

## Evaluating Risk of Economic Loss due to River Flood in Urban areas (Study Area: Kan Watershed)

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

1. Department of Water Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran  
(Received: June. 9, 2019- Revised: June. 30, 2019- Accepted: July. 1, 2019)

### ABSTRACT

In this paper, direct loss to structures and their properties due to rivers' floods in urban areas was investigated. Risk evaluation and flood management require an algorithm for evaluating economic loss due to flood. In this research, hydraulic properties such as depth and flow velocity were used to detect the destroyable areas during the flood event. Then the flow depth was used to estimate the economic loss due to floods with different return periods; 2, 5, 10, 25, 50, 100 and 500-year. The economic loss due to floods was calculated using the depth-loss functions of five different models. Furthermore, the costs of expected annual damage (EAD) for structures in the study area were determined for plan floods, of which the critical areas at the region were distinguished. The results showed that using depth-loss function of Arrighi *et al.* (2013) is more logic in the study area and it can be employed for risk management and flood insurance studies when the proper data are not exist. Finally, the depth-loss functions' uncertainty were investigated using the First Order Variance Estimation (FOVE) method and the estimated loss confidence interval was determined. The procedure introduced in this paper provides a tool for rapid and acceptable approximation for risk assessment in urban flood-prone areas, especially where detailed information about structures and their pertinent properties cannot be provided.

Keywords: Economic loss of flood, Urban flood, Depth-loss function, Risk management, Uncertainty

## ارزیابی ریسک و عدم قطعیت خسارات مالی ناشی از سیلاب‌های رودخانه‌ای در مناطق شهری (منطقه مورد مطالعه: حوضه آبریز کن)

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

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

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۳/۱۹ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۴/۹ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۴/۱۰)

### چکیده

در این مقاله به ارزیابی خسارت مستقیم ناشی از سیلاب بر ساختمان‌ها و دارایی‌ها و محتویات داخل ساختمان در مناطق شهری پرداخته شده است. ارزیابی ریسک و مدیریت سیلاب‌های شهری نیازمند وجود یک الگوریتم مشخص برای برآورد خسارت‌های اقتصادی ناشی از سیلاب می‌باشد. در این تحقیق از مشخصه‌های هیدرولیکی عمق و سرعت جریان برای تعیین منطقه در معرض تخریب در هنگام بروز سیل و سپس عمق جریان برای تخمین میزان خسارت اقتصادی ناشی از سیلاب با دوره بازگشت‌های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰ و ۵۰۰ ساله برای ساختمان‌های بجای مانده در منطقه مورد مطالعه استفاده گردید. در الگوریتم توسعه یافته از منحنی‌های عمق - خسارت ۵ مدل مختلف استفاده به عمل آمد و میزان خسارت حاصله از سیلاب‌های طرح و در نهایت خسارت سالانه مورد انتظار وارد بر ساختمان و محتویات داخل آن (EAD) محاسبه گردید. با استفاده از این تخمین‌ها، مناطق بحرانی برای مدیریت ریسک سیلاب در منطقه مطالعاتی شناسایی شدند. نتایج نشان داد که استفاده از منحنی‌های عمق - خسارت مدل Arrighi *et al.* (2013) به نتایجی منطقی‌تر رسیده و در شرایط نبود داده مناسب می‌توان از آن برای مطالعات مربوط به مدیریت ریسک و بیمه سیل استفاده نمود. در نهایت به بررسی عدم قطعیت منحنی عمق - خسارت با استفاده از روش تخمین واریانس مرتبه اول (FOVE) جهت در نظر گرفتن باند اطمینان برای میزان خسارت برآورد شده، پرداخته شد. با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله می‌توان یک تخمین سریع با تقریب قابل قبول از ریسک سیلاب را بخصوص در مناطقی که از لحاظ تامین داده‌های تفصیلی مربوط به دارایی‌های منقول و غیرمنقول با مشکل مواجه می‌باشند، بدست آورد.

**واژه‌های کلیدی:** خسارت اقتصادی سیلاب، سیلاب شهری، منحنی عمق - خسارت، مدیریت ریسک، عدم قطعیت

### مقدمه

(Sadeghlo and Sajasi Gheidari, 2014; Kardan *et al.*, 2018).

اقدامات سازه‌ای کنترل سیلاب، با وجودی که سالیان دراز از روش‌های غالب مدیریت سیلاب بوده است، در سال‌های اخیر به علت عدم قطعیت زیاد در تعیین سیل طراحی به دلایل گوناگونی مانند تغییرات اقلیمی بوجود آمده و تغییر الگوی بارش - ها، مورد تردید قرار گرفته است. در مقابل، روش‌های جدیدی که تاکید بیشتری بر اقدامات غیرسازه‌ای کاهش یا کنترل سیلاب دارند، توسعه یافته‌اند. مهم‌ترین دست‌آورد در این زمینه تغییر سیاست‌ها از مدیریت بحران به مدیریت ریسک سیلاب بوده است (Merz *et al.*, 2010; Ganji *et al.*, 2016). در کلامی کوتاه می‌توان گفت که سیاست‌های کنترل سیلاب در قدیم بیشتر بر روی کنترل یا کاهش خطر سیلاب شامل کاهش شدت جریان سیلاب و آب‌گرفتنی (روش‌های سازه‌ای) متمرکز بود، حال آنکه مدیریت ریسک سیلاب تاکید زیادی بر مدیریت ریسک سیلاب با استفاده از هر دو روش سازه‌ای و غیرسازه‌ای دارد. در این دیدگاه ریسک

سیلاب از جمله بلاای طبیعی شناخته شده است که بر اساس گزارش پایگاه داده بین‌المللی مخاطرات در زمینه بلاای طبیعی، در کنار زلزله و خشکسالی بالاترین رتبه را از لحاظ خسارات مالی و جانی به همراه دارد (The international disaster database, 2016). حداقل یک سوم از همه ضرر و زیان‌های ناشی از نیروهای طبیعی را می‌توان به جاری شدن سیل نسبت داد (Loster, 1999; Hansson *et al.*, 2008; Rashid, 2011). بر اساس مطالعات انجام شده، گسترش شهرها در حوضه آبریز سبب افزایش سطوح نفوذناپذیر، افزایش حجم رواناب و سیلاب، کاهش زمان تمرکز، افزایش دبی حداکثر لحظه‌ای و تغییر کیفیت سیلاب می‌گردد. توسعه شهرنشینی به ویژه در حاشیه رودخانه‌ها، بر خسارت سیل در دهه‌های اخیر افزوده است (Ghahroudi Tali, 2016). از این رو آگاهی از میزان خطرپذیری مناطق مختلف شهر و توجه به موضوع مدیریت سیلاب شهری حائز اهمیت و توجه است

حتی در صورت وجود مجموعه داده‌های جامع و قابل قبول، برون‌یابی توابع خسارت با توجه به پیچیدگی‌های موجود در مکانسیم‌های خسارت، امکان‌پذیر نمی‌باشد (Andrè *et al.*, 2013; Cammerer *et al.*, 2013; Scorzini and Frank, 2015). روش‌های محاسبه خسارت بر اساس روش‌های احتمالی، گزینه مناسبی در اینگونه موارد محسوب می‌گردند، هر چند که هنوز بخوبی توسعه نیافته‌اند.

امروزه در بیشتر مدل‌های مورد استفاده عمق آب عامل تعیین‌کننده برای خسارت موردانتظار تلقی می‌شود (FEMA, 2003; Queensland Government, 2002; Van der Sande, 2001). برخی مواقع پارامترهای دیگری از قبیل سرعت، مدت زمان تماس با آب، آلودگی آب و زمان هشدار هم مورد استفاده قرار می‌گیرد (Luino *et al.*, 2009). از جمله مدل‌هایی که برای ارزیابی خسارت در حال حاضر در سطح دنیا مورد استفاده قرار دارند می‌توان از Life-Sim (Debo (1982), Arrighi *et al.* (2003), Dutta (2009), Luino *et al.* (2013) نام برد. یکی از آخرین کارهای انجام شده در زمینه ارزیابی خسارت، مربوط به کار جامع و گسترده‌ای است که اتحادیه اروپا در سال ۲۰۱۷ انجام داد و در طی آن تلاش نمود یک پایگاه اطلاعات جهانی از منحنی‌های عمق-خسارت را برای هر یک از قاره‌های اروپا، آمریکا، آسیا، آفریقا و اقیانوسیه توسعه دهد (Huizinga *et al.*, 2017). در این مطالعه منحنی‌های عمق-خسارت با توجه به حداکثر خسارت سیلاب، شاخص‌های اقتصادی و اقتصادی-اجتماعی برای هرکدام از قاره‌ها توسعه پیدا کردند. از مطالعات انجام شده بر روی منطقه مورد مطالعه می‌توان به پژوهش Hoshyaripour *et al.* (2016) اشاره کرد که با در نظر گرفتن مسائل اجتماعی و آسیب‌پذیری آن و همچنین ترکیب روش‌های بهینه‌سازی به مدیریت سیلاب در حوضه آبریز کن پرداختند. Ghahroudi tali *et al.* (2016) به بررسی آسیب‌پذیری حوضه‌های شمال غرب از درکه تا کن پرداختند و نتایج نشان داد که بیشترین میزان رواناب خروجی هم از حوضه کن ناشی می‌شود.

هدف از این پژوهش ایجاد بانک اطلاعاتی برای ارزیابی صحیح مقادیر سیلاب در سطح بین‌المللی و ارزیابی خسارت سیلاب در کشورهایی است که در حال حاضر هیچ مدل خسارت برای آن‌ها تعریف نشده است.

همانطور که ذکر گردید مدیریت ریسک بر مدیریت بحران ارجحیت دارد و به همین لحاظ در تحقیق حاضر مورد توجه خاص قرار گرفته است. برای مدیریت ریسک سیلاب عوامل زیر باید مورد توجه قرار گیرند (Merz *et al.*, 2010):

ارزیابی آسیب‌پذیری مناطق در معرض سیلاب: در این

به عنوان خسارت بوجود آمده یا خسارت مورد انتظار با احتمال رخداد معین در دوره زمانی مشخص (به عنوان مثال یک ساله) تعریف می‌شود. ارزیابی خسارت سیلاب اهمیت زیادی در زمینه تصمیم‌گیری و مدیریت ریسک سیلاب دارد.

خسارت‌های سیلاب معمولاً به دو دسته مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. خسارت‌های مستقیم با توجه به تأثیر فیزیکی تماس آب با مردم/ اشیاء به وجود می‌آیند (Karbasi *et al.*, 2019). خسارت‌های مستقیم منجر به ایجاد خسارت‌های غیر مستقیم می‌گردند که در خارج از زمان یا مکان وقوع سیلاب رخ می‌دهند. این دو نوع خسارت به دو دسته خسارت‌های ملموس و غیرملموس بر اساس امکان برآورد مستقیم ارزش پولی خسارت تقسیم می‌شوند (Smith and Ward, 1987; 1998). به طور کلی مدیریت ریسک سیلاب بر روی خسارت مستقیم و ملموس انجام می‌شود، زیرا ارزیابی خسارت‌های ناملموس مثل اختلال در سرویس‌های عمومی، آسیب‌های روانی و ... بسیار مشکل است (Nascimento *et al.*, 2007). در همین راستا تخمین خسارت اقتصادی ناشی از سیلاب در حوضه شهری برای مدیریت و کاهش اثرات سیلاب حائز اهمیت است که معمولاً توسط مدل‌های تخمین خسارت انجام می‌شوند. مدل‌های موجود برای تخمین خسارت به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: مدل‌های تجربی و شبیه‌سازی (Smith, 1994; Merz *et al.*, 2010). مدل‌های تجربی با استفاده از مجموعه داده‌های رویدادهای پیشین و آسیب‌پذیری، خطر را به خسارت مرتبط می‌سازند (روش‌های مبتنی بر داده)، در حالی که مدل‌های شبیه‌سازی با استفاده از روش‌های مفهومی و با در نظر گرفتن فرضیاتی در رابطه مکانیسم خسارت، میزان آسیب‌پذیری و خطر را تخمین می‌زنند. مدل‌های تجربی و شبیه‌سازی خسارت را می‌توان برای مقاصد مختلفی از جمله به دست آوردن تابع خسارت برای انواع دارایی‌ها، تخمین خسارت رویدادهای آبی و آنالیز منبع عدم قطعیت در ارزیابی خسارت به کار گرفت (Papathoma-Köhle *et al.*, 2015). تولید و توسعه مدل‌های تخمین خسارت سیلاب علیرغم همه پیشرفت‌های سال‌های اخیر با مشکلاتی مواجه می‌باشد که اهم آن‌ها کمبود داده خسارت می‌باشد (Handmer, 2003; Meyer *et al.*, 2013). مدل‌های مبتنی بر داده، به دلیل نیاز به واسنجی برای به کارگیری در زمینه‌های مختلف، نسبت به کمبود داده مشاهداتی مربوط به خسارت حساس‌تر می‌باشند (Merz *et al.*, 2010; Bubeck and Kreibich, 2011). مدل‌های شبیه‌سازی با در نظر گرفتن فرضیاتی در رابطه با خسارت - خطر، وابستگی کمتری به مجموعه داده برای استخراج مدل دارند، اگرچه آن‌ها هم به داده برای واسنجی و ارزیابی نیازمندند.

شده توسط هر یک از مدل‌های فوق با یک نمونه خسارت سیلاب ثبت و گزارش شده در این حوضه مقایسه گردید. در نهایت ریسک خسارت ناشی از سیلاب با محاسبه میزان متوسط خسارت سالانه ارزیابی شد. در ادامه تحقیق، بدین مهم توجه شد که خسارت مستقیم وارده بر ساختمان‌ها که از ترکیب توابع هیدرولوژیکی، هیدرولیکی و اقتصادی به دست می‌آید، دارای تابع صریحی نمی‌باشد و لذا خسارت برآورد شده دارای عدم قطعیت خواهد بود. در این راستا از آنجایی که پارامتر عمق آب، عامل اصلی تعیین کننده میزان خسارت وارده بر ساختمان‌ها می‌باشد به برآورد عدم قطعیت منحنی عمق - خسارت با استفاده از روش تخمین واریانس مرتبه اول (FOVE) پرداخته شد. روش ارائه شده در این مطالعه از نظر نگرش به مدیریت ریسک سیلاب در مناطق شهری، طرز برخورد با مسئله و ارزیابی خسارت‌های ساختمانی در ایران از جایگاه ویژه‌ای برخوردار بوده و الگوریتم ارائه شده در این مقاله در کنار ارزیابی تجربیات جهانی، جهت به دست آوردن یک تخمین سریع با تقریبی قابل قبول از خسارت در مناطق شهری و بخصوص مناطقی که دارای کمبود داده میدانی می‌باشند، مناسب و کاربردی می‌باشد.

## روش تحقیق

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز کن که با مساحت ۸۳۵ کیلومتر مربع در شمال استان تهران واقع شده است از سمت شمال به حوضه جاجرود، از سمت شرق به حوضه وردیج و از سمت غرب به حوضه حصارک منتهی می‌شود. حوضه کن در منطقه 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 زیر حوضه تقسیم می‌شود (شکل ۱) به نحوی که امام‌زاده داوود پرشیب‌ترین (با ۱۹۶٪) و کشار کم شیب‌ترین (۱٪) 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.

روند محاسبات برای تعیین ریسک مخاطرات ناشی از سیلاب شناسایی مناطق مستعد سیلاب اولین گام در مطالعات ریسک سیلاب است که نیاز به مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی دارد. معمولاً با استفاده از نقشه‌های خطر حاصل از نتایج هیدرولیکی می‌توان پهنه سیلاب احتمالی، عمق آب و در صورت نیاز سرعت آب را نمایش داد. بسیاری از مدل‌های یک بعدی برای

مرحله میزان خسارت وارده بر عناصری چون منازل مسکونی یا مراکز عمومی و تجاری تعیین می‌شود. جوامعی که به طور منظم استراتژی خود را برای مقابله با چنین رویدادهایی توسعه می‌دهند، در مقایسه با جوامعی که از مدیریت ریسک سیلاب غافل می‌باشند، از آسیب‌پذیری کمتری برخوردارند (Thieken *et al.*, 2007; Kreibich and Thieken, 2009). در این راستا جمع‌آوری اطلاعات مربوط به عناصر در معرض خطر نه تنها برای ارزیابی آسیب‌پذیری، بلکه برای تدارک اقدامات کاهش مخاطرات نظیر مقاوم‌سازی در برابر سیلاب یا اولویت‌بندی برای کمک‌رسانی فوری در هنگام وقوع سیلاب، ضروری می‌باشد.

پهنه‌بندی ریسک سیلاب: در بسیاری از کشورها پهنه‌بندی سیلاب اجباری است. دستورالعمل سیلاب اتحادیه اروپا در نوامبر ۲۰۰۷ به تصویب رسیده است که طبق آن کشورهای عضو باید هر دو نقشه‌ی خطر سیلاب به مفهوم پهنه‌بندی خطر سیلاب و ریسک سیلاب به مفهوم ارزیابی تأثیرات جانبی سیلاب بر جان و ارزش دارایی مردم و محیط زیست را تهیه نمایند (European Commission, 2007).

به‌گزینی برای کاهش ریسک سیلاب: در این مرحله گزینه‌های کاهش ریسک پیش‌بینی شده و گزینه‌های مختلف سود و هزینه با ارزیابی خسارت محتمل مقایسه می‌گردد (Pandey Nathwani, 2004).

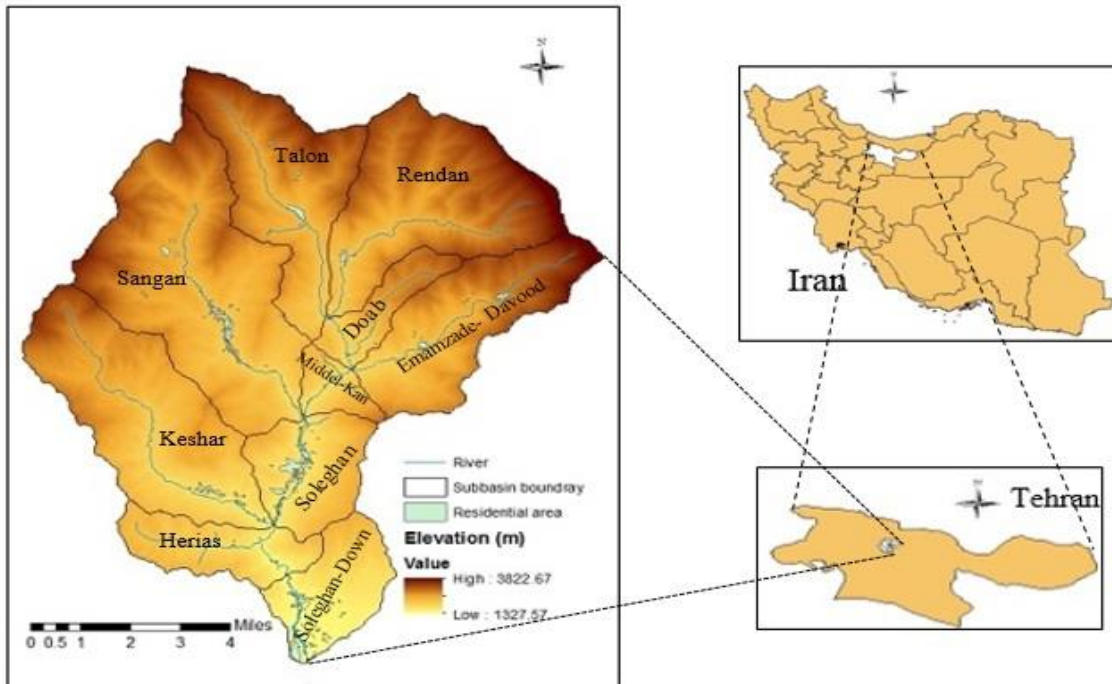
ارزیابی‌های مالی خسارت‌های محتمل برای بخش بیمه: محاسبه حق بیمه و تخمین پرداخت بدهی بر اساس خسارت‌های اقتصادی سالانه مورد انتظار و حداکثر خسارت محتمل (PML) صورت می‌گیرد (Merz *et al.*, 2010).

ارزیابی‌های مالی در زمان رخداد سیلاب و بلافاصله پس از آن: این ارزیابی برای ستاد مدیریت بحران و دیگر ارگان‌های دولتی به منظور تصمیم‌گیری در رابطه با بودجه و جبران خسارت وارده ضروری است (Merz *et al.*, 2010).

در این مطالعه از موارد پنج‌گانه فوق برای مدیریت ریسک سیلاب، به ردیف‌های ۱، ۲ و ۴ پرداخته شده و الگوریتم مورد استفاده، ردیف پنجم را نیز پوشش می‌دهد. در تحقیق حاضر در راستای رسیدن به این اهداف به ارزیابی خسارت مستقیم ناشی از سیلاب بر ساختمان‌ها و دارایی‌های داخل ساختمان‌ها (محتویات) در حوضه کن پرداخته شده است. برای انجام این ارزیابی از منحنی‌های خسارت مورد استفاده در مدل‌های Life-Sim (Debo (1982), Dutta *et al.* (2003), Luino *et al.* (2009) و Arrighi *et al.* (2013) استفاده شد. خسارت سیلاب برای دوره بازگشت‌های مختلف (۵۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ سال) در منطقه مورد مطالعه به دست آمد. خسارت سیلاب محاسبه

ریسک سیلاب در مناطق شهری نیازمند استفاده از مدل دو بعدی است (Kardan et al., 2018). چارچوب استفاده شده برای ارزیابی خسارت در این مطالعه به شرح فلوجارت شکل (۲) است:

تخمین سطح آب در رودخانه‌ها با الگوی جریان ماندگار و برای شناسایی اولیه مناطق آب‌گرفته مناسب می‌باشند. در صورت وجود پیچیدگی در هندسه رودخانه و نیاز به پارامترهای جریان غیرماندگار، استفاده از مدل‌های دوبعدی ضروری است. مطالعات



شکل ۱. حوضه آبریز کن به همراه زیرحوضه‌های آن

جدول ۱. مشخصات کلی زیرحوضه‌های کن

| زیر حوضه         | مختصات جغرافیایی |             | مساحت (ha) | مساحت منطقه مسکونی (ha) | محیط (km) | حدائق ارتفاع (km) | حداکثر ارتفاع (km) | شیب آبراهه (%) | طول آبراهه اصلی (km) |
|------------------|------------------|-------------|------------|-------------------------|-----------|-------------------|--------------------|----------------|----------------------|
|                  | عرض              | طول (اعشار) |            |                         |           |                   |                    |                |                      |
| طالون            | 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                  |



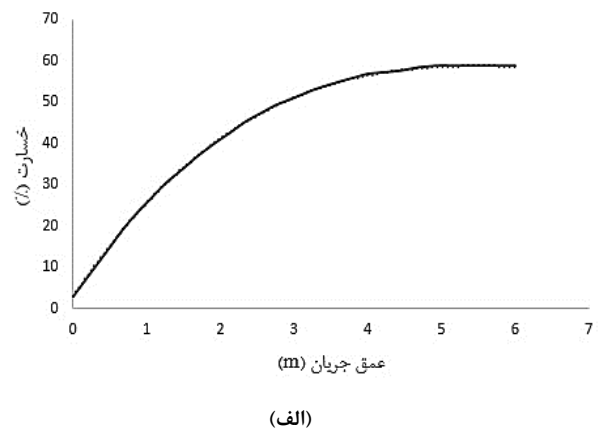
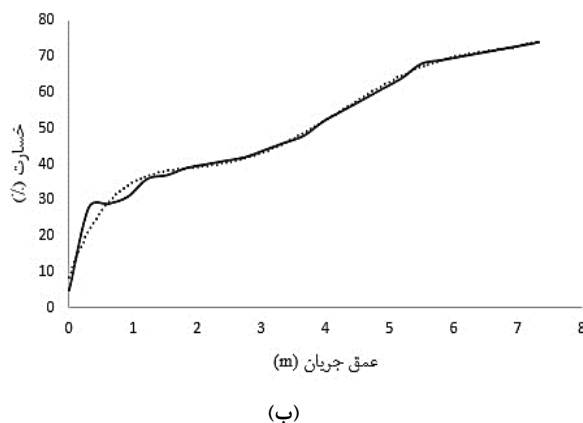
شکل ۲. مدل مفهومی ارزیابی خسارت سیلاب

### منحنی‌های عمق - خسارت

اصولاً تعیین خسارت مستقیم سیلاب با استفاده از منحنی‌های عمق-خسارت صورت می‌گیرد که نشان‌دهنده میزان خسارت سیلابی است که در عمق مشخصی از جریان برای هر دارایی رخ می‌دهد. در بسیاری از کشورها مدل‌سازی خسارت سیلاب با استفاده از منحنی‌های عمق-خسارت که بر اساس تحلیل رویدادهای گذشته و قضاوت‌های کارشناسی توسعه پیدا کرده‌اند، صورت گرفته است. این نوع منحنی‌های خسارت برای همه مناطق در دسترس نیست و این امر مانع ارزیابی سیلاب در برخی مناطق

می‌شود. علاوه بر این، با توجه به وجود روش‌های متعدد برای مدل‌سازی خسارت در کشورهای مختلف و با مقایسه این روش‌ها با یکدیگر به طور غیر مستقیم می‌توان خسارت سیلاب‌ها در مقیاس ملی را ارزیابی نمود. در این مطالعه برای ارزیابی خسارت مستقیم سیلاب از منحنی‌های عمق-خسارت پنج مدل مختلف و شناخته شده در سطح دنیا برای شبیه‌سازی خسارت مستقیم سیلاب استفاده شده است.

شکل (۳) نمونه‌ای از منحنی‌های عمق-خسارت متعلق به مدل Life-Sim و Dutta et al. (2003) که برای ساختمان‌های بتنی تهیه شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۳. تابع عمق-خسارت برای ساختمان‌های بتنی الف) Dutta et al. (2003) و ب) Life-Sim

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. برای محاسبه زمان تمرکز ابتدا از روش‌های تجربی که در جدول (۲) ارائه شده است استفاده گردید. سپس با متوسط‌گیری این مقادیر و اطلاعات مشاهداتی این پارامتر تحت واسنجی قرار گرفت. زمان تمرکز چند زیرحوضه اصلی حوضه کن در جدول (۲) نشان داده شده است.

### مدل هیدرولیکی

در این مطالعه جهت شبیه‌سازی جریان رودخانه و به دست آوردن نقشه‌های عمق سیلاب برای دوره بازگشت‌های مختلف (۵۰۰، ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ سال) از مدل HEC-RAS دوبعدی استفاده گردید. برای انجام مطالعات هیدرولیکی رودخانه اطلاعات نقشه‌برداری مسیر رودخانه‌ها پس از انجام اصلاحات لازم وارد محیط GIS شد و مدل رقومی ارتفاع (DEM) حوضه کن ایجاد گردید. همچنین با توجه به نقشه کاربری اراضی منطقه،

### مدل‌سازی هیدرولوژیکی-هیدرولیکی

#### مدل هیدرولوژیکی

با توجه به تعداد کم و ناقص بودن آمار و اطلاعات ثبت شده از سیل در ایستگاه‌های هیدرومتری حوضه، باید از مدل‌های ریاضی هیدرولوژیکی برای استخراج هیدروگراف سیلاب طرح در زیرحوضه‌های این منطقه استفاده نمود. با توجه به سابقه مدل HEC-HMS در مطالعات برآورد سیلاب از این مدل به منظور محاسبه دبی‌های اوج و هیدروگراف سیلاب برای دوره‌بازگشت-های مختلف (۵۰۰ و ۲۰۰، ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ ساله) در تمامی زیرحوضه‌ها 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 گروه 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 در منطقه جمع‌آوری شد. نسبت تلفات اولیه، یکی از پارامترهای واسنجی است که به عنوان

مطالعه امکان استفاده از مدل یک بعدی هم امکان پذیر بود ولی با توجه به هدف مطالعه که ارائه یک الگوریتم برای ارزیابی ریسک سیلاب می باشد و استفاده از مدل یک بعدی برای تمامی مناطق امکان پذیر نمی باشد از مدل دو بعدی برای شبیه سازی هیدرولیکی مشخصه های جریان استفاده گردید.

ضریب مانینگ زیرحوضه ها تعیین گردید. شرط مرزی بالادست برای هر زیرحوضه هیدروگراف های مربوط به دوره بازگشت های مختلف و شرط مرزی پایین دست عمق نرمال تعریف گردید. از معادلات موج دینامیک برای شبیه سازی جریان غیرماندگار استفاده گردید. با توجه به شرایط کوهستانی بودن منطقه مورد

جدول ۲. برآورد زمان تمرکز با استفاده از روابط تجربی مختلف (دقیقه)

| johnstone & cross | california | Chow   | FAA    | kerpich | bransby-williams | pasini | Kerby  | SCS    | زیرحوضه        |
|-------------------|------------|--------|--------|---------|------------------|--------|--------|--------|----------------|
| ۱۵۱/۷۷            | ۶۰/۴۴      | ۸۴/۶۴  | ۱۰۶/۱۹ | ۵۳/۶۷   | ۱۷۵/۹۱           | ۱۱۸/۶۴ | ۱۱۵/۵۲ | ۱۸۲/۴۲ | طلالون         |
| ۱۵۶/۹۲            | ۶۲/۴۷      | ۸۸/۳۴  | ۱۱۰/۸۷ | ۵۶/۵۰   | ۱۸۵/۵۳           | ۱۱۶/۹۹ | ۱۱۹/۱۸ | ۲۴۸/۸۱ | امامزاده داوود |
| ۱۹۰/۸۵            | ۸۹/۲۹      | ۱۱۳/۴۹ | ۱۳۷/۵۷ | ۷۶/۳۸   | ۲۴۰/۲۸           | ۱۷۵/۴۱ | ۱۴۳/۰۸ | ۲۸۰/۹۳ | سنگان          |
| ۱۸۳/۸۹            | ۱۰۲/۱۸     | ۱۰۸/۲۲ | ۱۳۲/۱۹ | ۷۲/۱۴   | ۲۳۲/۵۷           | ۱۵۲/۵۹ | ۱۳۸/۲۱ | ۲۳۳/۴۶ | کشار           |
| ۱۲۳/۶۳            | ۴۵/۱۳      | ۶۵/۱۰  | ۸۶/۷۰  | ۳۹/۱۴   | ۱۲۶/۵۷           | ۷۷/۵۷  | ۹۵/۳۸  | ۱۷۰/۱۶ | سولقان         |

احتمالاتی می باشد، تشریح آن بدون بررسی عدم قطعیت امکان پذیر نخواهد بود (USACE, 1996). به طور ساده می توان عدم قطعیت را وقوع حوادث خارج از کنترل تعریف کرد (Mays, 1992). هدف اصلی از تحلیل عدم قطعیت، کمی کردن مشخصه های آماری خروجی های سیستم است که تحت تاثیر پارامترهای اصلی تصادفی سیستم قرار می گیرند. در طراحی، آنالیز و مدل سازی سیستم های مهندسی تعیین مقدار خروجی های سیستم تابعی از چندین پارامتر است که تمامی آن ها با دقت مطلق اندازه گیری نشده اند. بدین ترتیب عدم قطعیت موجود در هر پدیده ناشی از دو دسته عوامل می باشد: عدم قطعیت ناشی از کمبود دانش و عدم قطعیت طبیعی. عدم قطعیت ناشی از کمبود دانش شامل عدم قطعیت هایی است که به علت کمبود دانش در مدل سازی پدیده ناشی می شود. عدم قطعیت طبیعی ناشی از ذات تصادفی بودن پارامترهای دخیل در آن پدیده می باشد. بر همین اساس تخمین خسارت مالی وارد شده به یک منطقه بر اساس اطلاعاتی صورت می گیرد که دارای هر دو نوع عدم قطعیت می باشد. این عدم قطعیت ها شامل موارد زیر است:

- الف) عدم قطعیت موجود در وقایع هیدرولوژیک آینده که شامل بارندگی، دبی جریان و در نهایت میزان عمق جریان است.
- ب) عدم قطعیت ناشی از اجرای مدل هیدرولیکی که می تواند ناشی از تخمین نادرست فاکتور زبری باشد.
- ج) عدم قطعیت موجود در برآورد توابع برآورد خسارت فیزیکی و ضرایب تجربی مورد استفاده در آن ها.

باتوجه به این مسئله که پارامتر عمق جریان سیلاب عامل اصلی و موثر در میزان خسارت وارد بر ساختمان تلقی می شود؛ در این تحقیق به بررسی عدم قطعیت بند "الف" که در نهایت

### ارزیابی خسارت اقتصادی

لایه های اطلاعاتی مورد استفاده برای محاسبه خسارت اقتصادی عبارتند از: مدل رقومی دیجیتالی (DEM)، نقشه عمق آب که توسط مدل سازی هیدرولیکی محاسبه می گردد و لایه پلیگونی از منطقه با طبقه بندی ساختمان ها بر اساس نوع مصالح، کاربری، تعداد طبقات و ارزش اقتصادی هر واحد.

### ارزیابی ریسک

با تخمین خسارت های اقتصادی در هر نقطه برای دوره بازگشت های مختلف، می توان مقادیر به دست آمده را در دامنه فراوانی درون یابی کرد و یک منحنی خسارت- فراوانی پیوسته به دست آورد. این نوع منحنی ها پایه ای برای محاسبات ریسک می باشند که با نام خسارت سالانه مورد انتظار (EAD) تعریف می شوند. EAD در ساده ترین شکل به مفهوم مجموع خسارت های ناشی از تمامی سیلاب ها می باشد که با توجه به احتمال وقوع آن ها وزن دهی شده اند، بر این اساس می توان آن را خسارت محتمل کوتاه مدت یا سالانه دانست. اگر  $D_{tot}$  کل خسارت اقتصادی تخمین زده شده برای دوره بازگشت معین ( $T_r$ ) باشد، EAD را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\text{Risk} = \text{EAD} = \int_0^1 D_{tot}(T_r) \cdot d\left(\frac{1}{T_r}\right) \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$D_{tot} = D_S + D_C \quad (\text{رابطه ۲})$$

در روابط فوق  $D_{tot}$  یعنی خسارت اقتصادی کل است که حاصل مجموع خسارت های وارده به ساختمان ها ( $D_S$ ) و خسارت وارده به محتویات ( $D_C$ ) می باشد.

### عدم قطعیت خسارت محتمل

در بررسی ریسک خسارت سیل از آنجا که ریسک ذاتاً یک مفهوم

مشکل اول عملاً در بسیاری از مواقع وجود دارد و تقریب مورد بحث نیز در اغلب موارد قابل قبول است، روش FOVE در مواردی که بظاهر لاینحل به نظر می‌رسند راهگشا است.

اگر یک مدل با خروجی  $W$  تابعی از متغیر تصادفی  $X$  به صورت  $W=g(X)$  باشد، به علت تصادفی بودن  $X$ ، خروجی مدل در معرض عدم قطعیت قرار دارد. میانگین و واریانس  $g(X)$  را می‌توان از لحاظ تئوری به صورت زیر بیان کرد:

$$E[W] = E[g(X)] = \mu_w = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)f(x)dx \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$Var[W] = Var[g(X)] = \sigma_w^2 = \int_{-\infty}^{\infty} [g(x) - \mu_w]^2 f(x)dx$$

با توجه به روابط ذکر شده، میانگین و واریانس  $W=g(X)$

به طور مستقیم تابعی از تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی  $X$  است. در بسیاری از آنالیزها و طراحی‌های مهندسی، تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی  $X$  به طور دقیق مشخص نیست و یک راه‌حل برای بدست آوردن مقادیر گشتاورهای اول و دوم در روابط (۳ و ۴) استفاده از سری تیلور در نقطه انتخابی  $x_0$  در فضای نمونه متغیر تصادفی  $X$  به صورت زیر است:

$$W = w_0 + \sum_{r=1}^{\infty} \left[ \frac{\partial^r w}{\partial X^r} \right]_{x_0} \frac{(X-x_0)^r}{r!} = w_0 + \left[ \frac{\partial w}{\partial X} \right]_{x_0} (X - x_0) + \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial X^2} \right]_{x_0} \frac{(X-x_0)^2}{2} + \dots$$

که در آن  $w_0 = g(x_0)$  و ضریب حساسیت مرتبه اول نامیده می‌شود که تعیین کننده نرخ تغییرات مقدار تابع  $g(X)$  در  $X = x_0$  است و  $\left[ \frac{\partial^2 w}{\partial X^2} \right]_{x_0}$  ضریب حساسیت مرتبه دوم می‌باشد که نشان‌دهنده انحنای تابع  $g(X)$  در  $X = x_0$  است. با به‌کارگیری رابطه (۵) میانگین و واریانس  $W=g(X)$  را به ترتیب می‌توان از روابط زیر به دست آورد:

$$E[W] = w_0 + E \left[ \sum_{r=1}^{\infty} \left[ \frac{\partial^r w}{\partial X^r} \right]_{x_0} \frac{(X-x_0)^r}{r!} \right] = w_0 + \dots \left[ \frac{\partial w}{\partial X} \right]_{x_0} E[(X-x_0)] + \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial X^2} \right]_{x_0} \frac{E[(X-x_0)^2]}{2} + \dots$$

$$Var[W] = Var[w_0] + Var \left[ \sum_{r=1}^{\infty} \left[ \frac{\partial^r w}{\partial X^r} \right]_{x_0} \frac{(X-x_0)^r}{r!} \right] = \left[ \frac{\partial w}{\partial X} \right]_{x_0}^2 Var[(X-x_0)] + \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial X^2} \right]_{x_0} \frac{Var[(X-x_0)^2]}{4} + \dots$$

ترم‌های مرتبه‌های بالا پیچیدگی انجام عملیات جبری را افزایش داده و معمولاً نیازمند اطلاعات آماری بیشتر به علت حساسیت گشتاورهای مرتبه سوم و چهارم می‌باشند. یک روش کاربردی برای تخمین میانگین  $W=g(X)$  با تقریب مرتبه ۱ را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

$$E[W] = w_0 + \left[ \frac{\partial w}{\partial X} \right]_{x_0} (\mu_x - x_0) \quad (\text{رابطه ۸})$$

منجر به برآورد عمق جریان می‌گردد و لذا عملاً عدم قطعیت بند "ب" را پوشش می‌دهد و همچنین عدم قطعیت بند "ج" بدون آنکه نیاز به ورود به پروسه تولید توابع باشد، پرداخته شده است.

#### محاسبه عدم قطعیت

جهت محاسبه عدم قطعیت موجود در پدیده‌ها با توجه به ماهیت پدیده، میزان پیچیدگی مسأله و داده‌های در دسترس می‌توان از روش‌های متفاوتی استفاده کرد. این روش‌ها به سه دسته روش-های تحلیلی مثل روش استخراج تابع توزیع و تکنیک‌های تبدیل انتگرالی، روش‌های تقریبی مثل روش تخمین مرتبه اول تغییرات و روش تخمین نقطه‌ای هار و روش‌های شبیه‌سازی مثل روش مونت کارلو (Tung and Yen, 2005) تقسیم می‌شوند. روش‌های تحلیلی در آنالیز عدم قطعیت برای حالت‌های محدودی پاسخ مناسب می‌دهد و در اکثر حالات به علت پیچیدگی مسأله مورد بررسی یا موجود نبودن توابع چگالی احتمال نمی‌توان از این روش‌ها استفاده کرد. به همین علت بهره‌گیری از روش‌های تقریبی یا شبیه‌سازی توسط محققین اجتناب ناپذیر می‌گردد (Tung, 1993). طبق گفته‌ی Cornell (1972) وجود یک مدل تقریبی از کل مسأله، بهتر از داشتن یک مدل دقیق از بخشی از آن است. روش شبیه‌سازی مونت کارلو که بر اساس تولید داده-های تصادفی بر مبنای توزیع آماری آن‌ها می‌باشد، دارای اهمیت خاصی بوده و مورد توجه محققان می‌باشد. بزرگترین مشکلی که روش مونت کارلو از آن برخوردار می‌باشد وابستگی این روش به شناخت پدیده و ارزیابی نسبتاً مناسب از توابع چگالی احتمال قابل برازش بر پارامترهای دخیل در پدیده می‌باشد. با توجه به اینکه محاسبه عدم قطعیت خسارت سیلاب با استفاده از روش مونت کارلو نیازمند تعریف تابع چگالی احتمال مشخص برای پارامتر عمق جریان در هر نقطه مکانی می‌باشد و این مهم در عمل میسر نمی‌باشد، در مطالعه حاضر از این روش استفاده نگردید. همانطور که در بخش‌های پیشین ذکر شد، روش منتخب در این پژوهش بسط معادلات استخراج شده برای منحنی عمق-خسارت در مدل‌های مختلف به سری تیلور و سپس تعیین عدم قطعیت این منحنی با استفاده از روش واریانس مرتبه اول (FOVE) می‌باشد. اساس روش FOVE (روش تخمین واریانس مرتبه اول) مبتنی بر استفاده از میانگین و واریانس متغیر تصادفی در بسط تابع به سری تیلور می‌باشد. اگر داده‌ها و استدلال‌های فیزیکی برای ایجاد تابع چگالی احتمال برای یک متغیر کافی نباشند و همچنین خروجی نهایی، یعنی پارامتر تصمیم یا طراحی، به گشتاورهای بالاتر از میانگین و واریانس حساس نباشد، می‌توان از روش FOVE برای بررسی عدم قطعیت استفاده نمود. چون



هیدروگراف و دبی اوج آن بود. مقایسه هیدروگراف سیل شبیه-سازی شده و اندازه‌گیری شده در ایستگاه هیدرومتری سولقان در شکل (۴) ارائه شده است. همانطور که ملاحظه می‌گردد در این دو واقعه نمونه، دو پارامتر مهم دبی اوج و زمان رسیدن به اوج که در مطالعات سیلاب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند به خوبی شبیه‌سازی شده‌اند، مضافاً آنکه قانون بقای جرم نیز در همه موارد رضایت بخش است. با استفاده از برنامه بهینه‌سازی موجود در مدل HEC-HMS فرآیند تنظیم پارامترهای زیر مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه برای تعدادی از سیل‌های مشاهده شده انجام پذیرفت. نتایج حاصل از واسنجی پارامترهای مدل به تفکیک زیرحوضه‌های مورد مطالعه در جدول (۳) 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 گردید (جدول ۴).

#### استخراج پهنه‌های سیل‌گیر

با اجرای مدل HEC-RAS به ازاء سیلاب‌ها با دوره بازگشت‌های مختلف (جدول ۴) 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 (آب گرفتگی) برای هر زیرحوضه و دوره بازگشت استخراج گردید و وارد محیط GIS شد. شکل (۵) نمونه‌ای از نقشه‌های تولید شده برای زیرحوضه رندان در بالادست حوضه آبریز کن را نشان می‌دهد.

$$\text{Var}[W] = \left[ \frac{\partial w}{\partial X} \right]_{x_0}^2 \sigma_x^2 \quad (\text{رابطه ۹})$$

همانطور که ذکر شد در این مطالعه با توجه به اینکه خسارت تابعی از متغیر تصادفی عمق است و تابع چگالی احتمال آن به علت تنوع مکانی دقیقاً مشخص نیست از روش FOVE برای بررسی عدم قطعیت میزان خسارت استفاده گردیده است. با استفاده از روش FOVE واریانس مربوط به EAD مطابق رابطه (۱۰) محاسبه می‌گردد:

$$\text{Var}[EAD] = \left[ \frac{\partial D}{\partial h} \right]_{EAH}^2 \sigma_h^2 \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن  $\sigma_h^2$  واریانس عمق جریان به ازای دوره بازگشت-های مختلف و EAH امید ریاضی این عمق‌ها می‌باشد که بترتیب از روابط (۱۱ و ۱۲) بدست می‌آیند:

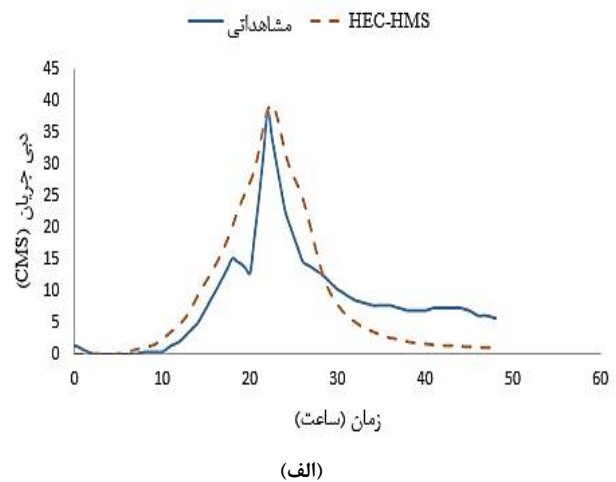
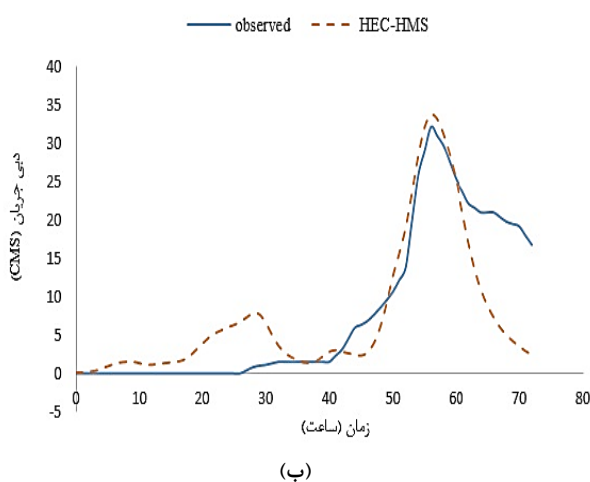
$$\sigma_h^2 = \left( \sum_{T_r=2}^{T_r=500} h_{T_r}^2 \times \frac{1}{T_r} \right) - EAH^2 \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$EAH = \sum_{T_r=2}^{T_r=500} h_{T_r} \times \frac{1}{T_r} \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

## نتایج و بحث

### تولید هیدروگراف سیلاب

با ساخت مدل حوضه، مدل هواشناسی و مشخصات کنترلی برای سیل واسنجی در محیط HEC-HMS ابتدا شبیه‌سازی فرآیند بارش-رواناب با مقادیر اولیه پارامترها انجام پذیرفت. این حوضه شامل سه ایستگاه باران‌سنج ثابت امامزاده داوود، رندان و سنگان و همچنین سه ایستگاه هیدرومتری با نام‌های سولقان، کیگا و کشار می‌باشد. با بررسی هیدروگراف‌های ثبت شده در ایستگاه-های هیدرومتری و بارش‌های ثبت شده در ایستگاه‌های باران سنجی ثابت در منطقه، وقایع بارش-رواناب جهت واسنجی و اعتباریابی مدل انتخاب گردیدند. 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



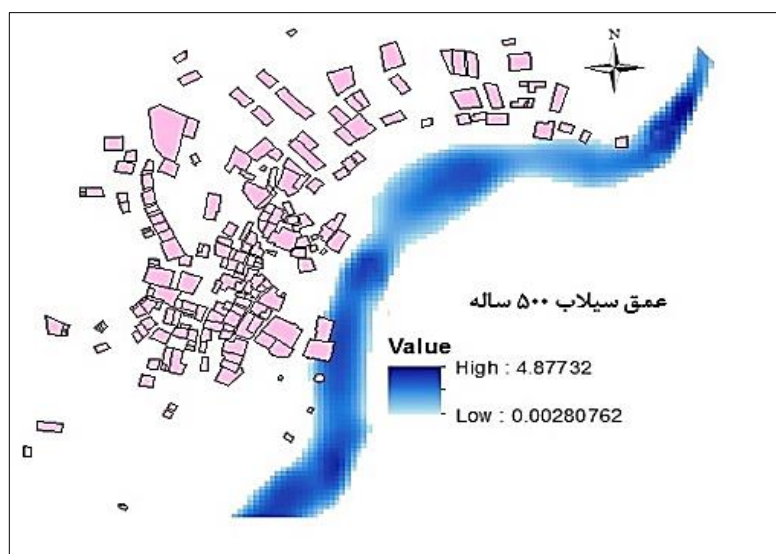
شکل ۴. سیلاب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده (الف) مربوط به ۵ و ۶ فروردین ۱۳۸۲، (ب) مربوط به ۲۴ و ۲۵ فروردین ۱۳۸۱

جدول ۳. پارامترهای واسنجی شده در حوضه رودخانه کن به تفکیک زیرحوضه‌ها

| زیر حوضه         | CN    | تلفات اولیه (mm) | زمان تمرکز (hr) | درصد سطح غیر قابل 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 ۴. مقادیر دبی اوج سیل (CMS) با دوره بازگشت‌های مختلف در حوضه آبریزکن

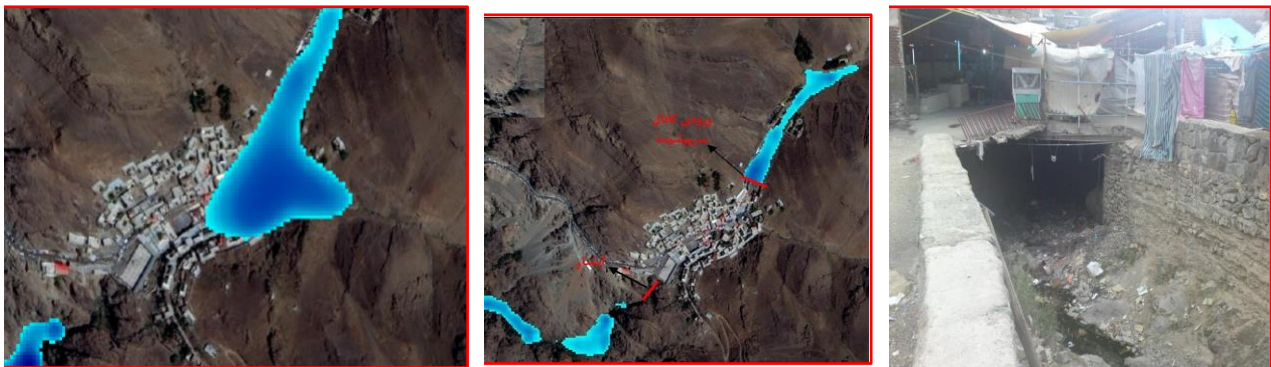
| زیر حوضه         | دوره بازگشت (سال) |    |    |    |    |     |     |     |
|------------------|-------------------|----|----|----|----|-----|-----|-----|
|                  | ۲                 | ۵  | ۱۰ | ۲۵ | ۵۰ | ۱۰۰ | ۲۰۰ | ۵۰۰ |
| طالون            | ۸                 | ۱۲ | ۱۵ | ۲۰ | ۲۴ | ۲۸  | ۳۱  | ۳۶  |
| رندان            | ۹                 | ۱۴ | ۱۸ | ۲۴ | ۲۸ | ۳۳  | ۳۷  | ۴۲  |
| امامزاده داوود   | ۷                 | ۱۲ | ۱۴ | ۱۹ | ۲۲ | ۲۶  | ۲۹  | ۳۳  |
| دوآب             | ۳                 | ۵  | ۷  | ۹  | ۱۰ | ۱۲  | ۱۳  | ۱۶  |
| سنگان            | ۱۱                | ۱۸ | ۲۲ | ۳۰ | ۳۵ | ۴۱  | ۴۶  | ۵۳  |
| کشار             | ۱۳                | ۲۴ | ۳۴ | ۴۹ | ۶۲ | ۷۷  | ۸۵  | ۱۰۰ |
| هریاس            | ۶                 | ۱۲ | ۱۶ | ۲۴ | ۳۰ | ۳۷  | ۴۱  | ۴۴  |
| کن میانی         | ۳                 | ۴  | ۵  | ۷  | ۸  | ۹   | ۱۰  | ۱۲  |
| سولقان           | ۷                 | ۱۳ | ۱۸ | ۲۷ | ۳۴ | ۴۲  | ۴۷  | ۵۵  |
| پایین دست سولقان | ۷                 | ۱۳ | ۱۸ | ۲۶ | ۳۳ | ۴۰  | ۴۵  | ۵۲  |



شکل ۵. نقشه شبیه‌سازی شده عمق سیلاب ۵۰۰ ساله (متر) در منطقه رندان (بالادست حوضه آبریز کن) در مدل دو بعدی HEC-RAS

عبور سیلاب ۵۰۰ ساله را هم داراست (شکل ۶-ب). با توجه به اینکه در برآورد میزان خسارت باید تمام احتمالات موجود بررسی شود، مدل هیدرولیکی در صورت انسداد دهانه این کانال هم اجرا گردید. نتایج حاصل در شکل (۶-ج) ارائه گردیده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود در صورت انسداد دهانه کانال، جریان آب به منطقه راه پیدا خواهد کرد و منجر به خسارت اقتصادی به ساختمان‌ها و دارایی‌های داخل آن‌ها می‌گردد. خسارت‌های برآورده شده برای منطقه امامزاده داوود مربوط به این سناریو در بخش‌های بعد ارائه شده است.

لازم به ذکر است که در حوضه 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 ۶-الف). خسارت‌های جانی و مالی سنگین ناشی از رخداد سیلاب در سال‌های ۱۳۳۳ و ۱۳۶۶ که بر اثر انسداد دهانه کانال و بالا آمدن آب تا ارتفاع ۱۰ متری به بار آمد، موجب شد که ابعاد هندسی این کانال نسبت به قبل افزایش یابد. نتایج شبیه‌سازی هیدرولیکی بیانگر این است که کانال جدید ظرفیت



شکل ۶. الف) کانال سرپوشیده در بالادست منطقه امامزاده داوود، ب) شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان سیلاب ۵۰۰ ساله بدون انسداد کانال سرپوشیده و ج) شبیه‌سازی هیدرولیکی جریان سیلاب ۵۰۰ ساله با انسداد کانال سرپوشیده

است. این منحنی‌ها با توجه به نوع مصالح به کار رفته در ساختمان‌ها و تعداد طبقات آن‌ها متفاوت می‌باشند. شکل (۷) نمونه‌ای از این منحنی‌ها را برای ساختمان‌ها با مصالح متفاوت نشان می‌دهد.

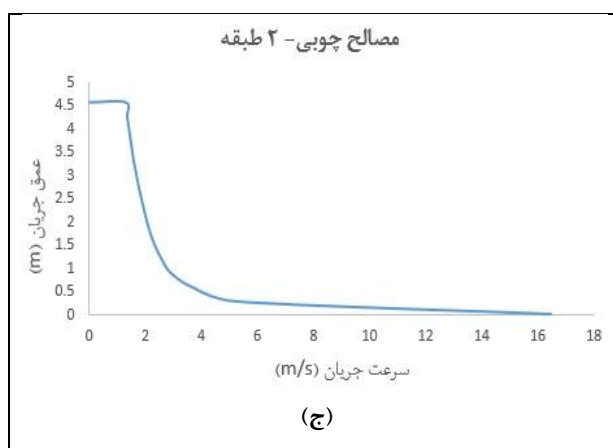
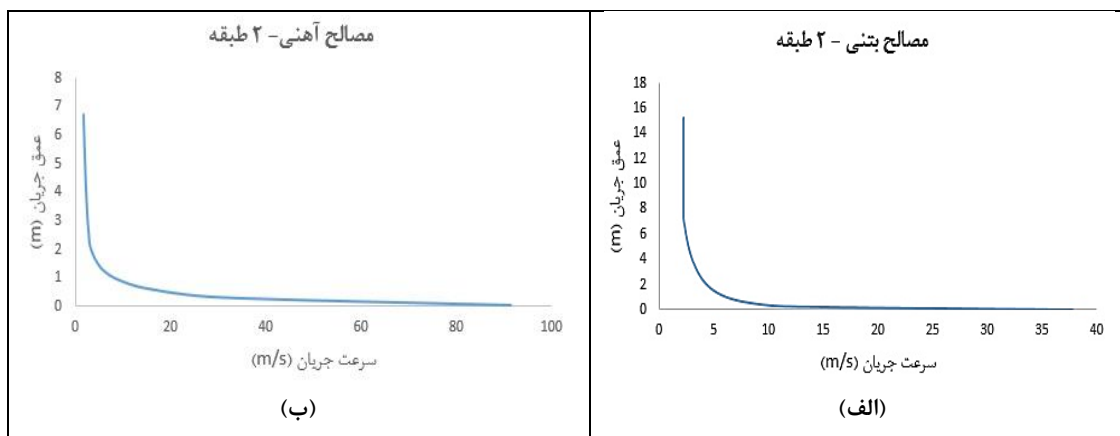
همانطور که ملاحظه می‌گردد منحنی آستانه تخریب در واقع منحنی تغییرات سرعت در مقابل عمق می‌باشد. این منحنی بدین صورت تفسیر می‌گردد که اگر در هر نقطه از منطقه، میزان عمق و سرعت در بالای نمودار و یا روی منحنی مربوطه قرار گیرد، ساختمان به طور کلی تخریب شده و درجه خسارت ۱۰۰ درصد تعریف می‌گردد. این مناطق به عنوان مناطق پر ریسک شناخته شده و ساختمان‌های موجود در آن‌ها از بقیه عناصر موجود در نقشه کاربری اراضی مجزا می‌گردند. بر همین اساس بقیه نقاط که در فضای مابین پایین منحنی و محورهای افقی و قائم قرار گیرند، تخریب نمی‌شوند ولی محتمل است که دچار درصدی از خسارت شوند. در شکل (۸) بخشی از ساختمان‌هایی که دچار تخریب کامل شده و بخشی که تخریب نشده ولی دچار درصدی از خسارت ناشی سیلاب هستند (در بخش بعدی توضیح داده شده است)، مشخص می‌باشد.

#### مدل‌سازی خسارت و تخمین ریسک

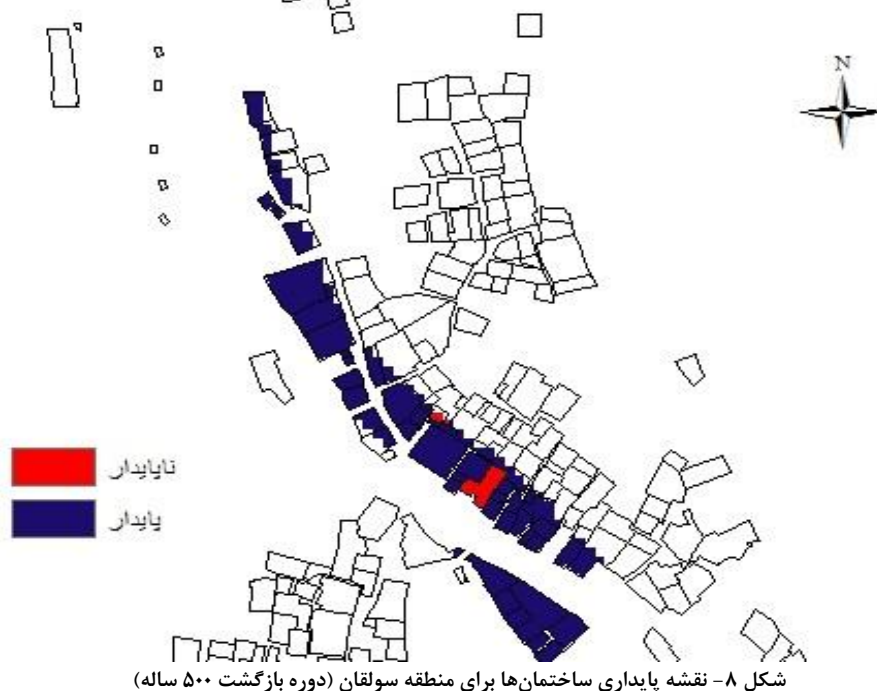
با توجه به اینکه در این مطالعه به تخمین خسارت مستقیم و ملموس ناشی از سیلاب برای ساختمان‌ها و محتویات درون آن‌ها پرداخته شده است لازم است در مرحله اول پایدار ماندن یا تخریب ساختمان در اثر وقوع سیلاب تحلیل گردد. در مرحله بعد برای ساختمان‌هایی که تخریب نشده‌اند با تعریف منحنی‌های عمق-خسارت متناسب با نوع سازه و کاربری آن، درصد میزان خسارت وارده بر سازه (میزان آسیب‌پذیری) برآورد گردد. در نهایت درصد خسارت به دست آمده از مرحله دوم در واحد پولی به ازاء هر متر مربع ضرب و خسارت به صورت واحد پولی بیان گردد. مراحل کار برای مدل‌سازی خسارت و نتایج حاصله در ادامه توضیح داده شده است.

#### معیار پایداری

در خصوص معیارهای لازم برای پایدار ماندن سازه‌ها در مقابل سیلاب کار زیادی صورت نگرفته و اگر هم صورت گرفته به صورت رسمی منتشر نشده است. در این مطالعه از نتایج حاصل از پژوهش USACE<sup>۱</sup> و پروژه RESCDAM<sup>۲</sup> استفاده به عمل آمده



شکل ۷. نمودار عمق - سرعت برای ساختمان های ۲ طبقه با الف) مصالح بتنی، ب) مصالح آهنی و ج) مصالح چوبی

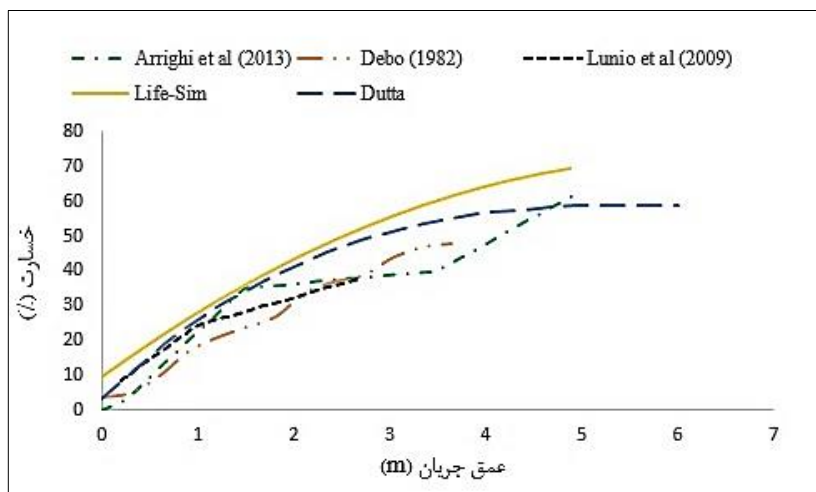


خسارت ناشی از سیلاب بر ساختمان‌ها را می‌توان توسط عوامل مختلفی از جمله سطح آب، سرعت جریان، مقدار بار معلق و شناور، آلودگی در آب و مدت زمان سیلاب تعیین نمود. عمق آب اغلب به عنوان مهم‌ترین عامل نشان‌دهنده بزرگی اثر سیلاب در

آسیب‌پذیری و منحنی عمق - خسارت ساختمان‌ها در مدل‌های مختلف آسیب‌پذیری را می‌توان درجه خسارت وارده به گروهی از عناصر در معرض ریسک ناشی از بلایای طبیعی تعریف کرد. درجه

قابل قبولی به همراه داشت. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که تخمین خسارت اقتصادی سیلاب در مناطق شهری متراکم از دقت بیشتری برخوردار است. مدل چهارم توسط Luino *et al.* (2009) برای تخمین خسارت سیلاب بر اساس سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) بر روی دریاچه Maggiore در شمال ایتالیا ارائه گردیده است. بر اساس نتایج گزارش شده توسط این محققین، منحنی‌های ارائه شده برای ارزیابی خسارت مناطق بزرگ مناسب می‌باشد. مدل پنجمی که در مطالعه حاضر برای ارزیابی خسارت ساختمانی مورد استفاده قرار گرفت مدلی است که توسط Arrighi *et al.* (2013) با مقیاس میکرو برای تخمین ریسک سیلاب بر روی منطقه Florence ایتالیا ارائه گردیده است. در مطالعه انجام شده توسط Arrighi *et al.* (2013) تنها خسارت مستقیم ملموس وارده به سازه، محتویات درون ساختمان‌های شخصی و اداری - عمومی در نظر گرفته شده است. منحنی‌های خسارت مورد استفاده در گزارش این محققین از وقایع حادث شده در شهرهای Palermo ایتالیا (Oliveri and Santoro, 2000) و Prague در جمهوری چک (Genovece, 2006) به دست آمده است.

توابع عمق خسارت مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه (برای کاربری مسکونی) در شکل (۹) نشان داده شده است. در این نمودار محور  $y$  نشان‌دهنده درصد خسارت و محور  $x$  عمق آب بر حسب متر است.



شکل ۹. منحنی‌های عمق - خسارت برای ساختمان‌های مسکونی

تمامی ساختمان‌ها از قبیل تعداد طبقات، وجود یا عدم وجود زیرزمین و ارتفاع از سطح زمین در منطقه مورد مطالعه به دست آید. با مراجعه به سازمان بنیاد مسکن انقلاب اسلامی و مصاحبه با مشاورین املاک منطقه اطلاعات مذکور جمع‌آوری گردید. در این تحقیق خسارت سازه‌ای وارد بر ساختمان بر اساس هزینه بازسازی

اعمال خسارت بر سازه در نظر گرفته می‌شود. در این ارتباط برای خسارت وارده به سازه در معرض خطر می‌توان رابطه بین عمق سیلاب و خسارت را به صورت درصدی از ارزش کل سازه تعریف کرد.

یکی از مدل‌هایی که در این تحقیق از منحنی‌های عمق - خسارت آن‌ها استفاده به عمل آمده است مدل Life-Sim می‌باشد که یک مدل شبیه‌سازی پویا و توزیعی برای تخمین پتانسیل تلفات مرگ و میر ناشی از سیلاب طبیعی و سیلاب ناشی از شکست سد محسوب می‌شود. این مدل توسط اداره مهندسی ارتش ایالات متحده آمریکا، کمیته ملی استرالیا برای سدهای بزرگ و اداره آبادانی ایالات متحده آمریکا توسعه داده شده است. در این مدل منحنی‌های عمق - خسارت برای ساختمان‌ها با کاربری‌های مختلف، وسایل و محتویات درون ساختمان‌ها و همچنین وسایل نقلیه ارائه شده است (HEC-Life Sim user's manual). دسته دوم منحنی‌های عمق - خسارت مورد استفاده در این تحقیق توسط Debo (1982) ارائه شده است. این محقق منحنی‌های عمق - خسارت مناسبی را برای محاسبه خسارت ناشی از سیلاب در منطقه جورجیا ارائه نمود. مدل ریاضی ارائه شده توسط Dutta *et al.* (2003) برای آب‌گرفتگی سیلاب و تخمین تلفات ناشی از آن در حوضه‌های رودخانه‌ای ژاپن، گروه سوم مدل‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر است. اجرای مدل یاد شده توسط محققین مزبور برای تخمین خسارت شهری نتایج

#### ارزشگذاری ساختمان‌ها

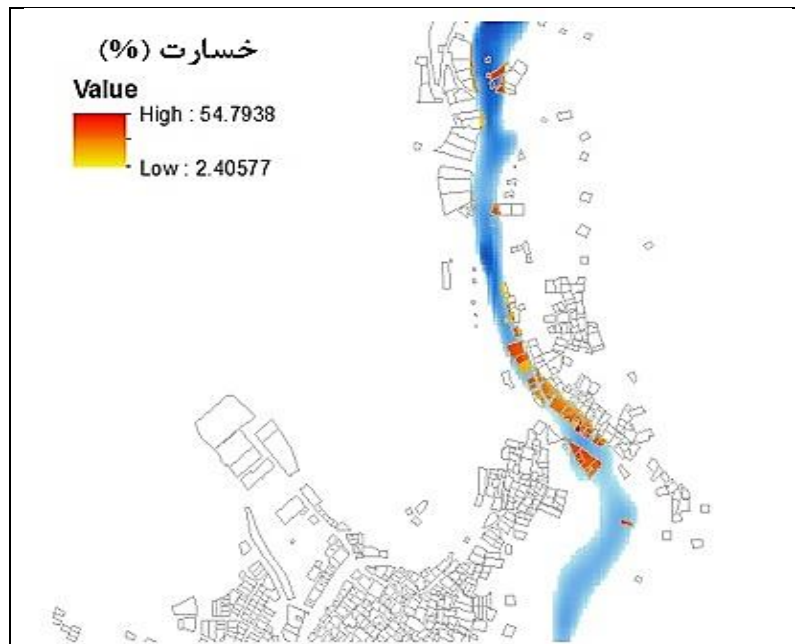
کمی‌سازی میزان خسارت مستلزم ارزیابی اولیه از عناصر در معرض خطر سیلاب است. تخمین میزان خسارت وارد بر ساختمان و محتویات داخل آن‌ها بر اساس کاربری و تعداد طبقات آن‌هاست. برای این منظور نیاز است که اطلاعات و مشخصات

(جایگزینی) محاسبه شده است.

از جمله مسکونی، تجاری، مذهبی و... را به خود اختصاص دادند. برای اجرای الگوریتم توسعه داده شده برای محاسبه خسارت، تمامی لایه‌هایی که به صورت فایل شکل بودند به فرمت رستری تبدیل شدند. با توجه به رزولوشن (قدرت تفکیک مکانی) منبع اطلاعاتی، در تبدیل فایل شکل‌ها به فایل‌های رستری اندازه سلول‌ها ۰/۵ متری انتخاب گردید. شکل (۱۰) نتیجه اجرای الگوریتم محاسبه خسارت اقتصادی را برای منطقه سولقان نشان می‌دهد.

### محاسبه خسارت مورد انتظار ساختمان

برای ارزیابی خسارت سیلاب مورد انتظار یک روش محاسباتی در محیط GIS توسعه داده شد. این مدل به منظور محاسبه خسارت اقتصادی برای کاربری‌های مختلف ساختمان در حوضه کن برای مناطق طالبون، رندان، امامزاده داوود، سنگان، کشار و سولقان اجرا شد. فایل شکل مناطق مورد مطالعه ابتدا به لایه‌های مختلف تقسیم شد به طوری که هر کدام از ساختمان‌ها یک کلاس کاربری



شکل ۱۰. محاسبه خسارت نسبی ناشی از سیلاب

### ارزیابی ریسک

تحلیل خسارت که در قسمت‌های قبلی شرح داده شد برای سناریوهایی با دوره بازگشت‌های مختلف اجرا شد. به عنوان نمونه نتایج حاصل از محاسبه میزان خسارت وارده به سازه ساختمان‌ها برای سیلاب ۵۰۰ ساله منطقه امامزاده داوود و سنگان (به صورت درصد) در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

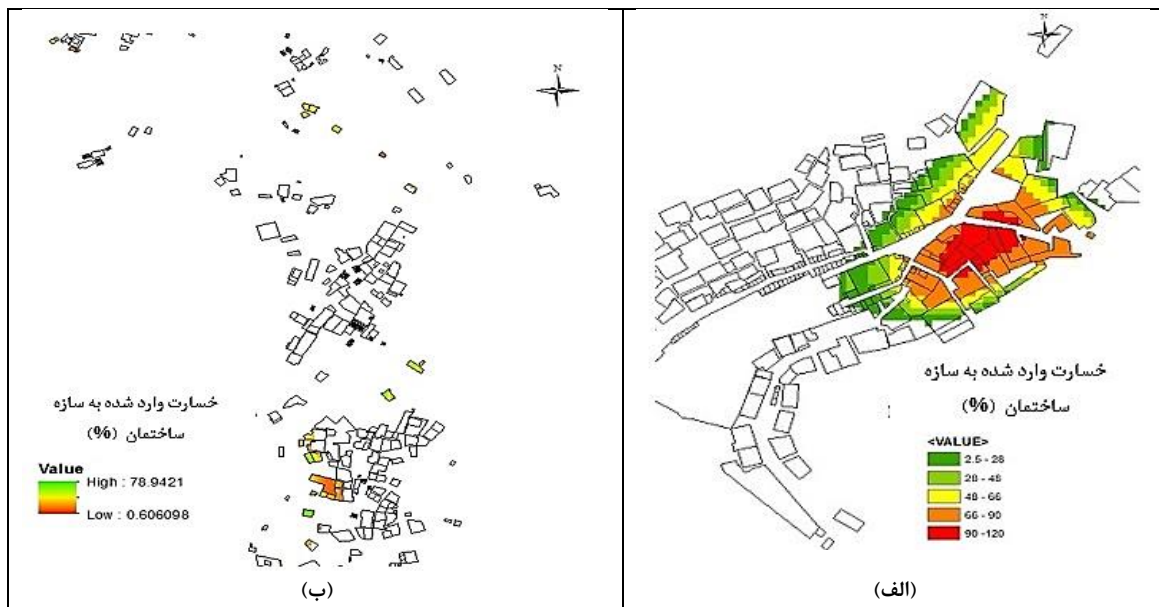
متوسط درصد خسارت وارده بر سازه تمامی ساختمان‌های منطقه مورد مطالعه به تفکیک کاربری‌های هر یک از آن‌ها برای دوره بازگشت‌های مختلف با استفاده از پنج نوع منحنی‌های عمق-خسارت مورد استفاده در این تحقیق محاسبه شده و دو نمونه از آن در جدول‌های (۵ و ۶) برای دو زیر حوضه از شش زیرحوضه موجود ارائه شده است.

جدول ۵. متوسط درصد خسارت سازه‌ای ساختمان‌ها با استفاده از منحنی خسارت Life-Sim

|       |       | دوره بازگشت (سال) |       |       |       |       |       |         |                |  |
|-------|-------|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|----------------|--|
| ۵۰۰   | ۲۰۰   | ۱۰۰               | ۵۰    | ۲۵    | ۱۰    | ۵     | ۲     | کاربری  | روستا          |  |
| ۲۹/۷۰ | ۲۹/۱۲ | ۲۸/۶۱             | ۲۸/۴  | ۲۷/۷  | ۲۶/۶۹ | ۲۶/۲۱ | ۲۴/۹۰ | مسکونی  | سولقان         |  |
| ۱۴/۳۷ | ۱۳/۸۴ | ۱۳/۲۱             | ۱۲/۴۵ | ۱۲/۱۱ | ۱۱/۲۲ | ۱۱/۳۷ | ۱۰/۶۸ | تجاری   |                |  |
| ۱۳/۴۸ | ۱۳/۳۲ | ۱۳/۱۵             | ۱۲/۸۵ | ۱۲/۶۸ | ۱۲/۲۷ | ۱۱/۷۷ | ۱۰/۵۱ | تاسیسات |                |  |
| ۲۹/۶۸ | ۲۸/۶۵ | ۲۷/۶۱             | ۲۶/۱۴ | ۲۵/۴۲ | ۲۳/۱۵ | ۲۱/۹۷ | ۱۹/۸۵ | مذهبی   |                |  |
| ۴۶    | ۴۵/۵۹ | ۴۶/۴۰             | ۴۶/۶۰ | ۴۵/۸۹ | ۴۷/۲۸ | ۴۶/۳۱ | ۴۶/۰۶ | مسکونی  | امامزاده داوود |  |
| ۲۴/۱۴ | ۳۳/۴۴ | ۳۱/۶۸             | ۳۱/۴۳ | ۲۹/۶۱ | ۲۷/۱۵ | ۲۶/۳۳ | ۲۳/۸۶ | مذهبی   |                |  |
| ۵۷/۷۶ | ۵۷/۰۹ | ۵۶/۳۴             | ۵۵/۰۶ | ۵۴/۵۱ | ۵۳/۳۶ | ۵۲/۸۱ | ۵۲/۴۸ | تجاری   |                |  |

جدول ۶. متوسط درصد خسارت سازه‌های ساختمان‌ها با استفاده از منحنی خسارت (Arrighi et al. (2013)

| دوره بازگشت (سال) |       |       |       |       |       |       |       | کاربری  | روستا  |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|--------|
| ۵۰۰               | ۲۰۰   | ۱۰۰   | ۵۰    | ۲۵    | ۱۰    | ۵     | ۲     |         |        |
| ۱۷/۲۹             | ۱۶/۰۷ | ۱۵/۳۴ | ۱۴/۸۱ | ۱۲/۷۱ | ۱۲/۷۱ | ۱۲/۰۱ | ۱۰/۳۷ | مسکونی  | سولقان |
| ۱۷/۸۲             | ۱۶/۱۹ | ۱۵/۰۲ | ۱۳/۶۰ | ۱۱/۱۲ | ۱۱/۱۲ | ۱۱/۳۱ | ۹/۹۶  | تجاری   |        |
| ۳۱/۳۵             | ۳۰/۴۱ | ۲۹/۲۹ | ۲۷/۱۵ | ۲۲/۸۲ | ۲۲/۸۲ | ۲۰/۰۵ | ۱۴/۹۱ | تاسیسات |        |
| ۱۰/۴۸             | ۹/۵۹  | ۸/۷۱  | ۷/۵۰  | ۵/۱۹  | ۵/۱۹  | ۴/۳۲  | ۳     | مذهبی   |        |
| ۲۱/۶۰             | ۲۱/۰۴ | ۲۰/۵۶ | ۱۹/۶۱ | ۱۸/۹۷ | ۱۸/۹۷ | ۱۷/۴۸ | ۱۵/۵۲ | مسکونی  | سنگان  |
| ۳۴/۸۱             | ۳۴/۴۴ | ۳۳/۷۷ | ۳۲/۶۰ | ۳۲/۴۰ | ۳۲/۴۰ | ۳۰/۳۸ | ۲۶/۶۹ | تاسیسات |        |
| ۲۲/۲۶             | ۲۰/۷۸ | ۲۰/۱۱ | ۱۶/۹۸ | ۱۳/۱۱ | ۱۳/۱۱ | ۱۳    | ۱۵/۵۲ | تجاری   |        |



شکل ۱۱. درصد خسارت سازه‌های وارده شده به ساختمان‌ها برای سیلاب ۵۰۰ ساله (برای الف) منطقه امامزاده داوود (ب) منطقه سنگان

جدول ۷. مساحت (m<sup>2</sup>) تحت خطر منطقه برای دوره بازگشت‌های مختلف

| دوره بازگشت (سال) |          |          |         |          |          |          |          | کاربری  | روستا          |
|-------------------|----------|----------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|----------------|
| ۵۰۰               | ۲۰۰      | ۱۰۰      | ۵۰      | ۲۵       | ۱۰       | ۵        | ۲        |         |                |
| ۷۵۵۶              | ۷۳۶۴/۵   | ۷۰۸۷/۷   | ۶۵۶۵/۲  | ۶۴۴۳/۲   | ۵۹۹۷/۲   | ۵۳۶۱/۲   | ۴۹۲۶/۵   | مسکونی  | سولقان         |
| ۱۱۱۴/۵            | ۱۰۷۲     | ۱۰۵۸/۲   | ۱۰۰۵/۵  | ۸۸۴/۷۵   | ۸۲۵/۵    | ۶۶۷      | ۶۰۵/۷۵   | تجاری   |                |
| ۵۶/۲۵             | ۵۶/۲۵    | ۵۶/۲۵    | ۵۶/۲۵   | ۵۶/۲۵    | ۵۵/۷۵    | ۵۵/۷۵    | ۵۵/۷۵    | تاسیسات |                |
| ۵۷۷               | ۵۷۷      | ۵۷۷      | ۵۷۴     | ۵۵۹      | ۵۵۷/۷۵   | ۵۲۳/۲۵   | ۴۹۶/۲۵   | مذهبی   |                |
| ۱۵۵۶              | ۱۵۳۶/۲۵  | ۱۴۸۸/۵   | ۱۴۵۴/۲۵ | ۱۴۵۴/۲۵  | ۱۳۸۸/۵   | ۱۳۸۸/۵   | ۱۳۶۹/۷۵  | مسکونی  | امامزاده داوود |
| ۱۷۰               | ۷۲/۷۵    | ۷۵/۷۲    | ۶۴/۷۵   | ۶۴/۷۵    | ۶۴/۷۵    | ۶۰/۵     | ۶۰       | مذهبی   |                |
| ۱۲۰۸۳/۷۵          | ۱۲۰۴۴/۷۵ | ۱۲۰۱۵/۲۵ | ۱۱۹۸۴   | ۱۱۹۳۵/۲۵ | ۱۱۹۳۵/۲۵ | ۱۱۸۹۳/۲۵ | ۱۱۸۰۷/۷۵ | تجاری   |                |

در مدل‌های Life-Sim و Dutta et al. (2003)، مشابه با خسارت وارد بر سازه ساختمان برای کاربری‌های مختلف از منحنی عمق-خسارت استفاده شده است. درحالی‌که در مدل Arrighi et al. (2013) خسارت وارد بر محتویات به صورت ثابت و در وقایع به صورت درصدی از خسارت وارد بر سازه تعریف شده است به نحوی

اکنون با استفاده از مجموع خسارت وارده به ساختمان (که شامل خسارت وارد بر سازه و محتویات ساختمان می‌باشد) می‌توان رابطه خسارت- فراوانی را برای منطقه مورد مطالعه ایجاد و سپس EAD (رابطه ۱۱) را محاسبه و از این طریق ریسک سیلاب را ارزیابی نمود. در ارتباط با خسارت وارد به محتویات ساختمان‌ها

متوسط خسارت سالیانه برای آنچه که در داخل ساختمان می‌تواند آسیب ببیند، ارزش‌گذاری بر حسب تعداد طبقات و کاربری ساختمان متفاوت می‌باشد. نتایج حاصله بر حسب ضرب مساحت در درصد خسارت وارده به ساختمان‌ها بیان شده است. برای محاسبه میزان خسارت بر حسب واحد پولی کافی است که نتایج به دست آمده را در هزینه بازسازی به ازای هر متر مربع ضرب نمود. نمونه این نوع محاسبات برای سیلاب مشاهداتی سال ۱۳۹۴ انجام شده و در بخش بعد ارائه شده است.

که خسارت محتویات ساختمان‌های مسکونی معادل با ۵۰ درصد و ساختمان‌های تجاری معادل با ۱۲ درصد خسارت وارد بر سازه در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که درصد خسارت‌های در نظر گرفته توسط *Arrighi et al.* (2013) در محدوده ضرایب محاسبه شده در مطالعه اتحادیه اروپا قرار داشت. در دو مدل *Debo* (1982) و *Luino et al.* (2009) نیز اصولاً نمودار عمق-خسارت برای محتویات وارده بر ساختمان تعریف نشده است. نتایج به دست آمده از محاسبه میزان ریسک سالانه مورد انتظار (EAD) در جدول (۸) ارائه شده است. در این جدول در محاسبه

جدول ۸. خسارت مورد انتظار سالانه (EAD)

| منحنی عمق-خسارت                              |             | مجموع خسارت وارد بر سازه و محتویات ساختمان (m <sup>2</sup> ) |                            |          | کاربری  | روستا          |
|--|-------------|--|----------------------------|----------|---------|----------------|
| خسارت وارد بر سازه ساختمان (m <sup>2</sup> ) |             | <i>Arrighi et al.</i> (2013)                                 | <i>Dutta et al.</i> (2003) | Life-Sim |         |                |
| Luino et al. (2009)                          | Debo (۱۹۸۲) |  |                            |          |         |                |
| ۶۷۱/۲۱                                       | ۴۷۱/۵۵      | ۷۵۴/۴۵   | ۸۹۱/۷۱                     | ۱۲۲۷/۴۰  | مسکونی  | سولقان         |
| ۸۹/۷۵  | ۶۱/۴۵       | ۷۲/۲۷  | ۱۱۰/۸۱                     | ۲۴۱/۳۴   | تجاری   |                |
| ۹/۸۴   | ۶/۴۸        | ۹/۹۰   | ۱۳/۲۱                      | ۱۱/۷۲    | تاسیسات |                |
| ۴۲/۱۷  | ۲۷/۶۵       | ۱۹/۹۷  | ۴۵/۹۴                      | ۱۰۸/۹۰   | مذهبی   |                |
| -  | -           | -  | -                          | ۸۹۳/۴۴   | مسکونی  | امامزاده داوود |
| -  | -           | -  | -                          | ۱۵/۵۲    | مذهبی   |                |
| -  | -           | -  | -                          | ۷۸۵۹/۳۹  | تجاری   |                |
| ۴۷۵/۸۵                                       | ۵۱۵/۶۰      | ۶۶۱/۲۰   | -                          | ۸۹۱/۲۷   | مسکونی  | سنگان          |
| ۱۴/۳۲  | ۱۸/۲۲       | ۱۷/۷۸  | -                          | ۱۰/۳۴    | تاسیسات |                |
| ۹۷/۲۰  | ۱۰۴/۷۶      | ۱۰۶/۲۶   | -                          | ۱۷۱/۰۹   | تجاری   |                |
| ۶۶/۳۱  | ۸۴/۵۶       | ۱۰۴/۷۷   | -                          | ۱۵۰/۶۵   | مسکونی  | کشار           |
| ۰/۰۴   | ۰/۰۳        | ۰/۰۳   | -                          | ۰/۰۴     | تجاری   |                |
| ۱۲۴/۵۶                                       | ۲۰۱/۵۸      | ۱۹۷/۷۵   | -                          | ۲۵۸/۲۹   | مسکونی  | رندان          |
| ۳۶/۱۶  | ۵۶/۰۸       | ۴۸/۱۵  | -                          | ۷۴/۴۸    | مسکونی  | طالون          |

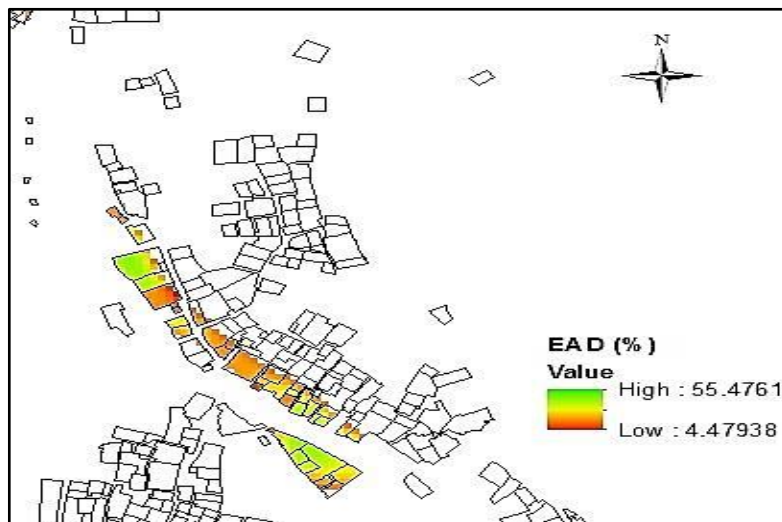
آسیب‌پذیری آن‌ها نسبت به سایر مکان‌ها بیشتر می‌باشد. برای ارزیابی عملکرد منحنی‌های عمق-خسارت سه مدل *Life-Sim*، *Dutta et al.* (2003) و *Arrighi et al.* (2013) (به علت وجود درصد خسارت وارد به محتویات) به مقایسه میزان شبیه‌سازی شده خسارت اقتصادی وارده بر ساختمان‌های حوضه کن در سال ۱۳۹۴ و اطلاعات ارائه شده توسط استانداری استان تهران اقدام گردید. سیلاب رخ داده در سال ۱۳۹۴ معادل با سیلابی با دوره بازگشت ۲۵ ساله بود به همین منظور از نتایج تخمین زده شده سه مدل مذکور برای این دوره‌بازگشت استفاده گردید. میزان خسارت وارد شده بر ساختمان‌ها برای منطقه سولقان به صورت جداگانه و بقیه مناطق به صورت مجموع ارائه شده است. در شکل (۱۳) مقایسه میان خسارت‌های تخمین زده شده توسط سه مدل مذکور و میزان خسارت مشاهداتی ارائه شده است. در شکل (۱۳) مشاهده می‌شود که نتایج حاصل از استفاده

همانطور که ملاحظه می‌گردد در جدول (۸) نتایج حاصل از مدل *Dutta et al.* (2003) فقط برای منطقه سولقان ارائه گردیده است. علت این امر آن است که در منحنی عمق-خسارت ارائه شده در این مدل (برخلاف منحنی‌های عمق-خسارت دیگر) خسارت وارده به ساختمان فقط برای مصالح بتنی ارائه شده است و در منطقه مطالعاتی کن فقط منطقه سولقان از چنین مصالحی برخوردار است. نکته قابل توجه دیگر در این جدول ارائه خسارت‌های منطقه امامزاده داوود (در سناریوی انسداد دهانه کانال سرپوشیده) منحصرأ با استفاده از مدل *Life-Sim* می‌باشد. علت این مسئله بالا بودن عمق آب در این منطقه و عدم امکان برون‌یابی دقیق در بقیه مدل‌ها می‌باشد. در شکل (۱۲) توزیع مکانی EAD (بر حسب درصد) برای واحدهای مختلف در منطقه سولقان نشان داده شده است. در این شکل مکان‌هایی که از ریسک بالاتری برخوردارند مکان‌هایی هستند که عمق سیلاب آن‌ها زیاد و مقدار

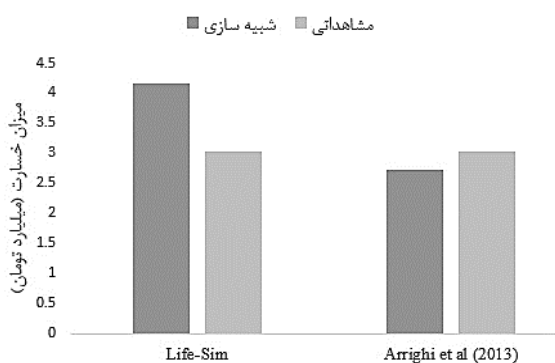


مدل *Arrighi et al.* (2013) در بردارد. اختلاف زیاد *Life-Sim* نسبت به این دو مدل *Dutta et al.* (2003) و *Arrighi et al.* (2013) به دلیل بالا بودن درصد خسارت وارد به محتویات می‌باشد.

دو منحنی عمق - خسارت *Dutta et al.* (2003) و *Arrighi et al.* (2013) با وجود اینکه برای دو منطقه متفاوت جغرافیایی ارائه شده‌اند، به یکدیگر نزدیک‌تر می‌باشند و کمترین میزان خطا را



شکل ۱۲. متوسط خسارت سالیانه (%) در منطقه سولقان



(ب)



(الف)

شکل ۱۳-مقایسه میان میزان خسارت برآورد شده سه مدل *Life-Sim*، *Dutta et al.* (2003) و *Arrighi et al.* (2013) و مشاهداتی سیل سال ۱۳۹۴ در الف) منطقه سولقان ب) بقیه مناطق

در جدول (۱۰) باند اطمینان برای منحنی عمق - خسارت وارد بر محتویات مدل‌های *Life-Sim*، *Dutta et al.* (2003) برای سه زیر حوضه سولقان، امامزاده داوود و سنگان آورده شده است. برای محاسبه باند اطمینان منحنی عمق - خسارت کل برای دو مدل *Life-Sim* و *Dutta et al.* (2003) از روش FOVE استفاده گردید. این در حالی است که برای مدل *Arrighi et al.* (2013)، به علت عدم وجود منحنی عمق - خسارت وارد بر محتویات و ارائه میزان خسارت محتویات به صورت درصدی از خسارت سازه‌ای وارد شده بر ساختمان‌ها، امکان استفاده از روش FOVE وجود ندارد. جهت محاسبه عدم قطعیت منحنی عمق - خسارت وارد بر محتویات در این روش از مطالعه‌ای که ارتش مهندسی آمریکا سال ۲۰۰۶ بر روی روابط عمق - خسارت انجام داده بودند (*USACE*, 2006)،

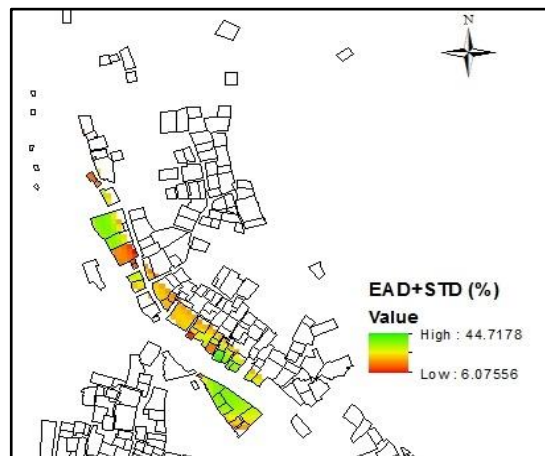
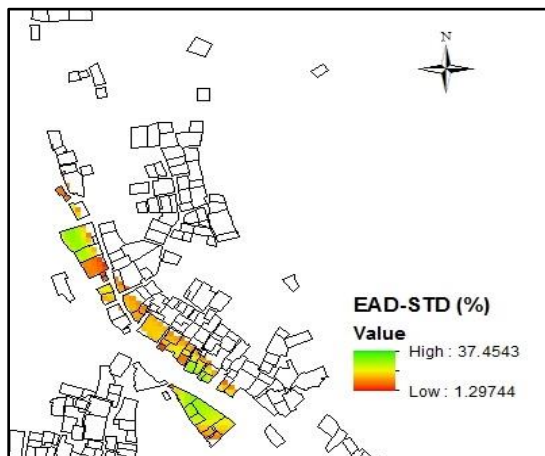
### عدم قطعیت

همانطور که در بخش روش تحقیق گفته شد برای تحلیل عدم قطعیت خسارت ناشی از سیلاب به علت عدم امکان استفاده از روشهای تحلیلی و همچنین روش مونت کارلو، سعی شد که از روش FOVE استفاده گردد. شکل (۱۴) نمونه‌ای از اجرای روش FOVE برای تشکیل باند اطمینان منحنی عمق - خسارت وارد بر سازه ساختمان، بر اساس روابط استخراج شده از منحنی‌های معرفی شده در مدل *Life-Sim* در منطقه سولقان را نشان می‌دهد.

در جدول (۹) باند اطمینان برای منحنی عمق - خسارت وارد بر سازه در پنج مدل *Life-Sim*، *Debo* (1982) *et al.*، *Dutta* (2003)، *Luino et al.* (2009) و *Arrighi et al.* (2013)

آمده، انحراف معیار برای کاربری‌های مختلف برای مدل Arrighi (2013) *et al.* برآورد گردید. نتایج حاصل از محاسبه انحراف معیار درصد خسارت محتویات نسبت به خسارت سازه‌ای برای مدل Arrighi *et al.* (2013) در جدول (۱۱) ارائه شده است.

استفاده گردید. در این مطالعه میانگین و انحراف معیار درصد خسارت محتویات نسبت به خسارت سازه‌ای ساختمان‌های مسکونی و تجاری با استفاده از تجارب موجود تخمین زده شد. با استفاده از نتایج این مطالعه، ضریب تغییرات خسارت در دو نوع کاربری برآورد شد و سپس با استفاده از ضریب تغییرات بدست



شکل ۱۴- باند اطمینان تولید شده برای تابع عمق - خسارت Life-Sim برای منطقه سولقان با استفاده از روش FOVE

جدول ۹. باند اطمینان منحنی عمق - خسارت وارد بر سازه ساختمان

| منطقه          | Life-Sim             | Debo (1982) | Dutta <i>et al.</i> (2003) | Luino <i>et al.</i> (2009) | Arrighi <i>et al.</i> (2013) |
|----------------|----------------------|-------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| سولقان         | EAD                  | ۹/۷۴        | ۱۵/۳۳                      | ۱۴/۳۳                      | ۹/۹۷                         |
|                | $EAD + \sigma_{EAD}$ | ۱۲/۹۹       | ۲۰/۱۲                      | ۱۸/۲۲                      | ۱۵/۳۶                        |
|                | $EAD - \sigma_{EAD}$ | ۶/۴۹        | ۱۰/۵۳                      | ۱۰/۴۴                      | ۴/۹۵                         |
| امامزاده داوود | EAD                  | -           | -                          | -                          | -                            |
|                | $EAD + \sigma_{EAD}$ | -           | -                          | -                          | -                            |
|                | $EAD - \sigma_{EAD}$ | -           | -                          | -                          | -                            |
| سنگان          | EAD                  | ۱۸/۱۴       | -                          | ۱۷/۳۶                      | ۱۴/۶۸                        |
|                | $EAD + \sigma_{EAD}$ | ۲۵/۴۷       | -                          | ۲۱/۷۷                      | ۲۱/۰۶                        |
|                | $EAD - \sigma_{EAD}$ | ۱۰/۸۰       | -                          | ۱۲/۹۴                      | ۸/۷۶                         |

جدول ۱۰. باند اطمینان منحنی عمق - خسارت وارد بر محتویات ساختمان

| منطقه          | Life-Sim             | Dutta <i>et al.</i> (2003) |
|----------------|----------------------|----------------------------|
| سولقان         | EAD                  | ۲۹/۰۹                      |
|                | $EAD + \sigma_{EAD}$ | ۳۶/۴۲                      |
|                | $EAD - \sigma_{EAD}$ | ۸/۷۸                       |
| امامزاده داوود | EAD                  | ۷۸/۲۴                      |
|                | $EAD + \sigma_{EAD}$ | ۸۳/۶۶                      |
|                | $EAD - \sigma_{EAD}$ | ۷۲/۸۲                      |
| سنگان          | EAD                  | ۲۳/۲۶                      |
|                | $EAD + \sigma_{EAD}$ | ۲۸/۳۹                      |
|                | $EAD - \sigma_{EAD}$ | ۱۸/۱۳                      |

جدول ۱۱. باند اطمینان برای میزان خسارت محتویات وارد بر ساختمان با استفاده از مدل Arrighi et al. (2013)

| نوع کاربری | میانگین درصد خسارت محتویات نسبت به | ضریب تغییرات به دست آمده | انحراف معیار درصد خسارت محتویات نسبت به |
|------------|------------------------------------|--------------------------|---|
| کاربری     | خسارت سازه‌ای                      | از USACE                 | خسارت سازه‌ای                           |
| مسکونی     | ۰/۵                                | ۰/۵۱                     | ۰/۲۵                                    |
| تجاری      | ۰/۱۲                               | ۰/۹۵                     | ۰/۱۱                                    |

## نتیجه‌گیری

مورد مطالعه محاسبه گردید. نتایج نشان داد که استفاده از منحنی‌های عمق- خسارت مدل Arrighi et al. (2013) دارای نتایجی متفاوت از بقیه بوده و در شرایط نبود داده مناسب از ساختار معماری، اقتصادی و همچنین سابقه خسارت در منطقه، قابل توصیه برای بکارگیری در مطالعات مربوط به مدیریت ریسک و بیمه سیل می‌باشند. با توجه به نتایج به دست آمده از درصد خسارت وارد بر منطقه مورد مطالعه، منطقه امامزاده داوود نسبت به دیگر مناطق از آسیب‌پذیری بالاتری برخوردار بود و بیشترین میزان خسارت را به خود اختصاص داده است. این نتیجه منطبق بر نتایج بدست آمده توسط Hoshyarypour et al. (2016) است که در مطالعه مدیریت سیلاب در حوضه آبریز کن پرداختند. آنها منطقه امامزاده داوود را از نظر تخریب مسکونی و تجاری با بیشترین میزان آسیب‌پذیری در حوضه مورد مطالعه معرفی نمودند. همچنین Ghahroudi Tali et al. (2016) به تعیین آسیب‌پذیری حوضه‌های شمال غرب تهران در که تا کن و مناطق شهری ۲ و ۵ پرداختند. نتایج بیانگر این بود که بافت فرسوده پارامتری است که بیشترین میزان آسیب‌پذیری را شامل می‌شود. در این پژوهش نیز در بررسی پایداری ساختمان‌ها، آن دسته از ساختمان‌ها که در بافت فرسوده قرار گرفته بودند در معرض ناپایداری و تخریب قرار داشتند.

در بخش نهایی پژوهش به کمی کردن تاثیر میزان عدم قطعیت منحنی عمق- خسارت که یکی از منابع مهم عدم قطعیت در برآورد ریسک خسارت اقتصادی وارد بر ساختمان‌ها می‌باشد، پرداخته شد. بدین منظور کمی کردن عدم قطعیت منحنی عمق- خسارت با استفاده از روش تقریبی واریانس مرتبه اول (FOVE) صورت گرفت و با ترکیب روش FOVE و روش محاسبه خسارت سالانه مورد انتظار وارد بر ساختمان (EAD) میزان عدم قطعیت منحنی‌های عمق- خسارت مدل‌های Life-Sim، Dutta et al. (2003) و Arrighi et al. (2013) در حوضه کن محاسبه شد.

روش پیشنهاد شده در این تحقیق، در صورت داشتن نقشه مناسب از منطقه شهری و اطلاع از حدود بزرگی سیل حادث شده، می‌تواند برای مدیران مناطق شهری نیز برای بدست آوردن یک تخمین سریع اما تقریبی از خسارت بعد از فاجعه و شناسایی نقاط بحران‌زا مورد استفاده قرار گیرد. این روش برای استفاده،

گذر از مدیریت بحران به مدیریت ریسک سیل در مرحله اول نیازمند ارزیابی خسارتهای محتمل در هر دو افق دور و نزدیک می‌باشد. رسیدن به این هدف مهم در کشور ایران، که برای هر سه بخش مدیریت دولتی، بیمه و سرمایه‌گذاران بخش خصوصی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، مادامی‌که روش متقن و یکپارچه‌ای برای برآورد خسارتهای ناشی از سیلاب وجود ندارد امکان‌پذیر نمی‌باشد. مطالعات محدود و پراکنده‌ای که تا کنون صورت گرفته نیز علیرغم ارزش ذاتی خود برای رسیدن به این اهداف کافی به نظر نمی‌رسند. در این پژوهش سعی شده است با نگاه به دست‌آوردهای سایر کشورها و مدل‌هایی که برای شرایط کشور یا کشورهای خاص توسعه یافته‌اند، امکان استفاده از نتایج کار آنها، که حاصل سالها کار تئوری و میدانی به صورت توأم بوده است، برای ایران با در نظر گرفتن همه کم و کاستی‌هایی که از نظر تأمین داده پایه این نوع مدل‌ها وجود دارد فراهم گردد. در این راستا و در وهله اول، علاوه بر ارائه الگوریتمی ساده و قدم به قدم برای ارزیابی خسارت در محیط GIS، پنج مدل ارزیابی خسارت قابل اعتنا در سطح دنیا با ارائه راه حل مورد نیاز برای استفاده از آنها در شرایط ایران ارزیابی شدند. در مطالعه موردی به محاسبه خسارت مستقیم ناشی از سیلاب بر ساختمان‌ها و دارایی‌های داخل ساختمان‌ها (محتویات) در حوضه کن پرداخته شده است. بدین منظور با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS سیل‌ها با دوره‌بازگشت‌های مختلف (۵۰۰، ۲۰۰ و ۱۰۰، ۵۰، ۲۵، ۱۰، ۵، ۲ سال) برای تمامی زیرحوضه‌های منطقه برآورد گردید. در مرحله بعد با استفاده از مدل هیدرولیکی دو بعدی HEC-RAS به ازای سیلاب‌های به دست آمده از مدل HEC-HMS، پهنه عمق و سرعت جریان حاصل شد. جهت محاسبه خسارت اقتصادی وارد بر ساختمان‌ها از منحنی‌های عمق- خسارت مورد استفاده در مدل‌های Life-Sim، Debo (1982) و Dutta et al. (2003)، Luino et al. (2009) و Arrighi et al. (2013) استفاده شد. در نهایت هم خسارت سیل‌های حدی به ازای دوره بازگشت‌های یاد شده (ریسک دراز مدت) و هم متوسط خسارت کل سالانه مورد انتظار وارد بر ساختمان و محتویات داخل آن و به عبارت بهتر ریسک کوتاه مدت سیل در منطقه

معرض سیلاب‌های سطح الارضی با منشأ غیر رودخانه‌ای قرار دارند روش کار در بخش مطالعات پایه هیدرولوژیکی- هیدرولیکی تغییر خواهد نمود.

تابع منطقه جغرافیایی خاص نبوده و در صورت تأمین اطلاعات پایه‌ای که در متن مقاله به آن‌ها اشاره شد می‌تواند برای مدیریت مناطقی که در معرض خطر سیلاب رودخانه‌ای قرار دارند مورد استفاده قرار گیرد. بدیهی است که برای مدیریت مناطقی که در

## REFERENCES

- André, C. Monfort, D. Bouzit, M. and Vinchon, C. (2013). Contribution of insurance data to cost assessment of coastal Flood damage to residential buildings: insights gained from Johanna (2008) and Xynthia (2010) storm events. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 2003–2012
- Arrighi, C. Brugioni, M. Castelli, F. Franceschini, S. and Mazzanti, B. (2013). Urban micro-scale flood risk estimation with parsimonious hydraulic modelling and census data. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1375-1391.
- Bubeck, P. and Kreibich, H. (2011). Natural Hazards: direct costs and losses due to the disruption of production processes. CONHAZ, Report WP1, D1.2.
- Cammerer, H. Thieken, A. H. and Lammel, J. (2013). Adaptability and transferability of flood loss functions in residential areas. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 3063-3081.
- HEC Life-Sim User's Manual . (2018). User's Manual of HEC Life-Sim life loss estimation. 216 p
- Cornell, C. A. (1972). First-Order Analysis of Model and Parameter Uncertainty Proceedings of International Symposium on Uncertainties in Hydrologic and Water Resources Systems, 3, 1245–1272.
- Debo, T. N. (1982). Urban flood damage estimating curves. *Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the ASCE*, 108(10), 1059-1069.
- Dutta, D. Herath, S. and Musiaka, K. (2003). A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of Hydrology*, 277, 24–49.
- European Commission (2007). A new EU Floods Directive. Retrieved November 26, 2007, from <http://ec.europa.eu/environment/water/floodrisk/index>
- FEMA. (2003). Hazard MH—Multi-hazard Loss Estimation Methodology. Federal Emergency Management Agency: USA
- Ganji, Z. Shokoohi, A. and Singh, V.P. (2016). Evaluating the effect of discharge - probability function uncertainty on the risk of agricultural loss due to flood using Monte Carlo method. *Iran-Water Resources Research*, 12(2): 13-23. (In Farsi)
- Genovese, E. (2006). A methodological approach to land use based flood damage assessment in urban areas: Prague case study. European Commission, Joint Research Centre.
- Ghahroudi Tali, M. Majidi Heravi, A. and Abdoli, E. (2016). Urban Flood Vulnerability (Case study: Tehran, Darakeh to Kan). *Journal of Geography and Environmental hazards*, 17, 21-35. (In Farsi)
- Handmer, J. (2003). The chimera of precision: Inherent uncertainties in disaster loss assessment. *Australian Journal of Emergency Management*, 18, 88–97.
- Hansson, K. Danielson, M. and Ekenberg, L. (2008). A framework for elevation of flood management strategies. *Journal of Environmental Management*, 86:465-480.
- Huizinga, J. Moel, H. and Szewczyk, W. (2017). Global flood depth-damage functions. Methodology and the database with guidelines. EUR 28552 EN.
- Hoshiyarpour, F. Yazdi, J. Eftekhari, M. Javadi, F. and Sheshangosht, S. (2016) Flood management in Kan river basin using a simulation- optimization approach. *Journal of Experimental Research in Civil Engineering*, 3:73-89. (In Farsi)
- Karbasi, M. Shokoohi, A. and Saghafian, B. (2019). Estimating Number of Fatalities Due to Flash Floods in Residential Areas. *Iran-Water Resources Research*, 15(1), 150-160 (In Farsi)
- Kardan, N. Hassanzadeh, Y. and Arzanlou, A. (2018). 2D Numerical Simulation of urban floods using CCHE2D (Case study: Aghghala city). *Iranian Journal of Marine Technology*, 4(4): 25:36. (In Farsi)
- Kreibich, H. and Thieken, A. H. (2009). Coping with floods in the city of Dresden, Germany. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 51(3), 423-436.
- Loster, T. (1999). Flood trends and global change. In: proceedings of Euroconference on global change and catastrophe risk management, 6-9 June, IISA Laxenburg, Austria.
- Luino, F. Cirio, C. G. Biddoccu, M. Agangi, A. Giulietto, W. Godone, F. Nigrelli, G. (2009). Application of a model to the evaluation of flood damage. *Journal of Geoinformatica*, 13, 339-353.
- Mays, L. W. and Tung Y. K. (1992). *Hydrosystems Engineering and Management*, McGraw-Hill, New York.
- Merz, B. Hall, J. Disse, M. and Schumann, A. (2010). Fluvial flood risk management in a changing world. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, 509-527.
- Merz, B. Kreibich, H. Schwarze, R. and Thieken, A. (2010). Assessment of economic flood damage. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10:1697-1724.
- Meyer, V. Becker, N. Markantonis, V. Schwarze, R. van den Bergh, J. C. J. M. Bouwer, L. M. Bubeck, P. Ciavola, P. Genovese, E. Green, C. Hallegatte, S.

- Kreibich, H. Lequeux, Q. Logar, I. Papyrakis, E. Pfurtsceller, C. Poussin, J. Przymuski, V. Thieken, A. H. and Viavattene, C. (2013). Review article: Assessing the costs of natural hazards – state of the art and knowledge gaps. *Journal of Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13, 1351–1373.
- Nascimento, N. Lea Machado, M. Baptista, M. De Paula, E. and Silva, A. (2007). The assessment of damage caused by floods in the Brazilian context. *Journal of Urban Water*, 4(3), 195-210.
- Oliveri, E. and Santoro, M. (2000). Estimation of urban structural flood damages: the case study of Palermo. *Urban Water*, 2, 223–234.
- Pandey, M. D. and Nathwani, J. S. (2004). Life quality index for the estimation of societal willingness-to-pay for safety. *Journal of Structural Safety*, 26, 181-199.
- Papathoma-Köhle, M. Zischg, A. Fuchs, S. Glade, T. and Keiler, M. (2015). Loss estimation for landslides in mountain areas
- Parker, D. J. Green, C. H. and Thompson, P.M. (1987). Urban flood protection benefits: A project appraisal guide. Gower Technical Press, Aldershot.
- Queensland Government. (2002). Disaster loss assessment guidelines, Illycroft Pty Ltd: Queensland, Australia, 111 p.
- Rashid, H. (2011). Interpreting flood disaster and flood hazard perception from newspaper: table of two floods in the Red River valley, Manitoba, Canada. *Applied Geography*, 31, 35-45.
- Sadeghlo, T. and Sajasi Gheidari, H. (2014). Flood risk management strategies in rural areas with models SWOT- TOPSIS. *Journal of Geography and Environmental hazards*, 12, 105-128. (In Farsi)
- Scorzini, A. R. and Frank, E. (2015). Flood damage curves: new insights from the 2010 flood in Veneto, Italy. *Journal of Flood Risk Management*, 10: 381-392.
- Smith, D. I. (1994). Flood damage estimation – A review of urban stage-damage curves and loss functions. *Journal of Water SA*, 20, 231–238.
- Smith, K. and Ward, R. (1998). Floods: Physical processes and human impacts. New York: Wiley.
- The International Disaster Database (EM-DAT) (2016) <http://www.emdat.be/about>
- Thieken, A. H. Kreibich, H. Muller, M. and Merz, B. (2007). Coping with floods: preparedness, response and recovery of flood affected residents in Germany. *Journal of Hydrological Sciences*, 52(5), 1016-1037.
- Tung, Y. K. (1993). Uncertainty and reliability analysis. In: Water Resources Handbook. Mays, L. W. McGraw-Hill. New York.
- Tung, Y. K. and Yen, B. C. (2005) Hydrosystem engineering uncertainty analysis, McGraw-Hill. New York.
- USACE. (1996). Risk-based analysis for flood damage reduction studies. Manual No. 1110-2-1619, 63 p.
- USACE. (2006) Depth- damage relationship for structures, contents, vehicles, and content- to-structure value ratios (CSV) in support of the Donaldsonville to the Gulf, Louisiana, feasibility study. Report No. 22316638.
- Van der Sande, C. (2001). River flood damage assessment using IKONOS imagery. E.C. Joint Research Centre & S.A.I., Ispra, Italy, 77 p.