

## تحلیل ریسک سیلاب شهری بندرعباس با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و تحلیل

## سلسله مراتبی

یوسف احمدی: دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، پردیس قشم، دانشگاه هرمزگان

ام‌البنین بذرافشان\*: دانشیار گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان

علی سلاجقه: استاد گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی کرج، دانشگاه تهران

ارشک حلی‌ساز: استادیار گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

علی آذره: استادیار، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه جیرفت

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱/۲۸

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۲)

## چکیده

توسعه‌ی مناطق شهری و روستایی، تبدیل اراضی و بهره‌برداری بیش از ظرفیت منابع طبیعی در دهه‌های اخیر، به تغییر در خصوصیات هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز و در پی آن، تغییر در رژیم هیدرولوژیکی رودخانه‌ها منجر شده است. این تغییر به ایجاد رواناب بیش از حد ظرفیت رودخانه نیز منجر شده که به صورت سیلاب‌های مخرب دیده می‌شود. در این مطالعه، تحلیل ریسک سیلاب شهری بندرعباس با استفاده از دو مدل یادگیری ماشینی پیشینه بی‌نظمی و ماشین‌بردار پشتیبان، و تحلیل سلسله مراتبی صورت گرفت. در تحقیق حاضر از شش عامل مؤثر بر سیلاب شهری شامل ارتفاع، شیب، فاصله از سطح ایستابی، ظرفیت انتقال آب، فاصله از خور و فاصله از شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب سطحی استفاده شد. از مجموع ۹۸ موقعیت آب‌گرفتگی، به صورت تصادفی ۷۰ درصد به عنوان داده‌های آزمون و ۳۰ درصد به عنوان داده‌های اعتبارسنجی طبقه‌بندی شد. نتایج حاصل از به کارگیری دو مدل در تحلیل خطر سیلاب بر اساس منحنی ROC در هر دو بخش آموزش ( $AUC: 0.987$ ) و اعتبارسنجی ( $AUC: 0.948$ )، نشان داد که مدل یادگیری ماشینی نسبت به مدل پیشینه بی‌نظمی دقت بیشتری دارد. برای تحلیل آسیب‌پذیری سیل و تعیین پارامتر مؤثر بر سیلاب شهری، از تحلیل سلسله مراتبی AHP استفاده شد. نتایج تحلیل آسیب‌پذیری نشان داد که عامل تراکم جمعیت دارای بیشترین اهمیت است. در نهایت، تحلیل جامع ریسک آب‌گرفتگی اثبات کرد که بخش‌های جنوبی و مرکزی شهر بندرعباس، ریسک آب‌گرفتگی زیادی دارند و این بخش‌ها برای مدیریت رواناب شهری و آب‌گرفتگی در اولویت بالایی هستند. توسعه‌ی فضای سبز و افزایش ظرفیت سیستم جمع‌آوری رواناب خیابان‌ها، از جمله اقدامات مهم برای کاهش ریسک آب‌گرفتگی شهری است. همچنین توزیع مکانی تراکم جمعیتی و تراکم شهری در بندرعباس، نامتوازن بود و این موضوع باید در برنامه‌های مدیریتی این شهر لحاظ شود تا میزان تمرکز جمعیتی در مناطق دارای ریسک زیاد کاهش یابد.

واژگان کلیدی: آسیب‌پذیری سیلاب، پیش‌بینی مکانی، ماشین‌بردار پشتیبان، مدل پیشینه بی‌نظمی.

## ۱- مقدمه

سیل یکی از رویدادهای طبیعی است که هر ساله به تلفات انسانی و خسارت به ساختمان‌ها، تأسیسات، باغ‌ها، کشتزارها و منابع طبیعی منجر می‌شود. از میان پدیده‌های طبیعی می‌تواند بزرگ‌ترین عامل خسارت باشد که همواره زندگی، اموال و دارایی‌های افراد بی‌شماری را در خطر قرار می‌دهد. باید از طریق پهنه‌بندی سیلاب در شهرها، افزایش خسارت‌های ناشی از سیل را در تغییر هر یک از جنبه‌های زندگی بشر بررسی کرد، سپس مناطقی را که احتمال خسارت زیادی دارند، تعیین و تمهیدات کنترل سیلاب را در نظر گرفت. همچنین مسیرهای مطمئن برای امداد رسانی و مکان‌های امن برای اسکان مردم را شناسایی کرد (Paul et al., 2019).

شهرنشینی با دخالت غیر مستقیم در حوزه‌های آبخیز به برهم زدن تعادل دامنه‌ها، از بین بردن پوشش گیاهی، فشردگی خاک و تغییر در نیمرخ آبراهه‌ها منجر می‌شود، شدت سیلاب‌ها را افزایش می‌دهد و حجم رسوب تولیدی را بالا می‌برد. در دامنه‌ی کوه نیز که قلمرو گسترش بافت فیزیکی شهر را شامل می‌شود، الگوی زهکشی طبیعی را برهم می‌زند و خطر سیلاب‌های شهری را بیشتر می‌کند (Hosseinzadeh, 2004). سیل گرفتگی شهرها و خسارات و زیان‌های فیزیکی (تخریب ساختمان‌ها، معابر عمومی و زیرساخت‌ها)، صرف هزینه‌های اضطراری و خسارت وارد شده بر بهداشت و سلامت مردم، نمونه‌ای از مشکلات برآمده از وقوع سیلاب‌ها است. طی سالیان اخیر به دلیل گسترش شهرها، پدیده‌ی سیلاب چهره‌ی جدیدی پیدا کرده و تحت عنوان سیلاب شهری، در مطالعات شهری جایگاهی جدید و والا یافته‌است (Ghahroodi Taloodi, 2009). وسعت حوضه‌های آبخیز مشرف به شهر بندرعباس، سطح قابل توجهی را به خود اختصاص می‌دهد و جهت زهکشی عمومی این حوضه‌ها نیز به صورت کامل به سمت محدوده‌ی شهری است. در این راستا، سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)<sup>۱</sup> به همراه مدل‌ها ابزارهایی کلیدی است که با داشتن مدل‌سازی و برخی آنالیزها، در کنترل سیلاب‌ها مؤثر است (Roostayi, 2008).

در این زمینه، مطالعات متعددی در داخل و خارج کشور صورت گرفته‌است؛ برای مثال، Choubin و همکاران (۱۳۹۸) از مدل‌های تجزیه و تحلیل تمایز چند متغیره (MDA)<sup>۲</sup>، درختان طبقه‌بندی و رگرسیون (CART)<sup>۳</sup>، همراه با الگوریتم پرکاربرد و ماشین‌بردار پشتیبانی (SVM)<sup>۴</sup>، برای ایجاد نقشه‌ی حساسیت به سیل در حوزه‌ی آبخیز خیابان-چای استان اردبیل استفاده کردند. نتایج نشان داد که مدل MDA نسبت به مدل‌های SVM و CART، از بالاترین دقت پیش‌بینی برخوردار است. Ghalesari و همکاران نیز در سال ۱۳۹۹ پژوهشی را با استفاده از مدل بردار پشتیبان و GIS در حوزه‌ی نکارود انجام دادند. این پژوهش با هدف شناسایی مناطق حساس به سیل‌گیری انجام شد که در آن نگارنده با اشاره به کمبود اطلاعات در اکثر حوزه‌ها، لزوم استفاده از تکنیک داده‌کاوی را برای مطالعات هیدرولوژی توجیه می‌کرد. نامبرده با بهره‌گیری از GIS و ENVI<sup>۵</sup>، ۱۲ پارامتر هیدرولوژیک ژئومورفولوژی و فیزیوگرافی را استخراج و به همراه نقاط برداشت شده توسط GPS، همه‌ی متغیرها را با فرمت ASCII و اندازه پیکسل یکسان به نرم-افزار R وارد کرد. نتایج ارزیابی نشان داد که مدل SVM در شناسایی پهنه‌های سیلاب به خصوص در مناطق با تمرکز

<sup>۱</sup> Geography Information System

<sup>۲</sup> Multivariate Diference Analysis

<sup>۳</sup> Classification and Regression Tree (CART) models

<sup>۴</sup> Support Vector Machine

<sup>۵</sup> Environment for Visualizing Images

سکونت گاه انسانی، دقت بیشتری دارد و در آن مناطق، حساسیت به سیل گیری بیشتر است. در همین سال Vafakhah و همکاران (۱۳۹۹) به منظور پهنه بندی خطر سیل در استان گیلان، از مدل های نسبت فراوانی (FR)<sup>۱</sup>، سیستم استنتاج عصبی فازی تطبیقی (ANFIS) و مدل های جنگل تصادفی (RF)<sup>۲</sup> استفاده کردند. نتایج اعتبارسنجی مدل ها نشان داد که مدل جنگل تصادفی نسبت به دو مدل دیگر، در پهنه بندی سیلاب کارایی مناسب تری دارد. Chen و همکاران (۲۰۰۹)، به توسعه و تست یک مدل آبگرفتگی سیلاب شهری بر پایه ی GIS در یک منطقه ی شهری پرداختند. این مدل از دو جزء تشکیل شده است: مدل بارش - رواناب و مدل آبگرفتگی. رواناب سطحی تجمعی که خروجی مدل بارش رواناب است، به عنوان ورودی به مدل آبگرفتگی وارد می شود. مدل بارش - رواناب، مدل Green-Ampt را برای محاسبه ی نفوذ - که بر پایه ی خصوصیات بارندگی، خصوصیات خاک و سازه های زهکشی موجود استوار است - سازگاری می کند. پایه ی مدل آبگرفتگی، مدل آب مسطح است. این تحقیق از داده های ارتفاعی در دسترس، داده های بارش و داده های جمع آوری شده ی سیلاب های قبلی به منظور توسعه، اجرا و ارزیابی رویکرد مدل استفاده کرده است. Sahana و همکاران (۲۰۲۰) به منظور مدل سازی سیلاب در منطقه ی Sundarban هند، از روش نسبت فراوانی متعارف، نسبت فروانی اصلاح شده و ماشین بردار پشتیبان استفاده کردند. نتایج آنان نشان داد که مدل ماشین بردار پشتیبان نسبت به دو روش دیگر، در مدل سازی سیل نتیجه ی بهتری دارد. Castache و همکاران (۲۰۲۰) برای پیش بینی مناطق مستعد سیل در حوضه آبریز رودخانه بوزاو (رومانی)، ترکیب جدیدی از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)<sup>۳</sup>، شاخص آنتروپی (IoE)<sup>۴</sup> و ماشین بردار پشتیبان (SVM) معرفی کردند. نتایج به دست آمده از پژوهش آنها نشان داد که همه ی مدل های هیبریدی نسبت به مدل های مستقل، عملکرد پیش بینی بالایی دارند.

آنالیزهای تصمیم گیری چندمعیاره، ابزاری مفید برای حل مسائل تصمیم گیری پیچیده است که اغلب به معیارها و داده های غیرقابل مقایسه نیاز دارد (Hwang and Yoon, 1981). محققان از ترکیب این روش ها با GIS به طور قابل توجهی به ویژه در خصوص سیل استفاده کرده اند (Jaffari et al, 2014 & Paquette and Lowry Fernandez, 2012). Shahiri و Fernandez در سال ۲۰۱۰ از AHP برای تهیه ی نقشه ی پتانسیل سیلاب در آرژانتین استفاده کردند. Tabarestani و Zokaei در سال ۲۰۲۰ به تحلیل سیل استان مازندران با استفاده از روش AHP پرداختند. نتایج نشان داد میزان خطر سیل خیزی در هر یک از ایستگاه های هیدرومتری، با مشاهدات واقعی تعداد سیلاب ها - که عمدتاً با دوره ی بازگشت ۵۰ و ۱۰۰ سال بود - تا حد مطلوبی منطبق است. این موضوع دقت بالای روش AHP و صحت وزن های تخصیص یافته به عوامل مؤثر را نشان می دهد و قابلیت بهره برداری از نتایج پژوهش برای اقدامات پیشگیرانه ی آتی را روشن می سازد.

شهر بندرعباس از یک سو به دلیل موقعیت جغرافیایی، رژیم بارندگی رگباری با شدت بالا و مدت کوتاه، نحوه ی استقرار و رشد و توسعه ی چشمگیر به ویژه طی دهه ی اخیر، با معضل سیلاب مواجه است. از سوی دیگر، پهنه بندی خطر سیلاب با هدف به کارگیری در برنامه ریزی و مدیریت کنترل و مهار سیل تاکنون در شهر بندرعباس قابل توجه نبوده و در قالب طرح تحقیقاتی نیز فعالیت چندانی در این زمینه صورت نگرفته است (Saremi et al, 2018)؛ بنابراین هدف

<sup>1</sup> Frequency Ratio

<sup>2</sup> Random Forest

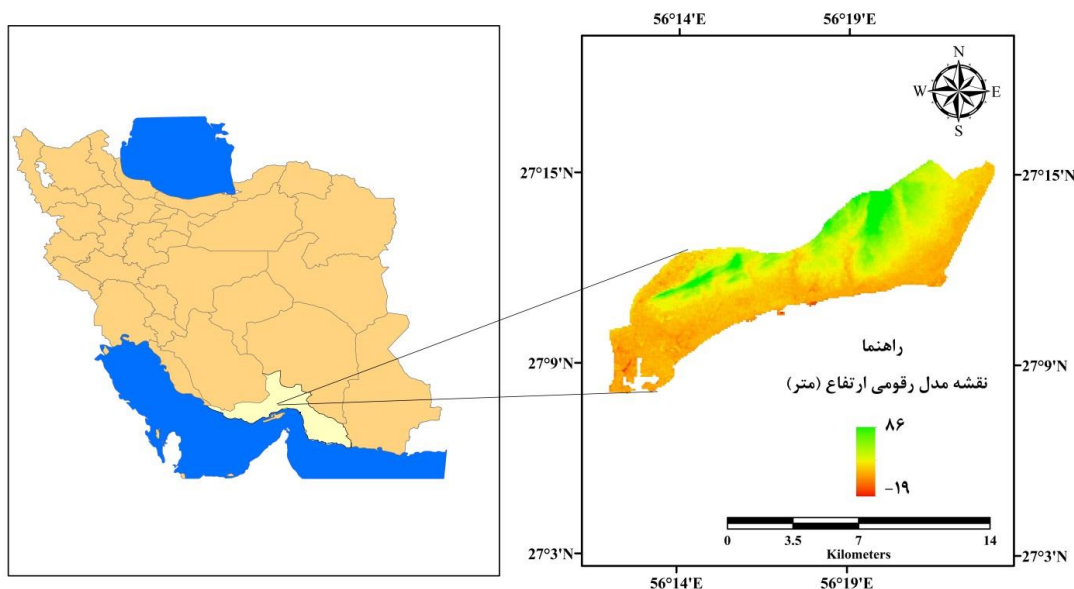
<sup>3</sup> Fuzzy Analytic Hierarchy Process

<sup>4</sup> Index of Entropy

از این مطالعه، بررسی ریسک سیلاب شهر بندرعباس با استفاده از مدل‌های ماشین بردار پشتیبان، بیشینه بی‌نظمی و تحلیل ریسک سیلاب با روش تحلیل سلسله مراتبی است. به منظور پیش‌بینی دامنه‌ی خسارات ناشی از سیلاب در شرایط مختلف و توجیه اقتصادی و اجتماعی برنامه‌های کنترل و مهار سیلاب، پهنه‌بندی خطر سیل ضروری به نظر می‌رسد؛ از این رو، مدل‌سازی خطر و تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری سیل می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های آتی، مدیریت سیل‌خیزی و آمایش سرزمین در منطقه‌ی مورد مطالعه نقش به‌سزایی داشته باشد.

## ۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

حوزه‌ی آبخیز شهری بندرعباس با مساحتی بالغ بر ۳۷۹ کیلومترمربع، در جنوب استان هرمزگان و حاشیه‌ی خلیج فارس واقع شده‌است. ارتفاع این حوزه از سطح دریا به طور متوسط ۴۰ متر است. این حوزه ۵ زیرحوزه و به عبارتی ۵ آبراهه‌ی اصلی و موقتی در سطح حوزه آبخیز دارد که جهت همگی آنها از شمال به جنوب است و به دریا ختم می‌شود (Saremi et al, 2018).



شکل ۱: موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه

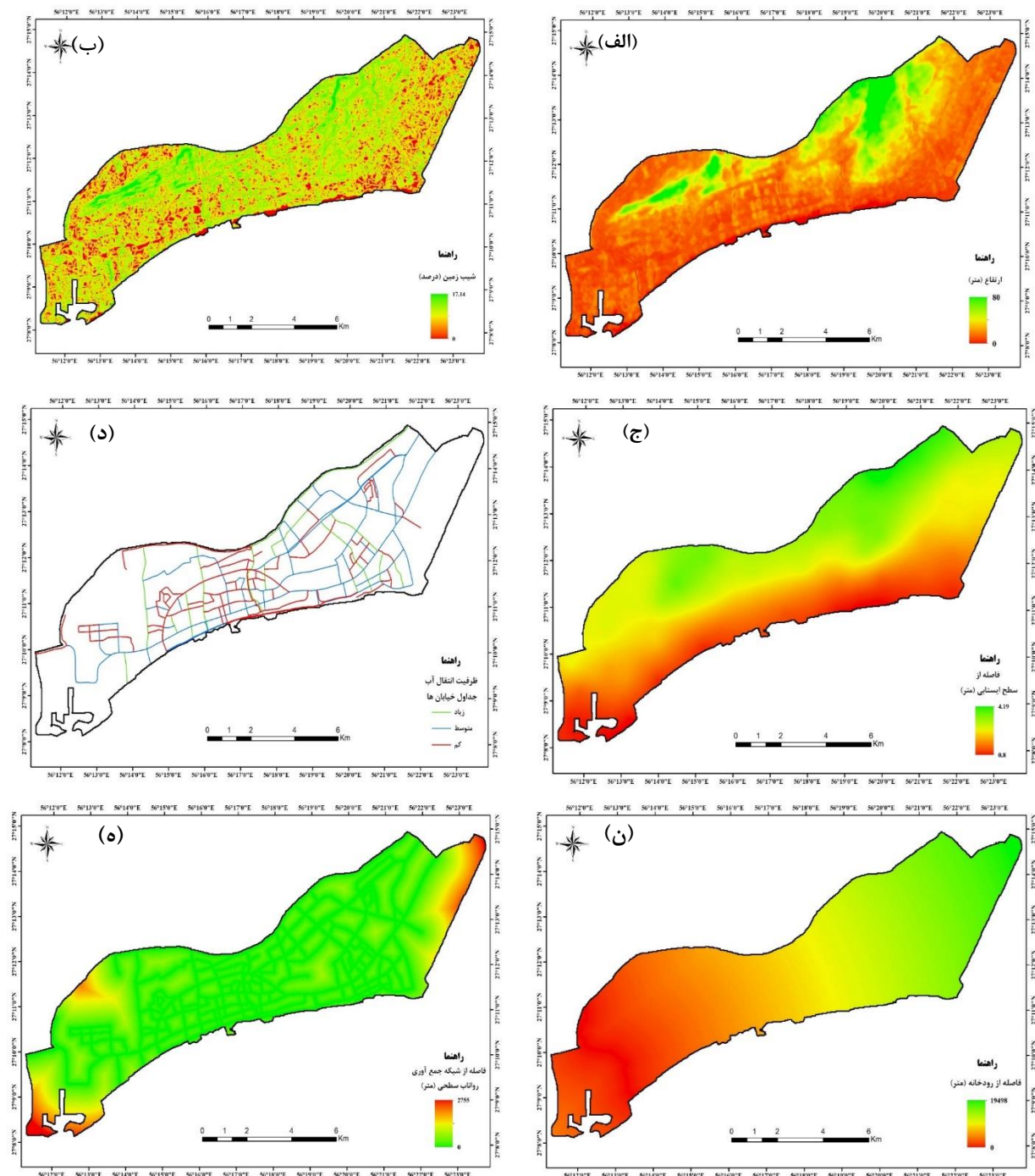
## ۳- مواد و روش

### تحلیل خطر سیل

در این مطالعه متغیرهای تأثیرگذار مورد استفاده برای تحلیل خطر سیلاب شهری بندرعباس شامل ارتفاع از سطح دریا، شیب زمین، فاصله از سطح ایستابی، ظرفیت انتقال آب جداول خیابان‌ها، فاصله از رودخانه‌ها و فاصله از شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب سطحی است که این متغیرها از سازمان مدیریت منابع آب ایران تهیه شد. بنابراین، لایه‌های مورد استفاده در این تحقیق با پیکسل سائز ۳۰ متر شامل نقشه‌ی رقومی ارتفاع است که ارتفاع از سطح دریا و شیب از آن استخراج شد. از لایه‌ی ایزوپیز، فاصله از سطح پیزومتری یا تراز آب زیرزمینی و از لایه‌ی شبکه آبراهه‌ی حوزه‌ی آبخیز شهری، فاصله از رودخانه استخراج شد. فاصله از شبکه‌ی رواناب سطحی نیز از لایه‌ی شبکه‌ی جدول‌کشی شهری

حاصل شد (شکل ۲). چگونگی تأثیرگذاری این عوامل به این صورت است که در طبقات ارتفاعی پایین، پتانسیل زیادی برای شکل‌گیری سیل وجود دارد و شیب با توجه به تأثیر بر میزان نفوذ آب و ایجاد رواناب‌ها و سرعت جریان، بر وقوع سیل نیز تأثیرگذار است. آبراهه‌ها، پایداری دامنه را از طریق فرسایش و اشباع بخش‌های پایینی آن تحت تأثیر قرار داده‌اند و یکی از عوامل مهم در سیل‌گیری اراضی مجاور خود هستند؛ بنابراین، نقشه‌ی فاصله از آبراهه در محیط-نرم‌افزار ArcGIS تهیه می‌شود.

سطح ایستابی آب زیرزمینی نیز بر وقوع سیل و آب‌گرفتگی معابر تأثیر دارد؛ به طوری که در مناطق با عمق سطح ایستابی کمتر، خطر وقوع سیلاب بیشتر است. فاصله از شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب سطحی (کانال‌ها و زهکش‌های شهری)، از دیگر عوامل مؤثر بر سیل‌خیزی در اراضی شهری است. مناطق با فاصله‌ی بیشتر نسبت به زهکش‌های شهری، خطر آب‌گرفتگی بیشتری دارند. ظرفیت انتقال آب جداول خیابان‌ها نیز بر آب‌گرفتگی معابر و خیابان‌ها تأثیر می‌گذارد؛ هرچه ظرفیت انتقال آب جداول و زهکش‌های شهری بیشتر باشد، خطر سیل کاهش می‌یابد. در ادامه، کلیه‌ی لایه‌ها در محیط ArcGIS تهیه شد. شکل ۲، نقشه‌ی فاکتورهای مؤثر بر سیل شهری را نشان می‌دهد (Pourghasemi et al, 2014).



شکل ۲: نقشه‌ی متغیرهای مؤثر بر وقوع سیل الف: نقشه‌ی ارتفاع؛ ب: شیب زمین؛ ج: فاصله از سطح استابی؛ د: ظرفیت انتقال آب از جدول خیابان‌ها؛ ن: فاصله از رودخانه و ه: شبکه‌ی فاصله از شبکه زهکشی

### مدل‌سازی خطر سیل

در این تحقیق، مدل‌سازی خطر سیل با استفاده از دو مدل ماشین‌بردار پشتیبان (SVM) و بیشینه بی‌نظمی (MaxEnt) انجام شد. جدول ۱، خصوصیات مدل‌های کاربردی در این مطالعه را نشان می‌دهد. نقشه‌ی پهنه‌بندی خطر سیلاب می‌تواند ابزاری مؤثر در برنامه‌ریزی مسیر توسعه‌ی آینده‌ی شهر و شناخت نواحی باشد که نیازمند توسعه‌ی زیر



ساخت‌های تخلیه و زهکشی سیلاب است تا از خسارت وارد شده بر اراضی زراعی، ساختمان‌ها و زیر ساخت‌های منطقه‌ی موردنظر جلوگیری شود.

### مدل ماشین‌بردار پشتیبان

این روش از جمله روش‌های نسبتاً جدیدی است که در سال‌های اخیر نسبت به روش‌های قدیمی‌تر، در طبقه‌بندی کارایی خوبی نشان داده‌است. مبنای کاری دسته‌بندی‌کننده‌ی SVM، دسته‌بندی خطی داده‌ها است. در تقسیم خطی داده‌ها سعی می‌کنیم خطی را انتخاب کنیم که حاشیه‌ی اطمینان بیشتری داشته باشد (Shin, 2005). ماشین‌های بردار پشتیبان همانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، نوعی الگوریتم داده‌کاوی است. مراحل حل مسئله در این الگوریتم، همانند شبکه‌های عصبی مصنوعی به دو مرحله‌ی آموزشی و آزمایشی یا صحت‌سنجی تقسیم می‌شود (Seyedian, 2014). ماشین‌بردار پشتیبان (SVM)، یک الگوریتم نظارت‌شده‌ی یادگیری ماشین است که هم در مسائل طبقه‌بندی و هم در مسائل رگرسیون قابل استفاده است؛ با این وجود، از آن بیشتر در مسائل طبقه‌بندی استفاده می‌شود (Siahkamari et al, 2014). در الگوریتم SVM، هر نمونه داده به عنوان یک نقطه در فضای  $n$  بعدی روی نمودار پراکندگی داده‌ها ترسیم می‌شود.  $n$  تعداد ویژگی‌هایی است که یک نمونه داده دارد و مقدار هر ویژگی مربوط به داده‌ها، یکی از مؤلفه‌های مختصات نقطه روی نمودار را مشخص می‌کند، سپس با ترسیم یک خط راست، داده‌های مختلف و متمایز از یکدیگر را دسته‌بندی می‌کند (Yan et al, 2018).

در مدل رگرسیون بردار پشتیبان، تابعی مرتبط با متغیر وابسته  $y$  - که خود تابعی از چند متغیر مستقل  $x$  است - برآورد می‌شود. مشابه سایر مسائل رگرسیونی فرض می‌شود رابطه‌ی میان متغیرهای مستقل و وابسته، با تابع جبری مانند  $f(x)$  به علاوه‌ی مقداری اغتشاش (خطای مجاز  $\epsilon$ ) مشخص شود (رابطه‌ی ۱ و ۲).

$$f(x) = W^T \cdot \varphi(x) + b \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

$$y = f(x) + \text{noise} \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

چنانچه  $W$  بردار ضرایب،  $b$  ثابت مشخصه‌های تابع رگرسیونی و  $\varphi(x)$  نیز تابع کرنل باشد، آنگاه هدف پیدا کردن فرم تابعی برای  $f(x)$  است. این مهم با واسنجی مدل ماشین‌بردار پشتیبان توسط مجموعه‌ای از نمونه‌ها (مجموعه‌ی واسنجی) محقق می‌شود. برای محاسبه‌ی  $w$  و  $b$  لازم است تابع خطای معادله‌ی ۳ در مدل ماشین‌بردار پشتیبان رگرسیونی با در نظر گرفتن شرایط مندرج (قیود) در معادله‌ی ۴ بهینه شود.

رابطه‌ی ۳

$$W^T \cdot \varphi(x_i) + b - y_i \leq \epsilon + \epsilon_i^*$$

$$\frac{1}{2} W^T \cdot w + C \sum_{i=1}^N \epsilon_i + C \sum_{i=1}^N \epsilon_i^* y_i \quad \text{رابطه‌ی ۴}$$

رابطه‌ی ۵

$$-W^T \cdot \varphi(x_i) - b \leq \epsilon + \epsilon_i^* \\ \geq 0, i=1, 2, \dots, N \in \epsilon + \epsilon_i^*$$

در معادلات بالا، C عددی صحیح و مثبت است که عامل تعیین جریمه در هنگام رخ دادن خطای واسنجی مدل به شمار می‌رود،  $\varphi(x)$  تابع کرنل، N تعداد نمونه‌ها و دو مشخصه‌ی  $\epsilon$  و  $\epsilon_i^*$  متغیرهای کمبود هستند (Isazadeh et al, 2017). در نهایت، تابع رگرسیون بردار پشتیبان را می‌توان به فرم زیر بازنویسی کرد (رابطه‌ی ۶):

$$f(x) = \sum_{i=1}^N \bar{a}_i \varphi(x_i)^T \cdot \varphi(x) + b \quad \text{رابطه‌ی ۶}$$

که در آن  $\bar{a}_i$ ، میانگین ضریب لاگرانژ است. محاسبه‌ی  $\varphi(x)$  در فضای مشخصه‌ی آن ممکن است بسیار پیچیده باشد. برای حل این مشکل، روند معمول در مدل رگرسیون بردار پشتیبان انتخاب یک تابع کرنل است. با توجه به اینکه در ماشین بردار پشتیبان معمولاً از تابع کرنل پایه شعاعی استفاده می‌شود، در این تحقیق نیز از این تابع استفاده شد (رابطه‌ی ۷) (Kavzoglu and Colkesen, 2009).

$$k(x|x_i) \exp\left(-\frac{\|x - x_i\|^2}{\sigma^2}\right) \quad \text{رابطه‌ی ۷}$$

ذکر این امر لازم است که فرآیند محاسبات ماشین بردار پشتیبان، بر اساس کد نویسی در محیط R انجام شد.

#### مدل پیشینه بی‌نظمی

یکی دیگر از مدل‌ها که در بررسی پیش‌بینی سیل معرفی شده است، مدل پیشینه بی‌نظمی است (Phillips et al, 2006). الگوریتم حداکثر آنتروپی، ارزیابی احتمال توزیع مقادیر حداکثر آنتروپی متأثر از محدودیت‌های ناشی از متغیرهای محیطی تأثیرگذار بر نحوه‌ی بروز خطر سیل است. این مدل با استفاده از داده‌های واقعیت، داده‌های گسسته و پیوسته، به پیش‌بینی اثر متقابل شاخص‌ها و همبستگی احتمال وقوع خطر نسبت به مکان‌های وقوع، و متغیرهایی که به عنوان ورودی در حداکثر رساندن دقت مدل ضرورت کافی دارند، پیش‌بینی و درصد مشارکت و میزان اهمیت آنها را مشخص می‌کند (Convertino et al, 2013). توزیع احتمال این روش، به صورت نمایی و بر اساس تقسیم مجموع وزن متغیرهای محیطی بر یک مقیاس ثابت برآورد می‌شود؛ به طوری که مقادیر احتمال بین صفر و یک قرار می‌گیرد و مجموع احتمالات برابر یک می‌شود. رابطه‌ی ۸، توزیع احتمال این مدل را نشان می‌دهد که در آن  $\lambda$  برداری از n ضریب با ارزش واقعی یا وزن‌های متغیرهای محیطی، f برداری از همه n متغیر و  $Z_\lambda$  ثابت نرمال‌سازی است تا اطمینان حاصل شود که مجموع  $q_\lambda$  برابر یک می‌شود (Rezaei et al, 2017).

$$q_\lambda(x) = \frac{e^{\lambda \cdot f(x)}}{Z_\lambda} \quad \text{رابطه‌ی ۸}$$



آزمون جک نایف نیز نوعی روش تعیین اهمیت متغیرها به روش جایگزین در مدل‌های پیش‌بینی است که به روش حذف متغیرهای مستقل عمل می‌کند و مدل به تعداد مجموعه متغیرها ( $n$ ) اجرا می‌شود و در هر بار اجرا، یک متغیر مستقل حذف ( $n-1$ ) و ارزیابی مدل صورت می‌گیرد که با این کار، اهمیت و جایگاه هر متغیر در مدل مشخص می‌شود. مدل فوق در نرم افزار MaxEnt اجرا شد.

### ارزیابی مدل‌ها

به منظور ارزیابی عملکرد مدل، از سطح زیر نمودار AUC به دست آمده از منحنی ROC استفاده شد. منحنی ROC، نمایشی گرافیکی از موازنه بین میزان خطای منفی و مثبت برای هر مقدار احتمالی از پیش‌بینی‌ها است (Poorghasemi et al, 2013). مقدار سطح زیر این منحنی، شاخصی کمی برای نمایش کارایی و قدرت پیش‌بینی مدل است. دامنه‌ی مقادیر مختلف سطح زیر منحنی بین  $0/5$  (پیش‌بینی تصادفی) تا حداکثر  $1$  (پیش‌بینی کاملاً صحیح) است (جدول ۱). در نهایت،  $70\%$  وقایع سیل برای آموزش واسنجی<sup>۱</sup> و یک گروه متشکل از  $30\%$  درصد برای اعتبارسنجی<sup>۲</sup> تقسیم شد.

جدول ۱: همبستگی کیفی-کمی سطحی زیر منحنی

مقادیر سطح زیر منحنی (AUC)	دقت پیش‌بینی
$0/9-1$	عالی
$0/8-0/9$	خیلی خوب
$0/7-0/8$	خوب
$0/6-0/7$	متوسط
$0/5-0/6$	ضعیف

### تحلیل آسیب‌پذیری سیلاب

پس از برآورد خطر<sup>۳</sup> سیلاب با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، برای تحلیل آسیب‌پذیری<sup>۴</sup> سیلاب شهری از دیگر فاکتورهای مؤثر تحت عنوان فاکتورهای غیرمحیطی و ادافیکی شامل وضعیت اقتصادی - اجتماعی منطقه، تراکم شهری، تراکم جمعیت و کیفیت ساختمان استفاده شد. این داده‌ها از سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان هرمزگان تهیه شد. به منظور برآورد آسیب‌پذیری سیلاب در این پژوهش نیز از مدل تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. روش AHP شامل مراحل اصلی زیر است:

<sup>1</sup> Training

<sup>2</sup> Validatio

<sup>3</sup> Risk

<sup>4</sup> Vulnerability

## تشکیل ساختار سلسله مراتبی

طرح پرسش‌نامه و جمع‌آوری نظرات کارشناسان مختلف در مورد میزان اهمیت و ارزش هر کدام از معیارها نسبت به تعیین هدف با توجه به جدول ۹ کمیتی ساعتی صورت گرفت. جدول ۲، مقیاس ۹ کمیتی ساعتی را نشان می‌دهد.

جدول ۲: مقیاس ۹ کمیتی ساعتی برای مقایسه‌ی دودویی معیارها (بلداجی و همکاران، ۱۳۸۹)

امتیاز	تعریف	توضیح
۱	اهمیت مساوی در تحقق هدف دو معیار اهمیت مساوی دارند.	
۳	اهمیت اندکی بیشتر برای تحقق هدف اهمیت i بیشتر از j است.	
۵	اهمیت بیشتر اهمیت i خیلی بیشتر از j است.	
۷	اهمیت خیلی بیشتر اهمیت i خیلی خیلی بیشتر از j است.	
۹	اهمیت مطلق اهمیت خیلی بیشتر i نسبت به j به طور قطعی به اثبات رسیده است.	
۲، ۴، ۶، ۸	هنگامی که حالت‌های میانه وجود دارد.	

## تشکیل ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارها

محاسبه‌ی میانگین هندسی هر سطر از ماتریس مقایسه‌ی زوجی ( $b_{ij}$ ) رابطه‌ی ۹.

$$b_{ij} = \left( \prod_{i=1}^k a_{ij} \right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{رابطه‌ی ۹}$$

$B_{ij}$  میانگین هندسی هر سطر از ماتریس مقایسه‌ی زوجی،  $a_{ij}$  اهمیت معیار i ام نسبت به معیار j ام نرمالیزه کردن میانگین‌های هندسی با استفاده از رابطه‌ی ۱۰.

$$w_i = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^k b_{ij}} \quad \text{رابطه‌ی ۱۰}$$

$w_i$ : وزن معیار i ام، k تعداد معیارهای تصمیم‌گیری (Akbarpoor et al, 2013).

چنانچه ضریب سازگاری ( $CR^1$ ) محاسبه شده با استفاده از نرم‌افزار Expert choice9، کوچک‌تر یا مساوی ۰/۱ باشد، سازگاری در قضاوت‌ها مورد قبول است؛ در غیر این صورت، باید در قضاوت‌ها تجدید نظر شود. بنابراین، در این پژوهش ابتدا شاخص‌های مؤثر بر سیل‌خیزی شهر بندرعباس از طریق مطالعات و تجربه‌ی کارشناسی تعیین شد؛ بدین منظور بر اساس مطالعات جغرافیایی و سوابق سیلاب در این شهر، متغیرهای وضعیت اقتصادی — اجتماعی، تراکم شهری، تراکم جمعیت و کیفیت ساختمان به عنوان متغیرهای اصلی تأثیرگذار بر افزایش آسیب‌پذیری سیلاب، به کارشناسان معرفی و از آنها خواسته شد که تقدم اولویت خطر را به صورت زوجی به روش سلسله مراتبی و مقیاس ۱ تا ۹ ارزش‌گذاری کنند. در نهایت با استفاده روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) و با استفاده از پرسشنامه، وزن هر کدام

<sup>1</sup> Consistency Ratio

از شاخص‌های مورد استفاده تعیین شد. با توجه به ورودی لایه‌های مختلف با درجه‌بندی‌های متفاوت و نیاز به یکسان‌سازی آنها در زمینه‌ی هدف، به طبقه‌بندی مجدد این لایه‌ها برای عملیات هم‌پوشانی پرداخته می‌شود. این عمل با استفاده از دستور Reclassify، برای طبقه‌بندی مجدد لایه‌های رستری در محیط ArcGIS صورت گرفت. طبقه‌بندی مجدد روی نقشه‌ی فاکتورهای وضعیت اقتصادی - اجتماعی، تراکم شهری، تراکم جمعیت و کیفیت ساختمان صورت گرفت و برای هر یک از کلاس‌ها، ارزشی بین ۱ تا ۹ مطابق با جدول ۲ در نظر گرفته شد.

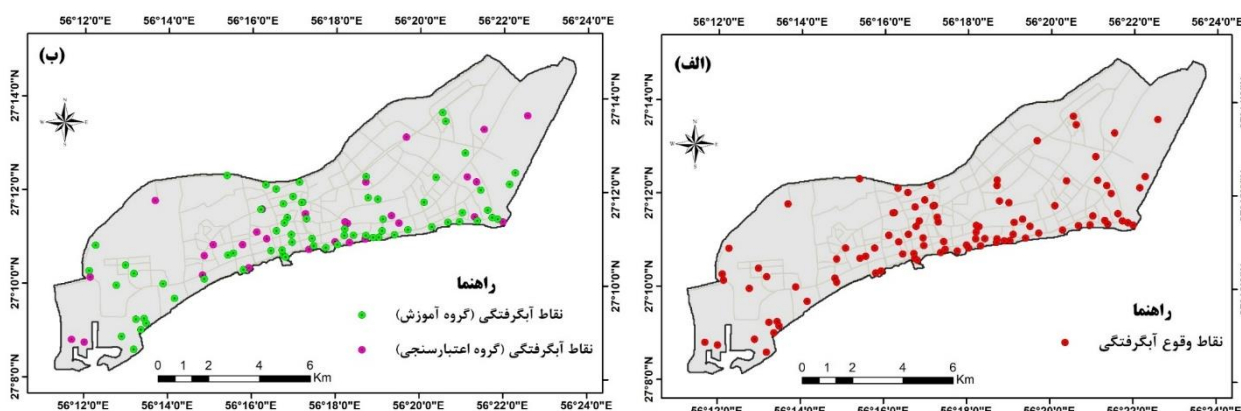
### ارزیابی ریسک سیل

پس از تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری سیل براساس شاخص‌های تراکم جمعیت، کیفیت ساختمان، وضعیت اقتصادی - اجتماعی و تراکم شهری (براساس مدل AHP) و تهیه‌ی نقشه‌ی خطر سیل براساس شاخص‌های ارتفاع از سطح دریا، شیب زمین، فاصله از سطح ایستایی، ظرفیت انتقال آب جداول خیابان‌ها، فاصله از رودخانه‌ها و فاصله از شبکه‌ی جمع‌آوری رواناب سطحی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین (SVM و MaxEnt)، به تهیه‌ی نقشه‌ی ریسک سیل شهر بندرعباس پرداخته شد. ریسک، تابعی از آسیب‌پذیری و خطر است؛ بنابراین، نقشه‌ی ریسک سیل شهری بندرعباس براساس تلفیق نقشه‌های آسیب‌پذیری و خطر با استفاده از معادله‌ی زیر به دست آمد (Dewan, 2013):

$$Risk = Hazard \times Vulnerability$$

### ۴- یافته‌ها (نتایج)

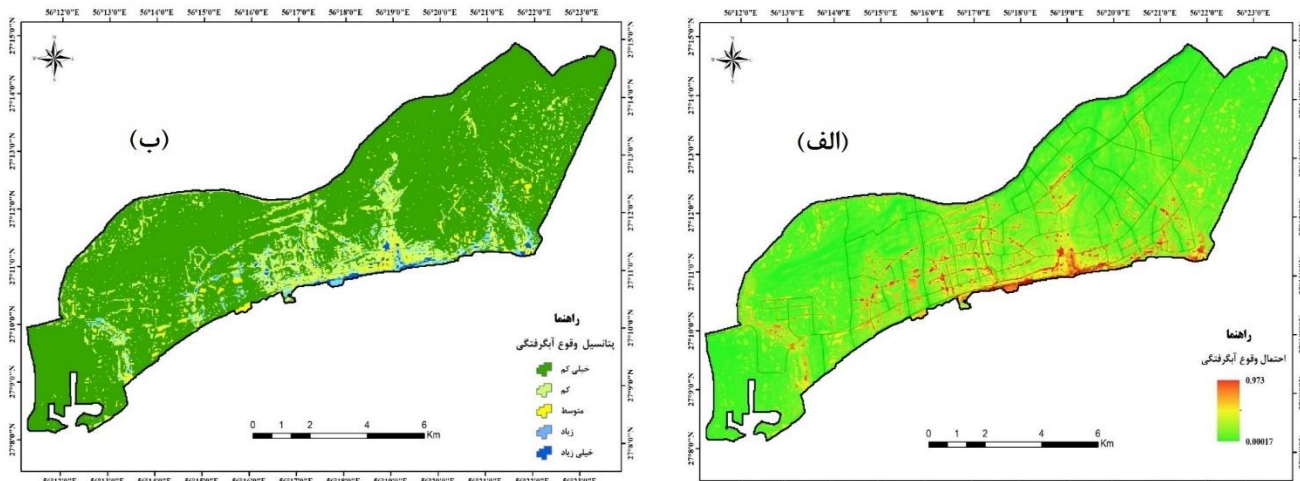
نقشه‌ی توزیع مکانی وقایع آبگرفتگی در شکل (۳ الف) نشان داده شده‌است. در کل، ۹۸ موقعیت آبگرفتگی در شهر بندرعباس ثبت شده که در چند سال اخیر در زمان بارندگی، آبگرفتگی زیادی داشته‌است. شکل (۳ ب)، دو گروه آموزش و اعتبارسنجی را نشان می‌دهد؛ گروه آموزش شامل ۷۰ درصد داده‌ها (۶۹ موقعیت آبگرفتگی‌ها) و گروه اعتبارسنجی شامل ۳۰ درصد داده‌ها (۲۹ موقعیت آبگرفتگی‌ها) است.



شکل ۳: الف) موقعیت نقاط آبگرفتگی ثبت شده در شهر بندرعباس، ب) گروه‌های آموزش و اعتبارسنجی

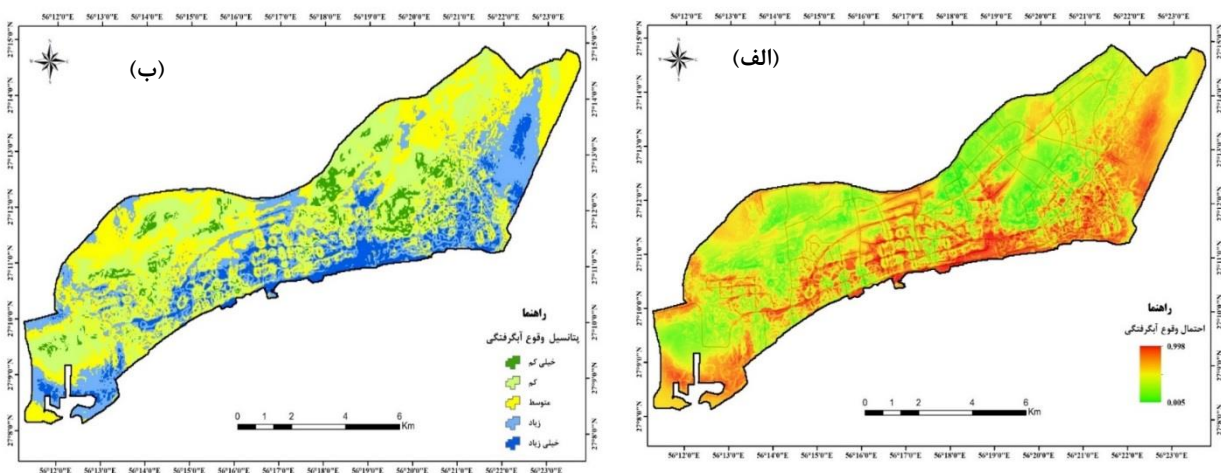
نقشه‌ی پیش‌بینی احتمال وقوع خطر آبگرفتگی براساس مدل بیشینه بی‌نظمی در شکل (۴ الف) نشان داده شده‌است. در بخش‌های جنوبی و مرکزی شهر بندرعباس، احتمال وقوع آبگرفتگی بالاست و در بخش‌های غربی و شرقی این احتمال کمتر است. به منظور مدیریت بهتر سیلاب شهری، نقشه‌ی احتمال وقوع آبگرفتگی شهری کلاس‌بندی شد و

این کلاس‌ها براساس مدل بیشینه بی‌نظمی در شکل (۴ ب) نشان داده شد. کلاس‌های پتانسیل آبگرفتگی زیاد و خیلی زیاد، در بخش‌های جنوبی و لکه‌هایی از آن در مرکز شهر بندرعباس قرار دارد. بخش‌های غربی و شرقی در کلاس‌های پتانسیل آبگرفتگی خیلی کم و کم قرار گرفته‌اند. کلاس‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد نیز به ترتیب ۱۱/۸۱، ۴۸/۱۱، ۸۵/۳، ۶۵/۲ و ۹/۰ درصد از شهر بندرعباس را به خود اختصاص داده‌اند (شکل ۴ ب).



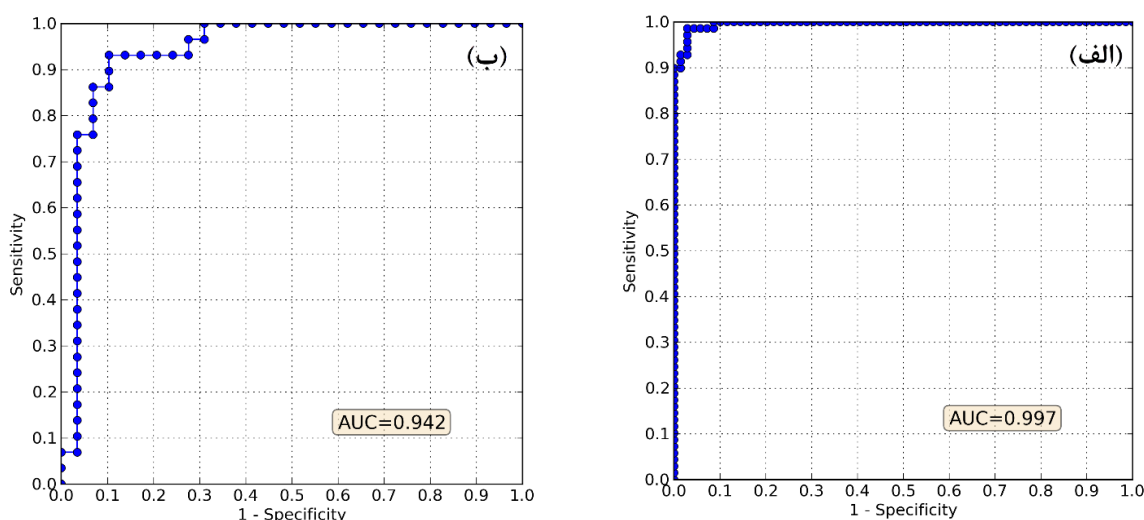
شکل ۴: الف) نقشه احتمال وقوع آبگرفتگی با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی، ب) نقشه کلاس‌های پتانسیل وقوع آبگرفتگی با استفاده از مدل بیشینه بی‌نظمی

نقشه‌ی پیش‌بینی احتمال وقوع آبگرفتگی و کلاس‌بندی آن با استفاده از مدل ماشین‌بردار پشتیبان، در شکل ۵ نشان داده شده‌است. براساس نتایج این مدل، احتمال وقوع آبگرفتگی در بخش‌های جنوبی، شرقی و جنوب غربی بیشتر است؛ درحالی که این احتمال در بخش‌های شمالی و شمال غربی شهر بندرعباس کمتر است. براساس نتایج، بخش‌های جنوبی، مرکزی و جنوب غربی در کلاس پتانسیل زیاد و خیلی زیاد قرار گرفته‌اند. کلاس‌های خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب ۶۲/۴، ۴۵/۲۷، ۸۱/۳۴، ۳/۲۴ و ۸۱/۸ درصد از مساحت شهر بندرعباس را به خود اختصاص داده‌اند.

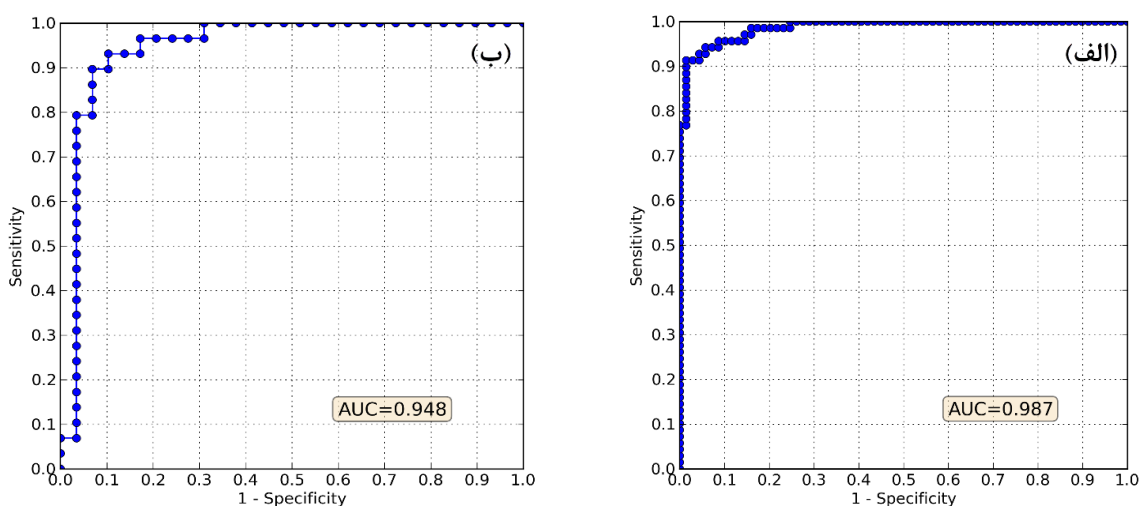


شکل ۵: نقشه‌ی احتمال وقوع آبگرفتگی (الف) و کلاس‌بندی (ب) با استفاده از مدل ماشین‌بردار پشتیبان

برای تعیین دقت مدل‌ها، از معیار مساحت زیر منحنی مشخصه‌ی عامل گیرنده استفاده شد. شکل ۶، میزان دقت مدل پیشینه بی‌نظمی را در دو مرحله‌ی آموزش و اعتبارسنجی نشان می‌دهد. براساس این منحنی‌ها، مدل پیشینه بی‌نظمی در مرحله‌ی آموزش، ۹۹/۷ درصد و در مرحله‌ی اعتبارسنجی، ۹۴/۲ درصد دقت داشته‌است؛ بنابراین، مدل پیشینه بی‌نظمی در هر دو مرحله‌ی آموزش و اعتبارسنجی، کارایی عالی (مساحت زیر منحنی بالاتر از ۹۰ درصد) داشته‌است. نتایج ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل ماشین‌بردار پشتیبان نیز در شکل ۷ ارائه شده‌است. همان گونه که مشخص است، مساحت زیر منحنی مشخصه‌ی عامل گیرنده در مرحله‌ی آموزش، ۹۸/۷ درصد و در مرحله‌ی اعتبارسنجی، ۹۴/۸ درصد است. بنابراین، مدل ماشین‌بردار پشتیبان عملکرد عالی دارد؛ زیرا در هر دو مرحله‌ی آموزش و اعتبارسنجی، مساحت زیر منحنی بیش از ۹۰ درصد بوده‌است.



شکل ۶: منحنی مشخصه‌ی عامل گیرنده به دست آمده از مدل پیشینه بی‌نظمی در مراحل آموزش (الف) و (ب) اعتبارسنجی



شکل ۷: منحنی مشخصه‌ی عامل گیرنده به دست آمده از مدل ماشین‌بردار پشتیبان در مراحل آموزش (الف) و (ب) اعتبارسنجی

### تحلیل آسیب‌پذیری

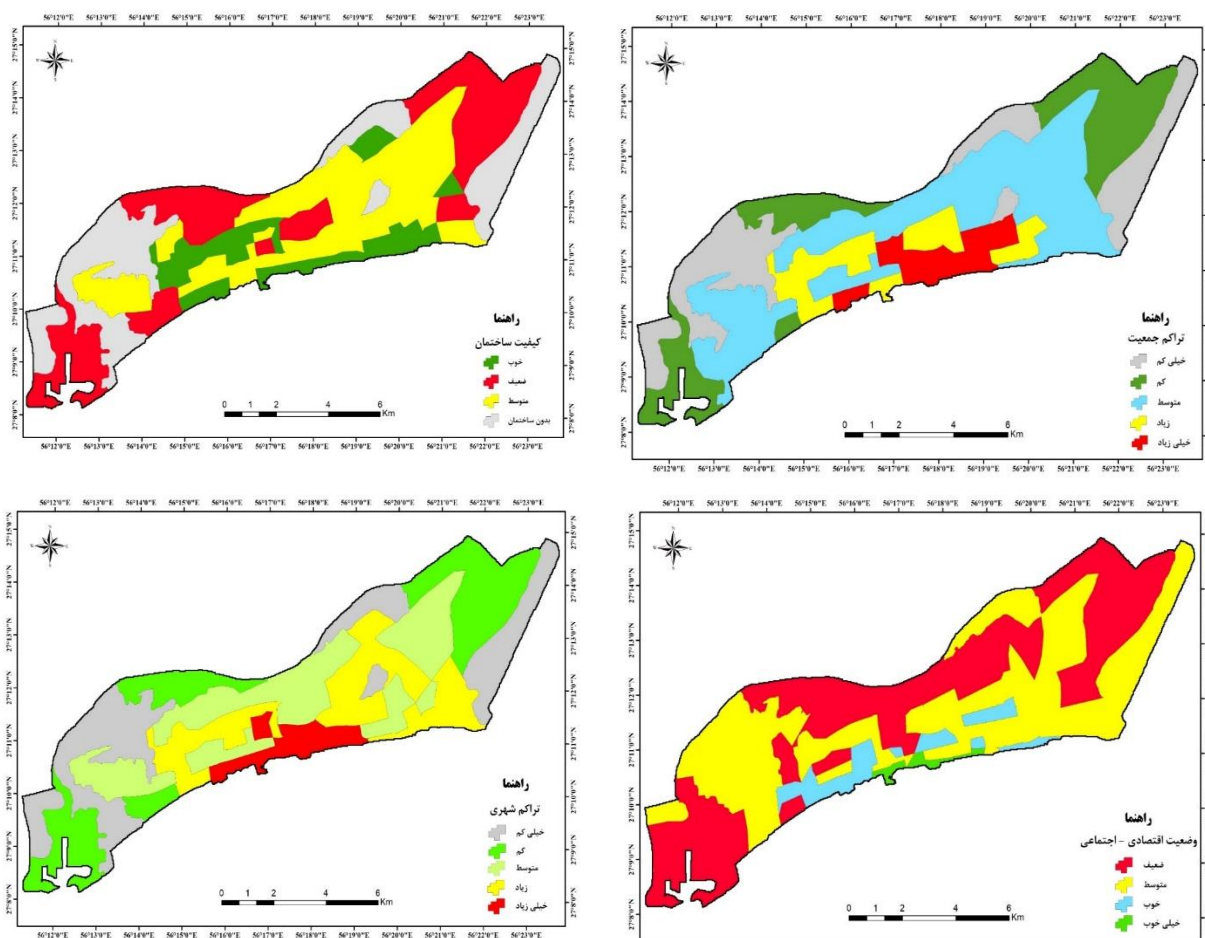
هدف از تحقیق حاضر با توجه به موارد پیش‌تر گفته شده، تحلیل ریسک سیلاب است؛ از این رو، علاوه بر تحلیل خطر باید به تحلیل آسیب‌پذیری نیز پرداخت. بنابراین، بعد از تهیه‌ی نقشه‌ی خطر سیل‌گیری با استفاده از دو مدل

یادگیری ماشین، مرحله‌ی بعدی تحلیل آسیب‌پذیری با استفاده از شاخص‌های غیرمحیطی است. در بررسی تحلیل آسیب‌پذیری، بیشتر از متغیرهای اقتصادی - اجتماعی استفاده می‌شود؛ چرا که ممکن است با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی تشخیص داده شود که منطقه به لحاظ متغیرهای محیطی از نوع پرخطر است، اما به لحاظ عوامل آسیب‌پذیری نظیر کیفیت ساختمان، تراکم شهری، تراکم جمعیت و وضعیت اقتصادی اجتماعی آسیب‌پذیر نیست. شکل ۸، تحلیل آسیب‌پذیری سیلاب را بر اساس متغیرهای معرفی شده نشان می‌دهد. براساس اطلاعات تراکم جمعیت، بخش‌های جنوبی و مرکزی شهر بندرعباس تراکم جمعیت بیشتری دارد و در قسمت‌های غربی و شرقی این شهر، تراکم خیلی کمتر است. غالباً ساختمان‌های واقع در بخش‌های ساحلی شهر بندرعباس به علت نوساز بودن، کیفیت و امنیت بالاتری دارد. از طرفی، بخش‌های جنوب غربی و شمال شرقی دارای ساختمان‌هایی سنتی با کیفیت پایین‌تر است. براساس آمار موجود، قسمت‌هایی که در حاشیه‌ی ساحل قرار دارند از وضعیت اقتصادی - اجتماعی مطلوب‌تری برخوردارند؛ در قسمت‌های شمالی، غربی و جنوبی نیز وضعیت اقتصادی - اجتماعی مردم ضعیف‌تر است. در بخش جنوبی این شهر به دلیل نزدیک بودن به دریا و منظره‌ی زیبا، تراکم شهری زیادتر است و در بخش‌های شمالی، غربی و شرقی، تراکم شهری کمتر.

امتیاز کلاس‌های عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری، در جدول ۳ نشان داده شده‌است. کلاس تراکم جمعیت خیلی زیاد، کلاس کیفیت ساختمان کم، کلاس اقتصادی - اجتماعی ضعیف و تراکم شهری خیلی زیاد دارای بیشترین امتیاز است. برای بررسی و تحلیل آسیب‌پذیری، از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. نتایج این روش نشان داد که وزن تراکم جمعیت ۰/۳۰۶، کیفیت ساختمان ۰/۰۵۹، تراکم شهری ۰/۰۲۳ و وضعیت اقتصادی ۰/۰۲۲ است. بنابراین، تراکم جمعیت مهم‌ترین معیار مؤثر بر آسیب‌پذیری است. کیفیت ساختمان، تراکم شهری و وضعیت اقتصادی - اجتماعی به ترتیب جایگاه‌های دوم تا چهارم را به خود اختصاص می‌دهد (جدول ۴).

نقشه‌ی درجه‌ی آسیب‌پذیری شهر بندرعباس براساس نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی، در شکل (۹ الف) نشان داده شده‌است. براساس نقشه‌ی درجه‌ی آسیب‌پذیری، تنوع وسیعی از درجات مختلف آسیب‌پذیری در شهر بندرعباس قابل ملاحظه است؛ بخش‌هایی که درجه‌ی آسیب‌پذیری آنها نزدیک به یک است، وضعیت آسیب‌پذیری در آنها بحرانی است (بخش‌های قرمز رنگ). به منظور تحلیل بهتر نتایج آسیب‌پذیری، نقشه‌ی درجه‌ی آسیب‌پذیری پهنه‌بندی شد که در شکل (۹ ب) ملاحظه می‌شود. براساس نتایج کلاس‌بندی آسیب‌پذیری، پهنه‌هایی که توان آسیب‌پذیری بالایی دارند، عموماً در بخش‌های جنوبی شهر بندرعباس و نزدیک مرکز واقع هستند. نتایج این پهنه‌بندی نشان داد که ۲۲/۴ درصد شهر بندرعباس در کلاس آسیب‌پذیری خیلی کم، ۲۱/۷۴ درصد در کلاس آسیب‌پذیری کم، ۳۸/۴۷ درصد در کلاس آسیب‌پذیری متوسط، ۱۰/۲۲ درصد در کلاس آسیب‌پذیری زیاد و بیش از ۷ درصد در کلاس آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار گرفته‌اند.





شکل ۸: نقشه‌ی عوامل مؤثر در تحلیل آسیب‌پذیری

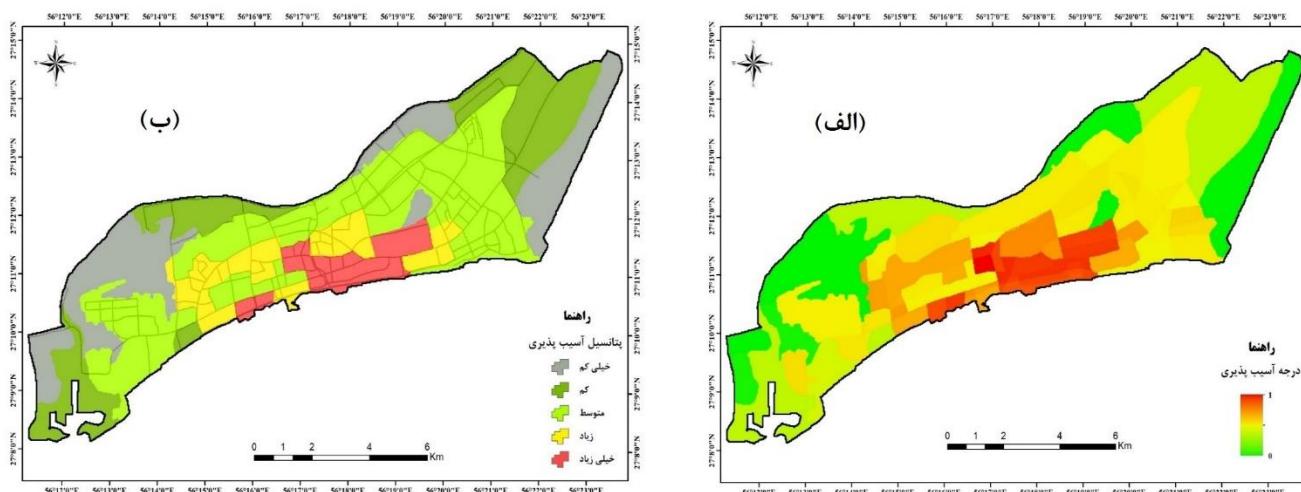


جدول ۳: امتیاز کلاس‌های عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری

امتیاز	کلاس	فاکتور
۱	خیلی کم	تراکم جمعیت
۲	کم	
۳	متوسط	
۴	زیاد	
۵	خیلی زیاد	کیفیت ساختمان
۰	بدون ساختمان	
۳	کم	
۲	متوسط	
۱	زیاد	اقتصادی و اجتماعی
۴	ضعیف	
۳	متوسط	
۲	خوب	
۱	خیلی خوب	تراکم شهری
۱	خیلی کم	
۲	کم	
۳	متوسط	
۴	زیاد	
۵	خیلی زیاد	

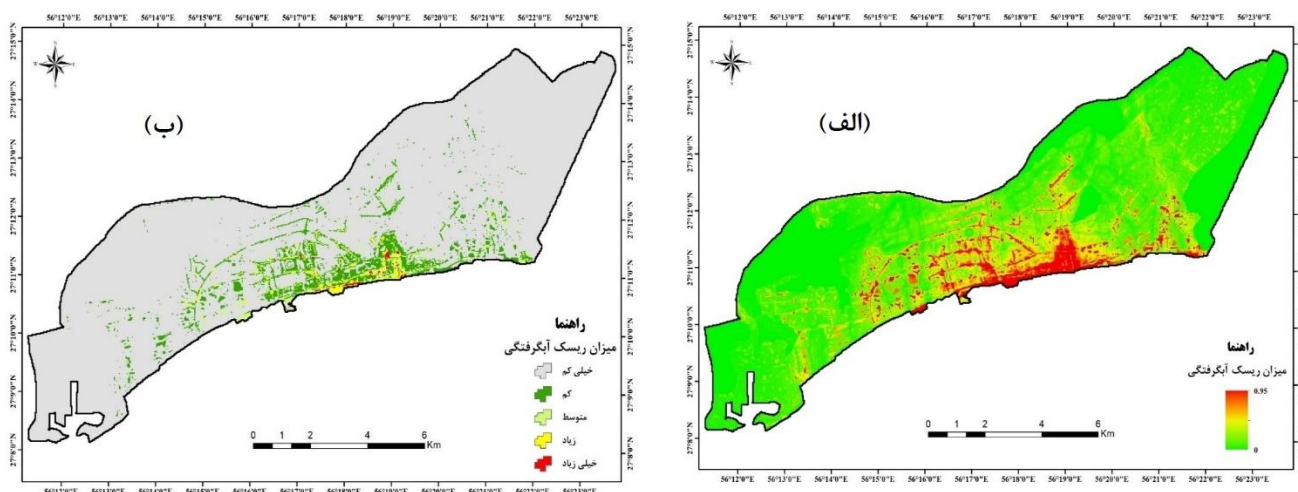
جدول ۴: نتایج مقایسه‌ی زوجی معیارهای مؤثر بر آسیب‌پذیری

عوامل	تراکم جمعیت	کیفیت ساختمان	تراکم شهری	وضعیت اقتصادی - اجتماعی	وزن عامل
تراکم جمعیت	۱	۷	۶	۵	۰/۳۰۶
کیفیت ساختمان		۱	۳	۲	۰/۰۵۹
تراکم شهری			۱	۱	۰/۰۲۳
وضعیت اقتصادی - اجتماعی				۱	۰/۰۲۲
میزان سازگاری (CR)					۶/۶ درصد



شکل ۹: الف) نقشه‌ی توزیع مکانی درجه آسیب‌پذیری شهر بندرعباس نسبت به سیل ب) نقشه‌ی پهنه‌بندی پتانسیل آسیب‌پذیری شهر بندرعباس

با در نظر گرفتن میزان خطر و درجه‌ی آسیب‌پذیری، نقشه‌ی ریسک آبگرفتگی تهیه شد که در شکل (۱۰ الف) نشان داده شده‌است. براساس تحلیل‌های به دست آمده از نقشه‌ی ریسک می‌توان اظهار کرد که بخش‌های جنوبی و مرکزی شهر بندرعباس، درجه ریسک بالاتری دارند. به منظور مدیریت بهتر آبگرفتگی و اجرای اقدامات کنترلی، نقشه‌ی ریسک کلاس‌بندی شد. شکل (۱۰ ب)، نقشه‌ی پهنه‌بندی ریسک آبگرفتگی شهر بندرعباس را در پنج کلاس نشان می‌دهد. براساس این نقشه، ۹۰/۱ درصد شهر بندرعباس در کلاس ریسک خیلی کم، ۶/۵ درصد در کلاس ریسک کم، ۲/۱ درصد در کلاس ریسک متوسط، ۰/۸ درصد در کلاس ریسک زیاد و ۰/۵ درصد در کلاس ریسک خیلی زیاد قرار دارند. بخش‌های ساحلی و نزدیک مرکز شهر بندرعباس نیز پهنه‌های ریسک زیاد و خیلی زیاد را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین بخش‌های شمالی، غربی و شرقی نیز به عنوان کلاس‌های ریسک خیلی کم تا ریسک متوسط شناسایی شد.



شکل ۱۰: الف) نقشه‌ی توزیع مکانی درجه‌ی ریسک آبگرفتگی ب) نقشه‌ی پهنه‌بندی ریسک آبگرفتگی شهر بندرعباس

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق خطر آسیب‌پذیری، ریسک آبگرفتگی و سیلاب شهری بندرعباس با استفاده از دو مدل یادگیری ماشینی پیشینه بی‌نظمی و ماشین‌بردار پشتیبان بررسی شد. نتایج ارزیابی دقت مدل‌ها نشان داد که هر دو مدل در پیش‌بینی مکانی احتمال وقوع سیل و شناسایی مناطق مستعد وقوع آبگرفتگی، دقت بالایی دارند. از آنجایی که اغلب مناطق شهری مانند شهر بندرعباس فاقد اطلاعات دقیق هیدرولیکی و هیدرولوژیکی است، استفاده از مدل یادگیری ماشینی و رخدادهای تاریخی آبگرفتگی شهری می‌تواند رویکردی نوین برای مدیریت سیلاب و آبگرفتگی شهری باشد. براساس آزمون‌های انجام شده می‌توان گفت که مدل یادگیری ماشینی در تجزیه و تحلیل مکانی وقایع آبگرفتگی و سیل شهری، همچنین استخراج روابط بین متغیرهای محیطی و رخدادهای آبگرفتگی قابلیت بالایی دارد. نتایج این تحقیق با یافته‌های Eini و همکاران (۲۰۲۰)، Siahkamari و همکاران (۲۰۱۸) و Yan و همکاران (۲۰۱۸) مطابقت دارد. در این تحقیق، نقشه‌ی خطر آبگرفتگی نشان داد که احتمال وقوع این پدیده در بخش‌های مرکزی و جنوبی شهر بندرعباس بیشتر است. اولویت‌بندی و نظرسنجی کارشناسی نشان داد که در بین عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری، عامل تراکم جمعیت بیشترین اهمیت را دارد. نقشه‌ی آسیب‌پذیری براساس عوامل مختلف نیز نشان داد که بخش‌های مرکزی و نزدیک به ساحل، درجه آسیب‌پذیری بالاتری دارند که با مطالعه‌ی Darabi و همکاران (۲۰۱۹)، Safari و همکاران (۱۳۹۰) و Majidi Heravi و همکاران (۱۳۹۴) مطابقت دارد. تجزیه و تحلیل جامع ریسک آبگرفتگی نیز اثبات کرد که بخش‌های جنوبی و مرکزی شهر بندرعباس ریسک آبگرفتگی زیادی دارند و این بخش‌ها برای مدیریت رواناب شهری و آبگرفتگی در اولویت بالایی هستند. توسعه‌ی فضای سبز و افزایش ظرفیت سیستم جمع‌آوری رواناب خیابان‌ها، از جمله اقدامات مهم برای کاهش ریسک آبگرفتگی شهری است. یکی دیگر از راهکارهای کاهش این ریسک، بازسازی ساختمان‌هایی است که مقاومت کمی دارند و در مواقع رخداد سیلاب شهری ممکن است تخریب شوند یا آسیب جدی به آنها وارد شود. براساس یافته‌های این تحقیق، توزیع مکانی تراکم جمعیتی و تراکم شهری، نامتوازن بود و این موضوع باید در برنامه‌های مدیریتی شهر بندرعباس لحاظ شود تا میزان تمرکز جمعیتی در مناطق دارای ریسک زیاد کاهش یابد.

## منابع

1. Yan, J.; Jin, J.; Chen, F.; Yu, G.; Yin, H.; & W. Wang, 2018. Urban flash flood forecast using support vector machine and numerical simulation, *Journal of Hydroinformatics*, 20(1), 221-231.
2. Akbarpoor, A.; Khasheie Siuki, A.; Keshavarz, A.; & H. Furughifar, 2016. Determination of the Appropriate Sites to Rain Water Harvesting using Analysis Hierarchical Process (AHP), *Watershed management*, 6 (12), 65-74. (In Persian).
3. An ensemble prediction of flood susceptibility using multivariate discriminant analysis, classification and regression trees, and support vector machines, *Science of the Total Environment*, 651, 2087-2096.
4. Choubin, B.; Moradi, E.; Golshan, M.; Adamowski, J.; Sajedi-Hosseini, F.; & A. Mosavi, 2019.
5. Convertino, M.; Troccoli, A.; & F. Catani, 2013. Detecting fingerprints of landslide drivers: a MaxEnt model, *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1367-1386.

6. Costache, R.; Popa, M. C.; Bui, D. T.; Diaconu, D. C.; Ciubotaru, N.; Minea, G.; & Q. B. Pham, 2020. Spatial predicting of flood potential areas using novel hybridizations of fuzzy decision-making, bivariate statistics, and machine learning, *Journal of Hydrology*, 124808.
7. Darabi, H.; Choubin, B.; Rahmati, O.; Haghighi, A. T.; Pradhan, B.; & B. Kløve, 2019. Urban flood risk mapping using the GARP and QUEST models: A comparative study of machine learning techniques, *Journal of hydrology*, 569, 142-154.
8. Dewan, A., 2013. Floods in a megacity: geospatial techniques in assessing hazards, risk and vulnerability, Dordrecht: Springer, 119-156.
9. Eini, M.; Kaboli, H. S.; Rashidian, M.; & H. Hedayat, 2020. Hazard and vulnerability in urban flood risk mapping: Machine learning techniques and considering the role of urban districts, *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 101687.
10. Ghahroodi Tali, M.; Majidi Heravi, A.; & A. Abdili, 2016. Vulnerability due to urban floods (Case study: Tehran, Darkeh to Kan), *Geography and environmental hazards*, 17, 21-35. (In Persian).
11. Heravi, M, 2014. Vulnerability due to urban floods in the northwest of Tehran Journal of Geography. 46: 181-202.
12. Hosseinzadeh, S.R, 2004. Environmental Crises in Iranian Metropolitan Cities Sustainable City Book , p:183. Witpress England.
13. Hwang, C., & K. Yoon., (1980). Multiple attribute decision making, in lecture notes in economics and mathematical systems, 186: Springer-Verlag, Berlin.
14. Isazadeh, M.; Biazar, S. M.; & A. Ashrafzadeh, 2017. Support vector machines and feed -forward neural networks for Spatial modeling of groundwater qualitative parameters, *Environmental Earth Sciences*, 76(17), 610-625.
15. Jaafari, A.; Najafi, A.; Pourghasemi, H. R.; Rezaeian, J.; & A. Sattarian, 2014. GIS-based frequency ratio and index of entropy models for landslide susceptibility assessment in the Caspian forest, northern Iran, *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(4), 909-926.
16. Kavzoglu, T., & I. Colkesen., (2009). A kernel functions analysis for support vector machines for land cover classification. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 11, 352-359.
17. Paquette, J., & J. Lowry, (2012). Flood hazard modelling and risk assessment in the Nadi River Basin, Fiji, using GIS and MCDA. *The South Pacific Journal of Natural and Applied Sciences*. 30(1), 33-43.
18. Paul, G. C.; Saha, S.; & T. K. Hembram, 2019. Application of the GIS-based probabilistic models for mapping the flood susceptibility in Bansloi Sub-basin of Ganga-Bhagirathi River and their comparison, *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, 2(2-3), 120-146.
19. Phillips, S. J.; Anderson, R. P.; & R. E. Schapire, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions, *Ecological modelling*, 190(3-4), 231-259.
20. Pourghasemi, H. R.; Moradi, H. R.; & M. Mohammadi, 2014. Landslide Susceptibility Zoning, Using Weight of Evidence Probabilistic, Geospetial information Technology, 1 (2), 69-80. (In Persian).
21. Rezaei, S.; Nadery, S.; & P. Karami, 2017. Spring and summer habitat suitability modeling of wild boar (*Sus scrofa*) in Jassb wildlife refuge of Arak using Maximum Entropy (MaxEnt) method, *Journal of Animal Environment*, 9(2), 25-36.

22. Rustayi, S.H. and Jananeh, K, 2018. Zoning the risk of slope instability in the potential catchment area of Ardabil Chay using fuzzy hierarchical method, *Journal of Geography and Planning*. 23(70): 169-188.
23. Safari, A.; Pourfarzaneh, S.; & A. J. Musivand, 2011. Assessing the vulnerability of urban areas to flood risk using GIS and fuzzy logic Case study: Tehran Region 3, *Applied Research in Geographical Sciences*, 17(20), 129-150. (In Persian).
24. Sahana, M.; Rehman, S.; Sajjad, H.; & H. Hong, 2020. Exploring effectiveness of frequency ratio and support vector machine models in storm surge flood susceptibility assessment: A study of Sundarban Biosphere Reserve, India, *Catena*, 189, 104450.
25. Saremi, N.; Bazrafshan, O.; Esmaelpour, Y.; & M. Sour, 2018. Flood Zoning and Assessment of Surface Runoff Channels Efficiency in Bandar-Abbas Urban Watershed, *Journal of Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 42(12), 42-51. (in Persian)
26. Seyedian, M, 2013. River flow forecasting using data mining and time series, *Journal of Echo Hydrology*. 1(3): 167-179.
27. Shin, S.; Kyung, S.; Lee, T.; & Kim, J.H, 2005. An application of support vector machines in bankruptcy prediction model, expert system with application, 28:127-135.
28. Siahkamari, S.; Haghizadeh, A.; Zeinivand, H.; Tahmasebipour, N.; & O. Rahmati, 2018. Spatial prediction of flood-susceptible areas using frequency ratio and maximum entropy models, *Geocarto international*, 33(9), 927-941.
29. Tabarestani, S.H, 2020. Evaluation of flood potential in the watershed of Mazandaran province by AHP method, *Journal of Environment and Water Engineering*. 6(4): 331-341. (in Persian)
30. Vafakhah, M.; Loor, S. M. H.; Pourghasemi, H.; & A. Katebikord, 2020. Comparing performance of random forest and adaptive neuro-fuzzy inference system data mining models for flood susceptibility mapping, *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 417.

## Risk analysis of urban flood in Bandar Abbas using Machine Learning model and Analytic Hierarchy Process

**Yousef Ahmadi:** *Ph.D Student in Watershed Management, Natural Resources Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Hormozgan, BandarAbbas*

**Ommolbanini Bazrafshan\*:** *Associate professor, Natural Resources Department, Faculty of Agriculture & Natural Resources, University of Hormozgan, BandarAbbas, Iran*

**Ali Salajeghe:** *Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Agriculture & Natural Resources Campous, University of Tehran, Karaj, Iran.*

**Arashk Holisazi:** *Assistant Professor, Watershed Management Department, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resource, Gorgan, Iran*

**Ali Azare:** *Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Human Science , Jiroft University*

Article History (Received: 2021/03/12      Accepted: 2021/04/17)

### Extended abstract

#### 1- Introduction

Floods are one of the natural events that cause human casualties and damage to buildings, facilities, gardens, fields, and natural resources every year. Urbanization disturbs the balance of slopes through indirect intrusion within watersheds, kills vegetation, soil compaction, and changes in the profile of waterways, increases the severity of floods, and increases the amount of sediment generated. At the foot of the mountain, which includes the city's physical fabric expansion area, the natural drainage pattern disrupts and increases the risk of urban flooding. On the one hand, because of its geographical position and the heavy rainfall regime over a short period of time, and on the other hand, because of its significant growth and development, especially during the last decade, and because of its location, the town of Bandar Abbas faces flood problems. On the other hand, flood risk zoning has not been considered so far in order to be used in the planning and management of flood protection and control in Bandar Abbas, and not much work has been done in this area in the form of research and even studies. Flood risk zoning is therefore important in order to forecast the degree of flood damage under various circumstances and the economic and social basis for flood control and containment systems. Risk modeling and flood vulnerability mapping will play an important role in future decision-making, flood management, and land management in the area of the study in some cases.

#### 2- Methodology

In general, the first step in the implementation of research in watershed management, environmental, natural resources, agriculture, etc. projects is the preparation of the data used in that project. The data needed to investigate the hazard, vulnerability, and risk of urban floods in Bandar Abbas in the first stage are: 1- Height 2- Land slope 3- Distance from water table 4- Water transport capacity of canal 5- Distance from river 6- Distance from collection network of surface runoff was obtained from Iran Water Resources Management Organization and city demographic data Bandar Abbas was prepared by the Statistics Center of Iran. A map of four key factors, including building quality, urban density, population density and, socio-economic status, has been prepared to examine the vulnerability. Two models of Maximum Entropy (MaxEnt) and Support Vector Machine (SVM) were used to investigate the risk, vulnerability, and risk of flooding and urban flooding in Bandar Abbas. Then, the Area under Curve (AUC) obtained from the curve ROC was used in order to test the model's efficiency. After estimating flood hazard, a hierarchical analysis model was used in order to estimate flood vulnerability in this report. Finally, the map of flood risk was obtained based on hazard and vulnerability maps.

#### 3- Results

Based on the Maximum Irregularity Model, the results obtained from the flood risk prediction map showed that the southern parts of Bandar Abbas had a greater likelihood of flooding. It is also likely that parts of



Bandar Abbas city center will be flooded. Bandar Abbas western and eastern areas are less likely to be flooded. Support has also shown that the southern, eastern, and southwestern regions are listed as likely to undergo urban flooding in order to help control urban floods. Using the SVM, the flood prediction map shows that the southern, eastern, and southwestern areas are more likely to flood; however, the northern and northwestern parts of Bandar Abbas are less likely to flood. The AUC was used in order to prepare the models. In the two phases of training and validation, the accuracy of the model suggests the highest irregularity. The Maximum Entropy Model, based on these curves, was 99.7% accuracy in the training phase and 94.2% accuracy in the validation phase. Therefore, in both the training and validation phases, the MaxEnt had excellent performance (area under the curve about 90%). The findings of hierarchical analysis have shown that the most important effective criterion for vulnerability is population density. The standard of construction, urban density and socio-economic status were ranked second, and fourth, respectively. Finally, on the basis of the risk map review, it can be claimed that there is a higher degree of risk in the southern parts of Bandar Abbas and parts of Bandar Abbas city center.

#### **4- Discussion & Conclusions**

The results of the model accuracy evaluation show that SVM has accuracy in flood probability spatial prediction and in identifying areas vulnerable to flooding. It can also be seen that the SVM had better performance than the model of the support vector machine. Since most urban areas such as Bandar Abbas lack reliable hydraulic and hydrological knowledge, a new approach to flood management and urban flooding may be the use of machine learning models and historical urban flooding events. Machine learning models are highly capable of spatial analysis of flood events and urban flooding, as well as extracting the relationships between environmental variables and flood events, based on the tests conducted. The flood risk map revealed in this analysis that the central and southern sections of Bandar Abbas are more susceptible to flood. Prioritization and expert studies have shown that among the factors influencing vulnerability, the population density factor is the most significant. The map of vulnerability based on different factors also showed that there is a greater degree of vulnerability in the central and coastal areas. Comprehensive flood risk analysis has shown that there is a high risk of flooding in the southern and central parts of Bandar Abbas and these areas have a high priority for urban runoff and flood control.

**Key Words: Flood Vulnerability; Spatial Prediction; Support vector machines; Maxent model**