

## Evaluating Human Casualty Estimation Models for River Floods on a Regional and Global Scale (Case Study: Can Watershed)

KIMIA AMIRMORADI<sup>1</sup>, ALIREZA SHOKOOHI<sup>\*</sup>

1. Water Engineering Department, Faculty of Agriculture and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

(Received: July. 20, 2020- Revised: Feb. 25, 2021- Accepted: May. 17, 2021)

### ABSTRACT

Flood is one of the most important types of natural disasters that lead to serious damage, especially in Iran. Despite the high number of human casualties in Iran, this phenomenon has not been sufficiently studied. A review of the relevant research conducted so far shows that the number of relationships is low and at the same time their accuracy is questionable. In this study, the developed regional and global models have been evaluated to determine human casualties in the catchment area of Kan River located in Tehran. In this research, HEC-HMS has been used for hydrological simulation and HEC-RAS two-dimensional model has been used for flood simulation and estimation of parameters such as velocity, depth, and rate of flood rise in an unstable state. The spatial distribution of all parameters of both regional and global models according to the structure of the models was obtained in the GIS environment. Finally, the short-term risk of flood losses in the study basin was calculated using the results of the regional model. The regional model which was developed based on the hydraulic and morphological parameters of the basin and the global model which was designed for mortality due to dam failure were able to simulate historical events well, however, the regional model in all high-risk to low-risk areas has better results. The global model, which is a parametric model, was found to be acceptable for estimating model losses in the range of low-risk and predicting instantaneous flood mortality, by changing the average distribution parameter by twice the standard deviation. The use of both regional and global calibrated models is recommended in risk management and instantaneous floods crisis.

**Keywords:** Kan Basin, Flash Flood, Casualty, Regional Casualty Model, Global Casualty Model.

## ارزیابی مدل‌های تخمین تلفات انسانی سیلاب‌های رودخانه‌ای در مقیاس منطقه‌ای و جهانی (مطالعه موردی: حوضه آبریز کن)

کیمیا امیرمرادی<sup>۱</sup>، علیرضا شکوهی<sup>۱\*</sup>

۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.  
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۳۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۲/۷ - تاریخ تصویب: ۱۴۰۰/۲/۲۷)

### چکیده

سیلاب یکی از مهم‌ترین انواع بلایای طبیعی است که منجر به وقوع تخریب‌های جدی به‌ویژه در ایران می‌شود. علیرغم وقوع تلفات انسانی زیاد در ایران، به‌عنوان پیامد ناشی از سیلاب ناگهانی<sup>۱</sup>، هنوز بررسی این پدیده به میزان کافی انجام نشده است. مرور تحقیقات مرتبط انجام شده تاکنون، نشان‌دهنده تعداد روابط کم و در عین حال دقت نه چندان مناسب آن‌ها می‌باشد. در این تحقیق مدل‌های منطقه‌ای<sup>۲</sup> و جهانی<sup>۳</sup> توسعه داده شده برای تعیین تلفات انسانی در سطح حوضه آبریز رودخانه کن واقع در تهران ارزیابی شده‌اند. در این تحقیق برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی از HEC-HMS و برای شبیه‌سازی سیل و برآورد پارامترهایی نظیر سرعت، عمق و سرعت بالا آمدن سیل در حالت غیرماندگار از مدل دوبعدی HEC-RAS استفاده شده است. توزیع مکانی کلیه پارامترهای هر دو مدل منطقه‌ای و جهانی با توجه به ساختار مدل‌ها از برنامه نویسی در محیط GIS حاصل شد. در نهایت ریسک کوتاه مدت تلفات سیل در حوضه مطالعاتی با استفاده از نتایج مدل منطقه‌ای محاسبه گردید. مدل منطقه‌ای که براساس پارامترهای هیدرولوژیکی و مورفولوژیکی حوضه توسعه یافته است و مدل جهانی که برای مرگ و میر ناشی از شکست سد طراحی شده است بخوبی توانستند وقایع تاریخی را شبیه‌سازی نمایند با این تفاوت که مدل منطقه‌ای در همه پهنه‌های پرخطر تا کم خطر نتایج بهتری را بدست داد. در ارزیابی مدل جهانی که با توجه به ساختار آن و برخلاف مدل منطقه‌ای مدلی پارامتریک محسوب می‌گردد، مشخص شد که با تغییر پارامتر میانگین توزیع ارائه شده برای تخمین تلفات مدل جهانی برای محدوده کم خطر به اندازه دو برابر انحراف معیار، نتایج مدل جهانی نیز برای استفاده در پیش‌بینی مرگ و میر سیلاب‌های آبی قابل قبول خواهد بود. بکارگیری هر دو مدل منطقه‌ای و جهانی واسنجی شده در مدیریت ریسک و بحران سیلاب‌های آبی توصیه می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** حوضه آبریز کن، سیلاب آبی، تلفات جانی، مدل تلفات منطقه‌ای، مدل تلفات جهانی.

### مقدمه

ناشی از سیل کمتر بدان پرداخته شده است. در ایران مطابق آمار موجود در ۵۳ سال گذشته، بیش از ۱۲ هزار شهروند ایرانی (متوسط سالانه ۲۲۶ نفر) بر اثر سیلاب جان خود را از دست داده‌اند (Mehr News, 2012). یکی از بزرگترین سیلاب‌های اخیر مربوط به فروردین ماه ۱۳۹۸ می‌باشد که با افزایش بارش‌ها در شمال و شمال شرق کشور از ۲۶ اسفند ماه ۱۳۹۷ آغاز گردید و در استان‌های گلستان و مازندران منجر به سیلاب و زیر آب رفتن شهرهایی چون آق قلا و گمیشان شد. این سیلاب منجر به فوت ۱۳ نفر و مصدوم شدن ده‌ها نفر گردید (Karimi Soltani, 2020). در تاریخ ۵ فروردین ۱۳۹۸ سیلی ناگهانی در ورودی شهر شیراز (دروازه قرآن) براه افتاد و آب گرفتگی معابر و واژگونی خودروها منجر به فوت ۲۲ نفر و ۱۹۰ مصدوم گردید. موج دوم بارش‌ها در

با وجودی که بشر در طول تاریخ سیلاب‌های زیادی را تجربه کرده است، هیچ‌گاه اثرات مخرب سیلاب‌ها در گذشته مانند امروز نبوده است زیرا افراد بسیار کمتری در سیلاب‌دشت‌ها زندگی می‌کردند و فعالیت‌های انسانی در گذشته این چنین موجب افزایش پتانسیل سیلاب نمی‌گردید. با توجه به این‌که در ایران در بسیاری موارد توسعه در مناطق مستعد سیل صورت گرفته و هرساله خسارات زیادی از این بابت به جان و مال مردم و اکوسیستم طبیعی وارد می‌شود، برآورد میزان خطر سیلاب امری ضروری است. ارزیابی خطر سیلاب فرایندی است که امروزه در اکثر کشورها به علت آسیب‌های جانی و مالی هنگفت ناشی از آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است اما در ایران با وجود خسارات فراوان

\* نویسنده مسئول: shokoohi@eng.ikiu.ac.ir

۱۱ فروردین ۱۳۹۸ آغاز و شهرهای غربی و جنوبی کشور را در بر گرفت و استان لرستان را با خسارت‌های سنگین مواجه گردانید که در پی آن ۱۵ نفر کشته و ۲۵۶ مصدوم به جای ماند. آمار رسمی منتشر شده میزان تلفات ناشی از سیل در سراسر کشور در سال ۱۳۹۸ را بطور کلی ۷۶ نفر و تعداد کشته شدگان مرد را دو برابر تعداد زنان اعلام می‌نماید (Beitollahi, 2019). در دی ماه ۱۳۹۸ نیز سیلابی معادل با ۶ برابر سیلاب گلستان در استان سیستان و بلوچستان به وقوع پیوست که منجر به فوت ۲ تن و مفقود شدن ۱ نفر گردید (Natural Disaster Research, Institute, 2020).

به‌طور کلی روش‌های تخمین تلفات سیلاب از یک طرف به مشخصات سیلاب و از طرف دیگر به امکان وجود سیستم هشدار سیل، دسترسی به جان‌پناه و راه‌های تخلیه مردم وابسته می‌باشد. بدین منظور با در نظر گرفتن روابط مختلف میان این پارامترها، مدل‌هایی هر چند محدود برای برآورد تلفات سیلاب ارائه شده است. (Mizutani (1985) رابطه‌ای را میان مرگ و میر ناشی از طوفان‌های ساحلی و فقط بر اساس عمق متوسط سیلاب استخراج نمود. محاسبه تلفات دو رویداد با عمق یکسان بر اساس روابط ارائه شده توسط این محقق منجر به برآوردهایی کاملاً متفاوت می‌گردد که این امر دقیقاً ناشی از تأثیر عواملی نظیر هشدار سیلاب و زمان لازم برای تخلیه در میزان مرگ و میر می‌باشد. (Duiser (1989) و (Waarts (1992) اطلاعات مربوط به تلفات جانی سیل سال ۱۹۹۲ در هلند و همچنین مشخصه‌های هیدرولیکی سیلاب نظیر عمق آب و سرعت افزایش عمق آب را از طریق اسناد رسمی و دولتی، حافظه عمومی مردم و شهرداری جمع‌آوری نمودند. (Waarts (1992) بر اساس داده‌های موجود و ارزیابی تعداد و محل کشته‌شدگان در سیل سال ۱۹۹۲ سه منطقه مختلف در پهنه سیلابی را مشخص کرد: منطقه افزایش سریع عمق، منطقه با سرعت جریان زیاد و منطقه باقیمانده از کل منطقه تحت تأثیر سیلاب. نتایج نشان داد که اکثر کشته‌شدگان در منطقه با افزایش سریع عمق آب قرار دارند. (Boyd et al. (2005) مجدداً برای ساده‌سازی، یک تابع تلفات بر اساس عمق جریان سیلاب بر پایه اطلاعات مشاهداتی از هفت واقعه‌ی سیل حاصل از امواج ساحلی ارائه نمودند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده این امر بود که اگر تنها عمق آب در محاسبه مرگ و میر لحاظ گردد همواره دو سوم جمعیتی که در معرض سیلاب قرار می‌گیرند جان سالم به در خواهند برد. با توجه به این امر، محققین به این نتیجه رسیدند که تنها عمق آب بر میزان تلفات ناشی از سیلاب تأثیرگذار نیست و پارامترهای هیدرولیکی دیگری چون سرعت جریان و سرعت افزایش عمق آب نیز می‌تواند تأثیر به‌سزایی بر میزان تلفات داشته باشد.

مبتنی بر مطالعاتی بود که در فوق اشاره شد به بررسی و ارائه الگوی تلفات سیلاب ناگهانی در مقیاس جهانی پرداختند. محققین مزبور در این مطالعه که اطلاعات آن از همه کشورهای دنیا جمع‌آوری گردیده بود از مراحل ۴ گانه برای تعیین تلفات ناشی از سیلاب استفاده نمودند: (۱) تعیین پهنه‌ی سیلاب و مشخصه‌های هیدرولیکی آن (عمق، سرعت جریان و سرعت افزایش عمق جریان)، (۲) منطقه بندی با استفاده از مشخصه‌های هیدرولیکی، (۳) تخمین تعداد افراد در معرض خطر با در نظر گرفتن تخلیه، پیش هشدار و دست یابی به جان‌پناه و (۴) تعیین ضریب تلفات برای افراد در معرض خطر برای هر منطقه. (Brazdova and Riha (2014) نیز با استفاده از ۱۹ واقعه تاریخی سیلاب، مدلی برای تخمین تعداد تلفات در اروپای مرکزی را ارائه نمودند که در آن عوامل عمق و سرعت جریان در نظر گرفته شده بود.

از جمله مطالعات انجام شده بر روی تخمین تلفات جانی در داخل کشور می‌توان به سه مطالعه انجام شده توسط *et al.* (Amirmoradi and Shokoohi (2020) و Karbasi (2018 a,b) اشاره کرد. در مطالعه اول (Karbasi et al. (2018, a) اقدام به توسعه یک مدل منطقه‌ای کردند که در آن به بررسی ارتباط پارامترهای هیدرولیکی با تعداد تلفات جانی ناشی از وقوع سیلاب‌های آبی در مناطق مسکونی حوضه آبریز کن پرداخته شد. در مطالعه دوم (Karbasi et al. (2018, b) رابطه تلفات ناشی از سیلاب‌های ناگهانی بر روی حوضه آبریز کن را توسعه دادند که در آن علاوه بر پارامترهای هیدرولیکی سیلاب، پارامترهایی چون زمان پیش هشدار و تخلیه سازی نیز لحاظ شده بود. مقایسه میزان مرگ و میر حاصل از مدل برای وقایع تاریخی ثبت شده با مرگ و میر ثبت شده در این مطالعه نشان داد که این مدل بدون پارامتر معرف فرصت تخلیه برای مناطق پایین دست دارای خطای بیش برآورد می‌باشد. (Amirmoradi and Shokoohi (2020) با توجه به توانایی مدل منطقه‌ای (Karbasi et al. (2018, a) در برآورد میزان تلفات ناشی از سیلاب‌های ناگهانی و در عین حال وجود نقیصه در نظرنگرفتن امکان تخلیه، به ارزیابی مدل مزبور و توسعه آن پرداختند. این دو محقق توانستند با استفاده از عوامل ژئومورفولوژیکی مرتبط به زمان انتقال سیل به پایین دست حوضه، مدل منطقه‌ای را توسعه دهند که نتایج حاصل از آن در برآورد تلفات ناشی از سیلاب‌های ناگهانی در منطقه کن قابل استفاده است. با توجه به مطالعات صورت گرفته بر روی این حوضه اطلاعات ناقص مشاهداتی موجود، نیاز به کالیبره دقیق‌تری از روابط احساس می‌گردید و این امر منجر به این گردید که مدل

نزدیک خواهند بود و با مقایسه مدل منطقه‌ای با این مدل جهانی از یک طرف صحت و کارایی مدل منطقه‌ای آزمون شده و از طرف دیگر می‌توان مدل جهانی (Jonkman *et al.*, 2008) را برای منطقه مورد مطالعه اصلاح، واسنجی و مورد استفاده قرار داد.

## مواد و روش‌ها

### محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز کن با مساحت ۲۱۵ کیلومتر مربع یکی از حوضه‌های شمالی حوضه تهران است که در حدفاصل طول جغرافیایی  $51^{\circ}10'$  تا  $51^{\circ}23'$  و عرض جغرافیایی  $35^{\circ}45'$  تا  $35^{\circ}58'$  قرار دارد. از نظر تقسیم بندی هیدرولوژی ایران، حوضه آبریز رودخانه کن بخشی از حوضه آبریز مرکزی و جز یکی از هشت زیر حوضه تهران می‌باشد و از شمال و غرب به حوضه کرج و از شرق و جنوب به دشت تهران مشرف است. ارتفاع متوسط حوضه ۲۳۷۷ متر از سطح دریای آزاد می‌باشد که مرتفع‌ترین نقطه حوضه با ۳۸۲۲ متر در زیر حوضه امامزاده داوود و پست‌ترین نقطه با ۱۳۲۷ متر در زیر حوضه کن شهر تهران قرار دارد. این حوضه از ۱۰ زیرحوضه با مشخصات مندرج در جدول (۱) و شکل (۱) تشکیل شده است. مطالعات و بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که حوضه آبریز کن یک محدوده آسیب‌پذیر در برابر سیلاب می‌باشد. وجود رستوران‌ها، مراکز جمعیتی، تفریحی، توریستی و زیارتی در مجاور رودخانه‌های پرشیب، پتانسیل بروز خطر را تشدید کرده است. با توجه به آمار تلفات جانی (ارائه شده در جدول ۲)، ۵ روستای زندان، طالبون، امامزاده داوود، سنگان و سولقان بیش‌ترین میزان تلفات جانی را تاکنون داشته‌اند و در سایر مناطق حوضه کن تعداد تلفات ناچیز بوده است. بنابراین در این پژوهش به بررسی تلفات جانی ۵ منطقه مذکور پرداخته شده است.

### مراحل لازم برای تخمین تلفات ناشی از سیلاب

چارچوب استفاده شده برای ارزیابی تلفات جانی در این پژوهش در شکل (۲) ارائه شده است.

همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می‌گردد در گام اول برای محاسبه پارامترهای مؤثر در مرگ و میر مورد استفاده در مدل منطقه‌ای و جهانی لازم است که سیلاب‌های حدی برآورد گردند و سپس به کمک مدل هیدرولیکی، مشخصات جریان تعیین گردد. روشی که در این پژوهش برای ارزیابی مخاطرات جانی سیلاب و تخمین میزان ریسک سالانه مورد انتظار<sup>۱</sup> (EAR) در پیش گرفته شده است نیازمند تعیین هیدروگراف سیل زیر

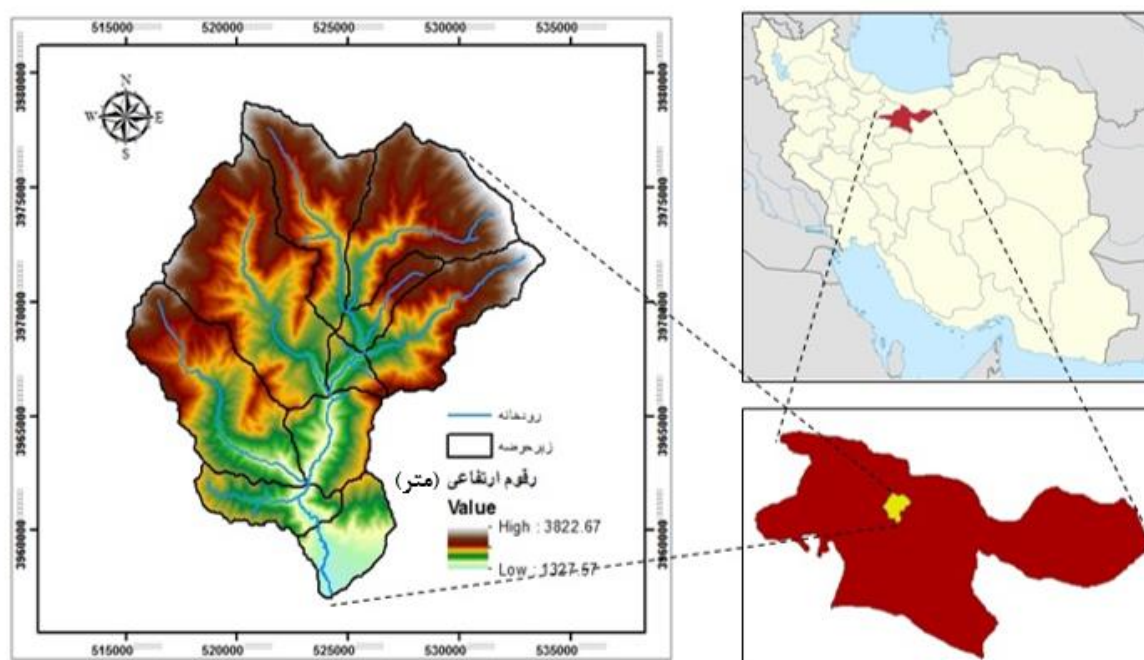
منطقه‌ای ارائه شده با مدل جامع جهانی ارائه شده توسط *et al.* (2008) Jonkman مقایسه و صحت سنجی آن بررسی گردد. نکته حائز اهمیت در خصوص استفاده و کالیبره کردن مدل Jonkman و همکاران (۲۰۰۸) برای موضوع این پژوهش و منطقه مورد مطالعه آن است که مدل مزبور برای شکست سد و دیواره‌های سیل بند یا کاربرد ویژه برای سرزمین‌های پستی مانند هلند و یا نیواورلئان ایالت متحده آمریکا در واقع طوفان کاترینا (سال ۲۰۰۵) توسعه یافته است ولی برای مرگ و میر سیلاب‌های ناگهانی رودخانه‌ای نیز توسعه می‌گردد بدون آنکه تاکنون گزارشی از عملکرد آن در این چنین وضعیتی وجود داشته باشد.

تحقیقات مربوط مساله پیش‌بینی تلفات ناشی از سیلاب در کشور ایران، علیرغم وجود این واقعیت که مساله تغییر اقلیم در سال‌های اخیر به شدت بر وقایع حدی تاثیر گذاشته است (Habibnejad and Shokoochi, 2020; a, b)، محدود و در همان حدی است که در فوق بدان اشاره شد. این امر لزوم توجه به توسعه یک مدل ساده، کارا و دقیق برای شرایط خاص کشور ایران را مورد تأکید قرار می‌دهد. این امر و همچنین راستی آزمایی مدل‌های منطقه‌ای توسعه داده شده با توجه به داده‌های اندک و در پاره‌ای از موارد گمراه‌کننده‌ای که در اختیار محققین داخلی قرار دارد، یکی از محرک‌های انجام پژوهش حاضر می‌باشد. در سطح دنیا مدل‌هایی نظیر مدل ارائه شده توسط *et al.* (2008) Jonkman که سابقه‌ای بس طولانی داشته، از بانک اطلاعاتی نسبتاً غنی برای بسط آن‌ها استفاده شده است و مهمتر اینکه برای تحلیل طوفان‌های اثرگذار در سطح دنیا به بوته آزمایش گذاشته شده‌اند. به عنوان مثال از مدل یاد شده برای ارزیابی طوفان‌هایی همچون طوفان کاترینا که در سال ۲۰۰۵ سواحل خلیج مکزیک و ایالت‌های جنوبی کشور ایالات متحده آمریکا را درنوردید، استفاده به عمل آمد و نتایج شبیه‌سازی، بسیار با واقعیات مشاهده شده نزدیک بود (Jonkman *et al.*, 2018). یکی از بهترین روش‌های راستی آزمایی مدل‌های منطقه‌ای توسعه یافته در ایران در سایه همین مقدار محدود اطلاعات در دسترس، ارزیابی آنها در مقابل عملکرد مدل‌های قابل استفاده در مقیاس جهانی می‌باشد. بر این اساس در این تحقیق رابطه منطقه‌ای ارائه شده توسط Amirmoradi and Shokoochi (2020) که دربردارنده پارامترهای هیدرولیکی و همچنین اثر زمان در دسترس برای تخلیه افراد در معرض خطر در حوضه آبریز کن می‌باشد با مدل جهانی *et al.* (2008) Jonkman به عنوان یکی از شناخته‌ترین شده مدل‌ها در دنیا، مقایسه می‌گردد. فرض بر آن است که نتایج دو مدل به هم

<sup>۱</sup> Expected Annual Risk

حوضه‌های موجود در حوضه آبریز مطالعاتی برای دوره بازگشت-های مختلف (۵۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ ساله) می‌باشد. برای این منظور با توجه به تعداد کم و ناقص بودن آمار و اطلاعات ثبت شده از سیل در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه از مدل‌های ریاضی هیدرولوژیکی HEC-HMS در تمامی زیر حوضه‌ها استفاده گردید. در این مدل از روش SCS برای محاسبه نفوذ، از روش هیدروگراف واحد کلارک در روندیابی زیرحوضه و از روش ماسکینگام برای روندیابی در رودخانه استفاده گردید. نقشه شماره منحنی CN با تلفیق نقشه‌های کاربری اراضی و گروه‌های هیدرولوژیکی خاک حاصل شد. برای در نظر گرفتن شرایط رطوبتی اولیه هر رگبار در هر زیر حوضه، آمار مقدار بارش ۵ روز قبل از رگبار در ایستگاه‌های موجود (ارائه شده توسط سازمان حفاظت خاک آمریکا) در منطقه جمع‌آوری شد. نسبت تلفات اولیه، یکی از پارامترهای واسنجی است که به عنوان حدس اولیه در همه زیرحوضه‌ها ۲۰ درصد در نظر گرفته شد تا در صورت نیاز تغییرات لازم در آن داده شود. همچنین با توجه به نقشه زمین‌شناسی درصد اولیه غیرقابل نفوذ در هر زیرحوضه بدست آمده و در مرحله کالیبراسیون تحت واسنجی قرار گرفت. مطابق شکل (۲) در گام دوم لازم است پهنه سیلاب احتمالی، عمق آب و سرعت آب را با استفاده از مدل هیدرولیکی بدست آورد. بسیاری از مدل‌های هیدرولیکی یک بعدی با بکارگیری معادلات جریان ماندگار برای تخمین سطح آب در رودخانه‌ها و برای شناسایی اولیه مناطق آب‌گرفته مناسب می‌باشند. در صورت وجود پیچیدگی در هندسه رودخانه و نیاز به بکارگیری پارامترهای

جریان غیر ماندگار، استفاده از مدل‌های دوبعدی ضروری است. مطالعات ریسک سیلاب در مناطق شهری نیازمند استفاده از مدل دو بعدی است (Kardan *et al.*, 2017). در این مطالعه جهت شبیه‌سازی جریان رودخانه و به دست آوردن نقشه‌های عمق سیلاب برای دوره‌بازگشت‌های مختلف از مدل HEC-RAS دوبعدی استفاده گردید. شایان ذکر است که با توجه به کوهستانی و پرشیب بودن منطقه مورد مطالعه امکان استفاده از مدل یک بعدی در تعیین پهنه سیلاب امکان‌پذیر بود ولی با توجه به این امر که در مدل‌های مورد استفاده برای تعیین تلفات جانی، تغییرات زمانی عمق و نرخ بالا آمدن جریان از عوامل کلیدی است و مدل یک بعدی توانایی تولید این مشخصه از جریان سیلابی را ندارد، در این مطالعه از مدل دو بعدی برای شبیه‌سازی هیدرولیکی مشخصه‌های جریان استفاده گردید. برای انجام مطالعات هیدرولیکی منطقه مورد مطالعه بعد از تشکیل DEM، محدوده دو بعدی جریان برای تمامی رودخانه‌های حوضه آبریز کن تعیین و شبکه‌بندی مورد نیاز انجام شد. به منظور تحلیل جریان غیر دائمی، ضریب زبری از روی نقشه‌های کاربری اراضی تعیین و سپس هیدروگراف سیلاب‌های طرح زیرحوضه‌ها به عنوان شرط مرزی بالا دست و عمق نرمال به عنوان شرط مرزی پایین دست به مدل معرفی گردیدند. در مدل HEC-RAS دوبعدی از دو حالت شبیه‌سازی موج دینامیک و موج پخشیدگی برای شبیه‌سازی جریان به خصوص در خارج از محدوده رودخانه کن استفاده گردید.



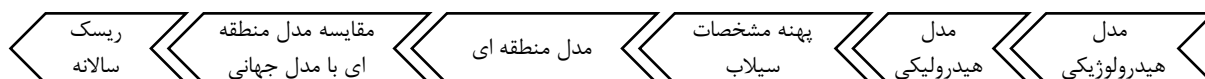
شکل ۱- حوضه آبریز کن به همراه زیرحوضه‌های آن.

جدول ۱- مشخصات کلی زیرحوضه‌های کن

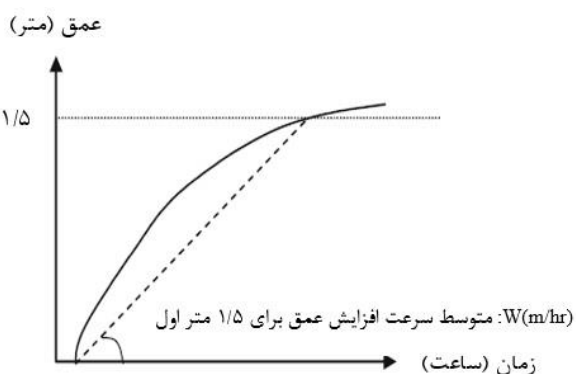
زیر حوضه	مساحت (ha)	مساحت منطقه مسکونی (ha)	محیط (km)	شیب آبراهه (%)	طول آبراهه اصلی (km)	ارتفاع متوسط (m)
طلالون	۲۶۶۵	۱۶	۲۹/۸۳	۷/۱۵	۹/۶۱	۲۶۱۶/۰۳
رندان	۳۳۶۱	۶/۸	۲۷/۷۴	۹/۱۶	۹/۰۴	۲۷۲۲/۴۳
امامزاده داوود	۲۳۷۸	۱۶/۱	۲۵	۱۰/۳۴	۸/۵۸	۲۵۷۷
دوآب	۷۱۹	۰/۹۱	۱۵/۲۷	۱۹/۷۴	۳/۷۴	۲۳۵۶/۶۶
سنگان	۴۷۴۳	۳۳/۹	۳۶/۱۳	۷/۶	۱۱/۸۲	۲۴۳۹/۰۳
کشار	۳۴۷۸	۱۳/۶	۲۹/۲۵	۸/۸	۱۱/۹۶	۲۲۷۴/۵۸
هریاس	۱۱۴۴	۱/۰۹	۱۸/۵۸	۹/۰۴	۴/۳۸	۱۹۱۸/۰۹
کن میانی	۴۴۰	۰/۷	۹/۸۹	۳/۲۵	۲/۶۴	۲۰۳۷/۶۴
سولقان	۱۳۶۷	۵۳/۸	۱۵/۶۸	۳/۲۱	۴/۷۶	۱۹۴۴/۳۷
پایین دست سولقان	۱۲۸۹	۱۴۳/۸	۱۶/۲۱	۱/۸	۵/۶	۱۶۵۶/۸۸

جدول ۲- مشخصات سیلاب‌های رخ داده در حوضه آبریز کن به همراه تعداد تلفات ناشی از آنها

شماره	زمان وقوع سیلاب	محل وقوع تلفات سیلاب	دبی حداکثر (cms)	تعداد تلفات
۱	مرداد ۱۳۶۵	منطقه امامزاده داوود	۳۰	۹ نفر
۲	خرداد ۱۳۳۴	منطقه رندان	۳۳	۴ نفر
۳	فروردین ۱۳۷۵	منطقه سولقان	۸۹/۹	۶ نفر
۴	تیر ۱۳۹۴	کل روستاهای حوضه کن	دبی ۲۵ ساله	۲۲ نفر



شکل ۲- مدل مفهومی تخمین تلفات ناشی از سیلاب (همین مطالعه)



شکل ۳- نمایش رابطه متوسط سرعت افزایش عمق آب و زمان تا عمق ۱/۵ متری (Jonkman et al., 2008)

۲- برآورد مقدار  $w_t$  (نرخ افزایش عمق آب) از رابطه ۱:

$$w_t = \frac{h_t - h_{t-1}}{0.5} \quad (\text{رابطه ۱})$$

بعد از مراحل اولیه و پیمودن گام‌های اول و دوم که به محاسبه پارامترهای مهم هیدرولیکی در جریان سیلابی می‌انجامد، برای تخمین میزان تلفات سیلاب در دو مدل منطقه‌ای و جهانی لازم است سه مرحله زیر به ترتیب طی گردند:

۱- تعیین محدوده ناپایدار در منطقه مسکونی

۲- تعیین افراد در معرض خطر سیلاب.

۳- تخمین میزان تلفات اتفاق افتاده نسبت به افراد در

همانطور که ذکر شد مشخصه‌های هیدرولیکی سیلاب که برای تخمین میزان تلفات نیاز می‌باشند، عبارتند: عمق سیلاب، سرعت افزایش عمق آب و سرعت جریان. در میان این شاخصه‌ها سرعت افزایش عمق سیلاب تأثیرگذارترین شاخصه بر فرآیند پیدا کردن جان‌پناه یا رسیدن به طبقات فوقانی ساختمان می‌باشد. سرعت افزایش عمق سیلاب را می‌توان از تقسیم عمق سیلاب بر زمان به دست آورد. در ارتباط با خسارت جانی سیلاب، معمولاً متوسط سرعت افزایش عمق سیلاب از زمان شروع سیلاب تا رسیدن به عمق یک و نیم متری در یک محل خاص (شکل ۳) در نظر گرفته می‌شود (Jonkman et al., 2008). این عمق در واقع آستانه رسیدن آب به سر افراد و ایجاد خطر خفگی برای افراد است.

در این مطالعه به محاسبه این پارامتر به صورت مکانی و در قالب فایل رستری در محیط GIS پرداخته شده است. برای به دست آوردن این پارامتر در فرمت رستری مراحل زیر انجام شد:

۱- استخراج میزان عمق جریان در گام‌های زمانی ۰/۵ ساعته (با توجه به اینکه مدت زمان شبیه‌سازی هیدرولیکی ۲۴ ساعت می‌باشد، ۴۸ فایل رستری از عمق جریان جهت به دست آوردن نرخ افزایش عمق آب ( $w$ ) مورد استفاده قرار گرفت).

معرض خطر.

### تعیین محدوده تعادل ناپایدار برای انسان در جریان سیلابی

در ارزیابی به عمل آمده توسط Jonkman and Penning-Rowse (2008) دو عامل اصلی برای ناپایداری انسان وجود دارد: ناپایداری گشتاوری (واژگون شدن) و ناپایداری اصطکاکی (سر خوردن)، به نحوی که در جریان کم عمق و سرعت زیاد سر خوردن باعث مرگ می‌شود ولی در جریان عمیق و سرعت کم مرگ انسان در اثر واژگون شدن در سیلاب رخ می‌دهد. با توجه به اینکه رابطه ارائه شده میزان پایداری افراد با یک قد و وزن مشخص را تعیین می‌کند، در مطالعه مذکور برای تعیین پهنه پایداری انسان در برابر جریان آب از رابطه کالیبره شده توسط مطالعات آزمایشگاهی استفاده گردید. روابط ارائه شده برای مقادیر بحرانی سرعت و عمق که منجر به ناپایداری انسان در جریان سیلابی می‌گردد عبارت‌اند از:

(رابطه ۲)

$$h_c = \frac{C_M^2}{C_F^2} = \cos(\alpha) \frac{L}{\mu} \quad V_C = \frac{C_F \times m^{0.5}}{C_M}$$

(رابطه ۳)

$$C_F = \frac{2\mu g}{C_D B \rho} \quad C_M = (2g \cdot \frac{\cos(\alpha)L}{C_D B \rho})^{0.5}$$

در روابط فوق  $\alpha$  زاویه کج شدگی فرد،  $L$  (m) قد شخص،  $m$  (kg) جرم شخص،  $B$  (m) متوسط عرض بدن،  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) چگالی مایع،  $g$  ( $\text{m/s}^2$ ) شتاب جاذبه،  $\mu$  ضریب اصطکاک،  $C_D$  ضریب نیروی کششی،  $h_c$  ارتفاع بحرانی و  $V_C$  سرعت بحرانی می‌باشد. در این مطالعه رابطه (۲) و (۳) برای شرایط متوسطی که در آن:  $m=75$ ؛  $B=0.4\text{m}$ ؛  $\mu=0.5$ ؛  $\alpha=75^\circ$ ؛  $g=9.81\text{ m/s}^2$ ؛  $L=1.75\text{m}$ ؛  $\rho=1000\text{ kg/m}^3$  و  $C_D=1.1$ ؛ مورد استفاده قرار گرفته است (Jonkman and Penning-Rowse, 2008).

برای محاسبه میزان مرگ و میر فرض بر آن قرار گرفت که در اثر ورود جریان به منطقه مسکونی و ایجاد منطقه ناپایدار امکان بروز تلفات وجود دارد. لذا اگر در حاشیه رودخانه و در مکانی که سکونت وجود ندارد مکان نامنی تشخیص داده شود برای آن منطقه تلفاتی محاسبه نخواهد شد. با داشتن میزان جمعیت در هر منطقه و با فرض توزیع یکنواخت جمعیت در محدوده مسکونی (Amirmoradi and Shokoochi, & karbasi et al., 2018; 2020) و همچنین داشتن مساحت دارای تلفات، جمعیتی که در هر روستا و سیلاب دچار تلفات می‌شوند، مشخص می‌گردد.

### تعیین پتانسیل تلفات

برای تخمین پتانسیل تلفات عواملی همچون ۱- تعداد افراد ساکن در منطقه خطر قبل از رویداد، ۲- درصد افرادی که به

خارج از منطقه قبل از رویداد تخلیه می‌شوند، ۳- درصد افراد باقی‌مانده که امکان پیدا کردن جان‌پناه را دارند و ۴- تعداد افراد نجات‌یافته باید در نظر گرفته شوند. در این مطالعه فرض شده است که تخلیه و پیش‌هشدار ما قبل وقوع سیلاب موجود نبوده ولی افراد در معرض خطر با توجه به موقعیت خود نسبت به سرآب حوضه، ممکن است فرصت آگاه شدن از وقوع سیلاب از همه مجاری اطلاعاتی را داشته و بتوانند تا رسیدن پیک سیلاب و بروز شرایط بحرانی منطقه سیل‌گیر را تخلیه نمایند. در این تحقیق تعداد افراد ساکن در مناطق مسکونی واقع در پهنه‌های سیلابی مختلف (۵۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ ساله) با در نظر گرفتن ضریب تخلیه به عنوان تعداد افراد در معرض خطر معرفی گردید. لازم به ذکر است در این مطالعه فرض شده است در صورتی که فردی به وسیله نقلیه دسترسی و فرصت کافی برای رسیدن به پناهگاه را دارا می‌باشد، زنده خواهد ماند.

### تعیین ضریب تلفات و میزان مرگ و میر

طبق تعریف، ضریب تلفات برابر است با تعداد مرگ و میر ناشی از سیلاب تقسیم بر کل افراد در معرض خطر سیلاب. این تابع معمولاً برای نشان دادن رابطه میان درصد تلفات با شاخصه‌های هیدرولیکی جریان مانند عمق، سرعت، امکان تخلیه سازی و ... به کار می‌رود (Amirmoradi and Shokoochi, 2020). تعداد مرگ و میر از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$N_F = F_D N_{EXP} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن  $N_F$ : تعداد مرگ و میر،  $F_D$ : ضریب تلفات و  $N_{EXP}$ : تعداد افراد در معرض خطر (افرادی که در پهنه ناپایدار سیلاب قرار می‌گیرند) می‌باشد. همانطور که گفته شد فرض شده است که افراد در صورت داشتن وسیله نقلیه و امکان رسیدن به پناهگاه با تلفات جانی روبه‌رو نخواهند شد و لذا ارزیابی به عمل آمده روی پتانسیل تلفات شامل مرگ و میر جاده‌ای در زمان بروز سیلاب نمی‌باشد.

### مقایسه مدل منطقه‌ای تلفات سیلاب با مدل Jonkman و همکاران (2008)

(Jonkman et al., 2008) روشی را برای تخمین تلفات ناشی از سیلاب در مناطق کم ارتفاع با استفاده از اطلاعات مربوط به سیلاب‌های ناشی از شکست سد ارائه دادند و بیان کردند که این روش برای سیلاب‌های رودخانه‌ای نیز پاسخگو می‌باشد. مراحل لازم برای استفاده از مدل (Jonkman et al., 2008) که از این پس روش جهانی نامیده می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌گردد:

- ۱- آنالیز مشخصه‌های هیدرولیکی سیلاب،
- ۲- منطقه‌بندی محل تحت پوشش سیلاب بر اساس شدت

$$F_D = \Phi_N \left( \frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \quad \mu_N = 1.046 \quad \sigma_N = 0.28$$

$$(h \geq 2.1 \text{ m and } w \geq 0.5 \text{ m/h}) \text{ and } (hv < 7 \text{ m}^2/\text{s} \text{ or } v < 2 \text{ m/s})$$

منطقه باقی مانده: در این مناطق مرگ و میر برای افرادی رخ می دهد که جان پناه پیدا نکرده اند. مشخصات هیدرولیکی جریان و ضریب تلفات در این منطقه مطابق رابطه ۷ است:

$$F_D = \Phi_N \left( \frac{\ln(h) - \mu_N}{\sigma_N} \right) \quad \mu_N = 7.60 \quad \sigma_N = 2.75$$

$$(w < 0.5 \text{ m/h or } (h < 2.1 \text{ m and } w \geq 0.5 \text{ m/h})) \text{ and } (hv < 7 \text{ m}^2/\text{s} \text{ or } v < 2 \text{ m/s})$$

در معادلات فوق  $F_D$  ضریب تلفات،  $h$  عمق جریان (m)،  $v$  سرعت جریان (m/s)،  $w$  سرعت افزایش عمق جریان (m/h) و  $\mu_N$  و  $\sigma_N$  به ترتیب میانگین و انحراف معیار توصیه شده برای مدل مذکور می باشند. با داشتن مشخصات هیدرولیکی در محیط GIS می توان مناطق خاص را نیز بر اساس یک آستانه مشخص از شاخص هیدرولیکی ایجاد نمود.

#### محاسبه ریسک مخاطرات جانی

برای محاسبه ریسک مخاطرات جانی لازم است منحنی هایی با عنوان منحنی تلفات - فراوانی تشکیل داد که انتگرال سطح زیر آن ها خسارت سالانه مورد انتظار ( $EAN_F$ ) را بدست می دهد. برای محاسبه  $EAN_F$  که در واقع امید ریاضی و یا محتمل ترین میزان تلفات ناشی از وقوع سیل می باشد، لازم است که مجموع تلفات ناشی از تمامی سیلاب ها که با توجه به احتمال وقوع آن ها وزن - دهی شده اند، بدست آورده شود. بر همین اساس می توان  $EAN_F$  را ریسک کوتاه مدت سالانه دانست. اگر  $N_F(T_r)$  تلفات تخمین زده شده برای دوره بازگشت معین  $T_r$  باشد،  $EAN_F$  را می توان به صورت رابطه ۸ محاسبه کرد:

$$\text{Risk} = EAN_F = \int_0^1 N_F(T_r) \cdot \left( \frac{1}{T_r} \right) \quad (\text{رابطه ۸})$$

#### نتایج و بحث

##### تولید هیدروگراف سیلاب

با توجه به اینکه مطالعه موردی در تحقیق حاضر منطبق بر حوضه مطالعاتی است که Amirmoradi and Shokoochi (2020) از آن استفاده نموده اند برای این بخش از نتایج بدست آمده در مطالعه مزبور استفاده به عمل آمد. در این حوضه سه ایستگاه باران سنج ثابت در امامزاده داوود، رندان و سنگان و همچنین سه ایستگاه هیدرومتری با نام های سولقان، کیگا و کشار فعال می باشند. در مطالعه این دو محقق، برای تولید هیدروگراف های سیلاب با دوره بازگشت های مختلف (۵۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ سال)

مشخصه های هیدرولیک جریان شامل سه منطقه شکست سد، منطقه افزایش سریع عمق آب، منطقه باقی مانده، ۳- محاسبه ضریب تلفات با استفاده از توابع ارائه شده برای هر یک از ۳ منطقه تعیین شده در مرحله دوم، ۴- برآورد میزان جمعیت در معرض خطر، ۵- تخمین تلفات ناشی از سیلاب.

در خصوص موارد ۱، ۴ و ۵ در بخش های قبل توضیحات لازم ارائه گردید لذا در اینجا مراحل دوم و سوم مورد بحث واقع خواهند شد. مطالعات مختلف (Jonkman, and Waarts, 1992) (2007) نشان داد که مناطق مختلف با مشخصات هیدرولیکی مختلف تأثیر معنی داری بر عکس العمل های افراد در معرض خطر نظیر شرکت در فرآیند تخلیه سازی، پیدا کردن جان پناه و ایستادگی و مقاومت در برابر جریان سیلاب دارند. هدف اصلی در منطقه بندی محل سیلاب، تخمین میزان مرگ و میر بر اساس نوع منطقه با مشخصات هیدرولیکی معین است. در مدل جهانی (Jonkman et al. (2008) منطقه بندی محل وقوع سیلاب با توجه به میزان مشخصه های هیدرولیکی عمق ( $h$ )، سرعت ( $v$ )، تابع ضریبی عمق در سرعت ( $hv$ ) و سرعت افزایش عمق جریان ( $w$ ) صورت می گیرد. با توجه به مقدار پارامترهای ذکر شده و همانطور که در فوق برای مرحله دوم روش جهانی ذکر گردید منطقه وقوع سیلاب به سه منطقه با نام های منطقه شکست، منطقه افزایش سریع عمق آب و منطقه باقی مانده تفکیک می شود. برای هر یک از این سه منطقه تابع تلفات  $F_D$  مختص به آن منطقه استخراج می گردد. تابع تلفات روش جهانی در سه منطقه مورد نظر به همراه پارامترهای معرف هر منطقه در ذیل ارائه شده است:

منطقه شکست: سرعت بالای جریان مناطق نزدیک محل شکسته شدن سیل بند رخ می دهد که منجر به ریزش ساختمان ها و ناپایداری افراد در برابر سیلاب می شود. مشخصات هیدرولیکی جریان و ضریب تلفات در این منطقه مطابق رابطه ۵ است:

$$F_D = 1 \quad hv \geq 7 \text{ m}^2/\text{s} \quad \text{and} \quad v \geq 2 \text{ m/s}$$

منطقه افزایش سریع عمق آب: با افزایش سرعت بالا آمدن آب و افزایش عمق آن، افراد قادر به رسیدن به جان پناه در مناطقی با ارتفاع زیاد و یا طبقات بالای ساختمان ها نیستند. ترکیب افزایش سریع عمق و عمق های زیاد بسیار خطرناک می باشد. مشخصات هیدرولیکی جریان و ضریب تلفات در این منطقه مطابق رابطه ۶ است:

(رابطه ۶)



و اسنجی شده مدل HEC-HMS و اطلاعات بارندگی، مقادیر سیلاب‌های طرح بدست آورده شدند (جدول ۳).

ابتدا با استفاده از روش بلوک‌های متناوب هایتوگراف‌های مربوط به هر دوره بازگشت حاصل شده و سپس بر اساس پارامترهای

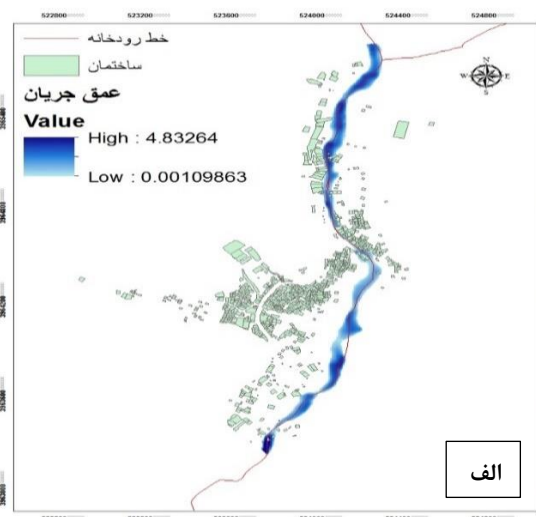
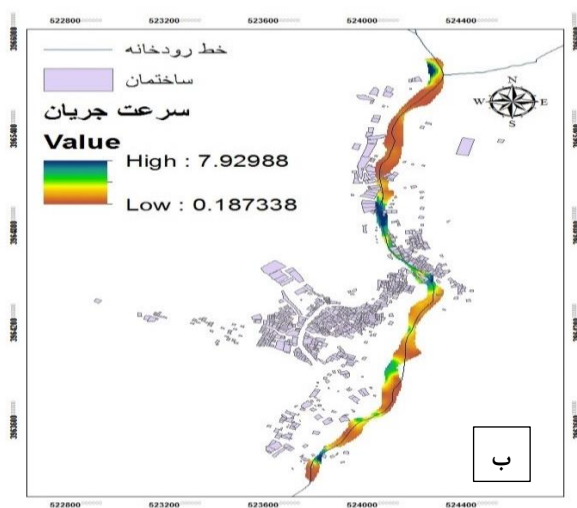
جدول ۳. مقادیر دبی اوج سیل (CMS) با دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه آبریزکن (همین مطالعه)

زیرحوضه	دوره بازگشت (سال)						
	۵۰۰	۲۰۰	۱۰۰	۵۰	۲۵	۱۰	۵
طلون	۳۶	۳۱	۲۸	۲۴	۲۰	۱۵	۱۲
رندان	۴۲	۳۷	۳۳	۲۸	۲۴	۱۸	۱۴
امامزاده داوود	۳۳	۲۹	۲۶	۲۲	۱۹	۱۴	۱۲
دوآب	۱۶	۱۳	۱۲	۱۰	۹	۷	۵
سنگان	۵۲	۴۶	۴۱	۳۵	۳۰	۲۲	۱۸
کشار	۱۰۰	۸۵	۷۷	۶۲	۴۹	۳۴	۲۴
هریاس	۴۴	۴۱	۳۷	۳۰	۲۴	۱۶	۱۲
کن میانی	۱۲	۱۰	۹	۸	۷	۵	۴
سولقان	۵۵	۴۷	۴۲	۳۴	۲۷	۱۸	۱۳
پایین دست سولقان	۵۲	۴۵	۴۰	۳۳	۲۶	۱۸	۱۳

هیدرولیکی دو بعدی می‌باشد تمامی روابط مورد نظر در محیط GIS و با استفاده از کدهای قابل اجرا برای نقشه‌های رستری بدست آمدند. در شکل (۴) نمونه‌ای از نقشه‌های تولید شده از عمق و سرعت جریان برای زیرحوضه سنگان در بالادست حوضه آبریز کن نشان داده شده است.

### توزیع مکانی مشخصه‌های هیدرولیکی سیلاب

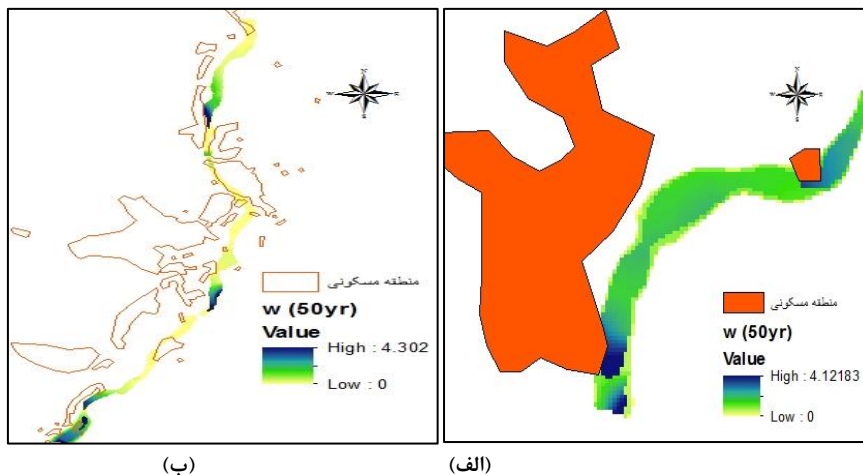
با اجرای مدل دوبعدی HEC-RAS به ازای سیلاب‌های مختلف با دوره بازگشت‌های ۲ تا ۵۰۰ سال مشخصات هیدرولیکی جریان در مناطق مسکونی محاسبه شده و پارامترهای مورد نیاز در برآورد تلفات برای هر دو مدل منطقه‌ای و جهانی استخراج شدند. همانطور که ذکر شد چون هندسه مورد استفاده برای مدل



شکل ۴ - نقشه شبیه‌سازی شده الف) عمق (m) و ب) سرعت سیلاب ۵۰۰ ساله (m/s) در منطقه مسکونی سولقان در مدل دو بعدی HEC-RAS

مطالعه بدست آورده شد. نمونه‌ای از نتایج مربوط به پارامتر سرعت افزایش عمق جریان برای دور بازگشت ۵۰ ساله زیر حوضه‌های رندان و سولقان در شکل (۵) ارائه شده است.

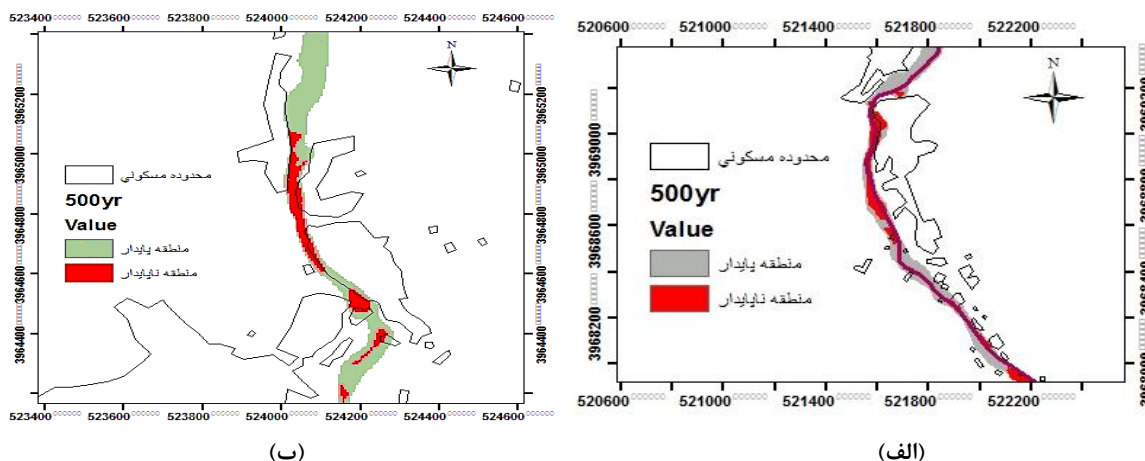
سرعت افزایش عمق آب (w) که یکی از موثرترین عوامل هیدرولیکی در میزان تلفات سیلاب است با توجه به رابطه ۱ و مقایسه سطح آب در  $\Delta t$ ‌های متوالی (۱ دقیقه در این مطالعه) و برای کل زمان پایه هیدروگراف سیل طراحی در ۵ منطقه مورد



شکل ۵- پارامتر سرعت افزایش عمق جریان (m/hr) برای زیرحوضه‌های الف) رندان و ب) سولقان

از فاکتورهای عمق آب و سرعت جریان و همچنین بقایای موجود در آب ارائه کردند. میزان  $h_v$  به دست آمده از مطالعات این محققین در محدوده  $0.06 \text{ m}^2/\text{s}$  تا  $1/2 \text{ m}^2/\text{s}$  قرار دارد. Jonkman *et al.* (2008) جهت به دست آوردن روابط دقیق و تحلیل با قرار دادن نمونه انسانی و مونولیت در برابر جریان رودخانه سرعت و عمقی که باعث ناپایداری شخص در برابر جریان می‌شود را محاسبه کردند (روابط ۲ و ۳). میزان  $h_v$  با استفاده از رابطه ۲ و ۳ مورد استفاده در این تحقیق  $1/22 \text{ m}^2/\text{s}$  بدست آمد. برای تعیین مقادیر  $h_v$  در محیط GIS لازم است که مقادیر حاصل از عمق و سرعت به ازای هر دبی سیلابی در هم ضرب شده و سپس با اعمال قوانین شرطی منطقه ناپایدار تعیین گردد. آن قسمت از محدوده سیلاب ناپایدار که با محدوده مسکونی برخورد داشت به‌عنوان محدوده دارای تلفات جانی قلمداد گردید. در نهایت با در نظر گرفتن فرض توزیع یکنواخت جمعیت در محدوده مسکونی و داشتن مساحت دارای تلفات، جمعیتی که در هر روستا و سیلاب دچار تلفات می‌شوند، مشخص گردید. شکل (۶) نمونه‌ای از نتایج بدست آمده را نشان می‌دهد.

**توزیع مکانی ناپایداری منجر به مرگ و میر**  
 اساس محاسبات پایداری و یا ناپایداری انسان هنگام مواجهه با سیلاب یعنی از بین رفتن تعادل افراد در معرض جریان سیلاب و واژگونی آن‌ها در این مطالعه رابطه شماره ۲ و ۳ می‌باشد. واقعیت آن است که تلفات سیلاب ممکن است به علت عوامل مختلفی از قبیل صدمات فیزیکی، حمله قلبی و غرق شدن در اتومبیل (Jonkman and Kelman, 2005) اتفاق بیافتد اما بیشتر محققین ترکیبی از عمق (m)  $h$  و سرعت  $v$  (m/s) نظیر آنچه که در رابطه ۲ و ۳ ملاحظه می‌گردد را پیشنهاد نموده‌اند. برای رسیدن به نتیجه فوق در ژاپن آزمایش‌هایی برای امکان راهروی در میان آب‌های سیلاب انجام شد. Suetsugi (1998) گزارش کرد هنگامی که میزان  $h_v$  بیش از  $0.5 \text{ m}^2/\text{s}$  باشد، راه رفتن برای مردم مشکل خواهد شد. در این حالت لازم است که برای تابع ضریبی عمق-سرعت یک مقدار بحرانی  $h_v$  تعریف گردد که تجاوز از آن منجر به ناپایداری انسان می‌گردد. (Abt *et al.* (1989) و *et al.* (2000) Karvonen میزان  $h_v$  را بیش از  $1/35 \text{ m}^2/\text{s}$  اعلام نمودند. *et al.* (2004) Ramsbottom و *et al.* (2005) Penning-Rowssel یک معادله تحلیلی در ارتباط با خطر سیلاب برای مردم با استفاده

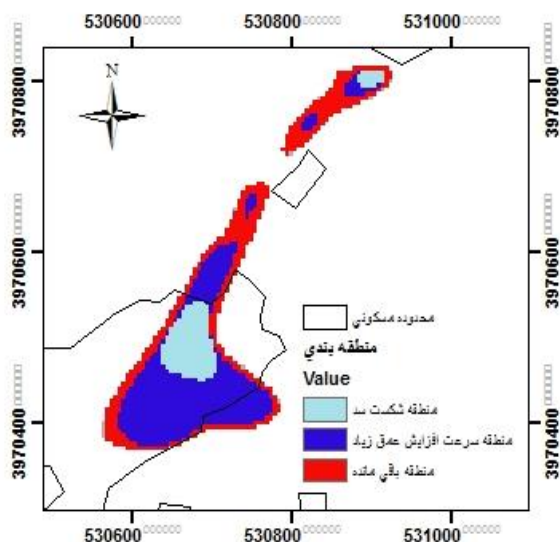


شکل ۶- پایداری انسان در برابر جریان سیلاب ۵۰۰ ساله در بخشی از منطقه مسکونی الف) سولقان ب) سنگان

بدین منظور برای مقایسه مدل منطقه‌ای توسعه داده شده با مدل جهانی (ارائه شده در بخش ۲-۶) نیاز است که منطقه بندی محل وقوع سیلاب انجام گیرد.

منطقه‌بندی حوضه آبریز کن با استفاده از مشخصه‌های هیدرولیکی سیلاب

با توجه به معادلات و روابط ارائه شده در بخش ۲-۶ (روابط ۵، ۶ و ۷) منطقه‌بندی مشخصه‌های هیدرولیکی عمق، سرعت و سرعت افزایش عمق جریان برای ۵ منطقه مورد مطالعه در حوضه آبریز کن در محیط GIS صورت گرفت. نمونه‌ای از منطقه بندی برای دوره ۵۰۰ ساله در منطقه امامزاده داوود در شکل (۷) ارائه شده است.



شکل ۷- منطقه‌بندی محل وقوع سیلاب ۵۰۰ ساله بر اساس شدت مشخصه‌ها در منطقه امامزاده داوود

#### تعیین افراد در معرض خطر

تعداد افراد در معرض خطر ( $N_{EXP}$ ) در روش جهانی با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود:

$$N_{EXP} = (1 - F_E)(1 - F_S)N_{PAR} - N_{RES} \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

که در آن:

$N_{PAR}$ : مردم در ریسک قبل از رویداد

$F_E$ : نسبت افرادی که به خارج از منطقه تخلیه می‌شوند

$F_S$ : نسبت افراد باقی‌مانده که امکان پیدا کردن پناگاه را دارند

$N_{RES}$ : تعداد افراد نجات‌یافته

در این پژوهش برای محاسبه تعداد افراد در معرض خطر برای هر دو مدل منطقه‌ای و جهانی، مقدار  $(1 - F_E)$  برابر با ضریب تلفات منطقه‌ای (ضریب ارائه شده در رابطه ۱۰) در نظر گرفته

#### مدل منطقه‌ای توسعه داده شده برای تخمین تلفات ناشی از سیلاب

مدلی که در این تحقیق برای ارزیابی و مقایسه با مدل جهانی مورد استفاده قرار گرفت مدلی است که Amirmoradi and Shokoohi (2020) برای حوضه آبریز کن ارائه نمودند. براساس گزارش منتشر شده از این مدل، محققان اساس کار را بر اصلاح مدل منطقه‌ای گذاشتند که Karbasi et al. (2018) توسعه دادند و در همان حوضه کن آن را آزمودند. Karbasi et al. (2018) بر اساس استفاده از روابط جریان دائم برای تعیین تلفات جانی ناشی از وقوع سیلاب‌های آبی در مناطق مسکونی حوضه آبریز کن مدل منطقه‌ای زیر را ارائه دادند:

(رابطه ۹)

$$N_F = 5 \cdot 786(0 \cdot 578h)(0 \cdot 5924V)(e^{3 \cdot 755A})$$

که در آن  $h$  عمق جریان (متر)،  $v$  سرعت جریان (متر بر ثانیه) و  $A$  مساحت منطقه سیلابی در محدوده مسکونی (کیلومترمربع) می‌باشد. نتایج به دست آمده از این مدل بیانگر اختلاف چشمگیر در میزان تلفات واقعی و مدل شده در پایین دست حوضه می‌باشد. این امر می‌تواند نشانگر اهمیت وجود فرصت جهت تخلیه در مناطق پایین‌دست در مقابل مناطق بالادست حوضه باشد. Amirmoradi and Shokoohi (2020) برای اصلاح رابطه فوق ابتدا با توجه به انجام ساختارهای مختلف رگرسیون غیرخطی میان میزان تلفات و پارامترهای هیدرولیکی چون عمق و سرعت جریان و سپس افزودن خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبریز نظیر شیب آبراهه اصلی و طول آبراهه اصلی توانستند مدل زیر (رابطه ۱۰) را گسترش دهند که با دقتی قابل قبول میزان مرگ و میر شبیه‌سازی شده ناشی از سیل را در موارد تاریخی ثبت شده بدست داد:

$$F_D = \frac{0 \cdot 76}{1 + e^{-0 \cdot 76hv}} - 0 \cdot 002 \frac{L_m}{S_m} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

در رابطه فوق  $F_D$  ضریب تلفات،  $L_m$  طول آبراهه اصلی بر حسب کیلومتر و  $S_m$  شیب آبراهه اصلی بر حسب (متر/متر) می‌باشد.

#### مقایسه میان مدل منطقه‌ای توسعه داده شده و مدل جهانی

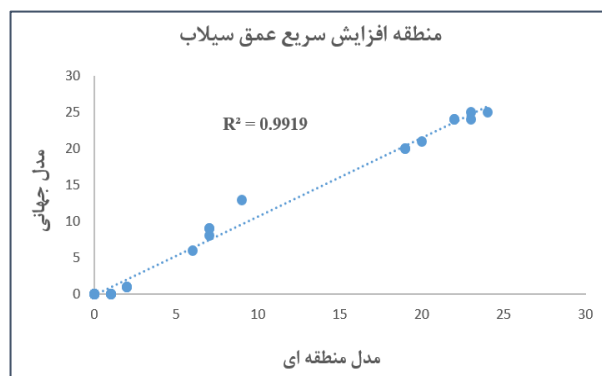
همانطور که در بخش قبلی ذکر شد مدل منطقه‌ای ارائه شده توسط Amirmoradi and Shokoohi (2020) توسط داده‌های اندکی که برای حوضه آبریز کن موجود می‌باشد کالیبره و صحت سنجی شده است. بدین منظور جهت اطمینان بیشتر از عملکرد این مدل، در این بخش به مقایسه میان مدل منطقه‌ای توسعه داده شده و مدل جهانی Jonkman et al. (2008) استفاده گردید.

هیدرولیکی مورد نیاز برای هر یک از مناطق (بر اساس روابط مدل جهانی) استخراج شده و تعداد تلفات برای هر منطقه با استفاده از رابطه ۱۰ محاسبه گردید. در مدل جهانی هم با استفاده از توابع ارائه شده برای هر منطقه (روابط ۵، ۶ و ۷) تعداد تلفات تعیین شد. مقایسه نتایج هر دو مدل برای هر منطقه در شکل (۸) نشان داده شده است.

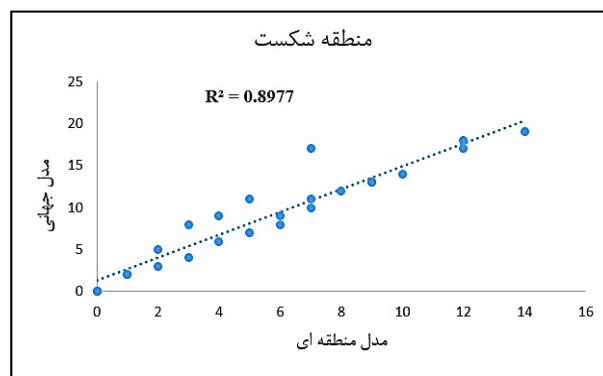
شد و به علت نبود اطلاعات کافی از در نظر گرفتن ضریب  $F_S$  صرف نظر گردید.

### نتایج مقایسه مدل منطقه‌ای و جهانی

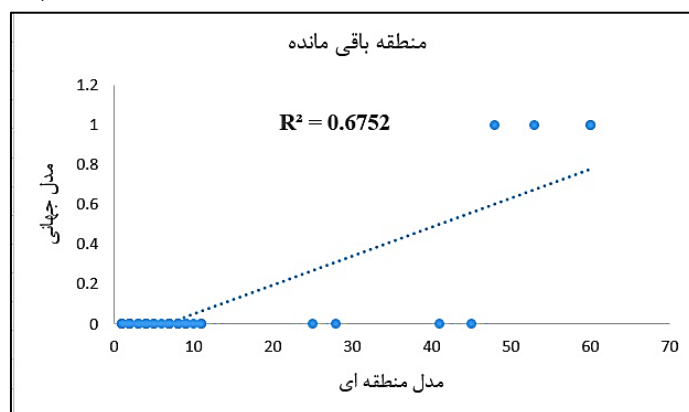
ابتدا مناطق مسکونی مورد مطالعه در حوضه آبریز کن با توجه به روابط ارائه شده در مدل جهانی منطقه‌بندی شدند. برای تخمین تعداد تلفات جانی با استفاده از مدل منطقه‌ای مشخصه‌های



(ب)



(الف)



(ج)

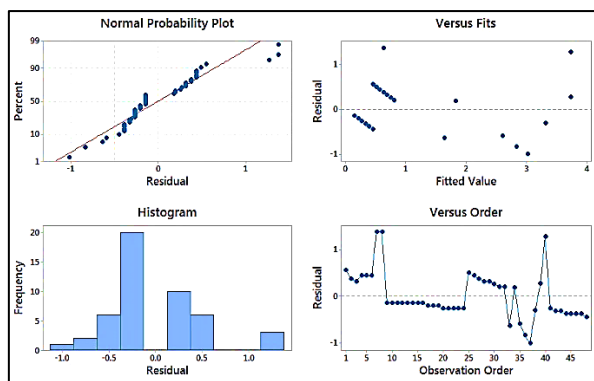
شکل ۸- نتایج مربوط به مقایسه میزان تلفات دو مدل منطقه‌ای و جهانی در الف) منطقه شکست، ب) منطقه افزایش سریع عمق آب و ج) منطقه باقی مانده

پارامتر میانگین ( $\mu$ ) توصیه شده برای منطقه مربوطه در مدل جهانی، اقدام شد. در صورتی که با تغییر میانگین پیشنهادی توسط Jonkman *et al.* (2008) مدل مزبور برای منطقه باقی مانده کالیبره نشد، در مرحله بعد انحراف معیار این مدل نیز تغییر داده خواهد شد. در این ارتباط و برای تعیین میزان مناسب ایجاد تغییر در میانگین کافی است حول میانگین پیشنهادی در مدل Jonkman *et al.* (2008) باند اعتماد مناسبی را تعریف نمود. با توجه به پارامتریک بودن مدل جهانی، محدوده تغییرات پارامتر میانگین در محدوده عدم قطعیت این پارامتر یعنی به ازای اضافه و کم شدن مضربی از انحراف معیار میانگین توزیع تعریف می‌گردد. همان‌طور که در شکل (۸-ج) ملاحظه می‌گردد مدل جهانی در تخمین میزان تلفات در منطقه ۳ (منطقه باقی مانده) نسبت به مدل منطقه‌ای کم برآورد می‌باشد لذا پارامتر  $\mu$  به  $\mu - \sigma$

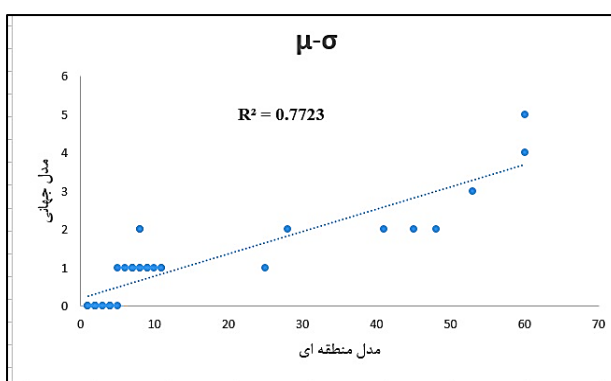
با مشاهده نتایج مربوط به سه منطقه مورد نظر، دو منطقه شکست (منطقه ۱) و منطقه افزایش سریع عمق آب (منطقه ۲) از شباهت خوبی برخوردارند و عملکردی مشابه برای میزان تلفات بین مدل منطقه‌ای و مدل جهانی مشاهده می‌شود. در منطقه باقی مانده که عملاً مناطق دور از رودخانه و بیشتر در نواحی پایین دست حوضه می‌باشند اختلاف زیادی میان تعداد مرگ و میر برآورد شده توسط مدل منطقه‌ای با مدل جهانی وجود دارد. شایان ذکر است که توسعه دهندگان مدل جهانی در مطالعه خود بدین نکته اذعان داشته‌اند که منطقه ۳ از کمترین میزان همبستگی با داده‌های مشاهداتی برخوردار بود ( $R^2=0.09$ ). برای بررسی صحت و بهبود ساختار مدل جهانی به کالیبره کردن تابع مرگ و میر مدل جهانی برای منطقه باقی مانده بر اساس و به کمک نتایج مدل منطقه‌ای اقدام گردید. برای انجام این امر در وهله اول به تغییر

تغییر داده شد. نتایج حاصل از این تغییر در شکل (۱۰-الف) ارائه شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که با این میزان تغییر در میانگین، مدل جهانی به نتایج مدل منطقه‌ای مرگ و میر حوضه آبریز کن نزدیک‌تر شده و قابل قبول می‌باشد. نتایج حاصل از ارزیابی باقی‌مانده‌های دو مدل در این حالت در شکل (۱۰-ب) آورده شده است

تغییر یافت. نتایج به دست آمده در شکل (۹-الف) ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با وجود افزایش میزان تلفات نسبت به قبل، همبستگی خوبی با مدل منطقه‌ای ایجاد نشده و نتایج آنالیز آماری صورت گرفته بر روی باقی‌مانده‌های مدل (شکل ۹-ب) هم این موضوع را تأیید می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده میزان پارامتر  $\mu$  به  $\mu-2\sigma$

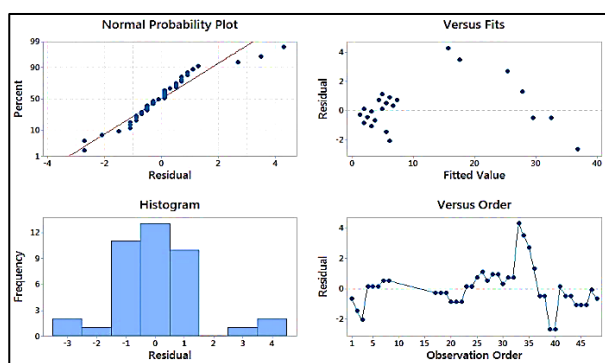


(ب)

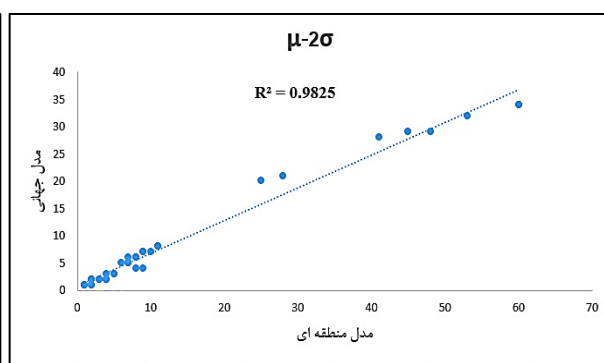


(الف)

شکل ۹- نتایج حاصل از تغییر  $\mu$  به  $\mu-2\sigma$  در تابع مرگ و میر منطقه باقی‌مانده در مدل جهانی (الف) مقایسه میان تعداد تلفات تخمین زده شده توسط مدل منطقه-ای و جهانی، (ب) آزمون باقی‌مانده‌ها در مدل جهانی



(ب)



(الف)

شکل ۱۰- نتایج حاصل از تغییر  $\mu$  به  $\mu-2\sigma$  در تابع مرگ و میر منطقه باقی‌مانده در مدل جهانی (الف) مقایسه میان تعداد تلفات تخمین زده شده توسط مدل منطقه‌ای و جهانی، (ب) آزمون باقی‌مانده‌ها در مدل جهانی

است علت این امر را می‌توان در این مهم دانست که تابع مزبور (رابطه ۵) برای منطقه شکست که پایین‌دست سد یا سیستم سیل بند قرار دارد، استخراج شده است. در زیرحوضه مورد مطالعه چنین سازه‌هایی در مسیر سیلاب وجود ندارد. در پایین‌دست حوضه در منطقه افزایش سریع عمق آب هم بیش برآوردی به چشم می‌خورد. در استخراج تابع مرگ و میر برای این منطقه در مدل جهانی از توزیع نمایی استفاده شده است. از معایب این توزیع آن است که در عمق‌های بالا میزان  $F(D)$  را برابر با ۱ تخمین می‌زند. این مسئله در حوضه آبریز کن می‌تواند علت بیش برآوردی مدل جهانی باشد. ضعیف‌ترین عملکرد مدل جهانی در

به منظور مقایسه عملکرد مدل جهانی با مدل منطقه‌ای از شاخص‌های آماری میانگین مطلق خطا (MAE)، ریشه متوسط مربع خطا (RMSE) و میانگین نسبی (اریبی نسبی) RME استفاده گردید. مقایسه میان دو مدل برای سه ناحیه مجزا یعنی اولی در بالادست، دومی در مرکز ثقل و سومی در پایین‌دست حوضه صورت گرفت. نتایج حاصل از مقایسه دو مدل با استفاده از شاخص‌های آماری مذکور در جدول (۴) ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، مدل جهانی در بالادست حوضه نسبت به بقیه مناطق عملکرد بهتری داشته است. در رابطه با منطقه شماره ۱ یعنی منطقه شکست، مدل جهانی دارای بیش برآوردی

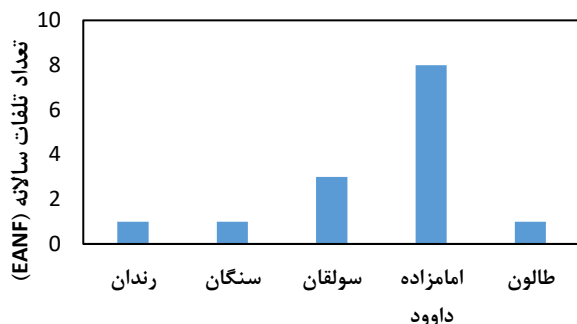
منطقه باقی مانده برای پایین دست حوضه کن می باشد.

جدول ۴- نتایج شاخص های آماری برای دو مدل منطقه ای مرگ و میر و جهانی

محدوده حوضه	منطقه بندی*	MAE	RMSE	RME
منطقه ۱	منطقه ۱	-	-	-
بالادست حوضه	منطقه ۲	۰/۱۲	۰/۱۲	-۱
منطقه ۳	منطقه ۳	۰/۸۷	۱/۱۷	-۰/۳۳
منطقه ۱	منطقه ۱	۳/۸۷	۴/۵۵	۰/۶۴
مرکز ثقل حوضه	منطقه ۲	۱	۱/۱۷	۰/۰۳
منطقه ۳	منطقه ۳	۲/۳۷	۲/۵۷	-۰/۲۹
منطقه ۱	منطقه ۱	۲/۳۷	۲/۸	۰/۴۷
پایین دست حوضه	منطقه ۲	۱/۲۵	۱/۸	۰/۲۱
منطقه ۳	منطقه ۳	۸/۳۱	۱۲/۸۷	-۰/۳۶

\* منطقه ۱: منطقه شکست، منطقه ۲: منطقه افزایش سریع عمق آب، منطقه ۳: منطقه باقی مانده

برای ارزیابی خطرات بالقوه و سالانه مرگ و میر ناشی از وقوع سیلاب های آبی در منطقه از رابطه ۸، که در واقع معرف ریسک کوتاه مدت مرگ و میر ناشی از سیلاب در حوضه کن می باشد، استفاده به عمل آمده است، میزان تلفات مورد انتظار سالانه ( $EAN_F$ ) برای ۵ زیر حوضه رندان، طالون، امامزاده داوود، سنگان و سولقان با استفاده از مدل منطقه ای توسعه داده شده محاسبه و در شکل (۱۱) ارائه شده است.



شکل ۱۱- میزان تلفات سالانه ( $EAN_F$ ) برای ۵ منطقه مورد مطالعه

### نتیجه گیری

وقوع سیلاب های اخیر کشور و مخاطرات مالی و جانی ناشی از آن، لزوم توسعه مدل های پیش بینی و تخمین خسارت جانی سیلاب برای ارائه و اجرای برنامه های پیشگیرانه را خاطر نشان می سازد. در این مطالعه به بررسی و مقایسه ی رابطه ی منطقه ای ارائه شده توسط Amirmoradi and Shokoohi (2020) با رابطه جهانی (Jonkman et al. (2008) که یکی از روابط شناخته شده در سطح دنیا برای ارزیابی تلفات جانی ناشی از سیلاب می باشد، پرداخته شد. با توجه به منطقه بندی صورت گرفته در حوضه آبریز کن بر اساس میزان مشخصه های هیدرولیکی (عمق، سرعت و سرعت افزایش عمق جریان) دو منطقه شکست و منطقه افزایش سریع عمق آب در هر دو مدل از نتایج تقریباً مشابهی برخوردار

همانطور که گفته شد یکی از علل اصلی مقایسه مدل منطقه ای با مدل جهانی، عدم وجود اطلاعات کافی در منطقه برای کالیبره کردن مدل منطقه ای می باشد. نتایج حاصل از مقایسه تخمین تلفات توسط مدل منطقه ای با مدل جهانی نشان دهنده آن است که مدل منطقه ای ارائه شده برای حوضه کن با مدل جهانی هم خوانی دارد و هر دوی این مدل ها عملاً از اصولی یکسان تبعیت می نمایند. از آنجایی که مدل جهانی Jonkman et al. (2008) از مدل های شناخته شده جهانی در برآورد تلفات ناشی از سیلاب می باشد، می توان گفت که از یک طرف مدل منطقه ای ارائه شده از مقبولیت مورد نظر برخوردار می باشد و از طرف دیگر ادعای (Jonkman et al. (2008) مبنی بر قابلیت استفاده از مدل مزبور برای سیل های رودخانه ای تقریباً درست بوده و با کالیبراسیون و ایجاد تغییر در محدوده پارامترهای پیشنهادی مدل مزبور می تواند نتایج قابل قبولی بدست بدهد.

### تلفات سالانه حدی مرگ و میر مورد انتظار

نتایج حاصل از شبیه سازی تلفات در دوره های بازگشت ۲ تا ۵۰۰ سال برای هر یک از مناطق حوضه کن در جدول (۵) آورده شده است. همانطور که ملاحظه می گردد بیشترین تلفات در همه دوره بازگشت ها مربوط به منطقه امامزاده داوود و کمترین مقدار آن مربوط به منطقه رندان می باشد.

جدول ۵- مقادیر  $EAN_F$  برای زیر حوضه های مورد مطالعه با استفاده از مدل منطقه ای

منطقه	دوره بازگشت (سال)							
	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	۵۰۰
رندان	۱	۱	۱	۱	۲	۲	۲	۳
سنگان	۱	۱	۲	۲	۳	۴	۵	۷
سولقان	۲	۳	۶	۱۰	۱۴	۱۹	۲۱	۲۴
امامزاده داوود	۸	۱۰	۱۱	۱۲	۱۶	۱۸	۲۱	۳۱
طالون	۱	۱	۲	۲	۳	۴	۴	۵

یک مدل کامل برای پیش بینی تلفات ناشی از همه انواع سیلاب‌ها به شرط واسنجی ارتقا داد. براساس نتایج بدست آمده و ملاحظه تطابق مناسب خروجی مدل منطقه‌ای توسعه داده شده توسط Amirmoradi and Shokoohi (2020) با مدل جهانی (که یک بانک اطلاعاتی غنی و کاربردی در بسیاری از مناطق دنیا پشتیبان ارزش و صحت آن می‌باشد)، ساختار مدل منطقه‌ای قابل تأیید بوده و استفاده از آن برای پیش بینی مرگ و میر ناشی از سیلاب-های ناگهانی توصیه می‌شود. استفاده از مدل جهانی نیز برای کشور ایران در صورت واسنجی برای منطقه باقی‌مانده توصیه می‌گردد. مدل منطقه‌ای در درجه اول و مدل جهانی در درجه دوم می‌توانند از یک طرف ابزاری برای تعیین اولویت احداث و ارزش اقتصادی سیستم‌های هشدار سیل محلی در بالادست کلان‌شهرهایی مانند تهران باشند و از طرف دیگر می‌توانند در خدمت ستادهای مدیریت بحران شهری از نقطه نظر شناسایی نقاط بحرانی برای مدیریت سیل و فراهم آوردن تمهیدات نجات در خود منطقه و در مجاورت آن پیش از وقوع سیلاب قرار گیرند.

"هیچ‌گونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود ندارد"

## REFERENCES

- Abt, SR, Witter, RJ, Taylor, A. and Love, DJ. (1989). Human stability in a high flood hazard zone. *Water Resour Bull.*, 25(4):881-890
- Amirmoradi, K. and Shokoohi, A. (2020). Developing a regional model for estimating flood mortality regarding the evacuation time (Case Study: Kan Watershed). *Journal of Soil and Water Research*, from [https://ijswr.ut.ac.ir/article\\_75750.html](https://ijswr.ut.ac.ir/article_75750.html) (in Farsi, On-line).
- Beitollahi, A. (2019). Lessons from the recent flood of the country, Shiraz flooding, Road, Building and Urban Development Research Center, 51 pp.
- Boyd, E. (2005). Toward an empirical measure of disaster vulnerability: storm surges, New Orleans, and Hurricane Betsy. In: 4th UCLA conference on public health and disasters, 1-4 May, Los Angeles.
- Brazdova, M. and Riha, J. (2014). A simple model for the estimation of the number of fatalities due to floods in Central Europe. *Natural Hazards Earth System Science*, 14:1663-1676.
- Duiser, J.A. (1989). An exploratory study into methods for determining flood damage during breakthrough, TNO report ref. 82-0644.
- Habibnejad R. and Shokoohi A. (2020, a). Evaluating Intensity, Duration and Frequency of Short Duration Rainfalls Using a Regional Climate Change Model (Case Study: Tehran). *Iran Water Resources Research*, 15(4):412-424. (in Farsi)
- Habibnejad R. and Shokoohi A. (2020, b). Uncertainty Analysis of IDF Curves Simulation under Climate Change Scenarios Using a Weather Generator Model (Case Study: Tehran). *Iran Water Resources Research*, 16(2): printed online. (in Farsi)
- Jonkman S.N. (2007). Loss of life estimation in flood risk assessment—theory and applications. Ph.D. thesis,
- Jonkman, S.N. and Kelman, I. (2005). An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. *J. of Disaster*, 29(1): 75-97.
- Jonkman, S.N. and Penning-Rowsell, E. (2008). Human instability in flood flows. *Journal of the American Water Resource Association*, 44(4): 1-11.
- Jonkman, S.N. Godfroy, M. Sebastian, A. and Kolen, B. (2018). Brief communication: Loss of life due to Hurricane Harvey. *Journal of Natural Hazard*, 18: 1073-1078.
- Jonkman, S.N. Vrijling, J.K. and Vrouwenvelder, A.C.W.M. (2008). Methods for the estimation of loss of life due to floods: a literature review and a proposal for a new method. *Journal of Natural Hazard*, 46(3): 353-389.
- Karbasi, M. Shokoohi, A. and Saghafian, B. (2018, a). Loss of life estimation due to flash floods in residential using a regional model. *Journal of Water Resource Management*, DOI 10.1007/s11269-018-2071-9.
- Karbasi, M. Shokoohi, A. and Saghafian, B. (2018, b). Estimating the number of fatalities due to flash floods in residential areas. *Journal of Iran-Water Resources Research*, 15:236-246 (in Farsi).
- Kardan, N. Hasanzadeh, Y and Arzanlo, A. (2017). Two-dimensional simulation of an urban flood with the CCHE2D model (Case study: Aq Qala city). *Marine Technology Journal*, 4(4) (in Farsi).
- Karimi Soltani, P. (2020). Damages, causes, and

- solutions to prevent floods in Iran in 2019. Roshd magazine 3:39-45(in Farsi).
- Karvonen, R.A. Hepojoki, A. Huhta, H.K. and Louhio, A. (2000). The use of physical models in dam-break analysis RESCDAM Final Report. Helsinki University of Technology, Helsinki.
- Mehr news. (2012). /<https://www.mehrnews.com>.
- Natural Disaster Research Institute. (2020). Flood report on January 11, 2020. <https://ndri.ac.ir/sistan-baluchestan-flood-2020-2>.
- Penning-Rowsell, E. Floyd, P. Ramsbottom, D. and Surendran, S. (2005). Estimating injury and loss of life in floods: A deterministic framework. *Journal of Natural Hazard*, 36(1-2):43-64.
- Ramsbottom, D. Wade, S. Bain, V. Hassan, M. Penning-Rowsell, E. Wilson, T. Fernandez, A. House, M. and Floyd, P. (2004). R&D outputs: flood risks to people. Phase 2. FD2321/IR2. Department for the Environment, Food, and Rural Affairs/Environment Agency.
- Suetsugi, K. (1998). Control of floodwater and improvements of the evacuation system for floodplain management. In: Fukuoka S (ed.) *Floodplain risk management, Proceedings of an international workshop*. Hiroshima, 11-13 November 1996, pp 191-207.
- Waarts, P. (1992). Method for determining the number of deaths due to inundation. Report TNO B-91-1099.