

Developing a Regional Model for Estimating Flood Mortality Regarding the Evacuation Time (Case Study: Kan Watershed)

KIMIA AMIRMORADI¹, ALIREZA SHOKOOHI^{1*}

1. Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.
(Received: March. 18, 2020- Revised: Apr. 14, 2020- Accepted: Apr. 19, 2020)

ABSTRACT

Floods are one of the most important natural hazards causing many serious destruction and fatalities, especially in Iran. Despite recognizing the high number of fatalities due to floods, especially in recent years, there is not an acceptable/reliable model for mortality estimation. The few presented models, that are intrinsically valuable, are not enough for achieving the goals. The regional model presented in this paper employs hydraulic properties of floods and geometric characteristics of rivers for mortality estimation while considering the effect of available evacuation time in flood-prone areas. Based on the presented algorithm, the product of two hydraulic parameters: depth and flow velocity, presented in a raster format, are required for mortality simulation. An exponential function was developed based on the relationship between the depth, velocity, and the number of observed fatalities in the corresponding floods. The model, employing the length and slope of the main channel as the two geomorphologic parameters of the river directly related to the flow hydraulics, is capable of considering the available time for the people at risk to evacuate the region. Finally, the developed model's efficacy and accuracy were confirmed by comparing the results of the model with historical records and with that of the global/regional models.

Keywords: Flood Human Fatalities, Risk, Mortality, Regional Model, Evacuation Time.

توسعه یک مدل منطقه‌ای برای تخمین مرگ‌ومیر ناشی از سیلاب با احتساب تخلیه مناطق سیل‌گیر (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبریز کن)

کیمیا امیرمرادی^۱، علیرضا شکوهی^{۱*}

۱. گروه مهندسی آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۲۸ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱/۲۶ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۱/۳۱)

چکیده

سیلاب یکی از مهم‌ترین انواع بلایای طبیعی است که منجر به وقوع تخریب‌های جدی به‌ویژه در ایران می‌شود. علی‌رغم وجود تلفات زیاد جانی ناشی از سیلاب به‌ویژه در سال‌های اخیر، روش متقن و یکپارچه‌ای برای برآورد تلفات ناشی از سیلاب تاکنون ارائه نشده است. مطالعات محدود و پراکنده‌ای که تاکنون صورت گرفته نیز علی‌رغم ارزش ذاتی خود برای رسیدن به این اهداف، کافی به نظر نمی‌رسند. مدل منطقه‌ای ارائه‌شده در این مقاله برای برآورد تعداد تلفات از مشخصات هیدرولیکی سیلاب و مشخصات هندسی رودخانه‌ها استفاده نموده و اثر زمان در دسترس برای تخلیه افراد در معرض خطر را مد نظر قرار می‌دهد. بر اساس الگوریتم ارائه‌شده، به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی برای تخمین سیلاب‌های حدی و سپس تعیین دو پارامتر هیدرولیکی سرعت و عمق جریان به‌صورت رستری به ترتیب به کمک مدل‌های HEC-HMS و HEC-RAS اقدام شد. برای به دست آوردن رابطه‌ای جهت تخمین میزان تلفات ناشی از سیلاب به بررسی رابطه میان میزان تلفات و پارامترهای هیدرولیکی سیلاب پرداخته شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، یک مدل منطقه‌ای نمایم بر اساس ترکیبی از دو عامل عمق و سرعت جریان توسعه داده شد. با استفاده از دو پارامتر ژئومورفولوژیکی و مرتبط با هیدرولیک جریان حوضه یعنی طول و شیب آبراهه اصلی، امکان اعمال فرصت تخلیه و فرار از محدوده سیلاب به مدل منطقه‌ای توسعه داده‌شده، اضافه گردید. در انتها با مقایسه نتایج مدل توسعه‌یافته با شواهد تاریخی و همچنین با نتایج برخی مدل‌های جهانی و منطقه‌ای، کارایی مدل در برآورد تلفات انسانی ناشی از سیل قابل‌قبول ارزیابی شد.

واژه‌های کلیدی: تلفات انسانی سیل، ریسک، نرخ مرگ‌ومیر، مدل منطقه‌ای، فرصت تخلیه.

مقدمه

روز ادامه داشت، علاوه بر خسارت‌های مالی، موجب فوت ۱۳ نفر و مصدوم شدن حداقل ۱۱۶ نفر شد (Tasnim News, 2019). در تاریخ ۵ فروردین ۱۳۹۸ (March 25, 2019) سیلی ناگهانی در ورودی شهر شیراز (دروازه قرآن) به راه افتاد که بر اساس آمارهای رسمی منجر به فوت ۲۱ نفر و مصدوم شدن ۱۶۴ نفر شد. در همین سال سیل در استان‌های لرستان، همدان، خوزستان نیز به ترتیب جان ۱۵، ۸ و ۶ نفر را گرفت. آمار رسمی منتشرشده میزان تلفات ناشی از سیل در سراسر کشور در سال ۱۳۹۸ را به‌طور کلی ۷۶ نفر و تعداد کشته‌شدگان مرد را دو برابر تعداد زنان اعلام می‌نماید (Beitollahi, 2019). سیل دی‌ماه ۹۸ در بلوچستان (Jan 9, 2020) علاوه بر خسارت‌های مالی سنگین تا زمان تهیه این مقاله منجر به فوت بیش از ۳ تن از مردمان این استان شده است (Irna, 2020).

پیش‌بینی تلفات رویدادهای طبیعی به‌منظور تصمیم‌گیری‌های مناسب در رابطه با راهکارهای کاهش تلفات و مرگ‌ومیرهای در سطح محلی، منطقه‌ای و ملی ضروری می‌باشد. ارائه الگوریتم

سیلاب از جمله بلایای طبیعی شناخته شده است که بر اساس گزارش پایگاه داده بین‌المللی مخاطرات در زمینه بلایای طبیعی، در کنار زلزله و خشک‌سالی بالاترین رتبه را از لحاظ خسارت مالی و جانی به همراه دارد (The international disaster database, 2016). اهمیت و ضرورت مطالعه خسارات سیلاب: حداقل یک‌سوم از همه ضرر و زیان‌های ناشی از نیروهای طبیعی را می‌توان به جاری شدن سیل نسبت داد (Loster, 1999; Rashid, 2011; Hansson et al., 2008). تحقیقات صورت گرفته توسط سازمان یونسکو نشان می‌دهد که سیلاب در آسیا سالانه جان حدود ۱۷ میلیون نفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. 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). در سیلی که در ۲۶ اسفند سال ۱۳۹۷ (March 17, 2019) در استان‌های شمالی ایران، از جمله گلستان و مازندران و خراسان شمالی به راه افتاد و چندین

ای میان تعداد خانه‌های سیل‌زده و تعداد کشته‌شدگان استخراج نمودند. در این سیلاب عمدتاً مرگومیر در مناطقی با تعداد ساختمان‌های سیل‌زده فراتر از ۱۰۰۰ مورد اتفاق افتاده است. نتایج آماری به‌دست‌آمده نشان داد که اختلاف قابل‌توجهی میان نتایج موجود با اطلاعات مشاهداتی وجود دارد که ممکن است به علت تأثیر عواملی نظیر هشدار، تخلیه، مشخصه‌های سیلاب و ریزش ساختمان باشد. (Jonkman *et al.* (2008) با استفاده از یک روش سه مرحله‌ای به تعیین تلفات ناشی از سیلاب پرداختند: (۱) تعیین پهنه‌ی سیلاب و مشخصه‌های هیدرولیکی آن (عمق و سرعت جریان)، (۲) تخمین تعداد افراد در معرض خطر و (۳) تعیین ضریب تلفات برای افراد در معرض خطر. (2012) *et al.* Di Mauro به مقایسه سه روش برای تخمین تلفات سیلاب در کانادا، انگلیس و هلند پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که روش‌های مورد بررسی برای مقایسه سناریوهای خطر کاربردی‌تر می‌باشند. (Brazdova and Riha (2014) با استفاده از ۱۹ واقعه تاریخی سیلاب، مدلی منطقه‌ای برای تخمین تعداد تلفات در اروپای مرکزی را ارائه نمودند. (2015) *De Bruijn et al.* با ترکیب چندین عامل از قبیل مشخصه‌های سیلاب، ضریب خسارت، احتمال سیلاب و زمان تخلیه، نقشه‌ی پهنه‌ی خطر سیلاب و پهنه‌ی تلفات سیلاب را ارائه نمودند. (2015) *Haynes et al.* در استرالیا و (2017) *Luu et al.* در ویتنام به پیش‌بینی تلفات سیلاب از طریق روابط بین تعداد تلفات و محیط‌زیست منطقه تحت خطر پرداختند.

تجربیات داخلی در ارزیابی و برآورد مرگومیر ناشی از سیلاب: از جمله مطالعات انجام‌شده بر روی تخمین تلفات جانی در داخل کشور می‌توان به مطالعه (2019) *Karbasi et al.* اشاره کرد که به بررسی ارتباط پارامترهای هیدرولیکی با تعداد تلفات جانی ناشی از وقوع سیلاب‌های آبی در مناطق مسکونی حوضه آبریز کن پرداختند. مدل منطقه‌ای توسعه داده‌شده در این مطالعه اثر عواملی همچون امکان تخلیه ساکنین در زمان وقوع سیلاب بر میزان مرگومیر را نادیده می‌گیرد. همچنین (2018) *Karbasi et al.* مدل ریاضی تلفات ناشی از سیلاب‌های ناگهانی بر روی حوضه آبریز کن با استفاده از مدل دوبعدی و شبیه‌سازی جریان رودخانه در حالت غیر دائم را توسعه دادند که در آن علاوه بر پارامترهای هیدرولیکی سیلاب نظیر سرعت و عمق جریان، پارامترهایی چون زمان پیش هشدار سیل لحاظ شده است. محققین مزبور در این مطالعه با مدل‌سازی تخلیه افراد در معرض خطر، اهمیت تخلیه در میزان مرگومیر را نشان دادند.

اهداف تحقیق: بیشتر کشورها از جمله ایران هیچ روش استانداردی برای تخمین تلفات ناشی از بلایای طبیعی ندارند. مرور

یادگیری برای تخمین خطرات و خسارات ناشی از این بلایا برای بخش‌های خصوصی و عمومی، می‌تواند پایه و اساسی را در راستای برنامه‌ریزی، ناحیه بندی، توسعه آیین‌نامه‌ها و سیاست-گذاری‌ها ارائه دهد که منجر به کاهش خطرات و عواقب ناشی از سیل شود.

تجربیات بین‌المللی در ارزیابی و برآورد مرگومیر ناشی از سیلاب: Mizutani (1985) رابطه‌ای را میان مرگومیر ناشی از طوفان‌های ساحلی $F(D)$ و عمق متوسط سیلاب h استخراج نمود. استفاده از رابطه مزبور و مشاهده تفاوت زیاد میان تلفات دو رویداد با عمق یکسان به‌خوبی تأثیر عواملی نظیر مشخصه‌های هیدرولیکی دیگر، هشدار سیلاب و زمان لازم برای تخلیه را نشان داد (Jonkman *et al.*, 1985). (1992) *Waarts* با استفاده از اطلاعات سیلاب ۱۹۵۳، تابعی عمومی (جهانی) را ارائه کرد که می‌توان به کمک آن درصد کشته‌شدگان بر اساس عمق سیلاب را به دست داد. (1997) *Vrouwenvelder and Steenhuis* فاکتور سرعت افزایش عمق را به تابع ارائه‌شده توسط (1992) *Waarts* اضافه کردند. (2005) *Jonkman* رابطه‌ای برای تلفات سیلاب‌های رودخانه‌ای در هلند ارائه نمود. در این رابطه عمق سیلاب، سرعت آب و امکان تخلیه سازی جمعیت از محل سیل در نظر گرفته شده است. (2003, 2004) *Romsbotton et al.* و (2005) *Rowell et al.* در قالب یک طرح تحقیقاتی مربوط به موسسه محیط‌زیست انگلستان رابطه‌ای را جهت محاسبه میزان ریسک جانی سیلاب برای افراد سیل‌زده توسعه دادند. در این روش سه فاکتور بر میزان ریسک جهانی تأثیرگذارند: خطر سیل، آسیب‌پذیری افراد و میزان آسیب‌پذیری محیط. در این روش قسمت‌های مربوط به پایداری افراد در برابر جریان سیلاب مبنایی جهت تعیین فاکتور خطر سیلاب در نظر گرفته شده است. در مورد فاکتورهای دیگر قضاوت مربوط به مشاهدات عینی، مبنای کار بوده است. با کنار هم قرار دادن این سه فاکتور میزان مرگومیر و افراد جراحت‌دیده قابل پیش‌بینی است. این روش برای سه مورد مطالعاتی در انگلستان به کار گرفته شد و نتایج حاصل‌شده با اطلاعات مشاهداتی مطابقت خوبی داشت. (2005) *Boyd* بر پایه اطلاعات مشاهداتی از هفت واقعه‌ی طوفان شامل طوفان *betsy* سال ۱۹۶۵ و *Camille* سال ۱۹۶۹ در ایالت متحده، تابعی از تلفات بر اساس ارتباط میان تعداد تلفات و عمق سیلاب ارائه نمودند. این رابطه برای عمق ۴ متر حداکثر نرخ تلفات $(F(D))$ را $0/۳۴$ تخمین می‌زند. این بدان معناست که اگر فقط عمق آب در محاسبه مرگومیر لحاظ شود همواره نزدیک به ۶۵ درصد جمعیت در معرض سیلاب، جان سالم بدر خواهند برد. (2008) *Zhai et al.* با آنالیز داده‌های مربوط به سیلاب ژاپن رابطه

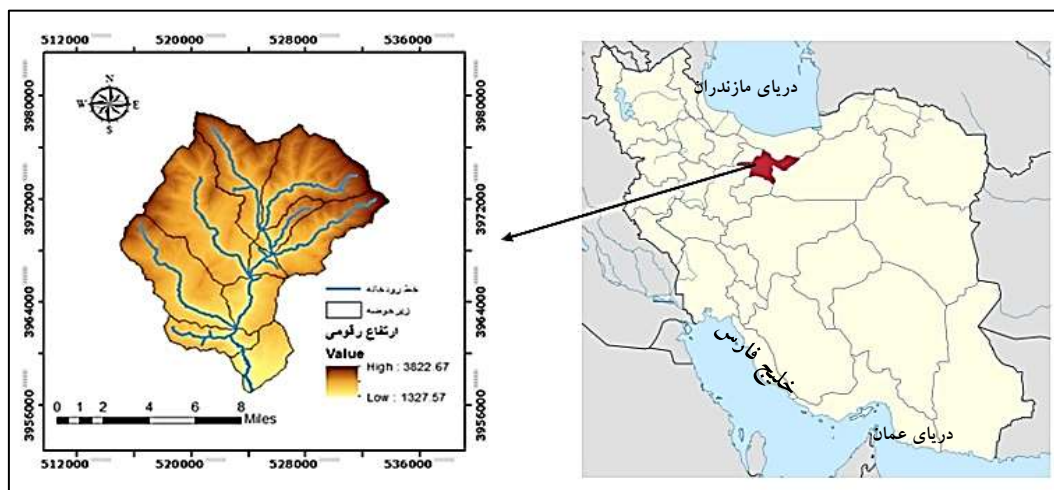
تاریخی، از طریق مقایسه با برخی مدل‌های جهانی و مدل منطقه‌ای کرباسی و همکاران ارزیابی می‌شود.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز کن که با مساحت ۸۳۵ کیلومتر مربع در شمال استان تهران واقع شده است، از سمت شمال به حوضه جاجرد، از سمت شرق به حوضه وردیج و از سمت غرب به حوضه حصارک منتهی می‌شود. حوضه کن در منطقه‌ای کوهستانی با شیب تند واقع شده است؛ به طوری که اختلاف بین بیشترین و کمترین نقطه ارتفاعی آن (بیشترین ۳۸۲۲ متر و کمترین ۱۳۳۰ متر) ۲۴۹۲ متر می‌باشد. حوضه کن به ۱۰ زیرحوضه تقسیم می‌شود (شکل ۱)؛ به نحوی که امامزاده داوود پرشیب‌ترین (با ۱۹۶ درصد) و کشار کم‌شیب‌ترین (۱ درصد) زیرحوضه‌های آن می‌باشند. رودخانه اصلی که با نام رودخانه کن شناخته شده است، از زیرحوضه طالون شروع شده و تا پایین دست زیرحوضه سولقان ادامه می‌یابد. اطلاعات کلی زیرحوضه‌های کن در جدول (۱) آورده شده است. با توجه به آمار تلفات جانی حوضه، مشخص شد که ۵ روستای رندان، طالون، 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.

تحقیقات انجام‌شده بر روی تلفات جانی تاکنون، نشان‌دهنده تعداد کم روابط و در عین حال دقت نه‌چندان مناسب روابط کلی ارائه‌شده به علت نادیده گرفتن برخی از پارامترهای مهم اثرگذار بر تلفات جانی ناشی از سیلاب‌های ناگهانی می‌باشد. استفاده از مدل‌سازی گسترده سیلاب و تلفات ناشی از آن به دو علت؛ (۱) پیچیدگی استفاده و ترکیب مدل‌های هیدرولیکی، خسارت و تخلیه (۲) مشکلات تأمین داده که معمولاً در بسیاری از کشورهای در حال توسعه نظیر ایران فراهم نیست، در حال حاضر گزینه مطلوبی از نظر مدیریت بحران در کشور نمی‌باشد. مضافاً آنکه استفاده از مدل‌های ریاضی ترکیبی و تغذیه آن‌ها از نتایج یکدیگر چیزی از عدم قطعیت نتایج حاصله نمی‌کاهد. در این تحقیق با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی مؤثر بر تلفات از قبیل سرعت و عمق جریان و همچنین مشخصه‌های هندسی رودخانه‌ها، به توسعه مدلی برای تعیین تلفات ناشی از سیلاب رودخانه‌ای در حوضه آبریز کن پرداخته شده است. این مدل منطقه‌ای نه تنها با استفاده داده‌ها و پارامترهای قابل دستیابی در هر منطقه به برآورد استاتیک میزان مرگ‌ومیر می‌پردازد، بلکه برخلاف دیگر مدل‌های مفهومی ارائه‌شده تا کنون (از جمله مدل منطقه‌ای *Karbasi et al., 2019*) می‌تواند اثر زمان در دسترس برای تخلیه افراد در معرض خطر را مد نظر قرار داده و با دقتی مناسب میزان مرگ‌ومیر را برآورد نماید. در بخش‌های بعد منطقه مورد مطالعه، مدل منطقه‌ای توسعه‌یافته در این تحقیق و پارامترهای آن معرفی شده و پس از واسنجی در مقابل داده‌های ثبت‌شده و وقایع



شکل ۱- حوضه آبریز کن به همراه زیرحوضه‌های آن

هیدرولیکی می‌توان پهنه سیلاب احتمالی، عمق و سرعت آب را نشان داد. بسیاری از مدل‌های یک‌بعدی با به‌کارگیری معادلات جریان ماندگار برای تخمین سطح آب در رودخانه‌ها و برای شناسایی اولیه مناطق آب‌گرفته مناسب می‌باشند. در صورت

مراحل لازم برای تخمین تلفات ناشی از سیلاب شناسایی مناطق مستعد سیل‌گیری اولین گام در مطالعات ریسک سیلاب است که نیاز به مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی دارد. معمولاً با استفاده از نقشه‌های خطر حاصل از نتایج مدل

وجود پیچیدگی در هندسه رودخانه یا کم شیب بودن رودخانه و تلفات جانی در این پژوهش در شکل (۲) ارائه شده است. (Karbasi et al., 2018). چارچوب استفاده‌شده برای ارزیابی مدل‌های هیدرولیکی دوبعدی و غیر ماندگار ضروری است

جدول ۱- مشخصات کلی زیرحوضه‌های کن

زیرحوضه	مختصات جغرافیایی خروجی (اعشار)		مساحت (ha)	مساحت منطقه مسکونی (ha)	محیط (km)	حداقل ارتفاع (km)	حداکثر ارتفاع (km)	شیب (آبراهه %)	طول آبراهه اصلی (km)
	عرض	طول							
طلالون	۳۵/۸۷	۵۱/۲۷	۲۶۶۵	۱۶	۲۹/۸۳	۱/۸۶	۳/۵۳	۷/۱۵	۹/۶۱
رندان	۳۵/۸۷	۵۱/۲۷	۳۳۶۱	۶/۸	۲۷/۷۴	۱/۸۶	۳/۷۴	۹/۱۶	۹/۰۴
امامزاده داوود	۳۵/۸۵	۵۱/۲۸	۲۳۷۸	۱۶/۱	۲۵	۱/۷۶	۳/۸۲	۱۰/۳۴	۸/۵۸
دوآب	۳۵/۸۵	۵۱/۲۸	۷۱۹	۰/۹۱	۱۵/۲۷	۱/۷۶	۳/۱۱	۱۹/۷۴	۳/۷۴
سنگان	۳۵/۸۳	۵۱/۲۶	۴۷۴۳	۳۳/۹	۳۶/۱۳	۱/۶۷	۳/۳۸	۷/۶	۱۱/۸۲
کشار	۳۵/۸۰	۵۱/۲۵	۳۴۷۸	۱۳/۶	۲۹/۲۵	۱/۵۲	۳/۲۶	۸/۸	۱۱/۹۶
هریاس	۵۱/۲۶	۳۵/۷۸	۱۱۴۴	۱/۰۹	۱۸/۵۸	۱/۴۱	۲/۳۳	۹/۰۴	۴/۳۸
کن-میانی	۳۵/۸۳	۵۱/۲۶	۴۴۰	۰/۷	۹/۸۹	۱/۶۷	۲/۷۵	۳/۲۵	۲/۶۴
سولقان	۳۵/۸۰	۵۱/۲۵	۱۳۶۷	۵۳/۸	۱۵/۶۸	۱/۵۲	۲/۷۳	۳/۲۱	۴/۷۶
پایین دست سولقان	۳۵/۷۵	۵۱/۲۶	۱۲۸۹	۱۴۳/۸	۱۶/۲۱	۱/۳۲	۲/۳۳	۱/۸	۵/۶



شکل ۲- مدل مفهومی تخمین تلفات ناشی از سیلاب

مدل‌سازی هیدرولیکی-هیدرولوژیکی

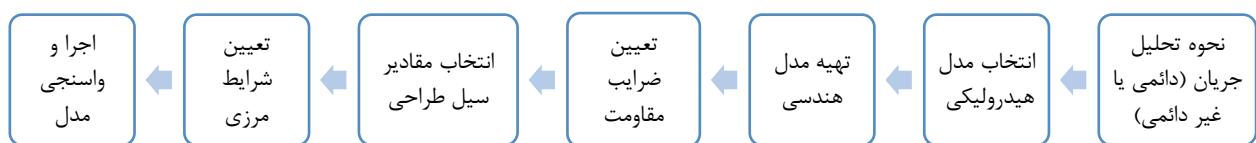
مدل‌سازی هیدرولوژیکی

در این پژوهش برای ارزیابی مخاطرات جانی سیلاب و تخمین میزان ریسک سالانه مورد انتظار (EAR: Expected Annual Risk) نیاز به هیدروگراف سیل زیرحوضه‌های موجود در حوضه آبریز کن برای دوره بازگشت‌های مختلف (۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ ساله) می‌باشد. با توجه به تعداد کم و ناقص بودن آمار و اطلاعات ثبت‌شده از سیل در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه و همچنین نیاز به شبیه‌سازی سیل‌های نادر، استفاده از مدل‌های ریاضی هیدرولوژیکی برای استخراج هیدروگراف سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف در زیرحوضه‌های این منطقه اجباری است. به منظور محاسبه دبی‌های اوج و هیدروگراف سیلاب برای دوره بازگشت‌های مختلف در تمامی زیرحوضه‌ها از مدل HEC-HMS استفاده شد. در این مدل از روش SCS برای محاسبه نفوذ، از روش هیدروگراف واحد کلارک در روندبایی زیرحوضه و از روش ماسکینگام برای روندبایی در رودخانه استفاده شد. 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 زیرحوضه، آمار مقدار بارش ۵ روز قبل از رگبار در ایستگاه‌های موجود در منطقه جمع‌آوری شد. نسبت تلفات اولیه، یکی از پارامترهای واسنجی است که به‌عنوان 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 به دست آمده و در مرحله کالیبراسیون تحت واسنجی قرار گرفت.

مدل‌سازی هیدرولیکی

مطالعات هیدرولیک جریان، پیش‌نیاز انجام مطالعات رودخانه‌ای محسوب می‌شود که در آن چگونگی پاسخ رودخانه به سیلاب معین با استفاده از شاخص‌هایی نظیر عمق، سرعت، عدد فرود و غیره از نظر هیدرولیکی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل (۳) گام‌های ضروری جهت انجام مطالعات هیدرولیکی رودخانه ارائه شده است.



شکل ۳- گام‌های ضروری جهت انجام مطالعات هیدرولیکی رودخانه

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی جریان رودخانه و به دست آوردن نقشه‌های عمق سیلاب برای دوره بازگشت‌های مختلف از

جریان کم‌عمق و سرعت زیاد مقدم بر مرگ ناشی از واژگون شدن انسان در سیلاب رخ می‌دهد. معادله (۱) روابط ارائه شده برای مقادیر بحرانی سرعت و عمق است که منجر به ناپایداری انسان در جریان سیلابی می‌شوند:

(رابطه ۱)

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

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

در روابط فوق α زاویه کج شدگی فرد، L (m) قد شخص، m (kg) جرم شخص، B (m) متوسط عرض بدن، ρ چگالی مایع، g (m/s²) شتاب جاذبه، μ ضریب اصطکاک، C_D ضریب نیروی کششی، h_c ارتفاع بحرانی و V_c سرعت بحرانی می‌باشد. در این مطالعه رابطه (۲) برای شرایط متوسطی که در آن: $\mu = 0.5$ ؛ $\alpha = 75^\circ$ ؛ $g = 9.81$ m/s²؛ $L = 1.75$ m؛ $m = 75$ kg؛ $\rho = 1000$ kg/m³ و $C_D = 1.1$ ؛ $B = 0.4$ m است (Jonkman and Penning-Rowsell, 2008). با توجه به اینکه رابطه ارائه شده میزان پایداری افراد با یک قد و وزن مشخص را تعیین می‌کند، در این مطالعه هم فرض شده است که میزان پایداری هر انسان با توجه به قد و وزن خود مشخص تعیین می‌شود. این میزان پایداری برای انسان‌ها با قد و وزن مشخص در سراسر دنیا به یک شکل خواهد بود. بدین منظور در این مطالعه برای تعیین پهنه پایداری انسان در برابر جریان آب از رابطه کالیبره شده فوق توسط مطالعات آزمایشگاهی استفاده شد.

پس از تعیین پهنه ناپایدار برای هر سیلاب (در هر دوره بازگشت)، آن قسمتی از محدوده ناپایدار که با محدوده مسکونی تقاطع داشته باشد، به‌عنوان محدوده دارای تلفات جانی قلمداد می‌شود. در نهایت با در نظر گرفتن فرض توزیع یکنواخت جمعیت در محدوده مسکونی و داشتن مساحت دارای تلفات، جمعیتی که در هر منطقه و در هر سیل دچار تلفات می‌شوند، مشخص می‌شود.

تعیین افراد در معرض خطر سیلاب

در سیلاب‌هایی که به‌صورت غیرمنتظره و ناگهانی اتفاق می‌افتند و امکان هشداردهی قبلی وجود ندارد، اولین اولویت کاری انتقال افراد در معرض خطر به نواحی امن‌تر می‌باشد. تعداد افراد در معرض خطر جریان سیلاب را می‌توان توسط ترکیب عوامل زیر تخمین زد:

- تعداد افراد ساکن در منطقه خطر قبل از رویداد.

- درصد افرادی که به خارج از منطقه قبل از رویداد تخلیه

می‌شوند.

- درصد افراد باقی‌مانده که امکان پیدا کردن جان‌پناه را

مدل HEC-RAS استفاده شد. برای انجام مطالعات هیدرولیکی منطقه مورد مطالعه و برای تعریف هندسه رودخانه ابتدا اطلاعات نقشه‌برداری مسیر رودخانه‌ها پس از انجام اصلاحات لازم وارد محیط GIS شده و مدل ارتفاعی رقومی (DEM) حوضه کن ایجاد شد. ضریب زبری از مهم‌ترین عوامل مؤثر برای تعیین دبی، سرعت و عمق جریان و همچنین واسنجی مدل‌های ریاضی است که برای هر زیرحوضه با توجه به نقشه کاربری اراضی تعیین شد. به‌منظور تحلیل جریان، هیدروگراف‌های سیلاب زیرحوضه‌ها به‌عنوان شرط مرزی بالادست و عمق نرمال به‌عنوان شرط مرزی پایین‌دست به مدل معرفی شد.

مراحل لازم برای تخمین تعداد تلفات ناشی از سیلاب

برای تخمین تعداد تلفات سیلاب لازم است سه مرحله زیر به ترتیب طی شود:

تعیین محدوده و مشخصات هیدرولیکی سیلاب نظیر عمق و سرعت.

تعیین محدوده ناپایدار در منطقه مسکونی

تعیین افراد در معرض خطر سیلاب.

تخمین میزان تلفات اتفاق افتاده نسبت به افراد در معرض خطر.

شبیه‌سازی مشخصه‌های سیلاب

برای رسیدن به میزان تلفات سیلاب، داشتن شناخت و آگاهی از مشخصه‌های هیدرولیکی سیلاب امری اجتناب‌ناپذیر است. مهم‌ترین شاخصه‌های هیدرولیکی که مستقیماً برای تخمین میزان تلفات مورد استفاده قرار می‌گیرند، عبارت‌اند از: عمق سیلاب و سرعت جریان.

تعیین محدوده ناپایدار در منطقه مسکونی مورد مطالعه

در پژوهش حاضر از روابط ارائه شده توسط Jonkman and Penning-Rowsell (2008) جهت مشخص کردن محدوده ناپایدار برای حفظ تعادل انسان در برابر جریان آب استفاده شده است. در مطالعه مذکور برای ارائه رابطه‌ای جهت تعیین پایداری انسان در برابر جریان آب، آزمایش‌هایی با قرار دادن نمونه انسانی و مونولیت در جریان یک رودخانه انجام گرفت و سرعت و عمقی که سبب ناپایداری شخص در برابر جریان می‌شود، محاسبه شد. در تئوری توسعه‌یافته توسط این دو محقق به این نکته توجه شده است که هر دو عامل سرعت و عمق، به تنهایی و همچنین در ترکیبی بحرانی، بیش از هر عامل دیگری در مرگ‌ومیر ناشی از سیلاب مؤثر می‌باشند. در ارزیابی به‌عمل آمده توسط این دو محقق دو عامل اصلی برای ناپایداری انسان وجود دارد: ناپایداری گشتاوری (واژگون شدن) و ناپایداری اصطکاکی (سر خوردن). محققین مزبور به این نتیجه رسیدند که سرخوردن در ترکیب

دارند.

- تعداد افراد نجات یافته.

در این تحقیق تعداد افراد موجود در پهنه‌های سیلابی مختلف (۵۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ ساله) به‌عنوان تعداد افراد در معرض خطر معرفی شد. در این تحقیق به‌منظور توسعه مدل تلفات انسانی، توزیع جمعیت افراد در معرض خطر در تمامی محدوده‌های مسکونی یکنواخت در نظر گرفته شد (Karbasi *et al.*, 2018; 2019). در این مطالعه فرض شده است که تخلیه و پیش‌هشدار ماقبل 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. لازم به ذکر است در این مطالعه فرض شده است در صورتی که فردی به‌وسیله نقلیه دسترسی و فرصت کافی برای رسیدن به پناهگاه را دارا می‌باشد، زنده خواهد ماند.

تشخیص تابع مرگ‌ومیر بر مبنای ضریب تلفات

طبق تعریف، ضریب تلفات برابر است با تعداد مرگ‌ومیر 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 و پارامترهایی از قبیل امکان تخلیه سازی و ... به کار می‌رود. تعداد مرگ‌ومیر از رابطه (۲) قابل محاسبه می‌باشد:

$$N_F = F_D N_{EXP} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن N_F : تعداد مرگ‌ومیر، F_D : ضریب تلفات و N_{EXP} : تعداد افراد در معرض خطر می‌باشد. در این مطالعه افرادی که در پهنه ناپایدار سیلاب قرار می‌گیرند به‌عنوان میزان تلفات در نظر گرفته شده است. در این مطالعه برآورد میزان تلفات در جاده‌ها و مسیرها مورد مطالعه قرار نگرفته و جز اهداف این پژوهش نمی‌باشد و فرض شده است که افراد در صورت داشتن وسیله نقلیه و امکان رسیدن به پناهگاه با تلفات جانی روبه‌رو نخواهند شد.

ارزیابی ریسک

با تخمین تلفات جانی ناشی از سیلاب در هر نقطه برای دوره بازگشت‌های مختلف، می‌توان مقادیر به‌دست‌آمده را درون‌یابی کرد و یک منحنی خسارت-فراوانی پیوسته به دست آورد. این نوع منحنی‌ها پایه‌ای برای محاسبات ریسک می‌باشند که با نام خسارت سالانه مورد انتظار (Risk) و در اینجا EAN_F تعریف می‌شوند. EAN_F در ساده‌ترین شکل به مفهوم مجموع تلفات ناشی

از تمامی سیلاب‌ها می‌باشد که با توجه به احتمال وقوع آن‌ها وزن‌دهی شده‌اند، بر این اساس می‌توان آن را تلفات محتمل کوتاه‌مدت یا سالانه دانست. اگر $N_F(T_r)$ تلفات تخمین زده شده برای دوره بازگشت معین T_r باشد، EAN_F را می‌توان به‌صورت رابطه (۳) محاسبه کرد:

$$\text{Risk} = EAN_F = \int_0^1 N_F(T_r) \cdot \left(\frac{1}{T_r}\right) \quad (\text{رابطه ۳})$$

نتایج و بحث

تولید هیدروگراف سیلاب

در محیط HEC-HMS، ابتدا شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب با مقادیر اولیه پارامترها انجام پذیرفت. در این حوضه سه ایستگاه باران‌سنج ثابت در امامزاده داوود، رندان و سنگان و همچنین سه ایستگاه هیدرومتری با نام‌های سولقان، کیگا و کشار فعال می‌باشند. با بررسی هیدروگراف‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های هیدرومتری و بارش‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های باران‌سنجی ثابت در منطقه، وقایع بارش-رواناب جهت واسنجی و اعتباریابی مدل انتخاب شدند. معیار انتخاب این وقایع در مرحله اول وجود همزمان داده‌های بارش و رواناب در تمامی ایستگاه‌های موجود در منطقه و در مرحله دوم بر اساس شکل هیدروگراف و دبی اوج آن بود. با استفاده از برنامه بهینه‌سازی موجود در مدل HEC-HMS فرآیند تنظیم پارامترهای زیر مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه برای تعدادی از سیل‌های مشاهده‌شده انجام پذیرفت. نتایج حاصل از واسنجی پارامترهای مدل به تفکیک زیرحوضه‌های مورد مطالعه در جدول (۲) آورده شده است.

برای تولید هیدروگراف‌های سیلاب با دوره بازگشت‌های مختلف (۵۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ سال) ابتدا با استفاده از روش بلوک‌های متناوب هایتوگراف‌های مربوط به هر دوره بازگشت حاصل شد و سپس بر اساس پارامترهای واسنجی-شده و اطلاعات بارندگی، هیدروگراف‌های مربوطه شبیه‌سازی شد (جدول ۳).

استخراج پهنه‌های سیل‌گیر

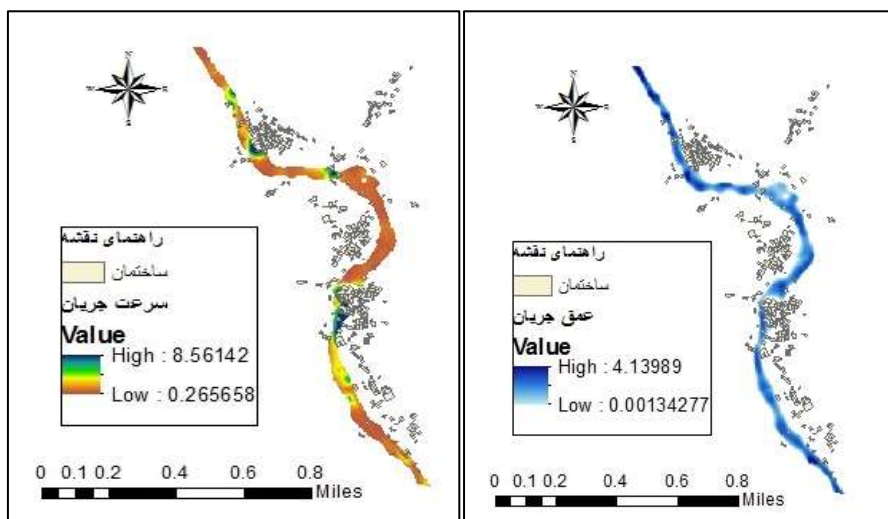
با اجرای مدل HEC-RAS پهنه سیلابی به همراه مشخصاتی متنوع از عمق تا سرعت و عدد فرود برای هر سلول در دشت سیلابی قابل استخراج و نمایش می‌باشد. بر این اساس نقشه‌های عمق (آب‌گرفتگی) و سرعت جریان برای هر زیرحوضه و دوره بازگشت استخراج و به محیط GIS وارد شدند. در شکل (۴) نمونه‌ای از نقشه-های تولیدشده از عمق و سرعت جریان برای زیرحوضه سنگان در بالادست حوضه آبریز کن نشان داده شده است.

جدول ۲- پارامترهای واسنجی شده در حوضه رودخانه کن به تفکیک زیرحوضه‌ها

زیرحوضه	CN	تلفات اولیه (mm)	زمان تمرکز (hr)	درصد سطح غیرقابل نفوذ (/)
طالون	۸۰/۳۳	۱۲/۹۶	۲/۲	۴/۵
رندان	۸۴	۱۲/۰۵	۲/۲	۱۳/۱
امامزاده داوود	۸۰/۵	۱۲/۳۳	۱/۳۷	۲۶
دوآب	۸۰/۳	۱۱/۹۵	۱/۳۳	۳۳/۲
سنگان	۸۰	۱۵/۵۲	۲/۵۳	۱۵/۵۲
کشار	۸۰/۴	۱۲/۳۶	۲/۳۶	۱۳/۲۲
هریاس	۷۹/۳	۱۲/۲۴	۱/۴۰	۰
کن-میانی	۷۸/۷	۱۳/۶۵	۰/۸۶	۴۷
سولقان	۷۹/۷	۱۲/۹۴	۱/۴۳	۵/۱
پایین دست سولقان	۸۰/۵	۱۲/۳	۰/۷۴	۰

جدول ۳- مقادیر دبی اوج سیل (CMS) با دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه آبریز کن

زیرحوضه	دوره بازگشت (سال)						
	۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰
طالون	۸	۱۲	۱۵	۲۰	۲۴	۲۸	۳۱
رندان	۹	۱۴	۱۸	۲۴	۲۸	۳۳	۳۷
امامزاده داوود	۷	۱۲	۱۴	۱۹	۲۲	۲۶	۲۹
دوآب	۳	۵	۷	۹	۱۰	۱۲	۱۳
سنگان	۱۱	۱۸	۲۲	۳۰	۳۵	۴۱	۴۶
کشار	۱۳	۲۴	۳۴	۴۹	۶۲	۷۷	۸۵
هریاس	۶	۱۲	۱۶	۲۴	۳۰	۳۷	۴۱
کن میانی	۳	۴	۵	۷	۸	۹	۱۰
سولقان	۷	۱۳	۱۸	۲۷	۳۴	۴۲	۴۷
پایین دست سولقان	۷	۱۳	۱۸	۲۶	۳۳	۴۰	۴۵



(ب)

(الف)

شکل ۴- نقشه شبیه‌سازی؛ الف) عمق (متر) و ب) سرعت (متر بر ثانیه) سیلاب ۵۰۰ ساله در منطقه سنگان.

کانال و بالا آمدن آب تا ارتفاع ۱۰ متری به بار آمد، موجب شد که ابعاد هندسی این کانال را بعد از رخداد سال ۱۳۶۶ افزایش دهند. نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی بیانگر این است که کانال جدید ظرفیت عبور سیلاب ۵۰۰ ساله را هم داراست (شکل ۶- الف). با توجه به اینکه در برآورد میزان مخاطرات باید تمام

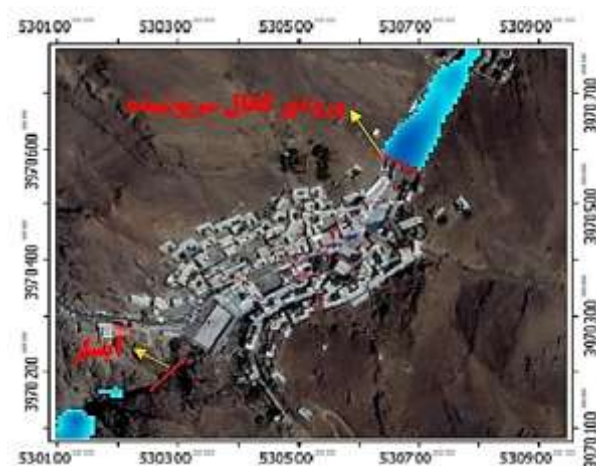
لازم به ذکر است که در زیرحوضه امامزاده داوود یک کانال مصنوعی سرپوشیده، درست در بالادست امامزاده، وجود دارد که جریان را به سمت پایین دست (انتهای آستان مبارک) عبور می‌دهد (شکل ۵). خسارت‌های جانی و مالی سنگین ناشی از رخداد سیلاب در سال‌های ۱۳۳۳ و ۱۳۶۶ که بر اثر انسداد دهانه

می‌تواند منجر به خسارت جانی در منطقه مسکونی شود. مخاطرات برآورده شده برای منطقه امامزاده داوود در بخش‌های بعد، مربوط به این سناریو می‌باشد.

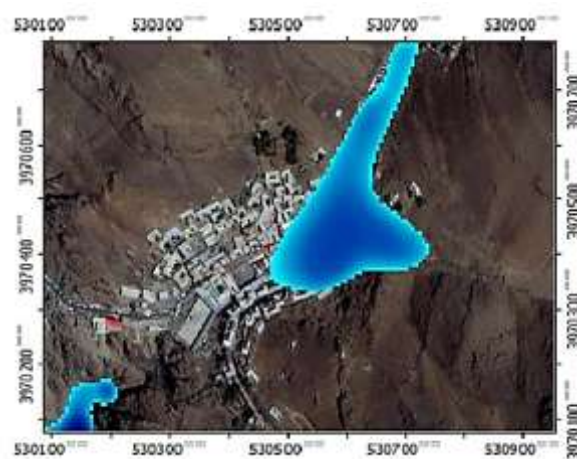
احتمالات موجود بررسی شود مدل هیدرولیکی در صورت انسداد دهانه این کانال هم اجرا شد. نتایج حاصل در شکل (۶-ب) ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود در صورت انسداد دهانه کانال جریان آب به منطقه راه پیدا خواهد کرد که



شکل ۵- کانال سرپوشیده در بالادست منطقه امامزاده داوود



(ب)



(الف)

شکل ۶- شبیه‌سازی جریان سیلاب ۵۰۰ ساله: الف) بدون انسداد کانال سرپوشیده و ب) با انسداد کانال سرپوشیده

شدن در اتومبیل اتفاق بیافتد (Jonkman and Kelman, 2005). بیشتر محققین برای شبیه‌سازی میزان تلفات ترکیبی از عمق $h(m)$ و سرعت $v(m/s)$ را پیشنهاد نموده‌اند که یکی از مقبول‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها به صورت تابع ضربی عمق-سرعت بحرانی hvc است که مقادیر بحرانی آن منجر به ناپایداری انسان می‌شود. در ژاپن آزمایش‌هایی برای امکان راهروی در میان آب‌های سیلاب انجام شد. (Suetsugi (1998 گزارش کرد هنگامی که میزان hvc بیش از $0.5 m^2/s$ باشد، راه رفتن برای مردم مشکل خواهد شد. (Abt et al. (1989 و (Karvonen et al. (2000 میزان hvc را بیش از $1/35 m^2/s$ اعلام نمودند. (et al. (2004) Ramsbottom و (Penning-Rowse et al. (2005) یک معادله تحلیلی در ارتباط با خطر سیلاب برای مردم با استفاده از فاکتورهای عمق آب و سرعت جریان و همچنین بقایای موجود

مدل‌سازی تلفات سیلاب

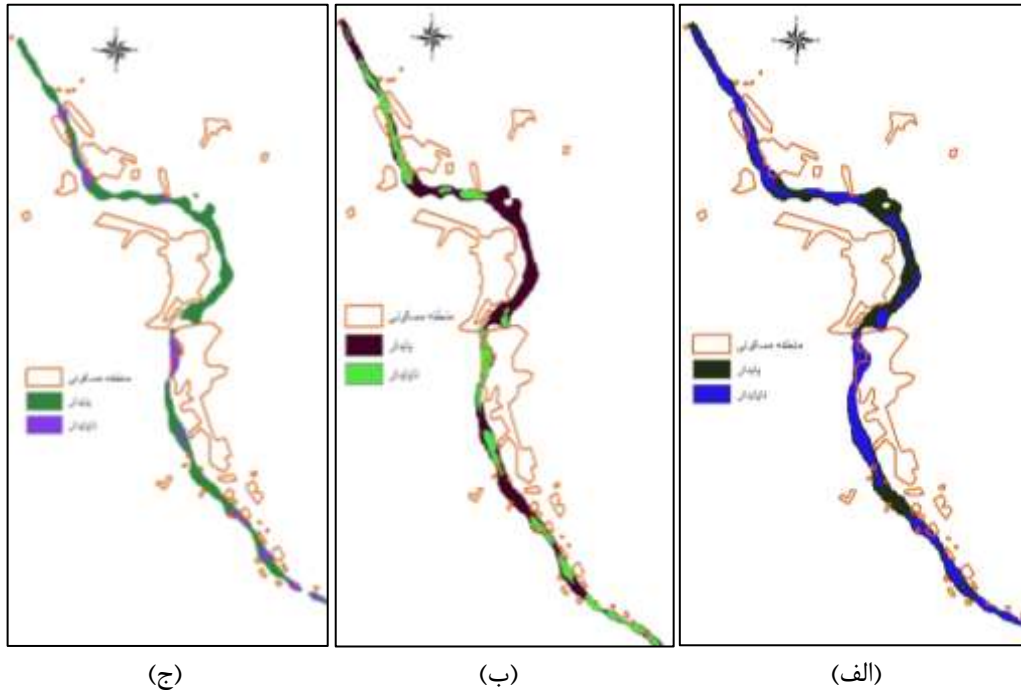
با توجه به آمار تلفات جانی حوضه، مشخص شد که ۵ روستای زندان، طالون، امامزاده داوود، سنگان و سولقان بیش‌ترین میزان تلفات جانی را تاکنون داشته‌اند و در سایر مناطق حوضه کن تعداد تلفات ناچیز بوده است. بنابراین نتایج مربوط به این ۵ ناحیه ارائه می‌شود.

پایداری انسان در برابر سیلاب

تعیین محدوده ناپایدار سیلاب برای انسان بر اساس مطالب ارائه‌شده در بخش‌های قبلی تعیین شده است. بدین منظور پس از تعیین عمق و سرعت سیلاب در مدل هیدرولیکی، نتایج وارد نرم‌افزار GIS شد و سپس این مقادیر با مقادیر عمق-سرعت بحرانی (رابطه ۲) مقایسه شدند. تلفات سیلاب ممکن است به علت عوامل مختلفی از قبیل صدمات فیزیکی، حمله قلبی و غرق

فرض توزیع یکنواخت جمعیت در محدوده مسکونی و داشتن مساحت دارای تلفات، جمعیتی که در هر روستا و سیلاب دچار تلفات می‌شوند، مشخص شد. نمونه‌ای از نتایج حاصله برای تعیین مناطق مستعد مرگ‌ومیر در سیلاب در زیرحوضه‌ی سنگان با جریان‌های ۲، ۵۰ و ۵۰۰ ساله در شکل (۷) ارائه شده است.

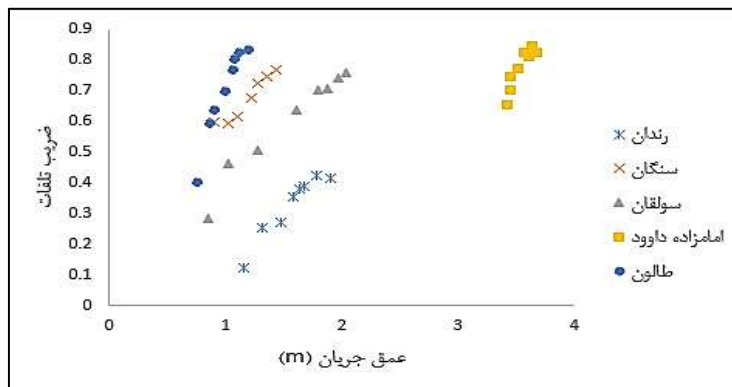
در آب ارائه کردند. میزان (h_v) به‌دست‌آمده از مطالعات این محققین در محدوده $0/6 \text{ m}^2/\text{s}$ تا $1/2 \text{ m}^2/\text{s}$ قرار دارد. میزان (h_v) با استفاده از رابطه $2 \text{ m}^2/\text{s}$ $1/22$ حاصل شد. پس از تعیین پهنه سیلاب ناپایدار (در هر دوره بازگشت)، آن قسمتی از محدوده سیلاب ناپایدار که با محدوده مسکونی برخورد داشت، به‌عنوان محدوده دارای تلفات جانی قلمداد شد. در نهایت با در نظر گرفتن



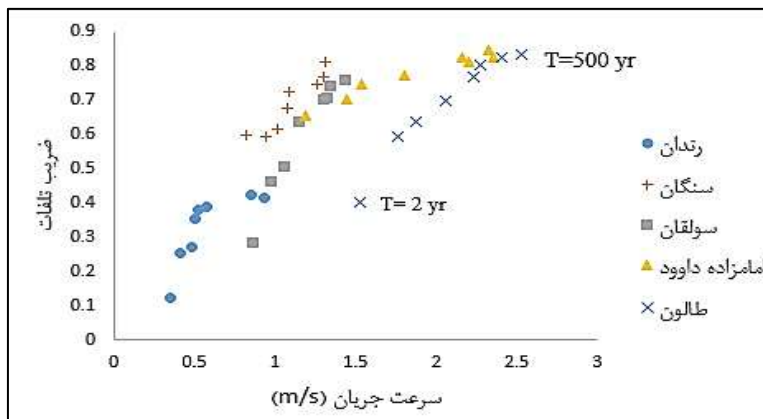
شکل ۷- پایداری انسان در برابر جریان سیلاب در منطقه سنگان با دوره بازگشت‌های: الف) ۲ ساله، ب) ۵۰ ساله و ج) ۵۰۰ ساله

به ازای حاصل ضرب این دو پارامتر نشان می‌دهد. همان‌طور که در این سه شکل مشاهده می‌شود، با زیاد شدن میزان عمق، سرعت و همچنین ضرب این دو پارامتر در هر منطقه میزان تلفات نیز افزایش می‌یابد.

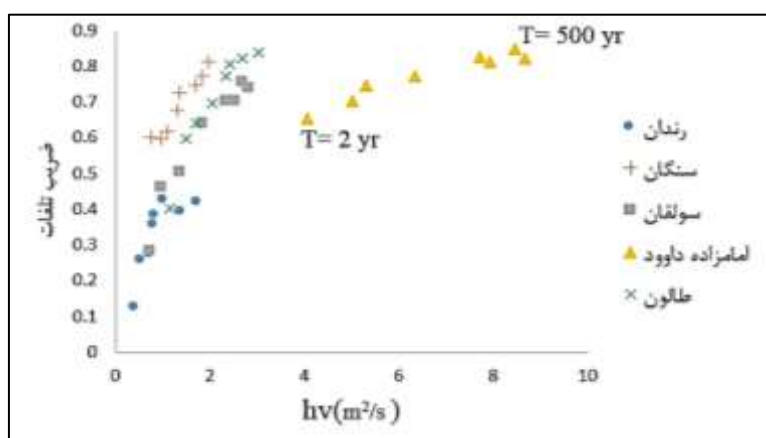
به‌منظور بررسی تأثیر تغییر پارامتر هیدرولیکی روی F_D (ضریب تلفات یا نسبت مرگ‌ومیر به تعداد افراد در معرض خطر) در هر یک از ۵ منطقه نامبرده، شکل‌های (۸) تا (۱۰) ارائه شده‌اند. دو شکل اول ضریب تلفات ایجادشده را به ازای تغییر مقادیر عمق متوسط و سرعت متوسط در هر منطقه و شکل سوم مقدار F_D را



شکل ۸- تأثیر تغییر عمق متوسط جریان در محدوده هر یک از مناطق حوضه آبریز کن بر تعداد تلفات ایجادشده



شکل ۹- تأثیر تغییر سرعت متوسط جریان در محدوده هر یک از مناطق حوضه آبریز کن بر تعداد تلفات ایجادشده



شکل ۱۰- تأثیر تغییر تابع ضریبی عمق- سرعت در محدوده هر یک از مناطق حوضه آبریز کن بر تعداد تلفات ایجادشده

مناطق پنج‌گانه حوضه کن، به بررسی روابط مختلفی میان پارامترهای هیدرولیکی و ضریب تلفات پرداخته شد. در ابتدا با توجه به ادبیات جهانی این موضوع (Mizutani, 1985; Waarts, 1992; Asselman and Jonkman, 2003; Boyd et al., 2005) و همچنین ارزیابی به‌عمل‌آمده در خصوص سازگاری نتایج محاسبه‌شده با مقادیر ثبت‌شده، سه مدل مناسب که از ضریب همبستگی خوبی با داده‌های موجود نیز برخوردار بودند، مطابق جدول (۴) در نظر گرفته شدند. در جدول، ANOVA هر سه مدل ضریب P-value برای ساختار کلی مدل و همچنین ضرایب اصلی مدل کمتر از ۰/۰۵ و در حد صفر به‌دست‌آمده آمد.

جدول ۴- روابط استخراج‌شده میان ضریب تلفات و پارامترهای هیدرولیکی

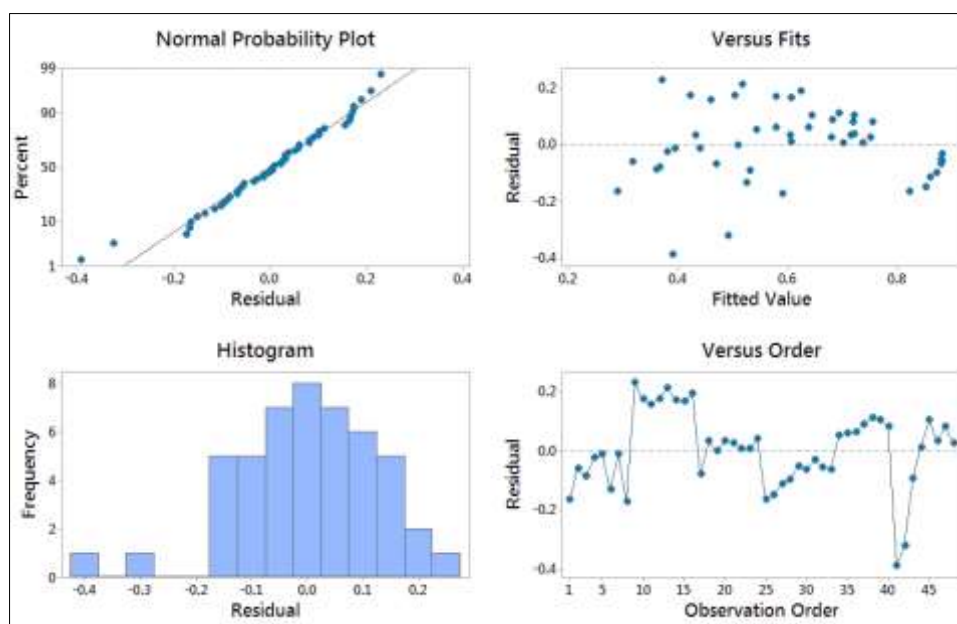
ردیف	رابطه	ضریب همبستگی
۱	$F(D) = 0.49 e^{0.075hv}$	$R^2 = 0.95$
۲	$F(D) = 0.5 h^{0.12} v^{0.52}$	$R^2 = 0.97$
۳	$F(D) = \frac{0.76}{1 + e^{-0.76hv}}$	$R^2 = 0.98$

جهت انتخاب بهترین مدل، باقی‌مانده‌های هر سه رابطه

توسعه مدل منطقه‌ای برای تخمین تلفات ناشی از سیلاب در توسعه مدل منطقه‌ای، ارزیابی مطالعات انجام‌شده نشان داد که اخیراً مدلی منطقه‌ای برای تخمین میزان مرگ‌ومیر توسط Karbasi et al. (2019) برای همین منطقه کن ارائه شده است. محققین مزبور 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 (معادله ۴) را گسترش دادند: (رابطه ۴) $N_F = 5.786(0.578h)(0.5924V)(e^{3.755A})$ که در آن h عمق جریان، v سرعت جریان و A مساحت منطقه سیلابی در محدوده مسکونی (کیلومتر مربع) می‌باشد. ارزیابی به‌عمل‌آمده از مدل Karbasi et al. (2019)، در تحقیق حاضر نشان داد که این مدل علی‌رغم نتایج نسبتاً قابل قبول خود به عللی همچون نوع تابع و نحوه ترکیب عوامل مؤثر در مرگ‌ومیر از یک سو و نادیده انگاشتن احتمال و فرصت فرار برای افراد در معرض خطر از سوی دیگر، نیاز به اصلاح داشته و قابل ارتقا می‌باشد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از مدل منطقه‌ای Karbasi et al. (2019)، در تحقیق حاضر برای توسعه مدل مرگ‌ومیر با به‌کارگیری روش ارائه‌شده برای برآورد تلفات جانی در بخش‌های قبل و با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده برای ضریب تلفات در

یادشده از توزیع نرمال تبعیت کرده، مستقل از هم بوده و بالاخره از ثبات واریانس (homoscedacity) برخوردار می‌باشند. بخشی از آنالیز واریانس مدل منتخب که در مورد صحت ضرایب مدل می‌باشد، در جدول (۵) ارائه شده است. همان‌طور که در جدول مزبور ملاحظه می‌شود، عدم قطعیت ضرایب مدل بسیار ناچیز و در حد صفر می‌باشد.

ارائه‌شده در جدول (۴) مورد آزمون قرار گرفتند. ارزیابی مقایسه-ای مدل‌ها نشان داد که مدل نمایی (مدل شماره ۳) عملکرد بهتری نسبت به دیگر مدل‌ها از خود نشان می‌دهد. شکل (۱۱) نمودارهای احتمال نرمال، سری زمانی، هیستوگرام و در نهایت تغییرات باقی‌مانده‌ها در مقابل مشاهدات را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مزبور مشخص است، باقی‌مانده‌های مدل



شکل ۱۱- نمودارهای باقی‌مانده مدل منطقه‌ای مرگومیر (مدل شماره ۳ در جدول ۵) در حوضه آبریز کن

جدول ۵- جدول ANOVA مدل منتخب $(F(D) = \frac{i}{1+e^{hv}})$

Parameter	Estimate	P-value	95% Confidence Interval	
			Lower Bound	Upper Bound
i	0.76	0.000	0.76	0.76
c	-0.76	0.000	-0.76	-0.76

گویند. مقادیر این شاخص‌ها برای مدل مرگومیر توسعه داده‌شده (مدل شماره ۳ در جدول ۴) در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶- نتایج بررسی عملکرد رابطه ضریب تلفات بر اساس شاخص‌های آماری

N_F	F(d)	شاخص‌های آماری
۲/۱۴	۰/۱۲	MAE
۳/۶۸	۰/۱۵	RMSE
-۰/۰۵	۰/۰۲۱	RME

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، مدل انتخاب‌شده جهت برآورد میزان تلفات در حوضه آبریز کن به‌قرار معادله (۸) خواهد بود:

$$F_D = \frac{0.76}{1+e^{-0.76hv}} \quad (\text{رابطه ۸})$$

که در آن F_D ضریب تلفات، h عمق جریان (m) و v سرعت جریان (m/s) می‌باشد. اکنون با استفاده از رابطه (۱) می‌توان از حاصل ضرب ضریب تلفات حاصل از معادله فوق در تعداد افراد در

علاوه بر بررسی جدول ANOVA، ضریب R^2 و آزمون باقی-مانده‌ها، آماره‌های دیگری جهت بررسی عملکرد مدل وجود دارد که هر کدام از یک جنبه کیفیت مدل را بررسی می‌کنند. در این تحقیق میانگین مطلق خطا (MAE)، ریشه متوسط مربع خطا (RMSE) و میانگین نسبی (اریبی نسبی) RME به‌عنوان ابزاری برای بررسی عملکرد مدل استفاده شدند. روابط هر یک از آماره‌های فوق‌الذکر در معادلات (۵) الی (۷) ارائه شده است:

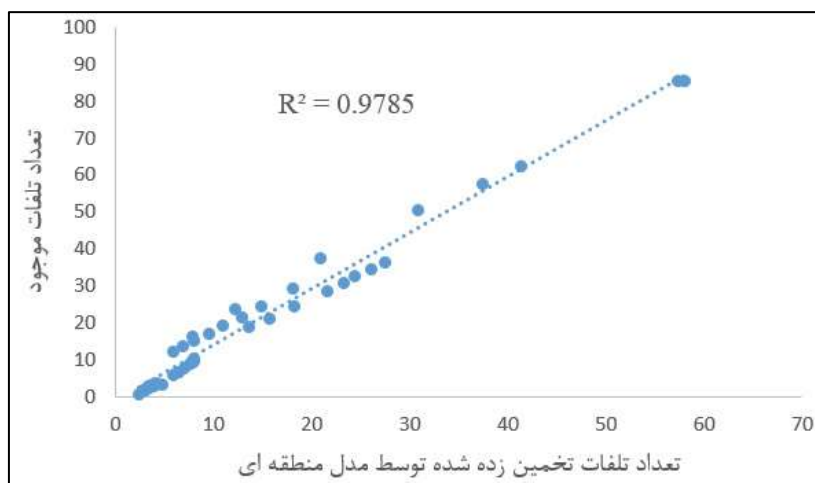
$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f_i^{obs} - f_i| \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i^{obs} - f_i)^2 \right]^{0.5} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$RME = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i - f_i^{obs})}{\sum_{i=1}^n f_i^{obs}} \quad (\text{رابطه ۷})$$

مقدار اریبی نسبی ممکن است مثبت، منفی و صفر باشد که مثبت بودن آن نشانه بیش‌برآورد بودن مدل و منفی آن بیانگر کم‌برآورد بودن است. اگر اریبی نسبی صفر باشد، نتیجه را نارایب

معرض خطر (N_{EXP})، تعداد تلفات (N_F) را به دست آورد. مقایسه تعداد تلفات تخمین زده شده و تعداد تلفات موجود (بر اساس مدل هیدرولیکی واسنجی شده) در شکل (۱۲) ارائه شده است.



شکل ۱۲- مقایسه تعداد تلفات تخمین زده شده و تعداد تلفات موجود در حوضه آبریز کن

تمامی داده‌های مربوط به دبی و تلفات سیلاب‌های رخ داده، به منظور انجام صحت‌سنجی مدل منطقه‌ای ارائه شده تنها از داده‌های اندک موجود در جدول (۷) استفاده شده است. برای انجام این امر، ابتدا با توجه به پیک سیلاب گزارش شده، هیدروگراف مربوطه به صورت مصنوعی ساخته شد و به مدل هیدرولوژیکی معرفی شد. سپس با اجرای مدل هیدرولیکی، پهنه‌های مربوط به عمق و سرعت حاصل شده و مقادیر تلفات با توجه به مدل منطقه‌ای ارائه شده (رابطه ۸)، محاسبه و با مقادیر تلفات واقعی مقایسه شد. جدول (۷) میزان تلفات ناشی از سیل در وقایع تاریخی ثبت شده و مقادیر متناظر محاسبه شده توسط مدل منطقه‌ای توسعه یافته را نشان می‌دهد.

اعتبارسنجی مدل توسعه یافته

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، در این تحقیق به منظور واسنجی مدل هیدرولیکی از هیدروگراف‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هیدرومتری استفاده شد و پس از اطمینان از نتایج، اقدام به تعیین پهنه سیل گیر و سپس نواحی ناپایدار شد. در ادامه، تعداد تلفات در هر روستا برآورد شد و بالاخره در گام آخر با استفاده از تعداد تلفات محاسبه شده، رابطه مورد نظر با استفاده از پارامترهای هیدرولیکی عمق و سرعت جریان توسعه یافت. تعداد تلفات به دست آمده بر اساس روش تحقیق و به کمک مدل توسعه یافته با تلفات واقعی گزارش شده در سیلاب‌های مختلف مقایسه شد تا از صحت نتایج مدل اطمینان حاصل شود. با توجه به عدم وجود

جدول ۷- مقایسه تلفات مشاهده شده و مدل شده در حوضه کن

شماره محدوده	زمان وقوع سیلاب	محل وقوع تلفات سیلاب	دبی حداکثر گزارش شده سیلاب (cms)	تعداد تلفات واقعی	تعداد تلفات مدل شده
۱	مرداد ۱۳۶۵	منطقه امامزاده داوود	۳۰	۹ نفر	۱۳ نفر
۲	خرداد ۱۳۳۴	منطقه زندان	۳۳	۴ نفر	۳ نفر
۳	مرداد ۱۳۳۳	منطقه امامزاده داوود	۱۰۰	حدود ۲۰۰۰ نفر*	۶۱ نفر
۴	فروردین ۱۳۷۵	منطقه سولقان	۸۹/۹	۶ نفر	۲۲ نفر
۵	تیر ۱۳۹۴	کل مناطق مسکونی حوضه کن	دبی ۲۵ ساله	۲۲ نفر	۳۸ نفر

* علت تفاوت مقادیر مدل شده و واقعی در این سیلاب، وقوع سیلاب در زمان حضور زائران بسیار زیاد در روستا بوده است و در مدل تنها جمعیت روستا لحاظ شده است.

علی‌رغم عدم وجود سیستم‌های پیش هشدار و برنامه‌ریزی برای تخلیه‌سازی در حوضه، تعدادی از ساکنین این مناطق با مطلع شدن از وقوع سیل از هر منبع خبری ممکن، فرصت لازم جهت فرار به محدوده‌های اطراف رودخانه (برخلاف مناطق بالادست) را داشته‌اند.

با توجه به مقادیر جدول (۷) می‌توان گفت در مناطق بالادست حوضه (شماره‌های ۱، ۲ و ۳)، مقادیر تلفات واقعی به تعداد تلفات مدل شده از شباهت بیش‌تری برخوردار است. علت وجود اختلاف در تلفات واقعی و مدل شده در محدوده پایین دست حوضه (شماره‌های ۴ و ۵)، می‌تواند ناشی از این واقعیت باشد که

ثبت شده به دست دهد. همان طور که در معادله (۹) ملاحظه می شود هر دو پارامتر منتخب دقیقاً با فرصت در دسترس تا زمان رسیدن سیل به منطقه سیل گیر مرتبط می باشند.

$$F_D = \frac{0.76}{1+e^{-0.76hv}} - 0.002 \frac{L_m}{S_m} \quad (\text{رابطه ۹})$$

در معادله فوق L_m طول آبراهه اصلی بر حسب کیلومتر و S_m شیب آبراهه اصلی بر حسب (m/m) می باشد. محاسبه میزان مرگومیر در منطقه با استفاده از رابطه فوق و بر اساس نتایج جدول (۸) از انطباق مناسب تری با وقایع تاریخی برخوردار می باشد. در این جدول نتایج حاصل از مدل منطقه ای Karbasi (2019) *et al.* (معادله ۴) نیز آورده شده است. همان طور که ملاحظه می شود، در نظر نگرفتن فرصت تخلیه برای افراد در معرض خطر در مدل Karbasi *et al.* (2019) سبب شده است که این مدل برخلاف مدل منطقه ای توسعه یافته در این تحقیق و در همه حالت ها بیش برآورد باشد.

با توجه به آنکه مدل به دست آمده در همه حالت ها دارای خطای "بیش برآورد" می باشد، لازم است که فاکتوری برای اعمال فرصت موجود در پایین دست برای فرار از محدوده سیلاب به مدل منطقه ای به دست آمده اضافه شود. برای حفظ سادگی در ساختار مدل و بنا بر اصل خسارت در مدل سازی (Parsimony) سعی شد از میان پارامترهای گوناگون قابل وصول و بیشتر مرتبط با خصوصیات فیزیوگرافی حوضه آبریز نظیر شیب حوضه، شیب آبراهه اصلی، رتبه آبراهه ها در خروجی حوضه، ضریب گراولیوس حوضه آبریز و نهایتاً طول آبراهه اصلی به عنوان پارامترهای کمکی و با حداقل تعداد ممکن استفاده به عمل آید. آزمون های به عمل آمده و مقایسه با ارقام تلفات ناشی از سیلاب های تاریخی

نهایتاً منجر به توسعه رابطه ای شد که با حفظ ساختار اصلی مدل منطقه ای به دست آمده در فوق توانست با دقتی قابل قبول میزان مرگومیر شبیه سازی شده ناشی از سیل را در موارد تاریخی

جدول ۸- مقایسه تلفات مشاهده شده و مدل منطقه ای در حوضه کن

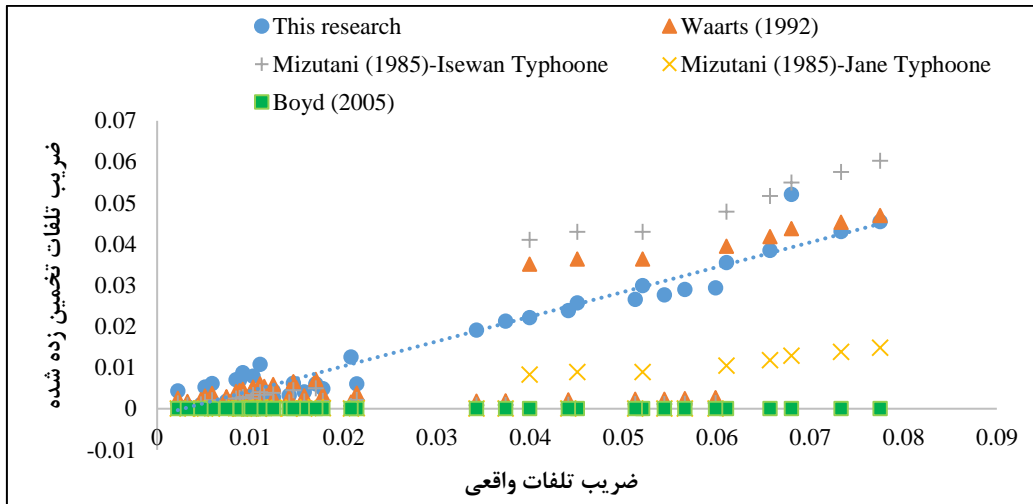
شماره	زمان وقوع سیلاب	محل وقوع تلفات سیلاب	دبی حداکثر (cms)	واقعی	کرباسی و همکاران (۲۰۱۹) (معادله ۴) مدل شده	تعداد تلفات
۱	مرداد ۱۳۶۵	منطقه امامزاده داوود	۳۰	۹ نفر	۱۲ نفر	۸ نفر
۲	خرداد ۱۳۳۴	منطقه رندان	۳۳	۴ نفر	۵ نفر	۱ نفر
۳	فروردین ۱۳۷۵	منطقه سولقان	۸۹/۹	۶ نفر	۲۸ نفر	۶ نفر
۴	تیر ۱۳۹۴	کل روستاهای حوضه کن	دبی ۲۵ ساله	۲۲ نفر	۴۵ نفر	۲۷ نفر

مشاهده می شود، مدل منطقه ای ارائه شده نسبت به دیگر روابط، تخمین دقیق تری از ضریب تلفات را به دست می دهد. برای ارزیابی آماری نتایج مدل های مختلف از آماره های R^2 ، RMSE و RME (معادلات ۵ الی ۷) استفاده به عمل آمد. نتایج مقایسه آماری مدل های یاد شده در جدول (۱۰) آورده شده است.

به منظور راستی آزمایی مدل منطقه ای به دست آمده در این تحقیق به مقایسه میان ضریب تلفات واقعی با ضریب تلفات مدل توسعه داده شده در این تحقیق و مدل های جهانی که مدعی قابلیت استفاده در موارد مشابه را دارند، اقدام و نتایج حاصل در شکل (۱۳) ارائه شده است. جدول (۹) روابط مورد استفاده در مدل های مورد مقایسه را نشان می دهد. همان طور که در شکل

جدول ۹- برخی مدل های جهانی و منطقه ای برای مقایسه با مدل منطقه ای توسعه داده شده

توابع	مدل
$F_D = 10^{\left(\frac{2}{3}h - \frac{11}{3}\right)}$	Mizutani, 1985 - Isewan typhoon
$F_D \leq 1$	Mizutani, 1985 - Jane typhoon
$F_D = 10^{(h-5.5)}$	Waarts, 1992
$F_D(h) = 0.665 \cdot 10^{-3} e^{1.16h}$	Boyd <i>et al.</i> , 2005
$F_D \leq 1$	
$F_D = \frac{0.34}{(1 + \exp(20.37 - 6.18h))}$	Karbasi <i>et al.</i> , 2019:
$N_F = 5 \cdot 786(0 \cdot 578h)(0 \cdot 5924V)(e^{3 \cdot 755A})$	



شکل ۱۳- مقایسه ضریب تلفات تخمین زده شده با ضریب تلفات موجود در حوضه آبریز کن

جدول ۱۰- مقایسه آماری روابط مختلف در تخمین ضریب تلفات سیلاب حوضه آبریز کن

دقت و خطای تخمین			مدل
RME	RMSE	R ²	
-۰/۴۵	۰/۰۱۵	۰/۹۷	The developed regional model (this research)
-۰/۵۷	۰/۰۲۲	۰/۵۶	Mizutani (1985)-Isewan Typhoon
-۰/۹۱	۰/۰۳۱	۰/۵۴	Mizutani (1985)-Jane Typhoon
-۰/۶	۰/۰۲۲	۰/۵۲	Warrts (1992)
-۰/۹۹	۰/۰۳۵	۰/۳۷	Boyd et al. (2005)

نمی‌باشد.

تلفات سالانه مورد انتظار

نتایج حاصل از شبیه‌سازی تلفات در دوره‌های بازگشت ۲ تا ۵۰۰ سال برای هر یک از مناطق حوضه کن در جدول (۱۱) آورده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بیش‌ترین تلفات در همه دوره بازگشت‌ها مربوط به منطقه امامزاده داوود و کمترین مقدار آن مربوط به منطقه رندان می‌باشد.

جدول ۱۱- مقادیر EAN_F برای زیرحوضه‌های مورد مطالعه با استفاده از مدل منطقه‌ای

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

(EAN_F) برای ۵ زیرحوضه رندان، طلون، امامزاده داوود، سنگان و سولقان با استفاده از مدل منطقه‌ای توسعه‌داده شده، محاسبه و در شکل (۱۴) ارائه شده است.

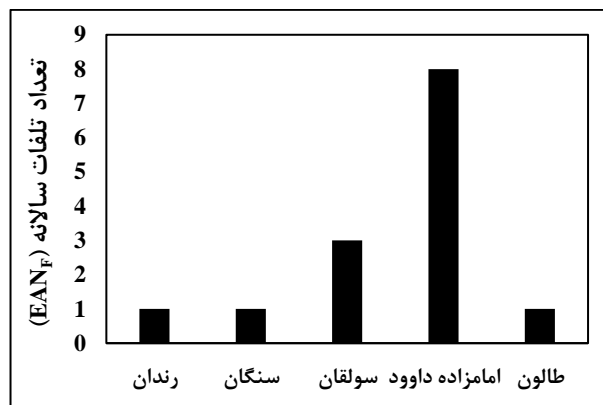
در جدول (۱۰) مشاهده می‌شود که در میان مدل‌های جهانی مورد مطالعه، مدل Mizutani (1985) کمترین خطا و بیش‌ترین دقت و مدل Boyd et al. (2005) بیش‌ترین خطا و کمترین دقت را دارا می‌باشد. نتایج این مقایسه بیانگر این امر است که مدل‌های ارائه شده با توجه به پارامترهای مورد بررسی در هر منطقه از تفاوت زیادی برخوردار است و مدعی مدل‌های مزبور مبتنی بر فرامنطقه‌ای بودن در منطقه مطالعاتی صادق

برای ارزیابی خطرات بالقوه و سالانه مرگ‌ومیر ناشی از وقوع سیلاب‌های آنی در منطقه از رابطه (۳) که در واقع معرف ریسک کوتاه مدت مرگ‌ومیر ناشی از سیلاب در حوضه کن می‌باشد، استفاده به عمل آمده است. میزان تلفات مورد انتظار سالانه

برنامه‌های پیشگیرانه را خاطر نشان می‌سازد. در این مطالعه با توجه به اهمیت موضوع، اقدام به ارائه الگوریتم و برم بنای آن الگوریتم به توسعه یک مدل منطقه‌ای تخمین مرگ‌ومیر ناشی از سیلاب اقدام شده است. نتایج حاصله نشان داد که بیشترین میزان مرگ‌ومیر در حوضه‌های بالادست حوضه رخ می‌دهد. مقایسه میزان مرگ‌ومیر حاصل از مدل برای وقایع تاریخی ثبت‌شده با مرگ‌ومیر ثبت‌شده در منطقه نشان داد که این مدل بدون پارامتر معرف فرصت تخلیه برای مناطق پایین‌دست، دارای خطای بیش-برآورد می‌باشد. استفاده از عوامل ژئومورفولوژیکی مرتبط به زمان انتقال سیل به پایین‌دست، نتایج مدل توسعه‌یافته نهایی را بسیار به وقایع ثبت‌شده نزدیک نمود. برای صحت‌سنجی مدل نهایی، نتایج حاصله با مقادیر مرگ‌ومیر حاصل از مدل‌های دیگر در سطح جهانی نظیر مدل‌های (Mizutani (1985)، Waarts(1992) و Boyd et al. (2005) و همچنین مدل منطقه‌ای Karbasi et al. (2019) مقایسه شد. نتیجه ارزیابی مدل توسعه‌یافته در همه حالت‌ها، قابل‌قبول و بهتر از مدل‌های یادشده در سطح جهانی و منطقه‌ای ارزیابی شد.

REFERENCES

- Abt, S.R. Wittler, R.J. Taylor, A. and Love, D.J. (1989). Human stability in a high flood hazard zone. *Water Resour Bull.*, 25(4):881-890.
- Asselman, N.E.M. and Jonkman, S.N. (2003). Consequences of floods: the development of a method to estimate the loss of life. Delft cluster publication: DC1-233-7, 27p.
- 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
- De Bruijn, K.M. Klijn, F. van de Pas B. and Slager, C.T.J. (2015). Flood fatality hazard and flood damage hazard: combining multiple hazard characteristics into meaningful maps for spatial planning. *Natural Hazards Earth System Science*, 15:1297-1309.
- Di Mauro, M. De Bruijn, K.M. and Meloni, M. (2012). Quantitative methods for estimating flood fatalities: towards the introduction of loss-of-life estimation in the assessment of flood risk. *Journal of Natural Hazard*, 63:1083-1113.
- Hansson, K. Danielson, M. and Ekenberg, L. (2008). A framework for the elevation of flood management strategies. *Journal of Environmental Management*, 86:465-480.
- Haynes, K. Coates, L.de. Oliveira, F.D. Gissing, A. Bird, D. van den Honert, R. Radford, D. D'Arcy, R. and Smith, C. (2015). An analysis of human fatalities from flood hazards in Australia, 1900-2015. *Floodplain Management*, 29(1):75-97.
- Irna. (2020). <https://www.irna.ir/news/83634103>
- Jonkman, S.N. and Kelman, I. (2005). An analysis of the causes and circumstances of flood disaster deaths. , Vol. 29 No. 1 pp. 75-97.
- Jonkman, S.N. and Penning-Rowse, E. (2008). Human instability in floods flows. *Journal of the American Water Resource Association*, 44(4): 1-11.
- 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). 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. (2019). Estimating the number of fatalities due to flash floods in residential areas. *Journal of Iran-Water Resources Research*, 15:236-246 (in Persian).
- 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
- Loster, T. (1999). Flood trends and global change. In: *Proceedings of Euroconference on global change and catastrophe risk management*, 6-9 June, IISA



شکل ۱۴- میزان تلفات سالانه (EAN_F) برای ۵ منطقه مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

بر اساس آخرین آمارها، ۱۳ درصد تلفات انسانی ناشی از بلایای طبیعی در ایران بر اثر سیل بوده است. بیشتر کشورها از جمله ایران هیچ روش استاندارد برای تخمین تلفات ناشی از بلایای طبیعی ندارند. با توجه به رویداد سیلاب‌های اخیر کشور و مخاطرات مالی و جانی ناشی از آن، لزوم توسعه مدل‌های پیش‌بینی و تخمین خسارت جانی سیلاب برای ارائه و اجرای

- Laxenburg, Austria.
- Luu, C. Von Meding, J. and Kanjanabootra, S. (2017). Analyzing flood fatalities in Vietnam using a national disaster database and tree-based methods. *Natural Hazards Earth System Science Discussion*, 155.
- 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
- Rashid, H. (2011). Interpreting flood disaster and flood hazard perception from a newspaper: table of two floods in the Red River Valley, Manitoba, Canada. *Applied Geography*, 31: 35-45.
- 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.
- Tasnim News. (2019). [https:// www. tasnimnews. com/ fa/ news/1398/01/01/1973448](https://www.tasnimnews.com/fa/news/1398/01/01/1973448)
- The International Disaster Database (EM-DAT). (2016). <http://www.emdat.be/about>.
- Waarts, P. (1992). Method for determining the number of deaths due to inundation. Report TNO B-91-1099