

تدوین راهبردهای طراحی شهری حساس به آب برای مدیریت رواناب شهری رشت بر پایه

مدل InVEST^۱

علی اکبر سالاری پور^۱، شهریار رضائی^{۲*}

^۱دانشیار گروه شهرسازی، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه گیلان

^۲دانش آموخته کارشناسی ارشد برنامه ریزی شهری، دانشکده معماری و هنر، دانشگاه گیلان

* shahriarrezae@webmail.guilan.ac.ir

چکیده

گسترش سطوح ساخته شده و کاهش پوشش گیاهی در شهرهای پربارش و جلگه‌ای، ظرفیت طبیعی نفوذ، نگهداشت آب و کنترل رواناب را کاهش داده و خطر آب‌گرفتگی و انتقال آلودگی را افزایش می‌دهد. در شهر رشت، مدیریت این مسئله نیازمند رویکردی فضایی و طراحی محور است که بتواند خروجی‌های مدل‌سازی هیدرولوژیک را به راهبردهای طراحی شهری حساس به آب تبدیل کند. این پژوهش با هدف تدوین راهبردهای طراحی شهری حساس به آب برای مدیریت رواناب شهری رشت بر پایه مدل InVEST انجام شده است. روش تحقیق کمی - فضایی بوده و شامل تولید نقشه‌های کاربری اراضی و NDVI برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ در محیط نرم‌افزار ENVI و مدل‌سازی وضعیت هیدرولوژیک پایه سال ۲۰۲۴ با ماژول Urban Stormwater Retention در InVEST است. داده‌های مورد استفاده شامل تصاویر لندست و سنتینل، داده‌های بارش GPM، گروه‌های هیدرولوژیک خاک HWSD و مقادیر EMC مربوط به نیتروژن/نیترات و فسفر بوده‌اند. نتایج نشان داد اراضی ساخته شده از ۴۱/۲۸ به ۶۳/۴۸ کیلومتر مربع افزایش و پوشش گیاهی از ۴۶/۸۹ به ۲۱/۷۱ کیلومتر مربع کاهش یافته است. پهنه‌های مرکزی و جنوبی رشت دارای رواناب بالاتر، نفوذ کمتر، ظرفیت پایین‌تر نگهداشت آب و بار آلودگی بیشتر هستند، در حالی که پهنه‌های غربی و شمالی به دلیل NDVI بالاتر و پوشش گیاهی بیشتر، ظرفیت مناسب‌تری برای نفوذ، ذخیره آب و کاهش آلودگی دارند. بر این اساس، راهبردهای پیشنهادی شامل بازطراحی سطوح سخت در مرکز، ایجاد فضاهای تأخیری در جنوب، حفاظت اکولوژیک در غرب و شمال و شکل‌دهی کریدورهای سبز - آبی در حاشیه رودخانه‌هاست.

کلیدواژه

طراحی شهری حساس به آب، زیرساخت سبز-آبی، رواناب شهری، رشت، مدل سازی invest

^۱ این مقاله مستخرج از پایان نامه کارشناسی ارشد نویسنده شهریار رضائی با عنوان "بررسی تأثیر تنوع کاربری اراضی و ساختار پوشش گیاهی بر شدت جزایر گرمایی در محدوده شهری رشت" به راهنمایی نویسنده دکتر علی اکبر سالاری پور در دانشگاه گیلان می باشد.

افزایش بی‌سابقه جمعیت شهری در دهه‌های اخیر، همراه با تشدید رخداد‌های اقلیمی جدی، شهرها را با چالش‌های بی‌سابقه‌ای در زمینه مدیریت منابع آب و زیرساخت‌های هیدرولیکی مواجه ساخته است (Rentachintala et al., 2022). شهرنشینی شتابان با تبدیل سطوح نفوذپذیر طبیعی به سطوح سخت و تغییرات اقلیمی با افزایش شدت و فراوانی بارش‌های سیلابی، به طور هم‌افزا چرخه هیدرولوژیک مناطق شهری را دگرگون کرده و حجم رواناب سطحی، دبی اوج سیلاب و بار آلودگی منتقل شده به منابع آبی را افزایش داده‌اند (Ghezali & Boukhemacha, 2026). در این میان، تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده نفوذپذیری خاک، ظرفیت ذخیره سطحی و زمان تمرکز رواناب، نقش کلیدی در تشدید یا تعدیل اثرات شهرنشینی ایفا می‌کند (Ou et al., 2024; Liu et al., 2023). تبدیل زمین‌های کشاورزی و پوشش گیاهی طبیعی به کاربری‌های مسکونی، تجاری و صنعتی، ضمن کاهش ظرفیت ذخیره و نفوذ آب، موجب افزایش ضریب رواناب و کاهش زمان تمرکز جریان می‌شود (Rentachintala et al., 2022; فروتن و همکاران، ۱۳۹۸). پوشش گیاهی نیز به عنوان یک عامل مهم در کاهش رواناب‌ها شناخته می‌شود، زیرا گیاهان و درختان با جذب آب بارش و کاهش سرعت جریان آب، نقش مؤثری در کاهش رواناب‌ها ایفا می‌کنند (ویسی نبی کندی و همکاران، ۱۴۰۳). در این راستا، شبیه‌سازی رواناب‌های شهری به عنوان یکی از ابزارهای مهم برای پیش‌بینی و ارزیابی تأثیرات تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی بر رواناب‌ها در نظر گرفته می‌شود. مدل‌های شبیه‌سازی می‌توانند به طور دقیق‌تر تغییرات رواناب‌ها را با توجه به عوامل مختلفی همچون تغییرات در پوشش گیاهی و کاربری اراضی پیش‌بینی کنند (ایزدی فرد و همکاران، ۱۴۰۲). این شبیه‌سازی‌ها می‌توانند به عنوان مبنای تصمیم‌گیری برای برنامه‌ریزی شهری و سیاست‌های مدیریت رواناب‌ها مورد استفاده قرار گیرند (وفاخواه و همکاران، ۱۳۹۴). مطالعات نشان می‌دهند که تغییرات در کاربری اراضی، به‌ویژه تبدیل زمین‌های کشاورزی به مناطق مسکونی یا تجاری، تأثیرات قابل توجهی بر رواناب‌ها دارند. در این نوع تغییرات، سطح پوشش گیاهی کاهش یافته و در عوض، سطح سفت و سخت‌شده افزایش می‌یابد که این امر منجر به افزایش رواناب‌ها می‌شود (افشاری آزاد و پورکی، ۱۳۹۱). این امر در بسیاری از مناطق کلان شهری مشهود است که در آن، افزایش ساخت‌وساز و تبدیل اراضی کشاورزی به زمین‌های مسکونی و تجاری تأثیرات منفی بر رواناب‌ها داشته است (فروتین و همکاران، ۱۳۹۸). مطالعات نشان داده‌اند که در مناطق با تغییرات وسیع در کاربری اراضی، رواناب‌ها بیشتر و سریع‌تر از نواحی با پوشش گیاهی سالم جاری می‌شوند (خوش‌روش و همکاران، ۱۳۹۴). اگرچه رابطه میان گسترش سطوح نفوذناپذیر و افزایش رواناب شهری در ادبیات هیدرولوژی شهری به خوبی شناخته شده است، اما در بسیاری از مطالعات، این رابطه عمدتاً در سطح برآورد کمی رواناب یا تحلیل تغییرات کاربری اراضی باقی مانده و کمتر به پیامدهای فضایی، زیست‌محیطی و طراحی‌محور آن پرداخته شده است. در شهرهای پربارش و جلگه‌ای مانند رشت، اهمیت مسئله تنها در افزایش حجم رواناب خلاصه نمی‌شود، بلکه کاهش پوشش گیاهی، افت ظرفیت نفوذ، تمرکز بار آلودگی، کاهش توان نگهداشت آب و نابرابری فضایی در توزیع خدمات اکوسیستمی نیز به‌طور هم‌زمان رخ می‌دهد. از این رو، پژوهش حاضر تلاش می‌کند رابطه شناخته‌شده میان سطوح نفوذناپذیر و رواناب را به سطحی تحلیلی‌تر ارتقا داده و آن را به مبنایی برای پهنه‌بندی مداخله و تدوین راهبردهای طراحی شهری حساس به آب تبدیل کند. با توجه به اهمیت تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی در مدیریت منابع آبی و کنترل رواناب‌ها، برای ایجاد شفافیت در زنجیره‌ی پژوهش، سوالات اصلی این تحقیق به صورت زیر تدوین شده‌اند:

الف: تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی شهر رشت چه اثری بر الگوی فضایی رواناب، نفوذ و نگهداشت آب داشته است؟ ب: کدام پهنه‌های شهر رشت از نظر تولید رواناب، کاهش نفوذپذیری و بار آلودگی در اولویت مداخله طراحی شهری قرار دارند؟ پ: بر اساس نتایج مدل InVEST، چه راهبردهای طراحی شهری حساس به آب برای بافت مرکزی، جنوبی، شمالی و غربی رشت قابل

پیشنهاد است؟ ت: چگونه می‌توان از زیرساخت سبز-آبی، خیابان‌های نفوذپذیر، باغ بارانی، بام سبز و کریدورهای اکولوژیک برای کاهش رواناب در رشت استفاده کرد؟ هدف کلی این تحقیق، هدف اصلی این پژوهش، شناسایی پهنه‌های اولویت‌دار مداخله در شهر رشت و تدوین راهبردهای طراحی شهری حساس به آب برای کاهش رواناب، افزایش نفوذپذیری، ارتقای ظرفیت نگهداشت آب و بهبود کیفیت رواناب بر پایه خروجی‌های مدل InVEST است. این هدف کلی در قالب چهار هدف اختصاصی دنبال می‌شود که هر یک پاسخگوی یکی از سوالات پژوهش می‌باشد: الف) تحلیل تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی شهر رشت در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ از منظر اثرگذاری بر ظرفیت جذب و نگهداشت آب ب) شناسایی پهنه‌های بحرانی تولید رواناب، کاهش نفوذپذیری و تمرکز بار آلودگی بر اساس خروجی‌های مدل InVEST پ) تبدیل نتایج مکانی مدل به راهبردهای طراحی شهری حساس به آب در مقیاس شهر، محله، خیابان و فضای عمومی ت) ارائه چارچوب مداخله طراحی برای پهنه‌های مرکزی، جنوبی، شمالی و غربی شهر رشت

۲. مبانی نظری

مدیریت رواناب شهری در ادبیات معاصر از رویکردهای صرفاً مهندسی و دفع سریع آب به سمت رویکردهای یکپارچه، اکولوژیک و طراحی‌محور حرکت کرده است. در رویکرد سنتی، رواناب عمدتاً به‌عنوان مسئله‌ای فنی تلقی می‌شود که باید از طریق شبکه‌های لوله‌ای، کانال‌ها و زهکش‌های بتنی با بیشترین سرعت از شهر خارج شود. هرچند این رویکرد در کوتاه‌مدت می‌تواند بخشی از آب سطحی را منتقل کند، اما در شرایط افزایش سطوح نفوذناپذیر، کاهش پوشش گیاهی و تشدید بارش‌های سیلابی، موجب افزایش دبی اوج، کاهش زمان تمرکز، تشدید آب‌گرفتگی و انتقال آلاینده‌ها به پایین‌دست می‌شود (Rentachintala et al., 2022). در برابر این رویکرد، طراحی شهری حساس به آب یا WSUD به‌عنوان چارچوبی برای ادغام چرخه آب در فرآیندهای برنامه‌ریزی و طراحی شهری مطرح شده است. این رویکرد، آب باران و رواناب را نه صرفاً به‌عنوان مسئله‌ای برای دفع، بلکه به‌عنوان بخشی از ساختار فضایی، اکولوژیک و اجتماعی شهر در نظر می‌گیرد. در این چارچوب، کنترل رواناب در مبدأ، افزایش نفوذپذیری، نگهداشت موقت آب، کاهش بار آلودگی، حفاظت از زیرساخت سبز-آبی و ارتقای کیفیت فضای عمومی، از اصول اصلی مدیریت پایدار رواناب شهری محسوب می‌شوند (Schulze et al., 2024; Tasnia & Growe, 2025). از این منظر، WSUD نسبت به روش‌های سنتی دفع آب، ظرفیت بیشتری برای بازتولید بخشی از چرخه طبیعی آب در شهر، کاهش فشار بر شبکه‌های زهکشی و تقویت تاب‌آوری فضایی و اکولوژیک دارد. ریشه‌های نظری WSUD به مباحث برنامه‌ریزی آب شهری در استرالیا بازمی‌گردد. همچنین مرور ادبیات نشان می‌دهد که رویکردهایی مانند WSUD، LID، SuDS و BMPs، با وجود تفاوت در خاستگاه جغرافیایی و اصطلاح‌شناسی، در یک اصل مشترک‌اند: کاهش اثرات هیدرولوژیک توسعه شهری از طریق کنترل رواناب در مبدأ و بهره‌گیری از فرآیندهای طبیعی. بر این اساس، WSUD در پژوهش حاضر به‌عنوان چارچوب نظری اصلی انتخاب شده است؛ زیرا امکان پیوند میان مدل‌سازی هیدرولوژیک، تحلیل فضایی و تصمیم‌سازی طراحی شهری را فراهم می‌کند. در این چارچوب، خروجی‌های مدل InVEST صرفاً شاخص‌هایی فنی برای برآورد رواناب نیستند، بلکه می‌توانند به معیارهایی برای تشخیص مسئله، تعیین نوع مداخله و اولویت‌بندی پهنه‌های شهری تبدیل شوند. این موضوع در شهر رشت اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا ترکیب بارش زیاد، شرایط جلگه‌ای، کاهش اراضی نفوذپذیر، گسترش سطوح ساخته‌شده و غلبه رویکردهای دفعی در مدیریت آب‌های سطحی، ضرورت استفاده از راهبردهای طراحی‌محور و مبتنی بر کنترل در مبدأ را افزایش می‌دهد. تغییر کاربری اراضی و دگرگونی پوشش گیاهی از مهم‌ترین محرک‌های تولید رواناب شهری به شمار می‌روند. تبدیل اراضی نفوذپذیر، کشاورزی، باغی و دارای پوشش گیاهی به سطوح ساخته‌شده، تعادل میان بارش، نفوذ، ذخیره سطحی، تبخیر - تعرق و جریان سطحی را تغییر می‌دهد. در نتیجه، کاهش نفوذپذیری سطح زمین، افزایش

ضریب رواناب، کاهش زمان تمرکز و افزایش حجم جریان سطحی رخ می‌دهد. با این حال، شدت این اثرات ثابت و خطی نیست و به شرایط محلی مانند شدت و مدت بارش، نوع خاک، رطوبت اولیه، شیب زمین و نوع و تراکم پوشش گیاهی وابسته است (Rentachintala et al., 2022). در این پژوهش، کاربری اراضی به‌عنوان شاخصی برای تبیین ساختار کالبدی و عملکردی سطح زمین در نظر گرفته شده و تفاوت میان سطوح ساخته‌شده، پوشش گیاهی، اراضی کشاورزی و اراضی بایر را نشان می‌دهد. نفوذپذیری خاک نیز بیانگر توان سطح و لایه‌های زیرین برای عبور آب است و در مدل InVEST از طریق گروه‌های هیدرولوژیک خاک و ضرایب رواناب وارد تحلیل می‌شود. تولید رواناب نیز به بخشی از بارش اطلاق می‌شود که پس از کسر نفوذ، ذخیره سطحی و سایر فرآیندهای نگهداشت، به جریان سطحی تبدیل می‌گردد. پوشش گیاهی از طریق رهگیری بارش، افزایش زبری سطح، ذخیره موقت آب، تقویت ماده آلی خاک و ایجاد مسیرهای نفوذ توسط ریشه‌ها می‌تواند در کاهش رواناب نقش مؤثری داشته باشد (Rentachintala et al., 2022). با این حال، کارکرد پوشش گیاهی در کاهش رواناب تحت تأثیر شرایط محیطی تغییر می‌کند؛ برای مثال، در بارش‌های شدید یا در شرایط اشباع بودن خاک، ظرفیت پوشش گیاهی برای جذب و نگهداشت آب محدودتر می‌شود. از این رو، در پژوهش حاضر شاخص NDVI صرفاً به‌عنوان نقشه‌ای توصیفی از سبزی‌نگی استفاده نشده، بلکه به‌عنوان متغیری اکولوژیک برای تبیین رابطه میان پوشش گیاهی، نفوذ، نگهداشت آب، بار آلودگی و تولید رواناب به کار رفته است. به جهت شفاف‌سازی دامنه و شرایط اثرگذاری پوشش گیاهی بر رواناب، در جدول ۱ پنج متغیر کلیدی تعدیل‌کننده (شدت بارش، نوع خاک، شیب زمین و نوع پوشش گیاهی) همراه با وضعیت افزایش‌دهنده و کاهش‌دهنده‌ی اثر و منابع معتبر مرتبط ارائه شده است.

عامل تعدیل کننده	اثر بر تولید رواناب	ارتباط با پژوهش	منبع
شدت و مدت بارش	در بارش‌های شدید، ظرفیت نفوذ، رهگیری و ذخیره سطحی سریع‌تر اشباع می‌شود	استفاده از داده بارش نماینده دوره اخیر در مدل‌سازی وضعیت ۲۰۲۴	(Rentachintala et al., 2022) (Wei et al., 2023; Liu et al., 2023)
نوع خاک و رطوبت اولیه	خاک‌های کم‌نفوذ یا مرطوب، رواناب بیشتری تولید می‌کنند	استفاده از گروه‌های هیدرولوژیک خاک HWSO	(François et al., 2024) (Wei et al., 2024)
شیب و ساختار سطح	شیب بیشتر و سطح سخت‌تر زمان تمرکز را کاهش و رواناب سطحی را افزایش می‌دهد	تفسیر فضایی پهنه‌های پرواناب و کم‌نفوذ	(Huang et al., 2023)
نوع کاربری اراضی	سطوح ساخته‌شده و سخت ضریب رواناب بالاتری دارند	طبقه‌بندی LULC و تنظیم جدول بیوفیزیکی InVEST	Liu et al., 2025
نوع و تراکم پوشش گیاهی	پوشش متراکم‌تر توان بیشتری در رهگیری، نفوذ و نگهداشت آب دارد	استفاده از NDVI برای سنجش وضعیت پوشش گیاهی	(Hu et al., 2023)

جدول ۱: متغیرهای تعدیل‌کننده‌ی اثر پوشش گیاهی بر کاهش رواناب

در ادبیات مدیریت پایدار رواناب شهری، چارچوب‌هایی مانند SuDS, LID, WSUD و شهر اسفنجی با هدف کاهش اثرات هیدرولوژیک توسعه شهری، کنترل رواناب در مبدأ، افزایش نفوذپذیری و بهبود کیفیت آب مطرح شده‌اند. LID بیشتر بر مداخلات پراکنده و کوچک‌مقیاس در سطح سایت و محله تمرکز دارد؛ SuDS بر زنجیره مدیریت رواناب از مبدأ تا مقصد و کنترل حجم، دبی و کیفیت آب تأکید می‌کند؛ شهر اسفنجی رویکردی کل‌نگر برای جذب، ذخیره و بازاستفاده از آب در مقیاس شهری ارائه می‌دهد؛

و WSUD تلاش می‌کند مدیریت چرخه آب را با طراحی شهری، کیفیت فضای عمومی، تاب‌آوری اکولوژیک و برنامه‌ریزی فضایی یکپارچه سازد.

مقایسه تطبیقی چارچوب‌های نظری مدیریت پایدار رواناب شهری

در ادبیات نوین مدیریت رواناب شهری، چهار چارچوب نظری اصلی با منشأ جغرافیایی و تأکیدهای طراحی متفاوت ظهور یافته‌اند. در جدول شماره ۲ این چارچوب‌ها شامل WSUD (استرالیا)، LID (آمریکا)، SuDS (بریتانیا) و شهر اسفنجی (چین) به‌طور تطبیقی مرور شده‌اند. هدف این مرور، شفاف‌سازی نقاط اشتراک و افتراق آن‌ها و نیز نشان دادن قابلیت‌های هر یک برای مدیریت پایدار رواناب در شهرهایی با ویژگی‌های محیطی گوناگون (مانند رشت) است.

چارچوب نظری (مبدأ)	مقیاس غالب	تأکید اصلی و فلسفه طراحی	اقدامات / تکنیک‌های شاخص	مستندات اثربخشی و ملاحظات کلیدی
WSUD (طراحی شهری حساس به آب) استرالیا (Khalaji et al., 2024; Tasnia & Growe, 2025)	شهر، محله و فضای عمومی	یکپارچه‌سازی چرخه آب با طراحی شهری؛ چندعملکردی بودن زیرساخت‌های سبز (سیلاب، کیفیت آب، زیبایی، تنوع زیستی) (Tasnia & Growe, 2025)	تلفیق بام سبز، روسازی نفوذپذیر، تالاب‌های مصنوعی و باغ‌های بارانی در بافت شهری به منظور بازتولید هیدرولوژی طبیعی (Rentachintala et al., 2022)	چارچوب WSUD قادر است با رویکرد داده-محور و مدل‌سازی نیمه-پیوسته، استراتژی‌های مؤثر کاهش حجم رواناب و خسارت سیلاب را در مقیاس حوضه شناسایی کند. (Liu et al., 2025; Khalaji et al., 2024)
LID (توسعه کم‌اثر) آمریکا (Rentachintala et al., 2022; Hao, 2019)	سایت و محله	کنترل در مبدأ و در مقیاس محله؛ حفظ هیدرولوژی پیش از توسعه از طریق مجموعه‌ای از تکنیک‌های پراکنده و طبیعت-محور (Rentachintala et al., 2022;)	بام سبز، روسازی نفوذپذیر، سلول‌های زیستی، شبکه‌های جمع‌آوری آب باران، پیاده‌روهای نفوذپذیر و مخازن نگهداشت زیرسطحی	مرور ۹۰ مطالعه علمی نشان داده LID با شبیه‌سازی در ابزارهایی چون SWMM و HEC-RAS به طور مؤثری رواناب سطحی و بار آلودگی را کاهش می‌دهد. این روش نیازمند مقیاس‌بندی مناسب و تلفیق با مدل‌های هیدرودینامیک است (Wang, 2025; Hao, 2019)
SuDS (سیستم‌های زهکشی پایدار) بریتانیا	زنجیره مدیریت رواناب از مبدأ تا مقصد	زنجیره مدیریت آب (منبع به مقصد) شامل چهار مرحله: جلوگیری، کنترل در مبدأ، مسیرهای انتقال سبز و کنترل نهایی؛ مبتنی بر راهنمای فنی (Woods-Ballard et al., 2015)	بام سبز، حوضچه‌های تعادلی، کانال‌های روباز با پوشش گیاهی، گودال‌های نفوذ، روسازی نفوذپذیر و تالاب‌های مصنوعی (Woods-Ballard et al., 2015)	هدف SuDS کاهش حجم و دبی پیک سیلاب و بهبود کیفیت رواناب از طریق فرآیندهای طبیعی فیلتراسیون و ایجاد ظرفیت مازاد برای مدیریت بارش‌های شدید است. استانداردهای ملی جدید بر طراحی، ساخت و نگهداری بلندمدت در چهار رکن تأکید دارند (Woods-Ballard et al., 2015)

شهر اسفنجی (Sponge City) چین (Chikhi et al., 2024; Ma et al., 2024)	مقیاس شهری و حوزه‌ای	رویکرد کل‌نگر در مقیاس حوزه شهری با استفاده از اقدامات مهندسی-اجتماعی برای بازتولید چرخه آب طبیعی و مهار آب در مبدأ (Chikhi et al., 2024; Li et al., 2024; Ma et al., 2024)	روسازی نفوذپذیر، بام سبز، باغ بارانی، حوضچه‌های نفوذ، ترمیم اکولوژیک رودخانه‌ها و بسترهای سبز شهری (Ma et al., 2024)	هدف برنامه جذب و مهار حداقل ۸۰٪ آب باران تا سال ۲۰۳۰ در مناطق شهری هدف‌گذاری شده است. شهر اسفنجی بر اساس LID/WSUD تجارب بومی‌سازی شده و نمونه‌های موفق در چین و هلند اثربخشی آن را در سیاست‌های تطبیق با تغییرات اقلیمی نشان داده‌اند. (Chikhi et al., 2024; Long et al., 2025)
--	----------------------	---	---	--

جدول ۲: مرور تطبیقی چهار چارچوب اصلی مدیریت پایدار رواناب شهری (SuDS، LID، WSUD) و شهر اسفنجی)

بر اساس چارچوب نظری پژوهش، پنج گزاره تحلیلی برای هدایت تحلیل‌ها تدوین شد: نخست، افزایش سطوح ساخته‌شده و کاهش اراضی نفوذپذیر در رشت با افزایش رواناب، کاهش نفوذ و افت ظرفیت نگهداشت آب همراه است. دوم، کاهش پوشش گیاهی و افت شاخص NDVI به افزایش رواناب و بار آلودگی و کاهش ظرفیت نفوذ و ذخیره آب منجر می‌شود. سوم، اثرات هیدرولوژیک تغییرات کاربری اراضی از نظر فضایی یکنواخت نبوده و پهنه‌های مرکزی و جنوبی، به دلیل غلبه سطوح ساخته‌شده و NDVI پایین‌تر، وضعیت بحرانی‌تری از نظر رواناب و نفوذپذیری دارند. چهارم، پهنه‌های دارای NDVI بالاتر، پوشش گیاهی بیشتر و ظرفیت نگهداشت آب بالاتر، به‌ویژه در بخش‌های غربی و شمالی، می‌توانند به‌عنوان پهنه‌های حفاظتی و پشتیبان شبکه سبز-آبی شهر عمل کنند. پنجم، خروجی‌های مدل InVEST قابلیت تبدیل به راهبردهای طراحی شهری حساس به آب در مقیاس خیابان، محله، پهنه شهری و کریدور رودخانه‌ای را دارند. بر این اساس، مدل مفهومی پژوهش بر پیوند میان محرک‌های کالبدی - اکولوژیک، شاخص‌های هیدرولوژیک و راهبردهای طراحی شهری حساس به آب استوار است. در این مدل، تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی به‌عنوان محرک‌های اصلی، از طریق اثرگذاری بر نفوذپذیری، ضریب رواناب، نگهداشت آب و بار آلودگی، الگوی فضایی رواناب شهری را شکل

می‌دهند. سپس خروجی‌های مدل InVEST و شاخص NDVI مبنای شناسایی پهنه‌های اصلاحی، حفاظتی، تکمیلی و کریدوری قرار گرفته و به تدوین راهبردهای طراحی شهری حساس به آب برای شهر رشت منجر می‌شوند.



شکل شماره ۱: چارچوب تحلیلی - کاربردی تبدیل یافته‌های مکانی و هیدرولوژیک پژوهش به راهبردهای طراحی شهری حساس به آب در شهر رشت

۲. پیشینه تحقیقاتی

تأثیر تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی بر رواناب شهری از موضوعات تثبیت‌شده در ادبیات هیدرولوژی شهری است. مطالعات داخلی و خارجی نشان داده‌اند که تبدیل اراضی نفوذپذیر، کشاورزی و دارای پوشش گیاهی به سطوح ساخته‌شده و سخت، موجب افزایش حجم رواناب، کاهش نفوذپذیری و تشدید دبی اوج جریان می‌شود. با این حال، مسئله اصلی در پژوهش‌های اخیر صرفاً اثبات این رابطه عمومی نیست، بلکه تحلیل شدت و توزیع مکانی اثرات، پیامدهای زیست‌محیطی و نحوه تبدیل نتایج مدل‌سازی به راهبردهای طراحی شهری و برنامه‌ریزی فضایی است. بخشی از مطالعات پیشین با استفاده از مدل‌های تجربی و ساده بارش - رواناب مانند CN و L-THIA، رابطه میان توسعه کالبدی و افزایش رواناب سطحی را بررسی کرده‌اند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تغییر کاربری اراضی، به‌ویژه تبدیل اراضی کشاورزی، پوشش‌های طبیعی و سطوح نفوذپذیر به اراضی ساخته‌شده و سطوح نفوذناپذیر، موجب افزایش رواناب سطحی، کاهش نفوذ و تشدید خطر آب‌گرفتگی شهری می‌شود (Weng, 2001; Shi et al., 2007; Shrestha et al., 2021). Shrestha et al. (2021) نشان دادند که کاهش اراضی کشاورزی و افزایش اراضی ساخته‌شده در شهر شیامن چین با افزایش سهم رواناب ناشی از اراضی ساخته‌شده همراه بوده است. همچنین (Sohn et al., 2020) تأکید می‌کنند که سطوح نفوذناپذیر، به‌ویژه سطوح نفوذناپذیر متصل به شبکه زهکشی، یکی از شاخص‌های کلیدی در پیش‌بینی رواناب شهری است. با وجود اهمیت این مطالعات در تبیین رابطه میان تغییر کاربری اراضی و رواناب، بخش قابل توجهی از آن‌ها عمدتاً بر برآورد کمی رواناب یا شبیه‌سازی پاسخ هیدرولوژیک متمرکز بوده‌اند و کمتر به پیوند هم‌زمان میان پوشش گیاهی، کیفیت رواناب، ظرفیت نگهداشت آب و پیامدهای طراحی شهری پرداخته‌اند. گروه دیگری از پژوهش‌ها نیز با استفاده از مدل‌های توزیع‌شده و

نیمه توزیع شده مانند SWAT و HEC-HMS، اثر تغییرات کاربری اراضی بر رواناب، دبی اوج و هیدروگراف سیلاب را بررسی کرده‌اند (Sajikumar & Remya, 2015; Ali et al., 2011; Azizi et al., 2021) از جمله پژوهش‌های (Liu و همکاران) و (Shukla et al., 2023)، امکان تحلیل دقیق‌تر پاسخ هیدرولوژیک حوضه به تغییرات کاربری اراضی را فراهم کرده‌اند. با این حال، بخش زیادی از این پژوهش‌ها همچنان در سطح تحلیل هیدرولوژیک باقی مانده و کمتر نشان داده‌اند که خروجی‌های مدل چگونه می‌تواند به تصمیمات طراحی شهری، اولویت‌بندی پهنه‌های مداخله یا توسعه زیرساخت سبز-آبی تبدیل شود. در سال‌های اخیر، ترکیب سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل‌های خدمات اکوسیستمی مانند InVEST و ARIES، امکان تحلیل مکانی رابطه میان تغییرات کاربری اراضی، عملکرد اکولوژیک زمین و مدیریت رواناب را فراهم کرده است. پژوهش‌هایی مانند (Atharinafi et al., 2021) و نیز (Yang et al., 2024) نشان داده‌اند که این مدل‌ها می‌توانند علاوه بر برآورد رواناب، شاخص‌هایی مانند نگهداشت آب، ظرفیت نفوذ و برخی کارکردهای زیست‌محیطی را نیز وارد تحلیل کنند. با وجود این، در بسیاری از این مطالعات، خروجی‌ها عمدتاً در قالب نقشه‌ها و شاخص‌های تحلیلی ارائه شده و پیوند آن‌ها با مداخله فضایی، طراحی شهری حساس به آب و سیاست‌گذاری کالبدی به صورت محدود تبیین شده است. در کنار این مطالعات، ادبیات طراحی شهری حساس به آب نشان می‌دهد که مدیریت رواناب شهری نباید صرفاً به عنوان مسئله‌ای فنی در شبکه دفع آب‌های سطحی تلقی شود. پژوهش‌هایی مانند (Schulze et al., 2024)، (Rashetnia et al., 2022) و (Wong et al., 2025) تأکید کرده‌اند که WSUD با ادغام زیرساخت سبز-آبی در خیابان‌ها، فضاهای عمومی، پارک‌ها، بام‌ها، لیه رودخانه‌ها و بافت‌های محله‌ای می‌تواند هم‌زمان به کاهش رواناب، افزایش نفوذپذیری، بهبود کیفیت آب و ارتقای کیفیت محیط شهری کمک کند. با این حال، تعیین مکان مناسب برای اجرای مداخلات WSUD همچنان یکی از چالش‌های اصلی این حوزه است؛ زیرا اثربخشی این مداخلات به ویژگی‌های مکانی، نوع کاربری اراضی، میزان پوشش گیاهی، نفوذپذیری خاک، حجم رواناب و بار آلودگی وابسته است. در مجموع، مرور پیشینه نشان می‌دهد که رابطه میان گسترش سطوح نفوذناپذیر و افزایش رواناب به خوبی شناخته شده است؛ اما خلأ اصلی در تبدیل تحلیل‌های هیدرولوژیک و مکانی به چارچوب مداخله طراحی شهری قرار دارد. از این رو، سهم پژوهش حاضر در اثبات دوباره این رابطه عمومی نیست، بلکه در تلفیق تحلیل تغییرات کاربری اراضی، شاخص NDVI، مدل InVEST و شاخص‌های رواناب، نفوذ، نگهداشت آب و بار آلودگی برای شناسایی پهنه‌های بحرانی و حفاظتی شهر رشت و ترجمه آن‌ها به راهبردهای طراحی شهری حساس به آب است.

نوآوری پژوهش حاضر در چهار محور زیر است که آن را از مطالعات پیشین در شهر رشت و ایران متمایز می‌کند: نوآوری پژوهش حاضر در پیوند دادن مدل‌سازی مکانی InVEST، تحلیل تغییرات کاربری اراضی، شاخص NDVI و شاخص‌های هیدرولوژیک - آلودگی با تدوین راهبردهای طراحی شهری حساس به آب برای شهر رشت است. در حالی که بخش مهمی از مطالعات پیشین عمدتاً بر برآورد کمی رواناب، تحلیل تغییرات پوشش زمین یا ارزیابی هیدرولوژیک متمرکز بوده‌اند، این پژوهش تلاش می‌کند خروجی‌های مدل‌سازی مکانی را به مبنایی برای تصمیم‌سازی طراحی در مقیاس پهنه، محله و کریدورهای سبز-آبی تبدیل کند. در این راستا، استفاده از ماژول Urban Stormwater Retention مدل InVEST امکان تحلیل هم‌زمان حجم رواناب، نسبت و حجم نفوذ، حجم و ارزش نگهداشت آب، بار آلودگی واقعی و بار آلودگی جلوگیری شده را در مقیاس سلول‌های ۳۰×۳۰ متر فراهم کرده است. همچنین، تلفیق داده‌های مربوط به نیترات و فسفر با لایه‌های کاربری اراضی، پوشش گیاهی، بارش و گروه‌های هیدرولوژیک خاک موجب شده است تحلیل رواناب از سطح برآورد کمی جریان سطحی فراتر رفته و کیفیت رواناب نیز در ارزیابی وارد شود. وجه متمایز دیگر پژوهش، ترجمه خروجی‌های مدل به پهنه‌های اولویت‌دار مداخله طراحی شهری است. بر این اساس، پهنه‌های مرکزی و جنوبی رشت به عنوان محدوده‌های نیازمند بازطراحی سطوح سخت، افزایش نفوذپذیری و توسعه زیرساخت سبز-آبی شناسایی شده‌اند؛ در مقابل، پهنه‌های شمالی و غربی، به دلیل ظرفیت بالاتر ذخیره، نفوذ و کاهش آلودگی، به عنوان عرصه‌های حفاظتی و پشتیبان شبکه

سبز-آبی تفسیر شده‌اند. افزون بر این، تنظیم جدول بیوفیزیکی متناسب با طبقات اصلی کاربری اراضی رشت، زمینه استفاده دقیق‌تر از مدل InVEST در شرایط شهرهای جلگه‌ای و پربارش شمال ایران را فراهم ساخته است.

۳. روش تحقیق

این پژوهش از نظر هدف کاربردی و از نظر روش، مبتنی بر رویکرد کمی - فضایی است. چارچوب تحلیلی آن بر تلفیق سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی و مدل InVEST استوار بوده و محدوده مطالعه، مرز اداری شهر رشت با مساحت تقریبی ۱۰۱/۶ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد که اطلاعات کامل در جدول شماره ۳ آمده است.

داده	منبع	سال(های) مورد استفاده	تفکیک مکانی	نحوه تهیه / پردازش
تصاویر ماهواره‌ای (Landsat)	سازمان زمین‌شناسی آمریکا (USGS)	۲۰۰۰ (TM)، ۲۰۰۸ (TM)، ۲۰۱۶ (OLI)	۳۰ متر	دانلود سطح ۱ (تصحیح شده)
تصاویر ماهواره‌ای (Sentinel-2)	آژانس فضایی اروپا (ESA)	۲۰۲۴	۱۰ متر (بازنمونه‌سازی به ۳۰ متر)	دانلود سطح ۲ (تصحیح اتمسفری)
داده‌های بارش	مرکز هیدرولوژی NASA (GPM)	میانگین بارش نماینده دوره ۲۰۰۵-۲۰۲۴ برای مدل‌سازی وضعیت ۲۰۲۴	۰/۱ درجه (تقریباً ۱۱ کیلومتر)	دانلود، برش، محاسبه مقدار نماینده و بازنمونه‌سازی به ۳۰ متر
گروه هیدرولوژیکی خاک	پایگاه جهانی HWSO (فائو/یونسکو)	نسخه ۱/۲ (۲۰۲۳)	۱ کیلومتر	برش برای محدوده رشت و اختصاص کلاس A تا D
داده نیترا (محلی)	نمونه‌برداری از خاک و آب (همکاری سازمان محیط زیست گیلان)، داده‌های منتشر شده رسمی	۲۰۲۴	نقطه‌ای و پهنه‌ای	درون‌یابی (کریجینگ) و تبدیل به رستر ۳۰ متر

جدول ۳: خلاصه منابع داده، سال‌های مورد استفاده، قدرت تفکیک مکانی و مراحل پیش‌پردازش هر لایه

چارچوب زمانی تحلیل و مدل‌سازی

در این پژوهش، تحلیل تغییرات کاربری اراضی و پوشش گیاهی در چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ انجام شد تا روند دگرگونی کالبدی و اکولوژیک شهر رشت طی دوره مورد مطالعه مشخص شود. با این حال، مدل‌سازی رواناب با ماژول Urban Stormwater Retention مدل InVEST برای وضعیت موجود سال ۲۰۲۴ اجرا گردید؛ زیرا هدف اصلی مدل‌سازی، شناسایی پهنه‌های فعلی تولید رواناب، کاهش نفوذ، تمرکز بار آلودگی و ظرفیت نگهداشت آب به‌منظور اولویت‌بندی مداخلات طراحی شهری حساس به آب بود. داده بارش مورد استفاده در مدل، به‌عنوان بارش نماینده وضعیت اقلیمی اخیر محدوده مطالعه در نظر گرفته شد و بر اساس داده‌های GPM/NASA و سری زمانی ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ تهیه گردید. بنابراین، خروجی‌های مدل InVEST در این مقاله به‌عنوان شبیه‌سازی روند تاریخی رواناب در کل دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ تفسیر نمی‌شوند، بلکه بیانگر وضعیت پایه سال ۲۰۲۴ و امکان مقایسه نسبی پهنه‌های مختلف شهر از نظر عملکرد هیدرولوژیک هستند. تحلیل سری زمانی LULC و NDVI در این چارچوب، نقش توضیح‌دهنده و زمینه‌ساز دارد و نشان می‌دهد که ساختار کالبدی و پوشش گیاهی شهر چگونه به وضعیت فعلی منجر شده است.

تولید نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی (LULC)

به منظور استخراج نقشه‌های کاربری اراضی (LULC) در چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴، مراحل زیر به ترتیب انجام پذیرفت. در مرحله پیش‌پردازش، تصحیحات اتمسفری با استفاده از روش DOS (Dark Object Subtraction) و نیز ژئورفرنس‌سازی با خطای RMSE کمتر از ۰/۵ پیکسل اعمال گردید. طبقات کاربری در چهار کلاس اصلی شامل اراضی ساخته‌شده، پوشش گیاهی طبیعی و فضای سبز شهری، اراضی کشاورزی و باغی، و اراضی بایر تعریف شدند. برای هر طبقه، حداقل ۵۰ ناحیه مورد علاقه (ROI) با پراکنش مناسب در سطح شهر انتخاب گردید. طبقه‌بندی تصاویر با بهره‌گیری از الگوریتم بیشینه شباهت (Maximum Likelihood Classifier – MLC) در محیط نرم‌افزار ENVI نسخه ۵/۳ اجرا شد. ارزیابی دقت نتایج با استفاده از ۲۰۰ نقطه تصادفی مستقل و محاسبه ماتریس خطا صورت پذیرفت. صحت کلی (Overall Accuracy) نقشه‌های تولیدشده برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ به ترتیب ۸۷٪، ۸۹٪، ۸۸٪ و ۹۱٪ و ضریب کاپا به ترتیب ۰/۸۳، ۰/۸۵، ۰/۸۴ و ۰/۸۹ به دست آمد.

شاخص NDVI

در این پژوهش، NDVI صرفاً به‌عنوان شاخص توصیفی پوشش گیاهی استفاده نشد، بلکه نقش یک متغیر اکولوژیک واسطه را در تحلیل رابطه میان ساختار کالبدی شهر و عملکرد هیدرولوژیک سطح زمین بر عهده دارد. این شاخص برای چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ محاسبه شد تا روند تغییرات پوشش گیاهی و ظرفیت اکولوژیک سطح زمین در کنار تغییرات کاربری اراضی بررسی شود. در ادامه، مقادیر NDVI با خروجی‌های مدل InVEST، از جمله حجم رواناب، نسبت نفوذ، حجم نگهداشت آب و بار آلودگی، مقایسه شد تا مشخص شود کاهش یا افزایش پوشش گیاهی چگونه با الگوی فضایی رواناب و ظرفیت نگهداشت آب در شهر رشت ارتباط دارد. از این رو شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی از رابطه $(NIR - RED) / (NIR + RED)$ بر روی تصاویر تصحیح شده محاسبه گردید و مقادیر آن در بازه ۱- تا ۱+ قرار دارد (مقادیر منفی سطوح بدون پوشش، نزدیک به صفر اراضی بایر یا مناطق شهری، و نزدیک به ۱+ پوشش متراکم).

مدل‌سازی رواناب با InVEST

در ماژو Urban Stormwater Retention (UR) ، ضریب رواناب سالانه (RC) بیانگر نسبت حجم رواناب سطحی سالانه به حجم بارش سالانه است، در حالی که ضریب نفوذ عمقی (PE) نسبت حجم آب عبوری از ناحیه ریشه و تغذیه بالقوه آب زیرزمینی به حجم بارش سالانه را نشان می‌دهد. ضریب نگهداشت رواناب نیز در مدل از رابطه $RE = 1 - RC$ محاسبه می‌شود. بر این اساس، RC و PE دو پارامتر مستقل‌اند و مقادیر PE در این پژوهش به‌صورت معکوس RC تعیین نشده‌اند. به دلیل نبود سری زمانی پیوسته دبی رواناب و مدل SWMM کالیبره‌شده برای شهر رشت، پارامترهای RC و PE به‌صورت ضرایب انتقالی و بر اساس شبیه‌سازی‌های پیوسته SWMM ارائه‌شده در راهنمای مدل InVEST و پژوهش (Hamel et al. 2021) تعیین شدند. در این تطبیق، اراضی ساخته‌شده با الگوی توسعه شهری متراکم، پوشش گیاهی و فضای سبز با سطح نفوذپذیر دارای تاج‌پوشش، اراضی کشاورزی و باغی با سطح نفوذپذیر و اراضی بایر با سطح فاقد پوشش گیاهی متناظر شدند. برای طبقه ساخته‌شده، با توجه به اینکه این طبقه ترکیبی از ساختمان، معبر، سطوح آسفالتی و لکه‌های محدود نفوذپذیر است، ضرایب بر پایه ترکیب نماینده توسعه شهری متراکم شامل ۹۰ درصد سطح نفوذناپذیر و ۱۰ درصد سطح نفوذپذیر محاسبه شد. مقادیر سایر طبقات مستقیماً از کلاس‌های پایه متناظر در شبیه‌سازی

SWMM اقتباس شدند. از آنجا که این ضرایب مستقیماً با داده‌های مشاهده‌ای رشت کالیبره نشده‌اند، به‌عنوان پارامترهای انتقالی برای مقایسه نسبی عملکرد هیدرولوژیک پهنه‌ها استفاده شده‌اند و نتایج مربوط به مقادیر مطلق رواناب و تغذیه بالقوه آب زیرزمینی باید با احتیاط تفسیر شوند.

PE_D	PE_C	PE_B	PE_A	RC_D	RC_C	RC_B	RC_A	is_connected	کلاس متناظر در پارامترگذاری	طبقه کاربری	lucode
۰.۰۰۱	۰.۰۰۳	۰.۰۰۶	۰.۰۱۱	۰.۷۹۰	۰.۷۷۶	۰.۷۶۹	۰.۷۶۱	۱	توسعه شهری متراکم؛ ترکیب ۹۰٪ نفوذپذیر و ۱۰٪ نفوذپذیر	مناطق ساخته‌شده	۱
۰.۰۰۷	۰.۰۲۸	۰.۰۵۷	۰.۱۱۰	۰.۳۰۰	۰.۱۶۰	۰.۰۹۰	۰.۰۰۰	۰	سطح نفوذپذیر بدون غلبه تاج پوشش درختی	اراضی کشاورزی و باغی	۲
۰.۰۰۸	۰.۰۳۲	۰.۰۶۲	۰.۱۱۰	۰.۲۸۰	۰.۱۵۰	۰.۰۸۰	۰.۰۰۰	۰	سطح نفوذپذیر دارای تاج پوشش گیاهی	پوشش گیاهی طبیعی و فضای سبز	۳
۰.۰۰۷	۰.۰۲۱	۰.۰۴۹	۰.۱۱۰	۰.۳۵۰	۰.۱۹۰	۰.۱۰۰	۰.۰۰۰	۰	سطح فاقد پوشش گیاهی	اراضی بایر	۴

جدول ۴: مقادیر شاخص‌های بیوفیزیکی برای مناطق مختلف شهر رشت

برای آماده‌سازی ورودی‌های مدل InVEST، جدول بیوفیزیکی بر اساس چهار طبقه اصلی کاربری اراضی شامل اراضی ساخته‌شده، پوشش گیاهی و فضای سبز شهری، اراضی کشاورزی و باغی و اراضی بایر تنظیم شد و به هر طبقه کد عددی اختصاص یافت. متغیر is_connected برای نمایش میزان اتصال هر کاربری به شبکه زهکشی تعریف شد؛ به‌گونه‌ای که برای اراضی ساخته‌شده، به دلیل ارتباط مستقیم با معابر، سطوح سخت و کانال‌های شهری، مقدار ۱ و برای سایر کاربری‌ها، به دلیل نفوذپذیری نسبی بیشتر و اتصال کمتر به شبکه رواناب، مقدار صفر در نظر گرفته شد. تخصیص این ضرایب بر پایه شباهت فیزیکی طبقات کلی کاربری اراضی پژوهش با کلاس‌های پایه مدل انجام شده است. به دلیل ناهمگنی درونی طبقه ساخته‌شده و نیز ترکیب شالیزار، باغ و اراضی زراعی در طبقه کشاورزی، تحلیل حساسیت پارامترها برای ارزیابی پایداری الگوی فضایی نتایج انجام شد. بنابراین، خروجی‌های مدل در درجه نخست برای مقایسه نسبی پهنه‌ها، شناسایی نواحی پررواناب و اولویت‌بندی مداخلات طراحی شهری استفاده شدند.

ضرایب rc_a تا rc_d بیانگر ضریب رواناب کاربری‌ها در گروه‌های هیدرولوژیک خاک A تا D هستند و با کاهش نفوذپذیری خاک از A به D افزایش می‌یابند. در مقابل، مقادیر pe_a تا pe_d به‌عنوان شاخص کارایی پوشش زمین در نفوذ و نگهداشت آب، به‌صورت معکوس با ضرایب رواناب تنظیم شدند. همچنین مقادیر EMC_N و EMC_P برای برآورد بار آلودگی نیتروژن/نیترات و فسفر در رواناب، بر پایه داده‌های محلی نمونه‌برداری خاک و آب استان گیلان و منابع رسمی منتشرشده به طبقات کاربری اختصاص یافتند. در این پژوهش، لایه کاربری اراضی سال ۲۰۲۴، استخراج‌شده از طبقه‌بندی نظارت‌شده تصاویر ماهواره‌ای، ورودی اصلی مدل بود. داده بارش سالانه با مقدار ۱۲۳۴ میلی‌متر از پایگاه GPM/NASA تهیه و پس از برش، هم‌تفکیک‌سازی و بازنمونه‌سازی، به رستر ۳۰ متری تبدیل شد. گروه‌های هیدرولوژیک خاک نیز به دلیل نبود نقشه محلی دقیق، از داده HWSO استخراج و برای محدوده رشت برش داده شدند. هدف این مرحله، انطباق جدول بیوفیزیکی مدل با شرایط کاربری اراضی، نفوذپذیری خاک، بارش و آلودگی رواناب در محدوده شهر رشت بود.

از آنجا که در داده‌های مورد استفاده در مورد داده‌های نیتروژن/نیترات و فسفر نیز محدودیت مشابهی وجود داشت، اطلاعات کافی درباره تعداد دقیق نمونه‌ها، تراکم نقاط نمونه‌برداری، پراکنش مکانی نمونه‌ها و خطای درون‌یابی در مقیاس درون‌شهری رشت در دسترس نبود، در این پژوهش از این داده‌ها برای تولید نقشه مستقل درون‌یابی شده آلاینده‌ها استفاده نشد. در نتیجه، خروجی‌های مربوط به نیتروژن/نیترات و فسفر به‌عنوان برآورد مدل محور بار آلودگی و برای مقایسه نسبی پهنه‌ها تفسیر شدند.

شاخص ارزش نگهداشت آب در این پژوهش به‌عنوان معیاری تکمیلی برای مقایسه نسبی پهنه‌ها از نظر اهمیت خدمات اکوسیستمی ذخیره و کنترل رواناب به‌کار رفت. این شاخص از حاصل ضرب حجم آب نگهداشت‌شده، به‌عنوان خروجی مستقیم مدل InVEST، در ارزش واحد نگهداشت هر مترمکعب آب محاسبه شد. با توجه به نبود داده محلی دقیق و رسمی درباره ارزش اقتصادی نگهداشت رواناب در شهر رشت، نتایج این شاخص به‌عنوان برآورد قطعی ارزش اقتصادی تفسیر نشد، بلکه برای سنجش تفاوت نسبی پهنه‌ها و کمک به اولویت‌بندی مکانی مداخلات طراحی شهری حساس به آب مورد استفاده قرار گرفت. بر این اساس، ارزش نگهداشت آب از رابطه (شماره ۱) زیر محاسبه شد:

$$\text{ارزش نگهداشت آب} = \text{حجم آب نگهداشت‌شده} \times \text{ارزش واحد نگهداشت هر مترمکعب آب}$$

پس از آماده‌سازی و بارگذاری ورودی‌ها، مدل InVEST اجرا و خروجی‌هایی شامل حجم آب نگهداشت‌شده، حجم رواناب تولیدشده، نسبت و حجم نفوذ آب، بار آلودگی واقعی و جلوگیری‌شده نیترات و فسفر، و ارزش نگهداشت آب تولید شد. در مرحله بعد، نقشه‌های خروجی مدل با لایه‌های شهری و معیارهای طراحی، از جمله تراکم سطوح سخت، مجاورت با فضاهای عمومی و قابلیت استقرار زیرساخت سبز-آبی، در محیط GIS تلفیق شدند. در نهایت، نتایج حاصل به پهنه‌های اولویت‌دار مداخله و راهبردهای طراحی شهری حساس به آب برای شهر رشت ترجمه گردید.

برای شفاف‌سازی روابط علی میان متغیرهای اصلی و جلوگیری از برداشت‌های خطی‌انگارانه، در جدول ۵ مرزبندی مفهومی سه مؤلفه‌ی کلیدی (کاربری اراضی، نفوذپذیری خاک، تولید رواناب) همراه با تعریف عملیاتی، شاخص اندازه‌گیری در این پژوهش و جهت‌گیری اثر هر یک بر رواناب (تحت شرایط ثابت دیگر) ارائه شده است.

متغیر	تعریف عملیاتی	شاخص اندازه‌گیری در این پژوهش	اثر تغییر بر رواناب (در شرایط یکسان)
کاربری اراضی	طبقه بندی پیکسل به ۴ کلاس (ساخته‌شده، پوشش گیاهی، کشاورزی، بایر)	نقشه‌های LULC از تصاویر لندست و سنتینل	تبدیل از کاربری کشاورزی به ساخته‌شده و افزایش ضریب رواناب به میزان ۰/۲ تا ۰/۴ واحد
نفوذپذیری خاک	توانایی خاک برای عبور آب در لایه سطحی (۳۰-۰ سانتی‌متر)	گروه هیدرولوژیک خاک A تا D برش خورده از نقشه جهانی	کاهش از گروه A (نفوذ بالا) به D (نفوذ کم) و باعث افزایش رواناب تا ۳ برابر
تولید رواناب	حجم آبی که زهکشی سطحی را تغذیه می‌کند (مترمکعب در سال)	خروجی ماژول InVEST (Runoff Volume)	تابع غیرخطی از شدت بارش، پوشش گیاهی و گروه خاک

جدول ۵: مرزبندی مفهومی متغیرهای کلیدی در رابطه کاربری اراضی-رواناب

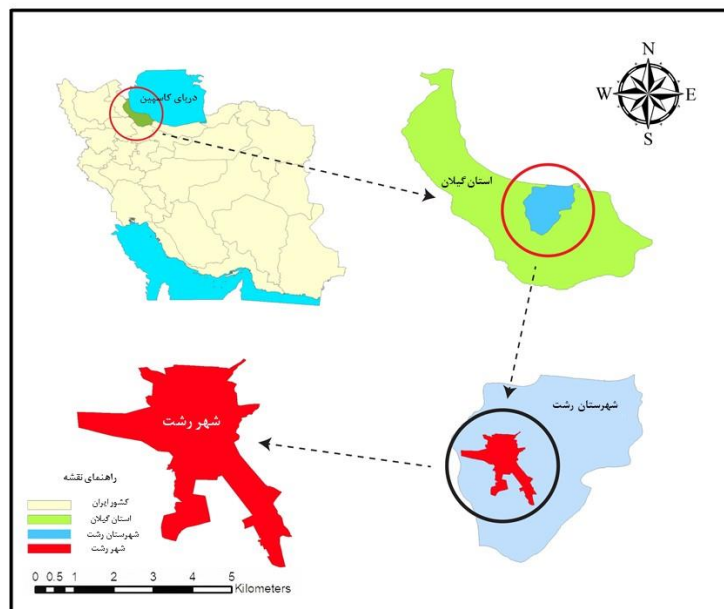
ارزیابی قابلیت اتکا، سازگاری درونی و تحلیل حساسیت

نتایج مدل در سه سطح شامل ارزیابی کیفیت داده‌های ورودی، بررسی سازگاری آماری خروجی‌ها و تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی کنترل شد. در سطح نخست، دقت نقشه‌های کاربری اراضی به‌عنوان ورودی اصلی مدل با استفاده از نقاط تصادفی مستقل،

ماتریس خطا، صحت کلی و ضریب کاپا ارزیابی شد. صحت کلی نقشه‌های سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ به‌ترتیب ۸۷، ۸۹، ۸۸ و ۹۱ درصد و ضریب کاپا به‌ترتیب ۰/۸۳، ۰/۸۵، ۰/۸۴ و ۰/۸۹ به دست آمد که بیانگر دقت قابل قبول لایه‌های ورودی است. در سطح دوم، سازگاری آماری خروجی‌ها با متغیرهای مستقل پژوهش از طریق همبستگی، تحلیل واریانس و رگرسیون چندمتغیره بررسی شد. نتایج نشان داد افزایش سطوح ساخته‌شده و ضریب رواناب با افزایش حجم رواناب و بار آلودگی همراه است، در حالی که افزایش NDVI با کاهش رواناب و افزایش نفوذ و نگهداشت آب ارتباط دارد؛ بنابراین، الگوهای مدل با منطق کاربری اراضی و پوشش گیاهی در رشت همخوانی دارد. در سطح سوم، پایداری نتایج از طریق تحلیل حساسیت یک‌طرفه برای دو پارامتر کلیدی، یعنی ضریب رواناب خاک گروه D و بارش سالانه، ارزیابی شد. تغییر ۱۰ درصدی ضریب رواناب به تغییر حدود ۱۲/۵ تا ۱۳ درصدی حجم رواناب و تغییر ۱۰ درصدی بارش سالانه به تغییر حدود ۷/۸ تا ۸ درصدی حجم رواناب منجر شد. همچنین، با اجرای بوت‌استرپ با ۱۰۰۰ تکرار، فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای میانگین حجم رواناب برآورد گردید. بر این اساس، اگرچه مدل فاقد کالیبراسیون مشاهده‌ای کامل است، خروجی‌های آن از نظر کیفیت داده‌های ورودی، سازگاری آماری، حساسیت پارامتری و ارتباط با متغیرهای مکانی اصلی پژوهش، برای مقایسه نسبی پهنه‌ها و اولویت‌بندی مداخلات طراحی شهری قابل اتکا است. بنابراین، نتایج مدل نه به‌عنوان جایگزین داده‌های مشاهده‌ای یا مدل‌های هیدرودینامیک کالیبره‌شده، بلکه به‌عنوان ابزاری برای تحلیل مکانی، شناسایی پهنه‌های اولویت‌دار و پشتیبانی از تصمیم‌سازی در طراحی شهری حساس به آب تفسیر می‌شوند.

۳. محدوده مورد مطالعه

شهر رشت، مرکز استان گیلان، در شمال ایران و در جلگه گیلان، در مجاورت دریای خزر و در ارتفاع حدود ۷ تا ۱۰ متر از سطح دریا واقع شده است. محدوده مورد مطالعه، مرز اداری شهر رشت است که بر اساس لایه چندضلعی رسمی در محیط نرم افزار ArcGIS استخراج شده و مساحتی حدود ۱۰۱/۶ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد. رشت به دلیل موقعیت جلگه‌ای، اقلیم مرطوب نیمه‌گرمسیری و میانگین بارندگی سالانه حدود ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر، از نظر مدیریت آب‌های سطحی و رواناب شهری دارای حساسیت بالایی است. این شهر در دهه‌های اخیر رشد کالبدی و جمعیتی قابل توجهی را تجربه کرده و بخش‌هایی از اراضی کشاورزی، شالیزارها و پوشش‌های گیاهی پیرامونی آن به سطوح ساخته‌شده تبدیل شده‌اند. این دگرگونی کاربری و پوشش زمین، با کاهش سطوح نفوذپذیر و افزایش سطوح سخت، نقش مهمی در تشدید تولید و تمرکز رواناب شهری در محدوده رشت ایفا کرده است.

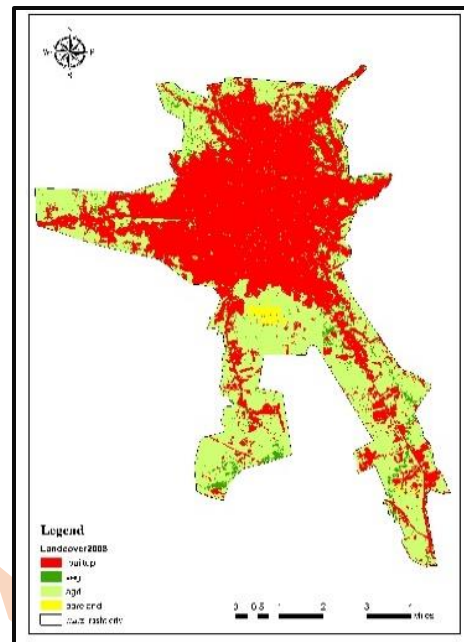
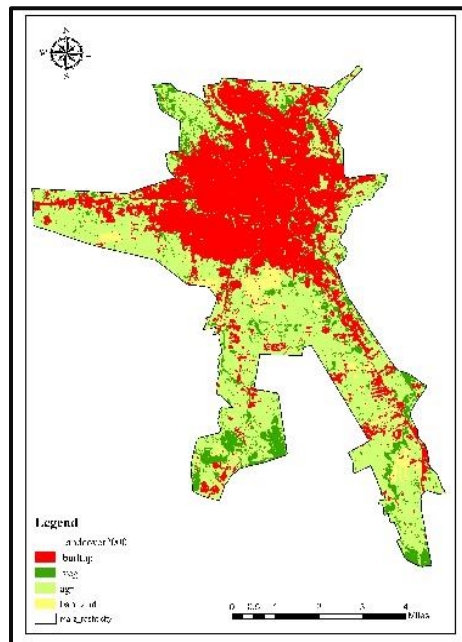


شکل ۲. موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه. شهر رشت (با رنگ قرمز) در محدوده‌ی شهرستان رشت (با رنگ آبی) و در درون استان گیلان (با رنگ سبز) در شمال ایران واقع شده است.

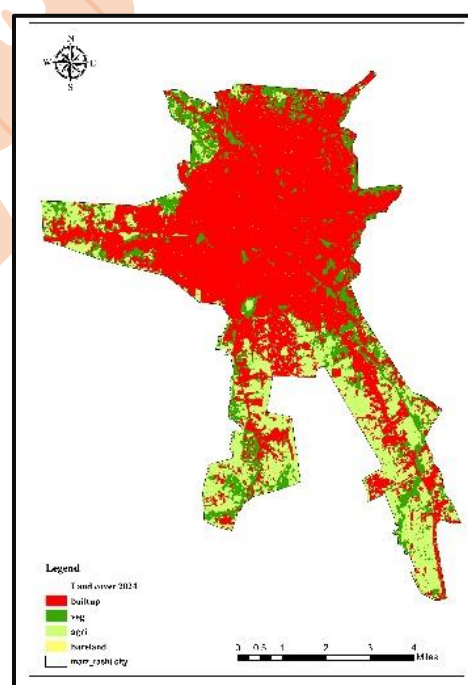
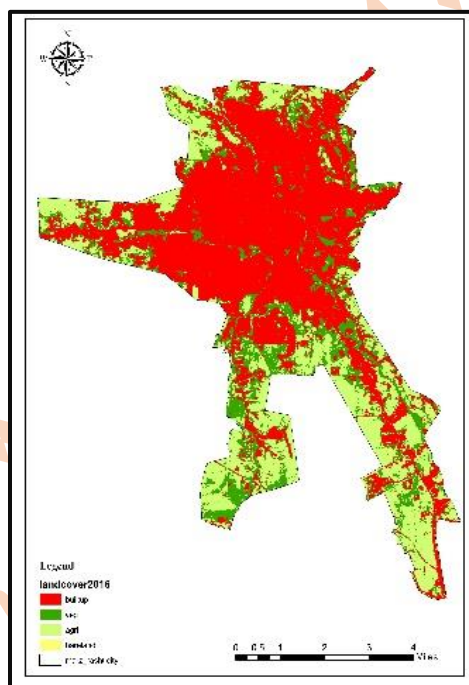
۴. یافته‌ها

تحلیل کاربری و پوشش زمین (LULC)

برای استخراج نقشه‌های کاربری و پوشش زمین، تصاویر ماهواره‌ای لندست و سنتینل-۲ در چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ پردازش شد. طبقه‌بندی نظارت‌شده در محیط نرم افزار ENVI 5.3 و با استفاده از الگوریتم بیشینه شباهت انجام گرفت. در این فرایند، نمونه‌های آموزشی به صورت نواحی مورد علاقه برای چهار طبقه اصلی شامل اراضی ساخته‌شده، اراضی کشاورزی و باغی، پوشش گیاهی طبیعی و فضاهای سبز شهری، و اراضی بایر تعریف شدند. اراضی ساخته‌شده شامل بافت‌های متراکم و نیمه‌متراکم شهری، شبکه معابر، فضاهای صنعتی و سایر سطوح سخت و نفوذناپذیر است. اراضی کشاورزی و باغی، شالیزارها، باغات و سایر اراضی زراعی را دربر می‌گیرد. طبقه پوشش گیاهی شامل حاشیه‌های سبز رودخانه‌ها، پارک‌ها و فضاهای سبز عمومی درون شهری است و اراضی بایر نیز سطوح فاقد پوشش گیاهی مؤثر و اراضی تخریب‌شده را شامل می‌شود. نقشه‌های تولیدشده مبنای تحلیل تغییرات فضایی و زمانی کاربری زمین در شهر رشت قرار گرفتند و به عنوان ورودی اصلی برای بررسی ارتباط میان تغییرات کاربری اراضی، پوشش گیاهی و الگوی تولید رواناب شهری مورد استفاده قرار گرفتند.



شکل ۳. نقشه های کاربری و پوشش زمین (LULC) در سری زمانی ۲۰۰۰ (سمت چپ) و ۲۰۰۸ (سمت راست)



شکل ۴. نقشه های کاربری و پوشش زمین (LULC) در سری زمانی ۲۰۱۶ (سمت چپ) و ۲۰۲۴ (سمت راست)

جدول ۶. مساحت (کیلومتر مربع) و سهم درصدی (%) طبقات کاربری و پوشش زمین شامل مناطق ساخته شده، پوشش گیاهی، اراضی کشاورزی و باغی، و اراضی بایر در سال های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴.

سال ۲۰۲۴	سال ۲۰۲۴	سال ۲۰۱۶	سال ۲۰۱۶	سال ۲۰۰۸	سال ۲۰۰۸	سال ۲۰۰۰	سال ۲۰۰۰	طبقه بندی کاربری ها
(بر حسب کیلومتر مربع)	(بر حسب کیلومتر مربع)	(بر حسب کیلومتر مربع)	(بر حسب کیلومتر مربع)	(بر حسب کیلومتر مربع)	(بر حسب کیلومتر مربع)	(بر حسب کیلومتر مربع)	(بر حسب کیلومتر مربع)	
۶۲/۶۹	۶۳/۴۸	۵۵/۹۰	۵۶/۷۹	۵۴/۹۲	۵۵/۸۰	۴۰/۶۴	۴۱/۲۸	مناطق ساخته شده
۲۱/۳۷	۲۱/۷۱	۲۷/۳۰	۲۷/۶۴	۴۱/۱۱	۴۱/۷۷	۴۶/۱۷	۴۶/۸۹	پوشش گیاهی
۱۵/۱۷	۱۵/۴۱	۱۶/۷۴	۱۷/۰۱	۲/۷۳	۲/۷۸	۹/۳۹	۹/۵۴	اراضی کشاورزی و باغی
۰/۷۵	۰/۷۷	۰/۱۴	۰/۱۴	۱/۲۲	۱/۲۵	۳/۷۹	۳/۸۵	اراضی بایر

نتایج تحلیل تغییرات کاربری اراضی شهر رشت در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ نشان می دهد که مساحت اراضی ساخته شده به طور قابل توجهی از ۴۱/۳ به ۶۳/۵ کیلومتر مربع افزایش یافته، در حالی که پوشش گیاهی با کاهش چشمگیر از ۴۶/۹ به ۲۱/۷ کیلومتر مربع رسیده است. همچنین اراضی کشاورزی و باغی در مجموع افزایش محدودی داشته و اراضی بایر کاهش یافته اند. بیشترین توسعه سطوح ساخته شده در دوره های ۲۰۰۰-۲۰۰۸ و ۲۰۱۶-۲۰۲۴ رخ داده، در حالی که شدیدترین کاهش پوشش گیاهی مربوط به فاصله ۲۰۰۸-۲۰۱۶ بوده است. این روند بیانگر جایگزینی تدریجی بخشی از سطوح نفوذپذیر طبیعی با سطوح سخت شهری است؛ وضعیتی که ظرفیت بالقوه شهر برای نفوذ، ذخیره و تنظیم رواناب را تضعیف کرده و زمینه تفسیر خروجی های مدل سازی وضعیت موجود سال ۲۰۲۴ را فراهم می کند.

جدول ۷. تغییرات مساحت (کیلومتر مربع) و تغییرات نسبی (%) طبقات کاربری/پوشش زمین شهر رشت در دوره های زمانی های مورد مطالعه

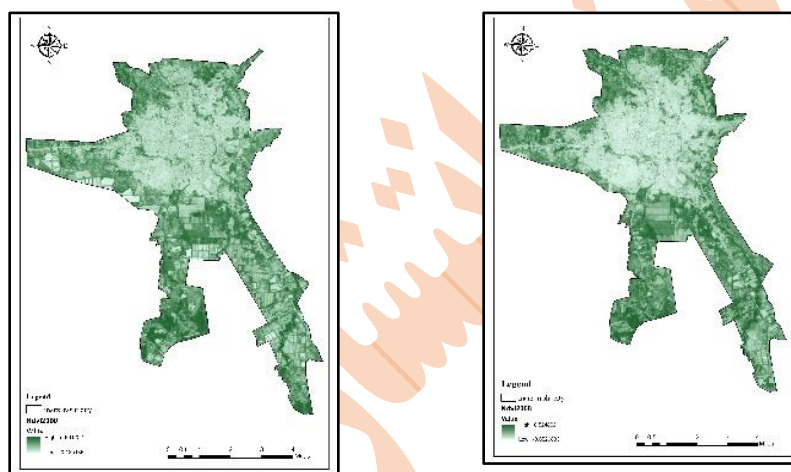
طبقه بندی کاربری زمین	مناطق ساخته شده	پوشش گیاهی	اراضی کشاورزی و باغی	اراضی بایر
۲۰۰۰-۲۰۰۸ کیلومتر مربع	+۱۴/۵۱	-۵/۱۲	-۶/۷۶	-۲/۶۰
۲۰۰۰-۲۰۰۸ درصد	+۱۴/۲۸	+۵/۰۶	-۶/۶۶	-۲/۵۷
۲۰۰۸-۲۰۱۶ کیلومتر مربع	+۱/۰۰	-۱۴/۱۳	+۱۴/۲۴	-۱/۱۰
۲۰۰۸-۲۰۱۶ درصد	+۰/۹۸	-۱۳/۹۱	+۱۴/۰۱	-۱/۰۸
۲۰۱۶-۲۰۲۴ کیلومتر مربع	+۶/۶۹	-۵/۹۳	-۱/۶۰	+۰/۶۲
۲۰۱۶-۲۰۲۴ درصد	+۶/۷۹	-۵/۸۳	-۱/۵۷	+۰/۶۲
۲۰۰۰-۲۰۲۴ کیلومتر مربع	+۲۲/۲۰	-۲۵/۱۸	+۵/۸۸	-۱/۹۷

-۱/۹۵	+۵/۷۸	-۲۴/۸۰	+۲۲/۹۰	۲۰۲۴-۲۰۰۰ درصد
-------	-------	--------	--------	----------------

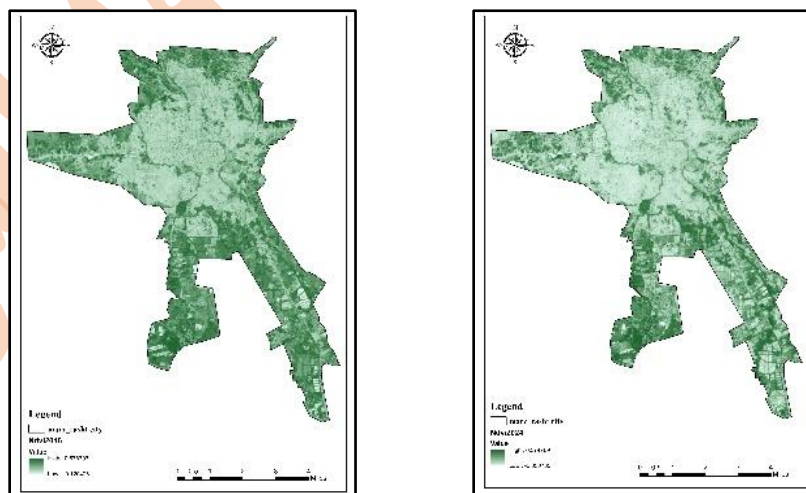
این تغییرات از نظر تحلیلی نشان می‌دهد که ساختار کالبدی شهر در جهت افزایش سطوح سخت و کاهش سطوح دارای توان نفوذ و نگهداشت آب حرکت کرده است؛ بنابراین، نقشه‌های کاربری اراضی صرفاً بیانگر تغییر پوشش زمین نیستند، بلکه زمینه کالبدی شکل‌گیری الگوی فعلی رواناب را توضیح می‌دهند.

توزیع شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) در منطقه‌ی مورد مطالعه

شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) یکی از پرکاربردترین سنجه‌ها برای اندازه‌گیری گستره و سرزندگی پوشش سبز گیاهی است. این شاخص بر پایه‌ی ویژگی طیفی گیاهان سالم بنا شده که در آن، بازتاب زیاد در باند فروسرخ نزدیک (NIR) و جذب قوی در باند قرمز طیف مرئی (RED) مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۵: نقشه‌های شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) برای شهر رشت در سری زمانی ۲۰۰۰ (سمت چپ)، ۲۰۰۸ (سمت راست)



شکل ۶: نقشه‌های شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) برای شهر رشت در سری زمانی ۲۰۱۶ (سمت چپ)، و ۲۰۲۴ (سمت راست)

بررسی نقشه‌های NDVI در چهار مقطع زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۴ نشان‌دهنده کاهش تدریجی شدت و پیوستگی پوشش گیاهی در شهر رشت است. در تمام دوره‌ها، هسته متراکم مرکزی و مرکزی-شمالی شهر دارای مقادیر پایین‌تر NDVI بوده، در حالی که نواحی پیرامونی، به‌ویژه بخش‌های جنوبی و غربی، مقادیر بالاتری از پوشش گیاهی را حفظ کرده‌اند. در فاصله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸، کاهش محسوس مقادیر NDVI و تکه‌تکه شدن فضاهای سبز درون‌شهری مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۱۶، هرچند بخشی از لکه‌های دارای NDVI متوسط در حاشیه شهر و امتداد مسیرهای زهکشی مجدداً ظاهر شده‌اند، اما هسته مرکزی همچنان با کمبود پوشش گیاهی مواجه است. در سال ۲۰۲۴، الگوی پوشش سبز بیش از پیش گسسته و خرد شده و لکه‌های دارای NDVI بالا عمدتاً به نواحی پیرامونی عقب‌نشینی کرده‌اند. این روند بیانگر اثر فرایندهای پرشدگی و فشردگی کالبدی بر کاهش پیوستگی اکولوژیک و تضعیف ظرفیت پوشش گیاهی در کنترل رواناب شهری است. کاهش NDVI در این پژوهش به‌عنوان نشانه‌ای از تضعیف عملکرد اکولوژیک سطح زمین تفسیر می‌شود؛ زیرا کاهش تراکم و سلامت پوشش گیاهی می‌تواند با کاهش نفوذ، کاهش نگهداشت آب و افزایش سهم رواناب سطحی همراه شود.

از نظر تحلیلی، کاهش NDVI در این پژوهش به‌عنوان نشانه‌ای از تضعیف ظرفیت اکولوژیک سطح زمین تفسیر می‌شود. پهنه‌های دارای NDVI پایین در سال ۲۰۲۴ عمدتاً با سطوح ساخته‌شده و نفوذناپذیر هم‌پوشانی داشته و در خروجی‌های مدل InVEST نیز با رواناب بیشتر، نفوذ کمتر و ظرفیت پایین‌تر نگهداشت آب همراه هستند. در مقابل، پهنه‌های دارای NDVI بالاتر، به‌ویژه در بخش‌های غربی و شمالی شهر، عملکرد مناسب‌تری در نفوذ، ذخیره آب و کاهش بار آلودگی نشان می‌دهند. بنابراین، NDVI در این پژوهش به‌عنوان شاخصی واسط میان وضعیت پوشش گیاهی و عملکرد هیدرولوژیک شهر عمل کرده و مبنایی برای تفکیک پهنه‌های نیازمند مداخله و پهنه‌های دارای اولویت حفاظت فراهم می‌سازد.

بار آلودگی واقعی

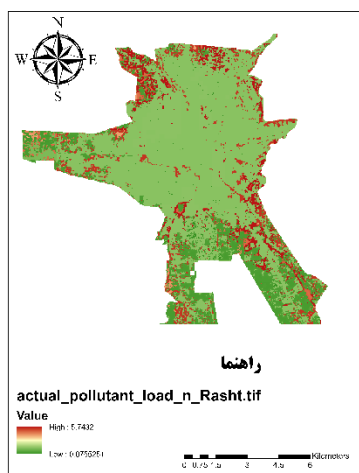
در شکل شماره ۷ (Actual Pollutant Load N) نشان‌دهنده بار آلودگی نیتрат در سطح شهر رشت است. بار آلودگی نیترات معمولاً از منابع مختلفی مانند فاضلاب‌ها، کشاورزی، و بارش‌ها به آب‌های سطحی وارد می‌شود.

بار آلودگی واقعی نیترات در این پژوهش با استفاده از ماژول Urban Stormwater Retention مدل InVEST محاسبه شده است. این ماژول بار آلودگی خروجی از هر سلول را بر اساس رابطه (شماره ۲) زیر برآورد می‌کند:

$$\text{Actual Load} = \text{EMC} \times \text{Runoff Volume} / \text{Cell Area}$$

بار آلودگی نیترات بر اساس میانگین غلظت رویدادی نیترات در رواناب و حجم رواناب سالانه محاسبه‌شده توسط مدل برآورد شد. مقادیر EMC برای کاربری‌های ساخته‌شده، کشاورزی، پوشش گیاهی و بایر به‌ترتیب ۱/۵، ۰/۵، ۰/۲ و ۰/۰۷ میلی‌گرم بر لیتر در نظر گرفته شد. شکل ۷ توزیع مکانی بار آلودگی نیترات در رشت را نشان می‌دهد. نتایج بیانگر وابستگی مستقیم بار آلودگی به نوع کاربری اراضی و حجم رواناب است؛ به‌گونه‌ای که بیشترین مقدار نیترات، حدود ۵/۷۴۳ میلی‌گرم بر مترمربع، در پهنه‌های مرکزی و جنوبی با تراکم بالای ساخت‌وساز، فعالیت‌های تجاری - صنعتی و سطوح نفوذناپذیر مشاهده می‌شود. در مقابل، کمترین مقدار، حدود ۰/۰۷۵۵ میلی‌گرم بر مترمربع، در اراضی دارای پوشش گیاهی و بخش‌هایی از نواحی غربی و شمالی ثبت شده است. ضریب تغییرات بالای ۰/۸۹، ناهمگنی شدید توزیع بار آلودگی را تأیید می‌کند. همچنین، سهم بیش از ۷۰ درصدی مناطق ساخته‌شده از بار آلودگی کل، همراه با حجم بالای رواناب در این پهنه‌ها، نقش فعالیت‌های انسانی و سطوح نفوذناپذیر را در تمرکز آلودگی نیترات نشان می‌دهد. در تفسیر نقشه‌های نیتروژن/نیترات و فسفر باید توجه داشت که این خروجی‌ها مستقیماً بر اساس مقادیر EMC

اختصاص یافته به طبقات کاربری اراضی در مدل InVEST تولید شده‌اند. بنابراین، این نقشه‌ها بیانگر برآورد مدل محور بار آلودگی در ارتباط با نوع کاربری، حجم رواناب و کارایی پوشش زمین‌اند و نباید به عنوان نقشه مشاهده‌ای غلظت آلاینده‌ها یا حاصل درون‌یابی مستقیم داده‌های نمونه‌برداری تفسیر شوند.



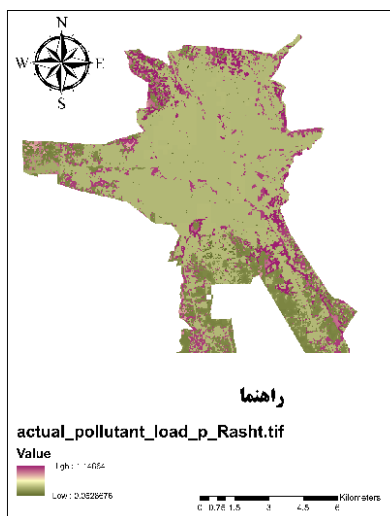
شکل ۷: نقشه بار آلودگی واقعی نیترات در شهر رشت، توزیع میزان آلودگی نیترات

جدول ۸: آمار توصیفی شاخص (Actual Pollutant Load N) در شهر رشت

شاخص	مقدار (mg/m^2)
حداقل مقدار	۰/۰۷۵۵
حداکثر مقدار	۵/۷۴۳
جمع کل	۱۶۹/۲۵۴/۱۳۴
میانگین	۱/۷۴۱
انحراف معیار	۱/۵۴۹

تحلیل بار آلودگی نیترات در شهر رشت (Actual Pollutant Load P)

در شکل ۸ (بار آلودگی واقعی فسفر، معادل نیترات)، نقشه توزیع آلودگی نیترات در شهر رشت با دامنه‌ای از ۰/۰۵۲۹ (سبز، کمترین) تا ۱/۱۴۸۶۴ (بنفش، بیشترین) ارائه شده است. مناطق بنفش که بیشترین بار آلودگی را دارند، عمدتاً منطبق بر نواحی با تراکم بالای فعالیت‌های انسانی، صنعتی، مسکونی و تجاری و همچنین نزدیکی به منابع فاضلاب و تخلیه‌های صنعتی هستند. در مقابل، مناطق سبز با کمترین آلودگی شامل اراضی کشاورزی با مدیریت صحیح و پهنه‌های دارای پوشش گیاهی انبوه می‌باشند که به دلیل جذب نیترات توسط گیاهان و عدم حضور فعالیت‌های آلاینده شهری، کیفیت بهتری دارند.



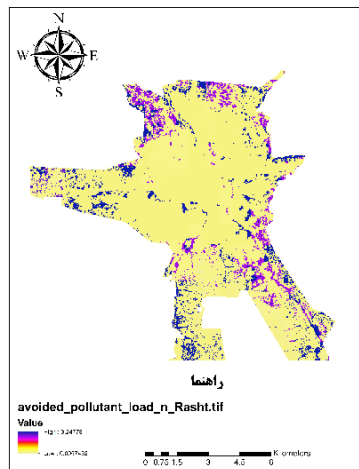
شکل ۸: نقشه بار آلودگی نیترات در شهر رشت، توزیع میزان آلودگی نیترات

تحلیل بار آلودگی نیترات جلوگیری شده در شهر رشت (Avoided Pollutant Load N)

شاخص بار آلودگی جلوگیری شده نیترات، میزان نیتراتی را نشان می‌دهد که به واسطه پوشش گیاهی، نفوذپذیری خاک و نگهداشت رواناب از ورود به منابع آبی بازمانده است. این شاخص در مدل InVEST از اختلاف میان بار بالقوه و بار واقعی آلودگی محاسبه می‌شود که بر اساس رابطه (شماره ۳) زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Avoided Load} = \text{Potential Load} - \text{Actual Load}$$

در این رابطه، بار بالقوه نشان‌دهنده آلودگی قابل تولید در شرایط نبود پوشش گیاهی و کنترل رواناب است، در حالی که بار واقعی تحت شرایط موجود کاربری اراضی، نفوذپذیری و پوشش گیاهی محاسبه می‌شود. مقادیر بالاتر این شاخص بیانگر عملکرد مؤثرتر پهنه‌ها در کاهش انتقال نیترات است. بر اساس نتایج، بیشترین میزان جلوگیری از آلودگی در بخش‌های غربی و شمالی شهر و اراضی دارای پوشش گیاهی متراکم مشاهده می‌شود؛ زیرا این پهنه‌ها با افزایش نفوذ، جذب نیترات و کاهش رواناب، نقش مهمی در بهبود کیفیت آب دارند. در مقابل، پهنه‌های ساخته شده متراکم در مرکز و جنوب شهر، به دلیل غلبه سطوح نفوذناپذیر و کمبود فضای سبز، کمترین ظرفیت را در جلوگیری از بار آلودگی نیترات نشان می‌دهند.



شکل ۹: نقشه بار آلودگی نیترات جلوگیری شده در شهر رشت

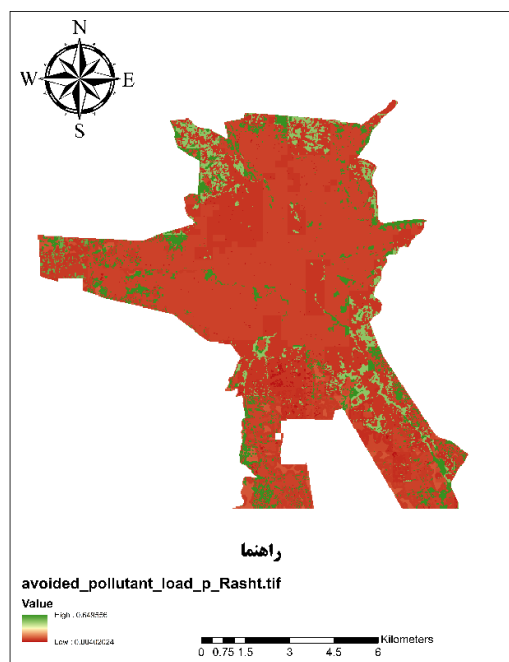
بار آلودگی جلوگیری شده نیترات در سطح پیک در شهر رشت (Avoided Pollutant Load P)

شاخص بار آلودگی جلوگیری شده فسفر، میزان فسفوری را نشان می‌دهد که به واسطه پوشش گیاهی، نفوذپذیری خاک و مدیریت رواناب از ورود به منابع آبی جلوگیری شده است. این شاخص در مدل InVEST مشابه نیترات و از اختلاف میان بار بالقوه و بار واقعی فسفر محاسبه می‌شود (رابطه شماره ۴):

$$\text{بار آلودگی جلوگیری شده فسفر} = \text{بار بالقوه فسفر} - \text{بار واقعی فسفر}$$

در این رابطه، بار بالقوه فسفر نشان‌دهنده میزان آلودگی قابل تولید در شرایط نبود پوشش گیاهی و کنترل رواناب است، در حالی که بار واقعی فسفر تحت شرایط موجود کاربری اراضی، نفوذپذیری خاک و مدیریت رواناب محاسبه می‌شود. غلظت میانگین رویدادی فسفر برای هر کاربری بر اساس داده‌های نمونه‌برداری محلی استان گیلان تعیین و نتایج پس از استانداردسازی بر اساس مساحت سلول‌ها به واحد میلی گرم بر مترمربع تبدیل شد. بر اساس شکل ۱۰، بیشترین میزان جلوگیری از بار آلودگی فسفر در نواحی دارای پوشش گیاهی، اراضی کشاورزی و پهنه‌های با مدیریت بهتر منابع طبیعی مشاهده می‌شود. در مقابل، مناطق شهری، صنعتی و تجاری به دلیل غلبه سطوح نفوذناپذیر و کمبود فضای سبز، کمترین ظرفیت را در کاهش و کنترل بار آلودگی فسفر نشان می‌دهند.

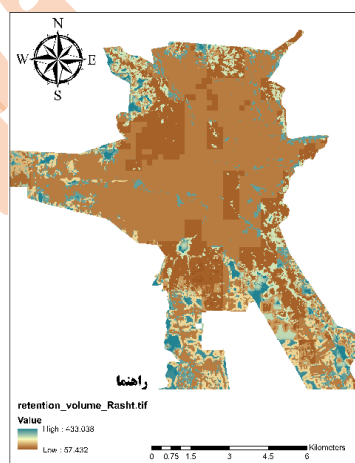
تمرکز بار آلودگی در پهنه‌های دارای رواناب بالاتر نشان می‌دهد که مسئله رواناب در رشت فقط از نظر حجم جریان اهمیت ندارد، بلکه با انتقال آلاینده‌ها و کاهش کیفیت رواناب نیز پیوند دارد.



شکل ۱۰: نقشه میزان بار آلودگی نیترات جلوگیری شده در سطح پیک در شهر رشت

تحلیل حجم ذخیره آب در شهر رشت (Retention Volume)

در شکل ۱۱ (حجم آب نگهداشت شده)، مناطق آبی معرف بالاترین حجم ذخیره آب هستند که معمولاً منطبق بر پوشش گیاهی انبوه یا خاک‌های با نفوذپذیری بالا بوده و با جذب بارش، رواناب را کاهش داده و در کنترل سیلاب مؤثرند. در مقابل، مناطق قهوه‌ای و زرد دارای پایین‌ترین حجم ذخیره هستند که به دلیل سطوح نفوذناپذیر (ساختمان شهری، جاده‌ها، ساختمان‌ها) و کمبود پوشش گیاهی، رواناب بیشتری تولید کرده و آلودگی منابع آبی را تشدید می‌کنند.



شکل ۱۱: نقشه حجم ذخیره آب در شهر رشت، توزیع مناطق با توانایی بالا و پایین در ذخیره‌سازی آب بارش‌ها

جدول ۹ : جدول آمار توصیفی شاخص (Retention Volume) برای شهر رشت

شاخص	مقدار / متر مکعب (m ³)
حداقل مقدار	۵۷/۴۳۲
حداکثر مقدار	۱۴۳۳/۰۳۷
جمع کل	۱۱/۱۲۴/۱۶۱
میانگین	۱۱۴/۴۳۶
انحراف معیار	۶۴/۷۷۰

جدول ۱۰ : شاخص‌های ناهمگونی و نابرابری توزیع حجم ذخیره آب در شهر رشت با تطابق نقشه حجم ذخیره آب (شکل ۱۱) و نقشه کاربری اراضی (شکل ۴۳):

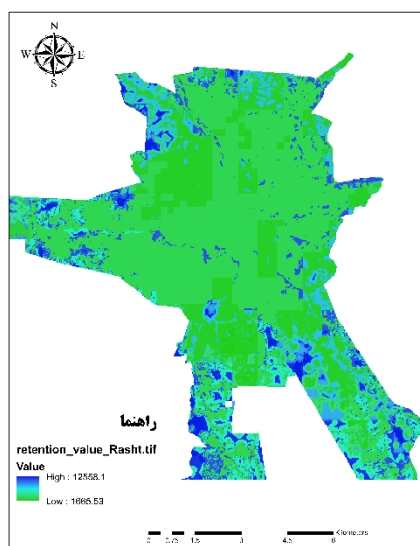
شاخص	مقدار	تفسیر
دامنه تغییرات (Range)	$۱۳۷۵/۶۱ - ۵۷.۴۳ = ۱۴۳۳.۰۴$ مترمکعب	تفاوت ۲۵ برابری بین کمترین و بیشترین ذخیره آب در سطح شهر
ضریب تغییرات (CV%)	$۵۶/۶ \text{ درصد} = ۱۰۰ * (۶۴/۷۷ / ۱۱۴/۴)$	ناهمگونی نسبتاً بالا - ذخیره آب به شدت در برخی مناطق متمرکز است
چارک اول (Q1)	تقریباً ۷۰ مترمکعب (توزیع چوله به راست)	۲۵ درصد از شهر دارای ذخیره بسیار کم (عمدتاً مناطق ساخته‌شده)
چارک سوم (Q3)	تقریباً ۱۵۰ مترمکعب	۲۵ درصد از شهر دارای ذخیره خوب (عمدتاً پوشش گیاهی و کشاورزی)
نسبت Q3/Q1	تقریباً ۱۴/۲	نشان‌دهنده نابرابری قابل توجه در توزیع خدمت ذخیره آب

بر اساس خروجی مدل InVEST، پهنه‌های آبی (بیشترین حجم ذخیره، بیش از ۴۰۰ مترمکعب) منطبق بر پوشش گیاهی متراکم در غرب و شمال شهر و تا حدی اراضی کشاورزی با خاک نفوذپذیر هستند. این مناطق با پوشش حدود ۳۰٪ از مساحت شهر، ۶۸٪ از کل ذخیره آب را تأمین می‌کنند. در مقابل، پهنه‌های قهوه‌ای/زرد (کمترین ذخیره، کمتر از ۸۰ مترمکعب) مربوط به اراضی ساخته‌شده متراکم در مرکز و جنوب هستند که با وجود ۴۰٪ مساحت، تنها ۱۲٪ از ذخیره آب را به خود اختصاص داده‌اند. مدل InVEST برای شاخص Retention Volume در اقلیم‌های مرطوب همبستگی بالای ۰/۸ با داده‌های میدانی نشان داده است. تحلیل حساسیت در رشت نشان داد تغییر ۲۰٪ در ضریب رواناب (rc_d) منجر به تغییر ۱۳٪ در حجم ذخیره آب می‌شود. از این روتوزیع ظرفیت ذخیره آب در رشت شدیداً نابرابر است و مناطق سبز و کشاورزی سهم نامتناسبی دارند، در حالی که مناطق شهری فشرده دچار کمبود شدید هستند.

تحلیل ارزش ذخیره آب در شهر رشت

نقشه ارزش ذخیره آب (Retention Value) در شهر رشت ظرفیت مناطق مختلف برای نگهداشت بارش و رواناب را نشان می‌دهد. شاخص ارزش ذخیره آب در شهر رشت نشان می‌دهد که ظرفیت نگهداشت آب به شدت تحت تأثیر نوع کاربری اراضی و پوشش

گیاهی است. در این پژوهش این شاخص به عنوان شاخصی تکمیلی برای نمایش اهمیت نسبی پهنه‌ها از نظر خدمت اکوسیستمی ذخیره آب استفاده شده است. این شاخص بر پایه حجم آب نگهداشت‌شده و ارزش واحد تعریف‌شده برای هر مترمکعب آب محاسبه می‌شود. بنابراین، تفسیر آن در این مقاله بیشتر ناظر بر مقایسه فضایی پهنه‌ها و اولویت‌بندی مداخله است، نه برآورد قطعی ارزش اقتصادی واقعی. بر اساس نقشه تولیدشده، پهنه‌هایی که حجم نگهداشت آب بیشتری دارند، ارزش نسبی بالاتری نیز نشان می‌دهند؛ در حالی که اراضی ساخته‌شده متراکم به دلیل سطوح نفوذناپذیر و ظرفیت پایین‌تر ذخیره آب، در گروه ارزش پایین‌تر قرار می‌گیرند.



شکل ۱۲: نقشه نشان‌دهنده ارزش ذخیره آب در مناطق مختلف شهر رشت

جدول ۱۱. آمار توصیفی شاخص نسبی ارزش نگهداشت آب (Retention Value) در شهر رشت

شاخص	مقدار / شاخص نسبی ارزش نگهداشت آب
حداقل مقدار	۱/۶۵۵
حداکثر مقدار	۱۲/۵۵۸
جمع کل	۳۲۲/۶۰۰/۶۶۹
میانگین	۳/۳۱۸
انحراف معیار	۱/۸۷۸/۳۳

شاخص ارزش نگهداشت آب

شاخص ارزش نگهداشت آب در این پژوهش به منظور مقایسه نسبی پهنه‌های شهری از نظر خدمت اکوسیستمی ذخیره و کنترل رواناب به کار رفته است. با توجه به وابستگی ارزش اقتصادی واقعی این خدمات به داده‌هایی مانند هزینه اجرای زیرساخت سبز، هزینه نگهداری، خسارت‌های آب‌گرفتگی، ظرفیت شبکه زهکشی و سیاست‌های مالی مدیریت شهری، نتایج این شاخص به عنوان برآورد

قطعی اقتصادی تفسیر نمی‌شود، بلکه مبنایی برای اولویت‌بندی نسبی پهنه‌های نیازمند حفاظت یا مداخله است. تطبیق نقشه ارزش نگهداشت آب با نقشه‌های کاربری اراضی و حجم نگهداشت نشان می‌دهد که پهنه‌های غربی و شمالی رشت، به دلیل پوشش گیاهی بیشتر و ظرفیت بالاتر ذخیره آب، ارزش نسبی بالاتری دارند. در مقابل، پهنه‌های مرکزی و جنوبی شهر، به علت تراکم سطوح ساخته‌شده، کاهش نفوذپذیری و ظرفیت پایین‌تر نگهداشت، در گروه ارزش نسبی پایین‌تر قرار می‌گیرند. بنابراین، حفاظت از پهنه‌های سبز و نفوذپذیر علاوه بر کارکرد هیدرولوژیک، در حفظ خدمات اکوسیستمی نیز اهمیت دارد.

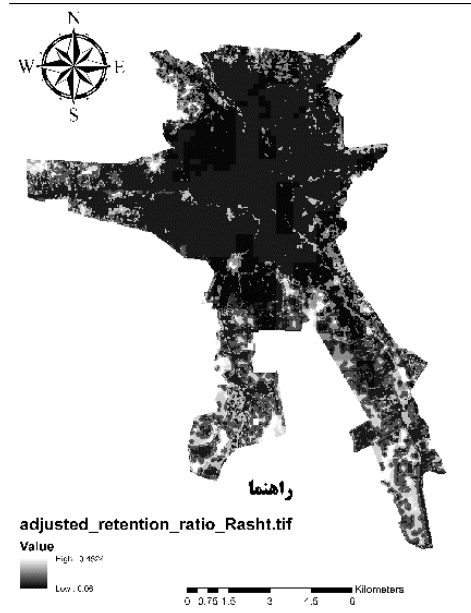
پهنه	وضعیت Retention Value	تفسیر
غرب و شمال	بالا	اولویت حفاظت اکولوژیک
مرکز و جنوب	پایین	اولویت بازطراحی سطوح سخت
حاشیه رودخانه‌ها	متوسط تا بالا	اولویت کریدور سبز - آبی

جدول ۱۲. تفسیر نسبی شاخص ارزش نگهداشت آب بر اساس پهنه‌های کاربری شهر رشت

از نظر تفسیر فضایی، مقادیر بالاتر Retention Value در پهنه‌های غربی و شمالی نشان‌دهنده اهمیت این نواحی در حفظ خدمات اکوسیستمی ذخیره آب است. در مقابل، مقادیر پایین‌تر این شاخص در پهنه‌های مرکزی و جنوبی، ضرورت مداخله طراحی برای افزایش نفوذپذیری، کاهش رواناب و تقویت زیرساخت سبز - آبی را نشان می‌دهد. بنابراین، Retention Value در این پژوهش بیش از آنکه شاخصی برای محاسبه ارزش اقتصادی قطعی باشد، ابزاری برای اولویت‌بندی فضایی حفاظت و مداخله محسوب می‌شود.

تحلیل ظرفیت ذخیره آب در شهر رشت (Adjusted Retention Ratio)

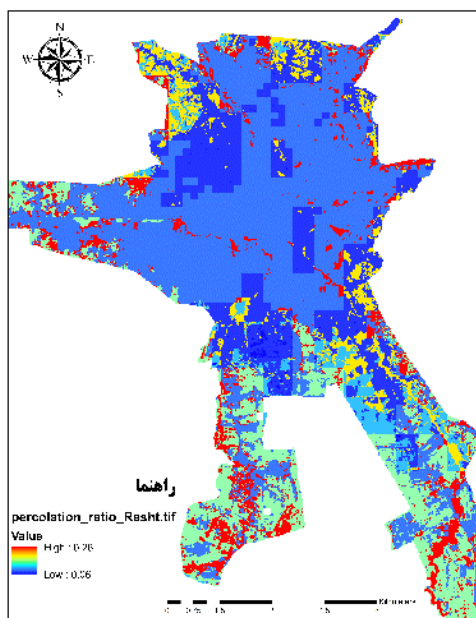
در این شاخص (نسبت ذخیره آب اصلاح‌شده)، ظرفیت ذخیره آب با در نظر گرفتن عوامل اصلاحی و مدیریتی نظیر تغییرات پوشش گیاهی، مصرف کود، تغییرات خاک و ساخت‌وساز ارزیابی می‌شود. مناطق با بالاترین نسبت (رنگ سفید) شامل اراضی کشاورزی، بایر و پوشش گیاهی هستند که پس از مداخلات محیطی و مدیریتی، ظرفیت بالایی در جذب و نگهداشت آب داشته و در کاهش رواناب و تغذیه آب زیرزمینی مؤثرند. در مقابل، مناطق با کمترین نسبت (رنگ سیاه) منطبق بر نواحی شهری، صنعتی و تجاری با سطوح نفوذناپذیر (آسفالت، بتن) و کمبود پوشش گیاهی بوده که به دلیل ساخت‌وساز و تغییرات سطح زمین، ظرفیت ذخیره آب بسیار پایینی دارند و بیشتر بارش به صورت رواناب خارج می‌شود.



شکل ۱۳: نسبت ذخیره آب اصلاح شده در شهر رشت

تحلیل نسبت نفوذ آب در شهر رشت

نقشه نسبت نفوذ آب (Percolation Ratio) در شهر رشت، توانایی زمین را در جذب بارش به سه دسته تقسیم می‌کند: مناطق آبی (نفوذ پایین) منطبق بر سطوح سخت شهری (آسفالت، بتن) که رواناب غالب است و خطر سیل و آلودگی را افزایش می‌دهد. مناطق سبز (نفوذ متوسط) شامل پوشش گیاهی نیمه‌متراکم و خاک‌های نیمه‌نفوذپذیر که جذب نسبی دارند. مناطق زرد تا قرمز (نفوذ بالا) مربوط به اراضی کشاورزی، پوشش گیاهی انبوه و خاک‌های نفوذپذیر (شنی-سیلty) هستند که با جذب سریع آب، تغذیه آب زیرزمینی را تقویت و رواناب را کاهش می‌دهند. شاخص نسبت نفوذ آب در شهر رشت نشان می‌دهد که توانایی جذب آب به شدت تحت تأثیر نوع کاربری اراضی است. بیشترین نفوذپذیری در اراضی کشاورزی و پوشش‌های گیاهی مشاهده می‌شود که با جذب بارش، به کاهش سیلاب و تغذیه آب زیرزمینی کمک می‌کنند. در مقابل، مناطق شهری و صنعتی با سطوح سخت کمترین نفوذپذیری را داشته و موجب افزایش رواناب، خطر سیلاب و آلودگی می‌شوند. نواحی با نفوذ متوسط نیز عمدتاً در حاشیه‌های شهری قرار دارند و نقش محدودی در کاهش رواناب ایفا می‌کنند.



شکل ۱۴: نقشه نسبت نفوذ آب در سطح شهر رشت

جدول ۱۳: جدول آمار توصیفی شاخص (Percolation Ratio) برای شهر رشت،

شاخص	مقدار / متر مکعب (m^3)
حداقل مقدار	۰/۰۵۹
حداکثر مقدار	۰/۲۵
جمع کل	۱۳/۴۳۰
میانگین	۰/۱۱۹
انحراف معیار	۰/۰۵۷

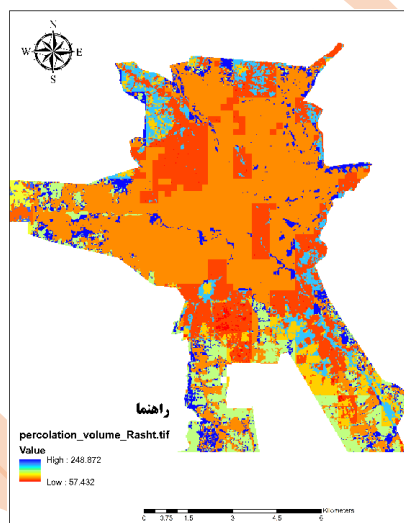
تحلیل میزان حجم نفوذ آب (Percolation Volume)

شاخص حجم نفوذ آب در شهر رشت نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه ظرفیت جذب آب میان کاربری‌های مختلف اراضی است. مناطق شهری، صنعتی و تجاری که با سطوح نفوذناپذیر مانند آسفالت و بتن مشخص می‌شوند، کمترین حجم نفوذ را داشته و بخش عمده بارش در آن‌ها به رواناب سطحی تبدیل می‌شود؛ مسئله‌ای که خطر سیلاب و انتقال آلودگی را افزایش می‌دهد. در مقابل، مناطق کشاورزی، پوشش‌های گیاهی طبیعی و خاک‌های نفوذپذیر مانند شنی-سیلتی، بیشترین حجم نفوذ را دارند و با جذب مؤثر آب، در کاهش رواناب، تغذیه آب زیرزمینی و کنترل سیلاب نقش مهمی ایفا می‌کنند. همچنین نواحی با نفوذ متوسط، شامل پوشش‌های گیاهی نیمه‌متراکم و خاک‌های نیمه‌نفوذپذیر، تا حدی توانایی کاهش رواناب را دارند اما عملکرد آن‌ها نسبت به مناطق طبیعی

ضعیف‌تر است. کاهش نسبت نفوذ در پهنه‌های ساخته‌شده نشان می‌دهد که نوع کاربری اراضی و ویژگی سطح زمین نقش تعیین‌کننده‌ای در تفکیک پهنه‌های پرواناب و کم‌نفوذ دارد.

شاخص	مقدار / متر مکعب (m^3)
حداقل مقدار	۵۷/۴۳۲
حداکثر مقدار	۲۴۸/۸۷۲
جمع کل	۱۰/۴۹۴/۰۵۱
میانگین	۱۰۷/۹۵۴
انحراف معیار	۵۱/۸۳

جدول ۱۴: جدول آمار توصیفی شاخص (Percolation Volume) برای شهر رشت

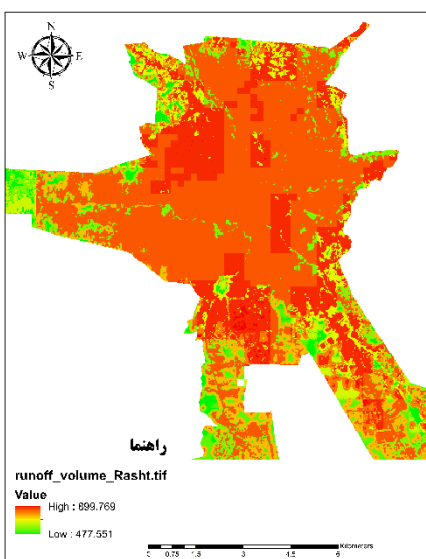


شکل ۱۵: توزیع نسبت نفوذ آب در شهر رشت

تحلیل میزان حجم رواناب (Runoff Volume)

شاخص حجم رواناب در شهر رشت بیانگر میزان آب بارش خروجی از هر منطقه است و تفاوت قابل توجهی میان کاربری‌های مختلف اراضی را نشان می‌دهد. مناطق شهری و صنعتی با سطوح نفوذناپذیر مانند آسفالت و بتن و کمبود پوشش گیاهی، بیشترین حجم رواناب را تولید می‌کنند، به طوری که حداکثر مقدار رواناب در این پهنه‌ها به ۸۹۹/۷۷ مترمکعب در هر سلول می‌رسد. در مقابل، مناطق کشاورزی، پوشش‌های گیاهی طبیعی و خاک‌های نفوذپذیر، کمترین رواناب را دارند (حداقل ۴۷۷/۵۵ مترمکعب)، زیرا آب بارش به راحتی جذب می‌شود و خطر سیلاب کاهش می‌یابد. مجموع حجم رواناب در سطح شهر ۸۱/۴۲۲/۷۵۹ واحد برآورد شده و میانگین آن ۸۳۷/۶۱ با انحراف معیار ۶۹/۶۲ است که نشان‌دهنده پراکندگی مکانی قابل توجه رواناب ناشی از تفاوت در نوع خاک، پوشش گیاهی و کاربری اراضی می‌باشد.

هم‌پوشانی مکانی این پهنه‌ها با سطوح ساخته‌شده و مقادیر پایین‌تر NDVI نشان می‌دهد که الگوی رواناب بالا در شهر رشت صرفاً یک خروجی منفرد مدل نیست، بلکه با ساختار کالبدی و اکولوژیک سطح زمین ارتباط دارد.



شکل ۱۶: نقشه نشان‌دهنده حجم رواناب در شهر رشت است، که مناطق با حجم رواناب بالا (قرمز و نارنجی) و حجم رواناب پایین (سبز) را بر اساس توانایی زمین در جذب آب بارش‌ها

جدول ۱۵: جدول آمار توصیفی شاخص (Runoff Volume) برای شهر رشت، شامل مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین، جمع کل و انحراف معیار حجم رواناب در سطح شهر است که توزیع و شدت رواناب را در نواحی مختلف نشان می‌دهد.

مقدار	شاخص
۴۷۷/۵۵	حداقل مقدار
۸۹۹/۷۷	حداکثر مقدار
۸۱/۴۲۲/۷۵۹	جمع کل
۸۳۷/۶۱	میانگین
۶۹/۶۲	انحراف معیار

جمع‌بندی فضایی خروجی‌های مدل نشان می‌دهد که نتایج به‌دست‌آمده صرفاً تأییدکننده رابطه عمومی میان افزایش سطوح نفوذناپذیر و افزایش رواناب نیست، بلکه الگوی نابرابر توزیع شاخص‌های هیدرولوژیک و آلودگی را در شهر رشت آشکار می‌کند. پهنه‌های مرکزی و جنوبی شهر، که سهم بیشتری از سطوح ساخته‌شده و نفوذناپذیر را در خود جای داده‌اند، به‌طور هم‌زمان با حجم بالاتر رواناب، نسبت نفوذ پایین‌تر، ظرفیت کمتر نگهداشت آب و بار آلودگی بیشتر همراه هستند. در مقابل، پهنه‌های غربی و شمالی، به دلیل برخورداری از پوشش گیاهی بیشتر و اراضی نفوذپذیرتر، عملکرد مطلوب‌تری در کاهش رواناب، افزایش نفوذ، ذخیره آب و جلوگیری از انتقال آلودگی نشان می‌دهند. بنابراین، تمایز اصلی یافته‌های این بخش در تعیین شدت و مکان اثرات هیدرولوژیک توسعه شهری و فراهم‌کردن مبنایی برای شناسایی پهنه‌های اولویت‌دار مداخله طراحی شهری حساس به آب است.

برای تقویت پشتوانه تحلیلی یافته‌ها و پرهیز از اتکای صرف به تفسیر بصری نقشه‌ها، در ادامه رابطه میان نوع کاربری اراضی، وضعیت پوشش گیاهی و شاخص‌های هیدرولوژیک مدل InVEST به صورت کمی بررسی شد. هدف از این بخش آن است که مشخص شود آیا الگوهای مشاهده شده در نقشه‌ها از نظر آماری نیز قابل پشتیبانی هستند یا خیر. بر این اساس، ابتدا تفاوت میانگین شاخص‌های اصلی مدل در طبقات مختلف کاربری اراضی بررسی شد؛ سپس رابطه میان NDVI، سطوح ساخته شده و شاخص‌هایی مانند حجم رواناب، نسبت نفوذ، حجم نگهداشت آب و بار آلودگی از طریق تحلیل همبستگی و رگرسیون چندمتغیره مورد آزمون قرار گرفت. این تحلیل‌ها امکان می‌دهند که ارتباط میان تغییرات کالبدی شهر، وضعیت پوشش گیاهی و عملکرد هیدرولوژیک پهنه‌ها به صورت کمی و فضایی تبیین شود.

مقایسه میانگین شاخص‌های هیدرولوژیک بین طبقات کاربری اراضی

برای بررسی اینکه تفاوت‌های مشاهده شده در نقشه‌ها صرفاً حاصل تفسیر بصری نیستند، میانگین شاخص‌های هیدرولوژیک در طبقات مختلف کاربری اراضی مقایسه شد. برای مقایسه میانگین حجم رواناب، حجم نفوذ، بار آلودگی نترات و حجم ذخیره آب در چهار طبقه کاربری (ساخته شده، پوشش گیاهی، کشاورزی، بایر)، از آزمون تحلیل واریانس یک طرفه (ANOVA) استفاده شد. پیش از آن، پیش فرض‌های نرمالیتی (آزمون شاپیرو-ویلک) و همسانی واریانس‌ها (آزمون لون) بررسی گردید. در موارد نقض پیش فرض‌ها، از نسخه ناپارامتریک کروسکال-والیس بهره گرفته شد. نتایج (جدول ۱۶) نشان داد که بین چهار طبقه کاربری از نظر تمام شاخص‌های مورد بررسی تفاوت آماری معناداری وجود دارد. آزمون تعقیبی توکی نشان داد که مناطق ساخته شده به طور معناداری دارای بیشترین حجم رواناب (میانگین ۸۷۲/۳ در مقابل ۵۰۱/۲ مترمکعب در پوشش گیاهی و بالاترین بار آلودگی نترات (میانگین ۴/۲۱ در مقابل ۰/۱۸ میلی گرم بر مترمربع، هستند. در مقابل، پوشش گیاهی طبیعی و اراضی کشاورزی به ترتیب بیشترین حجم نفوذ و ذخیره آب را دارا بودند.

شاخص	F-value	p-value	تفاوت معنادار بین کاربری‌ها (Tukey)
حجم رواناب (Runoff Volume)	۶/۲۴۳	<۰/۰۰۱	ساخته شده > کشاورزی > بایر > پوشش گیاهی
بار آلودگی نترات (Actual N Load)	۳۱۲/۸	<۰/۰۰۱	ساخته شده > بایر > کشاورزی > پوشش گیاهی
حجم ذخیره آب (Retention Volume)	۱۹۸/۴	<۰/۰۰۱	پوشش گیاهی > کشاورزی > بایر > ساخته شده
نسبت نفوذ (Percolation Ratio)	۱۷۶/۲	<۰/۰۰۱	کشاورزی > پوشش گیاهی > بایر > ساخته شده

جدول ۱۶: نتایج آزمون تحلیل واریانس یک طرفه (ANOVA) و آزمون تعقیبی Tukey برای مقایسه شاخص‌های هیدرولوژیک و آلودگی نترات بین انواع کاربری اراضی در شهر رشت

نتایج تحلیل واریانس نشان داد که میانگین شاخص‌هایی مانند حجم رواناب، نسبت نفوذ، حجم نگهداشت آب و بار آلودگی میان طبقات کاربری تفاوت معنادار دارد. این یافته نشان می‌دهد که نوع کاربری اراضی نقش تعیین کننده‌ای در تغییر عملکرد هیدرولوژیک سطح زمین دارد و تفاوت میان پهنه‌های ساخته شده، پوشش گیاهی، کشاورزی و بایر تنها یک الگوی بصری در نقشه‌ها نیست، بلکه از نظر آماری نیز قابل پشتیبانی است.

تحلیل همبستگی بین متغیرهای محیطی و هیدرولوژیک

تحلیل همبستگی پیرسون برای پاسخ به این پرسش انجام شد که آیا رابطه میان متغیرهای کالبدی و اکولوژیک با خروجی‌های مدل، از نظر کمی قابل شناسایی است یا خیر. برای بررسی روابط آماری میان متغیرهای پژوهش، ضریب همبستگی پیرسون بین متغیرهای مستقل شامل درصد سطح ساخته شده، NDVI، ضریب رواناب rc_d و تراکم جمعیت، با متغیرهای وابسته شامل حجم رواناب، بار

آلودگی و حجم ذخیره آب محاسبه شد. نتایج نشان داد درصد سطح ساخته شده و ضریب رواناب rc_d دارای همبستگی مثبت قوی با حجم رواناب هستند، در حالی که NDVI با حجم رواناب و بار آلودگی همبستگی منفی قوی دارد. همچنین، همبستگی منفی متوسط میان rc_d و حجم نفوذ آب، نقش کاهش نفوذپذیری خاک در افزایش رواناب و کاهش ظرفیت نفوذ را تأیید می کند. ۱۷.۴ ماتریس همبستگی پیرسون بین متغیرهای کلیدی نتایج نشان داد درصد سطوح ساخته شده با حجم رواناب و بار آلودگی رابطه مثبت دارد، در حالی که NDVI با حجم رواناب و بار آلودگی رابطه منفی و با شاخص های نفوذ و نگهداشت آب رابطه مثبت نشان می دهد. از این رو بیشترین همبستگی مثبت میان درصد سطوح ساخته شده و حجم رواناب مشاهده شد، در حالی که NDVI قوی ترین رابطه منفی را با حجم رواناب نشان داد.

متغیرها	حجم رواناب	بار آلودگی N	حجم ذخیره آب	نسبت نفوذ
درصد ساخته شده	***۰/۸۷	***۰/۹۱	***۰/۸۲	***۰/۷۹
NDVI	***۰/۸۴	***۰/۸۸	***۰/۷۹	***۰/۷۴
rc_d	***۰/۹۴	***۰/۸۹	***۰/۶۸	***۰/۷۳
تراکم جمعیت	***۰/۷۶	***۰/۸۵	***۰/۷۱	***۰/۶۵
(** دو دامنه) $p < ۰/۰۱$				

جدول ۱۷: ضرایب همبستگی بین متغیرهای کاربری اراضی و پوشش گیاهی با شاخص های هیدرولوژیکی و آلودگی در شهر رشت

تحلیل رگرسیون خطی چندگانه برای پیش بینی حجم رواناب

یک مدل رگرسیون خطی چندگانه (به روش گام به گام) با متغیر وابسته حجم رواناب و متغیرهای مستقل شامل درصد سطح ساخته شده، NDVI، rc_d و تراکم جمعیت برازش شد. که به صورت هم زمان اثر متغیرهای کالبدی و اکولوژیک بر حجم رواناب، مدل رگرسیون چندمتغیره اندازه گیری شود. مدل نهایی (جدول ۱۸) سه متغیر rc_d ، درصد ساخته شده و NDVI را حفظ کرد و توانست ۹۱٪ از تغییرات حجم رواناب را تبیین کند. ضریب استاندارد شده (Beta) نشان می دهد که rc_d بیشترین تأثیر را بر حجم رواناب دارد.

متغیر	خطای استاندارد (B)	Beta	t-value	p-value
ثابت	۱۲۴/۵ (۱۸/۳)	-	۶/۸۰	<۰/۰۰۱
rc_d	۶۸۰/۴ (۳۲/۱)	۰/۶۲	۲۱/۲۰	<۰/۰۰۱
درصد ساخته شده	۳/۴۲ (۰/۴۵)	۰/۲۸	۷/۶۰	<۰/۰۰۱
NDVI	۲۸۱/۵ - (۴۱/۲)	-۰/۱۹	-۶/۸۳	<۰/۰۰۱

جدول ۱۸: نتایج مدل رگرسیون چندمتغیره برای تبیین تغییرات حجم رواناب در شهر رشت بر اساس متغیرهای هیدرولوژیکی و کاربری اراضی

مقدار R^2 برابر با ۰/۹۱ نشان می دهد که ترکیب متغیرهایی مانند درصد سطوح ساخته شده، NDVI و ضریب رواناب توانسته است بخش عمده ای از تغییرات حجم رواناب را تبیین کند.

تحلیل روند تغییرات کاربری (آزمون من-کندال)

به منظور بررسی معناداری روند تغییرات مساحت طبقات کاربری در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، آزمون من-کندال بر روی سری زمانی چهار مقطع اعمال شد (جدول ۱۹). نتایج نشان داد افزایش مساحت ساخته شده دارای روند افزایشی معنادار و کاهش پوشش

گیاهی دارای روند کاهشی معنادار می‌باشند. شیب سن (Sen's slope) برای ساخته‌شده سالانه $0/93$ کیلومتر مربع و برای پوشش گیاهی سالانه $-1/05$ کیلومتر مربع برآورد شد. تغییرات اراضی کشاورزی و بایر فاقد روند معنادار آماری بودند.

جدول ۱۹: نتایج آزمون من-کندال برای روند تغییرات کاربری (۲۰۰۰-۲۰۲۴)

طبقه کاربری	آماره τ	p-value	شیب سن (km^2/year)	روند معنادار
ساخته‌شده	$1/00$	$0/42$	$+0/93$	افزایشی (معنادار)
پوشش گیاهی	$-1/00$	$0/42$	$-1/05$	کاهشی (معنادار)
کشاورزی	$0/33$	$0/75$	$+0/24$	غیرمعنادار
بایر	$-0/33$	$0/75$	$-0/12$	غیرمعنادار

روابط تحلیلی میان متغیرهای کالبدی - اکولوژیک و شاخص‌های هیدرولوژیک

رابطه تحلیلی	جهت رابطه	پشتوانه تحلیلی	تفسیر
سطح ساخته‌شده - حجم رواناب	مثبت	همبستگی/رگرسیون	افزایش سطوح سخت با افزایش رواناب همراه است
سطح ساخته‌شده - نسبت نفوذ	منفی	همبستگی/مقایسه میانگین	سطوح سخت ظرفیت نفوذ را کاهش می‌دهند
NDVI - حجم رواناب	منفی	همبستگی	پوشش گیاهی بیشتر با رواناب کمتر همراه است
NDVI - نگهداشت آب	مثبت	همبستگی/همپوشانی فضایی	پهنه‌های سبزتر ظرفیت ذخیره بالاتری دارند
			پوشش گیاهی بالاتر با افزایش ظرفیت ذخیره و نگهداشت آب همراه است.
NDVI - بار آلودگی	منفی	همبستگی پیرسون و همپوشانی فضایی NDVI با خروجی‌های بار آلودگی P و N	پهنه‌های دارای پوشش گیاهی بیشتر، توان بیشتری در کاهش انتقال آلودگی دارند.
حجم رواناب - بار آلودگی	مثبت	همبستگی/خروجی invest	افزایش رواناب با انتقال بیشتر آلاینده همراه است
کاربری ساخته‌شده - بار آلودگی	مثبت	ANOVA/همپوشانی فضایی	بافت‌های متراکم‌تر در معرض بار آلودگی بالاتر هستند

جدول ۲۰: جمع‌بندی روابط تحلیلی میان متغیرهای کالبدی، پوشش گیاهی و شاخص‌های هیدرولوژیک

تحلیل حساسیت و عدم قطعیت

با توجه به نبود داده‌های مشاهده‌ای پیوسته برای کالیبراسیون کامل مدل InVEST در مقیاس درون‌شهری رشت، تحلیل حساسیت و عدم قطعیت به‌عنوان روشی برای کنترل پایداری خروجی‌های مدل انجام شد. هدف از این تحلیل، سنجش میزان وابستگی نتایج به تغییرات پارامترهای کلیدی و ارزیابی دامنه تغییرپذیری خروجی‌ها بود. بر این اساس، تحلیل حساسیت یک‌طرفه بر روی دو پارامتر مهم شامل ضریب رواناب گروه خاک D و بارش سالانه انجام شد. تغییر ± 10 درصدی در ضریب رواناب منجر به تغییر حدود $12/5$ تا 13 درصدی در حجم رواناب و تغییر ± 10 درصدی در بارش سالانه منجر به تغییر حدود $7/8$ تا 8 درصدی در حجم رواناب گردید.

همچنین با استفاده از روش بوت استرپ با ۱۰۰۰ تکرار، فاصله اطمینان ۹۵ درصد برای میانگین حجم رواناب برابر با ۸۰۵/۳ تا ۸۶۹/۹ مترمکعب برآورد شد. این نتایج نشان می‌دهد که خروجی‌های مدل نسبت به پارامترهای کلیدی حساس هستند، اما الگوی کلی توزیع رواناب و تمایز میان پهنه‌های ساخته‌شده و پهنه‌های دارای پوشش گیاهی از پایداری نسبی برخوردار است.

پارامتر	تغییر اعمال شده	تغییر در حجم رواناب (درصد)
rc_d	+۱۰٪	+۱۳٪
rc_d	-۱۰٪	-۱۲/۵٪
بارش سالانه	+۱۰٪	+۸٪
بارش سالانه	-۱۰٪	-۷/۸٪

جدول ۲۱: تحلیل حساسیت پارامترهای کلیدی

نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که ضریب رواناب، به‌ویژه در گروه‌های خاک با نفوذپذیری پایین، یکی از پارامترهای اثرگذار بر حجم رواناب در شهر رشت است. این موضوع با شرایط کالبدی شهر نیز سازگار است؛ زیرا بخش‌های مرکزی و جنوبی که سهم بیشتری از سطوح ساخته‌شده و نفوذناپذیر دارند، در خروجی مدل نیز با حجم رواناب بالاتر و نسبت نفوذ پایین‌تر مشخص شده‌اند. همچنین حساسیت کمتر مدل نسبت به تغییرات بارش در مقایسه با ضریب رواناب نشان می‌دهد که در محدوده مطالعه، ویژگی‌های سطح زمین و نوع کاربری اراضی نقش تعیین‌کننده‌ای در تفکیک فضایی پهنه‌های پرواناب و کم‌رواناب دارند. با وجود این، به دلیل نبود داده‌های مشاهده‌ای مستقیم، از این رو نتایج این بخش به‌عنوان کنترل پایداری و سازگاری درونی مدل تفسیر می‌شود.

چارچوب اولویت‌بندی پهنه‌های مداخله طراحی شهری حساس به آب در شهر رشت بر پایه خروجی‌های مدل InVEST

بر اساس هم‌پوشانی نتایج حاصل از کاربری اراضی، NDVI، حجم رواناب، نسبت نفوذ، حجم نگهداشت آب و بار آلودگی، پهنه‌های شهر رشت از نظر نوع مداخله طراحی شهری حساس به آب قابل تفکیک هستند. در این چارچوب، پهنه‌های مرکزی و جنوبی به دلیل رواناب بالاتر، نفوذ کمتر و NDVI پایین‌تر، در اولویت مداخلات اصلاحی قرار می‌گیرند؛ در حالی که پهنه‌های غربی و شمالی به دلیل ظرفیت بالاتر نفوذ، نگهداشت آب و پوشش گیاهی، بیشتر نیازمند حفاظت و کنترل تغییر کاربری هستند. همچنین حاشیه رودخانه‌ها و مسیرهای طبیعی جریان آب، ظرفیت تبدیل شدن به کریدورهای سبز - آبی چندعملکردی را دارند. جدول شماره ۲۲، این ارتباط میان شواهد مدل، مسئله طراحی و راهبردهای پیشنهادی را برای شهر رشت خلاصه می‌کند.

برای پرهیز از ارائه توصیه‌های کلی، راهبردهای طراحی شهری حساس به آب در این پژوهش بر اساس ارتباط تحلیلی میان خروجی‌های مدل InVEST، نقشه‌های کاربری اراضی و شاخص NDVI صورت‌بندی شدند. در این چارچوب، شاخص‌هایی مانند حجم رواناب، نسبت نفوذ، حجم نگهداشت آب، بار آلودگی، وضعیت پوشش گیاهی و نوع کاربری اراضی، به‌عنوان مبنای تشخیص مسئله غالب هر پهنه مورد استفاده قرار گرفتند. بر این اساس، پهنه‌هایی که با رواناب بالاتر، نفوذ کمتر، NDVI پایین‌تر و سهم بیشتر سطوح ساخته‌شده مشخص شدند، به‌عنوان پهنه‌های نیازمند مداخله اصلاحی در نظر گرفته شدند. در مقابل، پهنه‌هایی که دارای NDVI بالاتر، ظرفیت نگهداشت آب بیشتر و نفوذپذیری مناسب‌تر بودند، به‌عنوان پهنه‌های حفاظتی و پشتیبان شبکه سبز - آبی شهر تبیین شدند. همچنین حاشیه رودخانه‌ها و مسیرهای طبیعی جریان آب به دلیل نقش بالقوه در هدایت رواناب و پیوستگی اکولوژیک، به‌عنوان پهنه‌های کریدوری مورد توجه قرار گرفتند. جدول ۲۲، این ارتباط میان شواهد مدل، مسئله طراحی شهری، ابزارهای اجرایی و راهبردهای بومی‌سازی شده برای شهر رشت را نشان می‌دهد.

طبقه‌ی ابزارهای سیاستی	پهنه هدف در شهر رشت بر پایه یافته‌های مدل	شواهد حاصل از مدل و تحلیل فضایی	مصادیق عینی و نمونه‌های اجرایی	چالش‌های پیاده‌سازی در شرایط محلی	راهبردهای بومی‌سازی مبتنی بر یافته‌های مدل
نظارتی (قانونی- برنامه‌ریزی)	کل محدوده شهر، با تأکید بر پهنه‌های مرکزی و جنوبی برای کنترل رواناب و پهنه‌های شمالی و غربی برای حفاظت	پهنه‌های مرکزی و جنوبی دارای سهم بالاتر سطوح ساخته‌شده، NDVI پایین‌تر، رواناب بیشتر و نفوذ کمتر هستند. در مقابل، پهنه‌های شمالی و غربی دارای NDVI بالاتر، پوشش گیاهی بیشتر، نگهداشت آب بالاتر و ظرفیت حفاظتی بیشتری دارند.	۱- الزام به حفظ حداقل ضریب نفوذپذیری ۰/۴ در طرح‌های تفکیک و ساختمانی ۲- ممنوعیت تغییر کاربری در پهنه‌های سبز شمالی و غربی (بر اساس نقشه آسیب‌پذیری) ۳- بازنگری طرح جامع و تفصیلی رشت با رویکرد "مدیریت در مبدأ"	۱- نبود ضمانت اجرایی کافی در نظام مهندسی و شهرداری ۲- مقاومت مالکان و سازندگان به دلیل هزینه اولیه ۳- عدم تطابق ضوابط موجود با ویژگی‌های زمین‌شناسی رشت (خاک رسی، سطح آب بالا)	۱- تدوین «دستورالعمل محلی مدیریت رواناب در مبدأ» برای رشت با همکاری شهرداری، آبفا و نظام مهندسی ۲- اعمال دوره انتقال ۳ ساله با آموزش اجباری مهندسان ۳- استفاده از ماده ۴ قانون برنامه هفتم توسعه (الزام به حفظ منابع آب و خاک) در لوایح محلی
اقتصادی و مالی	پهنه‌های مرکزی و جنوبی برای تشویق مداخله اصلاحی؛ پهنه‌های غربی و شمالی برای تشویق حفاظت از اراضی نفوذپذیر	شاخص ارزش نگهداشت آب نشان می‌دهد پهنه‌های دارای پوشش گیاهی و ظرفیت نگهداشت بیشتر، اهمیت بیشتری در حفظ خدمات اکوسیستمی دارند. پهنه‌های پررواناب و کم‌نفوذ نیازمند مشوق‌های مالی برای اصلاح سطح زمین هستند.	۱- کاهش عوارض ساختمانی به ازای هر مترمربع بام سبز یا روسازی نفوذپذیر ۲- اعطای «پاداش تراکم» در مناطق مرکزی و جنوبی در ازای جبران رواناب ۳- ایجاد صندوق «اعتبارات سبز» از محل عوارض آب‌گرفتگی	۱- کمبود منابع مالی شهرداری و وابستگی به درآمدهای ناپایدار (عوارض ساخت) ۲- عدم محاسبه منافع بلندمدت بوم‌سازگار در بودجه‌ریزی شهری ۳- نبود مدل شفاف تخصیص یارانه	۱- استخراج نقشه شاخص ارزش نگهداشت آب (مطابق جدول ۱۲ و ۱۳)، به عنوان مبنای محاسبه عوارض تشویقی ۲- پیشنهاد تشکیل «صندوق تاب‌آوری آب رشت» با مشارکت بخش خصوصی و استانداری ۳- تعریف «مالیات سبز» برای واحدهای صنعتی آلاینده (با استناد به بند «ج» تبصره ۶ قانون بودجه ۱۴۰۳)
فنی-زیرساختی بومی (LID/SuDS)	مرکز شهر، جنوب شهر، بافت‌های میانی و حاشیه رودخانه‌ها	مرکز و جنوب با رواناب بیشتر، نفوذ کمتر و NDVI پایین‌تر مشخص می‌شوند. بافت‌های میانی وضعیت متوسط دارند و قبل از تبدیل به پهنه بحرانی قابل اصلاح‌اند. حاشیه رودخانه‌ها ظرفیت شکل‌گیری کریدور سبز - آبی و کنترل رواناب آلوده را دارند.	۱- احداث باغ‌های بارانی در کنار معابر پر رواناب (مناطق مرکزی و جنوبی شهر رشت) ۲- استفاده از روسازی نفوذپذیر (بتن متخلخل، سنگفرش با درز شنی) در پیاده‌روها و پارکینگ‌ها ۳- طراحی کریدور سبز به عرض حداقل ۲۰ متر در حریم رودخانه گوهررود ۴- توسعه بام سبز گسترده در ساختمان‌های جدید بالای ۱۰۰۰ مترمربع	۱- سطح آب زیرزمینی بالای رشت (کمتر از دو متر در بسیاری از نواحی) ۲- باغ‌های بارانی ممکن است به سرعت اشباع شوند ۳- کمبود فضای باز در بافت فشرده مرکزی ۴- نبود استاندارد طراحی بومی برای بارش‌های سیلابی (بیش از ۵۰ میلی‌متر در ساعت)	۱- طراحی باغ‌های بارانی با زهکش زیرسطحی کنترل‌شده (اتصال به شبکه جمع‌آوری به صورت تأخیری) ۲- استفاده از چمن مقاوم به غرقابی و خاک بومی اصلاح شده (با شنی لومی برای افزایش نفوذ) ۳- اجرای پایلوت در دو نقطه (مثلاً بلوار امام خمینی و خیابان شریعتی یا محله‌هایی همچون پیربازار و...) با پایش مستمر

کل شهر، با تأکید بر هماهنگی میان پهنه‌های بحرانی، حفاظتی و کریدوری	نتایج مدل نشان می‌دهد مسئله رواناب در رشت فقط به یک شبکه فنی محدود نیست، بلکه با کاربری اراضی، پوشش گیاهی، رودخانه‌ها، فضاهای عمومی و شبکه زهکشی ارتباط دارد. بنابراین مدیریت آن نیازمند هماهنگی بین‌بخشی است.	۱- تشکیل کمیته دائمی مدیریت رواناب شهری رشت «با عضویت شهرداری، آبفا، محیط زیست، نظام مهندسی و جهاد کشاورزی	۱- مدیریت جزیره‌ای و موزای کاری در تمامی سطوح و سازمان‌ها	۱- استفاده از ظرفیت شورای برنامه‌ریزی و توسعه استان گیلان برای تصویب اساسنامه کمیته
نهادی-حکمرانی		۲- ایجاد «دفتر یکپارچه آب و فاضلاب شهری» برای هماهنگی زهکش سطحی و فاضلاب	۲- نبود نقشه واحد از تمامی کانال‌ها و انهار رشت	۲- تهیه «اطلس یکپارچه زیرساخت آبی رشت» با همکاری دانشگاه گیلان و سازمان GIS شهرداری
			۳- ضعف همکاری بین‌بخشی (بازتولید شده در پژوهش‌های قبلی نظیر لطیفی، ۱۳۸۳)	۳- بازتعریف وظایف مدیریت رواناب در طرح تفصیلی جدید
محللات مرکزی و جنوبی دارای رواناب بالا؛ محللات در حال تغییر؛ محدوده‌های دارای ظرفیت اجرای پروژه‌های کوچک مقیاس	بخش‌هایی از شهر که با رواناب بالا، NDVI پایین و کمبود فضای نفوذپذیر مواجه‌اند، بدون مشارکت شهروندان در نگهداری فضاهای سبز، باغچه‌های جاذب و کنترل زباله در رواناب، پایداری مداخلات را از دست می‌دهند.	۱- کمپین‌های آگاهی‌بخشی با عنوان همه با هم، رشتی بدون آب‌گرفتگی	۱- پایین بودن سواد آبی و عدم درک ارتباط فضای سبز با رواناب در بین ساکنان مناطق پرتراکم	۱- طراحی برنامه آزمایشی در ۳ محله با درگیری شدید آب‌گرفتگی (مثلاً محله یخ‌سازی، گلزار، منظره)
ترویجی- مشارکتی		۲- آموزش شهروندی برای جداسازی زباله از رواناب و نگهداری باغچه‌های جاذب	۲- بی‌اعتمادی تاریخی شهروندان به مدیریت شهری در پروژه‌های مشارکتی	۲- استفاده از ظرفیت رسانه‌های محلی (صدا و سیمای مرکز گیلان، روزنامه‌های محلی) و شبکه‌های اجتماعی
		۳- مشارکت دادن محللات در انتخاب مکان باغ راه های بارانی (طرح «محله سبز»)	۳- کمبود منابع مالی برای فعالیت‌های ترویجی مستمر	۳- ارائه مشوق غیرمالی (تندیس محله سبز، تخفیف عوارض سالانه) به خانوارهای مشارکت‌کننده

۵. بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات کاربری اراضی و کاهش پوشش گیاهی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، ساختار کالبدی و اکولوژیک شهر رشت را به گونه‌ای دگرگون کرده که ظرفیت بالقوه نفوذ، نگهداشت آب و تنظیم رواناب در بخش‌هایی از شهر تضعیف شده است. در این پژوهش، تحلیل LULC و NDVI برای شناسایی روند تاریخی تغییرات پوشش زمین به کار رفت، در حالی که مدل‌سازی InVEST برای ارزیابی وضعیت هیدرولوژیک پایه در سال ۲۰۲۴ انجام شد. بنابراین، نتایج مدل به عنوان بازسازی مستقیم تغییرات رواناب در کل دوره تاریخی تفسیر نمی‌شوند، بلکه نشان می‌دهند ساختار کالبدی و پوشش گیاهی موجود در سال ۲۰۲۴ چه الگوی فضایی از رواناب، نفوذ، نگهداشت آب و بار آلودگی ایجاد کرده است.

از نظر نظری، نتایج پژوهش نشان می‌دهد که طراحی شهری حساس به آب را می‌توان به عنوان حلقه اتصال میان مدل‌سازی هیدرولوژیک، تحلیل خدمات اکوسیستمی و تصمیم‌سازی فضایی در نظر گرفت. در این چارچوب، شاخص‌هایی مانند حجم رواناب، نسبت نفوذ، حجم نگهداشت آب، NDVI و بار آلودگی فقط متغیرهای فنی نیستند، بلکه می‌توانند به معیارهای تشخیص مسئله طراحی شهری تبدیل شوند. بر این اساس، پژوهش حاضر نشان می‌دهد که مدل InVEST می‌تواند فراتر از یک ابزار برآورد رواناب، به عنوان ابزار پشتیبان تصمیم برای اولویت‌بندی پهنه‌های مداخله طراحی شهری حساس به آب مورد استفاده قرار گیرد. این نکته، جایگاه مقاله را در ادبیات میان‌رشته‌ای هیدرولوژی شهری، برنامه‌ریزی فضایی و طراحی شهری تقویت می‌کند.

تحلیل سری زمانی نقشه‌های کاربری و پوشش زمین نشان داد که طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، مساحت مناطق ساخته‌شده از ۴۱/۳ به ۶۳/۵ کیلومتر مربع افزایش یافته، در حالی که پوشش گیاهی از ۴۶/۹ به ۲۱/۷ کیلومتر مربع کاهش یافته است. معناداری این

روندها با آزمون من-کندال در سطح ۰/۰۵ تأیید شد. این تغییرات بیانگر جایگزینی تدریجی سطوح نفوذپذیر با سطوح سخت شهری و کاهش ظرفیت طبیعی شهر در نفوذ و نگهداشت آب بارش است. یافته‌های مدل InVEST نشان داد که پهنه‌های ساخته‌شده متراکم، به‌ویژه در نواحی مرکزی و جنوبی رشت، دارای بیشترین حجم رواناب و کمترین ظرفیت نفوذ و ذخیره آب هستند؛ در مقابل، اراضی دارای پوشش گیاهی و کاربری‌های کشاورزی بیشترین توان نگهداشت و نفوذ آب را نشان می‌دهند. این نتایج با مطالعات پیشین درباره نقش تغییر کاربری اراضی در افزایش سطوح نفوذناپذیر، کاهش نفوذپذیری و تشدید رواناب شهری همخوان است. یکی از یافته‌های اصلی پژوهش، رابطه معنادار میان کاهش NDVI و افزایش رواناب و بار آلودگی است. تحلیل نقشه‌های NDVI نشان داد که پوشش سبز شهر، به‌ویژه در هسته مرکزی و شمالی، دچار خردشدگی و گسست فضایی شده است. نتایج همبستگی پیرسون نیز وجود رابطه منفی قوی میان NDVI و حجم رواناب و همچنین رابطه منفی معنادار میان NDVI و بار آلودگی نترات را تأیید کرد. این امر نشان می‌دهد که کاهش پوشش گیاهی علاوه بر افزایش رواناب، در تشدید انتقال آلاینده‌ها به منابع آب سطحی نیز نقش دارد. تحلیل‌های آماری نیز تفاوت معنادار میان طبقات کاربری را تأیید کردند. نتایج ANOVA و آزمون تعقیبی Tukey نشان داد که مناطق ساخته‌شده به‌طور معناداری بیشترین حجم رواناب و بار آلودگی نترات را دارند، در حالی که پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی بیشترین ظرفیت نفوذ و ذخیره آب را فراهم می‌کنند. همچنین، مدل رگرسیون خطی چندگانه نشان داد که ضریب رواناب rc_d درصد سطح ساخته‌شده و NDVI مهم‌ترین عوامل تبیین‌کننده حجم رواناب در شهر رشت هستند و در مجموع بیش از ۹۰ درصد تغییرات آن را توضیح می‌دهند. در این میان، rc_d با ضریب استانداردشده ۰/۶۲ بیشترین اثر را داشته و حساسیت بالای رواناب شهری به نفوذپذیری خاک و سطوح شهری را نشان می‌دهد.

نتایج تحلیل حساسیت نیز این موضوع را تأیید کرد؛ به‌طوری‌که تغییر ۱۰ درصدی در rc_d منجر به تغییر حدود ۱۳ درصدی در حجم رواناب شد. از نظر اعتمادپذیری نتایج، باید میان «اعتبارسنجی مشاهده‌ای کامل» و «کنترل سازگاری و پایداری خروجی‌ها» تفاوت قائل شد. در پژوهش حاضر، به دلیل نبود داده‌های مشاهده‌ای پیوسته از رواناب شهری و داده‌های هیدرومتری در مقیاس درون‌شهری، امکان کالیبراسیون کامل مدل فراهم نبود. با این حال، چندین کنترل مکمل برای ارزیابی قابلیت اتکای نتایج انجام شد. نخست، ورودی اصلی مدل یعنی نقشه کاربری اراضی با صحت کلی و ضریب کاپای قابل قبول ارزیابی شد. دوم، خروجی‌های مدل از نظر جهت و شدت رابطه با متغیرهای مستقل مانند درصد سطوح ساخته‌شده و NDVI از طریق همبستگی و رگرسیون بررسی شدند. سوم، تحلیل حساسیت نشان داد که اگرچه خروجی حجم رواناب نسبت به تغییر ضریب رواناب حساس است، اما الگوی کلی تمایز میان پهنه‌های ساخته‌شده و پهنه‌های دارای پوشش گیاهی پایدار باقی می‌ماند. بنابراین، نتایج مدل برای هدف اصلی این پژوهش، یعنی مقایسه نسبی پهنه‌ها و اولویت‌بندی مداخلات طراحی شهری حساس به آب، قابل استفاده است؛ هرچند برای برآورد دقیق دبی لحظه‌ای یا طراحی سازه‌ای شبکه زهکشی، داده‌های مشاهده‌ای و مدل‌های کالیبره‌شده تکمیلی ضروری خواهد بود. یکی دیگر از جنبه‌های مهم پژوهش حاضر، بررسی بار آلودگی نترات و ظرفیت جلوگیری از آلودگی توسط پوشش گیاهی بود. نتایج نشان داد که بیش از ۷۰ درصد بار آلودگی نترات شهر از مناطق ساخته‌شده منشأ می‌گیرد. در مقابل، پهنه‌های دارای پوشش گیاهی متراکم و اراضی کشاورزی با مدیریت مناسب توانسته‌اند سهم قابل توجهی در کاهش و جلوگیری از انتقال آلودگی داشته باشند. نقشه‌های Avoided Pollutant Load نشان داد که نواحی غربی و شمالی شهر، که دارای NDVI بالا و پوشش گیاهی متراکم هستند، بیشترین نقش را در جلوگیری از ورود آلاینده‌ها به منابع آبی ایفا می‌کنند. این موضوع اهمیت حفاظت از فضاهای سبز شهری و حاشیه‌های طبیعی را در ارتقای کیفیت آب شهری نشان می‌دهد. نتایج شاخص‌های Retention و Retention Volume نیز نشان داد که توزیع ظرفیت ذخیره آب در شهر رشت بسیار نابرابر است. مناطق دارای پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی، با وجود اشغال بخش محدودی از مساحت شهر، سهم عمده‌ای از ذخیره و ارزش اقتصادی آب را به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل،

مناطق ساخته شده متراکم با وجود سهم فضایی بالا، کمترین ظرفیت ذخیره آب را دارند. شاخص ارزش نگهداشت آب در این پژوهش نشان داد که پهنه‌های دارای ظرفیت بالاتر ذخیره آب، از نظر خدمات اکوسیستمی نیز اهمیت بیشتری دارند. با این حال، به دلیل نبود داده‌های محلی دقیق درباره هزینه‌های واقعی مدیریت رواناب، خسارت‌های آب‌گرفتگی و هزینه اجرای زیرساخت سبز در رشت، نتایج این شاخص به صورت شاخص نسبی ارزش نگهداشت آب تفسیر نشد. بنابراین، Retention Value در این مقاله بیشتر به عنوان شاخصی تکمیلی برای مقایسه نسبی پهنه‌ها و پشتیبانی از اولویت‌بندی طراحی شهری مورد استفاده قرار گرفت. این یافته‌ها بیانگر آن است که حفاظت و احیای فضاهای سبز نه تنها از منظر زیست‌محیطی، بلکه از دیدگاه اقتصادی نیز ضروری است. یافته‌های این پژوهش از نظر جهت کلی اثرات، با بخش مهمی از ادبیات هیدرولوژی شهری همسو است؛ زیرا مطالعات پیشین نیز نشان داده‌اند که گسترش سطوح نفوذناپذیر و کاهش پوشش گیاهی معمولاً به افزایش رواناب، کاهش نفوذ و تشدید فشار بر شبکه زهکشی شهری منجر می‌شود. با این حال، اهمیت نتایج حاضر در تأیید دوباره این رابطه شناخته شده خلاصه نمی‌شود، بلکه در نشان دادن شدت، توزیع فضایی و پیامدهای چندگانه آن در ساختار شهری رشت است. نتایج مدل InVEST و تحلیل‌های آماری نشان داد که افزایش سطوح ساخته شده در رشت به صورت یکنواخت بر کل شهر اثر نگذاشته، بلکه در پهنه‌های مرکزی و جنوبی با تمرکز بیشتری همراه بوده و هم‌زمان با کاهش NDVI، افت نسبت نفوذ، کاهش ظرفیت نگهداشت آب و افزایش بار آلودگی ظاهر شده است. بنابراین، مسئله رواناب در رشت صرفاً پیامد افزایش سطح ساخته شده نیست، بلکه نتیجه تضعیف هم‌زمان شبکه سبز - آبی، خردشدگی پوشش گیاهی و کاهش عملکرد اکولوژیک فضاهای باز شهری است. از منظر طراحی شهری حساس به آب، این یافته اهمیت ویژه‌ای دارد؛ زیرا نشان می‌دهد خروجی‌های مدل نباید فقط به عنوان نقشه‌های توصیفی رواناب یا نفوذ تفسیر شوند، بلکه می‌توانند مبنای تصمیم‌سازی فضایی برای تعیین نوع و مکان مداخله طراحی قرار گیرند. بر این اساس، پهنه‌های مرکزی و جنوبی که با رواناب بالا، نفوذ پایین و بار آلودگی بیشتر مشخص می‌شوند، باید در اولویت بازطراحی سطوح سخت، توسعه کف‌سازی نفوذپذیر، باغ‌های بارانی، نوارهای زیستی، فضاهای تأخیری و مداخلات خردمقیاس در معابر و فضاهای عمومی قرار گیرند. در مقابل، پهنه‌های غربی و شمالی که ظرفیت بیشتری برای نفوذ، نگهداشت آب و کاهش آلودگی دارند، باید نه به عنوان ذخیره توسعه کالبدی، بلکه به عنوان زیرساخت سبز - آبی موجود و دارای نقش حفاظتی در چرخه آب شهری رشت در نظر گرفته شوند. از این منظر، سهم پژوهش حاضر در تبدیل یک رابطه عمومی و شناخته شده هیدرولوژیک به چارچوبی مکانی و طراحی محور برای اولویت‌بندی مداخلات طراحی شهری حساس به آب است. بر اساس نتایج پژوهش، پهنه‌های مرکزی و جنوبی رشت به دلیل تمرکز سطوح سخت، کاهش ظرفیت نفوذ و فشار بالاتر بر چرخه هیدرولوژیک شهری، به عنوان اولویت‌های اصلی مداخله طراحی شناسایی می‌شوند. از این رو، مداخلاتی مانند کف‌سازی نفوذپذیر، باغ‌های بارانی، نوارهای سبز جاذب رواناب، حوضچه‌های تأخیری و خیابان‌های سبز باید پیش از سایر نواحی در این پهنه‌ها متمرکز شوند. در مقابل، پهنه‌های غربی و شمالی شهر به دلیل برخورداری از پوشش گیاهی بیشتر، ظرفیت بالاتری در کاهش رواناب، افزایش نفوذ و کاهش بار آلودگی دارند. بنابراین، این نواحی نباید صرفاً به عنوان ذخیره توسعه آتی تلقی شوند، بلکه باید به عنوان زیرساخت سبز - آبی موجود و ارزشمند برای حفظ تعادل اکولوژیک و کنترل رواناب شهری مورد حفاظت قرار گیرند. این تفسیر با دیدگاه Meng همسو است که کارایی مداخلات WSUD را وابسته به فعال‌سازی فرآیندهایی مانند نفوذ، ذخیره موقت، تبخیر - تعرق و تصفیه طبیعی در مقیاس سایت و محله می‌داند. همچنین، کاهش پیوستگی پوشش گیاهی و خردشدگی لکه‌های سبز نشان می‌دهد که راهبردهای WSUD در رشت باید فراتر از افزایش سطح فضای سبز تعریف شوند. بر اساس دیدگاه Kuller و همکاران، طراحی شهری حساس به آب باید به عنوان بخشی از فرم شهری در خیابان‌ها، فضاهای عمومی، پارک‌ها، حاشیه رودخانه‌ها و شبکه پیاده ادغام شود. بنابراین، راهبردهای پیشنهادی باید بر اتصال لکه‌های سبز، بازطراحی سطوح سخت، احیای مسیرهای طبیعی زهکشی و تبدیل حاشیه رودخانه‌ها به کریدورهای سبز - آبی متمرکز باشند. در مجموع، یافته‌ها با ادبیات جهانی WSUD همخوان

است و نشان می‌دهد که در شهر پربارش رشت، مدیریت رواناب نباید بر دفع سریع آب متکی باشد. راهبرد مناسب برای این شهر، حرکت به سوی نگهداشت، نفوذ، تصفیه طبیعی و استفاده طراحی محور از آب در فضای عمومی است؛ رویکردی که می‌تواند هم‌زمان به کاهش رواناب، کاهش آلودگی، افزایش تاب‌آوری شهری و ارتقای کیفیت محیط شهری کمک کند. بر این اساس، نتایج مدل INVEST و جدول شماره ۲۲ در این پژوهش می‌تواند مبنایی برای تبدیل تحلیل‌های کمی به تصمیم‌های طراحی شهری باشد. به بیان دیگر، نقشه‌های رواناب، نفوذ، بار آلودگی و ذخیره آب، تنها خروجی‌های تحلیلی نیستند، بلکه می‌توانند به نقشه‌های راهنمای مداخله طراحی تبدیل شوند. پهنه‌هایی که دارای رواناب بالا و نفوذ پایین هستند، باید به‌عنوان پهنه‌های بازطراحی سطوح سخت و توسعه زیرساخت سبز-آبی شناسایی شوند؛ پهنه‌هایی که پوشش گیاهی و ظرفیت ذخیره بالاتری دارند، باید به‌عنوان پهنه‌های حفاظت اکولوژیک و کنترل توسعه کالبدی در نظر گرفته شوند؛ و حاشیه رودخانه‌ها و مسیرهای زهکشی نیز باید به‌عنوان ستون فقرات شبکه سبز-آبی شهر رشت بازتعریف شوند.

۶. نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که مسئله رواناب شهری در رشت را نمی‌توان صرفاً به‌عنوان پیامد مستقیم افزایش سطوح نفوذناپذیر تفسیر کرد؛ هرچند این رابطه در ادبیات هیدرولوژی شهری پیش‌تر به‌خوبی شناخته شده است. یافته اصلی پژوهش حاضر آن است که توسعه کالبدی شهر رشت، از طریق کاهش پوشش گیاهی، افت NDVI، کاهش ظرفیت نفوذ و نگهداشت آب و افزایش بار آلودگی، الگوی فضایی نابرابری از فشار هیدرولوژیک ایجاد کرده است. این الگو در پهنه‌های مرکزی و جنوبی شهر با شدت بیشتری بروز یافته و در مقابل، پهنه‌های غربی و شمالی هنوز بخشی از ظرفیت اکولوژیک شهر برای نفوذ، ذخیره و کاهش آلودگی را حفظ کرده‌اند. بنابراین، ارزش اصلی پژوهش در اثبات دوباره رابطه میان سطح سخت و رواناب نیست، بلکه در تبدیل این رابطه به چارچوبی فضایی و طراحی محور برای شناسایی پهنه‌های اولویت‌دار مداخله طراحی شهری حساس به آب در شهر رشت است

لازم به تأکید است که در این پژوهش، تغییرات کاربری اراضی و NDVI برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ تحلیل شده، اما مدل‌سازی رواناب برای وضعیت پایه سال ۲۰۲۴ انجام شده است. بنابراین، نتایج INVEST بیانگر الگوی فضایی وضعیت فعلی شهر از نظر رواناب، نفوذ، نگهداشت آب و بار آلودگی است و نباید به‌عنوان شبیه‌سازی مستقیم روند زمانی رواناب در کل دوره مورد مطالعه تفسیر شود.

بر اساس نتایج مدل‌سازی، طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ مساحت اراضی ساخته‌شده رشت از ۴۱/۲۸ به ۶۳/۴۸ کیلومتر مربع افزایش یافته و پوشش گیاهی طبیعی از ۴۶/۸۹ به ۲۱/۷۱ کیلومتر مربع کاهش یافته است. این روند بیانگر کاهش ظرفیت اکولوژیک، نفوذپذیری و ذخیره آب در شهر و حرکت آن به‌سوی ساختاری متراکم‌تر، سخت‌تر و کم‌نفوذتر است. تمرکز این تغییرات در پهنه‌های مرکزی و جنوبی نیز نشان می‌دهد که دگرگونی کاربری اراضی در رشت از نظر فضایی یکنواخت نبوده و عمدتاً در محدوده‌هایی رخ داده که بیشترین فشار هیدرولوژیک را تجربه می‌کنند. در پاسخ به سؤال نخست پژوهش، روند غالب تغییرات کاربری اراضی در رشت، افزایش سطوح ساخته‌شده و کاهش پوشش گیاهی بوده است. این تغییر تنها به معنای گسترش ساخت‌وساز نیست، بلکه نشان‌دهنده کاهش اراضی دارای قابلیت نفوذ، ذخیره و تبخیر-تعرق و در نتیجه تضعیف زیرساخت سبز-آبی طبیعی شهر است. در پاسخ به سؤال دوم، نتایج مدل INVEST نشان داد که افزایش سطوح سخت و کاهش پوشش گیاهی موجب افزایش رواناب، کاهش نفوذ و افزایش بار آلودگی نیترات شده است. حجم رواناب در پهنه‌های ساخته‌شده مرکزی و جنوبی به حداکثر ۸۹۹/۷۷ مترمکعب در سال برای هر سلول ۳۰×۳۰ متر می‌رسد، در حالی که در پهنه‌های سبز غرب و شمال شهر حدود ۴۷۷/۵۵ مترمکعب است. همچنین نسبت نفوذ در بخش عمده اراضی ساخته‌شده کمتر از ۰/۱ و در پهنه‌های دارای پوشش گیاهی بیش از ۰/۲۵ است. دامنه بار آلودگی نیترات نیز

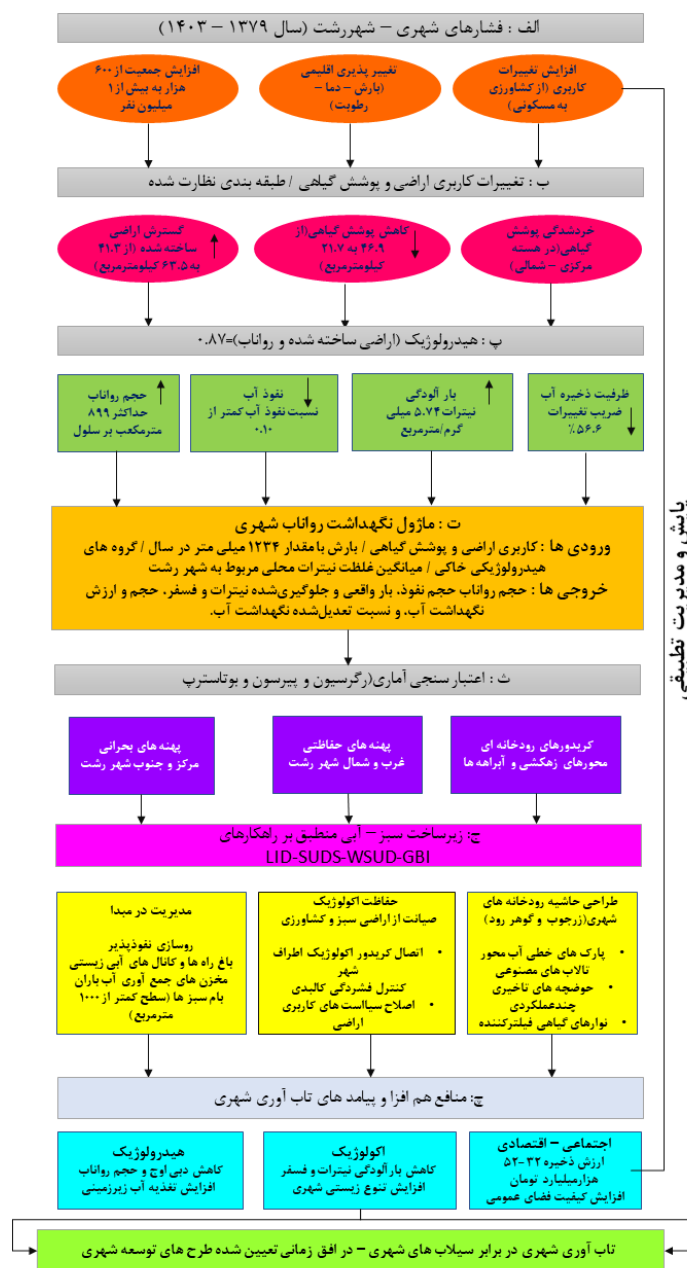
بین ۰/۰۷۵۵ تا ۵/۷۴۳ میلی گرم بر مترمربع متغیر است که نشان دهنده تفاوت آشکار عملکرد هیدرولوژیک و زیست محیطی پهنه‌های شهری است. در پاسخ به سؤال سوم، همپوشانی نقشه‌های رواناب، نفوذ، بار آلودگی و کاربری اراضی نشان داد که پهنه‌های مرکزی و جنوبی رشت بحرانی‌ترین محدوده‌ها از نظر تولید رواناب، کاهش نفوذ و تمرکز آلودگی هستند. در مقابل، پهنه‌های غربی و شمالی به دلیل برخورداری از پوشش گیاهی، اراضی باز و ظرفیت بالاتر ذخیره و نفوذ، به‌عنوان پهنه‌های حفاظتی و پشتیبان اکولوژیک شهر قابل تفسیرند. تحلیل‌های آماری نیز این الگو را تأیید می‌کند؛ به‌گونه‌ای که اراضی ساخته‌شده بیشترین رواناب و آلودگی و کمترین ظرفیت نفوذ را دارند، در حالی که پوشش گیاهی و اراضی کشاورزی عملکرد هیدرولوژیک مناسب‌تری نشان می‌دهند. همچنین، همبستگی مثبت میان سطوح ساخته‌شده و رواناب و همبستگی منفی میان NDVI و رواناب نشان می‌دهد که کاهش اثر سطوح سخت، افزایش پوشش گیاهی، تقویت نفوذپذیری و حفاظت از لکه‌های سبز، مهم‌ترین متغیرهای قابل مداخله در رشت هستند. بر این اساس، چارچوب پیشنهادی پژوهش بر تبدیل خروجی‌های مدل InVEST و شاخص NDVI به راهبردهای طراحی شهری حساس به آب استوار است. در این چارچوب، نقشه‌های رواناب، نفوذ، بار آلودگی، ذخیره آب و NDVI به‌عنوان نقشه‌های راهنمای مداخله عمل می‌کنند و مبنای شناسایی پهنه‌های بحرانی و حفاظتی، اولویت‌بندی مداخله، تعیین نوع راهبرد متناسب با هر پهنه، تبدیل آن‌ها به پروژه‌های اجرایی در مقیاس خیابان، محله و کریدور رودخانه‌ای و پایش اثر مداخلات قرار می‌گیرند. در پهنه مرکزی رشت، راهبرد اصلی بازطراحی سطوح سخت و افزایش نفوذپذیری درون‌بافتی است. به دلیل تراکم ساخت‌وساز و کمبود فضای باز، مداخلات باید خردمقیاس و قابل ادغام در بافت موجود باشند؛ مانند کف‌سازی نفوذپذیر، باغ‌های بارانی کوچک، نوارهای زیستی حاشیه خیابان، مخازن زیرسطحی جمع‌آوری آب باران و مدیریت آب باران در ساختمان‌های عمومی و تجاری. در پهنه جنوبی، راهبرد مناسب ایجاد ظرفیت ذخیره و تأخیر رواناب در مقیاس محله‌ای است. پارک‌های خطی آب‌محور، فضاهای سبز فرورفته، حوضچه‌های تأخیری، زمین‌های بازی چندعملکردی و مسیرهای سبز پیاده می‌توانند در شرایط عادی کیفیت فضای عمومی را ارتقا دهند و در زمان بارش شدید فشار بر شبکه زهکشی را کاهش دهند. در پهنه‌های غربی و شمالی، راهبرد اصلی حفاظت فعال و اتصال اکولوژیک است. باغات، شالیزارهای باقی‌مانده، لکه‌های سبز و حاشیه‌های گیاهی این بخش‌ها باید به‌عنوان زیرساخت سبز-آبی طبیعی شهر حفظ شوند. کنترل تغییر کاربری، جلوگیری از خردشدگی لکه‌های سبز، اتصال کریدورهای اکولوژیک، حفظ خاک نفوذپذیر و محدودسازی توسعه سطوح سخت در این پهنه‌ها اولویت دارد. حاشیه رودخانه‌ها، آبراهه‌ها و مسیرهای طبیعی زهکشی نیز باید به‌عنوان ستون فقرات شبکه سبز-آبی رشت بازتعریف شوند. تبدیل این فضاها به کریدورهای چندعملکردی از طریق پارک‌های خطی، نوارهای گیاهی فیلترکننده، تالابچه‌های مصنوعی، مسیرهای پیاده و دوچرخه و آزادسازی حریم عملکردی رودخانه‌ها می‌تواند هم‌زمان به کنترل رواناب، کاهش آلودگی و ارتقای کیفیت فضای عمومی کمک کند. در مجموع، مداخلات طراحی شهری حساس به آب در رشت باید در سه مقیاس خرد، محله‌ای و شهری دنبال شوند. در مقیاس خرد، باغ بارانی، کف‌سازی نفوذپذیر، مخازن جمع‌آوری آب باران و نوارهای سبز کنار معبر؛ در مقیاس محله‌ای، خیابان‌های سبز، پارک‌های فرورفته و فضاهای باز چندعملکردی؛ و در مقیاس شهری، کریدورهای رودخانه‌ای، کمربند سبز-آبی غربی و شمالی، حفاظت از اراضی نفوذپذیر و اتصال لکه‌های سبز پیشنهاد می‌شود. این رویکرد مدیریت رواناب را از مجموعه‌ای اقدامات پراکنده به شبکه‌ای پیوسته در ساختار طراحی شهری رشت تبدیل می‌کند.

با وجود یافته‌های ارزشمند، پژوهش حاضر دارای محدودیت‌هایی نیز بوده است. مهم‌ترین محدودیت، همچنین، در بخش ارزش نگهداشت آب، نبود داده‌های محلی دقیق درباره هزینه‌های واقعی اجرای زیرساخت سبز، هزینه‌های نگهداری، خسارت‌های ناشی از آب‌گرفتگی و ارزش اقتصادی خدمات اکوسیستمی در شهر رشت، موجب شد نتایج Retention Value به‌صورت شاخصی نسبی و سناریومحور تفسیر شود. از این رو، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، ارزش‌گذاری اقتصادی نگهداشت رواناب بر پایه داده‌های محلی و سناریوهای هزینه - فایده دقیق‌تر انجام گیرد.

همچنین، نبود اطلاعات تفصیلی درباره تعداد نمونه‌ها، پراکنش مکانی و خطای درون‌یابی داده‌های نیتروژن/نیترات و فسفر موجب شد خروجی‌های مربوط به بار آلودگی به‌صورت برآورد مدل‌محور و نسبی تفسیر شوند. بنابراین، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، نمونه‌برداری میدانی منظم از آلاینده‌های رواناب در مقیاس محله‌ای و در نقاط مختلف شبکه زهکشی شهری رشت انجام شود تا امکان اعتبارسنجی دقیق‌تر خروجی‌های آلودگی فراهم گردد.

همچنین استفاده از نقشه جهانی گروه‌های هیدرولوژیک خاک، محدودیت تفکیک مکانی داده‌های بارش و نبود اطلاعات دقیق از ظرفیت و ساختار شبکه زهکشی شهری می‌تواند بر دقت خروجی‌ها اثرگذار باشد. برای کاهش این عدم قطعیت‌ها، در پژوهش حاضر دقت نقشه‌های کاربری اراضی ارزیابی شد، روابط آماری میان خروجی‌های مدل و متغیرهایی مانند NDVI و درصد سطوح ساخته‌شده بررسی گردید و تحلیل حساسیت و بوت‌استرپ برای کنترل پایداری نتایج انجام شد. با این حال، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، داده‌های مشاهده‌ای مربوط به عمق و گستره آب‌گرفتگی، دبی رواناب، ظرفیت شبکه زهکشی، ویژگی‌های ریزمقیاس خاک و عملکرد واقعی مداخلات سبز-آبی در مدل وارد شود تا امکان کالیبراسیون و اعتبارسنجی میدانی دقیق‌تر فراهم گردد.

در مجموع، این پژوهش نشان می‌دهد که مدیریت پایدار رواناب در شهر رشت مستلزم پیوند میان مدل‌سازی هیدرولوژیک، تحلیل تغییرات کاربری اراضی، سنجش پوشش گیاهی و طراحی شهری حساس به آب است. ارزش اصلی پژوهش در تبدیل خروجی‌های کمی و مکانی مدل InVEST به راهبردهای طراحی شهری نهفته است؛ به‌گونه‌ای که برای هر پهنه شهر، نوع مداخله متناسب با ویژگی‌های هیدرولوژیک و اکولوژیک آن تعیین می‌شود. بر این اساس، در مرکز شهر بازطراحی سطوح سخت و افزایش نفوذپذیری، در جنوب ایجاد فضاهای ذخیره و تأخیر رواناب، در غرب و شمال حفاظت و اتصال زیرساخت سبز-آبی، و در حاشیه رودخانه‌ها شکل‌دهی کریدورهای سبز-آبی چندعملکردی پیشنهاد می‌شود. این چارچوب می‌تواند مبنایی برای بازنگری در طرح‌های توسعه شهری، ضوابط طراحی، پروژه‌های بازآفرینی، طراحی فضاهای عمومی و برنامه‌های مدیریت آب‌های سطحی رشت باشد. شکل ۱۷ چارچوب مفهومی یکپارچه پژوهش را از محرک‌های ساختاری تا راهبردهای طراحی شهری سازمان‌دهی می‌کند. در این مدل، شهرنشینی شتابان، تغییرپذیری اقلیمی و تغییر کاربری اراضی به‌عنوان محرک‌های اصلی، به افزایش ۲۲/۲ کیلومترمربعی اراضی ساخته‌شده، کاهش ۲۴/۸ کیلومترمربعی پوشش گیاهی و خردشدگی لکه‌های سبز در رشت منجر شده‌اند. این تحولات کالبدی با پاسخ‌های هیدرولوژیک معناداری همراه بوده‌اند؛ به‌گونه‌ای که همبستگی مثبت میان سطح ساخته‌شده و حجم رواناب و همبستگی منفی میان NDVI و حجم رواناب، نقش ساختار کالبدی و پوشش گیاهی را در تولید رواناب تأیید می‌کند. در هسته روش‌شناختی این چارچوب، ماژول Urban Stormwater Retention مدل InVEST با ورودی‌هایی مانند کاربری اراضی، بارش GPM، گروه‌های هیدرولوژیک خاک و مقادیر محلی EMC، شاخص‌های رواناب، نفوذ، نگهداشت آب و بار آلودگی را در مقیاس سلولی ۳۰×۳۰ متر برآورد کرده است. نتایج آماری و مکانی، سه نوع پهنه اصلی را مشخص می‌کند: پهنه‌های بحرانی مرکز و جنوب، پهنه‌های حفاظتی غرب و شمال، و کریدورهای رودخانه‌ای به‌عنوان محورهای اکولوژیک شهر. بر این اساس، راهبردهای زیرساخت سبز-آبی در سه سطح تعریف می‌شوند: مدیریت رواناب در مبدأ برای پهنه‌های بحرانی، حفاظت اکولوژیک برای پهنه‌های دارای ظرفیت طبیعی، و طراحی حاشیه رودخانه‌ها به‌عنوان کریدورهای چندعملکردی. پیامد این راهبردها، تقویت هم‌زمان منافع هیدرولوژیک، اکولوژیک و اجتماعی-اقتصادی است. در نهایت، هدف چارچوب پیشنهادی، افزایش تاب‌آوری شهری رشت در برابر سیلاب از طریق اجرای رویکرد WSUD و شکل‌دهی شبکه یکپارچه زیرساخت سبز-آبی است؛ شبکه‌ای که نیازمند پایش مستمر و مدیریت تطبیقی در فرایند توسعه شهری است.



شکل ۱۷ : چارچوب مفهومی یکپارچه پژوهش: زنجیره علی از فشارهای شهری تا تاب آوری در برابر سیلاب در شهر رشت (۱۳۷۹-۱۴۰۳)

در شکل شماره ۱۸ ساختار پیشنهادی مداخلات WSUD را در سه مقیاس سایت و معبر، محله و شهر نشان می‌دهد. در این ساختار، هر مقیاس به‌عنوان لایه‌ای مکمل عمل کرده و در مجموع، شبکه‌ای پیوسته از زیرساخت سبز-آبی را در شهر رشت شکل می‌دهد. این سازمان‌دهی سه‌سطحی با منطق «زنجیره مدیریت آب از مبدأ تا مقصد» در SuDS، اصل «کنترل در مبدأ» در LID و الگوی جذب، ذخیره و تأخیر رواناب در رویکرد شهر اسفنجی همخوان است. در مقیاس سایت و معبر، تمرکز اصلی بر کنترل رواناب در مبدأ است. روسازی نفوذپذیر، باغ‌های بارانی، کانال‌های زیستی، بام سبز گسترده و مخازن زیرسطحی می‌توانند از طریق افزایش نفوذ، ذخیره موقت رواناب، کاهش سرعت انتقال جریان، کاهش بار آلاینده‌هایی مانند نیترات و تعدیل دبی اوج، بخشی از عملکرد طبیعی

چرخه آب را در بافت شهری بازآفرینی کنند. این مداخلات به‌ویژه در بافت‌های متراکم مرکزی رشت، که با کمبود فضای سبز سطحی مواجه‌اند، اهمیت بیشتری دارند. در مقیاس محله‌ای، مداخلات باید بر ایجاد ظرفیت ذخیره و تأخیر رواناب در فضاهای عمومی و شبکه معابر متمرکز شوند. حوضچه‌های تأخیری چندعملکردی در پهنه‌های جنوبی رشت می‌توانند در شرایط عادی به‌عنوان فضای عمومی و تفریحی عمل کرده و در زمان بارش شدید، بخشی از رواناب محله را ذخیره و کنترل کنند. همچنین، کریدورهای خیابان سبز با ترکیب کانال‌های زیستی، درختان تاج‌پوش و نوارهای نفوذپذیر، زنجیره‌ای پیوسته برای انتقال، نفوذ تدریجی و پالایش اولیه رواناب در امتداد معابر ایجاد می‌کنند. در مقیاس شهری، مداخلات کلان‌مقیاس با هدف تقویت پیوستگی اکولوژیک و عملکردی شبکه سبز-آبی تعریف می‌شوند. پارک خطی رودخانه‌ای در امتداد گوهررود می‌تواند محور اصلی استقرار WSUD در رشت باشد و حاشیه‌های آبی را به فضاهای عمومی چندعملکردی تبدیل کند. تالاب‌های مصنوعی در نقاط تجمع رواناب نیز ضمن ذخیره و تنظیم جریان، به پالایش طبیعی آلاینده‌هایی مانند نیترات و فسفر و تقویت تنوع زیستی کمک می‌کنند. در نهایت، اتصال لکه‌های سبز غرب و شمال شهر از طریق کریدورهای اکولوژیک، پیوستگی فضایی زیرساخت سبز-آبی را تقویت کرده و تاب‌آوری هیدرولوژیک و اکولوژیک رشت را افزایش می‌دهد.



شکل ۱۸. ساختار سه‌لایه مداخله طراحی شهری حساس به آب و گونه‌شناسی زیرساخت سبز-آبی در شهر رشت، منطبق با چارچوب‌های WSUD، LID، SuDS و شهر اسفنجی.

منابع

۱. عینلو، فاطمه، سلاجقه، علی، ملکیان، آرش، و احدنژاد، محسن. (۱۳۹۷). اثر تغییر کاربری اراضی و توسعه شهری بر دبی پیک رواناب (مطالعه موردی: آبخیز شهری زنجان). نشریه علمی-پژوهشی مرتع و آبخیزداری، ۷۱(۱)، ۲۰۵-۲۲۱. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2018.137128.938>
۲. فروتن، سحر، ایلدرمی، علیرضا، نوری، حمید، و صفری‌شاد، مهتاب. (۱۳۹۸). تأثیر تغییر کاربری اراضی و توسعه فیزیکی شهر بر تغییرات رواناب سیلاب شهری با استفاده از روش NRCS-CN (مطالعه موردی: شهر اسدآباد). هیدروژئومورفولوژی، ۶(۲۰)، ۲۰-۲۱. [20.1001.1.23833254.1398.6.20.1.4](https://doi.org/10.1001.1.23833254.1398.6.20.1.4)

۳. ویسی نبی کندی، بهمن، راست خدیو، آرمان و شجاع، فائزه. (۱۴۰۳). مدل سازی تأثیر تغییر کاربری اراضی/پوشش زمین بر تاب آوری اکولوژیک شهری در برابر سیلاب (مطالعه شهر رشت). نشریه محیط زیست طبیعی. 385-400, 77(3), doi: 10.22059/jne.2024.382160.2710
۴. وفاخواه، مهدی، جوادی، محمدرضا و نجفی مجد، جوانشیر. (۱۳۹۴). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر مقدار رواناب در حوضه آبخیز چالوس رود. مجله اکوهیدرولوژی 10.22059/ije.2015.56160, 2(2), 211-220. doi: 10.22059/ije.2015.56160
۵. ایزدی فرد، هادی، راثی نظامی، سعید، مصطفی زاده، رئوف، و خاوریان، حسن. (۱۴۰۲). ارتباط تغییر ضریب رواناب سطحی با تغییر کاربری/پوشش اراضی حوضه سامیان استان اردبیل. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۵۱(۱)، ۲۴-۴۱. <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.373960.0>
۶. خوش‌روش، مجتبی، رائینی، محمود، نیکزاد طهرانی، اسماعیل، و کولائی، علی. (۱۳۹۴). اثرات افزایش توسعه شهری روی رواناب حوضه سردآبرود کلاردشت با استفاده از مدل بارش-رواناب HEC-HMS. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۹(۱)، ۲۰۹-۲۲۰. https://idj.iaid.ir/article_54876.html
۷. پاکاریان، ساره، ریاحی، وحید، و یلّقی، مصطفی. (۱۴۰۴). ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر پوشش گیاهی و آبی شهرستان رشت. جغرافیا و روابط انسانی، ۳۸(۳)، ۱۹۴-۲۰۸. <https://doi.org/10.22034/gahr.2025.556475.2617>
۸. متشرعی، مرضیه، ملک محمدی، بهرام، و رمضانی مهران، مجید. (۱۴۰۴). کاربرد مدل رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS) در بررسی اثرات تغییر کاربری اراضی بر خدمت اکوسیستمی تولید آب (مطالعه موردی: بخش لواسانات استان تهران). محیط‌شناسی، ۵۱(۳)، ۲۷۳-۲۹۲. <https://doi.org/10.22059/jes.2025.387056.1008561>
۹. افشاری آزاد، محمدرضا، و پورکی، هاله. (۱۳۹۱). برآورد رواناب سطحی شهر رشت (مطالعه موردی: خیابان شهید قلی‌پور تا فلکه یخساز). فضای جغرافیایی، ۱۲(۳۷)، ۱۲۱-۱۴۰. <https://sid.ir/paper/91330/fa>
۱۰. رحمانی ننه‌کران، فردین، اسمعیلی عوری، اباذر، کله‌هوئی، مهین، احمدی، محمد، مصطفی زاده، رئوف، و حزباوی، زینب. (۱۴۰۱). تغییرپذیری مؤلفه‌های رواناب و رسوب از ترکیب‌ها و درصد‌های مختلف پوشش گیاهی. پژوهش‌های فرسایش محیطی، ۱۲(۴)، ۱۵۸-۱۷۳. <http://magazine.hormozgan.ac.ir/article-1-715-fa.html>
۱۱. زرنندیان، اردوان، و رمضانی مهران، مجید. (۱۴۰۰). ارزیابی اثرات تخریب پوشش گیاهی بر تغییرات رواناب و پتانسیل آلودگی آب در زیرحوضه‌های آبخیز استان آذربایجان شرقی. حفاظت منابع آب و خاک، ۱۱(۱)، ۹۵-۱۱۲. <https://doi.org/10.30495/wsrcj.2021.18547>
۱۲. زنگارکی فراهانی، الهام، واعظی، علی‌رضا، و عسکری، محمدصادق. (۱۴۰۰). بررسی تولید رواناب تحت تأثیر درجه شیب و ویژگی‌های خاک در دامنه‌های مرتعی بدون پوشش گیاهی در منطقه نیمه‌خشک. تحقیقات کاربردی خاک، ۹(۴)، ۱۵-۲۶. https://asr.urmia.ac.ir/article_121152.html?lang=fa
۱۳. آذرخشی، مریم، مساعدی، ابوالفضل، بشیری، مهدی، و اجاقلو شهابی، رعنا. (۱۳۹۶). اثر تغییرات بارش و کاربری اراضی بر تولید رسوب (مطالعه موردی: حوزه آبخیز صنوبر-تربت حیدریه). مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۱۱(۳۷)، ۲۵-۳۳. <http://jwmsei.ir/article-1-563-fa.html>
۱۴. رویگر، حسین، امامقلی زاده، صمد، قره‌چلو، سعید، و گلپان، سعید. (۱۴۰۳). تأثیر تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی آینده با مدل CA-Markov بر جریان رودخانه تالار مازندران. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۵(۲)، ۸۹-۱۰۴. <https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.89>
۱۵. بیانی، هاید، باقری، علی، اکبری نودهی، داود، و کریمی، ولی‌اله. (۱۴۰۳). تأثیر تغییر کاربری اراضی بر رواناب با استفاده از مدل SWAT در حوزه آبخیز تجن. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۵(۲)، ۷۷-۸۸. <https://doi.org/10.61186/jwmr.15.2.77>
۱۶. قضاوی، رضا، و فاضلی، آرش. (۱۳۹۷). بررسی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر پتانسیل تولید رواناب‌های سطحی با استفاده از سنجش از دور و مدل SWAT. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۵(۶)، ۱۹۱-۲۰۶. <https://doi.org/10.22069/jwsc.2019.12697.2739>
۱۷. رضایی، شهریار و سالاری‌پور، علی‌اکبر. (۱۴۰۵). پویایی فضایی-زمانی LULC و پوشش گیاهی و ارتباط آن با پدیده جزایر گرمایی در شهر رشت. اقتصاد و برنامه ریزی شهری، ۷(۴)، ۱۸-۴۶. doi: 10.22034/uep.2025.556211.1756
۱۸. مجلس شورای اسلامی. (۱۴۰۳). قانون برنامه پنجساله هفتم پیشرفت جمهوری اسلامی ایران: فصل هشتم، نظام مدیریت یکپارچه منابع آب. پایگاه قوانین و مقررات کشور. <https://qavanin.ir/Law/TreeText/?IDS=15033449572675229448>
۱۹. مجلس شورای اسلامی. (۱۳۶۱). قانون توزیع عادلانه آب، ماده ۴۵، مصوب ۱۶ اسفند ۱۳۶۱.
۲۰. لطیفی، غلامرضا. (۱۳۸۳). مدیریت شهری در ایران (محدودیت‌ها، چالش‌ها و راه‌کارها). فصلنامه علوم اجتماعی، ۱۱(۲۷)، ۷۵-۱۰۰. https://qjss.atu.ac.ir/article_5268.html

۲۱. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان گیلان (۱۴۰۲). طرح جامع شهر رشت (جلد دوم - مطالعات زیرساخت و محیط زیست). معاونت شهرسازی و معماری. <https://shahrsazi.rasht.ir/%D8%B7%D8%B1%D8%AD-%D8%AC%D8%A7%D9%85%D8%B9-%D8%B4%D9%87%D8%B1-%D8%B1%D8%B4%D8%AA>
۲۲. سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان گیلان. (۱۳۹۸). سالنامه آماری استان گیلان. معاونت آمار و اطلاعات. <https://sdimpogl.ir/>
۲۳. سازمان نقشه‌برداری کشور. (۱۳۹۹). نقشه توپوگرافی و اطلاعات مکانی استان گیلان. <https://www.ncc.gov.ir/>
۲۴. سازمان هواشناسی کشور. (۲۰۲۳). داده‌های اقلیمی ایستگاه سینوپتیک رشت. <https://www.irimo.ir/far/index.php>
۲۵. شهرداری رشت. (۱۴۰۰). گزارش جمعیت شناور و طرح‌های توسعه شهری. <https://shahrsazi.rasht.ir/%D8%B7%D8%B1%D8%AD-%D8%AC%D8%A7%D9%85%D8%B9-%D8%B4%D9%87%D8%B1-%D8%B1%D8%B4%D8%AA>
۲۶. مرکز آمار ایران. (۱۳۹۵). سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵: استان گیلان. تهران: مرکز آمار ایران. <https://khabarpu.com/p/gov/amar.org.ir.htm>
۲۷. وزارت نیرو (شرکت مدیریت منابع آب ایران). (۱۳۹۹). اطلس بارش استان گیلان. <https://www.glrw.ir/cs/RainStatistic/206>
28. François, M., de Aguiar, T. R., Jr., Mielke, M. S., Rousseau, A. N., Faria, D., & Mariano-Neto, E. (2024). Interactions between forest cover and watershed hydrology: A conceptual meta-analysis. *Water*, 16(23), Article 3350. <https://doi.org/10.3390/w16233350>
29. Liu, W., Feng, Q., Engel, B. A., & Zhang, X. (2023). Cost-effectiveness analysis of extensive green roofs for urban stormwater control in response to future climate change scenarios. *Science of the Total Environment*, 856, Article 159127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159127>
30. Liu, L., Chen, Z., Lu, X., & Wang, Y. (2026). Effects of green infrastructure composition and configuration on runoff regulation in watersheds: A global meta-analysis. *Journal of Hydrology*, 664, Article 134418. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134418>
31. Rentachintala, L. R. N. P., Reddy, M. G. M., & Mohapatra, P. K. (2022). Urban stormwater management for sustainable and resilient measures and practices: A review. *Water Science and Technology*, 85(4), 1120–1140. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.017>
32. Liu, C., Zhang, K., Wei, S., Wang, P., Cen, Y., & Xia, J. (2023). Evaluation of the effects of grass and shrub cover on overland flow resistance and its attributes under simulated rainfall. *Journal of Hydrology*, 626, Article 130285. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130285>
33. Hu, Y., Zhang, F., Luo, Z., Badreldin, N., Benoy, G., & Xing, Z. (2023). Soil and water conservation effects of different types of vegetation cover on runoff and erosion driven by climate and underlying surface conditions. *Catena*, 231, Article 107347. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107347>
34. Huang, S., Chen, J., Xiao, H., & Tao, G. (2023). Test on rules of rainfall infiltration and runoff erosion on vegetated slopes with different gradients. *Rock and Soil Mechanics*, 44(12), 3435–3447. <https://doi.org/10.16285/j.rsm.2022.1936>
35. Wei, C., Dong, X., Ma, Y., Zhao, W., Yu, D., Tayyab, M., & Bo, H. (2023). Impacts of land use types, soil properties, and topography on baseflow recharge and prediction in an agricultural watershed. *Land*, 12(1), Article 109. <https://doi.org/10.3390/land12010109>
36. Wei, S., Zhang, K., Liu, C., Cen, Y., & Xia, J. (2024). Effects of different vegetation components on soil erosion and response to rainfall intensity under simulated rainfall. *Catena*, 235, Article 107652. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107652>
37. Hamel, P., & Guswa, A. J. (2015). Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: Case study of the Cape Fear basin, North Carolina. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 839–853. <https://doi.org/10.5194/hess-19-839-2015>
38. Ou, J., Li, J., Li, X., & Zhang, J. (2024). Planning and design strategies for green stormwater infrastructure from an urban design perspective. *Water*, 16(1), Article 29. <https://doi.org/10.3390/w16010029>
39. Avazpour, B., Osmond, P., & Corkery, L. (2023). The dynamic challenges of mainstreaming water sensitive cities in our built environment: Lessons from Australia. *Cities*, 143, Article 104615. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104615>
40. Tasnia, T., & Grove, A. (2025). A systematic literature review of water-sensitive urban design and flood risk management in contexts of strategic urban sustainability planning. *Land*, 14(2), Article 224. <https://doi.org/10.3390/land14020224>

41. Atharinafi, Z., & Wijaya, N. (2021). Land use change and its impacts on surface runoff in rural areas of the upper Citarum Watershed: Case study: Cirasea Sub-watershed. *Journal of Regional and City Planning*, 32(1), 36–55. <https://doi.org/10.5614/jpwk.2021.32.1.3>
42. Liu, B., Yang, J., Sha, J., Luo, Y., Zhao, X., & Liu, R. (2023). Analysis of runoff according to land-use change in the upper Hutuo River basin. *Water*, 15(6), Article 1138. <https://doi.org/10.3390/w15061138>
43. Mirzaei, M., Solgi, E., & Salmanmahiny, A. (2016). Assessment of impacts of land use changes on surface water using L-THIA model: Case study: Zayandehrud River basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188, Article 690. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5705-5>
44. Nagarajan, M., & Basil, G. (2014). Remote sensing- and GIS-based runoff modeling with the effect of land-use changes: A case study of Cochin corporation. *Natural Hazards*, 73, 2023–2039. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1173-9>
45. Shukla, S., Meshesha, T. W., Sen, I. S., Bol, R., Bogen, H., & Wang, J. (2023). Assessing impacts of land use and land cover (LULC) change on stream flow and runoff in Rur Basin, Germany. *Sustainability*, 15(12), Article 9811. <https://doi.org/10.3390/su15129811>
46. Yang, M., Xue, L., Liu, Y., Wang, W., Han, Q., Liu, S., & Fu, R. (2024). Runoff response to multiple land-use changes and climate perturbations. *Hydrological Processes*, 38(1), Article e15072. <https://doi.org/10.1002/hyp.15072>
47. Meyenberg, I., & Elkina, E. (2025). What makes nature-based solutions work? Governance approaches to tackle combined sewer overflows in urban water systems [Policy brief]. Ecologic Institute. <https://www.ecologic.eu/20129>
48. Gohari, A., Gohari, A., Ahmad, A. B., Mokhtar, K., Oloruntobi, O., Johari, N. H., & Darwin, N. B. (2025). Multi-criteria analysis of barriers to the use of green building technologies in residential buildings: A case study of Mashhad, Iran. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 27, 1183–1204. <https://doi.org/10.1007/s10098-024-02920-0>
49. Natural Capital Project. (n.d.). InVEST® user guide. Retrieved July 4, 2026, from <https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/en/index.html>
50. World Meteorological Organization. (2022). State of the global climate 2021 (WMO-No. 1290). World Meteorological Organization. <https://wmo.int/resources/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2021>
51. Woods-Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). The SuDS manual (C753). CIRIA.
52. Wang, S., Liu, G., Zhang, X., Fu, Y., Wang, J., Meng, X., Gao, S., Ma, Y., Shen, Z., & Chen, L. (2025). Changes in the effectiveness of low impact development practices and their role in optimal design. *Journal of Hydrology*, 660, Article 133505. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133505>
53. Ma, Y., Ning, X., & Jiang, Y. (2024). China's sponge city development: Global position, governance, and potential enhancement with ecosystem services. *Journal of Urban Technology*, 31(3), 83–106. <https://doi.org/10.1080/10630732.2024.2381181>
54. Khalaji, F., Zhang, J., & Sharma, A. K. (2025). Social and economic impacts of water sensitive urban design: A review. *Water*, 17(1), Article 16. <https://doi.org/10.3390/w17010016>
55. Hao, M., Gao, C., Sheng, D., & Qing, D. (2019). Review of the influence of low-impact development practices on mitigation of flood and pollutants in urban areas. *Desalination and Water Treatment*, 149, 323–328. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23852>
56. Chikhi, F., Li, C., Ji, Q., & Zhou, X. (2024). Advancing sponge city implementation in China: The quest for a strategy model. *Water Resources Management*, 38(7), 2251–2277. <https://doi.org/10.1007/s11269-024-03784-1>
57. Schulze, J., Gehrmann, S., Somvanshi, A., & Rudolph-Cleff, A. (2024). From district to city scale: The potential of water-sensitive urban design (WSUD). *Water*, 16(4), Article 582. <https://doi.org/10.3390/w16040582>
58. Kuller, M., Bach, P. M., Ramirez, D., & Deletic, A. (2017). Framing water sensitive urban design as part of the urban form: A critical review of tools for best planning practice. *Environmental Modelling & Software*, 96, 265–282. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.07.003>
59. van der Meulen, G. J. M., van Dorst, M. J., & Kuzniecowa Bacchin, T. (2023). Water sensitivity and context specificity: Concept and context in water-sensitive urban design for secondary cities. *Urban Water Journal*, 20(1), 15–25. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2153704>

60. Rashetnia, S., Sharma, A. K., Ladson, A. R., Browne, D., & Yaghoubi, E. (2022). A scoping review on water sensitive urban design aims and achievements. *Urban Water Journal*, 19(5), 453–467. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2022.2044494>
61. Meng, X. (2022). Understanding the effects of site-scale water-sensitive urban design (WSUD) in the urban water cycle: A review. *Blue-Green Systems*, 4(1), 45–57. <https://doi.org/10.2166/bgs.2022.026>
62. Wu, W., Jamali, B., Zhang, K., Marshall, L., & Deletic, A. (2023). Water sensitive urban design (WSUD) spatial prioritisation through global sensitivity analysis for effective urban pluvial flood mitigation. *Water Research*, 235, Article 119888. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.119888>
63. Altındaş, G., Dane, G., & Baba, A. (2026). Urban digital twins and water sensitive urban design: A systematic literature review. *Sustainable Cities and Society*, 145, Article 107456. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2026.107456>
64. Weng, Q. (2001). Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental Management*, 28(6), 737–748. <https://doi.org/10.1007/s002670010258>
65. Shi, P.-J., Yuan, Y., Zheng, J., Wang, J.-A., Ge, Y., & Qiu, G.-Y. (2007). The effect of land use/cover change on surface runoff in Shenzhen region, China. *Catena*, 69(1), 31–35. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.015>
66. Shrestha, S., Cui, S., Xu, L., Wang, L., Manandhar, B., & Ding, S. (2021). Impact of land use change due to urbanisation on surface runoff using GIS-based SCS–CN method: A case study of Xiamen City, China. *Land*, 10(8), 839. <https://doi.org/10.3390/land10080839>
67. Sohn, W., Kim, J.-H., Li, M.-H., Brown, R. D., & Jaber, F. H. (2020). How does increasing impervious surfaces affect urban flooding in response to climate variability? *Ecological Indicators*, 118, 106774. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106774>
68. Sajikumar, N., & Remya, R. S. (2015). Impact of land cover and land use change on runoff characteristics. *Journal of Environmental Management*, 161, 460–468. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.12.041>
69. Ali, M., Khan, S. J., Aslam, I., & Khan, Z. (2011). Simulation of the impacts of land-use change on surface runoff of Lai Nullah Basin in Islamabad, Pakistan. *Landscape and Urban Planning*, 102(4), 271–279. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.05.006>
70. Azizi, S., Ilderomi, A. R., & Noori, H. (2021). Investigating the effects of land use change on flood hydrograph using HEC-HMS hydrologic model: Case study: Ekbatan Dam. *Natural Hazards*, 109, 145–160. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04830-6>
71. Hamel, P., Guerry, A. D., Polasky, S., Han, B., Douglass, J. A., Hamann, M., Janke, B., Kuiper, J. J., Levrel, H., Liu, H., Lonsdorf, E., McDonald, R. I., Nootenboom, C., Ouyang, Z., Remme, R. P., Sharp, R. P., Tardieu, L., Viguié, V., Xu, D., Zheng, H., & Daily, G. C. (2021). Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software. *npj Urban Sustainability*, 1, Article 25. DOI: 10.1038/s42949-021-00027-9
72. Lonsdorf, E. V., Nootenboom, C. W., Janke, B., & Horgan, B. P. (2021). Assessing urban ecosystem services provided by green infrastructure: Golf courses in the Minneapolis–St. Paul metro area. *Landscape and Urban Planning*, 208, Article 104022. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2020.104022