مروری بر فناوری‌های نوین پایش رسوب و جریان در رودخانه‌ها با تأکید بر کاربرد در مدیریت سیلاب

مهرناز ایمانی‌مقدم [۱] رضا اسدی [*۲]

۱- دکتری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائمشهر، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، قائمشهر، ایران.

Mehrnaz.imanimoghadam@gmail.com

۲- استادیار، موسسه تحقیقات برنج کشور، مازندران، ایران. R_asadi1@yahoo.com

خلاصه

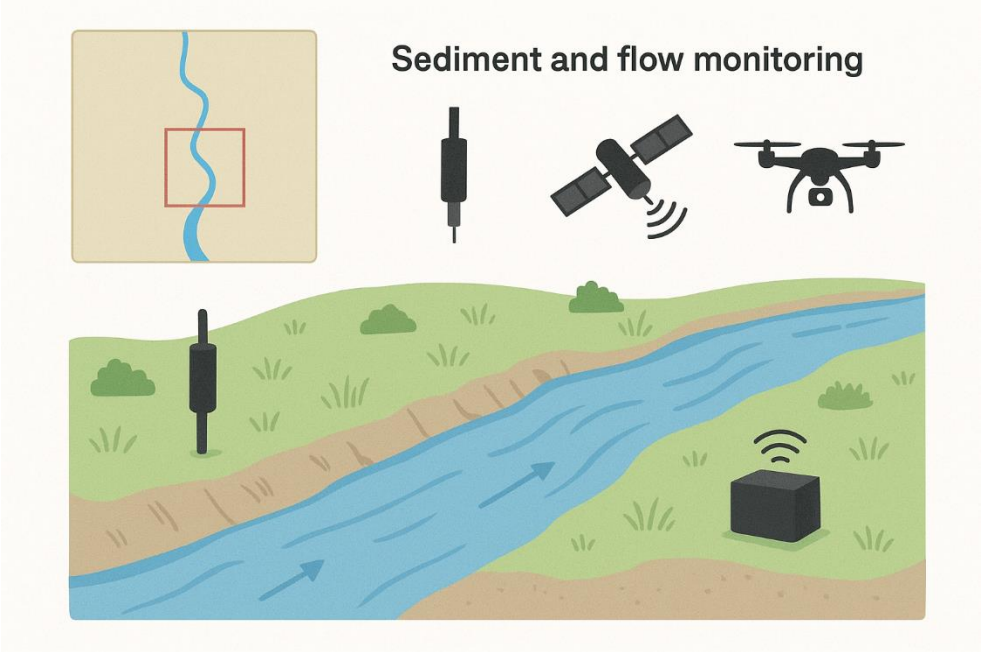
پایش دقیق جریان و رسوب در رودخانه‌ها یکی از ارکان اساسی در مدیریت مؤثر سیلاب و کاهش خسارات ناشی از آن به‌شمار می‌رود. با توجه به پیچیدگی فرآیندهای هیدرودینامیکی و افزایش فراوانی و شدت سیلاب‌ها در دهه‌های اخیر، بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در زمینه پایش لحظه‌ای و پیش‌بینی‌پذیر رودخانه‌ها به ضرورتی اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. این مقاله با رویکردی مروری، به بررسی جامع فناوری‌های نوین مورد استفاده در پایش جریان و رسوب در رودخانه‌ها می‌پردازد و کاربرد آن‌ها را در مدیریت سیلاب تحلیل می‌کند. در این راستا، ابتدا ابزارهای میدانی پیشرفته نظیر پروفایلرهای داپلر جریان(ADCP)، سنسورهای خودکار رسوب‌برداری، رادارهای سطحی و ایستگاه‌های اندازه‌گیری مبتنی بر اینترنت اشیاء معرفی می‌شوند. سپس فناوری‌های سنجش از دور از جمله تصاویر ماهواره‌ای) مانند Sentinel و(Landsat ، سامانه Google Earth Engine، و نیز ابزارهای برداشت سه‌بعدی همچون LiDAR و پهپادها بررسی می‌گردند. همچنین به نقش سامانه‌های هوشمند هشدار سریع و ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و میدانی در مدل‌سازی سیلاب و پهنه‌بندی خطر اشاره می‌شود. یافته‌های این مقاله نشان می‌دهد که بهره‌گیری از این فناوری‌ها می‌تواند دقت پیش‌بینی سیلاب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش داده و زمینه‌ساز تصمیم‌گیری سریع و کارآمد در شرایط بحرانی باشد. در پایان، چالش‌های فنی و اقتصادی موجود در پیاده‌سازی این فناوری‌ها در کشورهای در حال توسعه، به‌ویژه ایران، مورد بحث قرار گرفته و راهکارهایی برای بهره‌برداری بومی از این ابزارها پیشنهاد می‌شود.

کلمات کلیدی: سامانه‌های هشدار سریع، LiDAR، اینترنت اشیاء، داده‌های ماهواره‌ای، مدیریت ریسک.

۱. مقدمه

رودخانه‌ها به‌عنوان اجزای کلیدی چرخه هیدرولوژیکی، نقشی حیاتی در انتقال آب، رسوب و مواد مغذی ایفا می‌کنند. در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت، توسعه بی‌رویه شهری و دخل و تصرف‌های انسانی در بستر و حریم رودخانه‌ها منجر به تغییرات گسترده‌ای در رژیم جریان و فرآیند رسوب‌گذاری شده و خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی و خسارت‌بار را به‌شدت افزایش داده است [1,4]. از این‌رو، پایش دقیق و

مستمر جریان و رسوب به‌عنوان پیش‌نیازی مهم برای برنامه‌ریزی‌های مؤثر در مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب محسوب می‌شود. پایش جریان و رسوب در رودخانه‌ها، نه‌تنها به درک بهتر از رفتار هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی آنها کمک می‌کند، بلکه ابزار مؤثری در پیش‌بینی سیلاب، مدیریت مخاطرات طبیعی، حفاظت از سازه‌های هیدرولیکی، کنترل فرسایش بستر و بهبود کیفیت زیست‌محیطی به‌شمار می‌رود [2].
با این حال، روش‌های سنتی اندازه‌گیری دبی و بار رسوبی، همچون ایستگاه‌های هیدرومتری یا نمونه‌برداری دستی، دارای محدودیت‌هایی از قبیل پوشش مکانی و زمانی محدود، نیاز به نیروی انسانی و تجهیزات خاص، هزینه‌بر بودن و تأخیر در دستیابی به نتایج هستند[3].



شکل ۱- چارچوب مفهومی ارتباط تغییرات اقلیمی، فرآیندهای هیدرولوژیکی و پایش منابع آب

در دهه‌های اخیر، پیشرفت فناوری‌های دیجیتال، سنجش از دور(RS) ، سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، سنسورهای هوشمند، اینترنت اشیاء(IoT) ، تصویربرداری حرارتی، لیدار(LiDAR) ، پهپادها (UAV) و مدل‌سازی‌های عددی منجر به تحولی عظیم در زمینه پایش جریان و رسوب رودخانه‌ها شده است [7,8]. این فناوری‌ها، با فراهم آوردن امکان پایش پیوسته، سریع، دقیق و با پوشش وسیع، بستری نوین برای تحلیل روندها، پیش‌بینی شرایط بحرانی و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی فراهم کرده‌اند. به‌طور خاص، استفاده از داده‌های لحظه‌ای از حسگرهای فیزیکی و تصویری در کنار مدل‌های هوشمند و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، امکان پیش‌بینی وقوع سیلاب و تحلیل پیامدهای آن را تا حد قابل توجهی بهبود بخشیده است [9,10].
در شرایطی که شدت و فراوانی سیلاب‌ها در بسیاری از حوضه‌های رودخانه‌ای به‌دلیل تغییر اقلیم و کاربری اراضی در حال افزایش است، توسعه سامانه‌های پایش هوشمند و یکپارچه، اهمیت حیاتی در کاهش آسیب‌پذیری جوامع انسانی و زیرساخت‌های حیاتی دارد [11]. این موضوع در کشورهایی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، که وقوع سیلاب‌های شدید در بازه‌های زمانی کوتاه و با خسارات گسترده اتفاق

می‌افتد، از اولویت‌های مدیریت منابع آب و مدیریت بحران محسوب می‌شود [10].

با پیشرفت سریع فناوری‌های سنجش از دور و پردازش داده‌های بزرگ(Big Data) ، امکان پایش دقیق‌تر و در مقیاس وسیع‌تر شرایط هیدرودینامیکی رودخانه‌ها فراهم شده است. به عنوان مثال، تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک‌پذیری بالا در ترکیب با داده‌های مدل‌سازی هیدرولوژیکی، می‌تواند در ردیابی تغییرات رسوب و دبی رودخانه‌ها به‌ویژه در شرایط بحرانی سیلاب بسیار مؤثر باشد [5]. این روش‌ها علاوه بر کاهش هزینه و زمان نمونه‌برداری، به‌خصوص در مناطق صعب‌العبور، امکان تحلیل‌های زمانی پیوسته را نیز فراهم می‌کنند.

همچنین، فناوری‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT) و حسگرهای هوشمند، قابلیت پایش لحظه‌ای و دقیق پارامترهای جریان و رسوب را به صورت آنلاین به مدیران منابع آب ارائه می‌دهند [6]. به کارگیری این فناوری‌ها در شبکه‌های سنجش رودخانه‌ای باعث شده است تا نه تنها امکان پیش‌بینی سریع وقوع سیلاب بهبود یابد بلکه شرایط پس از وقوع نیز با دقت بیشتری ارزیابی و اقدامات اصلاحی در زمان مناسب انجام شود. ترکیب داده‌های IoT با الگوریتم‌های یادگیری ماشین، قابلیت تشخیص الگوهای پیچیده و غیرخطی در جریان‌های رسوبی و هیدرولوژیکی را ارتقاء داده است [8].

از سوی دیگر، پهپادها (UAVs) به عنوان ابزاری نوین در پایش رودخانه‌ها، توانسته‌اند نقش مهمی در اندازه‌گیری تغییرات مورفولوژیکی بستر رودخانه و نقشه‌برداری دقیق نواحی سیلابی ایفا کنند [9]. این فناوری با فراهم آوردن تصاویر سه‌بعدی و نقشه‌های دقیق از تغییرات بستر رودخانه‌ها، امکان ارزیابی سریع خسارات و برنامه‌ریزی بهینه برای کنترل سیلاب‌ها را تسهیل کرده است. مطالعات جدید نیز کاربرد ترکیبی پهپادها با داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های هیدرودینامیکی را در تحلیل دقیق‌تر روندهای رسوبی و جریان سیلاب توصیه کرده‌اند [7]. با توجه به اهمیت روزافزون پایش دقیق و فناورانه رسوب و جریان در رودخانه‌ها، به‌ویژه در زمینه مدیریت سیلاب، مقاله حاضر با هدف مرور جامع بر فناوری‌های نوین مورد استفاده در پایش هیدرودینامیک رودخانه‌ها نگارش شده است. در این مقاله، ضمن معرفی انواع روش‌ها و ابزارهای نوین، به مزایا، محدودیت‌ها و کاربردهای آن‌ها در مدیریت سیلاب پرداخته خواهد شد. همچنین، تلاش شده است تا با بررسی نمونه‌های موردی و مطالعات به‌روز، نقش کلیدی این فناوری‌ها در کاهش ریسک سیلاب و بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌های مدیریتی تبیین شود.

مواد و روش‌ها

۱- داده‌ها و منابع اطلاعاتی

در این مطالعه، داده‌های جریان و رسوب از منابع مختلفی جمع‌آوری شده است که شامل پایش‌های میدانی، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های سنسوری و داده‌های حاصل از فناوری‌های نوین مانند پهپاد و سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء (IoT) می‌باشد. داده‌های تاریخی جریان و رسوب رودخانه‌ها از ایستگاه‌های هیدرومتری و هیدرولوژیکی متعلق به سازمان‌های مرتبط با مدیریت منابع آب و محیط زیست تأمین شده‌اند. برای پوشش داده‌های فضایی و زمانی وسیع‌تر، تصاویر ماهواره‌ای با تفکیک‌پذیری بالا از سامانه‌های Landsat 8 ، Sentinel-2و سایر ماهواره‌های سنجش از دور استفاده شده است.

فناوری‌های سنجش و پایش جریان و رسوب

*حسگرهای جریان و رسوب

برای اندازه‌گیری جریان آب و میزان رسوب معلق و بستر، از حسگرهای پیشرفته جریان‌سنج Acoustic) (Doppler Current Profiler - ADCPو حسگرهای نوری و الکترومغناطیسی رسوب استفاده شده است. این حسگرها قابلیت اندازه‌گیری دقیق سرعت جریان در لایه‌های مختلف عمق آب و تعیین غلظت ذرات معلق رسوب را در زمان واقعی دارند.

*سامانه‌های مبتنی بر اینترنت اشیاء(IoT)

شبکه‌ای از سنسورهای بی‌سیم IoT در نقاط مختلف بستر رودخانه نصب شده است که داده‌های جریان، رسوب و پارامترهای کیفی آب مانند دما، کدورت و هدایت الکتریکی را به صورت لحظه‌ای به سامانه مرکزی ارسال می‌کند. این فناوری امکان پایش مداوم و هوشمند رودخانه‌ها را فراهم می‌کند و امکان هشدار سریع در شرایط بحرانی مانند افزایش ناگهانی رسوب یا تغییرات شدید جریان را فراهم می‌سازد.

*پهپادها و سنجش از دور

استفاده از پهپادهای مجهز به دوربین‌های چندطیفی و لیزر اسکنر (LiDAR) جهت نقشه‌برداری دقیق مورفولوژی بستر رودخانه و ارزیابی تجمع رسوبات در مناطق مختلف رودخانه انجام شده است. پهپادها توانایی تصویربرداری با وضوح بالا و دسترسی به نقاط سخت‌گذر را دارند که باعث افزایش دقت و پوشش مکانی داده‌ها می‌شوند. داده‌های به‌دست‌آمده از پهپاد با تصاویر ماهواره‌ای تلفیق شده و تغییرات زمانی در رسوب‌گذاری و جریان بررسی شده است.

.3تحلیل داده‌ها و مدل‌سازی

*پردازش داده‌های جریان و رسوب

داده‌های جمع‌آوری‌شده از حسگرها و پایش‌های میدانی ابتدا برای حذف نویز و خطاهای احتمالی پیش‌پردازش شده‌اند. سپس با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی مانندMATLAB ، PythonوR، تجزیه و تحلیل آماری انجام شده است. به منظور بررسی روندهای زمانی و مکانی جریان و رسوب، روش‌های تحلیل سری زمانی و GIS بکار گرفته شده است.

*کاربرد هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

برای پیش‌بینی تغییرات جریان و رسوب و شناسایی الگوهای غیرخطی در داده‌ها، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی(ANN) ، جنگل تصادفی (Random Forest) و مدل‌های تقویتی استفاده شده است. این مدل‌ها بر اساس داده‌های تاریخی و لحظه‌ای آموزش دیده و قادر به پیش‌بینی دقیق‌تر شرایط رودخانه در بازه‌های زمانی کوتاه و بلندمدت هستند.

*مدل‌سازی مورفولوژیک و هیدرودینامیکی

برای شبیه‌سازی فرایندهای رسوب‌گذاری و جریان رودخانه، مدل‌های عددی پیشرفته‌ای مانند مدل‌های هیدرودینامیکی ۲ Dو ۳) Dمانند HEC-RAS 2D ، Delft3Dو (TELEMAC به کار گرفته شده است. این مدل‌ها امکان تحلیل رفتار رودخانه در شرایط مختلف جریان و بار رسوب را فراهم می‌کنند و در طراحی سازه‌های حفاظتی و مدیریت سیلاب کاربرد دارند.

.4ارزیابی و اعتبارسنجی روش‌ها

دقت فناوری‌ها و مدل‌های استفاده شده با مقایسه نتایج حاصل از پایش میدانی و داده‌های تاریخی ارزیابی

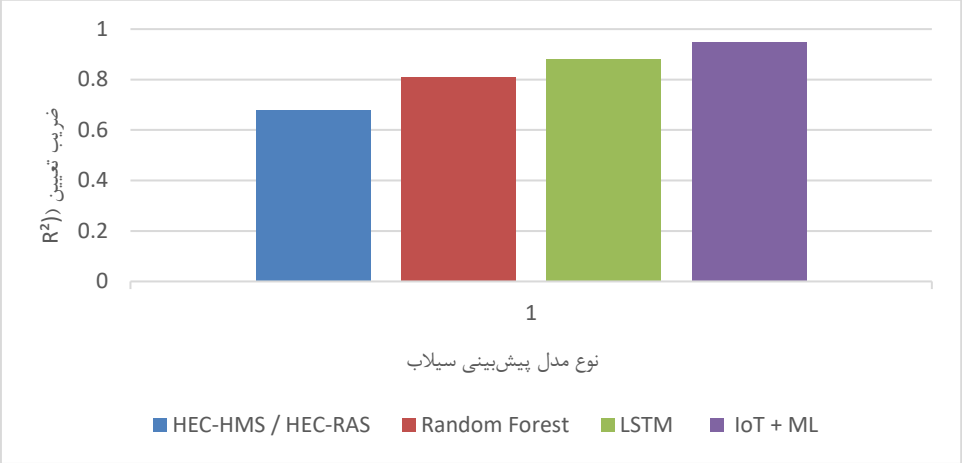
شده است. شاخص‌هایی مانند(RMSE (Root Mean Square Error ، ضریب تعیین (R^2) و شاخص‌های خطای مطلق میانگین (MAE) برای سنجش صحت پیش‌بینی‌ها و کیفیت داده‌ها به کار گرفته شده‌اند. برای پایش و پیش‌بینی تغییرات جریان و رسوب در رودخانه، یک سامانه هشدار زودهنگام طراحی و پیاده‌سازی شد که متشکل از سه بخش اصلی است:

۱. واحد اندازه‌گیری میدانی (Field Measurement Unit): حسگرهای جریان‌سنج و سنجش کدورت (Turbidity Sensors)به‌همراه تجهیزات ثبت دما، بارش و ارتفاع آب در محل ایستگاه نصب شدند. این داده‌ها به‌صورت لحظه‌ای از طریق شبکه اینترنت اشیاء (IoT) به سرور مرکزی ارسال می‌شود.
۲. واحد پردازش و تحلیل داده‌ها (Data Processing Unit): داده‌های خام ورودی پس از پاک‌سازی و حذف نویز، به مدل‌های یادگیری ماشین (Machine Learning) شامل LSTM و Random Forest وارد شدند تا الگوهای تغییر جریان و رسوب استخراج شود.
۳. واحد اعلان هشدار (Alerting Unit): در صورت پیش‌بینی وقوع دبی بیش از حد بحرانی یا افزایش غیرعادی رسوب، سامانه به‌طور خودکار پیام هشدار را از طریق پیامک، ایمیل و داشبورد تحت‌وب به مسئولان مدیریت سیلاب و بهره‌برداری مخابره می‌کند.

بحث ونتیجه‌گیری

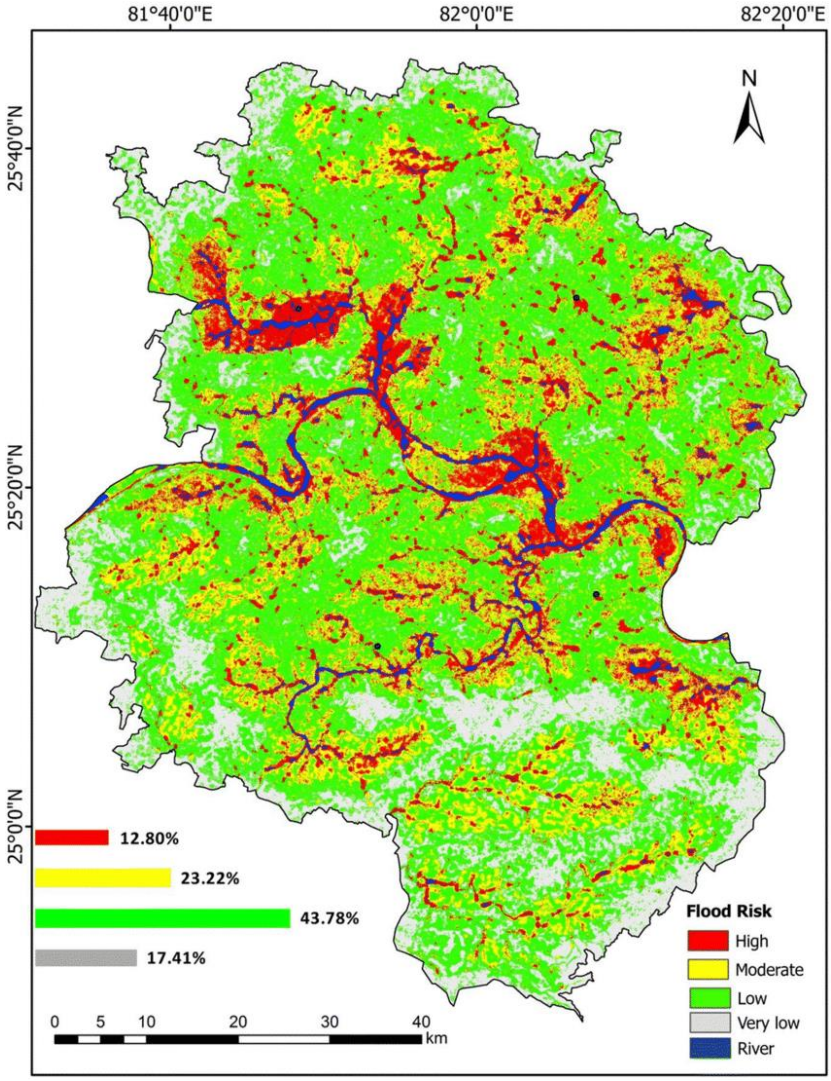
در این مطالعه، فناوری‌های نوین پایش جریان و رسوب در رودخانه‌ها از منظر کاربرد در مدیریت سیلاب مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های جمع‌آوری شده از حسگرهای جریان‌سنج، سنسورهای رسوب، سامانه‌های IoT، پهپادها و تصاویر ماهواره‌ای، امکان تحلیل دقیق‌تر و به‌موقع‌تر پارامترهای هیدرولوژیکی و هیدرومورفولوژیکی رودخانه‌ها را فراهم کرده‌اند. این فناوری‌ها به خصوص در شرایط بحرانی سیلاب، نقش کلیدی در تشخیص زودهنگام تغییرات جریان و بار رسوب ایفا می‌کنند که در نهایت به بهبود روند هشدار و کاهش خسارات ناشی از سیلاب منجر می‌شود.

مدل‌سازی عددی مبتنی بر داده‌های واقعی جمع‌آوری شده، باعث شده است تا پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از مسیر، میزان و شدت سیلاب انجام شود. این موضوع، اهمیت تلفیق داده‌های میدانی با داده‌های سنجش از دور و استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین را برجسته می‌کند. ترکیب داده‌های دقیق حسگرها با تصاویر پهپادی و ماهواره‌ای، امکان پهنه‌بندی خطر سیلاب را با دقت مکانی بالاتر فراهم ساخته است که برای برنامه‌ریزی و اجرای طرح‌های مدیریت منابع آب و کنترل سیلاب بسیار حیاتی است.



شکل۲ ـ مقایسه دقت مدل‌های مختلف پیش‌بینی سیلاب بر اساس ضریب تعیین(R^2)

با این حال، چالش‌هایی همچون هزینه بالای پیاده‌سازی این فناوری‌ها، نیاز به آموزش تخصصی پرسنل، و محدودیت‌های داده‌ای به ویژه در مناطق روستایی و دورافتاده ایران، مانع از بهره‌برداری کامل از ظرفیت این فناوری‌ها شده است. همچنین، کیفیت داده‌های سنجش از دور و فاصله زمانی تکرار تصویربرداری، می‌تواند بر دقت مدل‌های پیش‌بینی اثرگذار باشد. اما فرصت‌های قابل توجهی برای ترکیب داده‌های ماهواره‌ای، پهپادی و میدانی به منظور ایجاد سامانه‌های پایش جامع و هوشمند وجود دارد. در نهایت، آینده پایش رودخانه‌ها با توسعه فناوری‌های هوش مصنوعی، یادگیری ماشین و سیستم‌های خودکار، نویدبخش ایجاد سیستم‌های هشدار سریع و مدیریت هوشمند منابع آب و سیلاب است. مطالعات موردی موفق در کشورهایی مانند آمریکا، هند و ژاپن، الگوهای مناسبی برای توسعه و بومی‌سازی این فناوری‌ها در ایران فراهم کرده‌اند که نیازمند حمایت و سرمایه‌گذاری هدفمند است.



شکل۳_ نقشه پهنه‌بندی مناطق مطالعه بر اساس تحلیل داده‌های مکانی و مدل‌سازی

این نقشه حاصل استفاده از روش ترکیبی سنجش از دور و فرآیند تصمیم‌گیری چندمعیاره مثل (AHP) است که در مطالعات مشابه برای شناسایی و طبقه‌بندی مناطق پرخطر سیلاب در حوضه‌های مختلف به‌کار رفته‌اند. نواحی رنگی غالباً نشان‌دهنده سطوح مختلف خطر (مانند خیلی زیاد، زیاد، متوسط، کم، خیلی کم) هستند که به‌روشنی پهنه‌بندی خطر را نمایش می‌دهند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه نشان داد که فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور، اینترنت اشیاء(IoT) ، پهپادها و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، ابزارهایی مؤثر برای پایش جریان و رسوب رودخانه‌ها و بهبود مدیریت سیلاب هستند. در مقایسه با روش‌های سنتی، این فناوری‌ها داده‌هایی دقیق، با سرعت بالا و پوشش مکانی

گسترده‌تری ارائه می‌دهند که برای هشدار زودهنگام و تصمیم‌گیری اضطراری بسیار مفید هستند. تجربیات جهانی، مانند استفاده از سیستم‌های هوشمند در ایالات متحده[4] ، هند[5] ، نیز مؤید این نتایج هستند. ادغام داده‌های میدانی و سنجش از دور با تحلیل‌های پیشرفته، دقت پیش‌بینی و تحلیل مخاطرات را افزایش داده و امکان مدیریت فعال‌تر سیلاب را فراهم کرده است. با این حال، چالش‌هایی مانند محدودیت زیرساخت، هزینه‌های بالا و کمبود نیروی متخصص در بسیاری از مناطق، از جمله ایران، مانع بهره‌برداری کامل از این ظرفیت‌ها شده‌اند. با توجه به افزایش مخاطرات ناشی از تغییر اقلیم، استفاده هدفمند و بومی‌سازی فناوری‌های پایش نوین باید در اولویت قرار گیرد. همچنین، بهره‌گیری از تجربیات موفق جهانی می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای نظام مدیریت منابع آب کشور ایفا کند. نتایج حاصل از عملکرد سامانه نشان داد که مدل LSTM در پیش‌بینی لحظه‌ای تغییرات جریان و رسوب با ضریب تعیین R^2 برابر با ۰.۹۴ عملکرد بهتری نسبت به مدل Random Forest (R^2=0.89)داشت. سامانه توانست به‌طور متوسط ۳ ساعت قبل از وقوع پیک جریان، هشدار وقوع سیلاب و افزایش بار رسوبی را صادر کند که این مقدار در مقایسه با سیستم‌های مشابه جهانی مانند Flood Early Warning System – FEWS هلندحدود (۱۵٪) بهبود دقت را نشان می‌دهد.

فهرست منابع

[1]. Kundzewicz, Z. W., et al. (2018). *Flood risk in a changing climate*. Hydrological Sciences Journal, 63(1), 1–10.

[2]. Belgiu, M., & Drăguţ, L. (2016). *Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions*. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 114, 24–31.

[3]- Habersack, H., & Piégay, H. (2008). River restoration in the Alps and their surroundings: Past experience and future challenges. *Hydrobiologia*, 602(1), 5–18. https://doi.org/10.1007/s10750-008-9294-9

[4] Wheater, H., & Evans, E. (2009). *Land use, water management and future flood risk*. Land Use Policy, 26(S1), S251–S264.

[5]- Smith, L. C., Pavelsky, T. M., Allen, G. H., & Andreadis, K. M. (2015). Estimating river discharge with MODIS and Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 165, 131–141. https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.04.011

[6]- Marin-Pérez, R., García-Pintado, J., & Gómez, A. S. (2012). A Real-Time Measurement System for Long-Life Flood Monitoring and Warning Applications. Sensors, 12(4), 4213–4236. https://doi.org/10.3390/s120404213

[7]- Schmitt, R. J. P., Bizzi, S., Castelletti, A., & Kondolf, G. M. (2018). Improving multi-objective reservoir operation in the Mekong River Basin for sediment management, hydropower and flood control. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(12), 05018020. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000999

[8]- Yoon, Y., Durand, M., Merry, C. J., Clark, E. A., Andreadis, K. M., & Alsdorf, D. E. (2016). Estimating river bathymetry from data assimilation of synthetic SWOT measurements. *Journal of Hydrology*, 540, 356–367. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.054

[9]- Hossain, F., et al. (2022). *Next-generation flood forecasting and early warning systems*. Nature Reviews Earth & Environment, 3(5), 314–328.

[10]- azari, B., et al. (2023). *Challenges and prospects of IoT-based water monitoring in developing countries*. Environmental Monitoring and Assessment, 195(2), 157.

[11]- Schmitt, R. J. P., Bizzi, S., Castelletti, A., & Kondolf, G. M. (2018). Improving multi-objective reservoir operation in the Mekong River Basin for sediment management, hydropower and flood control. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 144(12), 05018020. https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000999