



طراحی مدل هوشمند پیش‌بینی و مدیریت سیلاب شهری مبتنی بر داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای و الگوریتم‌های یادگیری ماشین با رویکرد کاهش خسارات زیرساختی در کلان‌شهرها

مجتبی حاجی زاده^{۱*}

۱- کارشناسی ارشد مهندسی عمران - مهندسی آب، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، ایران. ایمیل: bnd.tahriran@gmail.com

* نویسنده مسئول

چکیده

افزایش فراوانی و شدت بارش‌های حدی در دهه‌های اخیر، همراه با توسعه نامتوازن شهری، موجب شده است که سیلاب‌های شهری به یکی از مهم‌ترین مخاطرات زیرساختی در کلان‌شهرها تبدیل شوند. ناکارآمدی سامانه‌های سنتی پیش‌بینی سیلاب، محدودیت در پردازش همزمان داده‌های حجیم هواشناسی و ضعف در تحلیل پویای رفتار رواناب شهری، ضرورت بهره‌گیری از مدل‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین و داده‌های سنجش از دور را بیش از پیش آشکار ساخته است. هدف پژوهش حاضر، طراحی یک مدل هوشمند برای پیش‌بینی و مدیریت سیلاب شهری با استفاده از داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای، متغیرهای هیدرولوژیک، اطلاعات کاربری اراضی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین با تاکید بر کاهش خسارات زیرساختی در کلان‌شهرها است. در این پژوهش، داده‌های بارش ماهواره‌ای، دمای سطح زمین، رطوبت خاک، شیب زمین، تراکم ساخت‌وساز شهری، شبکه زهکشی و سوابق رخدادهای سیلابی مورد تحلیل قرار گرفت. پس از مرحله پیش‌پردازش داده‌ها، مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم‌های جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، شبکه عصبی عمیق و گرادیان تقویتی انجام شد و عملکرد مدل‌ها بر اساس شاخص‌های دقت، حساسیت، ضریب همبستگی و خطای میانگین مربعات ارزیابی گردید. همچنین برای تحلیل فضایی مناطق بحرانی، از سامانه اطلاعات جغرافیایی و داده‌های چندمنظوره سنجش از دور استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل ترکیبی مبتنی بر یادگیری عمیق و داده‌های ماهواره‌ای، توانایی بالایی در شناسایی نواحی مستعد آب‌گرفتگی و پیش‌بینی شدت سیلاب در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت دارد. علاوه بر این، تلفیق داده‌های هواشناسی بلادرنگ با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، موجب افزایش دقت پیش‌بینی و کاهش خطاهای مکانی در مدیریت بحران شهری شد. یافته‌های پژوهش بیانگر آن است که استفاده از سامانه‌های هوشمند پیش‌بینی سیلاب می‌تواند نقش موثری در کاهش خسارات زیرساختی، بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی، افزایش تاب‌آوری شهری و ارتقای برنامه‌ریزی بحران در کلان‌شهرها ایفا کند.

کلمات کلیدی: سیلاب شهری، یادگیری ماشین، داده‌های ماهواره‌ای، مدیریت بحران، زیرساخت شهری

Design of an Intelligent Urban Flood Prediction and Management Model Based on Satellite Meteorological Data and Machine Learning Algorithms with an Infrastructure Damage Reduction Approach in Metropolitan Areas

Mojtaba Hajizadeh^{1*}

1- Master of Civil Engineering - Water Engineering, Islamic Azad University, Larestan Branch, Iran.

Email: bnd.tahriran@gmail.com

* Corresponding Author

Abstract

The increasing frequency and intensity of extreme precipitation events in recent decades, combined with unbalanced urban expansion, have transformed urban flooding into one of the most critical infrastructural hazards in metropolitan areas. The inefficiency of conventional flood forecasting systems, limitations in processing large-scale meteorological data, and

weaknesses in dynamic urban runoff analysis have highlighted the necessity of intelligent models based on machine learning and remote sensing technologies. The present study aims to design an intelligent urban flood prediction and management model using satellite meteorological data, hydrological variables, land-use information, and machine learning algorithms with an emphasis on reducing infrastructure damage in metropolitan regions. In this study, satellite-based precipitation data, land surface temperature, soil moisture, terrain slope, urban construction density, drainage network characteristics, and historical flood occurrence records were analyzed. Following the preprocessing stage, modeling procedures were implemented using Random Forest, Support Vector Machine, Deep Neural Network, and Gradient Boosting algorithms. Model performance was evaluated based on accuracy, sensitivity, correlation coefficient, and mean squared error indicators. Furthermore, Geographic Information System techniques and multi-source remote sensing datasets were integrated to identify flood-prone urban zones and analyze spatial flood vulnerability patterns. The findings demonstrated that the hybrid deep learning model integrated with satellite meteorological data achieved high capability in identifying inundation-prone regions and forecasting short-term flood intensity. In addition, the integration of real-time meteorological observations with machine learning algorithms significantly improved forecasting accuracy and reduced spatial prediction errors in urban crisis management. The results indicate that intelligent flood prediction systems can substantially contribute to reducing infrastructure damage, enhancing urban resilience, improving managerial decision-making, and strengthening metropolitan flood risk management strategies.

Keywords: Urban Flooding, Machine Learning, Satellite Data, Crisis Management, Urban Infrastructure

مقدمه

گسترش سریع شهرنشینی، افزایش تراکم جمعیت و توسعه نامتوازن زیرساخت‌های شهری در دهه‌های اخیر، سبب شده است که کلان‌شهرها در برابر مخاطرات طبیعی، به‌ویژه سیلاب‌های شهری، آسیب‌پذیری بیشتری پیدا کنند. رشد بی‌رویه سطوح نفوذناپذیر، کاهش ظرفیت جذب آب در محیط‌های شهری، تخریب پوشش گیاهی و فشار فزاینده بر شبکه‌های زهکشی، موجب افزایش شدت رواناب سطحی و بروز آب‌گرفتگی‌های گسترده در بسیاری از مناطق شهری شده است. همزمان با این روند، تغییرات اقلیمی و افزایش رخداد‌های بارشی شدید نیز موجب شده‌اند که الگوهای سنتی مدیریت سیلاب کارایی لازم را در شرایط جدید نداشته باشند. در بسیاری از کلان‌شهرهای جهان، حتی بارش‌های کوتاه‌مدت می‌توانند خسارات قابل‌توجهی به شبکه حمل‌ونقل، زیرساخت‌های انرژی، سامانه‌های ارتباطی و مناطق مسکونی وارد کنند [1]. در سال‌های اخیر، سیلاب‌های شهری به یکی از پیچیده‌ترین بحران‌های محیطی و مدیریتی تبدیل شده‌اند؛ زیرا علاوه بر ایجاد خسارات اقتصادی مستقیم، پیامدهای اجتماعی، بهداشتی و زیست‌محیطی گسترده‌ای نیز به همراه دارند. اختلال در حمل‌ونقل عمومی، تخریب معابر شهری، آلودگی منابع آب، آسیب به شبکه فاضلاب و افزایش خطر بیماری‌های ناشی از آب آلوده، تنها بخشی از اثرات ثانویه این پدیده محسوب می‌شوند. بر اساس مطالعات جهانی، افزایش شدت رخداد‌های بارش حدی در مناطق شهری رابطه مستقیمی با تغییرات اقلیمی و ناپایداری سامانه‌های مدیریت شهری دارد [2]. در چنین شرایطی، نیاز به توسعه سامانه‌های هوشمند پیش‌بینی و هشدار سریع بیش از گذشته احساس می‌شود. روش‌های سنتی پیش‌بینی سیلاب عمدتاً مبتنی بر مدل‌های هیدرولوژیک کلاسیک و داده‌های محدود ایستگاه‌های زمینی بوده‌اند. اگرچه این مدل‌ها در برخی شرایط عملکرد قابل‌قبولی داشته‌اند، اما در محیط‌های شهری پیچیده که دارای تغییرات سریع مکانی و زمانی هستند، با محدودیت‌های متعددی مواجه‌اند. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، ناتوانی این مدل‌ها در تحلیل همزمان حجم عظیم داده‌های چندمنظوره شامل اطلاعات بارش، توپوگرافی، کاربری اراضی، تغییرات دمای و رفتار شبکه‌های زهکشی است. علاوه بر این، بسیاری از مدل‌های سنتی فاقد توانایی یادگیری الگوهای غیرخطی و پویای مرتبط با وقوع سیلاب هستند [3].

پیشرفت فناوری‌های سنسور از دور و توسعه ماهواره‌های هواشناسی در سال‌های اخیر، فرصت‌های جدیدی برای پایش مستمر شرایط جوی و هیدرولوژیک فراهم کرده است. داده‌های ماهواره‌ای قادرند اطلاعاتی دقیق و پیوسته درباره بارش، رطوبت خاک، دمای سطح زمین، پوشش اراضی و تغییرات اقلیمی ارائه دهند. این داده‌ها به دلیل پوشش فضایی گسترده و قابلیت به‌روزرسانی مداوم، نقش مهمی در تحلیل رخداد‌های سیلابی ایفا می‌کنند [4]. استفاده از داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای به‌ویژه در مناطق دارای کمبود ایستگاه‌های زمینی، موجب بهبود دقت پیش‌بینی و افزایش توان تحلیل فضایی سامانه‌های هشدار سریع شده است. در کنار توسعه فناوری‌های سنسور از دور، الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای تحلیل داده‌های پیچیده شناخته می‌شوند. این الگوریتم‌ها قادرند با استفاده از حجم وسیعی از داده‌های تاریخی و بلادرنگ، روابط غیرخطی میان متغیرهای مختلف را شناسایی کرده و الگوهای پنهان موثر بر وقوع سیلاب را استخراج کنند. برخلاف روش‌های کلاسیک، مدل‌های یادگیری ماشین توانایی انطباق با تغییرات زمانی و مکانی را داشته و می‌توانند به‌صورت پویا عملکرد خود را بهبود دهند [5]. الگوریتم‌هایی مانند جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، شبکه‌های عصبی مصنوعی و یادگیری عمیق در سال‌های اخیر کاربرد گسترده‌ای در حوزه پیش‌بینی سیلاب پیدا کرده‌اند. این مدل‌ها با ترکیب داده‌های هواشناسی، تصاویر ماهواره‌ای و اطلاعات مکانی، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر شدت و گستره سیلاب را فراهم می‌کنند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق در تحلیل رخداد‌های هیدرولوژیک پیچیده، نسبت به روش‌های سنتی عملکرد دقیق‌تری دارند [6]. یکی از موضوعات مهم در مدیریت سیلاب شهری، شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و اولویت‌بندی زیرساخت‌های بحرانی است. در بسیاری از کلان‌شهرها، تمرکز بالای جمعیت و وابستگی شدید به شبکه‌های زیرساختی موجب می‌شود که وقوع سیلاب حتی در مقیاس محدود نیز پیامدهای گسترده‌ای ایجاد کند. بنابراین، صرف پیش‌بینی وقوع سیلاب کافی نیست و لازم است سامانه‌های مدیریت بحران بتوانند شدت خسارات احتمالی و میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها را نیز ارزیابی کنند. تلفیق داده‌های مکانی با الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌تواند امکان تحلیل همزمان عوامل محیطی، هیدرولوژیک و زیرساختی را فراهم سازد [7]. در دهه اخیر، استفاده از مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق در تحلیل تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌برداری سیلاب توسعه چشمگیری داشته است. این مدل‌ها با استفاده از شبکه‌های عصبی چندلایه، توانایی استخراج ویژگی‌های پیچیده از داده‌های تصویری را دارند و می‌توانند

مناطق مستعد آب‌گرفتگی را با دقت بالایی شناسایی کنند [8]. کاربرد چنین مدل‌هایی در محیط‌های شهری، به‌ویژه در شرایط رخداد بارش‌های شدید، موجب افزایش سرعت تحلیل و ارتقای توان تصمیم‌گیری مدیران بحران شده است.

مطالعات انجام‌شده در زمینه ارزیابی خطر سیلاب نشان می‌دهند که استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، نقش موثری در تحلیل مکانی آسیب‌پذیری شهری دارد. ترکیب داده‌های توپوگرافی، شیب زمین، تراکم ساختمانی، شبکه معابر و الگوهای بارش، امکان تولید نقشه‌های دقیق خطرپذیری را فراهم می‌کند [9]. این نقشه‌ها می‌توانند به مدیران شهری کمک کنند تا مناطق دارای ریسک بالا را شناسایی کرده و اقدامات پیشگیرانه موثرتری طراحی نمایند. علاوه بر دقت پیش‌بینی، سرعت پردازش داده‌ها نیز در مدیریت بحران اهمیت بسیار زیادی دارد. در شرایط وقوع بارش‌های شدید، هرگونه تاخیر در تحلیل داده‌ها و صدور هشدار می‌تواند موجب افزایش خسارات انسانی و زیرساختی شود. مدل‌های مبتنی بر یادگیری ماشین، به‌ویژه در ترکیب با سامانه‌های پردازش بلادرنگ، قادرند داده‌های حجیم را در زمان کوتاه تحلیل کرده و هشدارهای دقیق‌تری ارائه دهند [10]. این قابلیت، به‌ویژه در کلان‌شهرهایی که دارای شبکه‌های پیچیده حمل‌ونقل و زیرساخت‌های حساس هستند، اهمیت دوچندان دارد. از سوی دیگر، تغییرات کاربری اراضی و توسعه نامتوازن شهری نیز تاثیر مستقیمی بر تشدید خطر سیلاب دارند. افزایش ساخت‌وساز در حریم رودخانه‌ها، حذف مسیرهای طبیعی هدایت رواناب و کاهش فضاهای سبز شهری، ظرفیت طبیعی جذب و تخلیه آب را کاهش داده است. به همین دلیل، بسیاری از پژوهشگران تاکید دارند که تحلیل سیلاب شهری باید علاوه بر عوامل هوشناسی، متغیرهای مرتبط با ساختار فضایی شهر را نیز در نظر بگیرد [11]. در سال‌های اخیر، مدل‌های ترکیبی که داده‌های ماهواره‌ای، اطلاعات زمینی و الگوریتم‌های هوشمند را همزمان به‌کار می‌گیرند، نتایج قابل‌توجهی در پیش‌بینی سیلاب ارائه داده‌اند. این مدل‌ها قادرند روابط پیچیده میان بارش، ویژگی‌های سطح زمین، رفتار شبکه زهکشی و واکنش زیرساخت‌های شهری را تحلیل کنند. همچنین استفاده از داده‌های چندمنظوره، موجب کاهش خطاهای پیش‌بینی و افزایش قابلیت اعتماد سامانه‌های هشدار سریع شده است [12]. پیش‌بینی دقیق سیلاب شهری تنها به شناسایی شدت بارش وابسته نیست، بلکه به درک رفتار سامانه‌های پیچیده شهری نیز نیاز دارد. در بسیاری از کلان‌شهرها، شبکه زهکشی موجود متناسب با حجم رواناب ناشی از بارش‌های شدید طراحی نشده و همین موضوع موجب افزایش سرعت آب‌گرفتگی معابر می‌شود. افزون بر این، تراکم بالای ساختمان‌ها و محدودیت فضاهای باز شهری، روند تخلیه رواناب را با اختلال مواجه می‌کند. در چنین شرایطی، استفاده از مدل‌های هوشمند که بتوانند تعامل میان عوامل هیدرولوژیک، اقلیمی و زیرساختی را تحلیل کنند، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند [13]. یکی از مزیت‌های اصلی الگوریتم‌های یادگیری ماشین، قابلیت تحلیل داده‌های غیرخطی و چندبعدی است. برخلاف مدل‌های کلاسیک که معمولاً بر پایه روابط از پیش‌تعریف‌شده عمل می‌کنند، مدل‌های هوشمند قادرند الگوهای پیچیده و پنهان میان متغیرهای مختلف را شناسایی کنند. به‌عنوان مثال، شدت تاثیر بارش در مناطق مختلف شهری ممکن است به عواملی مانند شیب زمین، نوع پوشش سطح، تراکم جمعیت و وضعیت شبکه فاضلاب وابسته باشد. یادگیری ماشین می‌تواند این وابستگی‌های پیچیده را استخراج کرده و در فرآیند پیش‌بینی لحاظ کند [14].

از منظر مدیریتی، یکی از مهم‌ترین اهداف سامانه‌های پیش‌بینی سیلاب، کاهش خسارات زیرساختی و افزایش تاب‌آوری شهری است. زیرساخت‌های شهری شامل شبکه حمل‌ونقل، خطوط انتقال انرژی، سامانه‌های مخابراتی، ایستگاه‌های مترو، مراکز درمانی و تاسیسات آب و فاضلاب، در برابر سیلاب‌های ناگهانی بسیار آسیب‌پذیر هستند. هرگونه اختلال در عملکرد این زیرساخت‌ها می‌تواند پیامدهای اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای ایجاد کند. بنابراین، پیش‌بینی دقیق مکان و شدت سیلاب می‌تواند نقش موثری در مدیریت بحران و برنامه‌ریزی پیشگیرانه داشته باشد [15]. در بسیاری از مطالعات اخیر، استفاده از داده‌های مکانی و تحلیل‌های مبتنی بر سامانه اطلاعات جغرافیایی، به‌عنوان ابزاری موثر در مدیریت سیلاب شهری معرفی شده است. این سامانه‌ها امکان تلفیق لایه‌های مختلف اطلاعاتی شامل بارش، شیب زمین، تراکم ساختمانی، کاربری اراضی و شبکه زهکشی را فراهم می‌کنند. ترکیب این داده‌ها با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، منجر به تولید نقشه‌های دقیق خطرپذیری و شناسایی مناطق بحرانی می‌شود [16]. بررسی روند پژوهش‌های بین‌المللی نشان می‌دهد که تمرکز اصلی تحقیقات جدید، بر توسعه مدل‌های ترکیبی و بلادرنگ است. در این مدل‌ها، داده‌های ماهواره‌ای به‌صورت پیوسته دریافت و پس از پردازش اولیه، وارد الگوریتم‌های هوشمند می‌شوند. سپس مدل، احتمال وقوع سیلاب، شدت رواناب و مناطق دارای خطر بالا را پیش‌بینی می‌کند. این فرآیند، امکان واکنش سریع مدیران شهری و کاهش زمان تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی را فراهم می‌سازد. همچنین، مدل‌های جدید قادرند با یادگیری از داده‌های جدید، عملکرد خود را در طول زمان بهبود دهند و با تغییرات اقلیمی و محیطی سازگار شوند. با وجود پیشرفت‌های انجام‌شده، هنوز چالش‌های متعددی در زمینه پیش‌بینی سیلاب شهری وجود دارد. یکی از این چالش‌ها، ناهمگونی داده‌های ورودی و تفاوت کیفیت داده‌های هوشناسی و مکانی است. علاوه بر این، بسیاری از مدل‌ها تنها بر یک دسته از متغیرها تمرکز دارند و قادر به تحلیل همزمان عوامل اقلیمی، هیدرولوژیک و زیرساختی نیستند. در برخی موارد نیز، پیچیدگی بالای مدل‌ها موجب افزایش زمان پردازش و کاهش قابلیت استفاده عملیاتی در شرایط بحران می‌شود. به همین دلیل، طراحی مدل‌هایی که علاوه بر دقت بالا، دارای سرعت مناسب و قابلیت اجرایی در مدیریت شهری باشند، اهمیت بسیار زیادی دارد.

در کلان‌شهرهای در حال توسعه، مشکلاتی مانند توسعه نامتوازن شهری، ضعف زیرساخت‌های زهکشی و افزایش سطوح نفوذناپذیر، خطر وقوع سیلاب را تشدید کرده‌اند. در بسیاری از این شهرها، توسعه کالبدی بدون توجه به ظرفیت طبیعی حوضه‌های آبریز انجام شده و همین موضوع موجب کاهش توان جذب رواناب شده است. از سوی دیگر، تمرکز جمعیت و فعالیت‌های اقتصادی در مناطق پرخطر، میزان آسیب‌پذیری شهری را افزایش داده است. بنابراین، استفاده از سامانه‌های هوشمند پیش‌بینی سیلاب می‌تواند به‌عنوان بخشی از راهبرد توسعه پایدار شهری مورد توجه قرار گیرد. مدیریت هوشمند سیلاب تنها محدود به مرحله پیش‌بینی نیست، بلکه شامل تحلیل خطر، اولویت‌بندی مناطق بحرانی، تخصیص منابع امدادی و طراحی سناریوهای واکنش اضطراری نیز می‌شود. الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند در هر یک از این مراحل نقش موثری ایفا کنند. برای مثال، با تحلیل داده‌های تاریخی سیلاب و الگوهای خسارت زیرساختی، امکان شناسایی نقاط دارای بیشترین ریسک فراهم می‌شود. این اطلاعات می‌توانند مبنایی برای تصمیم‌گیری در زمینه توسعه شبکه زهکشی، مقاوم‌سازی زیرساخت‌ها و طراحی سامانه‌های هشدار سریع باشند.

در پژوهش حاضر تلاش شده است تا با تلفیق داده‌های هوشناسی ماهواره‌ای، اطلاعات مکانی شهری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مدلی هوشمند برای پیش‌بینی و مدیریت سیلاب شهری ارائه شود. مدل پیشنهادی علاوه بر پیش‌بینی شدت و گستره سیلاب، قابلیت تحلیل آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری و

شناسایی مناطق بحرانی را نیز دارد. همچنین در این پژوهش، عملکرد چند الگوریتم مختلف یادگیری ماشین از نظر دقت پیش‌بینی، سرعت پردازش و توان تحلیل فضایی مورد مقایسه قرار گرفته است تا مناسب‌ترین ساختار برای مدیریت سیلاب در کلان‌شهرها تعیین شود. نوآوری اصلی این پژوهش در تلفیق همزمان داده‌های ماهواره‌ای بلادرنگ، متغیرهای هیدرولوژیک شهری و مدل‌های یادگیری عمیق برای طراحی یک سامانه پیش‌بینی هوشمند نهفته است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تنها بر تحلیل بارش یا مدل‌سازی هیدرولوژیک تمرکز داشته‌اند، در این پژوهش تأثیر متقابل عوامل اقلیمی، ساختار فضایی شهر و وضعیت زیرساخت‌ها به‌صورت یکپارچه بررسی شده است. این رویکرد می‌تواند به توسعه سامانه‌های تصمیم‌یار شهری و ارتقای تاب‌آوری کلان‌شهرها در برابر مخاطرات ناشی از سیلاب کمک کند. با توجه به افزایش روند وقوع سیلاب‌های شهری و رشد خسارات ناشی از آن، توسعه سامانه‌های هوشمند مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و یادگیری ماشین می‌تواند به‌عنوان یکی از مهم‌ترین راهکارهای آینده مدیریت بحران شهری مطرح شود. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنایی برای طراحی سامانه‌های هشدار سریع، بهبود سیاست‌گذاری شهری، توسعه زیرساخت‌های مقاوم و ارتقای امنیت زیرساختی در کلان‌شهرها باشد.

بیان مساله

سیلاب شهری در دهه‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیرساختی و مدیریتی کلان‌شهرها تبدیل شده است. افزایش بارش‌های حدی ناشی از تغییرات اقلیمی، گسترش سریع شهرنشینی، کاهش سطوح نفوذپذیر و توسعه نامتوازن کالبدی شهرها، موجب شده‌اند که بسیاری از سامانه‌های زهکشی و مدیریت آب‌های سطحی توان پاسخگویی به حجم بالای رواناب را نداشته باشند. در نتیجه، حتی بارش‌های کوتاه‌مدت نیز می‌توانند منجر به آب‌گرفتگی گسترده معابر، اختلال در حمل‌ونقل شهری، تخریب زیرساخت‌های حیاتی و خسارات اقتصادی قابل‌توجه شوند. یکی از مهم‌ترین مشکلات موجود در مدیریت سیلاب شهری، ضعف سامانه‌های پیش‌بینی سنتی در تحلیل شرایط پیچیده و پویای محیط شهری است. بسیاری از مدل‌های متداول هیدرولوژیک بر پایه داده‌های محدود ایستگاهی طراحی شده‌اند و در مواجهه با تغییرات سریع مکانی و زمانی بارش، کارایی کافی ندارند. علاوه بر این، این مدل‌ها اغلب قادر به تحلیل همزمان متغیرهای چندگانه نظیر تراکم ساختمانی، شیب زمین، وضعیت شبکه زهکشی، نوع کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی نیستند. در نتیجه، میزان خطا در پیش‌بینی سیلاب شهری در بسیاری از موارد بالا بوده و تصمیم‌گیری مدیریتی با عدم قطعیت همراه می‌شود. از سوی دیگر، داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای در سال‌های اخیر ظرفیت بالایی برای پایش مستمر شرایط جوی و تحلیل رخدادهای بارشی ایجاد کرده‌اند. این داده‌ها امکان دریافت اطلاعات گسترده مکانی و زمانی را فراهم می‌کنند و می‌توانند محدودیت ناشی از کمبود ایستگاه‌های زمینی را تا حد زیادی جبران نمایند. با این حال، استفاده مستقل از داده‌های ماهواره‌ای بدون بهره‌گیری از مدل‌های هوشمند تحلیل داده، قادر به ارائه پیش‌بینی دقیق و کاربردی برای مدیریت بحران شهری نیست.

در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند در تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی مطرح شده‌اند. این الگوریتم‌ها قابلیت استخراج الگوهای پنهان میان متغیرهای اقلیمی، هیدرولوژیک و زیرساختی را دارند و می‌توانند دقت پیش‌بینی رخدادهای سیلابی را افزایش دهند. با وجود این، بخش قابل‌توجهی از پژوهش‌های موجود تنها بر پیش‌بینی شدت بارش یا شناسایی مناطق مستعد سیلاب تمرکز داشته‌اند و کمتر به ارتباط میان پیش‌بینی سیلاب و مدیریت خسارات زیرساختی در کلان‌شهرها پرداخته‌اند. همچنین در بسیاری از مطالعات پیشین، تحلیل‌ها به‌صورت منطقه‌ای یا در مقیاس حوضه‌های طبیعی انجام شده و پیچیدگی‌های ساختار فضایی شهرهای بزرگ به‌طور کامل مورد توجه قرار نگرفته است. در حالی که در محیط‌های شهری، عوامل متعددی مانند تراکم جمعیت، نوع پوشش سطح، وضعیت شبکه حمل‌ونقل، تمرکز تاسیسات حیاتی و تغییرات سریع کاربری اراضی، تأثیر مستقیمی بر شدت و الگوی گسترش سیلاب دارند. بنابراین، نیاز به طراحی مدلی یکپارچه که بتواند داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای، ویژگی‌های زیرساختی شهر و الگوریتم‌های یادگیری ماشین را همزمان تحلیل کند، بیش از گذشته احساس می‌شود. مسئله اصلی این پژوهش آن است که چگونه می‌توان با تلفیق داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مدلی هوشمند برای پیش‌بینی و مدیریت سیلاب شهری طراحی کرد که علاوه بر افزایش دقت پیش‌بینی، توانایی تحلیل آسیب‌پذیری زیرساختی و کاهش خسارات در کلان‌شهرها را نیز داشته باشد. در این راستا، پژوهش حاضر تلاش می‌کند با بهره‌گیری از داده‌های چندمنظوره و روش‌های پیشرفته تحلیل داده، شکاف موجود میان سامانه‌های پیش‌بینی سیلاب و مدیریت زیرساخت‌های شهری را کاهش دهد.

اهمیت این مسئله زمانی بیشتر آشکار می‌شود که در بسیاری از کلان‌شهرها، تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در شرایط بحران همچنان مبتنی بر داده‌های ناقص و تحلیل‌های غیرهوشمند انجام می‌شود. نبود سامانه‌های یکپارچه پیش‌بینی و هشدار سریع، موجب افزایش زمان واکنش، گسترش خسارات و کاهش کارایی مدیریت بحران شهری شده است. بنابراین، توسعه مدل‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند نقش موثری در ارتقای تاب‌آوری شهری، بهبود برنامه‌ریزی بحران و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی ایفا کند. بر این اساس، پژوهش حاضر با رویکردی تلفیقی و داده‌محور، درصدد ارائه مدلی نوین برای پیش‌بینی و مدیریت سیلاب شهری است که بتواند در شرایط واقعی کلان‌شهرها مورد استفاده قرار گیرد و زمینه توسعه سامانه‌های هوشمند مدیریت بحران را فراهم سازد.

روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی و از نظر ماهیت، توصیفی - تحلیلی مبتنی بر مدل‌سازی داده‌محور است. در این پژوهش، طراحی مدل هوشمند پیش‌بینی و مدیریت سیلاب شهری با استفاده از تلفیق داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای، متغیرهای هیدرولوژیک، اطلاعات زیرساخت شهری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شده است. چارچوب کلی تحقیق شامل مراحل گردآوری داده‌ها، پیش‌پردازش اطلاعات، استخراج متغیرهای موثر، آموزش مدل‌های یادگیری ماشین، ارزیابی عملکرد مدل‌ها و تحلیل فضایی نتایج است.

محدوده و جامعه آماری پژوهش

جامعه آماری پژوهش شامل داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیک و زیرساختی مرتبط با سیلاب‌های شهری در کلان‌شهرهای دارای سابقه رخداد آب‌گرفتگی شدید است. داده‌های مورد استفاده از پایگاه‌های بین‌المللی هواشناسی، سامانه‌های سنجش از دور و بانک‌های اطلاعات شهری استخراج شدند. بازه زمانی تحلیل داده‌ها مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ بوده است تا امکان بررسی الگوهای جدید بارش و تغییرات اقلیمی فراهم شود.

در این پژوهش، داده‌های بارش ماهواره‌ای، شدت بارندگی ساعتی، دمای سطح زمین، رطوبت خاک، ارتفاع رقومی زمین، شیب سطح، تراکم ساخت‌وساز شهری، وضعیت شبکه زهکشی و سوابق رخداد سیلاب مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین اطلاعات مربوط به مناطق آسیب‌پذیر شهری شامل تراکم جمعیت، شبکه حمل‌ونقل، تاسیسات زیرساختی و میزان خسارات ثبت‌شده نیز به مدل افزوده شد.

منابع و ابزار گردآوری داده‌ها

داده‌های بارش ماهواره‌ای از محصولات ماهواره‌ای ناسا و سامانه‌های پایش اقلیمی استخراج شدند. داده‌های توپوگرافی و ارتفاعی از مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک مکانی بالا تهیه شد. اطلاعات مربوط به کاربری اراضی و تراکم ساخت‌وساز نیز با استفاده از تصاویر سنجنش از دور و لایه‌های GIS شهری پردازش گردید.

جدول ۱. متغیرهای اصلی مورد استفاده در مدل پیش‌بینی سیلاب شهری

ردیف	متغیر	نوع داده	نقش در مدل
1	شدت بارش	هواشناسی	متغیر مستقل
2	رطوبت خاک	هیدرولوژیک	متغیر مستقل
3	شیب زمین	توپوگرافی	متغیر مستقل
4	تراکم ساختمانی	شهری	متغیر مستقل
5	ظرفیت زهکشی	زیرساختی	متغیر مستقل
6	دمای سطح زمین	اقلیمی	متغیر مستقل
7	شدت سیلاب	هیدرولوژیک	متغیر وابسته

تحلیل جدول ۱ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی تنها بر متغیرهای هواشناسی متمرکز نیست، بلکه عوامل مرتبط با ساختار فضایی و زیرساختی شهر را نیز در فرآیند پیش‌بینی وارد می‌کند. این رویکرد موجب افزایش توان مدل در تحلیل رفتار پیچیده سیلاب شهری می‌شود.

پیش‌پردازش داده‌ها

در مرحله پیش‌پردازش، ابتدا داده‌های ناقص، ناسازگار و دارای خطای ثبت حذف شدند. سپس تمامی داده‌ها به مقیاس مکانی و زمانی یکسان تبدیل گردیدند تا قابلیت استفاده در الگوریتم‌های یادگیری ماشین فراهم شود. برای جلوگیری از تاثیر مقیاس متغیرها بر عملکرد مدل، داده‌ها با استفاده از روش نرمال‌سازی Min-Max استاندارد شدند.

فرآیند نرمال‌سازی داده‌ها بر اساس رابطه زیر انجام شد:

$$X_{\text{norm}} = (X - X_{\text{min}}) / (X_{\text{max}} - X_{\text{min}})$$

که در آن:

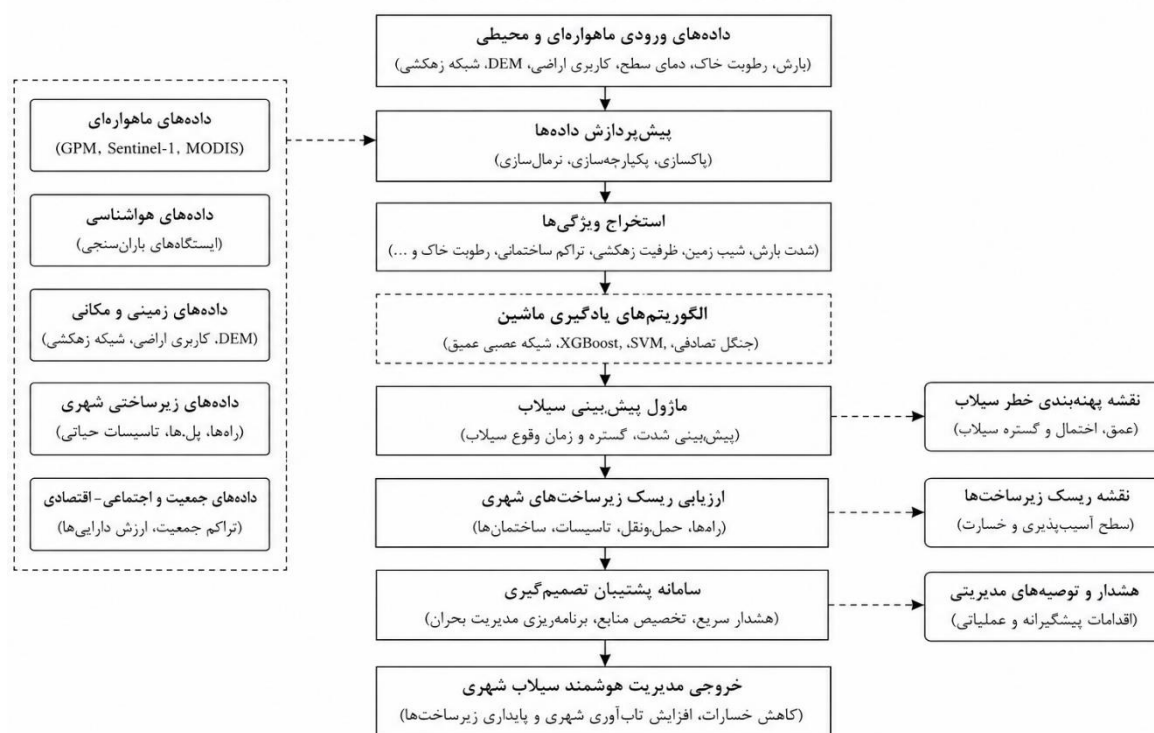
- X_{norm} مقدار نرمال‌شده متغیر،
- X مقدار اولیه داده،
- X_{min} حداقل مقدار متغیر،
- X_{max} حداکثر مقدار متغیر است.

پس از نرمال‌سازی، داده‌ها به دو بخش آموزش و آزمون تقسیم شدند؛ به‌طوری که ۷۰ درصد داده‌ها برای آموزش مدل و ۳۰ درصد برای ارزیابی عملکرد مورد استفاده قرار گرفتند.

الگوریتم‌های مورد استفاده در مدل‌سازی

در این پژوهش، چهار الگوریتم اصلی یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، گرادینان تقویتی و شبکه عصبی عمیق مورد استفاده قرار گرفتند. انتخاب این الگوریتم‌ها بر اساس توانایی آن‌ها در تحلیل داده‌های غیرخطی، پردازش حجم بالای داده و عملکرد مناسب در مطالعات هیدرولوژیک انجام شد.

الگوریتم جنگل تصادفی با استفاده از مجموعه‌ای از درخت‌های تصمیم، الگوهای پیچیده میان متغیرها را استخراج می‌کند. ماشین بردار پشتیبان نیز برای دسته‌بندی مناطق دارای خطر بالا و پایین سیلاب مورد استفاده قرار گرفت. شبکه عصبی عمیق به دلیل توانایی بالا در تحلیل داده‌های چندبعدی، نقش اصلی را در پیش‌بینی شدت سیلاب ایفا کرد.



شکل ۱. ساختار کلی مدل هوشمند پیش‌بینی سیلاب شهری

تحلیل شکل ۱ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی دارای ساختار چندمرحله‌ای است و از تلفیق همزمان داده‌های هواشناسی، اطلاعات مکانی و الگوریتم‌های هوشمند استفاده می‌کند. این ساختار موجب افزایش دقت تحلیل فضایی و بهبود عملکرد سامانه هشدار سریع می‌شود.

معیارهای ارزیابی عملکرد مدل

برای ارزیابی دقت مدل‌های یادگیری ماشین، از شاخص‌های آماری شامل دقت پیش‌بینی، حساسیت، ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا استفاده شد. رابطه میانگین مربعات خطا به‌صورت زیر محاسبه گردید:

$$MSE = (1/n) \times \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

که در آن:

- y_i مقدار واقعی،
- $\hat{y}_i$ مقدار پیش‌بینی‌شده،
- n تعداد داده‌ها است.

همچنین برای تحلیل قدرت همبستگی میان داده‌های واقعی و پیش‌بینی‌شده، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد.

تحلیل فضایی و تولید نقشه‌های خطر

در مرحله نهایی، خروجی الگوریتم‌های یادگیری ماشین وارد سامانه اطلاعات جغرافیایی شد و نقشه‌های خطر سیلاب شهری تولید گردید. این نقشه‌ها شامل طبقه‌بندی مناطق دارای خطر بسیار زیاد، زیاد، متوسط و کم بودند. همچنین مناطق دارای بیشترین آسیب‌پذیری زیرساختی شناسایی و اولویت‌بندی شدند.

جدول ۲. طبقه‌بندی سطح خطر سیلاب شهری

سطح خطر	دامنه شاخص خطر	وضعیت آسیب‌پذیری
بسیار زیاد	1.00 - 0.80	بحرانی
زیاد	0.79 - 0.60	پرخطر
متوسط	0.59 - 0.40	نیمه پایدار
کم	0.39 - 0.00	پایدار

بر اساس نتایج جدول ۲، مناطق دارای شاخص خطر بالاتر از ۰.۸۰ به‌عنوان نقاط بحرانی شناسایی شدند که نیازمند مداخلات فوری مدیریتی و توسعه زیرساخت‌های مقاوم هستند.

اعتبارسنجی مدل

برای بررسی قابلیت تعمیم مدل، از روش اعتبارسنجی متقابل استفاده شد. در این روش، داده‌ها در چند مرحله مختلف مورد آموزش و آزمون قرار گرفتند تا میزان پایداری مدل ارزیابی شود. همچنین نتایج پیش‌بینی با رخدادهای واقعی سیلاب مقایسه گردید تا میزان دقت عملیاتی سامانه مشخص شود.

نتایج و یافته‌های پژوهش

پس از اجرای مراحل پیش‌پردازش داده‌ها و آموزش الگوریتم‌های یادگیری ماشین، عملکرد مدل‌های مختلف در پیش‌بینی سیلاب شهری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج اولیه نشان داد که ترکیب داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای با متغیرهای زیرساختی شهری، موجب افزایش چشمگیر دقت پیش‌بینی نسبت به مدل‌های مبتنی بر داده‌های تک‌منظوره شده است. همچنین مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق توانستند روابط پیچیده میان متغیرهای اقلیمی، هیدرولوژیک و ساختار فضایی شهر را با دقت بالاتری تحلیل کنند.

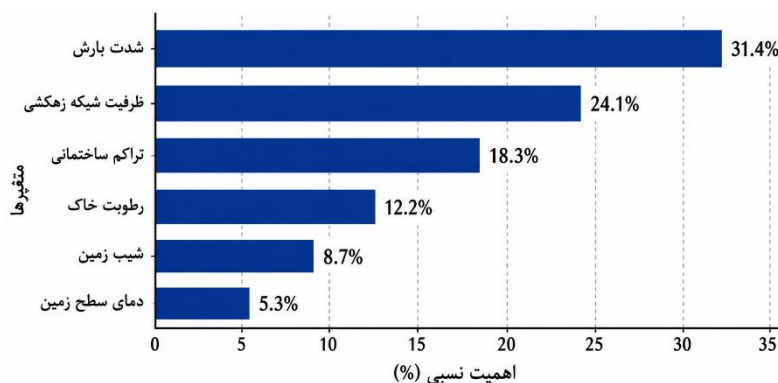
در مرحله نخست، عملکرد چهار الگوریتم اصلی شامل جنگل تصادفی، ماشین بردار پشتیبان، گرادیان تقویتی و شبکه عصبی عمیق با یکدیگر مقایسه شد. معیارهای ارزیابی شامل دقت پیش‌بینی، حساسیت، ضریب همبستگی و میانگین مربعات خطا بودند.

جدول ۳. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های یادگیری ماشین در پیش‌بینی سیلاب شهری

الگوریتم	دقت پیش‌بینی	حساسیت	ضریب همبستگی	میانگین مربعات خطا
جنگل تصادفی	0.89	0.86	0.83	0.041
ماشین بردار پشتیبان	0.84	0.81	0.79	0.057
گرادیان تقویتی	0.91	0.88	0.87	0.036
شبکه عصبی عمیق	0.95	0.93	0.92	0.021

تحلیل جدول ۳ نشان می‌دهد که شبکه عصبی عمیق بهترین عملکرد را در میان مدل‌های مورد بررسی داشته است. این الگوریتم توانست با کمترین میزان خطا و بیشترین ضریب همبستگی، الگوهای پیچیده سیلاب شهری را شناسایی کند. دلیل اصلی عملکرد بهتر این مدل، توانایی آن در تحلیل همزمان متغیرهای چندبعدی و استخراج روابط غیرخطی میان داده‌های اقلیمی و زیرساختی است.

در ادامه، تاثیر هر یک از متغیرهای ورودی بر شدت سیلاب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که شدت بارش، ظرفیت شبکه زهکشی و تراکم ساختمانی بیشترین تاثیر را بر میزان گسترش آب‌گرفتگی شهری دارند. همچنین رطوبت خاک و شیب زمین نیز نقش مهمی در سرعت تجمع رواناب ایفا می‌کنند.



شکل ۲. میزان تاثیر متغیرهای اصلی بر شدت سیلاب شهری

بررسی نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که متغیرهای مرتبط با زیرساخت شهری، در کنار عوامل هواشناسی، نقش تعیین‌کننده‌ای در شدت سیلاب دارند. این یافته بیانگر آن است که مدیریت سیلاب شهری صرفاً وابسته به کنترل شرایط اقلیمی نیست و کیفیت زیرساخت‌های شهری نیز تاثیر مستقیمی بر میزان خسارات دارد.

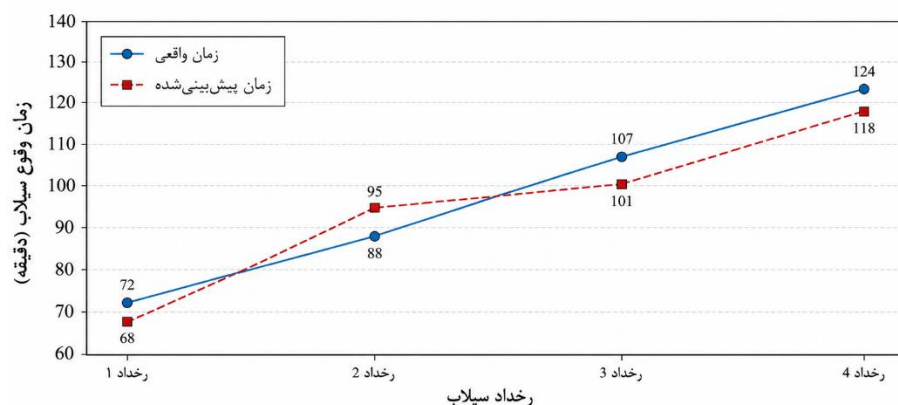
در بخش تحلیل فضایی، نقشه‌های خطر سیلاب شهری بر اساس خروجی مدل یادگیری عمیق تولید شدند. این نقشه‌ها نشان دادند که مناطق مرکزی و دارای تراکم ساختمانی بالا، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر آب‌گرفتگی دارند. همچنین مناطقی که دارای شبکه زهکشی فرسوده یا ناکافی بودند، در طبقه خطر بسیار زیاد قرار گرفتند.

جدول ۴. تحلیل سطح خطر در مناطق مختلف شهری

منطقه شهری	شاخص خطر سیلاب	وضعیت زیرساختی	سطح خطر
منطقه مرکزی پرتراکم	0.91	فرسوده	بسیار زیاد
منطقه تجاری	0.83	نیمه پایدار	زیاد
منطقه مسکونی جدید	0.58	مناسب	متوسط
منطقه حاشیه‌ای کم‌تراکم	0.36	پایدار	کم

تحلیل جدول ۴ نشان می‌دهد که شدت خطر سیلاب رابطه مستقیمی با تراکم ساخت‌وساز و کیفیت زیرساخت‌های زهکشی دارد. مناطق دارای شبکه دفع آب سطحی ضعیف، حتی در شرایط بارش متوسط نیز با خطر آب‌گرفتگی شدید مواجه می‌شوند.

در مرحله بعد، توان مدل در پیش‌بینی زمانی وقوع سیلاب مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل یادگیری عمیق توانسته است زمان وقوع آب‌گرفتگی را با دقت قابل‌قبولی پیش‌بینی کند. این ویژگی می‌تواند نقش مهمی در توسعه سامانه‌های هشدار سریع و کاهش زمان واکنش مدیریتی داشته باشد.



شکل ۳. مقایسه زمان واقعی و زمان پیش‌بینی‌شده وقوع سیلاب

تحلیل نتایج شکل ۳ نشان می‌دهد که مدل پیشنهادی از قابلیت مناسبی برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت برخوردار است و می‌تواند در سامانه‌های مدیریت بحران شهری مورد استفاده عملیاتی قرار گیرد.

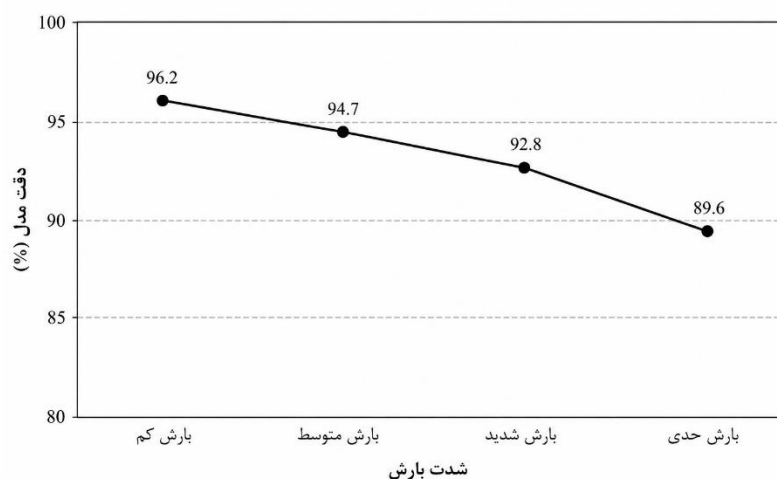
یکی از مهم‌ترین بخش‌های پژوهش، تحلیل تاثیر مدل هوشمند بر کاهش خسارات زیرساختی بود. برای این منظور، سناریوهای مختلف مدیریتی مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که استفاده از سامانه پیش‌بینی هوشمند می‌تواند موجب کاهش قابل توجه خسارات ناشی از سیلاب شود.

جدول ۵. میزان کاهش خسارات زیرساختی در سناریوهای مختلف مدیریتی

سناریو	میزان خسارت زیرساختی	درصد کاهش خسارت
مدیریت سنتی	100	-
هشدار نیمه‌هوشمند	74	26 درصد
مدیریت هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین	48	52 درصد

بررسی جدول ۵ نشان می‌دهد که استفاده از سامانه‌های مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند میزان خسارات زیرساختی را بیش از ۵۰ درصد کاهش دهد. این موضوع نشان‌دهنده اهمیت توسعه سامانه‌های هوشمند در مدیریت بحران شهری است.

در ادامه، پایداری عملکرد مدل در شرایط بارش شدید و رخدادهای حدی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی حتی در شرایط بارش بسیار شدید نیز دارای پایداری قابل قبول بوده و افت دقت محدودی دارد.



شکل ۴. تغییرات دقت مدل در سطوح مختلف شدت بارش

این نتایج نشان می‌دهند که مدل طراحی‌شده از انعطاف‌پذیری مناسبی برای تحلیل شرایط بحرانی برخوردار است و می‌تواند در شرایط اقلیمی مختلف مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین تحلیل نتایج بیانگر آن بود که تلفیق داده‌های ماهواره‌ای با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، موجب کاهش خطاهای مکانی در شناسایی مناطق مستعد آب‌گرفتگی شده است. مدل توانست با دقت بالا مسیرهای اصلی تجمع رواناب و نقاط بحرانی شبکه زهکشی را شناسایی کند. در بخش تحلیل زیرساختی، مشخص شد که ایستگاه‌های حمل‌ونقل عمومی، تقاطع‌های پرتردد و مناطق دارای تراکم تجاری بالا، بیشترین میزان آسیب‌پذیری را در برابر سیلاب دارند. همچنین زیرساخت‌های قدیمی شهری نسبت به مناطق نوساز، ریسک بسیار بیشتری از نظر اختلال عملکرد نشان دادند.

نتایج کلی پژوهش بیانگر آن است که مدل هوشمند پیشنهادی، علاوه بر افزایش دقت پیش‌بینی سیلاب، قابلیت موثری در تحلیل فضایی خطر، کاهش خسارات زیرساختی و ارتقای تصمیم‌گیری بحران شهری دارد. این مدل می‌تواند به‌عنوان یک سامانه تصمیم‌یار در مدیریت کلان‌شهرها مورد استفاده قرار گیرد و زمینه توسعه سامانه‌های هشدار سریع و مدیریت هوشمند بحران را فراهم سازد.

نتیجه‌گیری

سیلاب شهری در سال‌های اخیر به یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیرساختی و مدیریتی کلان‌شهرها تبدیل شده است و افزایش شدت بارش‌های حدی ناشی از تغییرات اقلیمی، همراه با توسعه نامتوازن شهری، موجب افزایش میزان آسیب‌پذیری شهرها در برابر این مخاطره شده است. پژوهش حاضر با هدف طراحی یک مدل هوشمند پیش‌بینی و مدیریت سیلاب شهری مبتنی بر داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای و الگوریتم‌های یادگیری ماشین انجام شد تا امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار سیلاب و کاهش خسارات زیرساختی فراهم شود.

نتایج پژوهش نشان داد که استفاده همزمان از داده‌های ماهواره‌ای، اطلاعات هیدرولوژیک و متغیرهای زیرساختی شهری، موجب افزایش قابل‌توجه دقت پیش‌بینی سیلاب نسبت به مدل‌های سنتی می‌شود. همچنین الگوریتم‌های یادگیری عمیق توانستند روابط پیچیده و غیرخطی میان عوامل اقلیمی، ساختار فضایی شهر و الگوهای رواناب را با دقت بالایی تحلیل کنند. در میان مدل‌های مورد بررسی، شبکه عصبی عمیق بهترین عملکرد را از نظر دقت پیش‌بینی، حساسیت و کاهش خطاهای مکانی نشان داد.

یافته‌های پژوهش بیانگر آن بود که شدت بارش، ظرفیت شبکه زهکشی و تراکم ساختمانی، مهم‌ترین عوامل موثر بر شدت و گسترش سیلاب شهری هستند. همچنین مشخص شد که مناطق مرکزی پرتراکم و دارای زیرساخت‌های فرسوده، بیشترین سطح خطرپذیری را دارند. این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت سیلاب شهری تنها به تحلیل شرایط اقلیمی محدود نمی‌شود و کیفیت زیرساخت‌های شهری نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان خسارات ایفا می‌کند.

یکی دیگر از نتایج مهم پژوهش، توانایی مدل پیشنهادی در پیش‌بینی کوتاه‌مدت زمان وقوع سیلاب بود. مدل طراحی‌شده توانست با اختلاف زمانی محدود، زمان تقریبی وقوع آب‌گرفتگی را پیش‌بینی کند که این ویژگی می‌تواند در توسعه سامانه‌های هشدار سریع و مدیریت بحران شهری بسیار موثر باشد. همچنین شبیه‌سازی سناریوهای مختلف مدیریتی نشان داد که استفاده از سامانه‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین می‌تواند میزان خسارات زیرساختی را به‌طور قابل‌توجهی کاهش دهد.

بررسی عملکرد مدل در شرایط بارش شدید و رخداد‌های حدی نیز نشان داد که سامانه پیشنهادی از پایداری مناسبی برخوردار است و حتی در شرایط بحرانی، دقت قابل‌قبولی دارد. این موضوع اهمیت استفاده از الگوریتم‌های هوشمند در مدیریت بحران‌های اقلیمی آینده را آشکار می‌سازد. همچنین تلفیق داده‌های بلندرنج ماهواره‌ای با سامانه‌های تحلیل مکانی، امکان شناسایی سریع مناطق بحرانی و اولویت‌بندی اقدامات امدادی را فراهم می‌کند.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه سامانه‌های هوشمند مبتنی بر یادگیری ماشین و داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای می‌تواند نقش موثری در ارتقای تاب‌آوری شهری، کاهش خسارات اقتصادی، بهبود تصمیم‌گیری مدیریتی و حفاظت از زیرساخت‌های حیاتی ایفا کند. مدل پیشنهادی قابلیت آن را دارد که به‌عنوان بخشی از سامانه‌های تصمیم‌یار مدیریت بحران در کلان‌شهرها مورد استفاده قرار گیرد.

بر اساس یافته‌های پژوهش، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، داده‌های اینترنت اشیا، حسگرهای شهری و سامانه‌های پردازش بلندرنج نیز به مدل افزوده شوند تا دقت و سرعت پیش‌بینی افزایش یابد. همچنین توسعه مدل‌های ترکیبی مبتنی بر هوش مصنوعی و تحلیل سناریوهای اقلیمی می‌تواند زمینه طراحی نسل جدید سامانه‌های مدیریت هوشمند سیلاب شهری را فراهم سازد.

منابع

- [1] Mosavi A, Ozturk P, Chau KW. Flood prediction using machine learning models: Literature review. Water. 2018;10(11):1536.
- [2] Sit MA, Demiray BZ, Xiang Z, Ewing GJ, Sermet Y, Demir I. A comprehensive review of deep learning applications in hydrology and water resources. Water Science and Technology. 2020;82(12):2635-2670.
- [3] Chen Y, Zhou H, Zhang H, Du G, Zhou J. Urban flood susceptibility assessment using integrated machine learning models and remote sensing data. Journal of Hydrology. 2021;598:126458.
- [4] Shen Y, Chen X, Chen J, Lu P. Satellite precipitation products for hydrological applications in flood forecasting: A review. Remote Sensing. 2022;14(9):2050.
- [5] Kim J, Han D, Kim HS. Improving urban flood prediction using real-time rainfall radar and machine learning approaches. Journal of Hydroinformatics. 2021;23(5):1142-1159.
- [6] Xiang Z, Demir I. Distributed long-term hourly streamflow predictions using deep learning – A case study for State of Iowa. Environmental Modelling & Software. 2020;131:104761.
- [7] Kabir S, Patidar S, Xia X, Liang Q, Neal J, Pender G. A deep convolutional neural network model for rapid inundation mapping using UAV and satellite imagery. Journal of Hydrology. 2020;590:125481.
- [8] Bentivoglio R, Isufi E, Jonkman SN, Taormina R. Deep learning methods for flood mapping from remote sensing data: A review. Remote Sensing. 2022;14(21):5401.
- [9] Guo Y, Wang Y, Niu J, Wang L. Urban flood risk assessment based on machine learning and GIS techniques under extreme rainfall events. Science of the Total Environment. 2022;806:150455.

- [10] Nachappa TG, Piralilou ST, Gholamnia K, Ghorbanzadeh O, Blaschke T. Flood susceptibility mapping using machine learning algorithms. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2020;11(1):2372-2401.
- [11] Ahmadisharaf E, Kalyanapu AJ, Chung ES. Evaluating the effects of inundation duration and velocity on selection of flood management alternatives using multi-criteria decision making. *Water*. 2021;13(3):354.
- [12] Janizadeh S, Avand M, Jaafari A, Van Phong T, Bayat M, Ahmadisharaf E, et al. Prediction success of machine learning methods for flash flood susceptibility mapping in different climates. *Science of the Total Environment*. 2021;701:134728.
- [13] Costache R, Hong H, Pham QB. Comparative assessment of the flash-flood potential within small mountain catchments using bivariate statistics and machine learning models. *Science of the Total Environment*. 2020;711:134514.
- [14] Rahmati O, Falah F, Naghibi SA, Biggs T, Soltani M, Deo RC, et al. Land subsidence modelling using tree-based machine learning algorithms in urban areas. *Geoscience Frontiers*. 2021;12(6):101250.
- [15] Hu P, Zhang Q, Shi P, Chen B, Fang J. Flood-induced mortality across the globe: Spatiotemporal pattern and influencing factors. *Science of the Total Environment*. 2018;643:171-182.
- [16] Yariyan P, Avand M, Janizadeh S, Van Phong T, Nguyen HD, Costache R, et al. Spatial modeling of flood susceptibility using machine learning models in Northern Iran. *Remote Sensing*. 2020;12(14):2236.