینه ارزیابی ریسک سیلاب تبدیل شوند. به عنوان مثال، (2018) Tensavan et al. به برآورد خسارت ناشی از سیلاب براساس تابع عمق-خسارت در شهرستان شیروان پرداختند. در این تحقیق میزان مساحت سیل‌گیر، عمق و سرعت متوسط جریان با دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از HEC-RAS مورد مدل‌سازی قرار گرفت. در نهایت نقشه مکانی از میزان خسارت برای دوره بازگشت‌های ۱۰ تا ۵۰۰ ساله برای مناطق مسکونی ارائه شد.

(Romali et al., 2019) با استفاده از رگرسیون چندمتغیره به توسعه رابطه بین خسارت سیلاب و ویژگی‌های اجتماعی-اقتصادی پرداختند. مدل توسعه داده شده در این تحقیق برای برآورد خسارت سیلاب مبتنی بر داده‌های حاصل از تکمیل پرسش‌نامه و مصاحبه است. این محققین عنوان نمودند که ویژگی‌های سیلاب همچون عمق جریان، بهترین توضیح از میزان خسارت سیلاب را ارائه می‌دهد. (Amirmoradi et al., 2020) ارزیابی خسارات مستقیم ناشی از سیلاب در مناطق شهری زیرحوضه‌های حوضه آبخیز کن را مورد مطالعه قرار دادند و میزان خسارت اقتصادی سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف را محاسبه نمودند. نتایج نشان داد که کاربرد منحنی‌های خسارت مدل (Arrighi et al., 2013) منجر به ارائه نتایج منطقی‌تری از خسارات شده است و می‌تواند در شرایط نبود داده مناسب مفید واقع شود. (Paulik et al., 2022) به ارزیابی خسارت وارد بر ساختمان‌ها در نیوزلند و تخمین میزان آسیب براساس رویکردی مبتنی بر دستورالعمل‌های موجود برای هزینه ساخت و ساز اجزای مختلف ساختمان پرداختند. بررسی اهمیت متغیرهای تأثیرگذار بر خسارت سیلاب از دیگر اهداف پژوهش بود که نشان داد عمق جریان متغیری بسیار مهم در تخمین خسارت مستقیم وارد بر ساختمان‌ها است. سرعت جریان در برآورد آسیب وارد ساختار ساختمان حائز اهمیت است ولی میزان بار رسوب از اهمیت کم‌تری در تخمین خسارت مستقیم وارد بر اجزای ساختمان برخوردار است. (Kabirsamadi et al., 2023) به توسعه منحنی عمق-خسارت برای برآورد خسارت سیلاب وارد بر محتوای داخل ساختمان‌های مسکونی، مبتنی بر اطلاعات پرسشنامه در شهر رشت پرداختند. این محققین نشان دادند که مدل خسارت توسعه داده شده تا عمق ۱/۵ متر با کم‌برآوردی و در عمق‌های بیش از ۱/۵ متر با بیش‌برآوردی در تخمین خسارت نسبت به مدل‌های موجود

برخوردار است. بررسی مطالعات مختلف حاکی از آن است که با وجود حذف سایر پارامترهای تأثیرگذار بر خسارت سیلاب ولی همچنان توابع عمق-خسارت یکی از عناصر اصلی و پذیرفته در سطح جهانی در مدل‌های آسیب ناشی از سیلاب به‌شمار می‌رود. اما متأسفانه در حال حاضر منحنی یا الگوی استاندارد برای توابع عمق-خسارت در کشور ایران موجود نبوده و همین مسأله، ارزیابی و تخمین خسارت سیلاب در مناطق مختلف کشور را تحت تأثیر قرار داده است.

از سوی دیگر پارامترهای هواشناسی همچون بارش باران و تغییرات آن‌ها یکی از عوامل مهم هواشناسی در شکل‌گیری سیلاب است که پیش‌بینی آن می‌تواند منجر به انجام پیش‌بینی از میزان سیلاب و حتی خسارات ناشی از آن شده و در نتیجه زمینه لازم را برای مدیریت، کنترل و کاهش خسارات ناشی از سیلاب فراهم آورد (Tomasella et al., 2018). در سال‌های اخیر، گسترش فناوری ماهواره و سنجش از دور موجب تسهیل در دسترسی به مدل‌های عددی پیش‌بینی آب و هوا شده است. این مدل‌ها با استفاده از حل مدل‌های ریاضی به پیش‌بینی وضعیت جو می‌پردازند. از جمله مزایای مدل‌های عددی پیش‌بینی آب و هوا، دسترسی به داده‌های بهنگام، هزینه کم و پوشش مکانی مناسب است که از اهمیت بالایی در زمینه فراهم‌آوری سازوکارهای موثر با هدف آمادگی، کنترل آسیب و مدیریت جبران خسارات ناشی از سیلاب برخوردار بوده است. با توجه به اینکه اطلاعات این پایگاه‌ها در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت (روزانه و بعضاً ساعتی) است، بنابراین دارای پتانسیل بالایی برای کاربرد در سیستم‌های پیش‌بینی سیلاب و خسارت به‌ویژه ارائه پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت و میان‌مدت از میزان سیلاب و خسارت می‌باشند. بنابراین هدف اصلی از انجام پژوهش حاضر توسعه منحنی عمق-خسارت مبتنی بر داده‌های مشاهداتی برای برآورد خسارت مستقیم سیلاب بر ساختمان‌های مسکونی است. علاوه بر این، بررسی میزان دقت پیش‌بینی‌های عددی هواشناسی برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی سیلاب و نهایتاً ارزیابی پتانسیل کاربرد خروجی مدل عددی هواشناسی برای تخمین خسارت مستقیم ناشی از سیلاب از دیگر اهداف پژوهش حاضر هستند. همانگونه که مشخص است پژوهش حاضر با هدف پر کردن شکاف‌های موجود در مدل‌سازی جامع خسارات سیلاب و ارائه راهکارهای عملیاتی برای مدیریت ریسک سیلاب، از چندین جنبه بنیادی نسبت به مطالعات پیشین تمایز یافته است، از جمله: ادغام پیش‌بینی هواشناسی با زنجیره کامل مدل‌سازی خسارت، توسعه توابع عمق-خسارت مبتنی بر داده‌های بومی، تبدیل خسارات نسبی به ارزش ریالی با رویکردی چندمقیاسی و ارائه چارچوبی برای سامانه پیش‌بینی آنلاین یکپارچه. در این مطالعه برای شبیه‌سازی

بارش، سیلاب و مؤلفه‌های هیدرولیکی سیلاب به‌ترتیب از مدل عددی هواشناسی WRF^1 ، مدل هیدرولوژیکی $HEC-HMS^2$ و مدل هیدرولیکی $HEC-RAS^3$ استفاده شده است در ادامه به جزئیات مدل‌های مورد استفاده برای این مهم اشاره شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه در این پژوهش حوضه آبخیز پلدختر واقع در استان لرستان است. با توجه به قرارگیری استان لرستان در قسمت علیای حوضه آبخیز کرخه و دز، هر ساله وقوع سیل‌های مخرب و ویرانگر موجب تخریب و نابودی مراتع، اراضی کشاورزی، مناطق مسکونی، تأسیسات عمومی (راه، پل و غیره)، تأسیسات آبی، سایر زیرساخت‌های حاشیه رودخانه‌ها، تلفات دامی و انسانی در این ناحیه می‌شود که از نظر ارزش اقتصادی، پیامدهای ناشی از آن بسیار قابل توجه است. براساس آمار شبکه باران‌سنج شرکت آب منطقه‌ای لرستان، میزان بارش‌ها در سال آبی (۱۳۹۷-۱۳۹۸) تا اردیبهشت ماه ۱۱۵۶ میلی‌متر بوده که معادل حجمی آن حدود ۵/۳۲ میلیارد مترمکعب است؛ از این میزان، حدود ۳/۱۶ میلیارد مترمکعب تبخیر، ۲/۳ میلیارد مترمکعب نفوذ و ۱۳ میلیارد مترمکعب آن تبدیل به رواناب شده است. وقوع سیلاب به دنبال بارش‌های قابل توجه در مدت زمانی کوتاه در استان لرستان در سال ۱۳۹۸ بار دیگر آسیب‌پذیری بالای این استان را در برابر وقوع سیلاب آشکار نمود. طی این واقعه تخریب زیرساخت‌ها، املاک عمومی و خصوصی در لرستان و بویژه شهرستان پلدختر و معمولان بسیار گسترده بوده است. در این مطالعه از اطلاعات مربوط به خسارت سیلاب فرودین ۱۳۹۸ وارد بر این حوضه آبخیز، دریافتی از سازمان مدیریت بحران کشور برای توسعه مدل منطقه‌ای خسارت استفاده شده است. در شکل ۱ موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری حوضه مورد مطالعه و منطقه شهری پلدختر نشان داده شده است.

۲-۲- مدل‌سازی هواشناسی

پیش‌بینی‌های جوی، پایه و اساس ارزیابی سیلاب و خسارت آن در بسیاری از فعالیت‌های اقتصادی، اجتماعی، کشاورزی و غیره هستند. بارش نیز عامل اصلی و محرک برای سیلاب‌های شهری به‌شمار می‌رود، به‌طوری‌که هر دو عامل مقدار بارندگی و الگوهای بارشی به‌طور قابل‌توجهی بر تکامل فرآیندهای سیلاب تأثیرگذار است (Bartholmes and Todini, 2005). مدل عددی پیش‌بینی هواشناسی WRF از اولین مدل‌های پیش‌بینی جوی است که هم به ارائه پیش‌بینی‌های کاربردی می‌پردازد و هم نیازهای تحقیقاتی محققان را برآورده می‌سازد. این مدل حاصل تلاش گروهی از

دانشمندان در موسسات تحقیقاتی و دانشگاه‌های مختلف است (Michalakes et al., 2001; Skamarock et al., 2005) مدل WRF دارای دو هسته دینامیکی ARW⁴ و NMM⁵ است. هر دو هسته دینامیکی از قواعد علمی مدل‌سازی اویلری در کنار داده‌های جغرافیایی به همراه داده‌های هواشناسی استفاده می‌کنند. سامانه مدل‌سازی WRF شامل ۴ برنامه اصلی است که عبارتند از: سیستم پیش‌پردازش (WPS⁶)، سیستم ادغام داده‌ها به نام WRFDA⁷، هسته دینامیکی مدل به نام ARW و ابزارهای گرافیکی پس‌پردازش و بصری‌سازی داده‌ها. در سیستم پیش‌پردازش گر (WPS) WRF پردازش‌های لازم بر روی شبکه جغرافیایی و هواشناسی برای ورود به فرآیند شبیه‌سازی انجام می‌شود. با استفاده از برنامه WRFDA امکان تصحیح و افزایش دقت مدل به کمک داده‌های هواشناسی فراهم است. مدل ARW دارای چند برنامه برای مقاردهی اولیه و حل معادلات مکانی و زمانی است. در این مطالعه، دو دامنه با نسبت ۳ به ۱ (تفکیک مکانی دامنه اصلی ۱۵ کیلومتر، تفکیک مکانی زیردامنه ۵ کیلومتر) در نظر گرفته شده است. پیکربندی فیزیکی مورد استفاده شامل طرح‌واره‌های میکروفیزیکی WDM5⁸، تابش موج بلند RRTM⁹، تابش موج کوتاه Dudhia، لایه مرزی ACM2¹⁰، سطح زمین Noah MP¹¹، همرفت Grell 3D است. همچنین، داده‌های بازتحلیل FNL¹² برای تعیین شرایط مرزی و اولیه در مدل WRF

مورد استفاده قرار گرفته است. اجرای مدل WRF در گام زمانی ۶ ساعته و برای بازه زمانی ۱۳۹۸/۰۱/۱۱ تا ۱۳۹۸/۰۱/۱۸ انجام شده است. باتوجه به تجارب سایر کشورها در زمینه کاربرد پیش‌بینی‌های هواشناسی برای هشدار سیلاب، این داده‌ها بهترین عملکرد را برای کاربرد داشته است (Flesch and Reuter, 2012; Givati et al., 2019; Tian et al., 2016). اگرچه مدل WRF به‌طور ذاتی در پیش‌بینی بارش‌های حدی و مقیاس‌های کوچک با چالش‌هایی مواجه است، در مطالعه حاضر برای کاهش این چالش‌ها، اقداماتی اتخاذ شده است که عبارتند از: (۱) تصحیح اریبی خروجی‌های بارش WRF با استفاده از روش نگاشت چندک، (۲) استفاده از تنظیمات پیشرفته پارامترسازی فیزیکی (مانند طرح‌واره‌های میکروفیزیک، همرفت و لایه مرزی) و رزولوشن مکانی بالا مبتنی بر نتایج تحقیق Koochi et al. (2024) که در آن با ارزیابی پیکربندی‌های فیزیکی مختلف برای شبیه‌سازی بارش در حوضه پلدختر، مناسب‌ترین پیکربندی فیزیکی ارائه شده است، و (۳) ارزیابی نتایج با داده‌های مشاهداتی در رویداد حدی. در تحقیق حاضر پس از تنظیم مدل هواشناسی WRF از خروجی‌های مدل مذکور برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و مدل‌سازی درصد خسارت سیلاب استفاده شده است. دامنه‌های محاسباتی مدل WRF و موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

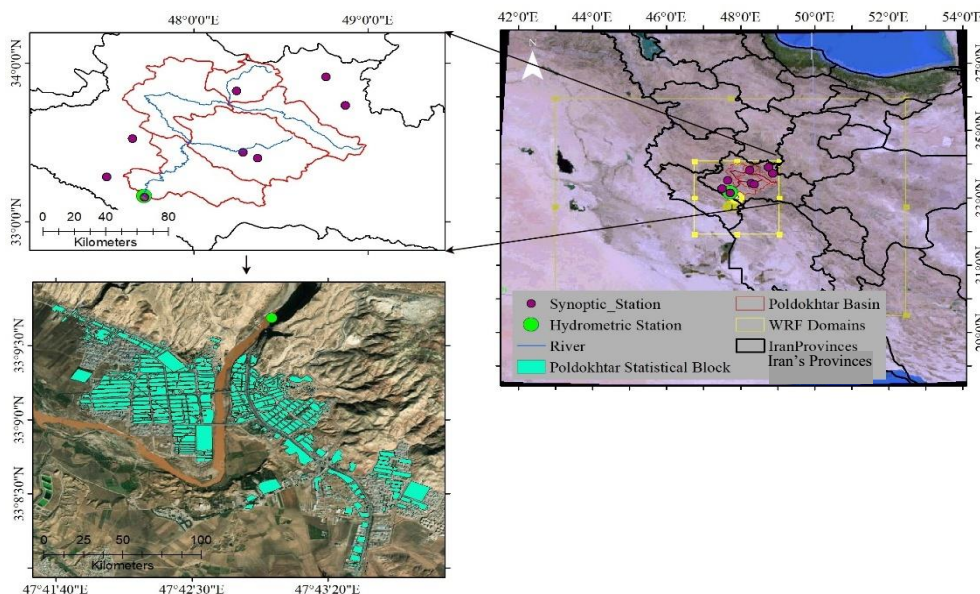


Fig. 1- Computational domains considered for the WRF (right), the studied basin for hydrological simulation (left, top), the area of Poldokhtar city for hydraulic and damage simulation (left, bottom)
 شکل ۱- دامنه‌های محاسباتی در نظر گرفته شده برای مدل WRF (سمت راست)، حوضه مورد مطالعه برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی (سمت چپ، بالا)، محدوده شهر پلدختر برای شبیه‌سازی هیدرولیکی و خسارت (سمت چپ، پایین)

۲-۳- مدل سازی هیدرولوژیکی

در تحقیق حاضر، برای شبیه سازی هیدرولوژیکی حوضه پلدختر از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS (HEC, 2000) استفاده شده است. مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در رده مدل های Link Lumped قرار دارد و یک مدل شبیه ساز سیلاب برای وقایع رخدادی قلمداد می شود. شماتیک تهیه شده برای حوضه پلدختر (شامل: ۵ زیرحوضه و ۲ آبراهه) در مطالعه پیش رو در شکل ۲ نشان داده شده است. مساحت حوضه مورد شبیه سازی ۸۱۶۵ کیلومترمربع است. برای شبیه سازی تبدیل بارش به رواناب، تلفات نفوذ، جریان پایه در زیرحوضه ها به ترتیب از روش SCS Unit Hydrograph، SCS Curve Number و ثابت ماهانه استفاده شد. همچنین، برای روندیابی جریان در آبراهه از مدل ماسکینگهام استفاده شده است. با توجه به گام زمانی داده های بارش (۶ ساعته) گام زمانی برای شبیه سازی هیدرولوژیکی و تخمین هیدروگراف سیلاب، ۶ ساعت در نظر گرفته شده است. روش SCS Unit Hydrograph¹³ یک روش ساخت هیدروگراف واحد بدون بعد مصنوعی^{۱۴} به شمار می آید و توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا توسعه داده شده است. در این روش پس از محاسبه زمان تأخیر حوضه، زمان رسیدن به دبی اوج و همچنین دبی اوج محاسبه شده و با کاربرد هیدروگراف واحد بدون بعد، هیدروگراف سیلاب حوضه محاسبه می شود (معادلات ۱ تا ۳). روش SCS Curve Number باران مازاد را به عنوان تابعی از بارش تجمعی، پوشش خاک، کاربری اراضی و رطوبت پیشین و با استفاده از معادله ۴ تخمین می زند (Alizade, 2020; Safavi, 2009; Mahdavi, 2005).

$$Q_p = 0/208 \frac{A}{t_p} \quad (1)$$

$$t_p = \frac{D}{2} + t_{lag} \quad (2)$$

$$t_{lag} = \frac{L^{0/8} \times (S + 1)^{0/7}}{1900Y^{0/5}} \quad (3)$$

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a + S)} \quad (4)$$

در رابطه فوق، D : مدت تداوم بارش، A : مساحت حوضه، t_{lag} : زمان تأخیر حوضه، L : طول بزرگترین آبراهه (استخراج شده از روی مدل های رقومی ارتفاعی) در واحد فوت، S : حداکثر پتانسیل نگهداشت آب در حوضه و Y : متوسط شیب حوضه (درصد)؛ میزان رواناب (میلی متر) تا زمان t : P : عمق بارش در زمان t (میلی متر)، I_a : مقدار جذب اولیه (میلی متر)، S : حداکثر پتانسیل نگهداشت آب در سطح حوضه (میلی متر) است که معیاری از توانائی حوضه آبریز در جمع کردن و حفظ بارش است.

در روش ماسکینگهام، روندیابی در رودخانه براساس رابطه دبی-ذخیره متغیر به صورت هیدرولوژیکی به عبارتی با استفاده از

معادله پیوستگی، انجام می شود. در این روش، حجم سیلاب در رودخانه به دو بخش منشوری و گوه ای تقسیم می شود. لذا حجم کلی ذخیره برابر است با مجموع حجم این دو ذخیره (معادله ۵) (Alizade, 2020; Safavi, 2009; Mahdavi, 2005).

$$S = K(XI + (1-X)Q) \quad (5)$$

مقدار X مرتبط با شکل ذخیره گوه ای است و از مقدار صفر برای ذخیره از نوع مخازن (تراز افقی سطح آب) تا ۰/۵ برای گوه کامل تغییر می کند. K ضریب ذخیره مربوط به ذخیره منشوری، I دبی ورودی به رودخانه و Q دبی خروجی از رودخانه است.

بنابراین با توجه به روش های مورد استفاده برای شبیه سازی هریک از فرآیندهای مدل هیدرولوژیکی و بر مبنای آنالیز حساسیت انجام شده در تحقیقات پیشین (RostamiZadeh et al., 2013; Garmeh et al., 2015; Roodaki and Azizian, 2020)، پارامترهای تصمیم برای واسنجی مدل هیدرولوژیکی شامل زمان تأخیر (T_{lag})، شماره منحنی (CN^{15}) برای زیرحوضه ها، X و K برای آبراهه ها است. زمان تأخیر یک حوضه بیانگر میزان تأخیر در پاسخ یک حوضه به بارش است. پارامتر شماره منحنی حوضه وابسته به کاربری اراضی، پوشش گیاهی و گروه های هیدرولوژیکی خاک در سطح حوضه است. برای هر زیرحوضه بایستی عددی که برآیند نوع خاک و کاربری اراضی کل زیرحوضه باشد، به مدل معرفی نمود. X و K نیز ضرایب مربوط به فرآیند روندیابی سیلاب در رودخانه هستند. پس از تعریف مشخصات حوضه در مدل هیدرولوژیکی، فرآیند بهینه سازی مقدار متغیرهای تصمیم (متغیرهای مورد واسنجی) با استفاده از الگوریتم بهینه سازی خودکار موجود در مدل HEC-HMS به انجام رسیده است. در این فرآیند مقدار شاخص کارایی نش ساتکلیف^{۱۶} (NSE) بین هیدروگراف مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری و هیدروگراف شبیه سازی شده (مبتنی بر بارش مشاهداتی) به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. در این پژوهش از هیدروگراف سیلاب مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری پلدختر در تاریخ ۱۳۹۵/۰۱/۲۴ تا ۱۳۹۵/۰۲/۰۱ برای واسنجی و از هیدروگراف سیلاب در رخدادهای ۱۳۹۷/۰۹/۰۲ تا ۱۳۹۷/۰۹/۰۷ و ۱۳۹۸/۰۱/۱۱ تا ۱۳۹۸/۰۱/۱۸ برای صحت سنجی مدل هیدرولوژیکی استفاده شده است.

۲-۴- مدل سازی هیدرولیکی دوبعدی جریان با مدل HEC-RAS

شبیه سازی مناسب پهنه سیلاب و استخراج مشخصات جریان همچون عمق از جمله نیازهای اساسی در فرآیند ارزیابی و برآورد خسارت سیلاب است که طی فرآیند مدل سازی هیدرولیکی حاصل می شوند. با توجه به اینکه هدف از مدل سازی هیدرولیکی سیلاب

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + gh \frac{\partial h}{\partial y} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - gn^2 v \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{5}{3}}} \quad (8)$$

که در آن، u مؤلفه x از سرعت جریان، v مؤلفه y از سرعت جریان، x و y مختصات مقطع جریان، h متوسط عمق آب در مقطع جریان، n ضریب زبری مانینگ و Z_b ارتفاع بستر است.

در این بخش، کاربرد نتایج برای مدل‌سازی خسارت ناشی از سیلاب در منطقه شهری پلدختر است؛ مدل هیدرولیکی دو بعدی HEC-RAS (HEC, 2021) مبنای مدل‌سازی هیدرولیکی قرار گرفته است. در این مدل از معادلات دوبعدی سنت‌ونانت در قالب دو فرم موج دینامیک و موج دیفیوژن برای شبیه‌سازی دوبعدی جریان استفاده می‌شود. معادلات حاکم بر جریان‌های ناپایدار معادله سنت‌ونانت است (معادلات ۶ تا ۸). که در آن، معادله (۶) معادله پیوستگی، معادلات (۷) و (۸) نیز به ترتیب معادله تکانه X و Y هستند (Sleigh and Goodwill, 2000):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - gn^2 u \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{\frac{5}{3}}} \quad (7)$$



Fig. 2- Schematic of the Poldokhtar basin in the HEC-HMS hydrological model in this study

شکل ۲- شماتیک حوزه پلدختر در مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در مطالعه حاضر

¹⁹SRTM از عملکرد قابل‌قبولی در ساخت مدل هندسی رودخانه و مدل‌سازی سیلاب توسط مدل HEC-RAS برخوردار هستند. علاوه‌براین، مدل هیدرولیکی HEC-RAS از جمله مدل‌هایی است که از وابستگی بسیار کمی به ابعاد سلولی نقشه توپوگرافی برخوردار

یکی از ورودی‌های مهم این مدل، نقشه رقمی ارتفاعی^{۱۷} منطقه است. در تحقیقاتی که توسط Azizian and Brocca (2020) به انجام رسیده است، نشان داده شد که منابع ارتفاعی مبتنی بر سنجنش از دور و در توان تفکیک ۳۰ متری همچون ALOS¹⁸ و

است (Azizian, 2019). به همین دلیل در این مطالعه از منبع ارتفاعی ALOS به عنوان ورودی مدل هیدرولیکی استفاده شده است. با توجه به توان تفکیک نقشه ارتفاعی مورد استفاده، ابعاد مش بندی در این مطالعه برای مدل سازی هیدرولیکی ۱۰۰ در ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است. براساس مطالعه Azizian and Samadi (2020) ضریب زبری مانینگ از جمله پارامترهایی است که امکان تخمین مقدار دقیق و قطعی برای آن در سطح حوضه وجود ندارد و لازم است که طی فرآیند واسنجی و مقایسه پارامترهای جریان شبیه سازی شده نسبت به مقادیر مشاهداتی، مقدار ضریب مانینگ تعیین شود. پس از شبکه بندی دوبعدی محدوده مورد مطالعه، مقداری اولیه برای ضریب مانینگ در نظر گرفته شده است. مقدار اولیه ضریب زبری مانینگ با استفاده از روش کاون که توسط اداره حفاظت خاک و سازمان زمین شناسی آمریکا ارائه شده، برآورد شده است. در این روش ضریب مانینگ در آبراهه اصلی و سیلابدشت ها از رابطه ۹ به دست می آید.

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) m \quad (9)$$

n_b : ضریب مانینگ پایه که براساس دانه بندی مواد تشکیل دهنده جداره آبراهه و یا سیلابدشت تعیین می شود. n_1 : ضریب مانینگ تعدیلی برای درجه بی نظمی سطح آبراهه اصلی و یا سیلابدشت، n_2 : ضریب مانینگ تعدیلی برای تغییرات مقاطع عرضی، n_3 : ضریب مانینگ تعدیلی برای موانع آبراهه اصلی یا سیلابدشت، n_4 : ضریب مانینگ تعدیلی برای پوشش گیاهی آبراهه اصلی یا سیلابدشت، و m : ضریب اصلاحی زبری براساس درجه پیچان رودی آبراهه اصلی هستند.

مدل سازی هیدرولیکی با تعیین شرایط مرزی براساس هیدروگراف سیلاب در بالادست و عمق نرمال در پایین دست رودخانه مورد مطالعه به انجام رسیده است. شرط مرزی عمق نرمال فقط برای خروج جریان از سطح جریان دوبعدی (پایین دست) کاربرد دارد. لازم بذکر است که از هیدروگراف جریان معمولاً برای ورود جریان به یک سطح دوبعدی جریان (بالادست) استفاده می شود. پس از تنظیم مدل هیدرولیکی برای حوضه مورد مطالعه، مدل به ازای مقادیر مختلف از ضریب مانینگ مورد اجرا و واسنجی قرار گرفته است. تابع هدف در فرآیند واسنجی مدل هیدرولیکی، میزان انطباق منحنی دبی-اشل مدل سازی شده براساس بارش مشاهداتی با منحنی دبی-اشل مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری پلدختر بوده است. به این ترتیب که مقداری برای ضریب زبری مانینگ به عنوان مقدار بهینه شناخته شده است که منحنی دبی-اشل حاصل از کاربرد آن، از بیشترین انطباق با منحنی دبی-اشل مشاهداتی برخوردار بوده است. در این پژوهش از منحنی دبی-اشل در ایستگاه هیدرومتری پلدختر در تاریخ ۱۳۹۵/۰۱/۲۴ تا ۱۳۹۵/۰۲/۰۱ برای واسنجی و از

منحنی دبی-اشل طی رخدادهای ۱۳۹۷/۰۹/۰۲ تا ۱۳۹۷/۰۹/۰۷ و ۱۳۹۸/۰۱/۱۱ تا ۱۳۹۸/۰۱/۱۸ برای صحت سنجی مدل هیدرولیکی استفاده شده است. پس از واسنجی و تعیین مقدار بهینه برای ضریب مانینگ در حوضه مورد مطالعه، برای مقایسه عملکرد مدل عددی WRF در شبیه سازی هیدرولیکی سیلاب، هیدروگراف حاصل از کاربرد مدل WRF به عنوان شرط مرزی رودخانه در بالادست در نظر گرفته شده و مدل سازی هیدرولیکی به انجام رسیده است.

۲-۵- توسعه مدل منطقه ای خسارت

به منظور توسعه مدل منطقه ای برای برآورد خسارت ناشی از سیلاب در مناطق مسکونی، از داده های خسارت و عمق سیلاب مشاهداتی در محدوده شهرستان پلدختر دریافتی از سازمان مدیریت بحران کشور استفاده شده است. پس از وقوع سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در حوضه پلدختر، این داده ها مبتنی بر بررسی های میدانی تیم های تخصصی این سازمان جمع آوری شده است. برای این منظور، تیم های کارشناسی سازمان مدیریت بحران، بلافاصله پس از وقوع سیلاب، با حضور در مناطق آسیب دیده، اقدام به ثبت کمی و کیفی خسارات وارد شده به ساختمان های مسکونی، زیرساخت ها و املاک عمومی نمودند. پارامترهایی نظیر عمق آب در نقاط مختلف، مترژ ساختمان های آسیب دیده، و درصد تخریب هر واحد مسکونی با استفاده از ابزارهای اندازه گیری و فرم های استاندارد ثبت شد. ارزش سال ۱۳۹۸ (با در نظر گرفتن نرخ مصوب وزارت راه و شهرسازی) و برآورد کارشناسی هزینه های بازسازی/نوسازی محاسبه شده است. برای برآورد بهترین منحنی بین داده های عمق و خسارت، توابع مختلفی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت برترین مدل عمق-خسارت برای ساختمان های با کاربری مسکونی معرفی شده است.

۲-۶- شاخص های ارزیابی

در این پژوهش برای ارزیابی نتایج شبیه سازی هیدرولیکی و مقادیر مشاهداتی شاخص درصد تطابق (F) (Cook and Merwade, 2009) و قدر مطلق خطای نسبی R^2 (Cook and Merwade, 2009) محاسبه شده است. شاخص درصد تطابق میزان تطابق کلی دو پهنه سیلاب با یکدیگر را نشان می دهد. مقدار بهینه شاخص F برابر با ۱ است که بیانگر انطباق کامل پهنه سیلاب شبیه سازی شده با پهنه مشاهداتی است (Jamali et al., 2018). شاخص قدرمطلق خطای نسبی حاکی از عملکرد مدل هیدرولیکی در شبیه سازی منحنی دبی-اشل است. پایین بودن مقادیر این شاخص، حاکی از انطباق بیشتر منحنی دبی-اشل مدل سازی شده با منحنی

مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری است. شاخص‌های درصد تطابق و قدر مطلق خطای نسبی را می‌توان با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه نمود.

$$F = \left(\frac{A_{om}}{A_o + A_m - A_{om}} \right) \times 100 \quad (10)$$

$$ARE = \left| \frac{T_m - T_o}{T_o} \right| \times 100 \quad (11)$$

که در آن، A_{om} : وجه اشتراک مساحت پهنه سیلاب مشاهداتی و مدل‌سازی، A_o : مساحت پهنه سیلاب مشاهداتی و A_m : مساحت پهنه سیلاب مدل‌سازی شده، T_o : تراز سطح سیلاب مشاهداتی و T_m : تراز سطح سیلاب مدل‌سازی شده، است.

برای ارزیابی ساختار کلی مدل منطقه‌ای خسارت و همچنین خروجی مدل‌سازی هیدرولوژیکی از شاخص‌های آماری ضریب همبستگی^{۳۱} (CC) (Pearson, 1896)، میانگین قدر مطلق خطا^{۳۲} (MAE) (Stanski et al., 1989)، ریشه متوسط مربعات خطا^{۳۳} (RMSE) (Hyndman and Koehler, 2006) و نش‌ساتکلیف (NSE) (Nash and Sutcliffe, 1970) استفاده شده است. شاخص‌های مذکور را می‌توان به ترتیب با استفاده از روابط (۱۲) تا (۱۵) محاسبه نمود.

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D}_i)(D_i^{obs} - \bar{D}_i^{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (D_i - \bar{D}_i)^2 \sum_{i=1}^n (D_i^{obs} - \bar{D}_i^{obs})^2}} \quad (12)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |D_i^{obs} - D_i| \quad (13)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (D_i^{obs} - D_i)^2} \quad (14)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (15)$$

که در آن، D_i : خسارت مدل‌سازی شده، D_i^{obs} : خسارت مشاهده‌ای، \bar{D}_i : متوسط خسارت مدل‌سازی شده، \bar{D}_i^{obs} : متوسط خسارت مشاهده‌ای و O_i : مقادیر مشاهداتی، S_i : مقادیر شبیه‌سازی، \bar{O} : میانگین مقادیر مشاهداتی هستند.

۷-۲- تعیین ارزش ریالی ساختمان‌ها

در تحلیل ریسک روش‌های مختلفی از جمله کاربرد روش‌های یکنواخت (در نظر گرفتن یک مقدار متوسط به عنوان ارزش ریالی ساختمان‌ها) تا مدل‌های رگرسیون پیچیده (لحاظ نمودن ویژگی‌های ساختمان) برای تخمین ارزش ریالی هر ساختمان وجود دارد. در این مطالعه از ۳ روش برای تخمین ارزش ریالی ساختمان‌ها و تبدیل درصد خسارت به صورت واحد پولی استفاده شده است که

در ادامه به جزئیات روش‌های مذکور اشاره شده است. لازم‌به‌ذکر است که ارزش ریالی مورد استفاده در این پژوهش هزینه ساخت و ساز هر مترمربع از ساختمان‌ها در سال وقوع سیلاب (سال ۱۳۹۸) است. این هزینه شامل قیمت ساخت هر مترمربع، نازک‌کاری، سفت‌کاری، تأسیسات برق، تجهیزات مکانیکی است و هزینه‌های جانبی ساخت و ساز شامل هزینه‌های دریافت مجوز، خلافی، طراحی، نظارت، عوارض، بیمه کارگران، مالیات، ثبت اسناد، املاک، آزمایشات، پسماند، تهیه شناسنامه، بیمه در آن لحاظ نشده است. مدل‌های مورد استفاده برای تبدیل میزان خسارت نسبی به خسارت مطلق عبارتند از:

مدل اول (M1): در این مدل از رویکردی ساده و رایج برای تبدیل درصد خسارت به خسارت ریالی استفاده گردیده است. به این ترتیب که با فرض میانگین ثابتی برای ارزش و مترژ ساختمان و تلفیق این دو با یکدیگر، برآوردی از ارزش ریالی ساختمان‌های منطقه ارائه شده است و پس از لحاظ نمودن میزان درصد خسارت، خسارت ریالی تخمین زده شد.

مدل دوم (M2): در این مدل سعی شده است تا حدی تغییرات مکانی مربوط به مترژ ساختمان‌های شهر پلدختر در نظر گرفته شود. برای این کار از نقشه بلوک‌های آماری شهر پلدختر استفاده شده است که در پژوهش حاضر از نقشه‌های آماده شده توسط مرکز آمار کشور و براساس سرشماری نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ استفاده شده است. در نقشه مذکور، اطلاعات جمعیتی و همچنین داده‌های مربوط به فراوانی واحدهای ساختمانی با مترژهای مختلف واقع در هر بلوک آماری ذکر شده است. با توجه به اینکه دقت این نقشه‌ها در سطح بلوک‌های آماری است و در آن‌ها اطلاعات دقیقی از جانمایی هر ساختمان و مترژ آن ذکر نشده است، در ابتدا به روش میانگین‌گیری وزنی و براساس فراوانی ساختمان‌ها در مترژهای مختلف، متوسط مساحت واحدهای ساختمانی واقع در هر بلوک آماری محاسبه شد. سپس با توجه به هزینه ساخت و ساز برای هر مترمربع ساختمان و نقشه مکانی درصد خسارت، نقشه مکانی مربوط به مقدار خسارت ریالی در هر بلوک آماری تهیه شده است.

مدل سوم (M3): از آنجایی که معمولاً تمام ساختمان‌های موجود در منطقه جدید نبوده و همچنین در برخی مواقع میزان خسارت در حدی نیست که نیاز به ساخت مجدد ساختمان وجود داشته باشد، بنابراین استفاده از ارزش ریالی ساخت و ساز برای هر مترمربع از ساختمان می‌تواند با بیش‌برآوردی در تخمین خسارت همراه باشد (Arrighi et al., 2022). بنابراین مدل سوم مبتنی بر کاربرد ضریبی با عنوان هزینه بازسازی/نوسازی^{۳۴} (RC) است. RC به عنوان کسری از ارزش بازار ساختمان در نظر گرفته می‌شود و مربوط به میانگین تفاوت بین ارزش بازار ساختمان‌های جدید و

ساختمان‌های قدیمی‌تر است که نیاز به بازسازی دارند (Arrighi et al., 2013b). مقدار این شاخص برای کاربرد در منطقه مورد مطالعه معادل ۰/۴۵ تعیین شده است.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی

در گام اول برای بررسی کارایی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب، مدل براساس مقادیر بارش مشاهداتی مورد واسنجی و صحت‌سنجی قرار گرفت و مقادیر بهینه برای پارامترهای تصمیم در حوضه پلدختر در جدول ۱ ارائه شده است. باتوجه به نتایج مشخص است که محدوده تغییرات شماره منحنی در زیرحوضه‌های محدوده مطالعاتی از ۵۵/۸۰ تا ۷۸/۷۰ و محدوده تغییرات زمان تأخیر در زیرحوضه‌ها ۲۸۰/۱۰ تا ۶۳۰/۰۰ دقیقه برآورد شده است. همچنین، ضرایب X و K برای روندیابی سیلاب در آبراهه‌ها به روش ماسکینگ‌هام به ترتیب ۰/۱۰ تا ۰/۳۰ و

۱۰/۹۰ تا ۱۵/۷۰ ساعت برآورد شده است. همانطور که مشخص است عملکرد مدل در شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب در دوره واسنجی (رخداد ۱۳۹۵) قابل قبول ارزیابی می‌شود. شاخص کارایی نش‌ساتکلیف در دوره واسنجی ۰/۹۶ تخمین زده شده است (شکل ۳). درصد خطای مدل در تخمین دبی اوج در دوره واسنجی ۳/۱۵ درصد برآورد شده است. همچنین همانطور که مشخص است مدل هیدرولوژیکی طی دوره‌های صحت‌سنجی (سیلاب‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸) از عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی شکل هیدروگراف و تخمین دبی اوج برخوردار بوده است، به طوری که مقدار شاخص کارایی نش‌ساتکلیف بیش از ۰/۹۰ و مقدار خطا در تخمین دبی اوج سیلاب کمتر از ۱۰/۰۰ درصد است. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS از قابلیت مناسبی برای شبیه‌سازی سیلاب حوضه پلدختر و بررسی دقت مدل WRF برای این مهم برخوردار است.

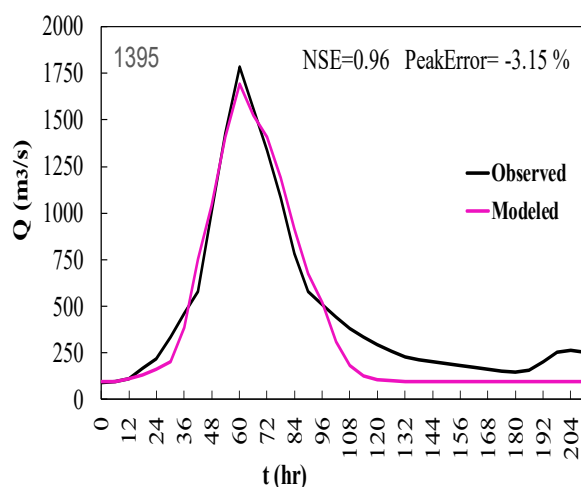
Table 1- Optimal values of decision parameters for the studied basin

جدول ۱- مقادیر بهینه پارامترهای تصمیم برای حوضه مورد مطالعه

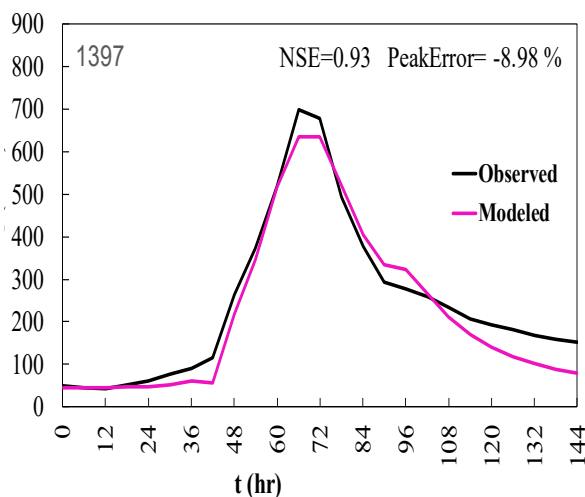
		K_hr	X	Tlag_min	CN
River5	River3				
River5	River3				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				
SubBasin5	SubBasin4				
SubBasin3	SubBasin2				
SubBasin1	SubBasin5				
SubBasin4	SubBasin3				
SubBasin2	SubBasin1				

Shirali et al. (2020) شبیه‌سازی سیلاب هم‌راستا با نتایج پژوهش است، در تحقیق فوق، با کاربرد مدل WRF برای شبیه‌سازی سیلاب در حوضه کارون نشان داده شد که می‌توان از خروجی‌های مدل عددی WRF در گام زمانی ساعتی برای پیش‌بینی سیلاب بهره برد.

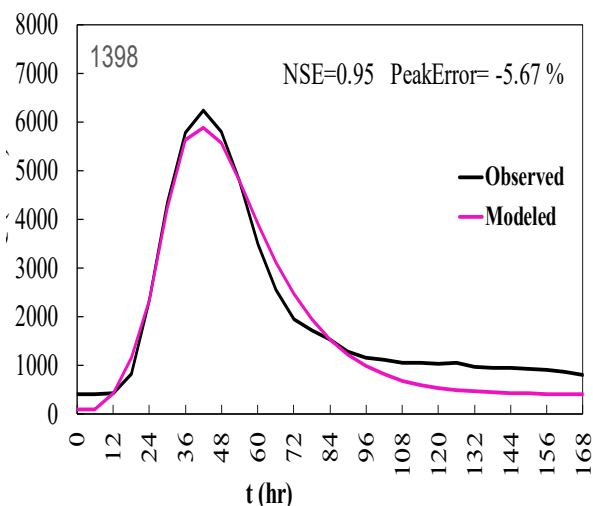
Saedi et al. (2020a) نیز در تحقیقی با ارزیابی تحلیل عدم قطعیت پیش‌بینی سیل با هفت مدل عددی پیش‌بینی گروهی بارش توسط مدل بارش-رواناب GR4J برای سیل گلستان در بهار ۱۳۹۸ نشان دادند که تصحیح اریبی از تأثیر بالایی بر بهبود پیش‌بینی سیلاب در این حوضه برخوردار بوده است، به طوری که پیش‌بینی جریان توسط مدل‌های عددی در حالت خام قابل قبول نبوده است. علاوه بر این، عملکرد قابل قبول مدل WRF در



واسنجی مدل هیدرولوژیکی مبتنی بر بارش مشاهداتی (رخداد ۱۳۹۵)



صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی مبتنی بر بارش مشاهداتی (۱۳۹۷)



صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی مبتنی بر بارش مشاهداتی (۱۳۹۸)

Fig. 3- Calibration and validation of the HEC-HMS hydrological model based on observed precipitation

شکل ۳- واسنجی و صحت‌سنجی مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS براساس بارش مشاهداتی

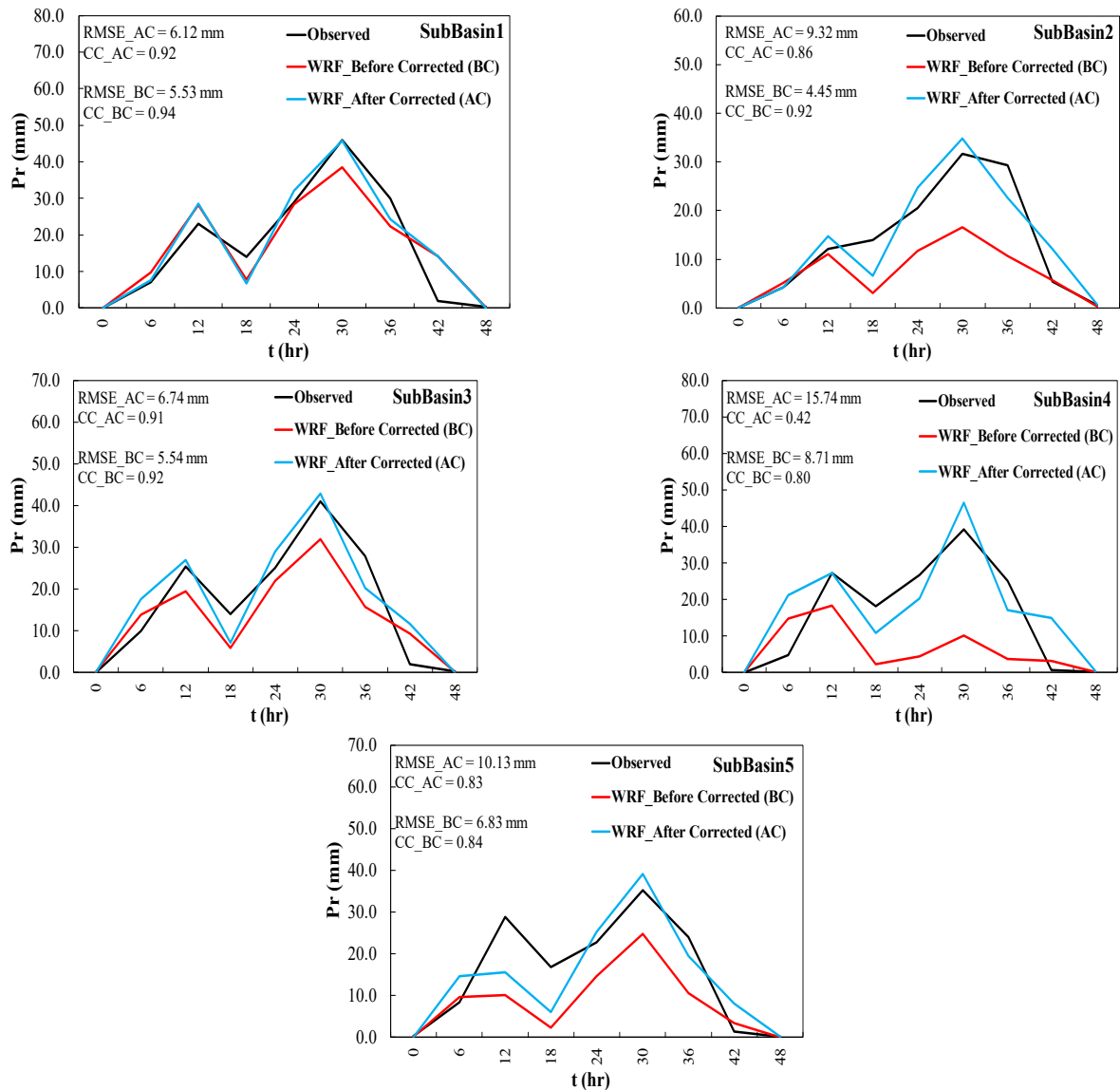


Fig. 4- Observed and WRF precipitation time series before and after bias correction
 شکل ۴- سری زمانی بارش مشاهداتی و WRF پیش و پس از تصحیح اریبی

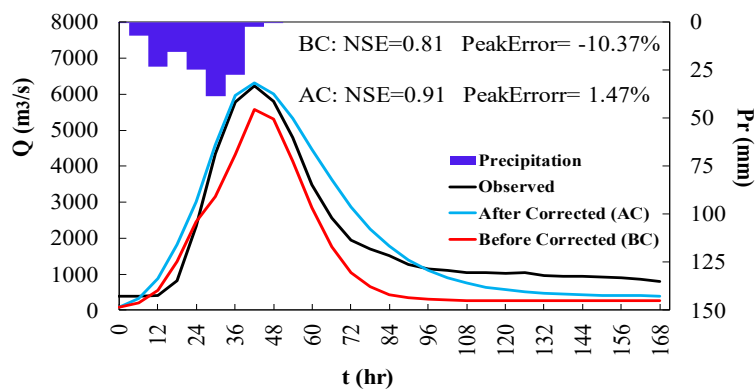
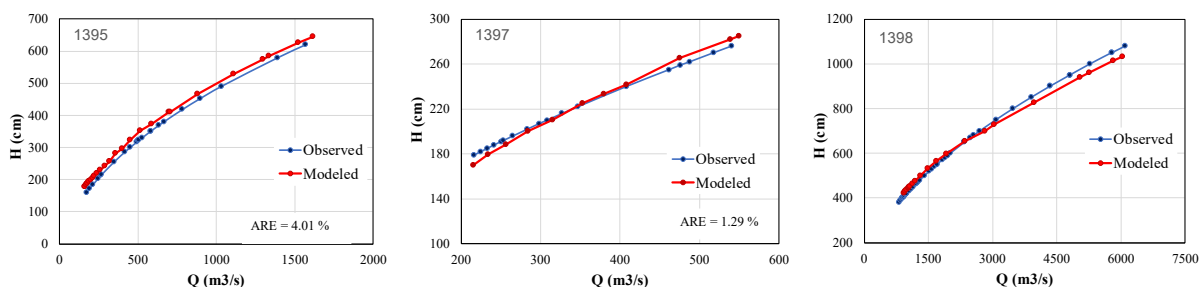


Fig. 5- Flood hydrograph simulated by the HEC-HMS hydrological model based on WRF precipitation
 شکل ۵- هیدروگراف سیلاب شبیه‌سازی شده توسط مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS براساس بارش WRF

۲-۳- نتایج مدل‌سازی هیدرولیکی

در شکل ۶ منحنی دبی-اشل ثبت شده در ایستگاه هیدرومتری پلدختر به همراه منحنی دبی-اشل به دست آمده از اجرای مدل هیدرولیکی برای دوره واسنجی و صحت‌سنجی نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود منحنی دبی-اشل مدل‌سازی شده توسط مدل هیدرولیکی و براساس هیدروگراف سیلاب مشاهداتی در رخدادهای واسنجی و صحت‌سنجی در ایستگاه هیدرومتری از انطباق خوبی با منحنی دبی-اشل مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری برخوردار است. به طوری که مقدار قدرمطلق خطای نسبی پس از واسنجی مدل هیدرولیکی در شبیه‌سازی

منحنی دبی-اشل به ۴/۰۱ درصد محدود شده است که می‌تواند مناسب ارزیابی شود. همچنین، مقدار شاخص قدرمطلق خطا در شبیه‌سازی منحنی دبی-اشل، برای رخداد سیلاب ۱۳۹۸ که مبنای این مطالعه برای ارزیابی خسارت در نظر گرفته شده، ۲/۸۷ درصد برآورد شده است. (Arash et al. (2020) نیز در پژوهشی نشان دادند که مدل رقومی ارتفاعی ALOS در کنار مدل هیدرولیکی HEC-RAS توانسته است مشخصات هیدرولیکی سیلاب شامل تراز سطح آب، پهنه و عمق سیلاب را با دقت بالایی شبیه‌سازی نماید.



و اسنجی مدل هیدرولیکی (رخداد ۱۳۹۵) صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی (رخداد ۱۳۹۷) صحت‌سنجی مدل هیدرولیکی (رخداد ۱۳۹۸)

Fig. 6- Comparison of the modeled discharge-stage curve based on the observed flood hydrograph with the observed discharge-stage curve at the Poldokhtar hydrometric station during calibration and validation

شکل ۶- مقایسه منحنی دبی-اشل مدل‌سازی شده براساس هیدروگراف سیلاب مشاهداتی با منحنی دبی-اشل مشاهداتی در ایستگاه هیدرومتری پلدختر طی واسنجی و صحت‌سنجی

مقاطع عرضی فوق استخراج شد. در شکل ۸ تغییرات عمق سیلاب و عرض سطح آب به دست آمده از کاربرد هیدروگراف سیلاب مربوط به باند اطمینان ۹۵ درصد و میانگین مدل عددی WRF به عنوان شرط مرزی در مدل هیدرولیکی HEC-RAS، در برابر عمق و عرض سطح آب به دست آمده از تعیین هیدروگراف سیلاب مشاهداتی به عنوان شرط مرزی در مدل‌سازی هیدرولیکی نشان داده شده است. براساس نتایج متوسط قدرمطلق خطا در شبیه‌سازی عمق سیلاب و عرض سطح آب به ترتیب ۲/۸۳ و ۱/۹۳ درصد است. همانطور که ملاحظه می‌شود استفاده از مدل عددی بارش WRF برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب و در نهایت شبیه‌سازی مشخصات هیدرولیکی جریان، از عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی عمق سیلاب و عرض سطح آب در محدوده مورد مطالعه برخوردار بوده است. با توجه به نتایج مشخص است که عمق سیلاب به دست آمده از کاربرد هر دو مدل عددی بارش علی‌رغم اندکی کم‌برآوردی دارای همبستگی مناسبی با عمق سیلاب حاصل از کاربرد

در این بخش نقشه پهنه سیلاب مدل‌سازی براساس هیدروگراف سیلاب WRF نسبت به پهنه سیلاب به دست آمده از کاربرد هیدروگراف سیلاب مبتنی بر بارش مشاهداتی مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۵). با توجه به الگوی پخش سیلاب در شکل ۷ و برای رخداد مورد مطالعه می‌توان دقت بالای مدل‌سازی هیدرولیکی را در برآورد پهنه سیلاب مشاهده نمود. همچنین، بررسی شاخص آماری F که بیانگر میزان شباهت بین پهنه سیلاب مدل‌سازی شده نسبت به پهنه سیلاب حاصل از هیدروگراف سیلاب مشاهداتی است، ۹۸ درصد تخمین زده شده است. این بدین معنا است که تطابق خیلی زیادی بین پهنه سیلاب مربوط به کاربرد هیدروگراف مدل عددی WRF برای تعیین شرایط مرزی مدل هیدرولیکی نسبت به پهنه سیلاب ناشی از کاربرد هیدروگراف سیلاب مشاهداتی وجود دارد.

برای بررسی هرچه بهتر کارایی مدل عددی هواشناسی WRF در شبیه‌سازی هیدرولیکی، ۱۵ مقطع عرضی در بازه مطالعاتی تعیین و مشخصات هیدرولیکی شامل عمق سیلاب و عرض سطح آب در

هیدروگراف سیلاب مشاهداتی حوضه برای شبیه‌سازی هیدرولیکی توسط مدل دوبعدی HEC-RAS است.

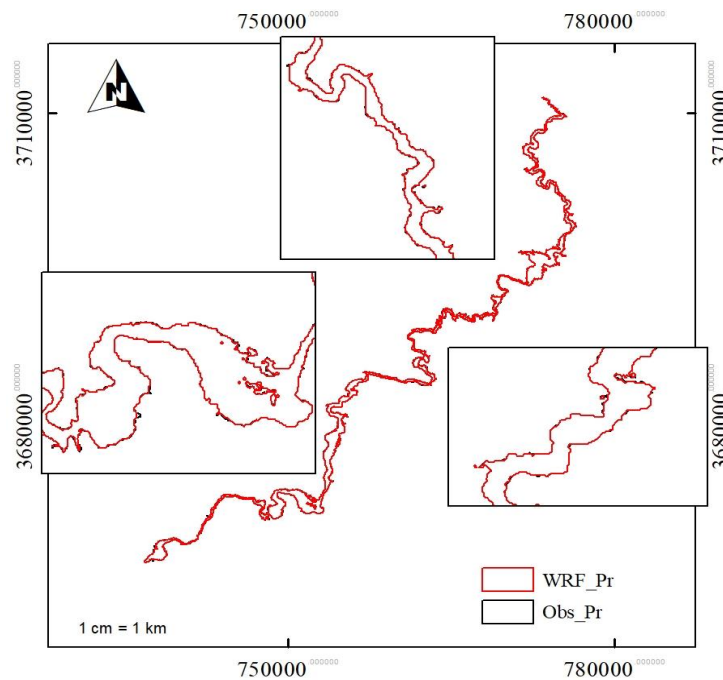


Fig. 7- Comparison of flood inundation using WRF numerical model flood hydrograph compared to the flood inundation of the observed hydrograph

شکل ۷- مقایسه پهنه سیلاب ناشی از کاربرد هیدروگراف سیلاب مدل عددی WRF نسبت به پهنه سیلاب حاصل از هیدروگراف سیلاب بارش مشاهداتی

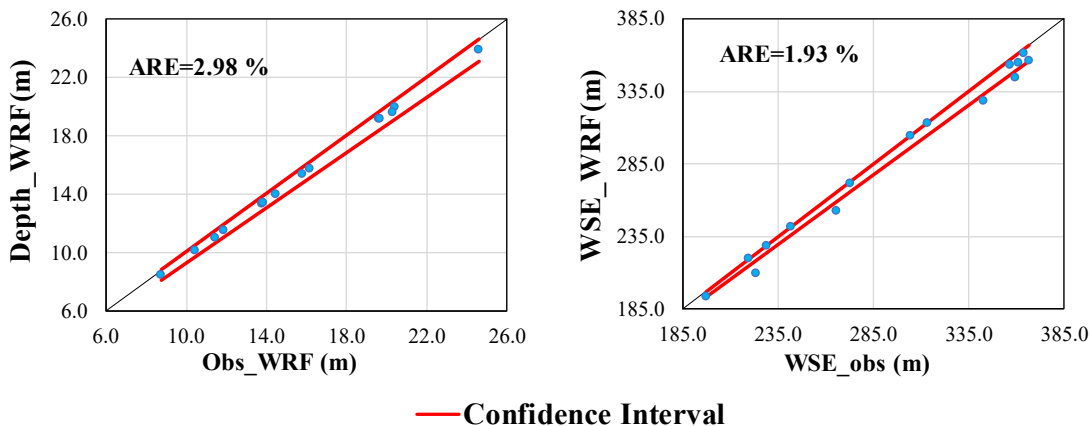


Fig. 8- Comparison of flood depth and WSE obtained from WRF and observed flood hydrograph
شکل ۸- مقایسه عمق سیلاب و عرض سطح آب به دست آمده از هیدروگراف سیلاب مربوط به داده‌های بارش WRF نسبت به مقادیر مربوط به هیدروگراف سیلاب مشاهداتی

۲ متر محدوده شده است. درحالی‌که در خط القعر رودخانه عمق جریان از ۵ متر تجاوز نموده است. بنابراین طی رخداد سیلاب فروردین ۱۳۹۸ برخی از ساختمان‌هایی که در حاشیه رودخانه واقع شده‌اند سیلابی با عمق بیش از ۲ متر و بعضاً تا ۳/۵ و ۴ متر را نیز

در شکل ۹ نقشه عمق جریان مدل‌سازی شده توسط مدل هیدرولیکی HEC-RAS ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود جریان وارد شده به محدوده شهری پلدختر دارای عمق کمتر از ۵ متر است و در بخش عمده‌ای از مناطق عمق جریان به

تجربه نموده‌اند. افزایش عمق سیلاب عبوری از این محدوده نشان‌دهنده پتانسیل بالای این منطقه برای ایجاد خسارات اقتصادی است.

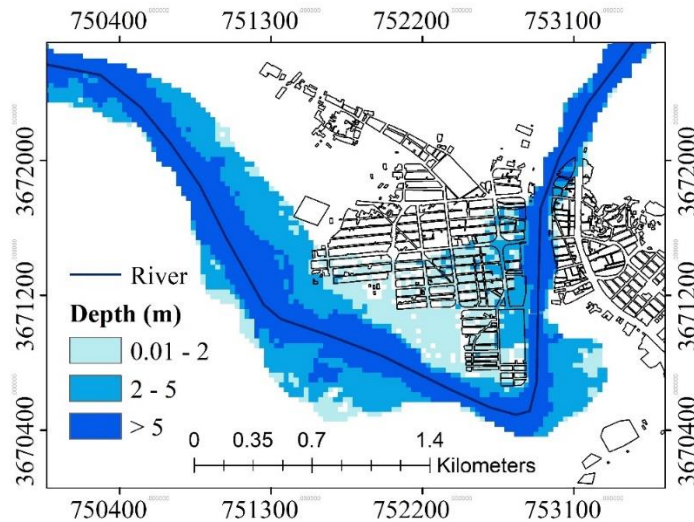


Fig. 9- Flood depth simulation in the Poldokhtar region based on 2D-HEC-RAS model
شکل ۹- نقشه شبیه‌سازی عمق سیلاب در منطقه پلدختر در مدل دو بعدی HEC-RAS

Table 2- Functions fitted to observed depth-damage data

جدول ۲- توابع برازش داده شده به داده‌های عمق-خسارت مشاهداتی

Model	Equation	X (m)
M1	$Y = 1 - \exp(-X^{1.12})$	$0.1 \leq$
M2	$Y = 1 - \exp(-0.94 \times X)$	$0.1 \leq$
M3	$Y = 0.21 + 0.33 \times X$	$0.1 - 2.4$
	$Y = 1$	$2.4 <$
M4	$Y = 0.008 + (0.82 \times X) + (-0.24 \times X^2) + (0.024 \times X^3)$	$0.1 - 4.5$
	$Y=1$	$4.5 <$

در این جدول Y درصد خسارت و X عمق جریان (متر) است.

در این روش از ترکیب دو تابع خطی مختلف استفاده شده است که در نتیجه مقدار شاخص RMSE در تخمین خسارت ناشی از سیلاب حدود ۱۳/۲۳ درصد برآورد شده است. همچنین، مقدار شاخص قدر مطلق خطای مدل در تخمین خسارت نسبت به سایر توابع بیشتر و برابر با ۱۰/۰۷ درصد است. با توجه به نتایج مشخص است که همبستگی خسارت‌های محاسباتی نسبت به مقادیر مشاهداتی در صورت کاربرد توابع مختلف از تفاوت قابل‌توجهی با یکدیگر

۳-۳- مدل منطقه‌ای خسارت سیلاب

برای برازش بهترین منحنی بین داده‌های عمق و خسارت توابع مختلفی مورد بررسی قرار گرفت که نتایج در جدول ۲ ارائه شده است. شاخص‌های خطای RMSE، MAE و CC برای هر یک از منحنی‌ها محاسبه و نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به میزان خطای هر تابع در تخمین خسارت سیلاب وارد بر ساختمان‌ها، تابعی که دارای خطای کمتر است از سایر مدل‌ها تفکیک شد. همان‌طور که در جدول ۲ نشان داده شده است دو تابع نمایی مختلف برای برازش به داده‌های مشاهداتی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مشخص است که مجانب افقی برای هر دو تابع نمایی زمانی که متغیر X به سمت بی‌نهایت میل کند برابر است با $Y=1$. همچنین در حالتی دیگر داده‌های مشاهداتی به دو بخش تقسیم شده و برای بخش اول (از عمق ۰/۱ تا عمق سیلاب ۲/۴ متر) تابعی خطی و برای سیلاب‌های با عمق بیشتر از ۲/۴ متر، مقدار خسارت ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده است. در تابع سوم، از منحنی درجه سوم با بیان محدودیت برای مقادیر عمق (۰/۱ تا ۴/۵) استفاده شده است.

بررسی مقدار خطای توابع مختلف در جدول ۳ نشان می‌دهد که کمترین خطا در تخمین خسارت ناشی از سیلاب با استفاده از مدل دوم که تابعی نمایی است، به دست آمده است. با توجه به نتایج مشخص است که بیشترین خطا در تخمین خسارت سیلاب با کاربرد مدل سوم و چهارم حاصل شده است.

برخوردار نیست. بنابراین تابع نمایی دوم به عنوان مدل برتر از نظر مقدار خطا در تخمین خسارت انتخاب شده است.

Table 3- RMSE, MAE and CC for depth-damage functions
جدول ۳- شاخص‌های RMSE، MAE و CC برای هر یک از توابع عمق-خسارت

Model	RMSE (%)	MAE (%)	CC
M1	11.56	9.12	0.92
M2	11.43	8.69	0.92
M3	13.23	10.07	0.89
M4	12.13	9.71	0.92

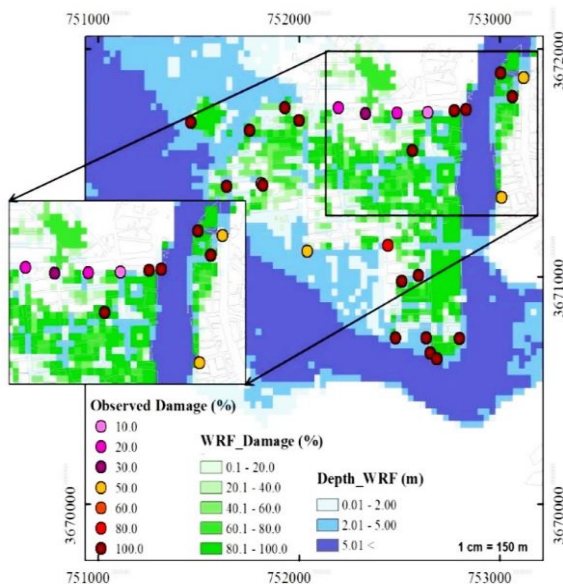


Fig. 10- Spatial changes in the percentage of relative damage to residential buildings using WRF precipitation data in the April 2019 flood
شکل ۱۰- تغییرات مکانی درصد خسارت نسبی وارد بر ساختمان‌های مسکونی به ازای کاربرد داده‌های بارش WRF در سیلاب فروردین ۱۳۹۸

۳-۴- ارزیابی روش‌های تعیین ارزش ریالی ساختمان‌ها

همانگونه که پیش‌تر نیز عنوان شد یکی از مسائل مهم در تخمین خسارت مالی ناشی از سیلاب بر ساختمان‌ها، تبدیل درصد خسارت به خسارت ریالی است. عدم دسترسی به داده‌های در وضوح بالا و ارزش ریالی هر ساختمان نیز بر پیچیدگی این مسأله می‌افزاید. با توجه به اهمیت روش برآورد ارزش ریالی خسارت براساس درصد

با توجه به نتایج مشخص است که مقادیر خسارت مدل‌سازی شده در کاربری مسکونی از همبستگی قابل‌قبولی با مقادیر خسارت مشاهده‌ای برخوردار است به طوری که مقدار ضریب همبستگی ۰/۹۲ تخمین زده شده است. مقدار میانگین مطلق خطا و ریشه متوسط مربعات برای تابع مسکونی مناسب ارزیابی می‌شود. ریشه میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا برای کاربری مسکونی به ترتیب در حدود ۱۱/۴۳ و ۸/۶۹ درصد تخمین زده شده است. البته ذکر این نکته لازم است که بخشی از خطای موجود در مدل‌سازی خسارت وارد بر سازه ساختمان‌ها می‌تواند ناشی از عدم توجه به سرعت جریان باشد، چنانکه عدم دسترسی به این داده‌ها ممکن است باعث کم‌برآوردی خسارت در ساختمان‌های واقع در مسیر جریان‌های پرسرعت شده باشد.

پس از اجرای تابع خسارت، نقشه تغییرات مکانی درصد خسارت حاصل از کاربرد عمق سیلاب مرتبط با هیدروگراف سیلاب عددی WRF به دست آمد که نتایج حاصل به همراه داده‌های مشاهده‌ای خسارت در شکل ۱۰ ارائه شده است. براساس گزارشات میدانی از منطقه، متوسط درصد خسارت وارده به ساختمان‌های مسکونی برابر با ۶۶ درصد تخمین زده شده است که مقدار آن در صورت مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی مبتنی بر داده‌های بارش WRF و کاربرد مدل منطقه‌ای خسارت ۷۰ درصد برآورد شده است. بنابراین تخمین عمق سیلاب و برآورد خسارت ناشی از سیلاب با استفاده از مدل منطقه‌ای خسارت توانسته است از عملکرد قابل‌قبولی در تخمین خسارت مستقیم سیلاب وارد بر مناطق مسکونی برخوردار باشد.

خسارت، در این بخش به ارزیابی سه مدل مورد استفاده برای تبدیل درصد خسارت به خسارت ریالی پرداخته شده است. به همین منظور میزان قدمطلق خطای نسبی ناشی از هر یک از مدل‌ها در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد، مدل‌های ۱ و ۳ به ترتیب با دارا بودن خطای نسبی در حدود ۳۱/۱ و ۴۴/۲ درصد از عملکرد قابل قبولی در برآورد ریالی میزان خسارت سیلاب برخوردار نبوده‌اند. درحالی‌که مدل ۲ با دارا بودن خطای نسبی در حدود ۷/۱ درصد نسبت به مدل‌های دیگر از عملکرد به مراتب بهتری برخوردار بوده است. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که افزایش دقت مکانی در تخمین ارزش ریالی خسارت می‌تواند منتج به نتایج بهتری شود. چنانکه لحاظ نمودن تغییرات مکانی برای مترآژ ساختمان‌های موجود در منطقه در سطح بلوک‌های آماری به جای در نظر گرفتن یک مقدار متوسط به عنوان مترآژ ساختمان‌ها میزان خطای نسبی را به شدت کاهش داده است.

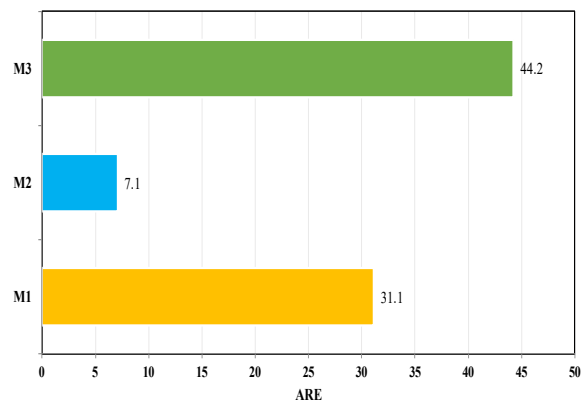


Fig. 11- Relative error in estimating financial damage by different models

شکل ۱۱- میزان خطای نسبی در تخمین خسارت مالی توسط مدل‌های مختلف

با توجه به تأثیر بالای عمق سیلاب بر میزان خسارت وارده بر ساختمان‌ها در این بخش به ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف تعیین ارزش ریالی ساختمان‌ها در عمق‌های مختلف سیلاب پرداخته شده است که نتایج در شکل ۱۲ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود برای تخمین خسارت ناشی از سیلاب‌های با عمق کمتر از ۱ متر بکارگیری ضریب RC (ضریب هزینه بازسازی/نوسازی) می‌تواند منجر به نتایج به مراتب بهتری شود، به طوری که مقدار خطای نسبی حاصل از کاربرد مدل سوم برای تبدیل درصد خسارت به مقدار ریالی در حدود ۳/۴ درصد تخمین

زده شده است. با توجه به نتایج مشخص است که مقدار خسارت مالی در مناطقی که سیلاب دارای عمق از یک متر است توسط کارشناسان مسئول ۳۴/۴ میلیون تومان برآورد شده است، با استفاده از مدل سوم مقدار خسارت مالی تخمینی معادل ۳۳/۲ میلیون تومان است، درحالی‌که کاربرد سایر مدل‌ها با خطایی بیش از ۳۰ درصد دارای بیش‌برآوردی در تخمین خسارت بوده‌اند. بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که در سیلاب‌های با عمق کمتر از ۱ متر در نظر گرفتن ضریب هزینه بازسازی/نوسازی ($RC=0/45$) از هزینه بازسازی کل منجر به ارائه تخمین صحیح‌تری از میزان خسارت خواهد شد؛ ولی در عمق‌های بیشتر که خسارت جدی و قابل توجه بوده و بعضاً نیاز به بازسازی‌های جدی‌تر و تعمیرات اساسی وجود دارد استفاده از ضریب RC می‌تواند با کم‌برآوردی در هزینه‌های بازسازی/نوسازی شود. چنانکه مشاهده می‌شود خطای نسبی حاصل از کاربرد ضریب RC در عمق‌های ۱ تا ۲/۵ و بیش از ۲/۵ متر به ترتیب برابر با ۵۹ و ۷۰ درصد است. همچنین همانطور که مشاهده می‌شود کاربرد مدل دوم برای تخمین خسارت سیلاب در عمق‌های بیش از ۱ متر از عملکرد بهتری نسبت به سایر مدل‌ها برخوردار است، بطوریکه میزان خطای نسبی این مدل در عمق‌های ۱ تا ۲/۵ متر و بیش از ۲/۵ متر به ترتیب در حدود ۱۳ و ۰/۲ درصد تخمین زده شده است. بنابراین استفاده از اطلاعات منطقه در سطح بلوک‌های آماری به عنوان جایگزینی برای روش مرسوم (در نظر گرفتن یک مقدار متوسط به عنوان مترآژ ساختمان‌های موجود در منطقه) توصیه می‌شود.

۴- نتیجه گیری

خسارت ناشی از سیلاب به متغیرهای زیادی بستگی دارد. این متغیرها ممکن است شامل عمق آب، سرعت، مدت زمان سیلاب، باررسوب باشد؛ اما آسیب وارد بر ساختار به شدت وابسته به عمق سیلاب است (FloodRisk Group, 2016). اما عدم وجود توابعی استاندارد برای کاربرد در کشورمان چالش‌های زیادی را در مسیر پژوهشگران برای ارزیابی خسارت سیلاب ایجاد نموده است. به همین منظور، در پژوهش حاضر به توسعه منحنی عمق-خسارت برای کاربرد در یکی از حوضه‌های مهم کشور ایران پرداخته شده است. از سوی دیگر با توجه به اهمیت تخمین خسارت مالی، مسأله مهمی همچون تبدیل خسارت نسبی به ارزش ریالی مطرح می‌گردد. بنابراین یکی دیگر از اهداف این پژوهش، بررسی کارایی سه مدل مختلف به منظور تعیین خسارت مالی ناشی از سیلاب است. همچنین یکی دیگر از اهداف مهم تحقیق حاضر بررسی کارایی خروجی مدل‌های عددی هواشناسی برای کاربرد به منظور

پیش‌بینی مؤلفه‌های هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و خسارت سیلاب است. نتایج حاصل از مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی و مقایسه با اطلاعات مشاهده‌ای از منطقه نشان داد که مدل عددی هواشناسی WRF در تلفیق با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS و مدل هیدرولیکی HEC-RAS با برخورداری شاخص خطای کمتر از ۵ درصد در تخمین دبی اوج سیلاب و متوسط اختلافی کمتر از ۰/۵ متر در شبیه‌سازی تراز سطح آب دارای عملکرد مناسبی برای کاربرد با هدف شبیه‌سازی مشخصات هیدرولوژیکی و هیدرولیکی سیلاب است. علاوه بر این، مدل خسارت توسعه داده شده برای منطقه مطالعاتی از کیفیت و دقت لازم برای کاربرد جهت تخمین خسارات مالی ناشی از سیلاب با اعماق مختلف در مناطق مسکونی برخوردار است. طبق محاسبات، ریشه میانگین مربعات خطا برای کاربری مسکونی در حدود ۰/۱۳ و میانگین مطلق خطا کمتر از ۰/۲۴ درصد تخمین زده شده است. بنابراین در مناطق با کمبود داده‌های مشاهداتی برای توسعه توابع خسارت، کاربرد مدل توسعه داده شده در پژوهش حاضر می‌تواند از عملکرد قابل قبولی در تخمین خسارت سیلاب در مناطق مسکونی برخوردار باشد. بررسی مدل‌های مورد مطالعه برای برآورد ارزش ریالی خسارات براساس درصد خسارت حاکی از آن است که افزایش دقت مکانی برای محاسبه مترای ساختمان‌های موجود در منطقه می‌تواند منجر به کاهش میزان خطای نسبی (خطای نسبی=۷/۱ درصد) در تخمین خسارات شود. همچنین، در نظر گرفتن ضریب هزینه بازسازی/نوسازی برای سیلاب‌های با عمق کمتر از ۱ متر با تخمین

صحيح‌تری از میزان خسارت همراه است. در حالیکه در صورت وقوع سیلاب با اعماق بیشتر و نیاز به بازسازی‌های اساسی، کاربرد ضریب RC با کم‌برآوردی در هزینه‌های بازسازی/نوسازی منجر به کم‌برآوردی در تخمین میزان خسارات خواهد شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد که با تلفیق مناسب بین خروجی مدل‌های عددی پیش‌بینی بارش (همچون WRF) با مدل‌های هیدرولوژیکی-هیدرولیکی و مدل‌های خسارت در یک پلتفرم آنلاین می‌توان ابزاری کارا و قدرتمند برای برآورد و پیش‌بینی خسارت سیلاب به‌ویژه در رخدادهای خسارت‌زا توسعه داد. این سامانه می‌تواند به‌عنوان ابزاری کلیدی در دسترس سازمان مدیریت بحران قرار گیرد تا برنامه‌ریزی برای تخلیه اضطراری، توزیع منابع، و اعلام هشدار به جوامع محلی تسهیل شود. علاوه بر این، نقشه‌های عمق سیلاب و خسارت تولید شده پس از کاربرد روش‌شناسی پژوهش حاضر، می‌تواند پایه‌ای برای توسعه نقشه‌های ریسک، تدوین مقررات ساخت‌وساز، تعیین حق بیمه سیلاب مورد استفاده قرار بگیرد. همچنین، با شناسایی دقیق مناطق پرخطر براساس مدل خسارت، بودجه‌های دولتی می‌توانند به‌صورت هدفمند به اجرای پروژه‌های مهندسی (مانند احداث دیوارهای سیل‌بند، کانال‌های انحراف سیلاب) یا راهکارهای مبتنی بر طبیعت (احیای تالاب‌ها، جنگل‌کاری) اختصاص یابند. پیشنهاد می‌شود برای بررسی قابلیت تعمیم‌پذیری نتایج پژوهش حاضر به سایر مناطق، کارایی چارچوب یکپارچه ارائه شده در این پژوهش، در مناطق با شرایط هیدرواقليمی متفاوت نیز مورد ارزیابی قرار بگیرد.

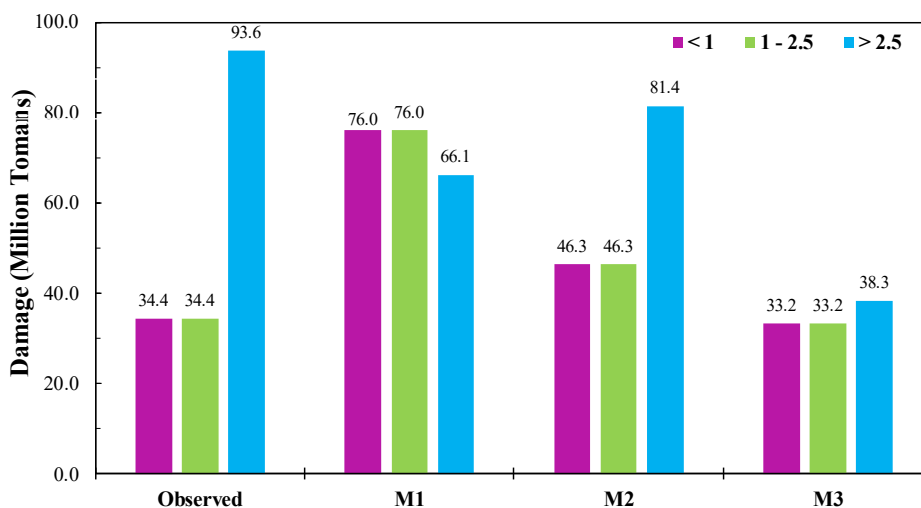


Fig. 12- Financial losses by different models in different flood depths

شکل ۱۲- خسارت مالی تخمین زده شده توسط مدل‌های مختلف به تفکیک عمق‌های مختلف سیلاب

- 1- Weather Research and Forecasting
- 2- Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
- 3- Hydrologic Engineering Center-River Analysis System
- 4- Advanced Research WRF
- 5- Non-hydrostatic Mesoscale Model
- 6- WRF Preprocessing System
- 7- WRF Data Assimilation
- 8- WRF Double-Moment 5-Class
- 9- Rapid Radiative Transfer Model
- 10- Asymmetrical Convective Model v2
- 11- Noah with Multiparameterization
- 12- Final Analysis
- 13- Soil Conservation Service Unit Hydrograph
- 14- Synthetic
- 15- Curve Number
- 16- Nash-Sutcliffe Efficiency
- 17- Digital Elevation Model
- 18- Advanced Land Observing Satellite
- 19- Shuttle Radar Topography Mission
- 20- Absolute Relative Error
- 21- Correlation Coefficient
- 22- Mean Absolute Error
- 23- Root Mean Square Error
- 24- Repair Cost

۵- مراجع

- Alfieri L, Dottori F, Betts R (2018) Multi-model projections of river flood risk in Europe under global warming. *Climate* 6(1):10.3390/cli6010006
- Alfieri L, Dottori F, Salamon P (2020) Global modeling of seasonal mortality rates from river floods. *Earth's future* 8(9):10.1029/2020EF001541
- Alizade A (2020) Applied hydrology. Imam Reza International University Press, 964p (In Persian)
- Amadio M, Scorzini AR, Carisi F (2019) Testing empirical and synthetic flood damage models: The case of Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 19(3):661–678
- Amirmoradi K, Shokoohi A, Azizian A (2020) Evaluating risk of economic loss due to river flood in urban areas (study area: Kan watershed). *Iranian Journal of Soil and Water Research* 50(9):2239–2259 (In Persian)
- Arash AM, Yasi M, Azizian A (2020) Accuracy assessment of RS-based DEMs in flood inundation mapping of different morphological types of rivers. *Journal of Hydraulics* 15(3):15–31 (In Persian)
- Arrighi C, Brugioni M, Castelli F (2013a) Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modelling and census data. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13:1375–1391
- Arrighi C, Brugioni M, Castelli F (2013b) Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modelling and census data. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13:1375–1391
- Arrighi C, Tanganelli M, Cristofaro M T (2022) Multi-risk assessment in a historical city. Springer Netherlands
- Azizian A, Samadi A (2022) 2D flood simulation in the HEC-RAS 5 numerical model environment. Parsia Publications, Tehran, Iran, 216p (In Persian)
- Bartholmes J, Todini E (2005) Coupling meteorological and hydrological models for flood forecasting. *Hydrology and Earth System Sciences* 9(4):333–346
- Bayat-Afshary N, Danesh-Yazdi M (2023) Are the magnitude and frequency of floods increasing in Iran due to climate change? Implications from a 50-year analysis. *Hydrological Sciences Journal* 68(15):2243–2261
- Cammerer H, Thielen AH, Lammel J (2013) Adaptability and transferability of flood loss functions in residential areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13:3063–3081
- Cook A, Merwade V (2009) Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology* 377(1-2):131–142
- Dottori F, Salamon P, Bianchi A (2016) Development and evaluation of a framework for global flood hazard mapping. *Advances in Water Resources* 94:87–102
- Dutta D, Herath S, Musiak K (2003) A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of Hydrology* 277(1-2):24–49
- Ferguson AP, Ashley WS (2017) Spatiotemporal analysis of residential flood exposure in the Atlanta, Georgia metropolitan area. *Natural Hazards* 87:989–1016
- Flesch TK, Reuter GW (2012) WRF model simulation of two Alberta flooding events and the impact of topography. *Journal of Hydrometeorology* 13(2):695–708
- Flood Risk Group (2016) The QGIS Plug-in FloodRisk.
- Garmeh R, Farid-hosseini A, Hashemi-Nia M, Hojjati A (2015) Calibration and validation parameter of hydrologic model HEC-HMS using particle swarm optimization algorithms-single objective. *Water and Soil* 29(3):615–626 (In Persian)
- Givati A, Gochis D, Rummeler T, Kunstmann H (2016) Comparing one-way and two-way coupled hydrometeorological forecasting systems for flood forecasting in the mediterranean region. *Hydrology* 3(2):19
- He K, Yang Q, Shen X, Anagnostou EN (2021) Brief communication: western europe flood in 2021: Mapping agriculture flood exposure from SAR. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 22(9):2921–2927
- HEC (Hydrologic Engineering Center) (2021) HEC-RAS 2D modeling user's manual, u.s. army corps of engineers, Davis CA.
- HEC (Hydrologic Engineering Center) (2000) HEC-HMS hydrologic modeling system, technical reference manual, CPD-74B, Davis, CA.
- Huizinga J, Moel HD, Szewczyk W (2017) Global flood depth-damage functions database with guidelines.
- Hyndman RJ, Koehler AB (2006) Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting* 22(4):679–688
- Kabirsamadi D, Shokoohi A, Modabberi H (2023) Developing an urban flood loss functions for residential buildings (Case Study: Rasht City). *Iran-Water Resources Research* 19:141–160 (In Persian)
- Kefi M, Mishra B K, Kumar P (2018) Assessment of tangible direct flood damage using a spatial analysis approach under the effects of climate change: Case study in an urban watershed in Hanoi, Vietnam. *ISPRS International Journal of*

- Geo-Information 7(1):10.3390/ijgi7010029
- Koohi S, Azizian A, Najafi MS (2025) Evaluation of the WRF local and regional IFS numerical model in precipitation estimation. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 55:2017–2033 (In Persian)
- Koohi S, Azizian A, Najafi MS (2024) Identifying the optimal numerical scheme within the WRF Model for Precipitations leading to floods and its uncertainties. *Iran-Water Resources Research* 20(3):18–38 (In Persian)
- Mahdavi M (2005) *Applied hydrology*. Tehran University Press, 340p (In Persian)
- Martínez-Gomariz E, Forero-Ortiz E, Guerrero-Hidalga M (2020) Flood depth-damage curves for Spanish urban areas. *Sustainability* 12: 10.3390/su12072666
- Michalakes J, Chen S, Dudhia J (2001) Development of a next generation regional weather research and forecast model. *Developments in Teracomputing* 269–276
- Molinari D, Scorzini AR, Arrighi C (2020) Are flood damage models converging to “ reality ”? Lessons learnt from a blind test. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20:2997–3017
- Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10:282–290
- Paulik R, Wild A, Zorn C, Wotherspoon L (2022) Residential building flood damage: Insights on processes and implications for risk assessments. *Journal of Flood Risk Management* 15(4):e12832
- Pearson K (1896) Mathematical contributions to the theory of evolution—on a form of spurious correlation which may arise when indices are used in the measurement of organs. *Proceedings of the Royal Society of London* 60:489–498
- Romali NS, Yusop Z, Izyan N (2019) Flood damage function model for residential area in Kuantan: A preliminary study. *The International Journal of Integrated Engineering* 11(2):203–213
- Roodaki S, Azizian A (2020) Uncertainty analysis due to the application of different infiltration methods on the performance of HEC-HMS model using GLUE algorithm. *Iran-Water Resources Research* 16(2):50-66 (In Persian)
- Rostamizad G, KhalighiSigaroodi S, Mahdavi M (2013) Comparison estimate precipitation loss methods in HEC-HMS model to simulation runoff (Case study: Kan basin). *Journal of Range and Watershed Management* 66(3):359-371 (In Persian)
- 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)
- Safavi MR (2009) *Engineering hydrology*. Arkan Danesh Press, 704p (In Persian)
- Sairam N, Brill F, Sieg T (2021) Process-based flood risk assessment for germany. *Earth’s Future* 9(10): e2021EF002259
- Shirali E, NikbakhtShahbazi A, Fathian H, Zohrabi N, Mobarak Hassan E (2020) Evaluation of WRF model for simulation of precipitation and flood forecasting in Karun 4 basin. *Iranian Journal of Soil and Water Research* 51(8):1907-1920 (In Persian)
- Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J (2005) A description of the advanced research WRF. Version 2, NCAR Tech, Note NCAR/TN-4681STR
- Stanski HR, Wilson, LJ, Burrows WR (1989) *Survey of common verification methods in meteorology* (2nd ed.). World Meteorological Organization
- Steinhausen M, Schröter K, Lüttke S (2022) Drivers of future fluvial flood risk change for residential buildings in Europe. *Global Environmental Change* 76:102559
- Tensavan MS, GanjiNowrozi Z, Dalqandi M, NikQalbAshuri S (2018) Estimation of flood damage using damage depth function (case study: Shirvan city). *Shahrood University of Technology*
- Thieken A H, Olschewski A, Kreibich H (2008) Development and evaluation of FLEMOps- A new flood loss estimation model for the private sector. *Flood Recovery, Innovation and Response* 118:315–324
- Tian J, Liu J, Yan D, Ding L, Li C (2019) Ensemble flood forecasting based on a coupled atmospheric-hydrological modeling system with data assimilation. *Atmospheric Research* 224(1):127–137
- Tomasella J, Gonçalves AS, Falck AS (2018) Probabilistic flood forecasting in the Doce basin in brazil: Effects of the basin scale and orientation and the spatial distribution of rainfall. *Journal of Flood Risk Management* 12:e12452
- Wilks DS (2019) *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Candice Janco