



University of Tehran Press

Analyzing the Impacts of Urban Sprawl on Flood and Runoff Patterns with a Sustainable Urban Management Approach: A Case Study of Ahvaz

Mohsen Niroomand¹ | Parham Pahlavani^{2*} | Behnaz Bigdeli³

1. Department of GIS, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: k.niroomand@ut.ac.ir

2. Corresponding Author, Department of GIS, School of Surveying and Geospatial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran. E-mail: Pahlavani@ut.ac.ir

3. Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran. E-mail: bigdeli@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received: January 26, 2025

Revised: February 23, 2025

Accepted: May 19, 2025

Published online: March 05, 2026

Keywords:

Urban sprawl,
Urban flood,
Otsu's thresholding,
Sentinel satellite imagery,
XGBoost model.

ABSTRACT

Urban sprawl, characterized by uncontrolled and dispersed expansion of built-up areas, is a common pattern of city growth. This phenomenon alters runoff patterns and urban flooding risks by increasing impervious surfaces, ultimately exacerbating flood hazards in developed areas. This study aims to examine the impact of urban sprawl on runoff and flood extent by analyzing land cover changes in Ahvaz from 2017 to 2023. To this end, Sentinel-1 and Sentinel-2 satellite imagery, along with the XGBoost machine learning model, were employed to classify land into built-up and non-built-up areas. Furthermore, Shannon entropy was utilized to assess urban growth patterns, while runoff and flood-prone areas were delineated using Otsu's thresholding method. The Shannon entropy analysis indicates that built-up areas have expanded towards the urban periphery, leading to an increase in impervious surfaces and intensified runoff. Consequently, over 2 hectares of newly developed land were affected by runoff during the study period. Additionally, more than 15 hectares of built-up areas were inundated during the floods of April 2019 and December 2020. Moreover, multiple regression analysis reveals that urban expansion, alongside precipitation levels, plays a significant role in increasing the occurrence of runoff and flooding events. The findings of this study underscore the necessity of intelligent urban development management through the implementation of permeable infrastructure, the expansion of green spaces, and the optimization of drainage systems to mitigate runoff and flood-related risks.

Cite this article: Niroomand, M.; Pahlavani, P. & Bigdeli, B. (2025-2026). Analyzing the Impacts of Urban Sprawl on Flood and Runoff Patterns with a Sustainable Urban Management Approach: A Case Study of Ahvaz. *Town and Country Planning*.17 (2), 411-427. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.389412.670492>



© Authors retain the copyright and full publishing rights.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.389412.670492>

Publisher: University of Tehran Press.



تحلیل آثار گسترش افقی شهری بر رواناب و سیلاب با رویکرد مدیریت پایدار شهری (مطالعه موردی: شهر اهواز)

محسن نیرومند^۱ | پرهام پهلوانی^{۲*} | بهناز بیگدلی^۳

۱. گروه مهندسی سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: k.niroomand@ut.ac.ir
۲. نویسنده مسئول، گروه مهندسی سیستم اطلاعات مکانی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Pahlavani@ut.ac.ir
۳. دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. رایانامه: bigdeli@shahroodut.ac.ir

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله:

پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۲/۱۴

کلیدواژه:

تصاویر ماهواره‌ای Sentinel، روش آستانه‌گذاری اوتسو، روش یادگیری ماشین XGBoost، سیلاب، گسترش افقی شهری.

گسترش افقی شهری با توسعه کنترل نشده و پراکنده مناطق ساخته شده یکی از الگوهای رایج رشد شهرها به شمار می‌رود. این پدیده، از طریق افزایش سطوح نفوذناپذیر، الگوهای رواناب و سیلاب‌های شهری را تغییر می‌دهد و به افزایش خطر آب‌گرفتگی در نواحی توسعه یافته منجر می‌شود. پژوهش حاضر، با هدف بررسی تأثیر گسترش افقی بر گستره رواناب و سیلاب، تغییرات پوشش اراضی شهر اهواز را طی دوره ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ تحلیل کرده است. در این زمینه، از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-1 و Sentinel-2 و مدل یادگیری ماشین XGBoost جهت طبقه‌بندی اراضی به دو کلاس مناطق ساخته شده و غیر ساخته شده استفاده شده است. همچنین، با استفاده از شاخص آنتروپی شانون تغییرات الگوی رشد شهری ارزیابی و پهنه‌های رواناب و سیلاب با روش آستانه‌گذاری اوتسو استخراج شده است. نتایج تحلیل آنتروپی شانون نشان می‌دهد که مناطق ساخته شده به سمت پیرامون شهر پیشروی داشته است. این امر سبب افزایش سطوح نفوذناپذیر و تشدید رواناب شده است؛ طوری که بیش از ۲ هکتار از اراضی توسعه یافته طی دوره مطالعه تحت تأثیر رواناب قرار گرفته‌اند. همچنین بیش از ۱۵ هکتار از مناطق ساخته شده در سال‌های منتهی به وقوع سیلاب‌های فروردین ۱۳۹۸ و آذر ۱۳۹۹، طی این وقایع، دچار آب‌گرفتگی شده‌اند. افزون بر آن، تحلیل رگرسیون چندگانه نشان می‌دهد گسترش شهری در کنار عامل میزان بارش نقش بسزایی در افزایش وقوع پدیده‌های سیلاب و رواناب ایفا می‌کند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت مدیریت هوشمند توسعه شهری از طریق به کارگیری زیرساخت‌های نفوذپذیر، توسعه فضاهای سبز، و بهینه‌سازی سیستم‌های زهکشی به منظور کاهش خطرات ناشی از رواناب و سیلاب تأکید دارد.

استناد: نیرومند، محسن؛ پهلوانی، پرهام و بیگدلی، بهناز (۱۴۰۴). تحلیل آثار گسترش افقی شهری بر رواناب و سیلاب با رویکرد مدیریت پایدار شهری (مطالعه موردی: شهر اهواز). *آمایش سرزمین*، ۱۷ (۲) ۴۱۱-۴۲۷. <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.389412.670492>

© نویسندگان. ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jtcp.2025.389412.670492>



مقدمه

طی دهه‌های گذشته، افزایش جمعیت شهرنشین و ضرورت پاسخ‌گویی به نیازهای شهروندان سبب توسعه و بروز تغییرات بسیاری در مناظر شهری نقاط مختلف جهان شده است. پدیده گسترش افقی شهری^۱ یکی از الگوهای متداول توسعه شهری محسوب می‌شود (Brueckner, 2000). این پدیده با توسعه غیر متمرکز، پراکنده، و اغلب برنامه‌ریزی نشده مناطق شهری شناخته می‌شود و می‌تواند تأثیرات گسترده‌ای بر ساختارهای زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی سکونتگاه‌ها داشته باشد (Wei & Ewing, 2018). اخلاص در چرخه هیدرولوژیکی و بروز وقایع سیلاب^۲ و رواناب^۳ از پیامدهای مخرب این پدیده به شمار می‌روند. گسترش افقی شهری عمدتاً سبب افزایش ساخت‌وساز در نواحی پیرامونی شهرها می‌شود و در نتیجه این پدیده فضای سبز، باغات، اراضی بایر، و زمین‌های کشاورزی به مناطق ساخته‌شده تبدیل می‌شوند (Hatab et al., 2019). تغییر پوشش اراضی سبب افزایش مناطق نفوذناپذیر از جمله آسفالت و بتن می‌شود. این امر ظرفیت خاک جهت جذب و ذخیره آب را به شدت کاهش می‌دهد و با ایجاد تغییرات عمده در چرخه هیدرولوژیکی منجر به وقوع پدیده‌های رواناب و سیلاب می‌شود (Ding et al., 2024). رواناب به آب‌هایی اطلاق می‌شود که به واسطه بارش بر سطح زمین جاری و به مسیرهای آبی هدایت می‌شوند (Karvonen, 2011). توسعه شهری و گسترش مناطق نفوذناپذیر سبب تبدیل مستقیم سهم بالایی از آب بارندگی به رواناب‌ها می‌شود. کاهش پوشش گیاهی سبب تسریع حرکت آب‌های جاری می‌شود و در نتیجه آن حجم و سرعت رواناب‌ها به طور چشمگیری افزایش می‌یابد (Jacobson, 2011). در صورت عملکرد ناکارآمد سیستم‌های زهکشی، تجمع و جاری شدن سریع حجم بالای آب در مناطق شهری منجر به وقوع سیلاب‌های ناگهانی می‌شود (Karvonen, 2011). این امر به‌ویژه در کشورهای توسعه‌نیافته و در حال توسعه به بروز خسارات فراوانی می‌انجامد. به این ترتیب، گسترش افقی شهری سبب تغییر الگوی جریان آب می‌شود و با فشار بر سیستم‌های زهکشی موجب مدیریت ناکارآمد آب‌های جاری و بروز سیلاب می‌شود؛ طوری که شدت، مدت، و محدوده مکانی وقوع سیلاب در مناطق شهری و پیراشهری از پیوند میان گسترش شهری و پویایی سیستم هیدرولوژیکی حاصل می‌شود (Tahmasebi et al., 2021). این امر نشان می‌دهد که مقابله با چالش‌های ناشی از گسترش افقی و در نتیجه آن سیلاب شهری نیازمند شناخت و بررسی ارتباط میان این پدیده‌ها است. با هدف تحقق بند یازدهم از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد^۴ که بر ایجاد شهرها و سکونتگاه‌های انسانی پایدار، ایمن، و مقاوم در برابر مخاطرات تأکید دارد، شناخت ارتباط میان گسترش افقی شهری و سیلاب‌ها می‌تواند زمینه‌ساز برنامه‌ریزی مؤثر و مدیریت پایدار منابع طبیعی و شهری شود. مطالعات و تصمیم‌گیری‌های هدفمند در این زمینه منجر به حصول توسعه پایدار، مدیریت منابع آبی، و بهبود تاب‌آوری شهری در برابر سیلاب‌ها می‌شود (Franci et al., 2015). امروزه، بهبود وضوح مکانی و زمانی تصاویر ماهواره‌ای و توسعه علوم سیستم‌های اطلاعات مکانی^۵ (GIS) فرصت‌های جدیدی جهت ارزیابی دقیق تغییرات کاربری زمین و تأثیر آن بر پدیده‌های هیدرولوژیکی فراهم آورده است (Mesvari & Shah-Hoseini, 2024). با توجه به اهمیت مسئله و چالش‌های مرتبط با گسترش افقی شهرها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، یک بررسی جامع و کمی از این رابطه می‌تواند به ارائه راهکارهای مدیریتی مؤثر جهت کاهش خسارات ناشی از سیلاب و بهبود کیفیت زندگی شهری منجر شود. در این زمینه، مطالعه حاضر به ارزیابی گسترش افقی شهری و بررسی تأثیر آن در رشد رواناب و سیلاب‌های مناطق شهری اهواز با توجه به میزان بارش در بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ می‌پردازد. شهر اهواز، واقع در جنوب غربی کشور ایران، طی سالیان گذشته سیلاب‌های بزرگی را تجربه کرده است. بدین منظور، تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱^۶ و سنتینل-۲^۷ جهت نقشه‌برداری سیلاب و پایش گسترش مناطق ساخته‌شده مورد

1. urban sprawl
2. flood
3. runoff
4. <https://sdgs.un.org/goals>
5. geospatial information system
6. sentinel-1
7. sentinel-2

استفاده قرار می‌گیرند. تصاویر اپتیکی و رادار دهانه مصنوعی^۱ (SAR)، با توانایی تصویربرداری در تمامی شرایط آب‌وهوایی، منابع ارزشمندی جهت بررسی ارتباط گسترش افقی شهری و سیلاب‌ها به شمار می‌روند (Mesvari & Shah-Hosseini, 2023).

اهداف و سؤالات پژوهش

گسترش افقی سریع شهرها در دهه‌های اخیر منجر به پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی، و اجتماعی زیان‌باری در نقاط مختلف جهان به‌خصوص کشورهای در حال توسعه شده است. در این میان، سیلاب و رواناب‌ها سبب تحمیل خسارات فراوانی به اماکن شهری و جمعیت شهرنشین شده‌اند. این امر لزوم شناخت صحیح ارتباط میان گسترش افقی شهری و چرخه هیدرولوژیکی جهت مدیریت و برنامه‌ریزی هدفمند با هدف تحقق اهداف توسعه پایدار را نمایان می‌سازد. به این منظور، تحقیق حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های GIS به ارزیابی ارتباط گسترش افقی شهری و بروز وقایع سیلاب و رواناب در محدوده شهری اهواز طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ می‌پردازد. اهداف زیر در ضمن این تحقیق پیگیری می‌شوند:

- بررسی توزیع مکانی و کمی‌سازی گسترش افقی شهری؛
- بررسی گستره و تحلیل مکانی مناطق ساخته‌شده تحت سیلاب و رواناب؛
- بررسی وقایع سیلاب و رواناب شهری با توجه به دو عامل کلیدی گسترش افقی و بارندگی؛
- با توجه به اهداف مورد نظر، سؤالات زیر جهت هدایت مسیر تحقیق مطرح می‌شوند:
- تصاویر ماهواره‌ای و روش‌های GIS چگونه جهت پایش گسترش افقی شهری و پهنه‌بندی سیلاب و رواناب مورد استفاده قرار می‌گیرند؟
- مناطق تازه‌ساخته‌شده چگونه تحت تأثیر سیلاب و رواناب قرار می‌گیرند؟
- سهم هر یک از عوامل کلیدی گسترش افقی و میزان بارش در وقوع سیلاب و رواناب چقدر است؟

پیشینه پژوهش

گسترش افقی شهری و تأثیر آن بر وقوع پدیده‌های سیلاب و رواناب لزوم مطالعه، برنامه‌ریزی، و اتخاذ تصمیم‌های هوشمندانه جهت تحقق اهداف توسعه پایدار در این زمینه را نمایان می‌سازد. با پیشرفت علوم در حوزه‌های هوش مصنوعی، سنجش از دور^۲، و GIS مطالعات گوناگونی در زمینه پایش گسترش مناطق ساخته‌شده، اخلاص در چرخه هیدرولوژیکی، و مدیریت چالش‌های ناشی از آن‌ها صورت پذیرفته است.

آیدوو^۳ و ژو (۲۰۲۳) به بررسی ارتباط الگوهای گسترش شهری و خطر وقوع سیلاب در دوازده کلان‌شهر سراسر جهان پرداختند و رشد شهری در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست^۴ مورد ارزیابی قرار دادند و الگوهای مختلف گسترش افقی شهری را شناسایی کردند. همچنین، داده‌های وقایع تاریخی سیل مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده همبستگی بالای گسترش نواری و جهش‌یافته با افزایش احتمال وقوع سیلاب است. استاملو^۵ و همکارانش (۲۰۲۱)، با بهره‌گیری از GIS و اتوماتای سلولی، مدلی جهت ارزیابی گسترش افقی شهری و حساسیت به سیلاب در حوضه رودخانه اراسیانوس در کشور یونان ایجاد کردند. بدین منظور، از مدل‌های تحلیل سلسله‌مراتبی و SLUETH جهت تهیه نقشه‌های حساسیت به سیلاب و پیش‌بینی گسترش شهری استفاده شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد مناطق شهری با بیشترین میزان بارش بالاترین حساسیت به سیلاب را تجربه می‌کنند. عباس^۶ و همکارانش (۲۰۲۰) به بررسی آثار گسترش افقی شهری و کاهش فضاهای سبز در بروز سیلاب در کوماسی غنا پرداختند. این پژوهش با بهره‌گیری از مشاهدات میدانی، تصاویر ماهواره‌ای لندست، و روش طبقه‌بندی

1. synthetic aperture radar
 2. remote sensing
 3. Idowu
 4. landsat
 5. Stamellou
 6. Abass

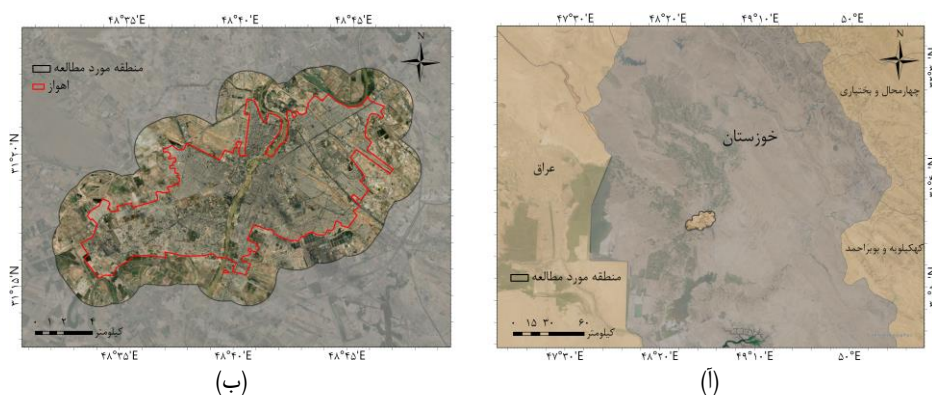
بیشینه احتمال به تهیه نقشه‌های پوشش اراضی پرداخته و افزایش ۵۴ درصدی اراضی ساخته‌شده در بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۶ را نشان داده است. نتایج این مطالعه بر اهمیت کنترل توسعه نامنظم شهری در کاهش مخاطرات سیل و ضرورت اجرای سیاست‌های رشد هوشمند و تقویت فضاهای سبز به منظور مدیریت مؤثر سیلاب تأکید می‌کند. دوی^۱ و همکارانش (۲۰۱۹) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ و ۸ به ارزیابی تأثیر گسترش افقی شهری و تغییرات اقلیمی بر سیلاب‌های منطقه چنای هند پرداختند. نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی و هیدرولیکی در این مطالعه نشان می‌دهد که گسترش شهری و افزایش بارش به ترتیب سبب افزایش ۲۲ درصدی و ۳۴ درصدی مساحت سیلاب‌ها شده و میزان آسیب‌پذیری ساختمان‌ها را به شدت افزایش داده است. فرانچی^۲ و همکارانش (۲۰۱۵) تأثیر گسترش افقی شهری و تغییرات کاربری اراضی بر خطر وقوع سیلاب را در داکا بنگلادش مورد بررسی قرار دادند. ایشان با استفاده از تصاویر چندزمانه لندست و ASTER تغییرات پوشش زمین بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ و مناطق آسیب‌پذیر در برابر رواناب‌ها و رخدادهای شدید همچون سیلاب سال ۲۰۰۴ را شناسایی کردند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد گسترش سریع مناطق شهری و کاهش اراضی زراعی به تشدید خطر سیلاب کمک کرده است.

مطالعه حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ و سنتینل-۲، مدل یادگیری ماشین، و همچنین روش‌های آماری به بررسی کمی و مکانی گسترش شهری و آب‌های جاری می‌پردازد. نیز با تفکیک پدیده‌های رواناب و سیلاب شهری از یک‌دیگر نقش گسترش سطوح نفوذناپذیر در افزایش آب‌های جاری را مطالعه می‌کند. همچنین، نقش این پدیده در گسترش رواناب و سیلاب شهری را در کنار عامل میزان بارندگی مورد بررسی قرار می‌دهد. نتایج حاصل می‌تواند در شناخت علل وقوع سیل و تبیین سیاست‌های بازدارنده راهگشا باشد.

منطقه مورد مطالعه و داده‌های تحقیق

محدوده و قلمرو مورد مطالعه

اهواز، مرکز استان خوزستان و یکی از کلان‌شهرهای جنوب غربی ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیم گرم و خشک خود در معرض چالش‌های زیست‌محیطی متعددی قرار دارد. این شهر در حاشیه رودخانه کارون، بزرگ‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه ایران، واقع شده است که نقش مهمی در تأمین منابع آبی و توسعه کشاورزی و صنعت منطقه ایفا می‌کند. بارش‌های این منطقه عمدتاً به صورت رگبارهای سنگین از سامانه‌های مدیترانه‌ای و دریای سرخ رخ می‌دهد و در کنار تغییرات وسیع کاربری اراضی طی دهه‌های اخیر موجب بروز رواناب و سیلاب‌های گسترده‌ای شده است؛ طوری که اهواز در سال‌های اخیر، به‌ویژه فروردین ۱۳۹۸ و آذر ۱۳۹۹، تحت تأثیر سیلاب‌های بزرگی قرار گرفته است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی شهر اهواز در استان خوزستان و حریم محدوده مطالعاتی را نمایش می‌دهد. جهت بررسی میزان ساخت‌وساز در حاشیه شهر، مطابق شکل، حریم دو کیلومتری اهواز به عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته می‌شود.

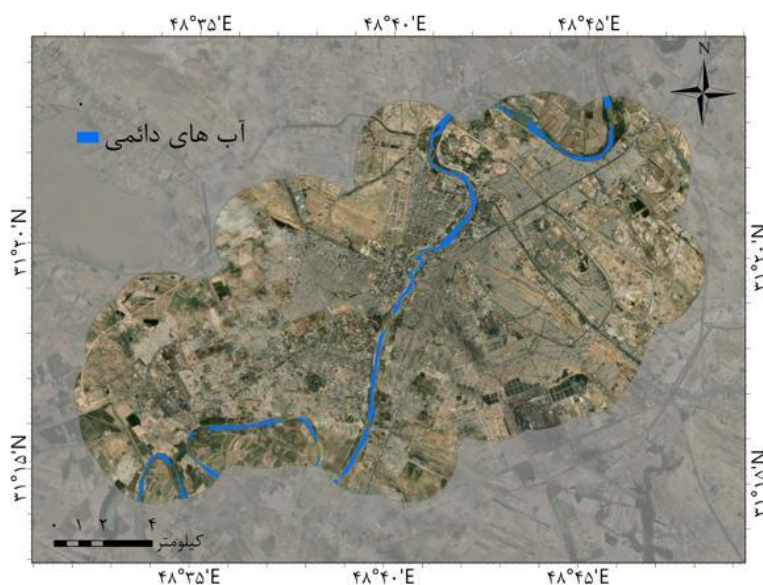


شکل ۱.۱) موقعیت اهواز در استان خوزستان؛ (ب) حریم محدوده مورد مطالعه

مجموعه داده‌ها

داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۱ و سنتینل-۲ در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. تصاویر سنتینل-۱ با وضوح مکانی ۱۰ متر و قطبش VV در باند C، با بهره‌گیری از فناوری راداری SAR، امکان ثبت اطلاعات سطح زمین را در تمامی شرایط جوی و نوری فراهم می‌آورد. این داده‌ها با دوره تناوب زمانی شش روزه جهت پایش تغییرات سطح زمین در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت مناسب‌اند (Mesvari & Shah-Hoseini, 2024). داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۲ در ۱۳ باند طیفی در محدوده‌های مرئی، فروسرخ نزدیک، و فروسرخ میانی اطلاعات متنوعی از پوشش سطح زمین فراهم می‌کنند. وضوح مکانی این داده‌ها در باندهای مرئی و فروسرخ نزدیک ۱۰ متر و در سایر باندها ۲۰ و ۶۰ متر است. تصاویر سنتینل-۲ با دوره تناوب زمانی پنج تا ده روزه به شناسایی دقیق تغییرات مکانی و زمانی در سطح زمین کمک می‌کنند و امکان تحلیل‌های طیفی و بررسی تغییرات پوشش اراضی را به شکل دقیق مهیا می‌سازند (Phiri et al., 2020).

همچنین، مجموعه داده‌های آب‌های دائمی JRC Global Surface Water و همچنین بارش روزانه^۱ CHIRPS نیز در روند تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی سیلاب و رواناب مورد استفاده قرار گرفته‌اند. شکل ۲ نقشه آب‌های دائمی اهواز بر اساس مجموعه داده مورد استفاده را نشان می‌دهد.

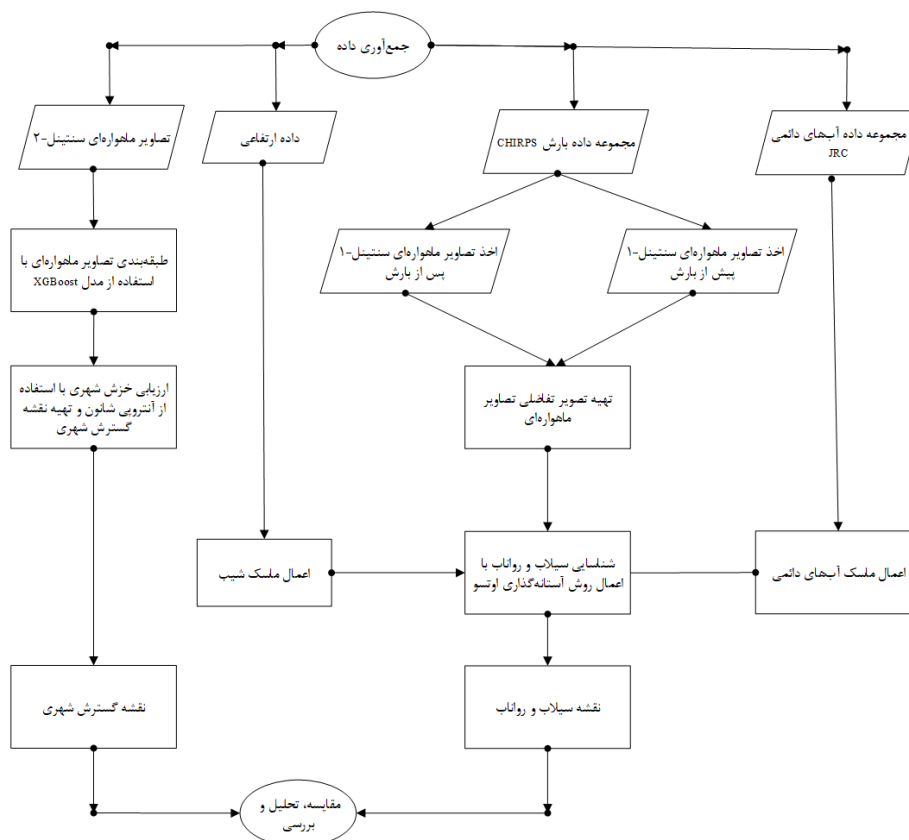


شکل ۲. نقشه آب‌های دائمی شهر اهواز

روش و ابزار تحقیق

مطالعه حاضر با هدف بررسی ارتباط گسترش افقی شهری با گسترش رواناب و سیلاب به تهیه نقشه‌های پوشش اراضی و پهنه‌بندی وقایع سیلاب و رواناب شهر اهواز می‌پردازد. در این زمینه، طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ جهت تهیه نقشه‌های پوشش اراضی با استفاده از مدل یادگیری ماشین XGBoost صورت می‌پذیرد. پهنه‌بندی سیلاب و رواناب، با توجه به زمان بارش‌های منطقه مورد مطالعه و با اعمال روش حدآستانه‌گذاری اوتسو^۲، روی تصاویر سنتینل-۱ انجام می‌گیرد. تحلیل و بررسی نقشه‌ها با استفاده از روش‌های GIS و تکنیک‌های آماری صورت می‌پذیرد. شکل ۳ روش تحقیق پیشنهادی را نمایش می‌دهد.

1. climate hazards center infrared precipitation with station data
2. Otsu's thresholding



شکل ۳. روش تحقیق پیشنهادی

روش‌های تحلیل و مدل‌سازی

پس از اخذ تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه در بازه زمانی مطلوب، پیش‌پردازش داده‌ها شامل تصحیحات اتمسفریک صورت می‌پذیرد. پس از آن، پردازش و مدل‌سازی داده‌ها جهت تهیه نقشه‌های پوشش اراضی، ارزیابی گسترش افقی، و پهنه‌بندی سیلاب و رواناب صورت می‌پذیرد.

طبقه‌بندی پوشش اراضی

در این پژوهش، از مدل یادگیری ماشین XGBoost به منظور طبقه‌بندی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۲ در دو کلاس ساخته‌شده و ساخته‌نشده استفاده شده است. کلاس ساخته‌شده شامل سطوح نفوذناپذیر نظیر ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها، جاده‌ها، و پیاده‌راه‌هاست.

به منظور افزایش دقت طبقه‌بندی، شاخص‌های طیفی $NDVI^1$ ، UI^2 ، $BAEI^3$ ، $SAVI^4$ و $NDVI^5$ از داده‌های ماهواره‌ای استخراج و به کار گرفته شدند (Estoque & Murayama, 2015; Hislop et al., 2018; Javed et al., 2021). این شاخص‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های بازتاب طیفی امکان تفکیک کارآمدتر مناطق ساخته‌شده را فراهم می‌سازند. داده‌های آموزشی و آزمایشی بر اساس سلول‌های تصاویر ماهواره‌ای گردآوری شده و برای آموزش و ارزیابی مدل مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بهینه‌سازی هایپرپارامترهای مدل از طریق روش جست‌وجوی گریدی صورت پذیرفته است (Putatunda & Rama,)

1. normalized difference built-up index
2. urban index
3. built-up area extraction index
4. soil adjusted vegetation index
5. normalized difference vegetation index

(2018). عملکرد مدل با استفاده از معیارهای ارزیابی شامل دقت کلی، ضریب کاپا، صحت، یادآوری^۱، و F1-Score سنجیده شده است (Cohen, 1960; Powers, 2020).

تحلیل گسترش شهری

شاخص آنتروپی شانون به عنوان معیاری برای سنجش پراکندگی و توزیع مکانی پدیده‌ها در تحلیل گسترش افقی شهری و ارزیابی توسعه مناطق ساخته شده استفاده می‌شود (Biney & Boakye, 2021). در این زمینه، منطقه مورد مطالعه به نواحی متحدالمرکز تقسیم شده و مساحت مناطق ساخته شده در هر ناحیه استخراج شده است. آنتروپی شانون نرمال شده مطابق رابطه ۱ مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در این رابطه n نشان دهنده تعداد نواحی و P_i بیانگر نسبت مناطق ساخته شده در هر ناحیه است (Biney & Boakye, 2021).

$$P_i = -\frac{1}{\log(n)} \sum_{i=1}^n P_i \log(P_i) \quad (1)$$

مقدار این شاخص در باز ۰ تا ۱ متغیر است. مقادیر بالاتر نشان دهنده پراکندگی بیشتر و مقادیر پایین تر بیانگر ساخت و ساز متمرکزتر است. این شاخص ابزاری مؤثر جهت تحلیل تغییرات مکانی و کمی سازی الگوهای توسعه شهری در طول زمان محسوب می‌شود (Biney & Boakye, 2021).

پهنه‌بندی سیلاب و رواناب

پژوهش حاضر به پهنه‌بندی سیلاب و رواناب با بهره‌گیری از تصاویر راداری سنتینل-۱ در قطبش VH می‌پردازد. قطبش VH به دلیل حساسیت بالاتر نسبت به تغییرات سطحی توانمندی بیشتری نسبت به قطبش VV در شناسایی مناطق سیلابی، به ویژه در محیط‌های شهری، دارد (Mesvari & Shah-Hosseini, 2023). به منظور کاهش اثر ناشی از زاویه دید ماهواره و تغییرات هندسی تصاویر، صرفاً داده‌های مربوط به گذر نزولی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در ادامه مراحل به کارگیری این فرایند بیان می‌شود.

پیش‌پردازش داده‌ها

در مرحله پیش‌پردازش، تصاویر قبل و بعد از سیلاب موزاییک شده و محدوده مطالعه استخراج شده است. جهت کاهش نویز لکه‌ای ذاتی تصاویر راداری، فیلتر مکانی با شعاع ۵۰ متر اعمال شده است (Senthilnath et al., 2013).

شناسایی مناطق سیلابی

در مرحله پردازش، تصویر اختلافی بین داده‌های پیش و پس از سیلاب ایجاد شده و برای تعیین حد آستانه بهینه از روش حدآستانه‌گذاری اوتسو استفاده شده است (Moharrami et al., 2021). این روش مقدار آستانه را به گونه‌ای تعیین می‌کند که حداکثر جداسازی بین پس‌زمینه و پیش‌زمینه تصویر حاصل شود (Xu et al., 2011). مطابق رابطه ۲، مقدار آستانه t به نحوی انتخاب می‌شود که واریانس بین کلاسی σ_B^2 بیشینه شود (Xu et al., 2011).

$$\sigma_B^2 = \omega_0 \times \omega_1 \times (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (2)$$

در رابطه ۲، ω_0 و ω_1 نسبت پیکسل‌های پیش‌زمینه و پس‌زمینه به کل پیکسل‌های تصویر را نشان می‌دهند. همچنین μ_0 و μ_1 به ترتیب میانگین شدت خاکستری در این دو بخش است.

تفکیک و حذف نواحی غیر سیلابی

به منظور تمرکز بر آب‌های مقطعی، نواحی آبی دائمی با تداوم بیش از ده ماه در سال بر پایه داده‌های JRC Global Surface Water شناسایی و حذف شده‌اند (Pekel et al., 2016). در گام بعد، نواحی با مساحت کمتر از هشت سلول همسایه نویز در نظر گرفته

1. recall

می‌شوند و از فرایند تحلیل حذف می‌شوند. همچنین، مدل ارتفاع رقومی به منظور ماسک کردن نواحی با شیب بیش از ۵ درصد به کار گرفته می‌شود. زیرا این مناطق عمدتاً مستعد جریان سطحی‌اند و احتمال تجمع آب در آن‌ها اندک است.

۱- اعتبارسنجی نتایج

اعتبارسنجی نتایج با استفاده از نمونه‌های مرجع سیلابی و غیر سیلابی انجام شد و با استفاده از معیارهای دقت کلی، ضریب کاپا، و F1-Score صورت گرفت (Cohen, 1960; Powers, 2020).

مقایسه و تحلیل آماری

مقایسه و تحلیل نقشه‌های پوشش اراضی و پهنه‌بندی سیلاب و رواناب همراه با ارزیابی مناطق ساخته‌شده تحت تأثیر سیلاب با بهره‌گیری از ابزارهای سامانه اطلاعات مکانی صورت می‌پذیرد. در این زمینه، از روش‌هایی نظیر آمار ناحیه‌ای^۱ و تحلیل همپوشانی^۲ به منظور بررسی روابط مکانی و ارزیابی میزان تأثیرپذیری مناطق مختلف استفاده شده است (Unwin, 2019; Unwin, 1996). همچنین، تحلیل رگرسیون چندگانه جهت بررسی نقش هر یک از دو متغیر کلیدی بارش و گسترش شهری در وقوع رواناب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه به این تحلیل پرداخته می‌شود.

تحلیل رگرسیون چندگانه

رگرسیون چندگانه یک روش آماری است که جهت مدل‌سازی رابطه بین یک متغیر وابسته و چندین متغیر مستقل استفاده می‌شود. در این روش، تأثیر چندین عامل بر یک نتیجه بررسی می‌شود تا پیش‌بینی دقیقی از رفتار متغیر وابسته صورت پذیرد. مدل رگرسیون چندگانه به شکل رابطه ۳ ارائه می‌شود (Stolzenberg, 2004).

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (3)$$

در رابطه ۳، Y متغیر وابسته، X_n متغیر مستقل n ام، β_0 جز ثابت مدل، و β_n ضریب رگرسیون متغیر n ام است. ε خطای مدل را نشان می‌دهد. ضرایب رگرسیون بیانگر تأثیر هر متغیر مستقل است.

تجزیه و تحلیل داده‌ها

نقشه‌های پوشش اراضی

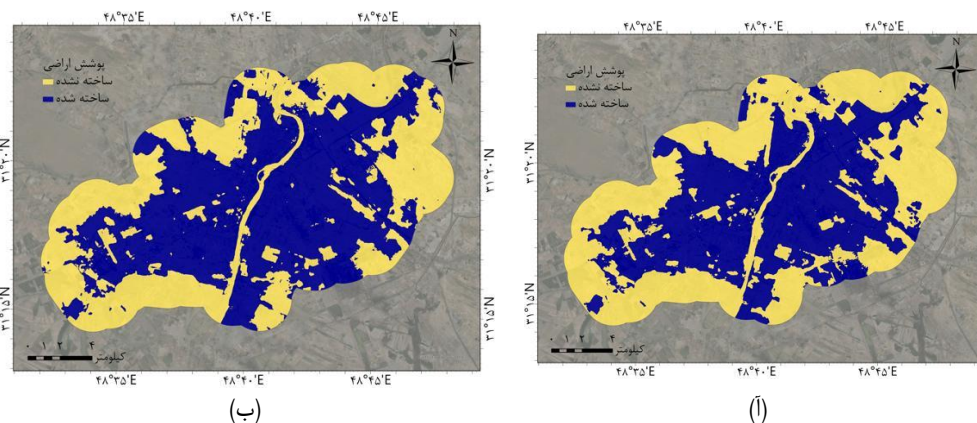
تصاویر ماهواره‌ای منطقه مورد مطالعه طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ بر مبنای مدل XGBoost به دو کلاس ساخته‌شده و ساخته‌نشده طبقه‌بندی می‌شود. بدین منظور ۲۴۴۵۸ سلول از تصویر ماهواره‌ای سال ۱۴۰۲ به عنوان نمونه آموزشی و ۱۱۱۲۵ سلول به عنوان نمونه آزمایشی جمع‌آوری می‌شود. هابپارامترهای مدل مورد نظر بر اساس جست‌وجوی گریدی تنظیم می‌شوند. میزان یادگیری مدل XGBoost معادل ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود. همچنین در روند آموزش ۲۰۰ درخت تصمیم با حداکثر عمق ۸ مورد استفاده قرار می‌گیرند. پس از آموزش، مدل ایجادشده جهت طبقه‌بندی تصاویر تمامی سال‌ها به کار گرفته می‌شود. جدول ۱ مقادیر معیارهای اعتبارسنجی مدل یادگیری ماشین XGBoost را نشان می‌دهد.

جدول ۱. معیارهای اعتبارسنجی مدل یادگیری ماشین XGBoost

F1-Score (ساخته‌شده)	Recall (ساخته‌شده)	صحت (ساخته‌شده)	دقت کلی
٪۹۳/۰۹	٪۹۱	٪۹۵/۲۹	٪۹۳/۲۵
F1-Score (ساخته‌نشده)	Recall (ساخته‌نشده)	صحت (ساخته‌نشده)	ضریب کاپا
٪۹۳/۳۹	٪۹۵/۵۰	٪۹۱/۳۹	٪۸۵/۶۷

1. zonal statistic
2. overlay

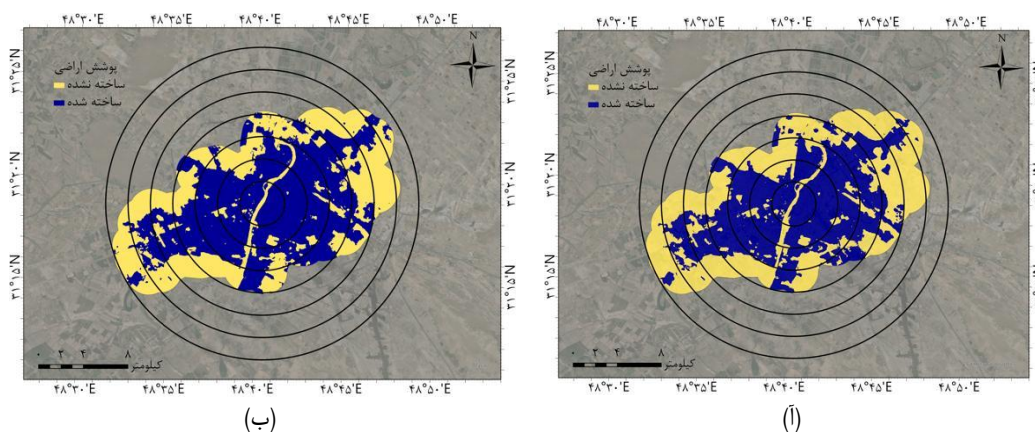
نقشه‌های کاربری و پوشش اراضی در دو طبقه ساخته‌شده و ساخته‌نشده برای سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ تهیه می‌شود. طبقه ساخته‌شده سطوح نفوذناپذیر و طبقه ساخته‌نشده سطوح نفوذپذیر را نشان می‌دهند. شکل ۴ نقشه پوشش اراضی سال ۱۳۹۶ و ۱۴۰۲ را نمایش می‌دهد.



شکل ۴. نقشه پوشش اراضی اهواز: (آ) سال ۱۳۹۶؛ (ب) سال ۱۴۰۲

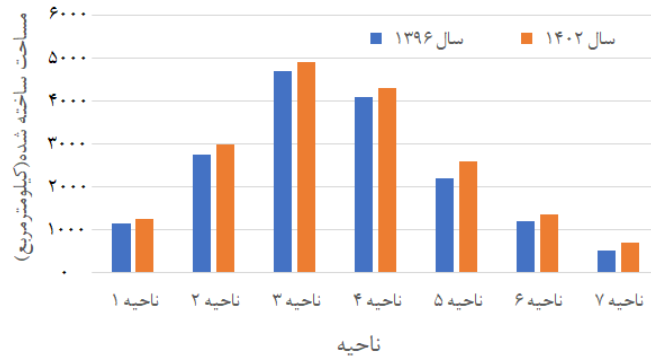
ارزیابی گسترش افقی شهری

تحلیل نقشه‌های پوشش اراضی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ نشان‌دهنده توسعه مناطق ساخته‌شده طی این بازه زمانی است؛ طوری که میزان این اراضی در بازه زمانی هفت ساله ۱۳/۱۲٪ افزایش یافته است. به منظور ارزیابی گسترش افقی شهری در شهر اهواز از تحلیل آنتروپی شانون استفاده می‌شود. در این زمینه، مطابق شکل ۵ منطقه مورد مطالعه به هفت ناحیه با فاصله دو کیلومتری تقسیم می‌شود.



شکل ۵. نواحی تحلیل آنتروپی شانون: (آ) سال ۱۳۹۶؛ (ب) سال ۱۴۰۲

مساحت مناطق ساخته‌شده هر یک از نواحی هفت‌گانه در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۴۰۲ در شکل ۶ نمایش داده می‌شود. بر این اساس، مقدار آنتروپی شانون نرمال برای سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۴۰۲ به ترتیب برابر ۰/۸۷۲۵ و ۰/۸۸۰۴ محاسبه می‌شود. این امر گسترش کنترل‌نشده ساخت‌وساز در نواحی پیرامونی شهر را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مساحت اراضی ساخته شده نواحی تحلیل آنتروپی شانون در سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۴۰۲

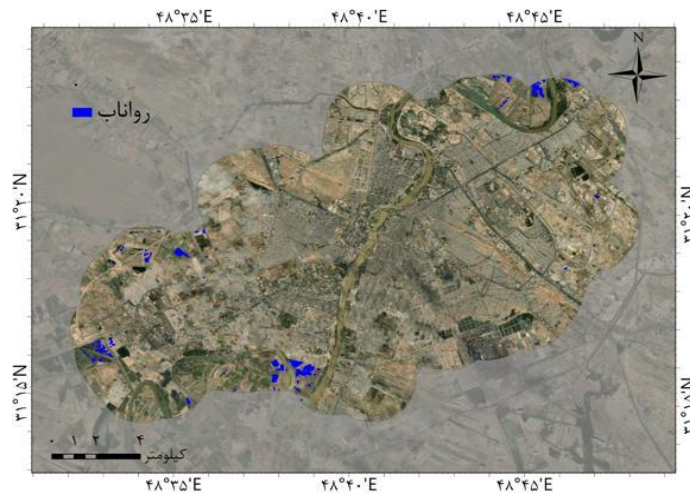
پهنه‌بندی رواناب و سیلاب

جهت بررسی نحوه گسترش رواناب در منطقه مورد مطالعه پهنه‌بندی رخداد این پدیده برای بازه زمانی معینی در هر یک از سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ صورت می‌پذیرد. به این جهت، میزان بارندگی اردیبهشت‌ماه در هر سال با استفاده از مجموعه داده CHIRPS استخراج می‌شود. انتخاب اردیبهشت به سبب بارش باران در این ماه طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ بوده است. بیشینه مقدار بارندگی بر اساس مجموعه داده CHIRPS طی این بازه زمانی در جدول ۲ نمایش داده می‌شود.

جدول ۲. بیشینه بارش اردیبهشت ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ شهر اهواز

تاریخ	بیشینه مقدار بارش (میلی‌متر)
۱۰ اردیبهشت ۱۳۹۶	۲.۳۷۶۰
۲ اردیبهشت ۱۳۹۷	۴.۵۸۸۱
۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۸	۱.۸۰۴۱
۱۹ اردیبهشت ۱۳۹۹	۱.۶۴۱۰
۸ اردیبهشت ۱۴۰۰	۲.۴۸۲۱
۷ اردیبهشت ۱۴۰۱	۲.۷۴۷۸
۱۹ اردیبهشت ۱۴۰۲	۳.۸۵۷۰

تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ و سنتینل-۲ جهت پوشش منطقه مطالعاتی در هر یک از تاریخ‌های وقوع بیشینه مقدار بارندگی اخذ می‌شود و پس از اعمال ماسک‌های آب‌های دائمی و پوشش گیاهی پهنه‌بندی رواناب‌ها با استفاده از روش حدآستانه‌گذاری خودکار اوتسو صورت می‌پذیرد. شکل ۷ نقشه رواناب‌های رخ داده در مناطق ساخته شده اهواز بعد از بارندگی ۲ اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۹ و روزهای پس از آن را نمایش می‌دهد.



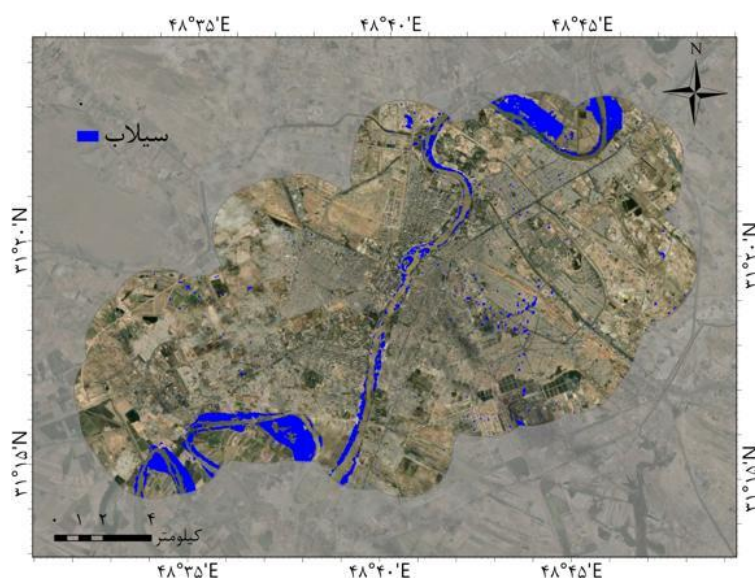
شکل ۷. رواناب شهری اردیبهشت ۱۳۹۹ شهر اهواز

میزان بارش طی بازه زمانی وقوع دو سیلاب بزرگ شهر اهواز در سال‌های اخیر با استفاده از مجموعه داده CHIRPS استخراج و بیشینه مقدار آن‌ها در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول ۳. بیشینه بارش طی وقوع سیلاب‌های بزرگ شهر اهواز

تاریخ	بیشینه مقدار بارش (میلی‌متر)
۱۱ فروردین ۱۳۹۸	۲۰.۹۳۴۳
۱۶ آذر ۱۳۹۹	۴۲.۲۳۶۰

نقشه پهنه‌بندی سیلاب‌ها در زمان وقوع این بارش‌ها و روزهای پس از آن با به‌کارگیری روش حدآستانه‌گذاری اوتسو بر تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۱ و سنتینل-۲ تهیه شده است. شکل ۸ نقشه سیلاب شهر اهواز در فروردین ۱۳۹۸ را نشان می‌دهد. این نقشه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مربوط به دو روز پس از وقوع سیلاب تهیه شده است.



شکل ۸. سیلاب شهری فروردین ۱۳۹۸ شهر اهواز

جهت ارزیابی نتایج، به مقایسه نقشه‌های سیلاب و رواناب با نمونه‌های آزمایشی جمع‌آوری شده پرداخته می‌شود. نتایج اعتبارسنجی در جدول ۴ قابل مشاهده است.

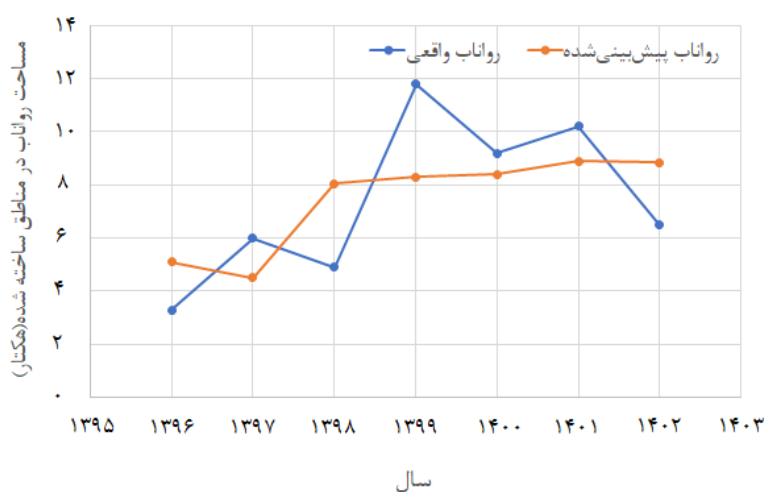
جدول ۴. اعتبارسنجی پهنه‌بندی سیلاب و رواناب

	دقت کلی	ضریب کاپا	F1-score
رواناب	٪۷۸.۳۵	٪۶۵.۴۲	٪۷۲.۱۸
	دقت کلی	صحت	F1-score
سیلاب	٪۸۵.۴۷	٪۷۸.۱۲	٪۸۲.۳۴

یافته‌های پژوهش

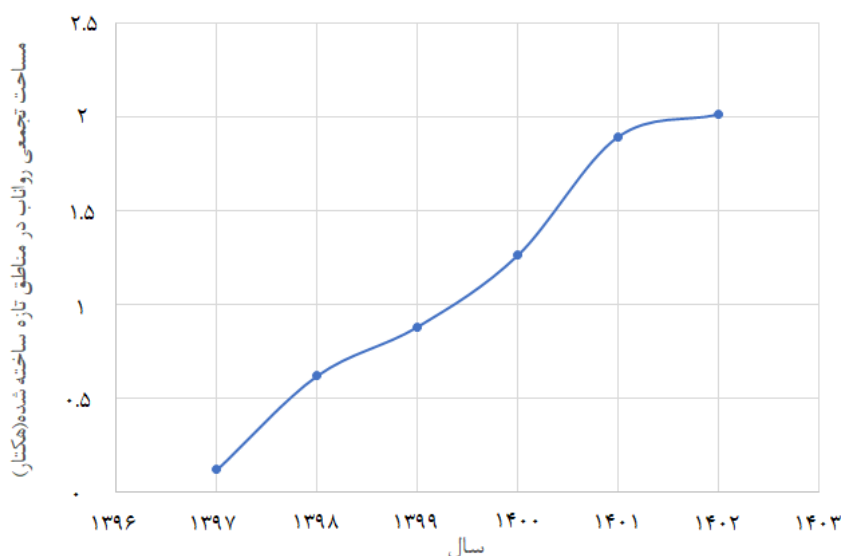
تحلیل رگرسیون خطی چندگانه جهت بررسی تأثیر گسترش افقی شهری و بارش به عنوان دو عامل مهم اثرگذار بر گستره مناطق ساخته‌شده تحت رواناب مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۹ مساحت مناطق تحت رواناب واقعی و پیش‌بینی‌شده بر اساس مقدار گسترش مناطق شهری و بارش در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس این شکل، بیش از ۱۱ هکتار از نواحی با سطوح غیر قابل نفوذ در اردیبهشت‌ماه ۱۳۹۹ تحت تأثیر رواناب قرار گرفته‌اند. تحلیل رگرسیون خطی چندگانه نشان می‌دهد میزان بارش با ضریب $0/۶۵۱$ و گسترش شهری با ضریب $0/۱۰۶$ در گستره نواحی تحت رواناب تأثیرگذارند. این امر، ضمن آنکه

نقش عمده بارندگی در وقوع رواناب را نشان می‌دهد، تأثیر میزان ساخت‌وساز در رخداد این پدیده و در پی آن سیلاب را برجسته می‌سازد.



شکل ۹. مساحت مناطق تحت تأثیر رواناب

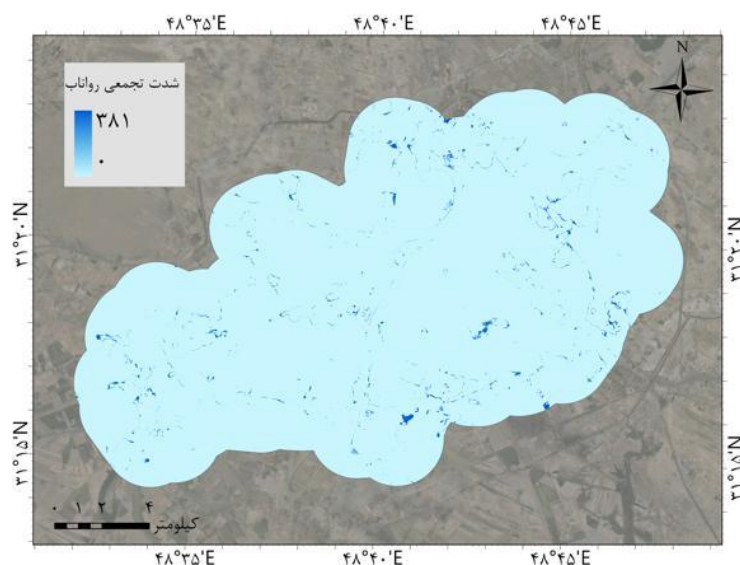
جهت بررسی میزان تأثیر ساخت‌وساز بر رواناب‌ها، مساحت مناطق تازه‌ساخته‌شده تحت تأثیر رواناب در هر سال محاسبه می‌شود. شکل ۱۰ مقادیر تجمعی مساحت رواناب به‌وقوع‌پیوسته در مناطق تازه‌ساخته‌شده در هر سال را نشان می‌دهد. بر این اساس، بیش از ۲ هکتار از اراضی ساخته‌شده در بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ پدیده رواناب را تجربه کرده‌اند.



شکل ۱۰. مساحت تجمعی مناطق تازه‌ساخته‌شده تحت تأثیر رواناب

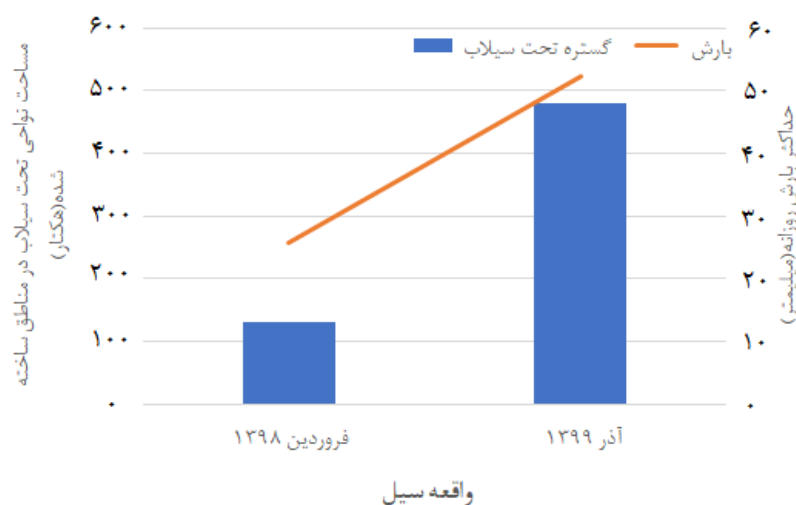
بر اساس نتایج حاصل از تحلیل تجمعی رواناب، توسعه ساخت‌وساز طی دوره زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ به افزایش گستره رواناب در مناطق تازه‌ساخته‌شده منجر شده است. شکل ۱۱ شدت تجمعی رواناب را در مناطقی که از کاربری غیر ساخته‌شده به ساخته‌شده تغییر یافته‌اند نشان می‌دهد. این معیار به مجموع جریان‌های سطحی تولیدشده در یک منطقه مشخص طی یک دوره زمانی معین اطلاق می‌شود. در شکل ۱۱ نواحی با مقادیر سلولی بالاتر بیانگر مناطقی هستند که به دلیل تغییر پوشش بیشترین میزان رواناب را تجربه کرده‌اند. این الگو بر نقش مؤثر تبدیل اراضی طبیعی به مناطق ساخته‌شده در افزایش رواناب و تأثیر آن بر

توزیع مکانی و گستره رواناب دلالت دارد. شدت تجمعی بالای رواناب در نواحی پیرامونی اهواز تأثیر وقوع گسترش افقی شهری بر افزایش مساحت روانابها را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱. شدت تجمعی رواناب در مناطق تازه‌ساخته‌شده اهواز، بازه زمانی ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲

شکل ۱۲ مساحت مناطق ساخته‌شده تحت تأثیر سیل در زمان وقوع دو سیلاب مورد نظر را نشان می‌دهد. مناطقی که پوشش آن‌ها در بازه زمانی یک ساله پیش از وقوع سیل به ساخته‌شده بدل شده است میزان بالایی از سیلاب را تجربه کرده‌اند؛ طوری که بیش از ۱۰ هکتار از ارضی تازه‌ساخته‌شده در فروردین ۱۳۹۸ دچار پدیده سیلاب شده‌اند. بر اساس شکل ۱۲ و داده‌های بارش، بارندگی شدید و سریع در نیمه آذر ۱۳۹۹ منجر به افزایش مکانی مناطق تحت تأثیر سیل شده است. از سوی دیگر، شدت پایین‌تر اما متداوم بارندگی در فروردین ۱۳۹۸ سبب وقوع پدیده سیلاب در بخش بزرگی از نواحی ساخته‌شده شهر اهواز شده است. این امر نشان می‌دهد دو عامل بارش و گسترش شهری در کنار یک‌دیگر سبب افزایش شدت و فراوانی سیلاب‌ها در مناطق شهری می‌شوند؛ به نحوی که توسعه شهری مانع از نفوذ آب به سطوح طبیعی می‌شود و مدیریت آب‌های جاری را مشکل می‌کند.



شکل ۱۲. مساحت مناطق شهری تحت تأثیر سیلاب

نتیجه

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد گسترش افقی شهر اهواز طی دوره ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ تأثیر قابل توجهی بر افزایش گستره رواناب و سیلاب داشته است. افزایش مساحت نواحی ساخته شده، که از طریق پردازش تصاویر ماهواره‌ای و طبقه‌بندی با مدل XGBoost شناسایی شده‌اند، موجب گسترش سطوح نفوذناپذیر و در نتیجه کاهش ظرفیت نفوذ آب به خاک شده است. این تغییرات، علاوه بر کاهش نرخ نفوذ، منجر به افزایش گستره رواناب سطحی، تشدید سرعت جریان، و در نهایت افزایش فراوانی و شدت وقوع سیلاب در محدوده‌های شهری شده است.

تحلیل آنتروپی شانون بیان‌گر آن است که توسعه شهری در این دوره به صورت پراکنده و نامتراکم رخ داده است. این الگوی رشد همراه افزایش بارندگی زمینه‌ساز تشدید فرایندهای هیدرولوژیکی نظیر رواناب و سیلاب بوده است. مقایسه تغییرات مکانی نشان می‌دهد بیش از ۲ هکتار از اراضی ساخته شده در بازه زمانی مطالعه تحت تأثیر رواناب قرار گرفته‌اند. همچنین، بیش از ۱۵ هکتار از مناطق توسعه یافته در سال منتهی به وقوع سیلاب‌های فروردین ۱۳۹۸ و آذر ۱۳۹۹ در جریان این سیلاب‌ها دچار آب‌گرفتگی شده‌اند. افزون بر آن، نتایج تحلیل رگرسیون چندمتغیره نشان می‌دهد که گسترش شهری با ضریب تأثیر ۰/۱۰۶ همراه بارندگی با ضریب ۰/۶۵۱ از عوامل مؤثر بر افزایش وقوع رواناب و سیلاب محسوب می‌شوند.

این نتایج بر ضرورت بازنگری در سیاست‌های توسعه شهری تأکید دارد. اتخاذ راهکارهای مدیریتی از جمله استفاده از زیرساخت‌های نفوذپذیر، توسعه فضاهای سبز، بهینه‌سازی شبکه‌های زهکشی، و طراحی هوشمندانه کاربری اراضی می‌تواند از تأثیرات منفی گسترش شهری بر فرایندهای هیدرولوژیکی بکاهد. علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های سنجش از دور، GIS، و مدل‌های یادگیری ماشین به منظور پایش مستمر تغییرات پوشش اراضی و پیش‌بینی پیامدهای آن می‌تواند نقش مهمی در مدیریت بهینه منابع آب و کاهش خسارات ناشی از سیلاب ایفا کند.

با توجه به اهمیت این مسئله، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آتی اثر تغییرات اقلیمی بر شدت و تناوب بارندگی در کنار گسترش شهری مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، ارزیابی کارآمدی راهکارهای کاهش رواناب، از جمله استفاده از پوشش‌های نفوذپذیر و بهبود سامانه‌های زهکشی شهری، می‌تواند به توسعه راهبردهای اثربخش در مدیریت سیلاب‌های شهری کمک کند.

منابع

- طهماسبی، قباد؛ محمدی، علی‌رضا و بوچانی، محمدحسین (۱۴۰۰). تحلیل فضایی عوامل مؤثر بر رخداد سیلاب در شهر ایلام. *آمایش سرزمین*, ۱۳(۱), ۲۱ - ۵۶.
- Tahmasebi, Ghobad; Mohammadi, Alireza; and Bochani, Mohammad Hossein (2021). Spatial analysis of factors influencing flood occurrence in Ilam city. *Journal of Land Use Planning*, 13(1), 21–56. (in Persian)
- Abass, K., Buor, D., Afriyie, K., Dumedah, G., Segbefi, A. Y., Guodaar, L., Garsonu, E. K., Adu-Gyamfi, S., Forkuor, D., & Ofosu, A. (2020). Urban sprawl and green space depletion: Implications for flood incidence in Kumasi, Ghana. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 51, 101915.
- Biney, E. & Boakye, E. (2021). Urban sprawl and its impact on land use land cover dynamics of Sekondi-Takoradi metropolitan assembly, Ghana. *Environmental Challenges*, 4, 100168.
- Brueckner, J. K. (2000). Urban sprawl: Diagnosis and remedies. *International regional science review*, 23(2), 160-171.
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, 20(1), 37-46.
- Devi, N. N., Sridharan, B., & Kuiry, S. N. (2019). Impact of urban sprawl on future flooding in Chennai city, India. *Journal of Hydrology*, 574, 486-496.
- Ding, Y., Jia, L., Wang, C., & Wang, P. (2024). Urban sprawl and its effects on water competition between building industry and residents: Evidence from 31 provinces in China. *Water-Energy Nexus*, 7, 26-38.
- Estoque, R. C. & Murayama, Y. (2015). Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices. *Ecological indicators*, 56, 205-217.
- Franci, F., Mandanici, E., & Bitelli, G. (2015). Remote sensing analysis for flood risk management in urban sprawl contexts. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5-7), 583-599.
- Hatab, A. A., Cavinato, M. E. R., Lindemer, A., & Lagerkvist, C.-J. (2019). Urban sprawl, food security and agricultural systems in developing countries: A systematic review of the literature. *Cities*, 94, 129-142.
- Hislop, S., Jones, S., Soto-Berelov, M., Skidmore, A., Haywood, A., & Nguyen, T. H. (2018). Using landsat spectral indices in time-series to assess wildfire disturbance and recovery. *Remote Sensing*, 10(3), 460.
- Idowu, D. & Zhou, W. (2023). Global Megacities and Frequent Floods: Correlation between Urban Expansion Patterns and Urban Flood Hazards. *Sustainability*, 15(3), 2514.
- Jacobson, C. R. (2011). Identification and quantification of the hydrological impacts of imperviousness in urban catchments: A review. *Journal of environmental management*, 92(6), 1438-1448.
- Javed, A., Cheng, Q., Peng, H., Altan, O., Li, Y., Ara, I., Huq, E., Ali, Y., & Saleem, N. (2021). Review of spectral indices for urban remote sensing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 87(7), 513-524.
- Karvonen, A. (2011). *Politics of urban runoff: nature, technology, and the sustainable city*. MIT Press.
- Mesvari, M. & Shah-Hoseini, R. (2024). Detection and segmentation of flood-affected areas using satellite images and deep learning methods. *Irrigation and Water Engineering*, 14(3), 342-357.
- Mesvari, M. & Shah-Hosseini, R. (2023). Flood Detection Based on UNet++ Segmentation Method Using Sentinel-1 Satellite Imagery. *Earth Observation and Geomatics Engineering*, 7(1).
- Moharrami, M., Javanbakht, M., & Attarchi, S. (2021). Automatic flood detection using sentinel-1 images on the google earth engine. *Environmental monitoring and assessment*, 193(5), 248.
- Pekel, J.-F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *nature*, 540(7633), 418-422.
- Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. *Remote Sensing*, 12(14), 2291.
- Powers, D. M. (2020). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. *arXiv preprint arXiv:2010.16061*.
- Putatunda, S. & Rama, K. (2018). A comparative analysis of hyperopt as against other approaches for hyperparameter optimization of XGBoost. Proceedings of the 2018 international conference on signal processing and machine learning.
- Senthilnath, J., Shenoy, H. V., Rajendra, R., Omkar, S., Mani, V., & Diwakar, P. (2013). Integration of speckle de-noising and image segmentation using Synthetic Aperture Radar image for flood extent extraction. *Journal of earth system science*, 122, 559-572.
- Stamellou, E., Kalogeropoulos, K., Stathopoulos, N., Tsesmelis, D. E., Louka, P., Apostolidis, V., & Tsatsaris, A. (2021). A GIS-cellular automata-based model for coupling urban sprawl and flood susceptibility assessment. *Hydrology*, 8(4), 159.
- Stolzenberg, R. M. (2004). Multiple regression analysis. *Handbook of data analysis*, 165-208.

- Tahmasebi, Gh., Mohammadi, A., & Bochani (2021). Spatial Analysis of Factors Influencing Flood Occurrence in Ilam City. *Scientific Journal*, 13(1), 21-56. (in Persian)
- Unwin, D. (2019). Integration through overlay analysis. In *Spatial analytical perspectives on GIS* (pp. 127-138). Routledge.
- Unwin, D. J. (1996). GIS, spatial analysis and spatial statistics. *Progress in Human Geography*, 20(4), 540-551.
- Wei, Y. D. & Ewing, R. (2018). Urban expansion, sprawl and inequality. In Elsevier, Vol. 177, 259-265.
- Xu, X., Xu, S., Jin, L., & Song, E. (2011). Characteristic analysis of Otsu threshold and its applications. *Pattern recognition letters*, 32(7), 956-961.