



Determining Flood-Prone Areas Using Evidential Belief Function Model (Case Study: Silakhor Plain in Lorestan Province, Iran)

Fatemeh Falah¹, Hossein Zeinivand^{2*}, Nasser Tahmasebipour³, Ali Haghizadeh⁴

1. Department of Range & Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran.
2. Department of Range & Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran.
3. Department of Range & Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran.
4. Department of Range & Watershed Engineering, Faculty of Natural Resources, Lorestan University, Lorestan, Iran.

Received: 20 January 2024/ Revised: 15 March 2024/ Accepted: 16 March 2024

<https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2020836.1010>

Abstract

First step in reducing the destructive effects of flood is identifying flood prone areas and flood management. Flood management is one of the basic measures in water resources planning, which is used to minimize potential damages and achieve sustainable development of communities. In this study susceptible areas to flood for a 10 km reach of Silakhor River (73 km²) was mapped using Evidential Belief Function (EBF) model. For this purpose, flood points of the study area (training and testing sets), were overlaid with the maps of flood influential factors including: elevation, slope, aspect, distance from river, river density and topographic wetness index and the map of susceptible areas to flood was prepared. According to validation result (using flood points that were not used for training phase) the EBF model with AUC value of 76% is suitable for identifying prone areas to flood. Also, the results of the research showed that the elevation, the distance from the river and the drainage density are very influential factors in the region's flood proneness.

Keywords: Flooding, Silakhor, Statistical model, Validation.



تعیین مناطق مستعد سیل با استفاده از مدل تابع شواهد قطعی (مطالعه موردی دشت سیلاخور در استان لرستان)

- فاطمه فلاح^۱، حسین زینی‌وند^{۲*}، ناصر طهماسبی‌پور^۳، علی حقی‌زاده^۴
۱. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.
 ۲. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.
 ۳. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.
 ۴. گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران.

دریافت: ۳۰ دی ماه ۱۴۰۲/اصلاحات: ۲۵ اسفند ماه ۱۴۰۲/پذیرش: ۲۶ اسفند ماه ۱۴۰۲

<https://doi.org/10.22034/arwe.2024.2020836.1010>

چکیده

اولین گام در جهت کاهش آثار زیانبار سیل، شناخت مناطق مستعد بروز سیل و مدیریت سیلاب است. مدیریت سیلاب از اقدامات اساسی در برنامه‌ریزی منابع آب است که برای کمینه کردن خسارات بالقوه و رسیدن به توسعه پایدار جوامع به کار می‌رود. در این مطالعه نقشه استعداد سیل برای بازه ۱۰ کیلومتری از رودخانه سیلاخور (مساحتی برابر با ۷۳ کیلومترمربع)، به کمک مدل تابع شواهد قطعی (Evidential Belief Function (EBF)) تهیه شد. پس از روی هم‌گذاری نقاط سیل اتفاق افتاده در منطقه در گذشته بعنوان نقاط گروه آموزش و نقشه‌های عوامل موثر بر سیلگیری شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی، نقشه استعداد سیل منطقه مطالعاتی تهیه شد. بر اساس نتایج حاصل از اعتبارسنجی (استفاده از برخی از نقاط سیل اتفاق افتاده در منطقه در گذشته که در آموزش کنار گذاشته شده بودند)، مدل EBF با سطح زیر منحنی ۷۶٪ قابلیت خوبی در نمایش مناطق مستعد سیل دارد. همچنین، نتایج حاصل از تحقیق نشان داد که ارتفاع از سطح دریا، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی عوامل بسیار تاثیرگذار در استعداد سیل‌گیری منطقه هستند.

کلمات کلیدی: سیل‌گیری، مدل آماری، اعتبارسنجی، سیلاخور.

مقدمه

تجارب مطالعاتی و مدیریتی کشورهای مختلف نشان می‌دهد که اولین گام در جهت کاهش آثار زیانبار سیل، شناخت مناطق سیل گیر است تا بتوان بر اساس آن، درباره نحوه استفاده از اراضی و کاربری‌های مختلف کشاورزی، صنعتی، خدماتی و مکان‌یابی سکونتگاه‌های شهری و روستایی تصمیم‌گیری اصولی و بهینه نمود و آثار زیانبار سیل را تا حد ممکن به حداقل رسانید (Alavipanah, 2010). بنابراین تهیه نقشه‌های پهنه بندی سیلاب لازمه انجام هرگونه طرح مدیریت و مهار سیلاب در دشت‌های سیلابی است، زیرا این نقشه‌ها اطلاعات ارزشمندی از عمق و مساحت سیل‌گیری در هر پهنه سیلابی در اختیار تصمیم‌گیران قرار می‌دهند (Esmaili and Rahmani, 2014). با رشد و توسعه فناوریهای نوین، روش‌های موجود تهیه نقشه‌های پهنه بندی سیل و محیط ارائه و نمایش این نقشه‌ها نیازمند استفاده از ابزار کاراثری است. از یک سو مدل‌های ریاضی جدید و پیشرفته امکانات زیادی جهت تحلیل دقیق تر جریان سیلاب در اختیار می‌گذارند و از سوی دیگر سیستم اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) توانایی زیادی جهت تولید نقشه‌های پهنه بندی سیل و نمایش بصری آن را دارند. در صورت برقراری ارتباط مناسب بین مدل ریاضی مورد استفاده و سیستم اطلاعات جغرافیایی، امکان ایجاد تغییرات مورد نظر، اصلاح و به روزآوری این نقشه‌ها به سادگی و با صرف هزینه و زمان اندک میسر خواهد بود. چنین سیستمی توانایی قابل ملاحظه‌ای جهت مدیریت سیلاب دشت پیش از وقوع سیل و حتی مدیریت بحران و امداد و نجات در حین وقوع سیل و بازسازی پس از سیلاب در اختیار مدیران و کارشناسان مربوطه قرار می‌دهد.

آلتوانی و همکاران (Althwaynee et al., 2014) برای پهنه بندی مناطق مستعد زمین لغزش در قسمت شمالی روستای جیونگ سانگ واقع در کره جنوبی مدل‌های EBF و LR^2 را تلفیق کردند. و بیان کردند که تلفیق مدل‌ها باعث کاهش دادن محدودیت‌های هر یک از مدل‌ها می‌شود. نمپاک و همکاران (Nampak et al., 2014) برای پهنه‌بندی پتانسیل آب زیرزمینی در حوزه لانگات ریور در مالزی از مدل‌های EBF و LR استفاده کردند. نتایج مطالعات آنها نشان داد مدل EBF توانایی بیشتری نسبت به مدل LR دارد. با این وجود هر دو مدل قابلیت خوبی در پهنه بندی مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی دارند با سطح زیر منحنی ۷۸ و ۷۲ درصد. قربانی نژاد و همکاران (Ghorbani Nejad et al., 2015) در مطالعه خود به پهنه بندی مناطق مستعد پتانسیل آب زیرزمینی در دشت ازنا-الیگودرز در استان لرستان، با استفاده از مدل‌های WOE^3 و EBF پرداختند. نتایج این مطالعات حاکی از دقت بالای این مدل‌ها در پهنه بندی مناطق مستعد آب‌های زیرزمینی می‌باشد. رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2016) با استفاده از مدل سیستم تصمیم‌گیری چند معیاره و جی‌آی‌اس پهنه‌بندی خطر سیل را در یاسوج انجام دادند. آنها در مطالعه خود از پارامترهای شیب، ارتفاع، فاصله از رودخانه و کاربری اراضی/ پوشش گیاهی استفاده کردند. رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2015) مناطق مستعد سیل در استان گلستان را با استفاده از مدل‌های FR و WOE پهنه بندی کردند. نتایج نشان داد که این مدل‌ها، تخمین مناسبی از سیل حوزه هستند و نتایج تقریباً مشابهی دارند. قنواتی و همکاران (Ghanavati et al., 2014) با استفاده از تلفیق مدل هیدرولوژیکی CN و AHP در محیط GIS به پهنه بندی پتانسیل سیل خیزی در حوزه رودخانه بالخو در استان اردبیل پرداختند. نتایج پژوهش نشان داد که حدود ۵۰ تا ۴۰ درصد مساحت حوزه طی دوره‌های ۵ تا ۵۵ ساله دارای پتانسیل سیلخیزی متوسط بوده و ۵۰ تا ۶۰ درصد دارای پتانسیل زیاد می‌باشد. است. آزادی و همکاران ۱۳۹۹ با استفاده از وزن عوامل یا شواهد وزنی (WoE) و مدل شواهد قطعی (EBF) بر اساس سیستم اطلاعاتی جغرافیایی (GIS) در حوزه رودخانه کشکان نقشه حساسیت منطقه به سیلاب را بدست آوردند. سپس به منظور اعتبارسنجی نقشه‌های پیش‌بینی پتانسیل سیل خیزی، از منحنی ROC استفاده شد. نتایج حاصل از تحقیق بیانگر دقت بیشتر مدل EBF (۰/۸۷۵) نسبت به مدل WOE (۰/۸۶۱) بود.

پارسائی (Parsaie, 2021) در مطالعه خود به پهنه بندی سیلاب رودخانه ی دشت سیلاخور واقع در شهرستان بروجرد استان لرستان با استفاده از نرم افزار HEC-RAS و سیستم اطلاعات جغرافیایی GIS پرداخت. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل نرم

¹ Geographic Information System

² Logistic Regression

³ Weight of Evidence

افزار HEC-RAS توانایی بسیار مناسبی در تخمین پهنه سیلابی دارد همچنین سیستم اطلاعات جغرافیایی مبتنی بر نرم‌افزار GIS نیز قابلیت بسیار مناسبی در نمایش پهنه سیلابی دارد.

باردواج و ویراپن (Bhardwaj and Veerappan, 2023)، در مطالعه‌ای با استفاده از مدل آماری تابع قطعی شواهد (EBF) و با کمک تکنیک‌های اطلاعات جغرافیایی و ۱۲ عامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، انحنای پلان، شاخص رطوبت توپوگرافی، شاخص توان جریان، سنگ‌شناسی، نوع خاک، کاربری اراضی، پوشش زمین، بارندگی و نزدیکی به زهکش اقدام به پهنه بندی حساسیت سیل در منطقه چالاکودی تالوک در شهر تریشور در ایالت کرالا در هند نمودند. با توجه به میزان پیش بینی معیار سطح زیر منحنی (AUC)، نتایج پهنه بندی در گروه "خوب" قرار گرفت.

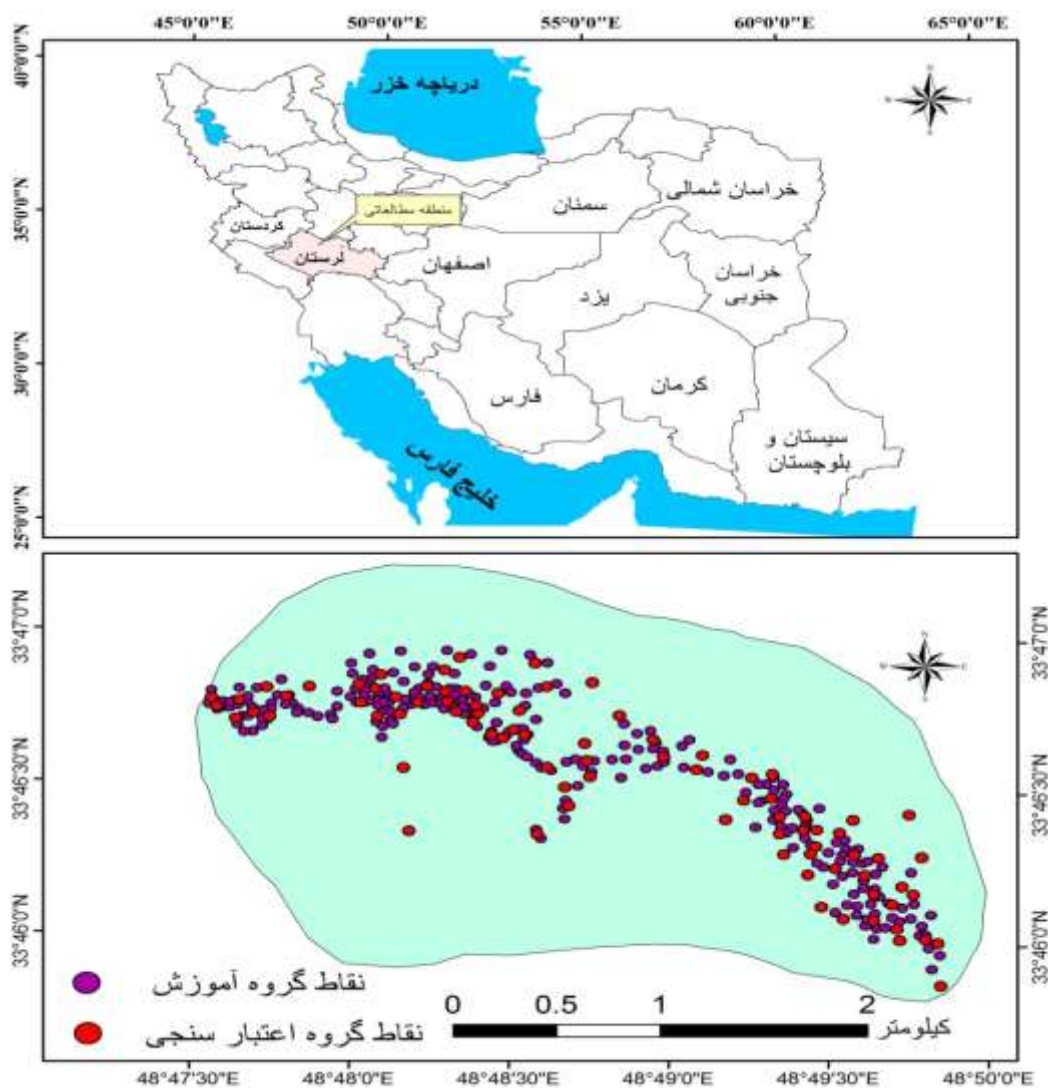
قوش (Ghosh, ۲۰۲۳) در تحقیقی با عنوان تهیه نقشه حساسیت سیل و ارزیابی آن در حوضه آبخیز حاره‌ای مانسونی با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های آماری نسبت فراوانی (RF) و توابع قطعی شواهد (EBF) و تکنیک‌های تلفیقی اقدام به تهیه نقشه حساسیت سیل در آبخیز داراکسوار در هند نمودند. آنها هم مدل‌ها را بصورت منفرد بکار بردند و هم در ترکیب با مدل رگرسیون لجستیک. در این تحقیق برای تهیه نقشه حساسیت سیل از ۱۱ فاکتور موثر استفاده شد و برای ارزیابی آن از ۱۶۲ نقطه سیل ثبت شده در منطقه استفاده کردند. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل نسبت فراوانی بالاترین دقت و روش تلفیقی نسبت فراوانی با رگرسیون لجستیک، کمترین دقت را در منطقه مورد مطالعه دارند.

استان لرستان به لحاظ قرارگیری در زاگرس میانی و شرایط زمین شناسی، آب و هوایی و هم چنین ویژگی‌های فیزیوگرافی و توپوگرافی حوزه‌های آبخیز آن از استانهای سیل خیز کشور است که طی سالیان گذشته بارها با وقوع سیلاب‌های شدید فصلی متحمل خسارات زیادی شده است. از طرفی در بالادست دشت سیلابی سیلاخور، منطقه نسبتاً بزرگ کوهستانی وجود دارد و این دشت دائماً معرض وقوع سیلاب قرار دارد. بنابراین تهیه نقشه مناطق مستعد سیل در این دشت، جهت اقدامات کاهش خسارت سیل ضروری است. به همین منظور، مطالعه حاضر با هدف بکارگیری و ارزیابی مدل EBF در تهیه نقشه مناطق مستعد سیل در بازه ۱۰ کیلومتری از رودخانه سیلاخور در استان لرستان صورت گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

دشت سیلاخور مابین شهرهای بروجرد و درود واقع در استان لرستان قرار گرفته است و با وسعتی برابر ۲۱۱۸ کیلومترمربع بخشی از حوضه آبریز کارون بزرگ در ایران است که در محدوده بین رودهای دائمی این دشت شامل سیلاخور، تیره و بیاتون است. از نظر تقسیمات زمین شناسی این ناحیه در بخش زاگرس مرتفع قرار دارد. دشت سیلاخور به دلیل وجود آب فراوان، خاک مناسب و زمین هموار، از کشاورزی پر رونقی برخوردار است. بزرگترین منبع تأمین کننده آب منطقه، آبخوان دشت سیلاخور است که از قسمت شمال غربی تا جنوب شرقی امتداد دارد و به دلیل وجود آب فراوان، خاک مناسب و زمین هموار، از کشاورزی پر رونقی برخوردار است. در این مطالعه نقشه‌های استعداد سیل برای بازه ۱۰ کیلومتری از رودخانه سیلاخور و برای منطقه‌ای به مساحت ۷۳ کیلومتر مربع که مابین عرض‌های جغرافیایی ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۸ و ۴۷ تا ۴۸ و ۵۰ درجه شرقی قرار دارد تهیه شده است. موقعیت منطقه مطالعاتی در لرستان و ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی در استان لرستان و ایران و نقاط سیل گیر مشاهداتی

Fig. 1. The location of the study area in Lorestan province and Iran and the observed flood points

مدل تابع شاهد قطعی (EBF)

آنچه سامانه های اطلاعات جغرافیایی را از سایر سامانه های بشر متمایز می سازد، به کارگیری انواع تحلیل های مکانی در مطالعه ای مربوط به زمین و محتوای آن است. به طور کلی، توابع موجود برای متخصصان این امکان را فراهم می آورد که در محیط GIS با در هم آمیختن و مقایسه کردن داده های مکانی و اطلاعات توصیفی، می تواند دقیق ترین مدل ها را از دنیای واقعی فراهم آورد. از آنجایی که سیل خیزی ناشی از برآیند عوامل مختلف محیطی می باشد، به منظور بررسی سریعتر این مهم و تاثیر گذاری عوامل مختلف می توان از مدل های مبتنی بر سیستم اطلاعات جغرافیایی استفاده کرد که در این مطالعه از مدل EBF استفاده شده است. مزیت مدل EBF نسبت به سایر روش های آماری، توانایی آن در ارزیابی اثرات همه طبقات هر عامل موثر بر سیل و ارزیابی همبستگی بین هر عامل و سیل است (Tehrany and Kumar, 2018).

برای بکارگیری مدل EBF ابتدا باید لایه های شماتیک (عوامل مؤثر بر سیل) به لایه های شاهد تبدیل شوند. بعد از آن می توان با استفاده از دانش کمی ارتباط مکانی بین سیل و عوامل مؤثر بر وقوع سیل، نقشه پهنه بندی سیل را پیش بینی کرد. مدل EBF شامل: (Bel درجه اعتماد)، (Dis درجه عدم اعتماد)، (Unc درجه عدم قطعیت) و (Pls درجه معقول بودن) می باشد. در تهیه نقشه پتانسیل بر اساس تابع شواهد قطعی از معادلات ۱ تا ۷ استفاده می شود:

$$M: 2^{\odot} = \{\emptyset, T_p, T_{\bar{p}}, \odot\} \quad \odot$$

$$= \{T_p T_{\bar{p}}\} \quad (1)$$

که در آن:

T_p تعداد پیکسل‌های تحت تاثیر سیل و $T_{\bar{p}}$ تعداد پیکسل‌هایی که تحت تاثیر سیل نمی‌باشند.

$$\lambda = (T_p)E_{ij} = \left[\frac{N(L \cap E_{ij})}{(N(E_{ij}) - N(L \cap E_{ij})/N(A) - N(L))} \right] = N/D \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Bel \\ &= \lambda(T_p)E_{ij} \\ &/ \sum \lambda(T_p)E_{ij} \end{aligned} \quad (3)$$

که $N(L \cap E_{ij})$ برابر با تراکم پیکسل‌های سیل واقع شده در E_{ij} ، $N(L)$ تراکم نقاط سیل در کل منطقه، $N(A)$ تراکم پیکسل‌ها در کل منطقه، N برابر با نسبت وقوع سیل و D نیز نسبت وقوع عدم سیل می‌باشد.

$$\begin{aligned} \lambda(T_{\bar{p}}) &= \frac{\left[\left(N(L) - \frac{N(L \cap E_{ij})}{N(L)} \right) \right]}{\left[\frac{(N(A) - N(L) - N(E_{ij}) + N(L \cap E_{ij}) + N(L \cap E_{ij}))}{(N(L) - N(E_{ij}))} \right]} \\ &= \frac{K}{H} \quad (4) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &= \frac{\left[\left(N(L) - \frac{N(L \cap E_{ij})}{N(L)} \right) \right]}{\left[\frac{(N(A) - N(L) - N(E_{ij}) + N(L \cap E_{ij}) + N(L \cap E_{ij}))}{(N(L) - N(E_{ij}))} \right]} \\ &= \frac{K}{H} \quad (4) \end{aligned}$$

$$Dis = \lambda(T_{\bar{p}}) \frac{E_{ij}}{\sum \lambda(T_{\bar{p}}) E_{ij}} \quad (5)$$

توابع ۲ و ۴ برای تمامی کلاسهای عوامل موثر بر سیل به کار برده شد و سپس معادلات ۳ و ۵ برای تهیه نقشه‌های اعتماد (Bel) و Dis (عدم اعتماد) به کار برده شد. همچنین روابط ۶ و ۷ نشان دهنده توابع عدم قطعیت (Unc) و معقول بودن (pls) می‌باشند. توابع عدم قطعیت و معقول بودن در ادامه آمده اند (Mogaji et al., 2014).

$$Unc = 1 - Dis - Bel \quad (6)$$

$$pls = 1 - Dis \quad (7)$$

نقشه‌های مورد نیاز برای اجرای مدل EBF

اطلاعات پایه مورد نیاز برای انجام مدل EBF، موقعیت نقاط سیل در دو گروه آموزش و اعتبارسنجی و نقشه‌های عوامل تاثیرگذار بر سیلاب شامل نقشه‌های، ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی می‌باشد. موقعیت نقاط سیل با توجه به مطالعات قبلی در شکل ۱ نشان داده شده است. سپس نقشه عوامل موثر بر وقوع سیلاب شامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی در محیط GIS تهیه و طبقه بندی شدند.

اعتبار سنجی مدل EBF

در این مطالعه به منظور اعتبار سنجی نقشه مناطق مستعد سیل حاصل از مدل EBF از روش منحنی ROC و برنامه Medcalc استفاده شده است. این منحنی روش کمی و گرافیکی مناسبی جهت تعیین میزان دقت مدل‌های پیش‌بینی مکانی و روش‌های داده‌کاوی محسوب می‌گردد. این روش در بسیاری از مطالعات مرتبط به منظور بررسی دقت نقشه نهایی به کار گرفته شده است (Shafapour Tehrany et al., 2015; Rahmati et al., 2015; Seihakmari et al., 2015). سطح زیر این منحنی بیانگر توانایی مدل در پیش‌بینی درست وقوع یا عدم وقوع رخداد مورد نظر است (Negnevitsky, 2002) دامنه مقادیر مختلف سطح زیر منحنی بین ۰/۵ (پیش‌بینی تصادفی) تا حداکثر ۱ (پیش‌بینی کاملاً صحیح) است (Philips et al., 2006).

تهیه نقشه‌های عوامل موثر بر وضعیت سیلاب

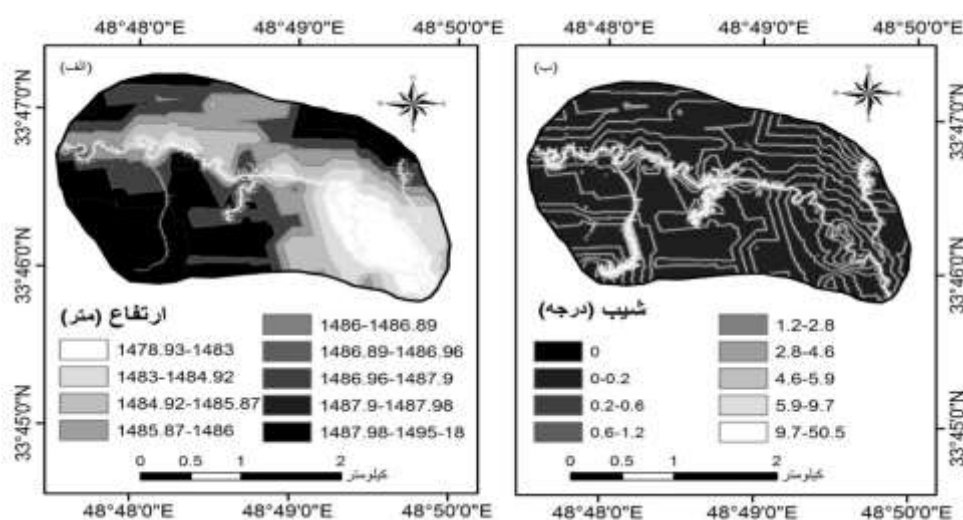
پس از بررسی مطالعات مختلف، نقشه ۹ پارامتر موثر بر سیل شامل: ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی، شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)، در محیط Arc-GIS تهیه و در کلاس‌های مختلف طبقه بندی شدند.

نقشه ارتفاع

ارتفاع یکی از مهم‌ترین عواملی است که در مطالعات مربوط به سیلاب به کار رفته است (Botzen et al., 2013). اختلافات ارتفاعی باعث ایجاد تفاوت در شرایط پوشش گیاهی و خاک و در نهایت ایجاد اقلیم‌های مختلف می‌شود (Anya, 1985). در شکل ۲ (الف) نقشه طبقات ارتفاعی محدوده مطالعاتی نشان داده شده است. کمترین و بیشترین ارتفاع در محدوده مطالعاتی به ترتیب ۱۴۷۸/۹۳ و ۱۴۹۵/۱۸ متر می‌باشد.

نقشه شیب

شیب زیاد موجب افزایش سرعت رواناب و به تبع آن کاهش نفوذ می‌شود و شیب کم باعث کاهش سرعت رواناب سطحی و افزایش نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی می‌گردد (Abdalla et al., 2012). نقشه شیب محدوده مطالعاتی با استفاده از GIS تهیه و در ۹ کلاس طبقه بندی گشت. کمترین و بیشترین شیب منطقه به ترتیب ۰ و ۵۰/۵ درجه می‌باشد (شکل ۲ ب).

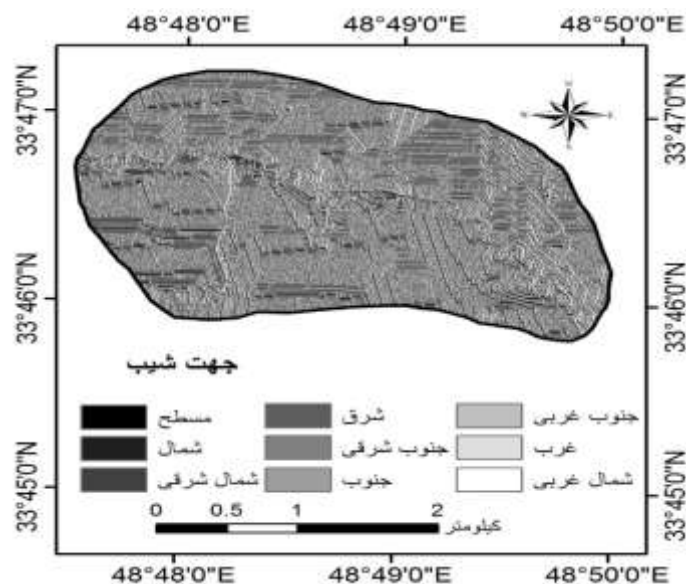


شکل ۲. نقشه (الف) ارتفاع و (ب) شیب منطقه مطالعاتی

Fig. 2. Map of (a) elevation and (b) slope of the study area

نقشه جهت شیب

جهت شیب با تاثیر آن بر میزان تبخیر و تعرق و جهت باران های جبهه ای تا حد زیادی در فرایندهای هیدرولوژیکی و در نتیجه توسعه پوشش گیاهی به ویژه در مناطق خشک موثر است (Sidle and Ochiai, 2006). نقشه جهت شیب از روی نقشه DEM و با استفاده از GIS تهیه شد. این نقشه در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. نقشه جهت شیب منطقه مطالعاتی

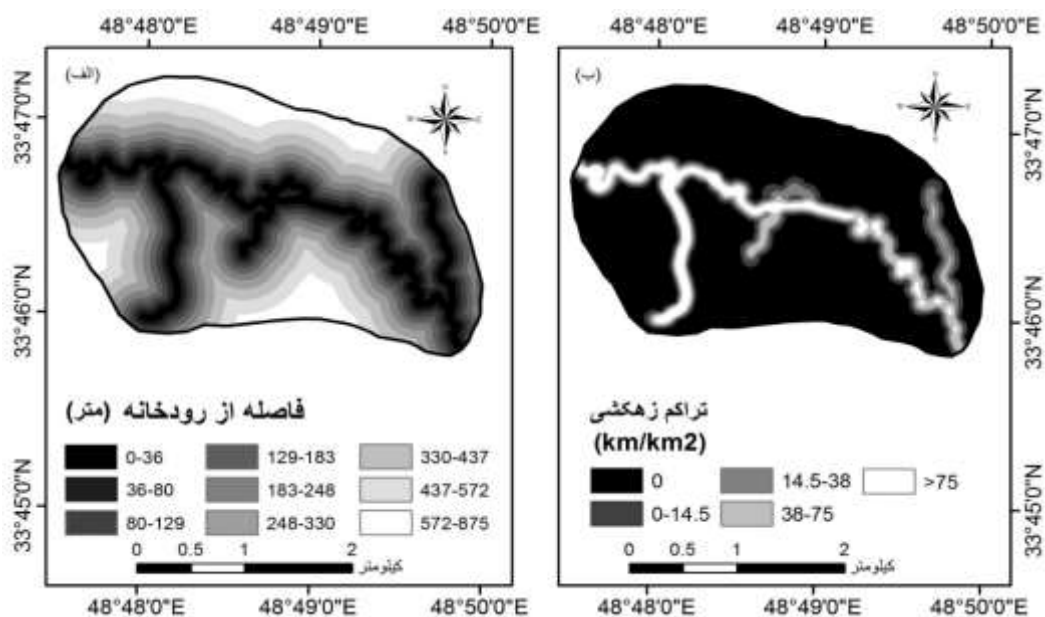
Fig. 3. Slope direction map of the study area

نقشه فاصله از رودخانه

فاصله از رودخانه یکی دیگر از عوامل موثر در بروز سیلاب است و نقش عمده ای در بزرگی سیلاب و پخش آن دارد (Fernandez and Glenn et al., 2012; Lutz, 2010). نقشه فاصله از رودخانه محدوده مطالعاتی با استفاده از ابزار فاصله اقلیدسی در محیط GIS در نه کلاس تهیه شد (شکل ۴ الف).

نقشه تراکم زهکشی

تراکم زهکشی از عواملی است که تاثیر عمده ای در بروز سیلاب دارد (Gül, 2013). الگو و تراکم شبکه زهکشی توسط سنگ‌های بستر تعیین می‌گردد. تراکم زهکشی رابطه معکوسی با میزان نفوذپذیری دارد. تراکم بالای شبکه زهکشی بیانگر تمرکز آب به صورت رواناب و کاهش نفوذ می‌باشد (Edet et al., 1998; Shaban et al., 2006). نقشه تراکم رودخانه‌های محدوده مطالعاتی با استفاده از ابزار تراکم کرنال در محیط GIS در پنج کلاس طبقه بندی شد (شکل ۴ ب).



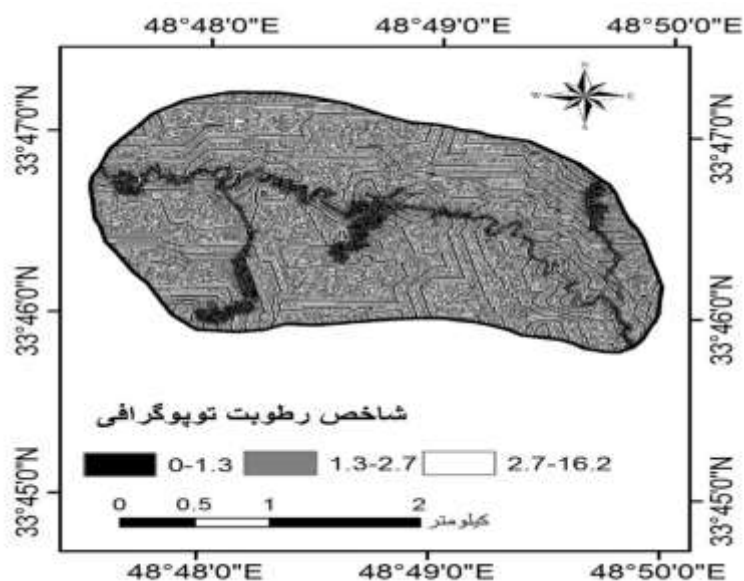
شکل ۴. نقشه (الف) فاصله از رودخانه و (ب) تراکم زهکشی منطقه مطالعاتی
 Fig. 4. Map of (a) distance from the river and (b) drainage density of the study area

نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی (TWI)

این شاخص بیانگر آن است که هر چه شیب یک منطقه بیشتر می‌شود میزان رطوبت موجود، به علت سریع‌تر از دسترس خارج شدن آب‌های سطحی، کاهش می‌یابد و در مقابل در مناطق با ارتفاع کمتر رطوبت بیشتری موجود است. شاخص مذکور از طریق رابطه ۸ به دست می‌آید:

$$TWI = \ln\left(\frac{As}{S}\right) \quad (8)$$

در این رابطه As و S به ترتیب بیانگر سطح ویژه حوزه آبخیز و درصد شیب زمین می‌باشد (Manap, 2013; Pourtaghi and Pourghasemi., 2014). در نهایت پس از تهیه نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی، این نقشه در سه کلاس طبقه‌بندی گشت (شکل ۵).



شکل ۵. نقشه شاخص رطوبت توپوگرافی منطقه مطالعاتی
 Fig. 5. Topographic humidity index map of the study area

نتایج و بحث

جهت پهنه بندی استعداد سیل با استفاده از مدل EBF، پس از تفکیک نقاط به دو گروه آموزش (۷۰ درصد = ۲۵۰ نقطه) و اعتبار سنجی (۳۰ درصد = ۸۴ نقطه)، ارزش عامل ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از رودخانه، تراکم زهکشی و شاخص رطوبت توپوگرافی به عنوان عوامل موثر انتخاب و وزن‌های به‌دست‌آمده برای هر کلاس در سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) در لایه‌های مربوطه بر اساس روابط ذکر شده در فصل (۳) اعمال و ضرایب مربوط به هر طبقه از هر لایه در مدل EBF (شامل نقشه‌های bel، unc، dis، pls) محاسبه و نتایج آنها در جدول ۱ ذکر شده است. نقشه‌های چهارگانه مدل EBF در شکل ۶ نشان داده شده است.

بر اساس نتایج حاصل از جدول ۱ با افزایش ارتفاع میزان خطر سیل کاهش می‌یابد به نحوی که بیشترین مقدار bel (۰/۵۵) در طبقه اول ارتفاعی (۱۴۷۸/۹۳ تا ۱۴۸۳ متر) مشاهده شد. نتایج حاصل از مطالعه دارایی و همکاران (Daraie et al., 2016) نیز نشان دهنده آن است که ارتفاعات پایین‌تر بیشتر در معرض خطر وقوع سیل هستند. نتایج حاصل از بررسی عامل شیب نشان داد بیشترین احتمال وقوع سیل در شیب‌های ۳۰/۱ تا ۵۰/۵ وجود دارد. این در حالی است که شفاف‌پور تهرانی و همکاران (Shafapour Tehrany et al., 2015) و دارایی و همکاران (Daraie et al., 2016) در مطالعه خود نشان دادند که بیشترین خطر وقوع سیل در نواحی با شیب‌های کمتر وجود دارد. این تضاد در نتایج به خصوصیات منطقه مطالعاتی برمی‌گردد چرا که بیشترین شیب منطقه در رودخانه و نواحی مجاور آن قرار دارد. بررسی عامل جهت شیب نشان داد بیشترین خطر سیل در نواحی شمال شرق، شرق و شمال غرب وجود دارد. بررسی رابطه عامل فاصله از رودخانه و سیلاب نشان می‌دهد که مناطق با فواصل کمتر دارای بیشترین مقدار هستند و هرچه فاصله از رودخانه بیشتر می‌شود ارزش bel کمتر می‌شود. نتایج حاصل از بررسی عامل تراکم زهکشی همچنین بیانگر رابطه قوی وقوع سیل در مناطق با تراکم زهکشی بالا دارد و هرچه این تراکم کمتر شود میزان ارزش طبقه کمتر می‌شود. رحمتی و همکاران (Rahmati et al., 2015) نیز در مطالعه خود این موضوع را تایید کردند.

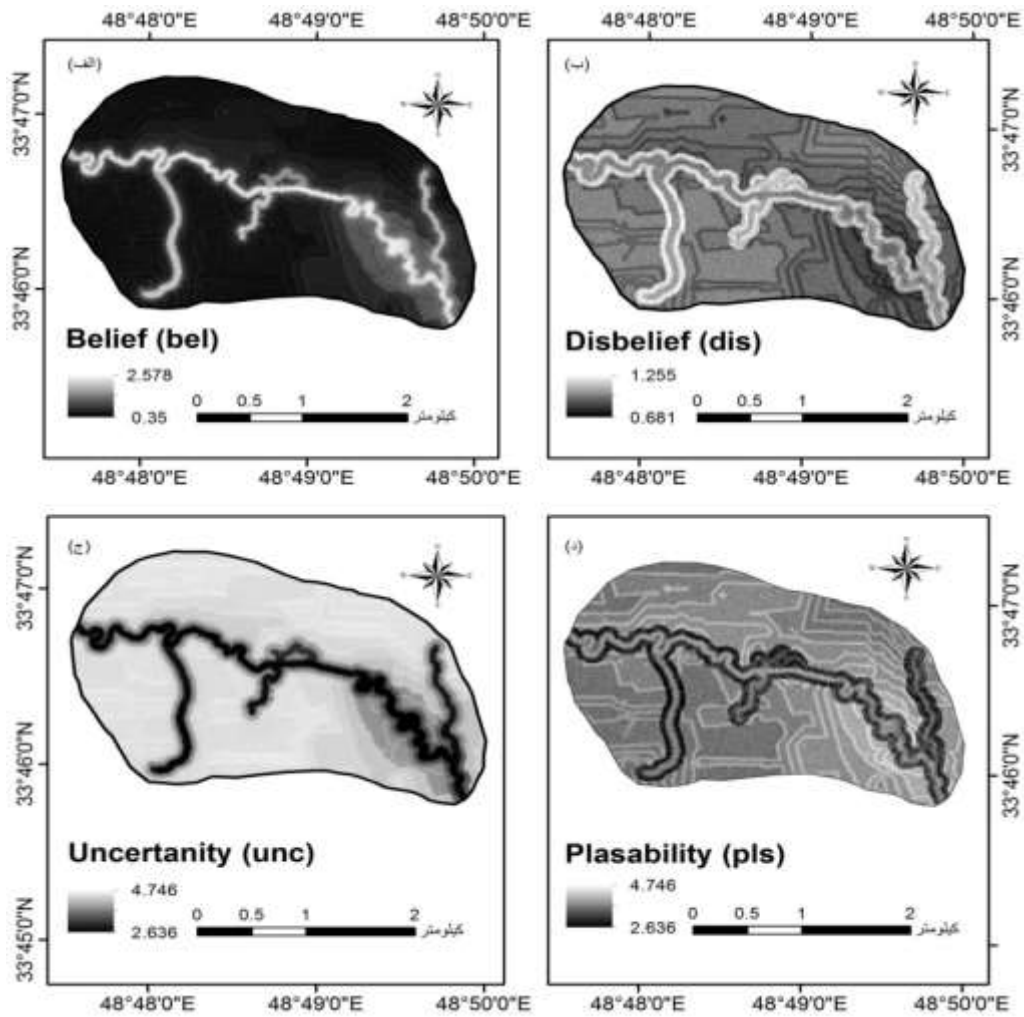
جدول ۱. تعداد پیکسل‌ها، نقاط سیل و وزن‌های حاصل از مدل‌های CF و EBF در هر طبقه از هر لایه

Table 1. Number of pixels, flood points and weights obtained from CF and EBF models in each layer

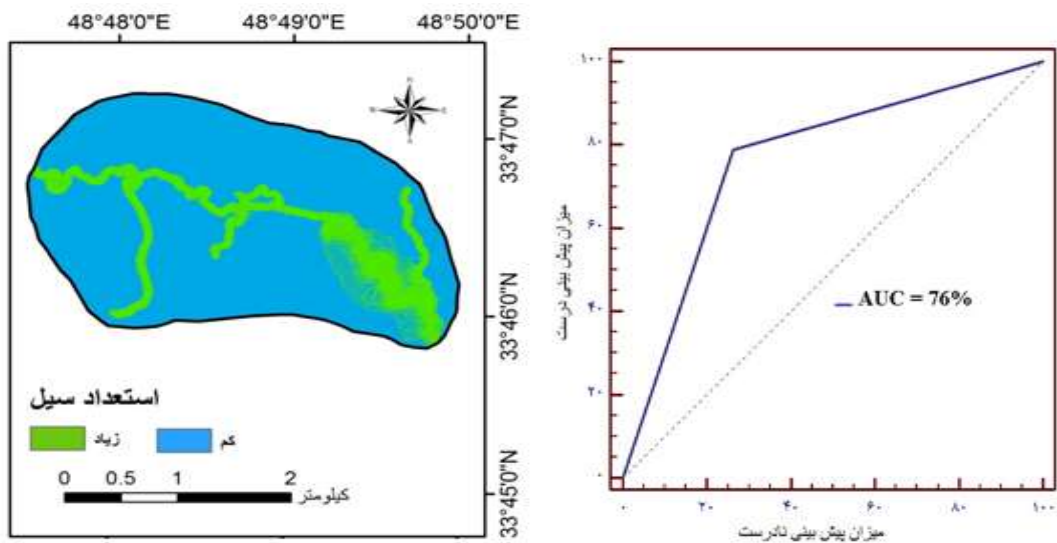
پارامتر	فاصله طبقات	تعداد نقاط در هر طبقه	تعداد پیکسل در هر طبقه	BEL	DIS	UNC	PLS
ارتفاع	1478/93-1483	135	193220	0/55	0/06	0/39	0/94
	14843-1484/92	58	213699	0/21	0/10	0/69	0/90
	1484/92-1485/87	35	215662	0/13	0/11	0/76	0/89
	1485/87-1486	18	201735	0/07	0/11	0/81	0/89
	1486-1486/89	4	95001	0/03	0/11	0/85	0/89
	1486/89-1486/96	0	20093	0/00	0/11	0/89	0/89
	1486/96-1487/9	0	323432	0/00	0/13	0/87	0/87
	1487/9-1487/98	0	10345	0/00	0/11	0/89	0/89
	1487/98-1495/18	0	553785	0/00	0/16	0/84	0/84
شیب	۱-۰/۴	1	6501	0/08	0/11	0/82	0/89
	۱/۴-۴/۲	77	1089459	0/03	0/18	0/78	0/82
	۴/۲-۲/۳	23	160057	0/07	0/11	0/82	0/89
	۷/۱۱-۳/۱	18	142439	0/06	0/11	0/83	0/89
	۱۱/۱۵-۱/۲	27	97860	0/14	0/10	0/76	0/90
	۱۵/۱۹-۲/۶	15	86468	0/08	0/10	0/81	0/90
	۱۹/۲۴-۶/۴	13	72005	0/09	0/10	0/81	0/90
	24/4-30/1	27	94983	0/14	0/10	0/76	0/90
	>30/1	49	77200	0/31	0/09	0/60	0/91
جهت شیب	مسطح	1	6501	0/12	0/11	0/77	0/89
	شمال	30	310841	0/08	0/12	0/81	0/88
	شمال شرقی	32	184078	0/14	0/11	0/76	0/89
	شرق	46	252978	0/14	0/11	0/75	0/89
	جنوب شرقی	25	161574	0/12	0/11	0/77	0/89

	جنوب	36	316351	0/09	0/11	0/80	0/89
	جنوب غربی	18	188252	0/07	0/11	0/81	0/89
	غرب	35	245714	0/11	0/11	0/78	0/89
	شمال غربی	27	160683	0/13	0/11	0/76	0/89
فاصله از رودخانه	0-36	159	203580	0/64	0/05	0/32	0/95
	36-80	42	203167	0/17	0/10	0/73	0/90
	80-129	22	202926	0/09	0/11	0/80	0/89
	129-183	9	202959	0/04	0/12	0/84	0/88
	183-248	8	202980	0/03	0/12	0/85	0/88
	248-330	6	202880	0/02	0/12	0/85	0/88
	330-437	3	202836	0/01	0/12	0/86	0/88
	437-572	1	202825	0/00	0/12	0/87	0/88
	>572	0	202819	0/00	0/12	0/88	0/88
تراکم زهکشی	0	46	1384510	0/02	0/02	0/96	0/98
	0-15	20	141569	0/07	0/22	0/71	0/78
	15-39	28	99846	0/14	0/30	0/56	0/70
	39-76	52	101719	0/25	0/26	0/48	0/74
	>76	104	99328	0/52	0/20	0/28	0/80
شاخص رطوبت توپوگرافی	0-1/3	80	570786	0/36	0/32	0/33	0/68
	1/3-2/7	66	691370	0/22	0/40	0/38	0/60
	2/7-16/2	104	564816	0/42	0/29	0/30	0/71

بر اساس پارامتر شاخص رطوبت توپوگرافی بیشترین وزن به طبقه با بیشترین شاخص رطوبت توپوگرافی تعلق گرفت. نتایج حاصل از مطالعه شفاپور تهرانی و همکاران (Shafapour Tehrany et al., 2015) نیز حاکی از آن است که بیشترین خطر وقوع سیل در مناطق با بیشترین شاخص توپوگرافی وجود دارد. به طور کلی با توجه به اینکه بر اساس روابط آماری ارائه شده در مدل های مذکور، به عواملی که در رخداد سیل تأثیر بیشتری داشته باشند وزن بیشتری اختصاص می‌یابد می‌توان اظهار داشت که عوامل محیطی از جمله ارتفاع از سطح دریا (۱۴۷۸/۹۳- ۱۴۸۳)، فاصله از رودخانه (۰ تا ۳۶ متر)، تراکم زهکشی (>76) (کیلومتر/ کیلومتر مربع) تأثیر بسیار قوی در پتانسیل و استعداد سیل‌گیری دارند و روند معنی داری بین افزایش دامنه طبقات و استعداد وجود دارد به نحوی که با افزایش ارتفاع، کاهش فاصله از رودخانه و افزایش تراکم زهکشی میزان استعداد سیل افزایش می‌یابد. پس از ترکیب لایه‌ها، نقشه نهایی استعداد سیل در دو طبقه استعداد سیل کم و زیاد تهیه شد (شکل ۷ الف) و بر اساس نتایج **Error! Reference source not found.** ۱۶/۰۵ درصد از مساحت محدوده مطالعاتی در کلاس استعداد سیل زیاد قرار دارد. بر اساس نتایج حاصله از اعتبار سنجی، مدل EBF با سطح زیر منحنی ۷۶ درصد (شکل ۷ ب) قابلیت خوبی در نمایش مناطق سیلگیر دارد.



شکل ۶. نقشه‌های حاصل از مدل EBF از (الف) bel، (ب) dis، (ج) unc و (د) pls در منطقه مطالعاتی
 Fig. 6. Maps resulting from the EBF model (a) bel, (b) dis, (c) unc and (d) pls in the study area



شکل ۷. (الف) نقشه استعداد سیل حاصل از مدل EBF و (ب) منحنی ROC
 Fig. 7. (a) Flood susceptibility map resulting from EBF model and (b) ROC curve

نتیجه گیری

سیل یکی از پدیده های مخرب و پیچیده طبیعی است که هر ساله خسارات فراوانی را به دنبال دارد. سیلاب دشت و مناطق مجاور رودخانه ها که بیشتر فعالیت های اقتصادی و اجتماعی در آنها صورت می گیرد، پیوسته در معرض خطر سیل قرار دارند و ضروری است که در اینگونه مناطق نقشه های پهنه بندی سیل تهیه شوند. در این مطالعه نقشه استعداد سیل برای بازه ۱۰ کیلومتری از رودخانه سیلاخور در دشت سیلاخور به کمک مدل EBF تهیه شد. بدین منظور از ۶ عامل موثر بر سیل برای اجرای مدل استفاده شد و پس از روی هم گذاری این لایه ها و نقاط گروه آموزش، نقشه استعداد سیل در ۲ کلاس کم (۸۳/۹۵) و زیاد (۱۶/۰۵) تهیه شد. در نهایت، نقشه ی نهایی پتانسیل سیل خیزی حاصله، با استفاده از نقاط گروه اعتبار سنجی و منحنی ROC سنجیده شد. نتایج حاکی از دقت ۷۶ درصدی مدل در نشان دادن نقشه های مستعد سیل می باشد. به طور کلی نتایج حاصل از تحقیق بیانگر آن است که ارتفاع از سطح دریا، فاصله از رودخانه و تراکم زهکشی عوامل بسیار تاثیرگذار در استعداد سیل گیری منطقه هستند و روند معنی داری بین افزایش دامنه طبقات و استعداد سیل خیزی وجود دارد به گونه ای که با افزایش ارتفاع، کاهش فاصله از رودخانه و افزایش تراکم زهکشی، پتانسیل سیل خیزی منطقه افزایش می یابد.

بنابراین با توجه به بالا بودن حجم اطلاعات به واسطه ی تعدد عوامل مختلف اثرگذار در ایجاد سیلاب، استفاده از تکنیک های تلفیقی GIS و مدل های داده کاوی می تواند سرعت پردازش اطلاعات را افزایش و منجر به برنامه ریزی دقیق تری در اجرای طرح های خسارت سیل شود. همچنین پیشنهاد می شود پهنه سیلاب با دوره های برگشت مختلف مشخص شده و میزان و درصد مناطق مستعد سیل تعیین گردد.

منابع

- Abdalla F. (2012). Mapping of groundwater prospective zones using remote sensing and GIS techniques, A case study from the Central Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 70(70), 8–17.
- Alavi Panah, S. K. (2012). *Application of remote sensing in earth science*, Tehran University Publications.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., & Lee, S. (2012). Application of an evidential belief function model in landslide susceptibility mapping. *Comput Geosci*. 44:120–135.
- Althuwaynee, O. F., Pradhan, B., Park, H. J., & Lee, J. H. (2014). A novel ensemble bivariate statistical evidential belief function with knowledge-based analytical hierarchy process and multivariate statistical logistic regression for landslide susceptibility mapping. *Catena*, 114, 21–36.
- Azadi, F., Sadough, S. H., Ghahroudi, M., & Shahabi, H. (2019). Zoning of flood risk in Kashkan River basin using two models WOE and EBF. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 9(1), 45-60.
- Bhardwaj, S., & Veerappan, R. (2023). *Flood Susceptibility Zonation Using Dempster-Shafer Evidential Belief Function (EBF) Method in Chalakudy Taluk, Kerala, India. In Impacts of Urbanization on Hydrological Systems in India (pp. 79-109)*. Cham: Springer International Publishing.
- Botzen, W. J., Aerts, J. C. J. H., & Van den Bergh, J. C. J. M. (2013). Individual preferences for reducing flood risk to near zero through elevation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 18, 229-244.
- Daraie, H., Shahedi, K., & Moradian, M. (2016). Preparation of flood risk probability and sensitivity maps using the frequency ratio method in Shazand Doab Bridge watershed, *Journal of watershed engineering and management*, 8(1), 68-79. (In Persian).
- Edet, A.E., Okereke, C.S., Teme, S.C., & Esu, E.O. (1998). Application of remote sensing data to groundwater exploration: A case study of the Cross River State, Southeastern Nigeria, *Journal of Hydrogeology*, 6(3), 394-404.
- Esmaili, F., & Rahmani, S., (2013). Flood zoning using GIS and mathematical models with the aim of flood management, case study, Gavi River, Ilam province. *International Bulletin of water resources and development*, 2(5), 62-73 (In Persian).
- Fernández, D.S., & Lutz, M.A. (2010). Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. *Eng Geol*, 111, 90–98.
- Ghanaati, E., Safari, A., Beheshti Jai, E., & M. (2013). Flood potential zoning using the integration of CN and AHP hydrological model in GIS environment, case study: Balkhlo river basin, *Natural Geography Quarterly*, 7(52).
- Ghorbani Nejad, S., Falah, F., Daneshfar, M., Haghizadeh, A., & Rahmati, O. (2015). Delineation of groundwater potential zones using remote sensing and GIS-based data-driven models. *Geocarto international*, 32(2), 167-187.
- Ghosh, B. (2023). Flood susceptibility assessment and mapping in a monsoon-dominated tropical river basin using GIS-based data-driven bivariate and multivariate statistical models and their ensemble techniques. *Environmental Earth Sciences*, 82(1), 28.

- Glenn, E., Morino, K., Nagler, P., Murray, R., Pearlstein, S., Hultine, K. (2012). Roles of saltcedar (*Tamarix* spp.) and capillary rise in salinizing a non-flooding terrace on a flow-regulated desert river. *J Arid Environ.* 79, 56–65.
- Gül, GO. (2013). Estimating flood exposure potentials in Turkish catchments through index-based flood mapping. *Nat Hazards*, 69, 403–423.
- Manap, M.A., Sulaiman, W.N.A., Ramli, M.F., Pradhan, B., & Surip, N. (2013). A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arabian journal of Geosciences*, 6, 1621–1637.
- Mogaji, K.A., Lim, H.S., & Abdullah, K. (2014). Regional prediction of groundwater potential mapping in a multifaceted geology terrain using GIS-based Dempster-Shafer model. *Arabian journal of Geosciences*, 8, 3235–3258.
- Nampak, H., Pradhan, B., & Manap, M.A. (2014). Application of GIS based data driven evidential belief function model to predict groundwater potential zonation. *Journal of hydrology*, 513, 283-300
- Negnevitsky, M. (2002). *Artificial intelligence-a guide to intelligent systems*. Great Britain: Addison-Wesley.
- Parsaie, A. (2021). Flood Zoning Using HEC-RAS and GIS Software (Case Study of Silakhor Plain River, Lorestan Province). *Journal of Science and Technology Construction*, 2(2), 1-10
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.
- Pourtaghi, Z. S., & Pourghasemi, H. R. (2014). GIS-based groundwater spring potential assessment and mapping in the Birjand Township, southern Khorasan Province, Iran. *Hydrogeol J*, 22(3), 643-662.
- Rahmati, O., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2015). Flood susceptibility mapping using frequency ratio and weights-of-evidence models in the Golastan Province, Iran. *Geocarto International*, 31(1), 42-70.
- Rahmati, O., Zeinivand, H., & Besharat, M. (2016). Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 1000-1017.
- Shaban, A., Khawlie, M., & Abdallah, C. (2006). Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. *Hydrogeology Journal*, 14, 433-443.
- Shafapour Tehrany, M. S., Lee, M.J., Pradhan, B., Neamah Jebur, M., & a Lee, S. (2014). Flood susceptibility mapping using integrated bivariate and multivariate statistical models. *Environ Earth Sci*, 72, 4001-4015.
- Shafapour Tehrany, M. S., Pradhan, B., & Jebur, M. N. (2013). Spatial prediction of flood susceptible areas using rule based decision tree (DT) and a novel ensemble bivariate and multivariate statistical models in GIS. *Journal of hydrology*, 504, 69-79.
- Siah Kamari, S. (2014). Comparing the effectiveness of abundance ratio and maximum entropy models in preparing maps of flood-prone areas (case study: Madarso watershed in Golestan province), Master's thesis, Lorestan University.
- Sidle, R., & Ochiai, H. (2006). *Processes, prediction, and land use*. Water resources monograph. American Geophysical Union, Washington, 525.
- Tehrany, M. S., & Kumar, L. (2018). The application of a Dempster–Shafer-based evidential belief function in flood susceptibility mapping and comparison with frequency ratio and logistic regression methods. *Environmental Earth Sciences*, 77, 1-24.