



Identification of flood atmospheric patterns and simulation of rainfall to runoff conversion in Shiraz Watershed

Received: 2021.09.09

Accepted: 2022.02.09

Hamid Jorkesh,¹ Mohammad Javad Amiri^{2*}, Ahmad Nohegar²

¹ Department of Environmental planning, Kish Campus, University of Tehran, Kish, Iran

² Department of planning, Management and Environmental Education, Faculty of Environment, Tehran, Iran

ABSTRACT

Introduction: Flood is caused by a sudden increase in the water level of a river due to heavy rainfall, in which excess water flows out of the basin and the riverbed and enters adjacent areas, causing extensive damage to the region's ecosystems and infrastructure. In order to determine and implement a strategic plan in the direction of crisis management, understanding the mechanism and development of the flood phenomenon and the amount of subsequent runoff is a priority. In recent years, flood events have occurred in the catchment area of the dry river of Shiraz; The most terrible flood event occurred on the 25th and 26th of March 2019 in the basin and caused severe economic, social and human damage to the people of the city. By recognizing the mechanisms and developing atmospheric patterns of flood generation, the first step can be taken in flood control; Also, by predicting the amount of runoff produced, how to deal with it can be identified. For this reason, in order to manage the environment of the dry river basin of Shiraz, the present study tries to approach flood management based on recognizing flood generating patterns and simulating the amount of runoff produced.

Material and methods: In order to study rainfall in the dry river of Shiraz, the daily rainfall was obtained from 12 rain gauge stations in the area in the period 2001 to 2019. The rainfalls were then sorted on an annual and monthly scale, and the rainfall was zoned using the Kriging algorithm in ArcGIS. Also, rainfalls of more than 40 mm were extracted from 12 rain gauge stations and were considered as flood events. For each rainfall station, the number of flood events was determined and flood events were zoned by the kriging algorithm in ArcGIS. Next, three events of flood on 16 February 2017, 26 March 2019 and 23 January 2020, when the average rainfall in the Shiraz watershed was 100 mm every three days, were selected and interacted with a synoptic approach. Atmospheric conditions and flood patterns were identified. Next, using the HEC-HMS hydrological model, the amount of rainfall to runoff conversion in each of the sub-basins in the Shiraz watershed was simulated.

Results and discussion: The results showed that the maximum precipitation occurs in February and the minimum in July. The maximum annual rainfall is 627 mm in the mountainous areas of Qalat and Golestan and the minimum is 245 mm in Maharloo Lake. Synoptic results showed that the low altitude and cold-water trough at the level of 500 hPa in the eastern Mediterranean along with the dynamic low-pressure system in Iran caused surface air instability in Fars Province and by injecting moisture from the Persian Gulf to the massif. The weather has caused floods in Shiraz. The results of rainfall-runoff modeling showed that the highest runoff in Sadra and Qalat sub-basins were 5773 and 5076 thousand m³, respectively, and the maximum peak discharge in Sadra and Qalat was 666 and 389 m³/sec, respectively. It happened at 17:00. The highest volume of rainfall penetration in Qalat and Chenar Rahdar was 5423 and 2546 thousand m³, respectively, and the lowest level of penetration in the Quran Gate was 247 thousand m³, the main reason being the high density of residential-commercial use in this sub-basin.

Conclusion: Therefore, it is suggested that in order to manage the flood crisis in Shiraz, controlling runoff produced in northern sub-basins such as Qalat, Golestan and Sadra and increasing the level of permeability can be effective in controlling floods.

Keywords: Cold Storage, Flood, HEC-HMS, Run off, Shiraz

How to cite this article:
Jorkesh, H., Amiri, M.J. and Nohegar, A., 2023. Identification of flood atmospheric patterns and simulation of rainfall to runoff conversion in Shiraz Watershed. *Environ. Sci.* 21(4): 1-22.

* Corresponding Author Email Address: mjamiri@ut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2022.1101



شناسایی الگوهای جوی مولد سیلاب و شبیه‌سازی تبدیل بارش به رواناب در محدوده مطالعاتی شیراز

حمید جورکش^۱، محمدجواد امیری^{۲*}، احمد نوحه‌گر^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۲۰

^۱ گروه برنامه‌ریزی محیط زیست، پردیس کیش، دانشگاه تهران، کیش، ایران

^۲ گروه برنامه‌ریزی، مدیریت و آموزش محیط زیست، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، ایران

چکیده

سابقه و هدف: سیلاب ناشی از افزایش ناگهانی ارتفاع آب رودخانه به دلیل وقوع بارندگی شدید است. آب اضافه از دبی پایه و بستر رودخانه خارج شده و وارد محیط مجاور می‌شود که باعث می‌شود خسارت‌های هنگفتی به اکوسیستم‌ها و زیرساخت‌های منطقه در دشت‌های سیلابی وارد شود. به‌منظور تدوین برنامه‌ی راهبردی در مسیر مدیریت بحران، شناخت سازوکار و تکوین پدیده‌ی سیلاب و میزان رواناب ایجادشده ناشی از آن در اولویت قرار دارد. طی سال‌های اخیر، سیلاب‌های فراوانی در حوضه آبریز رودخانه خشک شیراز اتفاق افتاده است. مهیب‌ترین سیلاب منطقه در روزهای ۵ و ۶ فروردین‌ماه ۱۳۹۸ در حوضه رخ داد و خسارت‌های اقتصادی-اجتماعی و جانی شدیدی بر منطقه و مردم شهر وارد ساخت. با شناخت سازوکارها و تکوین الگوهای اتمسفری مولد سیلاب، می‌توان اولین گام را در مهار سیلاب برداشت و همچنین با پیش‌بینی میزان رواناب تولید شده، نحوه‌ی مقابله با آن را تشخیص داد. به‌همین دلیل پژوهش حاضر در راستای مدیریت محیط‌زیستی حوضه‌ی آبخیز رودخانه خشک شیراز، سعی در رهیافت مدیریت سیلاب بر مبنای شناخت الگوهای مولد سیلاب و شبیه‌سازی میزان رواناب تولید شده را دارد.

مواد و روش‌ها: به‌منظور بررسی ویژگی‌های بارش در محدوده‌ی مطالعاتی رودخانه خشک شیراز، میزان بارش روزانه از ۱۲ ایستگاه باران‌سنجی در محدوده طی بازه‌ی زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ به‌دست آمد. سپس بارش‌ها در مقیاس سالانه و ماهانه مرتب شد و در محیط پردازشی ArcGIS، پهنه‌بندی بارش با الگوریتم کریجینگ انجام شد. همچنین بارش‌های بیش از ۴۰ میلی‌متر از ۱۲ ایستگاه باران‌سنجی استخراج گردید و به‌عنوان روزهای سیلابی در نظر گرفته شد. برای هر ایستگاه باران‌سنجی، تعداد روزهای سیلابی تعیین شده و در محیط ArcGIS، پهنه‌بندی روزهای سیلابی با الگوریتم کریجینگ انجام شد. سپس، سه وقوع سیلاب در روزهای ۱۶ فوریه ۲۰۱۷، ۲۶ مارس ۲۰۱۹ و ۲۳ ژانویه ۲۰۲۰ که در هر سه روز، میانگین بارش در محدوده‌ی مطالعاتی شیراز، ۱۰۰ میلی‌متر بود، انتخاب شده و با رویکرد سینوپتیکی، اندرکنش‌های جوی و الگوهای مولد سیلاب شناسایی گردید. سپس با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS میزان تبدیل بارش به رواناب در هر یک از زیرحوضه‌های موجود در محدوده مطالعاتی شیراز شبیه‌سازی شد.

نتایج و بحث: نتایج نشان داد که بیشینه‌ی بارش در فوریه و کمینه‌ی آن در جولای رخ می‌دهد. بیشینه‌ی بارش سالانه در مناطق کوهستانی قلات و گلستان با ۶۲۷ میلی‌متر و کمینه‌ی آن در مهارلو به میزان ۲۴۵ میلی‌متر است. نتایج سینوپتیکی نشان داد که استقرار ناوه‌ی کم‌ارتفاع و سردچال جوی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در شرق مدیترانه به همراه استقرار سیستم کم‌فشار دینامیکی ایران موجب ناپایداری هوای سطحی در استان فارس شده و با تزریق رطوبت از خلیج فارس به توده‌ی هوا، موجب وقوع بارش‌های سیلابی در شیراز شده است. نتایج مدل‌سازی بارش-رواناب نشان داد که بیشترین میزان رواناب در زیرحوضه‌های صدرا و قلات به ترتیب ۵۷۷۳ و ۵۰۷۶ هزارمترمکعب بود و بیشینه‌ی دبی پیک نیز در صدرا و قلات به ترتیب ۶۶۶ و ۳۸۹ مترمکعب در ثانیه بود که طی ساعت ۱۷:۰۰ اتفاق افتاد. بیشترین حجم نفوذ بارش در قلات و چنار راهدار به ترتیب ۵۴۲۳ و ۲۵۴۶ هزارمترمکعب بود و کمترین میزان نفوذ در دروازه قران با ۲۴۷ هزارمترمکعب بود که دلیل اصلی آن تراکم بالای کاربری مسکونی-تجاری در این زیرحوضه است.

نتیجه‌گیری: پیشنهاد می‌گردد که به‌منظور مدیریت بحران سیلاب در شیراز، مدیریت رواناب‌های تولیدشده در زیرحوضه‌های شمالی همچون قلات، گلستان و صدرا و استفاده از الگوهای مناسب مدیریت رواناب مانند زیرساخت‌های سبز و آبی می‌تواند در مهار سیلاب کارساز باشد.

واژه‌های کلیدی: سردچال، سیلاب، HEC-HMS، رواناب، شیراز

استناد به این مقاله: جورکش، ح.، امیری و ا. نوحه‌گر. ۱۴۰۲.

شناسایی الگوهای جوی مولد سیلاب و شبیه‌سازی تبدیل بارش به رواناب در محدوده مطالعاتی شیراز. فصلنامه علوم محیطی. ۲۲-۱: (۴) ۲۱.

* Corresponding Author Email Address: mjamiri@ut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2022.1101



مقدمه

سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۷ میلادی، حدود ۶۷ هزار و ۵۷۲ نفر در جهان براساس مخاطرات طبیعی فوت کرده‌اند که از این تعداد سیلاب با مرگ ۵ هزار و ۳۲ نفر پس از زلزله، امواج گرمایی و طوفان در رتبه‌ی چهارم قرار دارد (Kang *et al.*, 2020)؛ از لحاظ اقتصادی نیز سیلاب با خسارت بالغ بر ۳۶/۳ میلیارد دلار پس از زلزله و طوفان در رتبه‌ی سوم قرار دارد (پایگاه داده‌ی بین‌المللی مخاطرات، ۲۰۱۹). سیلاب یکی از مخاطرات هیدرولوژیکی است که در زیرگروه مخاطرات طبیعی قرار دارد که در جریان‌های رودخانه‌ای و آبراه‌های در مناطق پست ساحلی و جلگه‌ای به‌وفور مشاهده می‌شود (Qiu *et al.*, 2017). سیلاب در واقع ناشی از نیروی جریان آبی است که از الگوهای اتمسفری و سامانه‌های بارشی نشأت می‌گیرد؛ به‌گونه‌ای که با وقوع بارش‌های رگباری و سنگین، حجم بالایی از آب وارد محیط طبیعی می‌شود. جریان آب از سرشاخه‌های فرعی و اصلی به رودخانه‌ی اصلی در حوضه‌ی آبخیز انتقال یافته و موجب بالآمدن جریان پایه‌ی رودخانه شده و با خروج آب از مسیل اصلی، دشت و مناطق اطراف به زیر آب رفته و باعث سیل‌گرفتگی اراضی سکونتگاهی، کشاورزی و طبیعی منطقه می‌شود (Armon *et al.*, 2018). در نقاط شهری و مراکز سکونتگاهی علاوه بر رودخانه، جمع‌شدن حجم بالای رواناب‌های سطحی در شهر نیز موجب وقوع سیلاب شهری می‌شود که خسارت‌های اقتصادی-اجتماعی و جانی آن قابل تأمل است (O'Donnell and Thorne, 2020). سیلاب-ها براساس نحوه‌ی تکوین یکسان هستند و بارش‌های رگباری و سنگین دلیل اصلی سیلاب محسوب می‌شود، اما از لحاظ موقعیت محیطی و ارتباط آن‌ها با مکان و فضای جغرافیایی، به انواع مختلفی تقسیم می‌گردد که می‌توان به سیلاب رودخانه‌ای، سیلاب ساحلی، سیلاب شهری و سیلاب ناگهانی اشاره نمود که ناگهانی بودن آن نتیجه‌ی آزادشدن حجم زیادی از آب در پشت سد و سازه‌های بتنی و خاکی آن، رانش زمین و جاری شدن آب از کوهستان

امروزه افزایش و تقاضا برای سکونت، گسترش تأسیسات صنعتی-تجاری و کمبود فضا برای ساخت‌وساز سکونتگاهی موجب تغییر در مورفولوژی حوضه‌های آبخیز شده است (Tang *et al.*, 2005). همچنین تسطیح اراضی برای کاربری‌های انسانی، تجاوز به حریم رودخانه‌ها و مسیل‌های آبرو برای استفاده‌ی اقتصادی از اراضی مجاور آن و تأمین آب از رودخانه، تغییر کاربری‌های طبیعی به چشم‌اندازهای انسانی منجر به تغییر در الگوی زهکشی طبیعی، اختلال در رفتار هیدرولیکی جریان‌های آبی و درنهایت جاری شدن سیلاب شده است (Schilling *et al.*, 2014). پی‌آمد این تغییرات، افزایش خطر سیل‌خیزی، آب‌گرفتگی مناطق مسکونی، زیرآب رفتن اراضی کشاورزی و افزایش هزینه‌های نگهداری است که خسارت‌های مالی و جانی بر پیکره‌ی محیط‌زیست وارد می‌سازد. مهم‌ترین مولفه‌ی افزایش مخاطره‌ی سیلاب، گسترش کاربری‌های سکونتگاهی در حوضه‌های آبخیز است که سبب برهم‌خوردن تعادل مورفولوژیکی محیط و افزایش سطوح نفوذناپذیری می‌شود. استفاده از مصالح بتنی، آسفالت و ایزوگام دلیل اصلی آن است و این مولفه‌ی انسان‌ساخت باعث افزایش حجم رواناب و سیلاب، کاهش زمان تمرکز، افزایش دبی حداکثر لحظه‌ای و تغییر کیفیت سیلاب می‌گردد (Garner *et al.*, 2019). این موارد موجب افزایش فراوانی وقوع سیلاب در حوضه‌های آبریز شده است و سیلاب را به یکی از مخاطرات محیطی خسارت‌زا تبدیل نموده است. پایگاه داده‌ی بین‌المللی مخاطرات، سیلاب را مولفه‌ای از مخاطرات هیدرولوژیکی شناسایی نموده و حدود ۴۹ درصد از مخاطرات طبیعی را به‌خود اختصاص داده است. براساس گزارش EM-DAT در سال ۲۰۱۹، حدود ۳۹۶ مخاطره در جهان اتفاق افتاد که ۱۳۰ میلیارد دلار خسارت اقتصادی در بر داشته و موجب مرگ ۱۱ هزار و ۷۵۵ نفر در جهان شده است که از این تعداد ۱۹۴ مخاطره و ۴۳ درصد از مرگ‌ومیرها مربوط به سیلاب بوده است. آمار رسمی جهانی نشان می‌دهد که از

قاره‌ی آمریکای جنوبی، بارش‌های سنگین اغلب ناشی از سیستم کم‌فشاری است که ۳ روز قبل در اقیانوس آرام تشکیل شده و از کشور پرو و آرژانتین به سمت شمال حرکت کرده و یک رودباد در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال بر فراز کشور پرو تشکیل شده است و موجب ناپایداری اتمسفر سطح زمین می‌شود. سیستم کم‌فشار سطحی رطوبت خود را از اقیانوس آرام دریافت کرده و در جنوب کشور برزیل موجب وقوع سیلاب می‌شود (Teixeira and Satyamurty, 2007; Seluchi and Chou, 2009). تعدادی از پژوهشگران در هند به این نتیجه رسیده‌اند که طی ماه‌های گرم سال، سیستم کم‌فشار دینامیکی در اقیانوس هند و دریای عمان تشکیل می‌شود و این سیستم کم‌فشار به سمت شبه‌جزیره هندوستان حرکت می‌کند. در برخورد با ناهمواری‌های سطحی در خشکی و همچنین به دلیل ماهیت ناپایدار این سیستم، بارش‌های سیلابی در هندوستان اتفاق می‌افتد (Kumar et al., 2008; Ajayamohan et al., 2010; Yin, 2002; Singh et al., 1978; Jadhav, 1949). در جنوب چین، سیستم‌های کم‌فشار دینامیکی در سطح زمین دلیل عمده‌ی بارش‌های سیلابی در منطقه است که باعث ریزش باران شدید و طغیان رودخانه‌ها به صورت سیلاب می‌شود (Wu et al., 2010). بارش‌های سیلابی در کشور ژاپن بررسی شده است و در سیلاب جولای ۲۰۱۸ سیکلون اقیانوس آرام از سمت شمال‌غربی وارد جزیره‌ی ژاپن شده و در برخورد با ناهمواری‌های جزیره، موجب وقوع سیلاب در نیمه‌ی شمالی جزیره‌ی ژاپن شده است (Ai and Qian, 2020). در جنوب شرقی ایالات متحده در ساحل اقیانوس اطلس، ناوه‌ی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال موجب ناپایداری سطوح زیرین اتمسفر ساحلی می‌شود. در سطح زمین نیز سیستم کم‌فشار دینامیکی در ساحل مستقر شده و موجب همگرایی توده‌ی هوا و صعود همرفتی آن شده که موجب وقوع بارش رگباری و سیلاب در ساحل می‌شود (Xu, 2020). رودباد جنب‌حاره در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال به همراه ناوه‌ی قطبی دلیل اصلی رژیم بارندگی سیلابی در خاورمیانه

می‌باشد (Wang et al., 2018). سیلاب‌های رودخانه‌ای نیز اغلب از تجمع رواناب حاصل از سرشاخه‌های فرعی و اصلی در حوضه‌های آبخیز نشأت می‌گیرد که رواناب سرشاخه‌ها از طریق مسیل‌ها و آبراهه‌های فرعی به رودخانه‌ی اصلی متصل شده و در زمان وقوع بارش‌های رگباری و سنگین موجب بالا آمدن آب رودخانه و سرریز شدن آب از بستر و دیواره‌های رودخانه به سمت دشت و مناطق مجاور می‌شود (Mel et al., 2020). شناخت شرایط جوی و رفتار سنجه‌های اتمسفری در وقوع سیلاب، در اولویت برنامه‌ریزی‌های مدیریت بحران‌های هیدرولوژیکی قرار دارد که با آشکارسازی آن می‌توان راهکارهای تدوین شده را ارائه نمود (Tymvios et al., 2010). در جنوب شرقی ایران بارش‌های سنگین طی ماه‌های گرم سال ناشی از کم‌فشارهای گنگ-پاکستان است که از سمت شرق و جنوب شرق وارد ایران می‌شوند (Alijani et al., 2010). سیلاب‌های رخ داده در نیمه‌ی غربی و شمال‌غربی ایران عمدتاً از سیکلون‌های مدیترانه‌ای ناشی می‌شود که از ۳ مسیر شمالی، غربی و جنوبی طی ماه‌های سرد سال وارد ایران می‌شود و موجب وقوع بارش‌های سنگین در کرمانشاه، سنندج، ارومیه، تبریز، زنجان، قزوین، همدان و حتی تهران می‌شود (Rezaee Banafshe et al., 2015). در مناطق جنوبی، غربی و جنوب غربی ایران سیکلون‌های سودانی طی فصول سرد سال که از دریای سرخ رطوبت کسب کرده و طی مسیر در کشورهای عربی در جنوب دریای خلیج فارس، رطوبت خود را به صورت بارش تخلیه کرده و تضعیف می‌شوند، اما به محض رسیدن به مخزن رطوبتی خلیج فارس، رطوبت و انرژی ترمودینامیکی کافی کسب نموده و مجدداً سیکلون فعال شده و با رسیدن به خشکی‌های ایران و در برخورد با دامنه‌ی غربی کوهستان زاگرس موجب وقوع بارش‌های سیلابی در جلگه‌ی خوزستان، ایلام، لرستان، یاسوج، شیراز، بندرعباس و بوشهر می‌شود (Ghasemifar et al., 2017; Nazemosadat and Shahgholian, 2014; MahmudAbadi et al., 2016). در جنوب کشور برزیل در

بارش، افزایش ارتفاع و ضریب رواناب، افزایش دبی حداکثر و افزایش دبی متوسط شده است که در نهایت منجر به افزایش احتمال رخداد سیلاب در منطقه شده است. Hosseini *et al.* (2015) برای پیش‌بینی سیلاب‌های تاریخی رودخانه کشکان از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS استفاده نموده و نتایج آن‌ها نشان داد که این مدل دارای کارایی بالایی در شبیه‌سازی رواناب روزانه طی دوره‌ی ترسالی و همچنین در حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به‌ازای دوره بازگشت‌های کمتر از ۳۰۰ سال را دارد. لذا به‌خوبی می‌توان از این مدل هیدرولوژیکی در شبیه‌سازی رواناب روزانه و حداکثر دبی لحظه‌ای سیلاب به‌ازای دوره بازگشت‌های کوچک در حوضه مورد مطالعه استفاده نمود. (Rahimzadeh and Habibi (2018) نیز برای شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب و پیش‌بینی دوره‌ی بازگشت آن در حوضه روانسر کرمانشاه از این مدل استفاده کرده و نتایج مطلوبی حاصل شد. Jahanbakhsh *et al.* (2018) بارش- رواناب پیوسته حوضه شهرچای ارومیه را با استفاده از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS شبیه‌سازی نمودند.

طی سال‌های اخیر، سیلاب‌های فراوانی در حوضه آبریز رودخانه خشک شیراز اتفاق افتاده است؛ به‌گونه‌ای مهیب‌ترین سیلاب منطقه در روزهای ۵ و ۶ فروردین‌ماه ۱۳۹۸ در حوضه رخ داد و خسارت‌های اقتصادی- اجتماعی و جانی شدیدی بر منطقه و مردم شهر وارد ساخت. طی ۲۴ ساعت حدود ۱۵۰ میلی‌متر بارش در بخش شمال‌غربی شهر شیراز و ۷۵ میلی‌متر در جنوب‌شرقی شیراز به‌وقوع پیوست و طی ۲۰ دقیقه سیلاب عظیمی از سمت دروازه قرآن وارد شهر شیراز شد و اثرات تخریبی در مسیر خود و نهاد. با شناخت سازوکارها و تکوین الگوهای اتمسفری مولد سیلاب، می‌توان اولین گام را در مهار سیلاب برداشت و همچنین با پیش‌بینی میزان رواناب تولید شده، نحوه‌ی مقابله با آن را تشخیص داد. به‌همین دلیل پژوهش حاضر در راستای مدیریت محیط- زیستی حوضه‌ی آبخیز رودخانه خشک شیراز، سعی در

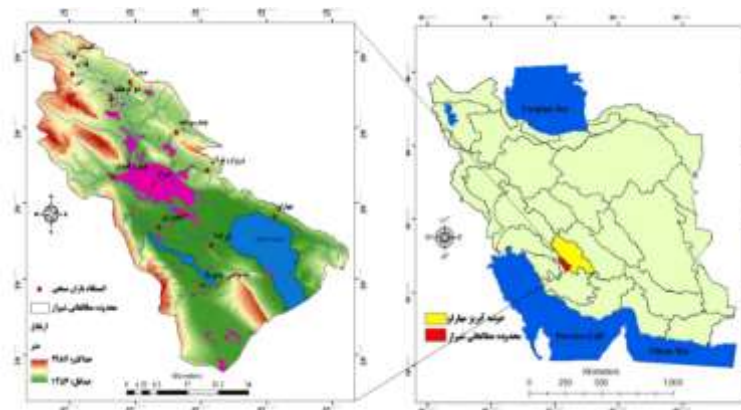
است. این ناوه موجب ناپایداری اتمسفر سطوح زیرین شده و باعث تشکیل سیکلون‌های مدیترانه‌ای در سطح زمین می‌شود (Dezfuli, 2020; Almazroui and Awad, 2016; Al-Nassar *et al.*, 2020; Al-Shouhani, 2020). این سیکلون‌ها با دریافت رطوبت از مدیترانه فعال شده و در امواج بادهای غربی به سمت شرق حرکت می‌کند. یک مسیر از شمال به سمت لبنان، سوریه، شمال شرقی عراق، ترکیه و نقاطی از شمال‌غربی ایران جریان یافته و موجب ریزش باران‌های سنگین می‌شود (Panegrossi *et al.*, 2020; Shestakova and Toropov, 2020; Rousta *et al.*, 2020). در مسیر دوم، این کم‌فشارها از عرض‌های پایین جغرافیایی به سمت عربستان جریان می‌یابد و عبور این توده‌ی هوای ناپایدار از روی خلیج فارس، رطوبت کافی کسب کرده و موجب وقوع بارش‌های سیل‌آسا در جنوب‌غربی و جنوب ایران می‌شود (Azizi *et al.*, 2009; Nazemosadat and Shahgholian, 2017). سیلاب مانند سایر پدیده‌های هیدرولوژیکی، پدیده‌ای تصادفی است و در هر زمان و هر مکانی احتمال رویداد آن وجود دارد و معمولاً به همین دلیل تعیین زمان دقیق وقوع آن امکان‌پذیر نیست؛ ولی پیش‌بینی بروز آن با توجه به وقایع هیدرولوژیکی مشاهده شده در گذشته، دور از دسترس نیست. مدل HEC-HMS یکی از مدل‌های هیدرولوژیکی است که کارایی بسیار بالایی در پروژه‌های هشدار سیل در جهان را به‌خود اختصاص داده است. مدل HEC-HMS یکی از مدل‌های رایانه‌ای برای شبیه‌سازی تبدیل بارش به رواناب و وقایع کوتاه‌مدت در سطح حوضه آبریز است. Rostamzad *et al.* (2013) برای برآورد تلفات بارش و شبیه‌سازی رواناب سطحی در حوضه آبخیز کن در استان تهران از مدل HEC-HMS استفاده کردند. (Derafshi *et al.* (2016). اثر تغییرات کاربری اراضی طی سال‌های ۱۹۸۸ و ۲۰۰۹ را بر رواناب سطحی حوضه آبخیز بابلرود بررسی نموده و نتایج مدل HEC-HMS نشان داد که کاهش کاربری کشاورزی- جنگلی و افزایش کاربری شهری موجب کاهش تلفات

رودخانه از ارتفاعات قلات، گلستان و باجگاه سرچشمه گرفته و در جهت شمال غربی- جنوب شرقی جریان می‌یابد و پس از طی مسافتی کوتاه، شاخه‌ی نهرا عظم از سمت چپ و تنگ مارون از سمت راست به آن می‌پیوندند و پس از ورود رواناب‌های حوضه شهری شیراز مانند باباکوهی، تنگ قرآن، سعدی، کفترک، کوی آزادگان و همچنین مازاد چشمه‌های برم‌دلک در نهایت به دریاچه‌ی مهارلو می‌ریزد. میانگین بارندگی سالیانه در ایستگاه قلات ۶۱۷/۴ میلی‌متر، در ایستگاه گلستان ۵۴۴/۲ میلی‌متر و در ایستگاه شیراز ۳۸۲/۷ میلی‌متر است. بررسی بارندگی بیان‌گر این است که هر چه از سمت بالادست و غرب حوضه به سمت خروجی حوضه و شرق حرکت کنیم، از میزان بارندگی کاسته شده و در نتیجه شاهد اقلیم خشک‌تری خواهیم بود.

رهیافت مدیریت سیلاب بر مبنای شناخت الگوهای مولد سیلاب و شبیه‌سازی میزان رواناب تولید شده دارد.

مواد و روش‌ها

حوضه آبخیز رودخانه خشک شیراز (محدوده مطالعاتی شیراز)، یکی از زیرحوضه‌های وسیع حوضه آبریز دریاچه-های طشک، بختگان و مهارلو به‌شمار می‌رود که با وسعت ۱۴۵۲/۲ کیلومترمربع در جنوب غربی این حوضه آبریز اصلی قرار گرفته است (شکل ۱). کلان‌شهر شیراز بزرگ‌ترین مرکز سکونتگاهی این محدوده‌ی مطالعاتی محسوب می‌شود که شهرک‌های اقماری، مسکونی، صنعتی و روستایی در اطراف آن گسترده شده‌اند. رودخانه خشک شیراز، آبراهه‌ی اصلی این حوضه است که یک رودخانه‌ی فصلی می‌باشد. این



شکل ۱- موقعیت توپوگرافیکی محدوده مطالعاتی شیراز
Fig. 1- Topographic location of study area in Shiraz

ArcGIS، پهنه‌بندی روزهای سیلابی با الگوریتم کریجینگ انجام شد.

برای شناخت علت وقوع سیلاب و استخراج الگوهای جوی مولد سیلاب در محدوده مطالعاتی شیراز، سیلاب‌های به-وقوع پیوسته‌ی استخراج شد و برای این پژوهش، تعداد وقوع ۳ سیلاب در روزهای ۱۶ فوریه ۲۰۱۷، ۲۶ مارس ۲۰۱۹ و ۲۳ ژانویه ۲۰۲۰ که در هر سه روز، میانگین بارش در محدوده‌ی مطالعاتی شیراز، ۱۰۰ میلی‌متر بود، انتخاب گردید. سپس فراسنج‌های جوی شامل ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، فشار سطح زمین و اُمگای تراز ۵۰۰

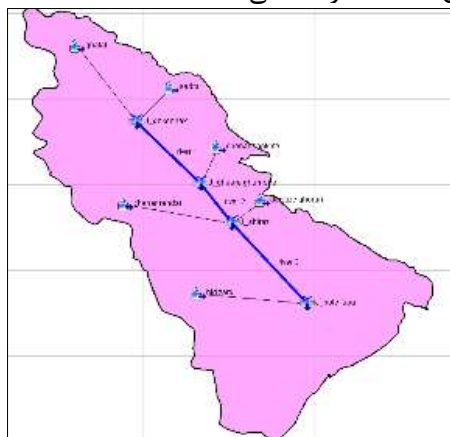
الگوهای مولد سیلاب

به‌منظور بررسی ویژگی‌های بارش در محدوده‌ی مطالعاتی رودخانه خشک شیراز، میزان بارش روزانه از ۱۲ ایستگاه باران‌سنجی در محدوده در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ به‌دست آمد. سپس بارش‌ها در مقیاس سالانه و ماهانه مرتب شد و در محیط پردازشی ArcGIS، پهنه‌بندی بارش با الگوریتم کریجینگ انجام شد. همچنین بارش‌های بیش از ۴۰ میلی‌متر از ۱۲ ایستگاه باران‌سنجی استخراج گردید و به‌عنوان روزهای سیلابی در نظر گرفته شد. برای هر ایستگاه باران‌سنجی، تعداد روزهای سیلابی تعیین شده و در محیط

مشخص گردید. سپس برحسب لزوم برای بعضی مناطق با بازدید میدانی، نوع کاربری محدوده‌های مشخص شده کنترل شد. در نهایت نقشه‌ی کاربری اصلاح شده برای حوضه‌های مطالعاتی تهیه و نقشه‌ی آن به صورت رستری در محیط ArcGIS ترسیم گردید. در مرحله‌ی بعد، لایه اطلاعات کاربری اراضی با لایه اطلاعاتی گروه هیدرولوژیکی خاک حوضه که با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی حاصل شده، همپوشانی داده شد و مقدار شماره منحنی (CN) برای هر نوع کاربری سپس در گروه‌های هیدرولوژیکی مختلف و با شرایط رطوبت پیشین متوسط خاک، با استفاده از جداول مرتبط به تفکیک محاسبه گردید. ساختار مدل HEC-HMS شامل ۳ بخش اصلی می‌باشد که عبارتند از: (۱) مدل حوضه، (۲) مدل هواشناسی، (۳) شاخص کنترلی زمان. داده‌های مورد نیاز مدل به شرح زیر ارائه شده است.

مدل حوضه

در این بخش، حوضه به‌طور شماتیک به مدل معرفی گردیده که شامل زیرحوضه‌ها، اتصال آن‌ها به یکدیگر و بازه‌ها می‌باشند (شکل ۲). سپس باید روش مناسبی برای تعیین تلفات اولیه رواناب، آب پایه و ردیابی سیل در آبراهه (یا رودخانه) انتخاب شود و اطلاعات فیزیکی حوضه وارد گردد. در این مدل روش‌های متعددی برای برآورد تلفات وجود دارد. در این پژوهش از روش تلفات شماره منحنی SCS-CN استفاده شد.



شکل ۲- طرح شماتیک محدوده مطالعاتی شیراز در نرم‌افزار HEC-HM
Fig. 2- Schematic design of the study area in Shiraz in HEC-HMS software

هکتوپاسکال برای هر یک از روزهای سیلابی از تارنمای مرکز داده‌های NCEP/ NCAR وابسته به سازمان ملی جو و اقیانوس‌شناسی ایالت متحده استخراج شد و در محیط برنامه‌نویسی و گرافیکی GRADS، نقشه‌ی هر یک از فراسنج‌های جوی برای روزهای سیلابی ترسیم گردید.

مدل HEC-HMS

در بخش دوم پژوهش، به‌منظور مدل‌سازی و تخمین میزان تبدیل بارش موثر به رواناب سطحی در آبراهه‌ها و رودخانه‌های محدوده مطالعاتی شیراز در روزهای سیلابی که در هر سه روز، میزان بارش میانگین حوضه ۱۰۰ میلی‌متر بود، ابتدا کلیه‌ی مطالعات لازم جهت برآورد رواناب و همچنین شبیه‌سازی هیدروگراف سیلاب انجام شد. در انجام این مهم، از داده‌های ثبت شده‌ی ایستگاه‌های هیدرومتری منطقه و آمار ایستگاه باران‌سنجی استفاده گردید. در مرحله بعد، نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه مورد مطالعه تهیه و سپس با استفاده از برنامه الحاقی Arc Hydro حوضه به زیرحوضه‌هایی تفکیک شد و با استفاده از الحاقیه HEC-geo HMS مدل حوضه تهیه گردید. در این پژوهش جهت مدل‌سازی هیدرولوژیکی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، پارامترها و داده‌های ورودی و اولیه مدل برآورد شد.

شماره منحنی زیرحوضه‌ها (CN)

برای به‌دست آوردن CN که به خصوصیات نفوذپذیری خاک حوضه مربوط می‌شود، ابتدا گروه هیدرولوژیکی خاک مشخص شد و سپس با بررسی وضعیت کاربری در سطح حوضه براساس جداول استاندارد که در منابع معتبر موجود است، مقدار این پارامتر تخمین زده شد. نقشه‌ی هیدرولوژیکی خاک از سازمان جنگل‌ها و مراتع تهیه و براساس ویژگی هیدرولوژیکی خاک منطقه، نوع گروه خاک استخراج شد. پارامتر دخیل دیگر در به‌دست آوردن CN، وضعیت کاربری اراضی و پوشش گیاهی است. برای نقشه کاربری اراضی زیرحوضه‌ها، ابتدا با استفاده از نقشه‌های موجود کاربری اراضی و بهره‌گیری از نرم‌افزار Google Earth محدوده اولیه کاربری‌های موجود در حوضه

نسبت بین زمان‌های آن‌ها (T)، به زمان رسیدن به آبدهی اوج (tp) نشان می‌دهد. ارتباط بین آبدهی اوج و زمان رسیدن به این آبدهی در رابطه ۴ و ۵ تعیین شده است (James et al., 1987):

$$UP = 2.08 \frac{A}{Tp} \quad (4)$$

$$TP = \frac{\Delta t}{2} + T_{lag} \quad (5)$$

در معادله فوق A برابر با مساحت و Δt تداوم بارندگی مازاد و T_{lag} زمان تأخیر حوضه است. برای محاسبه زمان تأخیر (T_{lag}) از روش SCS استفاده شد:

$$T_{lag} = \frac{L^{0.8}(S+1)^{0.7}}{1900Y^{0.5}} \quad (6)$$

در این رابطه، T_{lag} زمان تأخیر حوضه بر حسب ساعت، L طول رودخانه اصلی بر حسب فوت، Y متوسط شیب حوضه (درصد) و S نمایه نگهداشت آب در داخل حوضه بر حسب اینچ است که با رابطه ۷ به دست می‌آید (Alizadeh, 2016).

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (7)$$

که در آن، CN نمایه خصوصیات حوضه از نظر نفوذپذیری است (جدول ۱).

به منظور محاسبه تلفات رواناب حوضه، از روش شبکه‌ای SCS یا روش عدد منحنی (Curve Number) استفاده شد

که روابط آن به صورت زیر می‌باشد (Boughton, 1989):

$$P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad (1)$$

که در آن P_e : ارتفاع بارش موثر (رواناب) به میلی‌متر، P: ارتفاع بارندگی به میلی‌متر، I_a : تلفات اولیه به میلی‌متر که از رابطه ۲ این پارامتر قابل محاسبه است:

$$I_a = as \quad (2)$$

که در آن، a ضریبی است که مقدار آن ۰/۲ می‌باشد. S نیز حداکثر پتانسیل ذخیره حوضه به میلی‌متر است که از رابطه ۳ محاسبه می‌شود.

$$S = \frac{25400-254CN}{CN} \quad (3)$$

جهت تبدیل فرآیند بارش مازاد به جریان سطحی در حوضه از روش هیدروگراف واحد SCS استفاده شد. هیدروگراف واحد SCS، بی‌بعد و تک‌اوجی است. این هیدروگراف نسبت بین آبدهی هیدروگراف واحد در هر زمان (ut) و آبدهی هیدروگراف واحد در زمان رسیدن به اوج (up) را در برابر

جدول ۱- ویژگی زیرحوضه‌های محدوده مطالعاتی شیراز در ضریب CN

Table 1. Sub-basins of Shiraz characteristics in CN coefficient

مقدار Amount CN	نفوذناپذیری حوضه (درصد) Basin impermeability (%)	خصوصیات پوشش سطح حوضه Basin surface cover characteristics	گروه خاک Group of soil	حداقل نفوذپذیری (میلی‌متر در ساعت) Min of permeability (mm/h)	زیرحوضه (مورد مطالعه) Sub Basin (Study area)
۶۹	25	مراتع طبیعی با پوشش متوسط Natural pastures with medium coverage	B	6.4	قلات Ghalat
۹۲	55	مناطق مسکونی با ۶۵٪ آسفالت Residential areas with 65% asphalt	D	1.1	صدرا Sadra
۸۱	30	اراضی کشاورزی با ردیف متوسط Medium row cultivation	B	5.3	چنار سوخته Chenar Sookhteh
۹۲	84	مناطق مسکونی با ۶۵٪ آسفالت Residential areas with 65% asphalt	D	0.7	دروازه قران Darvazeh Quran
۷۴	70	مراتع طبیعی با پوشش خوب Natural pastures with good cover	C	2.6	چنار راهدار Chenar Rahdar
۷۹	20	اراضی کشاورزی با پوشش متوسط Medium coverage cultivation	B	6.5	بیدزرد Bidzard

$$T_c = 0.885 \left(\frac{L^3}{H}\right)^{0.385} \quad (8)$$

که در آن، T_c زمان تمرکز بر حسب ساعت، L طول بزرگترین مسیر آب حوضه (کیلومتر) و H اختلاف ارتفاع بالاترین و کمترین نقطه حوضه به متر است.

زمان تأخیر، فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارش مازاد و مرکز

زمان تمرکز یعنی مدت زمان رسیدن رواناب دورترین نقطه حوضه به نقطه خروجی که روش‌های متعددی برای محاسبه زمان تمرکز حوضه‌های آبخیز ارائه شده است که در این پژوهش از معادله کالیفرنیا در منطقه مورد مطالعه استفاده شد (Alizadeh, 2016).

استفاده می‌کند و دیگر نیازی به تعریف سری زمانی ایستگاه‌های هواشناسی نمی‌باشد.

شاخص‌های کنترلی: در این بخش، تاریخ و ساعت شروع و پایان شبیه‌سازی و فواصل زمانی موردنظر به مدل معرفی شد. کار اصلی مشخصه‌های کنترل، کنترل سرعت و دقت محاسبات می‌باشد. لازم به ذکر است که گام زمانی انتخابی در مدل باید از ۰/۲۹ زمان تأخیر حوضه کمتر باشد. شروع مدل‌سازی ساعت ۰۶:۰۰ روز ۲۶ مارس ۲۰۱۹ و خاتمه‌ی مدل‌سازی ساعت ۰۶:۰۰ روز ۲۷ مارس ۲۰۱۹ با گام زمانی ۱۰ دقیقه‌ای بود. با اجرای مدل بارش-رواناب HEC-HMS، میزان رواناب حاصل از سیلاب‌های ۱۰۰ میلی‌متری در محدوده مطالعاتی شیراز شبیه‌سازی گردید و برای هر یک از زیرحوضه‌ها، هیدروگراف ۲۴ ساعته نیز ترسیم گردید.

نتایج و بحث

نتایج بررسی بارش سالانه و ماهانه در محدوده مطالعاتی رودخانه خشک شیراز نشان می‌دهد که میزان بارش در نقاط کوهستانی واقع در شمال محدوده مطالعاتی، بیشتر از مناطق پست و دشت جنوبی شیراز است؛ به گونه‌ای که در نقاط کوهستانی گلستان و قلات بارش سالانه به ۶۲۷ میلی‌متر می‌رسد، اما اراضی نزدیک به دریاچه مهارلو میزان بارش کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر است (شکل ۳).

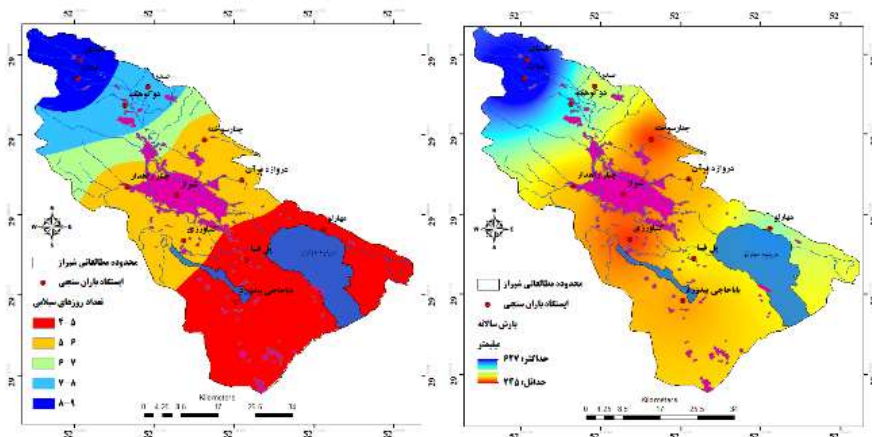
ثقل هیدروگراف می‌باشد و غالباً به جای آن، زمان تأخیر تا اوج در نظر گرفته می‌شود که فاصله زمانی بین مرکز ثقل بارش مازاد و نقطه اوج می‌باشد. سازمان حفاظت خاک آمریکا رابطه‌ی ۹ را برای محاسبه زمان تأخیر حوضه پیشنهاد داده است:

$$T_t = 0.6 T_c \quad (9)$$

که در آن، T_c زمان تمرکز برحسب ساعت و T_t زمان تأخیر برحسب ساعت است. در این پژوهش، زمان تأخیر ۳۰ دقیقه به دست آمد.

مدل هواشناسی حوضه

در این بخش داده‌های بارندگی برای شبیه‌سازی حوضه وارد شد. مدل هواشناسی که در این مطالعه استفاده شد، روش SCS Storm بود که عمدتاً برای حوضه‌های کوچک و ناپیوسته و لحظه‌ای کاربرد دارد و نتایج آن برای برآورد رواناب ناشی از سیلاب مناسب و قابل اعتماد است. این روش، یک روش مصنوعی برای ساخت توزیع بارش در یک حوضه می‌باشد که توسط مهندسين سرويس حفاظت خاک آمریکا (SCS) ابداع شده است. این روش ابتدا به منظور تهیه یک راهنما برای طراحی تأسیسات ذخیره آب مطمئن برای کارهای کشاورزی طراحی شده بود که بعدها برای کاربردهای دیگر نیز در کشور آمریکا مورد استفاده قرار گرفت. با انتخاب این روش در مدل HEC-HMS، مدل یک توزیع زمانی یکسان را برای تمامی زیرحوضه‌ها



شکل ۳- پهنه‌بندی بارش سالانه و تعداد رخدادهای سیلاب محدوده مطالعاتی شیراز در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹
Fig. 3- Zoning of annual rainfall and events of flood in the Shiraz watershed in 2001-2019

جدول ۲- میانگین بارش ماهانه در ایستگاه‌های باران‌سنجی محدوده مطالعاتی شیراز در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹

Table 2. Average monthly rainfall in the stations of Shiraz watershed in the 2001-2019

دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اوت	جولای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	
Dec	Nov	Oct	Sep	Aug	Jul	Jun	May	Apr	Mar	Feb	Jan	
۷۱	۸۰	۲	۵	۰	۰	۵	۵۲	۲۸	۴۴	۱۵۵	۷۰	گلستان Golestan
۷۶	۹۷	۳	۰	۰	۰	۰	۴۱	۷۴	۵۳	۱۴۶	۱۳۵	قلات Ghalat
۷۲	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۴۸	۳۰	۹۰	۷۲	۹۸	دوکوهک Dokoohak
۵۲	۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۰۵	۳۲	۲۲	۳۱	شیراز Shiraz
۵۱	۲۵	۰	۰	۰	۰	۰	۲۵	۷۸	۱۵	۵۹	۴۴	باباحاجی Baba Haji
۵۸	۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۶	۴۴	۲۱	۵۴	۴۸	چنار سوخته Chenar Sookhteh
۵۳	۳۰	۲	۲	۰	۰	۰	۱۵	۱۱۳	۱۸	۶۱	۳۷	پل فسا Pole Fasa
۵۶	۳۶	۱	۰	۲	۰	۰	۱۸	۸۶	۳۰	۴۴	۳۷	چنار راهدار Chenar Rahdar
۵۹	۵۹	۲	۲	۰	۰	۱	۱۵	۸۵	۲۹	۶۶	۳۹	صدرا Sadra
۵۵	۲۱	۲	۰	۰	۰	۰	۲۱	۹۸	۲۱	۵۵	۳۱	دروازه قرآن Darvazeh Quran
۶۹	۲۹	۴	۰	۰	۰	۰	۱۸	۹۱	۴۷	۷۱	۶۲	مهارلو Maharloo
۵۸	۲۴	۰	۰	۰	۰	۰	۶	۴۴	۲۱	۵۴	۴۷	کشاوری Keshavarzi

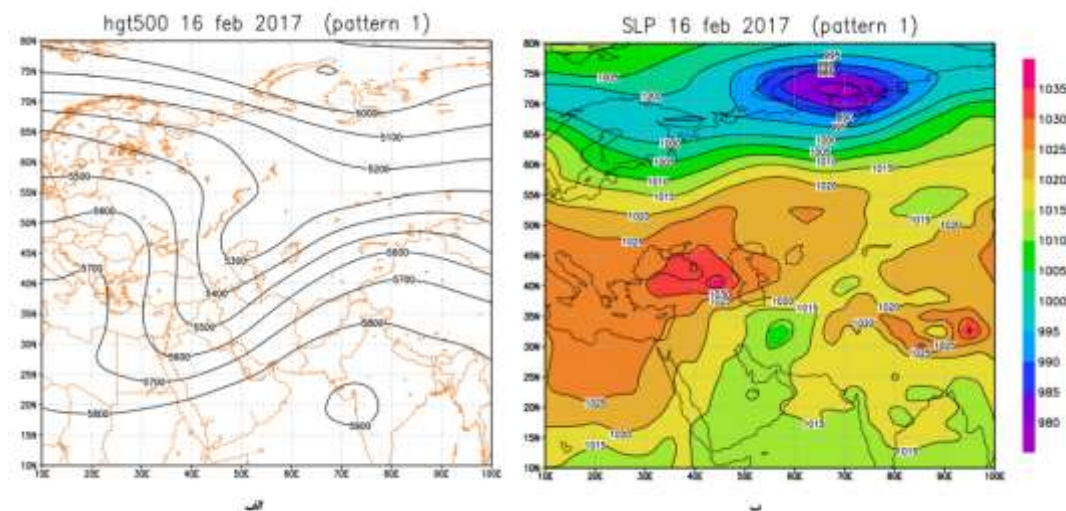
که موجب ایجاد پایداری هوا و سکون هوای سطح زمین در سوریه، ترکیه، عربستان، فلسطین و عراق شده است؛ اما پس از گردش سیکلونی هوا در محور ناوه، هوای سرد سطحی در برخورد با هوای گرم عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر، معتدل شده و به‌صورت همگرایی و چرخندی به سمت شمال‌غربی جریان یافته است. در جلوی فرود (ناوه) که ایران قرار دارد، توده‌ی ناپایدار هوا از دریای سرخ و خلیج فارس رطوبت کافی دریافت نموده و به‌صورت همگرایی به سمت جنوب‌غربی ایران جریان یافته و موجب ناپایداری هوای سطح زمین شده است. در این روز، نم نسبی و رطوبت از طریق دریای سرخ و خلیج فارس تأمین شده است (شکل ۴، الف). نقشه‌ی فشار سطح زمین بیان‌گر این است که در دریای مدیترانه و ترکیه، به‌دلیل نفوذ هوای سرد در عقب ناوه‌ی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، در سطح زمین سیستم پُرفشار قوی با مرکزی ۱۰۳۵ میلی‌بار تشکیل شده است که زبانه‌ی آن به دریای خزر نیز امتداد یافته است؛ اما به‌دلیل

بررسی ماهانه‌ی بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی محدوده نشان می‌دهد که در این حوضه، بارش‌ها اغلب در ماه‌های سرد سال از نوامبر (آبان‌ماه) تا ماه می (اردیبهشت‌ماه) به‌وقوع می‌پیوندند، اما از ژوئن (خردادماه) تا اکتبر (مهرماه) در اغلب ایستگاه‌ها بارشی اتفاق نمی‌افتد. همچنین بیشینه‌ی بارش در فوریه (بهمن‌ماه) و کمینه‌ی آن در جولای (تیرماه) رخ داده است (جدول ۲).

الگوی اول سیلاب

در روز ۱۶ فوریه ۲۰۱۷ که مصادف با ۲۸ بهمن ۱۳۹۵ می‌باشد، بارش رگباری در شیراز به‌وقوع پیوست. در این روز، موج بادهای غربی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال باعث ایجاد یک ناوه در شرق دریای مدیترانه شد که محور این ناوه از شمال دریای خزر تا مصر به‌صورت شمال‌شرقی- جنوب‌غربی امتداد یافت. در این ناوه که یک فرود بلند مدیترانه نیز محسوب می‌شود، هوای سرد اروپای شرقی به سمت خاورمیانه و مناطق شرق مدیترانه جریان یافته است

سیکلون در ایران شده است و در آن سیستم کم فشار با دریافت رطوبت از دریای خلیج فارس به سمت فلات داخلی ایران حرکت نموده است که در برخورد با کوهستان زاگرس، بر میزان ناپایداری آن افزوده شده است. این ویژگی های ناپایداری همراه با رطوبت فراوان، شرایط را برای وقوع بارش در استان فارس، به ویژه محدوده مطالعاتی شیراز فراهم نموده است که در نهایت موجب رخداد سیلاب در این حوضه شد (شکل ۴، ب).



شکل ۴- الف) نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ب) نقشه فشار سطح دریا در روز ۱۶ فوریه ۲۰۱۷
Fig. 4- A) Geopotential map of 500 Hpa, B) Sea level pressure map on Feb 16, 2017

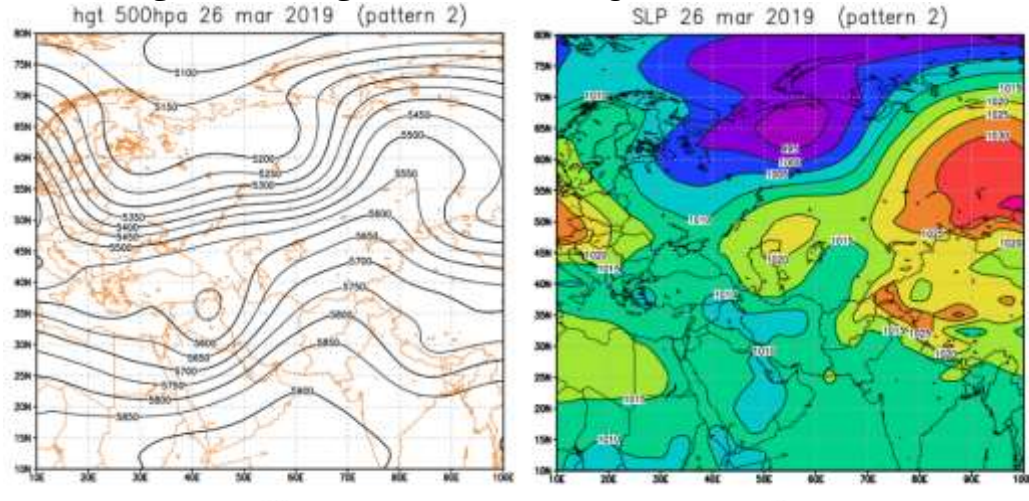
سردچال قرار دارد و هوای سردی که به سطح زمین رسیده است، در برخورد با هوای گرم سطحی موجب دگرگونی و منقلب شدن هوای سطحی می گردد (شکل ۵، الف). نقشه فشار سطح زمین نشان می دهد که به واسطه استقرار سردچال تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در عراق، در سطح زمین دو سیستم کم فشار با مرکزیت ۱۰۰۵ میلی بار در ایران و خلیج فارس تشکیل شده است. از طرف دیگر، به دلیل تشکیل فراز امگایی شکل در آسیای مرکزی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، یک سیستم پرفشار قوی با مرکزیت ۱۰۳۵ میلی بار در آسیای مرکزی و ارتفاعات هندوکش تشکیل شده است و زبانه های آن تا دریای خزر نیز نفوذ کرده است؛ اما ایران دارای هوای ناپایدار و تقریباً معتدل و گرم حاصل از کم فشار است (شکل ۵، ب). نزدیکی زبانه ی پرفشار آسیای مرکزی و کم فشار ایران، موجب افزایش گرادبان و

قرارگیری کشور ایران در جلوی ناوه ی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، یک سیستم کم فشار با مرکزیت ۱۰۰۵ میلی - بار در ایران مرکزی تشکیل شده است و زبانه ی جنوبی آن تا دریای سرخ و اقیانوس هند نیز امتداد یافته است. در این سیستم کم فشار، هوای سطح زمین ناپایدار بوده و بسته ی هوا با حرکت پادساعتگرد به صورت همگرایی، به ارتفاعات بالاتر صعود می کند. در ایران، ناپایداری تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و همگرایی سطح زمین موجب تشکیل

الگوی دوم سیلاب

در الگوی دوم سیلاب در شیراز که در روز ۲۶ مارس ۲۰۱۹ مصادف با ۶ فروردین ۱۳۹۸ می باشد، سیلاب عظیمی در شیراز اتفاق افتاد که خسارت های زیادی بر اکوسیستم های محیطی آن وارد ساخت. در این روز، در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، موج بادهای غربی در خاورمیانه باعث ایجاد سردچال شد که در آن منحنی ۵۵۵۰ متر بسته شده و نقطه ی مرکزی سردچال محسوب می شود که در شمال عراق قرار دارد. به طور کلی، در سمت چپ سردچال (عقب سردچال)، توده ی هوای سرد موجب پایداری و سکون هوا می شود، اما در سمت راست سردچال (جلوی سردچال) به دلیل چرخش سیکلونی و چرخندی توده ی هوا، شرایط اتمسفر در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، واگرا شده که موجب ناپایداری هوای زیرین خود می شود. کشور ایران در جلوی

خلیج فارس به محدوده‌ی شیراز، شرایط برای وقوع سیلاب مهیا شده است که در این روز میزان بارش در اغلب ایستگاه‌های باران‌سنجی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر گزارش شد.



شکل ۵- الف) نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ب) نقشه فشار سطح دریا در روز ۲۶ مارس ۲۰۱۹
Fig. 5- A) Geopotential map of 500 Hpa, B) Sea level pressure map on Mar 26, 2019

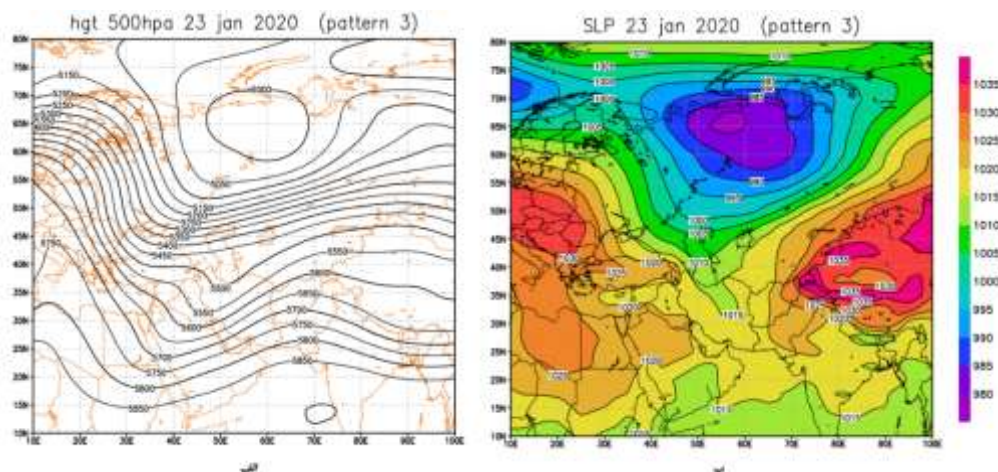
مرکزیت ۹۸۰ میلی‌بار در روسیه شده که زبانه‌ی آن، ایران را نیز فرا گرفته است. از طرف دیگر، دو سیستم پرفشار قوی در غرب و شرق ایران تشکیل شده است. نزدیکی کم‌فشار روسیه و ایران به سیستم‌های پرفشار موجب تشدید شیو فشار و گرادیان دمایی و تشکیل جبهه در ایران شده است. این جبهه‌ی دمایی موجب ناپایداری هوای سطحی در بخش‌های جنوبی کشور ایران شده است که به دلیل تزریق رطوبت خلیج فارس به توده‌ی هوا و برخورد آن با کوهستان جنوبی زاگرس، موجب وقوع بارش سیلابی در استان فارس و به‌ویژه شیراز شده است (شکل ۶، ب).

همان‌طور که در شکل زیر نمایان است، طی سیلاب‌های به‌وقوع پیوسته، بیشینه‌ی بارش‌ها در زیرحوضه‌های کوهستانی در شمال محدوده مطالعاتی شیراز بوده و کمینه‌ی آن در مهارلو و مناطق پست در بیدزرد و پُل‌فسا بوده است. طی سه وقوع سیلابی در حوضه، حداکثر بارش در قلات و گلستان با ۱۵۰ میلی‌متر و حداقل آن در مهارلو با ۵۵ میلی‌متر اتفاق افتاده است (شکل ۷). دلیل اصلی آن می‌تواند کوهستانی بودن اراضی واقع در شمال حوضه باشد که میزان بارش بیشتری دریافت می‌نماید.

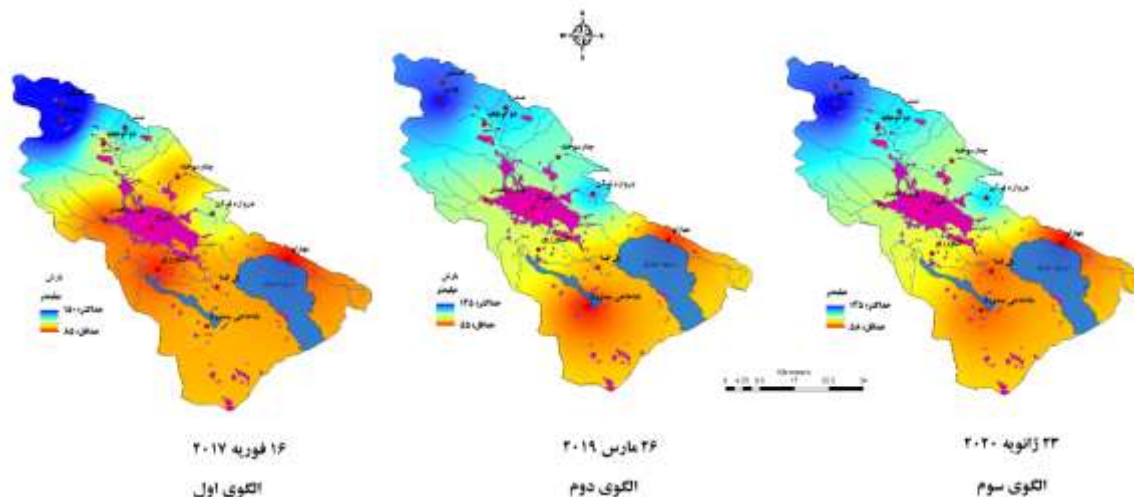
شیو فشاری و دمایی در ایران شده است که موجب تشدید ناپایداری هوا می‌گردد. باتوجه به همگرایی و ناپایداری هوای سطحی در استان فارس و تزریق رطوبت از دریای سرخ و

الگوی سوم سیلاب

در روز ۲۳ ژانویه ۲۰۲۰ مصادف با ۳ بهمن ۱۳۹۸، بارش رگباری شدیدی همراه با سیلاب در شیراز به‌وقوع پیوست و میانگین بارش در محدوده مطالعاتی شیراز ۱۰۰ میلی‌متر بود. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، موج بادهای غربی موجب ایجاد یک ناوه‌ی ضعیف در خاورمیانه شده که محور آن از شمال-غربی ایران و عربستان و شمال‌شرقی آفریقا می‌گذرد. همچنین یک سردچال قوی با مرکزیت ۵۰۰۰ متر در روسیه به‌وجود آمده است. در روسیه سردچال موجب ناپایداری شدیدی شده است که بارش‌ها در این سردچال به‌صورت برف ظاهر می‌گردد. پس از ایران، در کوهستان هندوکش، یک فراز در ادامه‌ی فرود ایران تشکیل شده که موجب پایداری و سردی هوای این منطقه شده است. مناطق جنوب‌غربی، شرقی و شمال‌شرقی ایران در جلوی فرود (ناوه) قرار داشته و گردش سیکلونی هوا موجب ناپایداری هوای سطح زمین شده است. همچنین عبور هوای ناپایدار از دریای خلیج فارس، رطوبت زیادی به توده هوا تزریق شده و بر شدت ناپایداری ترمودینامیکی آن افزوده است (شکل ۶، الف). در سطح زمین به‌واسطه‌ی سردچال، یک سیستم کم‌فشار دینامیکی قوی با



شکل ۶- الف) نقشه ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ب) نقشه فشار سطح دریا در روز ۲۳ ژانویه ۲۰۲۰
 Fig. 6- A) 500 hPa geopotential map, B) Sea level pressure map on Jan 23, 2020



شکل ۷- نقشه پهنه‌بندی میزان بارش در روزهای وقوع سیلاب در محدوده مطالعاتی شیراز
 Fig. 7- Zoning map of rainfall on the days of floods in the Shiraz watershed

سیلاب می‌باشد.

نتایج مدل HEC-HMS

شبیه‌سازی بارش ۱۰۰ میلی‌متری در محدوده مطالعاتی شیراز و تبدیل آن به رواناب با مدل HEC-HMS نشان داد که بیشترین دبی پیک در زیرحوضه‌های صدرا، قلات و دروازه قرآن بود. همچنین بیشینه‌ی حجم رواناب تولید شده در زیرحوضه‌های صدرا و قلات بود (جدول ۴). چون که در صدرا به علت گسترش سکونتگاه شهری و افزایش نفوذناپذیری اراضی، بارش سریعاً و بدون این که نفوذ کند، به رواناب تبدیل شده و در مسیر شیب حوضه، به سمت جنوب جریان می‌یابد. در دروازه قرآن نیز کاربری شهری موجب کاهش نفوذپذیری بارش شده و رواناب با شیب

رواناب حوضه

عدم قطعیت مدل (HEC-HMS)

در این پژوهش از دو واقعه‌ی سیلاب (۲۰۱۷/۲/۱۶) و (۲۰۱۹/۳/۲۶) برای واسنجی مدل HEC-HMS استفاده شد. برای تجزیه و تحلیل نتایج از معیار Nash استفاده شد. از واقعه‌ی سوم (۲۰۲۰/۱/۲۳) برای ارزیابی مدل استفاده شد و برای تجزیه و تحلیل نتایج از ضریب ناش و مجذور میانگین مربعات خطا استفاده شد و نتایج آن در جدول (۳) ارائه شد که بر اساس آن دبی پیک و حجم رواناب مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با مدل HEC-HMS مقایسه شده و اختلاف آن‌ها معنی‌دار نیست و گویای این موضوع است که مدل قادر به برآورد و شبیه‌سازی پارامترهای هیدرولوژیکی

زیادتی به سمت شهر شیراز و رودخانه خشک جریان می‌یابد؛ اما در زیرحوضه‌ی چنار سوخته که نهرا عظم در آن جاری است، به دلیل وجود باغات یکپارچه، اراضی بایر و مراتع کوهستانی، میزان نفوذ بارش زیاد بوده و رواناب با یک زمان تأخیر ۳۰ دقیقه‌ای تولید شده و در مسیر شیب حوضه به سمت جنوب جریان می‌یابد.

جدول ۳- نتایج واسنجی و ارزیابی مدل HEC-HMS در وقایع مشاهداتی سیلاب در شیراز

Table 3- Results of calibration and evaluation of HEC-HMS model in observational events of flood in Shiraz

معیار RMSE RMSE criteria	معیار NS NS criteria	فاکتورهای رواناب Runoff factors	واقعه‌ی سیلاب Flood event	مدل HEC-HMS HEC-HMS
۰/۰۱۶	۰/۸۱	دبی پیک (Peak of debit)	۲۰۱۷/۲/۱۶	واسنجی مدل Model calibration
۰/۰۰۸	۰/۷۵	حجم رواناب (Runoff volume)		
۰/۰۱۱	۰/۸۶	دبی پیک (Peak of debit)	۲۰۱۹/۳/۲۶	ارزیابی مدل Model evaluation
۰/۰۱۰	۰/۷۹	حجم رواناب (Runoff volume)		
۰/۰۱۴	۰/۸۸	دبی پیک (Peak of debit)	۲۰۲۰/۱/۲۳	ارزیابی مدل Model evaluation
۰/۰۰۹	۰/۸۱	حجم رواناب (Runoff volume)		

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی رواناب در زیرحوضه‌های محدوده مطالعاتی شیراز در بارش ۱۰۰ میلی‌متری

Table 4- Results of runoff simulation in sub-basins of Shiraz study area in 100 mm rainfall

حجم نفوذ بارش (هزار مترمکعب) Rainfall penetration volume	حجم بارش (هزار مترمکعب) Rainfall volume (1000 m ³)	حجم رواناب (هزار مترمکعب) Runoff volume (1000 m ³)	دبی پیک (مترمکعب در ثانیه) Peak of debit (m ³ /sec)	زیرحوضه Sub basin
۵۴۲۳	۱۰۵۰۰	۵۰۷۶	۳۸۹	قلات Ghalat
۷۲۶	۶۵۰۰	۵۷۷۳	۶۶۶	صدرا Sadra
۱۲۴۵	۳۵۰۰	۲۲۵۴	۲۶۲	چنار سوخته Chenar Sookhteh
۲۴۷	۳۰۰۰	۲۷۵۲	۳۳۶	دروازه قرآن Darvazeh Quran
۲۵۴۶	۶۰۰۰	۳۴۵۳	۲۸۱	چنار راهدار Chenar Rahdar
۶۴۴	۲۵۰۰	۱۸۵۶	۱۴۴	بیدزرد Bidzard

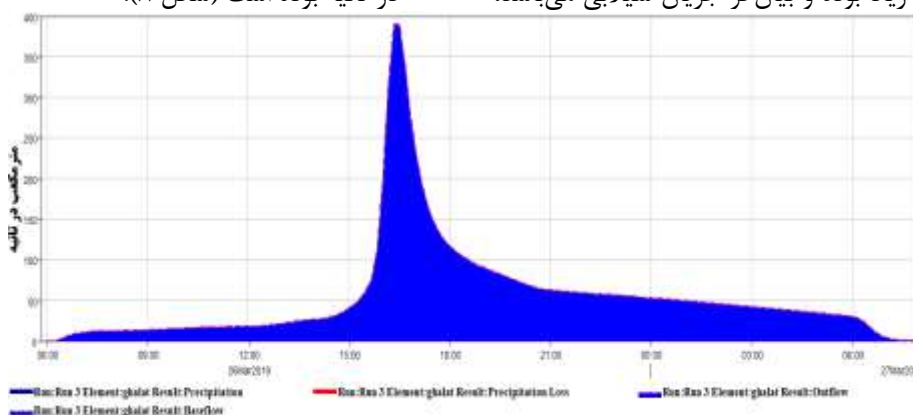
جدول ۵- نتایج شبیه‌سازی رواناب در ایستگاه‌های هیدرومتری رودخانه خشک شیراز در بارش ۱۰۰ میلی‌متری
Table 5. Results of runoff simulation in dry river hydrometric stations of Shiraz in 100 mm rainfall

دبی پیک (مترمکعب در ثانیه) Peak Debit (M ³ /Sec)	رودخانه خشک River Khoshk
۹۷۹	ایستگاه دوکوهک Dokoohak Station
۱۱۰۶	نهرا عظم Nahre Asam
۱۴۷۳	ساحلی Saheli
۲۲۰۳	پل فسا Pole Fasa

صدرا، دوکوهک، نهرا عظم (چنار سوخته)، دروازه قرآن، چنار راهدار و بیدزرد به دهانه‌ی رود در پل فسا اضافه شده و به دریاچه‌ی مهارلو می‌ریزد (جدول ۵). خروجی هیدروگراف زیرحوضه‌ی قلادت در منطقه‌ی

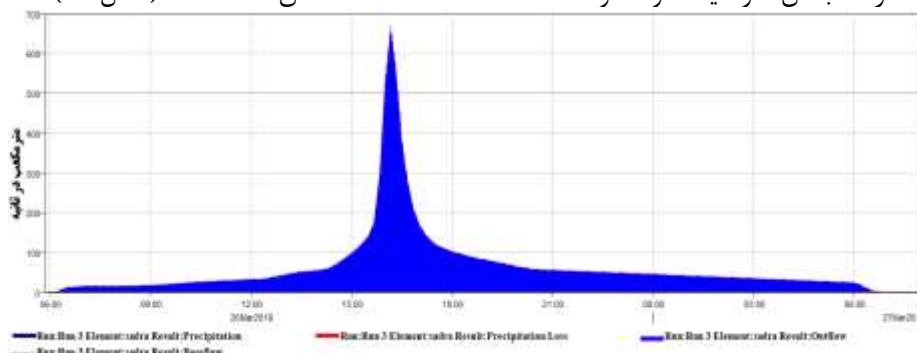
در آبراهه‌های رودخانه خشک شیراز نیز بیشینه‌ی دبی پیک در نزدیکی پل فسا اتفاق افتاده است. چون که پل فسا در دهانه‌ی خروجی رودخانه خشک در دریاچه‌ی مهارلو قرار دارد و رواناب تولید شده از زیرحوضه‌های قلادت، گلستان،

اما به دلیل وجود باغات یکپارچه و عدم وجود سکونتگاه‌ها و کاربری‌های انسانی در منطقه، سیلاب در آبراهه‌ی اصلی به جریان افتاده است. در این زیرحوضه، میزان دبی رواناب از ساعت ۱۵ روند اوجی گرفته و در ساعت ۱۷ به حداکثر مقدار خود رسیده است و پس از آن با شیب نزولی، کاهش یافته است. به جز بازه‌ی زمانی ۱۶ تا ۱۷، در دیگر ساعات روز، دبی رواناب زیرحوضه‌ی قلات کمتر از ۱۰۰ مترمکعب در ثانیه بوده است (شکل ۸).



شکل ۸- هیدروگراف ۲۴ ساعته رواناب تولید شده در زیرحوضه‌ی کوهستانی قلات از بارش ۱۰۰ میلی‌متری
 Fig. 8- 24-hour runoff hydrograph produced in Ghalat mountainous sub-basin from 100 mm of precipitation

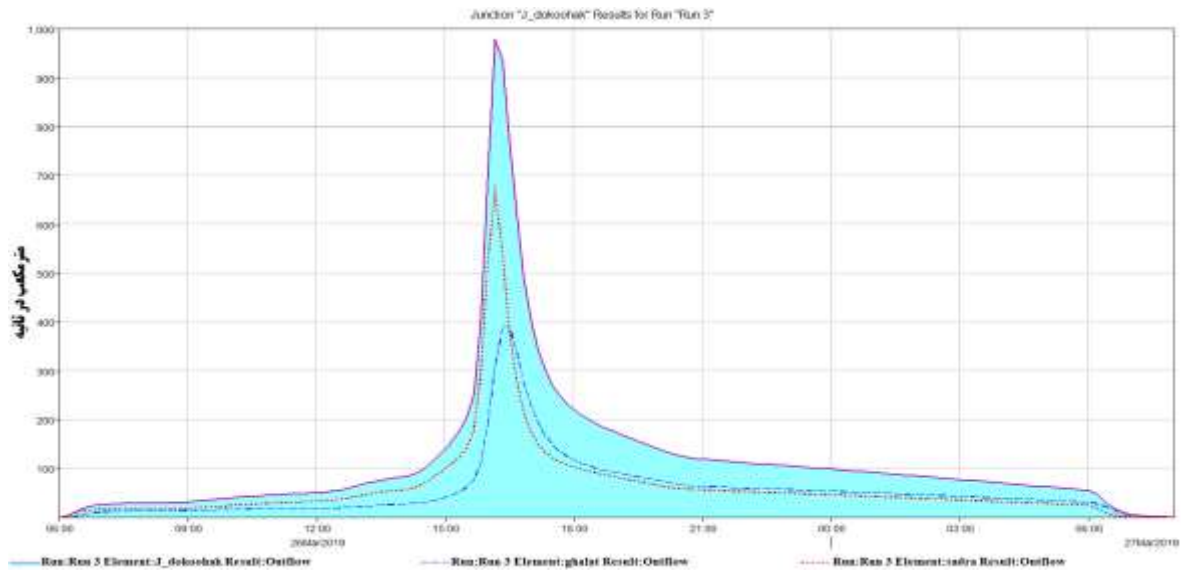
هزارمترمکعب آن به صورت رواناب از زیرحوضه خارج شده است. فقط در ساعت ۱۷:۰۰، دبی رواناب تشدید یافته است، اما پس از آن دبی رواناب زیرحوضه به کمتر از ۱۰۰ مترمکعب در ثانیه رسیده است (شکل ۹). در ایستگاه هیدرومتری دوکوهک که رواناب‌های تولید شده در زیرحوضه‌های قلات و صدرا به آن اضافه شده‌اند، دبی پیک به ۹۷۹ مترمکعب در ثانیه رسیده است که طی ساعت ۱۶ تا ۱۷ اتفاق افتاده است (شکل ۱۰).



شکل ۹- هیدروگراف ۲۴ ساعته رواناب تولید شده در زیرحوضه‌ی مسکونی صدرا از بارش ۱۰۰ میلی‌متری
 Fig. 9- 24-hour runoff hydrograph produced in Sadra residential sub-basin from 100 mm of precipitation

کوهستانی شمال محدوده مطالعاتی شیراز نشان می‌دهد که دبی پیک رواناب خروجی از حوضه ۳۸۹ مترمکعب در ثانیه در ساعت ۱۷:۰۰ به وقوع پیوسته است. در بارش ۱۰۰ میلی‌متری این حوضه‌ی کوهستانی، پس از نفوذ ۵۴۲۳ هزار مترمکعبی بارش، ۵۰۷۶ هزارمترمکعب آن به صورت رواناب تولید شده و از طریق آبراهه‌ی اصلی در راستای شیب حوضه، به سمت جنوب جریان یافته است. اگرچه دبی پیک این زیرحوضه، زیاد بوده و بیان‌گر جریان سیلابی می‌باشد،

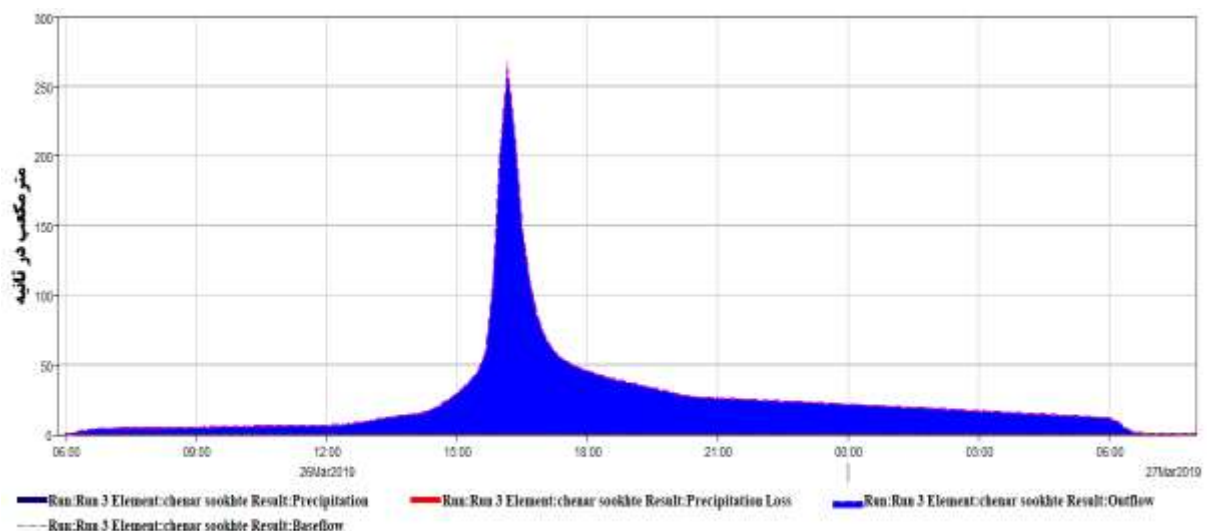
شهر صدرا در پایین‌تر از نقاط کوهستانی قلات قرار دارد و در این زیرحوضه به دلیل گسترش سکونتگاه شهری، اراضی غیرقابل نفوذ شده و میزان رواناب بیشتری نسبت به قلات تولید شده است. در این زیرحوضه، دبی پیک رواناب در ساعت ۱۷ بوده که به ۶۶۶ مترمکعب در ثانیه رسیده است که بیان‌گر سیلابی بودن زیرحوضه و آبراهه‌ی رودخانه خشک شیراز می‌باشد. از بارش ۶۵۰۰ هزار مترمکعبی در زیرحوضه‌ی صدرا، حدود ۷۲۶ هزار مترمکعب آن نفوذ یافته و حدود ۵۷۷۳



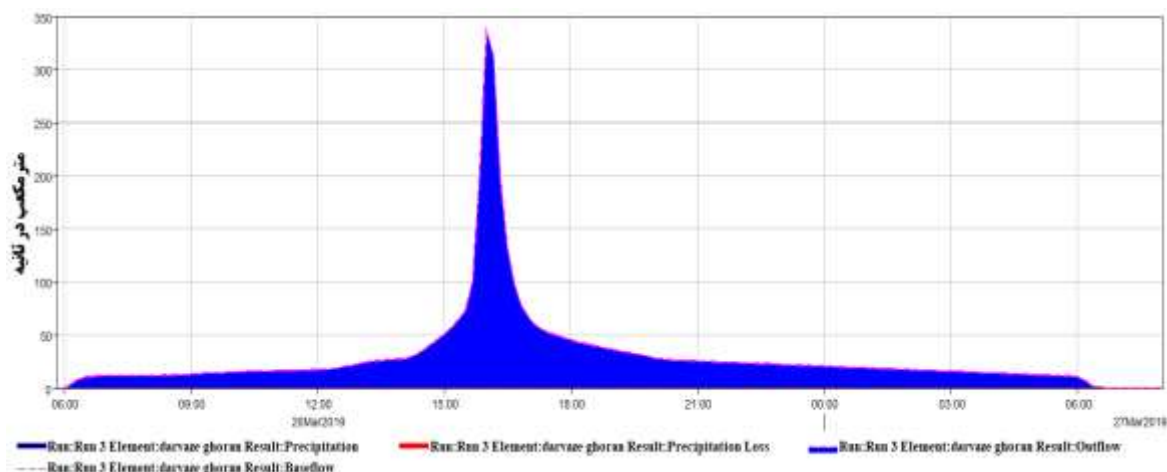
شکل ۱۰- هیدروگراف ۲۴ ساعته تجمعی رواناب تولید شده در ایستگاه هیدرومتری دوکوهک از بارش ۱۰۰ میلی‌متری
 Fig. 10- Accumulated 24-hour runoff hydrograph produced in Chenar Sookhteh (Nahr-e A`zam) basin from 100 mm of precipitation

رواناب تبدیل شده است که از طریق آبراهه‌ی نهرا عظم به رودخانه خشک شیراز ریخته است (شکل ۱۱). در زیرحوضه‌ی دروازه قرآن، دبی پیک در ساعت ۱۷:۰۰ به ۳۳۶ مترمکعب در ثانیه رسیده است. هیدروگراف این زیرحوضه نشان می‌دهد که تا قبل و بعد از ساعت ۱۷:۰۰، دبی رواناب کمتر از ۵ مترمکعب در ثانیه بوده است (شکل ۱۲). رواناب ایجاد شده در مسیر شیب حوضه، به رودخانه خشک شیراز می‌پیوندد.

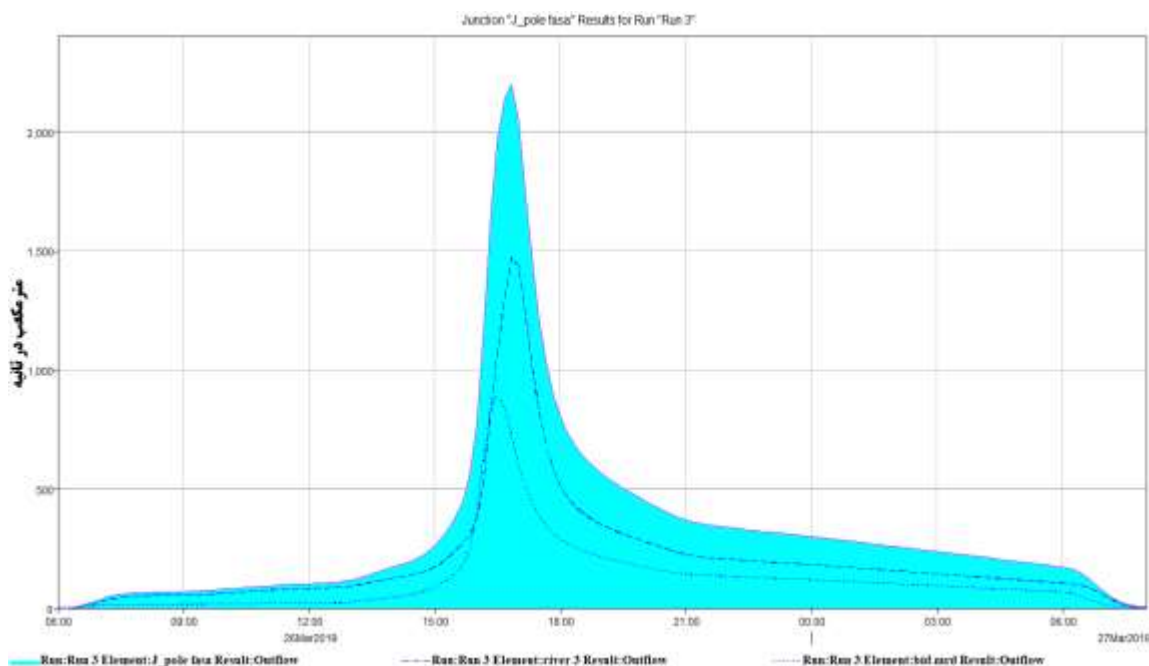
رودخانه نهرا عظم که از زیرحوضه‌ی چنارسوخته نشأت گرفته و به رودخانه خشک در شهر شیراز می‌پیوندد، به دلیل وجود باغات یکپارچه در این زیرحوضه، میزان نفوذ بیشتر از سایر زیرحوضه‌ها بوده که موجب کاهش دبی رواناب تولید شده در آن شده است؛ به گونه‌ای که دبی پیک آن در ساعت ۱۷ به ۲۶۲ مترمکعب در ثانیه رسیده است. در این زیرحوضه، از ۳۵۰۰ هزار مترمکعب بارش، حدود ۱۲۴۵ هزار مترمکعب آن در سطح حوضه نفوذ کرده و حدود ۲۲۵۴ هزار مترمکعب به



شکل ۱۱- هیدروگراف ۲۴ ساعته رواناب تولید شده در زیرحوضه‌ی چنارسوخته (نهرا عظم) از بارش ۱۰۰ میلی‌متری
 Fig. 11- 24-hour runoff hydrograph produced in Chenar Sookhteh (Nahr-e A`zam) basin from 100 mm of precipitation



شکل ۱۲- هیدروگراف ۲۴ ساعته رواناب تولید شده در زیرحوضه‌ی دروازه قرآن از بارش ۱۰۰ میلی‌متری
 Fig. 12- 24-hour runoff hydrograph produced in Darvazeh Quran basin from 100 mm of precipitation



شکل ۱۳- هیدروگراف ۲۴ ساعته تجمعی رواناب تولید شده در ایستگاه هیدرومتری پُل فسا از بارش ۱۰۰ میلی‌متری
 Fig. 13- Accumulated 24-hour runoff hydrograph produced at Polfasa hydrometric station from 100mm of precipitation

در ثانیه رسیده و دشت مهارلو در زیر آب بوده است. به دلیل گسترش سکونتگاه کلان‌شهر شیراز و شهرک‌های اقماری اطراف آن، میزان نفوذپذیری در سطح حوضه به‌صورت کاهش یافته و بارش سریعاً با زمان تأخیر کمتر از ۳۰ دقیقه، به رواناب تبدیل شده است که در دهانه‌ی خروجی رودخانه در مهارلو، دبی آن از ساعت ۱۲:۰۰ تا ۰۶:۰۰ صبح فردا بیشتر از ۲۰۰ مترمکعب در ثانیه بوده است (شکل ۱۳).

نهایتاً در ایستگاه پُل فسا در جنوب محدوده مطالعاتی که نزدیک دریاچه مهارلو بوده و در این نقطه، سیلاب حوضه از طریق رودخانه خشک شیراز به دریاچه‌ی مهارلو می‌ریزد، هیدروگراف ۲۴ ساعته که حاصل از رواناب‌های ایجاد شده در زیرحوضه‌های قلات، صدرا، چنارسوخته، دروازه قرآن، چنار راهدار و بیدزرد می‌باشد، نشان می‌دهد که در ساعت ۱۷:۱۵ دقیقه، دبی پیک رواناب به بیش از ۲۰۰۰ مترمکعب

نتیجه‌گیری

شناخت پدیده‌ی سیلاب و تدوین راهبرد مبتنی بر برنامه-ریزی برای کنترل و کاهش خسارت‌های ناشی از سیلاب، مستلزم آشکارسازی دلایل اتمسفری رخداد سیلاب با بهره-گیری از علوم جوی است. پژوهشگران با بررسی شرایط جوی به‌ویژه فراسنج‌های ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، میزان فشار جوی در سطح زمین و همچنین میزان ناپایداری هوا با امگا و تحلیل دینامیکی-همدیدی نقشه‌های مربوط به هر فراسنج جوی، ساز و کار تکوین و تشکیل وقوع بارش‌های سیل‌آسا را شناسایی می‌کنند. در پژوهش حاضر نیز با این رویکرد، رخداد بارش‌های سیلابی در محدوده مطالعاتی رودخانه خشک شیراز را بررسی نمود. به‌طور کلی، بارش‌های نیمه‌ی سرد سال در خاورمیانه شامل کشورهای ایران، ترکیه، عراق، سوریه، اردن، لبنان، فلسطین و شبه‌جزیره عربستان از امواج بادهای غربی و جریان‌ات فراز و فرودهای موجود در عمق بادهای غربی حاصل می‌گردد؛ به‌گونه‌ای که دو مسیر ورود سیکلون (موج باران‌زا) از سمت دریای مدیترانه و دریای سرخ در درون امواج بادهای غربی وجود دارد (Ahmadi and Jafari, 2015; Rezaee and Banafshe et al., 2015). سیکلون مدیترانه‌ای با دریافت رطوبت از دریای اژه، آدریاتیک و دریای مدیترانه، در درون بادهای غربی به سمت شرق جریان می‌یابد و این سیکلون در جلوی فرود (ناوه) در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌صورت جریان همگرایی (صعود از سطح زمین به ارتفاعات بالا) حرکت نموده و در برخورد با دامنه‌ی کوهستان‌های مرتفع به‌ویژه زاگرس در ایران، بر میزان صعود هوای مرطوب درون سیکلون افزوده شده و موجب تشکیل ابرهای باران‌زا می‌شود (MahmodAbadi et al., 2016). این سامانه‌ی بارشی در کردستان، کرمانشاه، خرم‌آباد، ایلام، چهارمحال بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد منجر به وقوع بارش‌های سنگین می‌گردد که در نواحی سکونتگاهی با سطوح نفوذناپذیر شهری، منجر به وقوع سیلاب می‌گردد (Nazemosadat and Shahgholian, 2014). موج دوم بادهای غربی در عرض‌های

پایین‌تر جغرافیایی (۱۵ تا ۳۰ درجه عرض شمالی) قرار دارد که از تنگه‌ی باب‌المندب در یمن تا تنگه‌ی سوئز در مصر محور این موج می‌باشد (AI-Shouhani, 2020). در این موج بادهای غربی، فرود قوی بر روی دریای سرخ تشکیل شده و با کسب رطوبت موجب ایجاد یک سیکلون قوی با رطوبت فراوان، میزان همگرایی و ناپایداری زیاد می‌گردد (AI-Nassar et al., 2020). سیکلون دریای سرخ در درون موج بادهای غربی به‌ویژه در جلوی فرود - که محل همگرایی سطح زمین، ناپایداری سطح زمین و واگرایی ارتفاعات بالا می‌باشد- به سمت شرق جریان یافته و موجب بارش سنگین در شبه‌جزیره عربستان و کشورهای جنوبی خلیج فارس می‌شود (Almazroui and Awad, 2016). پس از آن با تخلیه‌ی رطوبت به صورت بارش، سامانه تضعیف می‌شود، اما مجدداً با عبور از خلیج فارس، رطوبت کافی کسب نموده و انرژی پتانسیل قابل دسترس همرفتی آن افزایش یافته و ناپایداری آن به‌واسطه‌ی انرژی ترمودینامیکی و گرمای نهان تقویت شده و به سمت ایران جریان می‌یابد (Esfandiari and Lashkari, 2020; Kiani et al., 2019). سیکلون دریای سرخ با تقویت شدن در خلیج فارس، موجب وقوع بارش‌های سنگین در جنوب و جنوب‌غربی ایران می‌شود (Ahmadi and Jafari, 2015). در ارتفاعات زاگرس جنوبی به‌ویژه در محدوده مطالعاتی شیراز، فرآیند تراکم و میعان به‌دلیل ارتفاع بالا از سطح زمین، سریعتر از نواحی پست اتفاق می‌افتد و میزان بارش نیز در آن افزایش می‌یابد. سیستم‌های رطوبتی که از دریای سرخ وارد ایران می‌شوند، در بارش سیلابی فروردین‌ماه ۱۳۹۲ در نیمه‌ی جنوبی و جنوب‌غربی ایران، پدیده‌ی بلوکی‌نگ امگایی شکل موجب دو شاخه شدن امواج بادهای غربی شده که شاخه‌ی جنوبی آن با دریافت رطوبت فراوان از خلیج فارس موجب وقوع بارش‌های سیلابی در جنوب و جنوب‌غربی ایران شد (MahmodAbadi et al., 2016). در فروردین‌ماه ۱۳۹۱ نیز که بارش رگباری موجب وقوع سیلاب در استان فارس شد، استقرار ناهای عمیق تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر روی دریای سیاه و مدیترانه موجب

در کاربری‌های مختلف پرداخته‌اند (Cowles *et al.*, 2019؛ Rahimzadeh؛ Kabeja *et al.*, 2019؛ Stoleriu *et al.*, 2020؛ Jahanbakhsh Asl *et al.*, 2018؛ and Habibi, 2018). برای شبیه‌سازی و برآورد تبدیل بارش به رواناب پژوهشگران مدل HEC-HMS را طراحی نموده و از آن استفاده می‌کنند. دقت این مدل را برای رفتار هیدرولیکی رواناب‌های حوضه‌ی شهرچای ارومیه را تأیید کردند و از آن برای شبیه‌سازی پیوسته‌ی بارش-رواناب استفاده کردند. همچنین برای پیش‌بینی سیلاب نیز این مدل کاربرد فراوانی دارد که در حوضه‌ی آبریز رودخانه-ی کشکان در استان لرستان، سیلاب‌های تاریخی با این مدل پیش‌بینی شد (Hosseini *et al.*, 2015).

در پژوهش حاضر الگوهای جوی مولد سیلاب شناسایی شد و با مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS میزان رواناب تولید شده در زیرحوضه‌های محلی در شیراز شبیه‌سازی شد. می‌توان نتیجه گرفت که ایجاد ناوه و سردچال جوی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در خاورمیان و قرارگیری جنوب‌غربی ایران در جلوه‌ی ناوه به همراه استقرار سیستم کم‌فشار بر روی ایران موجب وزش رطوبتی خلیج‌فارس و ناپایداری هوای محدوده شیراز شده که در نهایت موجب وقوع سیلاب در حوضه‌ی مطالعاتی رودخانه خشک شیراز می‌شود. در بین زیرحوضه‌های منطقه، زیرحوضه‌ی شهری صدرا و دروازه قرآن به دلیل نفوذپذیری اندک در این مناطق، میزان رواناب بسیار زیاد است و موجب آب‌گرفتگی زیرحوضه و بالآمدن سطح آب رودخانه خشک شیراز شده و در نهایت در پُل فسا در دهانه‌ی ورودی رودخانه خشک شیراز به دریاچه‌ی مهارلو، بیشتر اراضی به زیرآب رفته و موجب خسارت‌های فراوانی بر زیرساخت‌های منطقه شده است.

سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از حمایت‌های متخصصان و کارشناسان سازمان آب منطقه‌ای و اداره کل هواشناسی استان فارس اعلام می‌دارند.

ناپایداری اتمسفر جنوب‌غربی ایران شد که با وزش رطوبتی دریای سرخ-خلیج‌فارس همراه بود (Halabian 2016). در روز ۱۱ فروردین ۱۳۹۸ نیز بارش سنگینی در نیمه‌ی جنوبی و جنوب‌غربی ایران به وقوع پیوست که پژوهشگران دلیل اصلی آن را قرارگیری ایران در جلوی ناوه همراه با واگرایی و صعود شدید هوای گرم و مرطوب جنوبی نشان دادند (Pazhooh and Jafari 2019). فرآیند جوی-دینامیکی مزبور، دلیل اصلی وقوع بارش‌های سیلابی در نواحی جنوبی ایران می‌باشد. نتایج پژوهش حاضر نیز نشان داد که موج بادهای غربی به همراه سیستم کم‌فشار سطح زمین که خود ناشی از شرایط ناپایدار در موج بادهای غربی می‌باشد، دلیل اصلی وقوع بارش‌های سنگین و رخداد پدیده سیلاب در محدوده مطالعاتی رودخانه خشک شیراز می‌باشد.

سیلاب‌های شهری ناشی از رخداد بارش‌های سنگین بوده و نوع استفاده از زمین شهری و کاربری‌های اراضی موجود در منطقه نقش مهمی در تشدید آن دارد (Kilavi *et al.*, 2018). همان‌طور که گفته شد، اغلب بارش‌های بیش از ۴۰ میلی‌متر در سطوح شهری با کاربری‌های سکونتگاهی پُرتراکم منجر به وقوع سیلاب می‌شود. در این پژوهش نیز نتایج مؤید همین موضوع می‌باشد. پس از وقوع سیلاب به دلیل سطوح نفوذناپذیر کاربری‌های سکونتگاهی در محدوده مطالعاتی شیراز، بارش سریعاً به رواناب تبدیل شده و وارد مجاری زهکشی و آبراه‌ها می‌شود که در نهایت با تخریب تأسیسات زیربنایی و خسارت اقتصادی بر شهر از خروجی حوضه بیرون می‌رود (Shen *et al.*, 2019؛ Wu *et al.*, 2019؛ Daliran Firouz *et al.*, Moayeri and Entezari, 2008). شناخت رفتار هیدرولیکی رواناب‌های ناشی از سیلاب شهری نقش مهمی در برنامه‌ریزی و تدوین راهبردهای مدیریتی جهت کنترل سیلاب دارد و پژوهشگران نیز با استفاده از مدل‌های رایانه‌ای همچون HEC-HMS، SWMM و HEC-RAS به همراه سامانه‌ی اطلاعات جغرافیایی به شبیه‌سازی و برآورد جریان سیلاب

References

منابع

- Ahmadi, M. and Jafari, F., 2015. Analysis of super heavy rainfall of march 2014 causing destructive flooding in the township of Bandar Abbas. *Iranian Journal of Hazards Science*. 2(3), 307-324. <https://doi.org/10.22059/jhsci.2015.56069>.
- Ai, Y. and Qian, W., 2020. Anomaly-based synoptic analysis on the heavy rain event of July 2018 in Japan. *Natural Hazards*. 1-18. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03888-y>.
- Ajayamohan, R.S., Merryfield, W.J. and Kharin, V.V., 2010. Increasing trend of synoptic activity and its relationship with extreme rain events over central India. *Journal of Climate*. 23(4), 1004-1013. <http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI2918.1>.
- Alijani, B., Khosravi, M. and Esmailnejad, M., 2010. A Synoptic Analysis of January 2008. Heavy Precipitation in the Southeast of Iran. *Journal of Climate Research*. 1(3-4), 3-14. <https://sid.ir/paper/213093/fa>
- Alizadeh, A., 2016. Principles of Applied Hydrology, Imam Reza University, 40, 942. Iran.
- Almazroui, M. and Awad, A.M., 2016. Synoptic regimes associated with the eastern Mediterranean wet season cyclone tracks. *Atmospheric Research*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.05.015>.
- Al-Nassar, A.R., Pelegrí, J.L., Sangrà, P., Alarcon, M. and Jansa, A., 2020. Cut off low systems over Iraq: Contribution to annual precipitation and synoptic analysis of extreme events. *International Journal of Climatology*. 40(2), 908-926. <https://doi.org/10.1002/joc.6247>
- AL-Shouhani, H.J., 2020. A Comparative Study Between Short Life-Cut off Low and Long Life-Cut off Low Accompanied by Heavy Precipitation Storms Over Iraq: Case Study. *Al-Mustansiriyah Journal of Science*. 31(2), 1-14. <https://doi.org/10.23851/mjs.v31i2.755>.
- Armon, M., Dente, E., Smith, J.A., Enzel, Y. and Morin, E., 2018. Synoptic-scale control over modern rainfall and flood patterns in the Levant drylands with implications for past climates. *Journal of Hydrometeorology*. 19(6), 1077-1096. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-18-0013.1>.
- Azizi, G., Nayeri, M. and Rostami, J.S., 2009. Synoptic analysis of heavy precipitation in west of Iran. *Journal of Physical Geography*. 1(4), 1-13. <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?id=193483>
- Boughton, W.C., 1989. A review of the USDA SCS curve number method. *Soil Research*. 27(3), 511-523. <https://doi.org/10.1071/SR9890511>.
- Cowles, A., Willson, C. and Twilley, R., 2019. Effects of Land-Use Change (1938–2018) on Surface Runoff and Flooding in the Amite River Basin, Louisiana, USA Using Coupled 1D/2D HEC-RAS–HEC-HMS Hydrological Modeling. https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2020esoar.10501755C/doi:10.1002/essoar.10501755.1.
- Daliran Firouz, H., Mokhtari, F., Soltani, S. and Mousavi, S.A., 2016. Flood Damage Assessment in Ghamsar and Ghohrood Watershed Basins Using HEC-FIA. *Journal of Water and Soil Science*. 19(74), 63-76. <http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.jstnar.19.74.6>
- Derafshi, Kh., Khaledi, Sh., Shaebaninia, H. and Mehrjoonezhad, A., 2016. The study of land use changes and modeling of precipitation runoff using HEC-HMS model, Case Study: Babolrood basin. *Environmental Erosion Research*. 4(20), 30-44. <http://dorl.net/dor/20.1001.1.22517812.1394.5.4.1.3>
- Dezfuli, A., 2020. Rare atmospheric river caused record floods across the Middle East. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 101(4), 394-400. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0247.1>
- Esfandiari, N. and Lashkari, H., 2020. Identifying atmospheric river events and their paths into Iran. *Theoretical and Applied Climatology*. 140, 1125-1137. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-020-03148-w>.
- Garner, M., Sebastian, A., Hakkenberg, C.R., Juan, A., Gori, A. and Bedient, P.B., 2019. Integrating Annual Landsat Imagery in a Hydrologic Impact Analysis of Localized Land Use Change for a Rapidly Developing Watershed in Houston, Texas. *American Geophysical Union, Fall Meeting*, 2019AGUFM.H53L1943G
- Ghasemifar, E., Naserpour, S. and Arezomandi, L., 2017. Analysis of synoptic patterns related to extreme precipitation over west of Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*. 4 (2), 69-86. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-2717-en.html>
- Jadhav, S.K., 2002. Summer monsoon low pressure systems over the Indian region and their relationship with the sub-divisional rainfall. *Mausam*. 53(2), 177-186. DOI: <https://doi.org/10.54302/mausam.v53i2.1633>.
- Jahanbakhsh Asl, S., Rezaee Banafsheh, M., Rostamzadeh, H. and Aalinejad, M.H., 2018. Continuous Simulation of Rainfall-Runoff of Shahrchay Basin of Urmia Using HEC-HMS Model. *Journal of HYDROGEOMORPHOLOGY*. 4 (16), 101-118. <https://dorl.net/dor/20.1001.1.23833254.1397.5.16.6.4>.
- James, W.P., Winsor, P.W. and Williams, J.R., 1987. Synthetic unit hydrograph. *Journal of Water*

- Resources Planning and Management. 113(1), 70-81. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1987\)113:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1987)113:1(1))
- Kabeja, C., Li, R., Guo, J., Rwabuhungu, D., Manyifika, M., Gao, Z., Wang, V. and Zhang, Y., 2019. The Impact of Reforestation Induced Land Cover Change (1990-2017) on Flash Flood Peak Discharge Using HEC-HMS Hydrological Model and Satellite Observations: A study in Data Scarce Tributary of Sichuan Basin, China. AGUFM, 2019, H13K-1868. <https://doi.org/10.3390/w12051347>.
- Kang, Y., Peng, X., Wang, S., Dong, C., Shang, K. and Zhao, Y., 2020. Statistical characteristics and synoptic situations of long-duration heavy rainfall events over North China. Earth and Space Science. 7(5), e2019EA000923. <https://doi.org/10.1029/2019EA000923>.
- Kiani, M., Lashkari, H. and Ghaemi, H., 2019. The effect of Zagros Mountains on rainfall changes of Sudanese low pressure system in western Iran. Modeling Earth Systems and Environment. 5(4), 1769-1779. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00631-w>.
- Kilavi, M., MacLeod, D., Ambani, M., Robbins, J., Dankers, R., Graham, R., Titly, H., Salih, A.M. and Todd, M.C., 2018. Extreme rainfall and flooding over central Kenya including Nairobi city during the long-rains season 2018: causes, predictability, and potential for early warning and actions. Atmosphere. 9(12), 472. <https://doi.org/10.3390/atmos9120472>.
- Kumar, A., Dudhia, J., Rotunno, R., Niyogi, D. and Mohanty, U.C., 2008. Analysis of the 26 July 2005 heavy rain event over Mumbai, India using the Weather Research and Forecasting (WRF) model. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 134(636), 1897-1910. <https://doi.org/10.1002/qj.325>.
- MahmodAbadi, M., Omidvar, K., Narangifard, M. and Fatemi, M., 2016. Synoptic analysis of the effects of blocking phenomenon on torrential rainfall in the southern of Iran of April 2013. Journal of Climate Research. 1395(25), 67-82. <https://doi.org/10.22067/geo.v3i2.26653>.
- Mel, R.A., Viero, D.P., Carniello, L. and D'Alpaos, L., 2020. Optimal floodgate operation for river flood management: The case study of Padova (Italy). Journal of Hydrology: Regional Studies. 30, 100702. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100702>.
- Nazemosadat, S.M.J. and Shahgholian K., 2014. Formation of Heavy Precipitation in southwestern Part of Iran and its Association with the Madden-Julian Oscillation. Journal of Water and Soil. 28(5), 1072-1083. <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.28595>.
- Nazemosadat, M.J. and Shahgholian, K., 2017. Heavy precipitation in the southwest of Iran: association with the Madden-Julian Oscillation and synoptic scale analysis. Climate Dynamics. 49(9-10), 3091-3109. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-016-3496-6>.
- O'Donnell, E.C. and Thorne, C.R., 2020. Drivers of future urban flood risk. Philosophical Transactions of the Royal Society A. 378(2168), 20190216. <https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0216>.
- Panegrossi, G., Marra, A.C., Sanò, P., Baldini, L., Casella, D. and Porcù, F., 2020. Heavy precipitation systems in the Mediterranean area: The role of GPM. In Satellite Precipitation Measurement (pp. 819-841). Springer, Cham. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-35798-6_18.
- Pazhoo, F. and Jafari F., 2019. Synoptic analysis of heavy and hazardous precipitations in western and south western Iran during the first ten days of April 2019. Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR), 29(114), 165-184. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2020.44600>.
- Qiu, L., Du, Z., Zhu, Q. and Fan, Y., 2017. An integrated flood management system based on linking environmental models and disaster-related data. Environmental Modelling and Software. 91, 111-126. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.025>.
- Rahimzadeh Z. and Habibi M., 2018. Simulation of hydrograph of flood with hydrological model HEC-HMS and prediction of return period in Kermanshah Ravansar Basin. Geography and Development Iranian Journal. 16(53), 175-194. <https://doi.org/10.22111/gdij.2018.4186>.
- Rostamzad G., Khalighi Sigaroodi, Sh. and Mahdavi, M., 2013. Comparison estimate precipitation loss methods in HEC-HMS model to simulation runoff (Case study: Kan basin). Journal of Range and Watershed Management. 66(3), 359-371. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2013.36513>.
- Rousta, I., Karampour, M., Doostkamian, M., Olafsson, H., Zhang, H., Mushore, T.D., Shiri Karimvandi, A., and Vargas, E.R.M., 2020. Synoptic-dynamic analysis of extreme precipitation in Karoun River Basin, Iran. Arabian Journal of Geosciences. 13(2), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-5101-x>.
- Schilling, K.E., Gassman, P.W., Kling, C.L., Campbell, T., Jha, M.K., Wolter, C.F. and Arnold, J.G., 2014. The potential for agricultural land use change to reduce flood risk in a large watershed. Hydrological Processes. 28(8), 3314-3325. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.9865>.
- Seluchi, M.E. and Chou, S.C., 2009. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. Theoretical and Applied Climatology. 98(1-2), 67-77. <http://dx.doi.org/10.1007/s00704-008-0101-x>.

- Shen, Y., Morsy, M.M., Huxley, C., Tahvildari, N. and Goodall, J.L., 2019. Flood risk assessment and increased resilience for coastal urban watersheds under the combined impact of storm tide and heavy rainfall. *Journal of Hydrology*. 579, 124159. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124159>
- Shestakova, A. A. and Toropov, P.A., 2020. Orographic and lake effect on extreme precipitation on the Iranian coast of the Caspian Sea: a case study. *Meteorology and Atmospheric Physics*. <https://doi.org/10.1007/s00703-020-00735-4>.
- Singh, S.V., Mooley, D.A. and Kripalani, R.H., 1978. Synoptic climatology of the daily 700 mb summer monsoon flow patterns over India. *Monthly Weather Review*. 106(4), 510-525. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1978\)106%3C0510:SCOTDM%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1978)106%3C0510:SCOTDM%3E2.0.CO;2).
- Stoleriu, C.C., Urzica, A. and Miha-Pintilie, A., 2020. Improving flood risk map accuracy using high-density LiDAR data and the HEC-RAS river analysis system: A case study from north-eastern Romania. *Journal of Flood Risk Management*. 13, 12572. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12572>.
- Tang, Z., Engel, B.A., Pijanowski, B.C. and Lim, K.J., 2005. Forecasting land use change and its environmental impact at a watershed scale. *Journal of Environmental Management*. 76(1), 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2005.01.006>.
- Teixeira, M.S. and Satyamurty, P., 2007. Dynamical and synoptic characteristics of heavy rainfall episodes in southern Brazil. *Monthly Weather Review*. 135(2), 598-617. <https://doi.org/10.1175/MWR3302.1>.
- Tymvios, F., Savvidou, K. and Michaelides, S.C., 2010. Association of geopotential height patterns with heavy rainfall events in Cyprus. *Advances in Geosciences*. 23, 73-78. <https://doi.org/10.5194/adgeo-23-73-2010>, 2010.
- Wang, Y., Chen, A.S., Fu, G., Djordjević, S., Zhang, C. and Savić, D.A., 2018. An integrated framework for high-resolution urban flood modelling considering multiple information sources and urban features. *Environmental Modelling and Software*. 107, 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.010>.
- Wu, L., Huang, R., He, H., Shao, Y. and Wen, Z., 2010. Synoptic characteristics of heavy rainfall events in pre-monsoon season in South China. *Advances in Atmospheric Sciences*. 27(2), 315-327. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-8219-z>.
- Wu, S., Jang, J., Wu, T., Lin, J. and Li, B., 2019. An evaluation of the flood diversion project d Junaidi ue to extreme rainfall event in Taipei City. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 615(1), 012061. IOP Publishing . <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/615/1/012061>.
- Yin, M.T., 1949. Synoptic-aerologic study of the onset of the summer monsoon over India and Burma. *Journal of Meteorology*. 6(6), 393-400. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1949\)006%3C0393:SASOTO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1949)006%3C0393:SASOTO%3E2.0.CO;2)

