



هوش مصنوعی، گذار از واکنش به تاب آوری در چرخه مدیریت بحران منابع آب

مهجبین ردائی^۱

۱- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه مراغه، مراغه، ایران

چکیده

افزایش فراوانی و شدت رویدادهای فاجعه‌بار، مدیریت بحران منابع آب را به یک اولویت جهانی تبدیل کرده است، که در آن نوآوری‌های فناوری نقش محوری ایفا می‌کنند. ادغام هوش مصنوعی اساساً الگوهای سنتی مدیریت بحران را بازسازی کرده و مسیرهای جدیدی را برای افزایش اثربخشی پاسخ و بهره‌وری عملیاتی ترسیم کرده است. علی‌رغم این تأثیرات دگرگون‌کننده، چندین چالش مهم و مسئله حل‌نشده همچنان پابرجاست. این مطالعه به طور سیستماتیک ۲۵۸ مطالعات نمایه شده در پایگاه‌های داده Web of Science و Google Scholar را با تمرکز بر تقاطع مفاهیم هوش مصنوعی و مدیریت بلایای طبیعی، به خصوص بحران‌های مرتبط با منابع آب را تحلیل نمود. با استفاده از رویکرد تحلیل محتوا، کاربری فناوری‌های متنوع هوش مصنوعی در چهار مرحله استاندارد مدیریت بحران مورد بررسی قرار گرفت: پیشگیری و کاهش، آمادگی، پاسخ و بازیابی. علاوه بر این، این مطالعه شکاف‌های تحقیقاتی را در چشم‌انداز فعلی مدیریت بحران آب مبتنی بر هوش مصنوعی شناسایی و ترکیب کرد و به طور خاص به افزایش تاب‌آوری قبل و بعد از بحران، تقویت زیرساخت‌های حیاتی، بهینه‌سازی طراحی شبکه تخلیه و بازسازی بلندمدت و پایدار پس از فاجعه پرداخت. این یافته‌ها بینش‌های مهمی را برای سیاست‌گذاران، محققان و متخصصان ارائه می‌دهد، ضمن اینکه پتانسیل استفاده نشده کاربردهای پیشرفته هوش مصنوعی را برای پیشبرد پیشرفت و نوآوری بیشتر در حوزه مدیریت بحران آب برجسته می‌کند.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی

دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۳/۱۵

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

ارائه آنلاین: ۱۴۰۵/۰۳/۳۰

*نویسنده مسئول:

m.radaei@maragheh.ac.ir

کلیدواژه‌ها:

هوش مصنوعی، مدیریت بحران، سیلاب،

منابع آب، تاب‌آوری



© نویسندگان

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License- CC BY) در دسترس شما قرار گرفته است.

۱- مقدمه

افزایش فراوانی و شدت فجایای طبیعی، نگرانی‌های عمیقی را در جوامع مختلف ایجاد کرده است. این روند صعودی ناشی از عوامل متعددی از جمله تغییرات اقلیمی، توسعه سریع شهری، افزایش جمعیت، تمرکز سرمایه گذاری در مناطق پرخطر، انتشارات آلودگی‌های محیط‌زیستی و بهره برداری بی رویه از منابع طبیعی است. بحران آب در عصر حاضر، به‌ویژه خشکسالی و سیل، به‌واسطه تعامل پیچیده عوامل اقلیمی، هیدرولوژیک، انسانی و فناورانه، با چالش‌های عمیق ساختاری و سیستمی مواجه‌اند. تغییرپذیری اقلیم و افزایش فراوانی رخداد‌های حدی موجب اختلال در الگوهای بارش، تبخیر-تعرق و تغذیه آب‌های زیرزمینی شده و پیش‌بینی‌پذیری سامانه‌های آبی را کاهش داده است. در سطح مدیریتی، ناهماهنگی نهادی، ضعف در یکپارچگی داده‌ها، کمبود پایگاه‌های داده مکانی-زمانی با دقت بالا و نبود مدل‌های هوشمند تطبیقی، تصمیم‌گیری مؤثر را دشوار می‌سازد. از منظر فنی، توسعه بی‌رویه زیرساخت‌های سخت‌افزاری بدون پشتوانه تحلیل سیستمی، سبب تشدید آسیب‌پذیری مناطق در برابر مخاطرات دوگانه خشک‌سالی-سیلاب شده است. علاوه بر این، افزایش فشار انسانی بر منابع آب و تخریب اکوسیستم‌های طبیعی، چرخه بازخوردی منفی ایجاد کرده که ضمن تضعیف ظرفیت‌های تاب‌آوری، موجب تبدیل بحران‌های مقطعی به بحران‌های مزمن و چندبعدی در نظام‌های اجتماعی-بوم‌شناختی می‌شود. این فجایا و بحران‌ها بازتاب عمیقی را در مورد نیاز به تقویت مدیریت بحران برانگیخته و بر ضرورت مبرم تقویت ظرفیت جوامع محلی به کاهش احتمال بروز آن و پاسخ‌دهی و تشویق بخش‌های دولتی و خصوصی به بازنگری در راهبردهای موجود مدیریت بحران تأکید می‌کند، تا بتواند ضمن کاهش خطرات از طریق راهکارهای پیشگیری، آمادگی، پاسخ و بازسازی [۱-۳] بر مفهوم تاب‌آوری تمرکز نماید.

هدف اصلی مدیریت بحران، حفاظت و ارتقای ایمنی و رفاه افراد، جوامع و سازمان‌ها در برابر فجایا، و همچنین کاهش اثرات آن در ابعاد اجتماعی-اقتصادی و محیط‌زیستی است. با این حال، با تداوم افزایش فراوانی و مقیاس فجایای جهانی، رویکردها و فناوری‌های پیشین مدیریت بحران به‌تدریج محدودیت‌های خود را در مواجهه با شرایط پویای محیطی و سناریوهای همراه با عدم قطعیت نشان می‌دهند [۴]. این رویکردها اساساً فاقد انعطاف‌پذیری بوده و قادر به برآورده کردن تقاضاهای به‌سرعت در حال تغییر شرایط اضطراری نیستند [۵]. با پیشرفت سریع فناوری هوش مصنوعی، کاربردهای بالقوه آن در مدیریت بحران توسط جامعه علمی و صنعتی به رسمیت شناخته شده است. هوش مصنوعی با قابلیت‌های قدرتمند پردازش داده، تشخیص الگو و تحلیل‌های پیش‌بینانه، راهکارهای فناورانه نوینی را برای مدیریت بحران مدرن ارائه می‌دهد [۶-۸]. ادغام فناوری‌های مرتبط با هوش مصنوعی در مدیریت بحران می‌تواند کارایی آمادگی پیش از بحران را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد، دقت ارزیابی ریسک خطرات را بهبود بخشد، تخصیص منابع امدادی را بهینه سازد و فرآیندهای پاسخ و بازسازی پس از بحران را سرعت بخشد [۹-۱۱]. در شرایط کنونی که محیطی داده‌محور و مبتنی بر فناوری‌های پیشرفته بر مدیریت بلایا حاکم است، ادغام هوش مصنوعی در مدیریت بلایا به یک روند اجتناب‌ناپذیر تبدیل شده است. این یکپارچه‌سازی توانایی پاسخ‌گویی به سوانح و فجایا را افزایش داده، نقشی اساسی در حفظ ایمنی عمومی ایفا می‌کند و از ثبات اجتماعی حمایت می‌نماید [۱۲].

مرورهای نظام‌مند ادبیات این امکان را فراهم می‌کنند که کاربردهای نوظهور فناوری‌های هوش مصنوعی در مدیریت فجایا پیش‌بینی شوند و در عین حال، مشکلات حل‌نشده و چالش‌های موجود در این زمینه نیز آشکار شود. مرور بر مطالعات حاکی از آن است که مطالعات بسیاری به بررسی کاربردهای کنونی فناوری اطلاعات، داده‌های کلان، هوش مصنوعی و اهمیت روش‌هایی مانند یادگیری عمیق و یادگیری

فجایای مدرن، طبقه‌بندی فناوری‌های مرتبط با هوش مصنوعی، جزئیات کاربردهای آن در مدیریت بحران آب، مقایسه روش‌های سنتی مدیریت بلایا با روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی است. با تکیه بر بررسی نظام‌مند، چالش‌های اصلی تحقیقاتی و کاربردی در زمینه استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت بحران‌های طبیعی به خصوص بحران آب شناسایی می‌شود و به ارائه راهبردهایی در زمینه کاربست روزافزون فناوری اطلاعات و هوش مصنوعی در مدیریت بحران آب پرداخته می‌شود.

۲- مبانی نظری

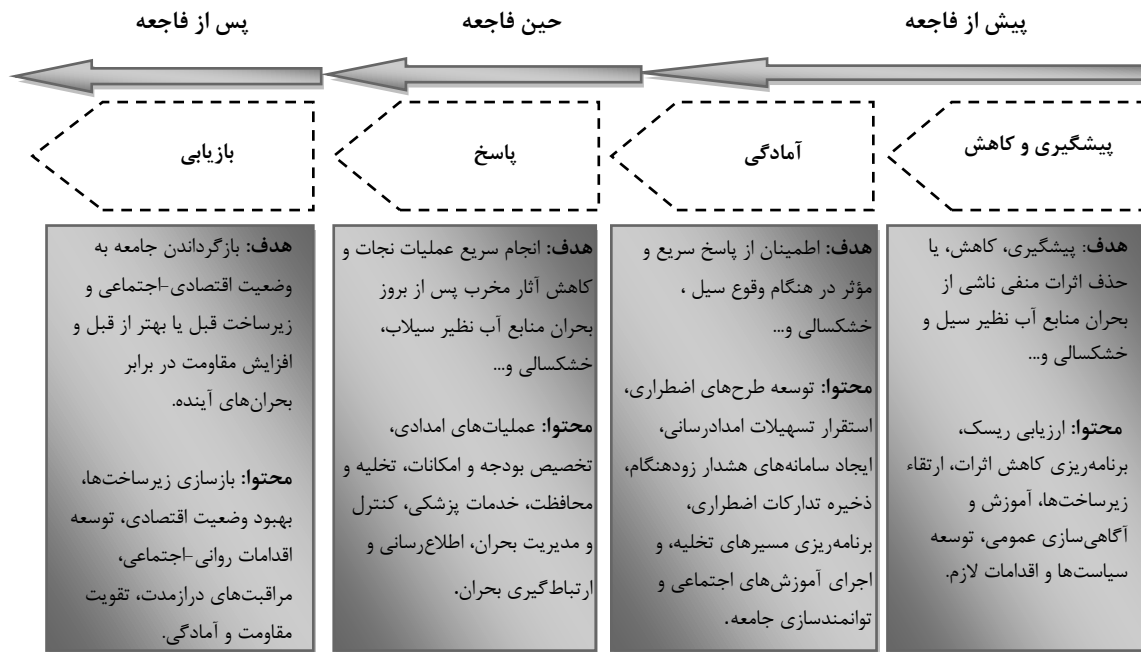
۲-۱ مدیریت بحران

مدیریت بحران عمدتاً شامل چهار فاز اصلی است: پیشگیری یا کاهش اثرات، آمادگی، پاسخ، و بازسازی پس از فاجعه. این چهار مرحله کل فرآیند قبل و بعد از وقوع فاجعه را دربر می‌گیرند و هر یک اهداف و کارکردهای ویژه خود را دارند. پیشگیری از بروز فاجعه بر کاهش احتمال وقوع یا کاهش اثرات آن‌ها از طریق ارزیابی ریسک و کاهش خطر متمرکز است. این مورد شامل اقداماتی مانند مقاوم‌سازی زیرساخت‌های حیاتی، بهینه‌سازی فناوری‌های پایش، اجرای طرح‌های کاربری اراضی، و ارتقای آگاهی عمومی نسبت به خطرات ناشی از فاجعه است [۱۹-۲۱]. آمادگی در برابر فجایا با هدف افزایش آمادگی برای مواجهه با بلایا انجام می‌شود و شامل تدوین برنامه‌های واکنش اضطراری، ایجاد زیرساخت‌های پیشگیری، استقرار سامانه‌های هشدار زودهنگام، و ذخیره‌سازی منابع امدادی است [۵، ۱۲، ۲۲-۲۴]. پاسخ شامل اقدام‌های فوری پس از وقوع حادثه برای حفظ جان و مال افراد است؛ از جمله انجام عملیات نجات اضطراری، توزیع منابع، و مدیریت تخلیه جمعیت [۲۵-۲۶]. بازسازی بر بازگرداندن نظم اجتماعی-اقتصادی به حالت عادی تمرکز دارد و معمولاً شامل تعمیر زیرساخت‌ها، حمایت روان‌شناختی، و بازسازی محیطی است [۲۷-۳۰].

ماشین، در مدیریت بحران پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها به‌طور انتقادی توضیح می‌دهند که فناوری‌های هوش مصنوعی چگونه رویکردهای سنتی مدیریت بحران را دگرگون کرده و یا توجه به عدم قعیت همراه با بحران‌های طبیعی و شرایط پویایی محیطی از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند [۱۳-۱۶]. برخی پژوهش‌ها نیز بیشتر بر کاربرد هوش مصنوعی در مراحل خاص مدیریت سوانح تمرکز داشته‌اند، مانند پیش‌بینی و تحلیل پاسخ به سوانح و فجایا [۷، ۱۷]. آخیار^۱ و همکاران (۲۰۲۴) در مطالعه خود به یک مرور روش‌شناختی ویژه درباره تکنیک‌های یادگیری عمیق و بررسی فنی آن در سه حوزه خاص سیل، زلزله و آتش‌سوزی ساختند و طرح‌های مبتنی بر هوش مصنوعی را در حوزه‌های مربوطه معرفی کرده است [۱۸].

با وجود رشد چشمگیر پژوهش‌ها در حوزه تلفیق هوش مصنوعی با مدیریت بحران‌های طبیعی، هنوز شکاف‌های اساسی در یکپارچه‌سازی چندسطحی داده‌ها و مدل‌های هوشمند در مدیریت بحران آب (به‌ویژه خشکسالی و سیل) مشاهده می‌شود. بیشتر مطالعات موجود به کاربست منفرد ابزارهای یادگیری ماشین یا سامانه‌های پیش‌بینی محدود شده‌اند و کمتر به طراحی چارچوب‌های جامع، تطبیقی و داده‌محور که بتوانند عدم قطعیت، پویایی محیطی و تعامل میان مؤلفه‌های طبیعی-انسانی را هم‌زمان تحلیل کنند، پرداخته‌اند. نوآوری اصلی این پژوهش در ارائه رویکردی نظام‌مند برای طبقه‌بندی فناوری‌های هوش مصنوعی، ارزیابی تطبیقی اثربخشی آن‌ها در مقابل روش‌های سنتی، و ارائه مدل مفهومی داده‌محور برای تصمیم‌گیری هوشمند در شرایط عدم قطعیت است؛ مدلی که بتواند شکاف میان قابلیت‌های فناورانه و نیازهای واقعی مدیریت بحران آب را پر کرده و مسیر گذار از سامانه‌های واکنشی به سامانه‌های پیش‌نگر، خودیادگیر و تاب‌آور را هموار سازد. هدف از انجام این مطالعه شناخت نقش هوش مصنوعی در مدیریت

¹ Akhyar



شکل ۱- گام‌های چهارگانه مدیریت بحران منابع آب، اهداف و محتوای مفهومی

۱-۲-۱ راهبردها و رویکردهای مدیریت بحران منابع آب

در مدیریت بحران منابع آب، لازم است برای هر یک از چهار مرحله، رویکردها و راهبردهای متفاوتی اتخاذ شود تا اثرات بحران کاهش یابد و توانایی‌های پاسخ‌گویی تقویت شود. به‌طور کلی، این راهبردها را می‌توان به دو دسته اقدامات سازه‌ای و اقدامات غیرسازه‌ای تقسیم کرد [۳۱-۳۲]. اقدامات سازه‌ای عمدتاً شامل بهبودهای مهندسی و فیزیکی هستند؛ مانند تقویت زیرساخت‌های حیاتی، بهینه‌سازی جانمایی مراکز امدادی، و افزایش تاب‌آوری سازه‌های موجود است. در مقابل، اقدامات غیرسازه‌ای بیشتر بر ابعاد نهادی، سیاستی و اجتماعی تمرکز دارند؛ از جمله تدوین برنامه‌های واکنش اضطراری، آموزش عمومی در زمینه احتمال بروز خطرات، بهبود سامانه‌های هشدار سریع، و تقویت مشارکت و همکاری‌های اجتماعی. در سال‌های اخیر، رویکردهای مبتنی بر فناوری توجه بیشتری را به خود جلب کرده‌اند و امکان مدیریت بحران هوشمند و بلادرنگ را با بهره‌گیری از هوش مصنوعی، داده‌های کلان، و اینترنت اشیا (IoT) فراهم کرده‌اند [۳۳-۳۵]. لازم به ذکر است، اگرچه مطالعات اندکی به طور مشخص به مسائل اخلاقی در پاسخ به بحران

پرداخته‌اند [۳۶-۳۹] اما در تمام مراحل مدیریت بحران از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. زیرا نقشی تعیین‌کننده در تضمین عدالت و کارآمدی پاسخ به بحران ایفا می‌کنند. مسائل اخلاقی شامل توزیع عادلانه منابع، حفظ حریم خصوصی، و همچنین موضوعات مربوط به شفافیت تصمیم‌گیری و پاسخ‌گویی در شرایط اضطراری هستند. نادیده‌گرفتن این مسائل می‌تواند مستقیماً خسارات ناشی از بحران را افزایش دهد. برای نمونه، توزیع ناعادلانه منابع امدادی ممکن است نارضایتی میان جمعیت آسیب‌دیده را تشدید کند، در حالی که نبود شفافیت اطلاعاتی می‌تواند تصمیم‌گیری را مختل کرده و اعتماد عمومی را کاهش دهد. زمانی که از هوش مصنوعی برای پردازش اطلاعات حساس مانند موقعیت مکانی افراد، وضعیت سلامت و سایر داده‌های شخصی استفاده می‌شود، لازم است مقررات سخت‌گیرانه حفاظت از داده‌ها رعایت شود تا از حقوق حریم خصوصی جمعیت‌های آسیب‌دیده صیانت گردد [۴۰-۴۲]. همچنین شفافیت در تصمیم‌گیری اهمیت اساسی دارد. سامانه‌های هوش مصنوعی باید بتوانند ضمن اتخاذ تصمیم‌های کارآمد، منطق پشت این تصمیم‌ها را به‌طور روشن توضیح دهند تا فرایند تصمیم‌گیری باز و شفاف باقی بماند.

تقویت زیرساخت‌های حیاتی (انرژی، آب، بهداشت و سلامت، حمل و نقل و...) بهینه‌سازی عملیات امداد و نجات (بهینه سازی مکان‌ها، دسترسی به خدمات، مسیرهای امداد و...) ارزیابی و تخصیص سریع و بهینه منابع افزایش تاب اوری (اقتصادی، اجتماعی، اکولوژیک، تکنولوژیک، زیرساختی)	اقدامات ساختاری	راهبردهای مدیریت سوانح، حوادث و بحران‌های منابع آب
توسعه برنامه‌های پاسخ اضطراری و بهبود سیستم‌های هشدار زودهنگام افزایش مشارکت و آموزش عمومی در حوزه مدیریت بحران سیلاب، خشکسالی و... ارتقاء سیستم‌های آماری و آمادگی برای مقابله و کاهش آسیب‌ها مقاوم‌سازی و هماهنگی منابع انسانی، آموزش مداوم، بهبود سیستم‌های پاسخگویی طراحی و اجرای سیاست‌های انطباق و سازگاری برای کاهش ریسک و ارتقاء اثرگذاری	اقدامات غیر ساختاری	
هوشمندسازی زیرساخت‌ها و سیستم‌های حیاتی استفاده از هوش مصنوعی و داده‌های بزرگ توسعه فناوری‌های IOT برای نظارت لحظه‌ای توسعه و بهره‌برداری از فناوری‌های فضایی و نقشه‌برداری دقیق استفاده از راهکارهای مبتنی بر اشتراک‌گذاری منابع و اطلاعات	اقدامات فناوریانه و هوشمند سازی	

شکل ۲- راهبردهای مدیریت سوانح، حوادث و بحران‌های منابع آب در پرتو هوش مصنوعی

۲-۲ هوش مصنوعی (AI^۱)

هوش مصنوعی به توانایی سامانه‌های کامپیوتری برای تقلید هوش انسانی اشاره دارد و به آنها امکان می‌دهد عملکردهایی مانند ادراک، یادگیری، استدلال، و تصمیم‌گیری را انجام دهند. از سال ۲۰۰۶، علاقه پژوهشی به بهره‌گیری از هوش مصنوعی در مدیریت بحران رو به افزایش بوده و حوزه‌های مختلفی از پیش‌بینی داده‌محور تا مدل‌های خودکار بهینه‌سازی تصمیم یا پشتیبان تصمیم را در بر گرفته است.

۲-۲-۱ یادگیری نظارت شده

در فرایندهای یادگیری نظارت شده، مدل با استفاده از داده های برچسب گذاری شده شامل ورودی ها و خروجی های مورد انتظار آموزش می‌بیند. این آموزش به مدل امکان می‌دهد رابطه نگاشت میان ورودی و خروجی را درک کند و در نتیجه توانایی پیش‌بینی به‌دست آورد و بتواند برای داده‌های ورودی جدید خروجی تولید کند [۴۳]. از مهمترین الگوریتم‌های یادگیری نظارت‌شده شامل درخت تصمیم (DT^۲)، ماشین بردار پشتیبان (SVM^۳)، شبکه‌های عصبی

(NN^۴)، رگرسیون خطی (LR^۵) و... هستند [۴۴-۴۵].

یادگیری نظارت‌شده به‌طور گسترده در مدیریت بحران برای پیش‌بینی و ارزیابی سوانح و فجایا به کار می‌رود. برای نمونه از داده‌های تاریخی هواشناسی و اطلاعات جغرافیایی برای تخمین پوشش سطح زمین و احتمال بروز خطرات استفاده می‌شود [۴۶]. الگوریتم‌های یادگیری نظارت‌شده می‌توانند احتمال وقوع سیلاب در مناطق مختلف را پیش‌بینی کنند [۴۷]. این الگوریتم‌ها می‌توانند به تصمیم‌گیرندگان در مدیریت بحران کمک کنند تا با بهره‌گیری از اطلاعات فاجعه بار گذشته و پارامترهای محیط‌زیستی مرتبط، سیاست‌های پیشگیرانه مناسب را تدوین کرده و برنامه‌های واکنش به بحران را تقویت کنند.

۲-۲-۲ یادگیری بدون نظارت

برخلاف یادگیری نظارت‌شده، یادگیری بدون نظارت به مجموعه داده‌های از پیش برچسب‌گذاری‌شده یا از پیش آموزش‌دیده متکی نیست. هدف یادگیری بدون نظارت، کاوش ساختار و الگوهای درونی داده‌هاست. این فرایند برای کشف ویژگی‌های پنهان و روابط ذاتی در داده‌ها طراحی

¹ Artificial Intelligence

² Decision Trees

³ Support Vector Machines

⁴ Neural Networks

⁵ Linear Regression

است، مدل خودآموز مناطق آسیب‌دیده را به‌درستی شناسایی می‌کند [۵۸]. همچنین، این روش می‌تواند برای پردازش داده‌های شبکه‌های اجتماعی جهت پاسخ‌گویی سریع در طول بحران و تخصیص منابع به کار رود، تا سرعت مدیریت بحران و تخصیص منابع مؤثرتر شود [۵۹].

۲-۲-۴ یادگیری عمیق

یادگیری عمیق از شبکه‌های عصبی عمیق برای تقلید روش‌های پردازش داده مغز انسان استفاده می‌کند. با ساخت مدل‌های پیچیده چندلایه، ویژگی‌های انتزاعی سطح بالا را از داده‌ها یاد می‌گیرد. این روش به‌ویژه در زمینه‌هایی مانند تشخیص تصویر، تشخیص گفتار و پردازش زبان طبیعی مؤثر است [۶۰-۶۱]. مدل‌هایی مانند شبکه‌های عصبی به‌طور گسترده در مطالعات اخیر به کار رفته‌اند [۶۲-۶۵]. این مدل‌ها قادرند به‌طور مستقل ویژگی‌های حیاتی را در مجموعه داده‌های وسیع یاد گرفته، شناسایی کنند و عملکرد پیش‌بینی را انجام دهند. یادگیری عمیق به‌طور گسترده در پژوهش و عمل مدیریت بحران، به‌ویژه در مدل‌سازی سیل، و در بهبود کارایی تخصیص منابع امداد و نجات به کار گرفته شده است [۶۶]. با تجزیه و تحلیل داده‌های هواشناسی تاریخی، مدل‌های یادگیری عمیق می‌توانند روندهای اقلیمی آینده را در مناطق خاص پیش‌بینی کنند و بدین ترتیب، امکان آمادگی پیشگیرانه برای وقوع بحران‌ها و فجایایی مانند سیلاب‌های طغیانگر را فراهم آورد [۶۷].

۲-۲-۵ یادگیری تقویتی

یادگیری تقویتی به این موضوع می‌پردازد که چگونه عامل‌ها (مانند ربات‌ها یا برنامه‌های نرم‌افزاری) با محیط خود تعامل می‌کنند تا پاداش تجمعی را به حداکثر برسانند [۶۸]. برخلاف یادگیری نظارت‌شده، یادگیری تقویتی به مجموعه داده‌های از پیش برچسب‌گذاری‌شده متکی نیست. در عوض، راهبردهای رفتاری را از طریق تعامل مستمر بین عامل و محیطش توسعه می‌دهد. عامل‌ها با ایجاد تعادل بین اکتشاف

شده است [۴۸]. یادگیری بدون نظارت عمدتاً شامل تکنیک‌هایی مانند خوشه‌بندی و کاهش ابعاد است. خوشه‌بندی شامل سازماندهی داده‌ها در گروه‌هایی است که در آن‌ها موارد درون هر گروه، شباهت بیشتری به یکدیگر دارند. کاهش ابعاد با کاهش تعداد متغیرها، در حالی که مهم‌ترین اطلاعات حفظ می‌شوند، به ساده‌سازی مجموعه داده‌ها کمک می‌کند [۴۹]. الگوریتم‌های رایج یادگیری بدون نظارت عبارتند از خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA^۱) و تحلیل مؤلفه‌های مستقل (ICA^۲) [۵۰-۵۱]. یادگیری بدون نظارت می‌تواند در شناسایی الگوها و ناهنجاری‌ها در داده‌های بلایا مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از تحلیل خوشه‌بندی، قادر است مناطقی با ویژگی‌های مشابه بحران را شناسایی کند که به پیش‌بینی مناطق احتمالی آسیب‌دیده کمک می‌کند [۵۲]. همچنین می‌توان از یادگیری بدون نظارت در پردازش داده‌های تاریخی گسترده حوادث و سوانح برای شناسایی عوامل خطر بالقوه استفاده کرد و بدین ترتیب، پشتیبانی داده‌محور در برنامه‌ریزی فراهم شود [۵۳].

۲-۲-۳ یادگیری نیمه نظارت شده

یادگیری نیمه‌نظارت‌شده مدل‌ها را از روی حجم زیادی از داده‌های بدون برچسب‌گذاری و مقدار کمی داده برچسب‌دار یاد می‌گیرد. یادگیری نیمه‌نظارت‌شده زمانی کاربرد دارد که جمع‌آوری داده‌های برچسب‌دار پرهزینه یا کمیاب باشد، با این وجود داده‌های برچسب‌دار می‌تواند تفاوت قابل توجهی در عملکرد مدل ایجاد کند [۵۴]. رویکردهای یادگیری نیمه‌نظارت‌شده عمدتاً شامل خودآموز، شبکه‌های مولد تخصصی (GANs^۳)، رویکردهای مبتنی بر گراف هستند [۵۵-۵۷].

یادگیری نیمه‌نظارت‌شده به‌طور گسترده در مدیریت بحران کاربرد ندارد، اما دارای کاربردهای بسیار وسیعی در پردازش تصاویر ماهواره‌ای است. اگرچه حاشیه‌نویسی تصاویر کمتر

^۱ Principal Component Analysis

^۲ Independent Component Analysis

^۳ Generative Adversarial Networks

۳- روش پژوهش

این پژوهش یک مطالعه مروری نظام‌مند با هدف بررسی و تحلیل کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت بحران منابع آب است. روش تحقیق بر پایه تجزیه و تحلیل محتوایی مطالعات موجود و استخراج الگوهای کاربردی فناوری‌های AI در چرخه مدیریت بحران‌های طبیعی به خصوص بحران آب تدوین شده است. برای گردآوری داده‌ها، جستجوی نظام‌مند در دو پایگاه معتبر علمی شامل Web of Science، Google Scholar انجام شد. کلمات کلیدی مورد استفاده شامل ترکیب‌هایی از عبارت‌های زیر بودند: Artificial Deep Learning, Machine Learning, Intelligence, Water Crisis Natural Disaster, Management Drought Prediction, Flood Management, Disaster Response, در مجموع ۲۵۸ پژوهش مرتبط با هوش مصنوعی و مدیریت بحران‌های طبیعی، به‌ویژه بحران آب، شناسایی و وارد فرایند غربالگری شدند. معیارهای ورود مطالعات شامل موارد زیر بود:

- ارتباط مستقیم با موضوع مدیریت بحران و فناوری‌های هوش مصنوعی
- تمرکز بر بحران‌های مرتبط با منابع آب (خشکسالی، سیل، کم‌آبی، مدیریت مخازن و...)
- انتشار از سال‌های ۲۰۱۰ به بعد
- دسترسی به متن کامل مقاله
- پس از ارزیابی عنوان، چکیده و متن کامل، مطالعات منتخب وارد مرحله تحلیل محتوا شدند. برای تحلیل داده‌ها از روش تحلیل محتوای کیفی و استقرایی استفاده شد. هر مطالعه بر اساس نوع فناوری هوش مصنوعی مورد استفاده، مرحله مدیریت بحران، نتایج، نقاط ضعف، چالش‌ها و پیشنهادها ارائه شده، استخراج و کدگذاری شد. کاربردهای AI در چهار مرحله استاندارد مدیریت بحران، پیشگیری و کاهش خطرات، آمادگی، پاسخ، بازسازی و بازیابی طبقه بندی شدند. بر اساس تحلیل روندهای پژوهشی، فناوری‌های هوش مصنوعی در شش حوزه اصلی، یادگیری نظارت‌شده، یادگیری بدون نظارت، یادگیری

که شامل آزمون و خطا است، و بهره‌برداری که در آن از دانش موجود برای تصمیم‌گیری مؤثرتر استفاده می‌شود، راهبردهای بهینه را کسب می‌کنند [۶۹]. الگوریتم‌های رایج یادگیری تقویتی شامل یادگیری Q، شبکه‌های Q عمیق [۷۰-۷۱] و همچنین الگوریتم بهینه‌سازی [۷۲] و الگوریتم بازیگر-منتقد مزیت نامتقارن [۷۳] هستند که محبوبیت آن‌ها از سال ۲۰۲۲ آغاز شده است. یادگیری تقویتی عمدتاً در مدیریت بحران برای بهینه‌سازی تصمیم‌گیری‌های اضطراری و تخصیص منابع امدادی به کار می‌رود [۷۴-۷۵]. یادگیری تقویتی همچنین می‌تواند برای بهینه‌سازی مسیرهای نجات مورد استفاده قرار گیرد و تخصیص و استفاده کارآمد از تیم‌ها و منابع امداد و نجات را تضمین کند [۷۶]. علاوه بر این، یادگیری تقویتی در شبیه‌سازی سناریوهای واکنش اضطراری مفید است. از طریق شبیه‌سازی، عامل‌ها آموزش می‌بینند تا در محیط‌های پیچیده و پویا، تصمیمات بهینه بگیرند و سرعت و اثربخشی تلاش‌های پاسخ به بحران را بهبود بخشند [۷۷].

۲-۲-۶ یادگیری عمیق تقویتی

یادگیری عمیق تقویتی نمایانگر لبه تکنولوژی توسعه یافته هوش مصنوعی امروزی است [۷۸]. این رویکرد از شبکه‌های یادگیری عمیق برای شبیه‌سازی ادراک محیطی در فرآیند تصمیم‌گیری بهره می‌برد [۷۹]. یادگیری عمیق تقویتی، به عامل‌ها امکان می‌دهد تا در محیط‌های بصری پیچیده، استراتژی‌هایی را بیاموزند [۸۰-۸۱]. این تکنیک به‌طور گسترده در زمان‌بندی وظایف امدادسانی در حوادث و سوانح و سیستم‌های پشتیبانی تصمیم خودکار به کار گرفته می‌شود. این رویکرد امکان تخصیص پویای منابع امدادی را فراهم کرده و پاسخ‌های بی‌درنگ به شرایط متغیر محیطی را تسهیل می‌کند [۸۲-۸۵]. علاوه بر این، یادگیری عمیق تقویتی به پهبادهای و ربات‌های نجات اجازه می‌دهد تا به‌طور مستقل در محیط‌های حادثه‌دیده عمل کرده و عملیات جستجو و نجات را انجام دهند [۸۶-۸۷].

اولیه سوانح و حوادث، یادگیری تقویتی برای راهبردهای واکنش، و ادغام داده‌ها برای یکپارچه‌سازی اطلاعات و غیره. - در مرحله پیشگیری و کاهش: مدل‌های هوش مصنوعی در ادغام با سنجش از دور برای شناسایی احتمال بروز خطرات سوانحی نظیر سیلاب یا خشکسالی به کار می‌روند. محققانی نظیر عامر^۱ و همکاران (۲۰۲۱) و آخیار و همکاران (۲۰۲۴) دریافتند که این روش‌ها، عملکرد بهتری نسبت به روش‌های بصری سنتی دارند و می‌توانند نتایج دقیق‌تری در ارتباط با مناطق پرخطر ارائه دهند.

- در مرحله آمادگی: هوش مصنوعی می‌تواند در شبیه‌سازی و آموزش به کار رود. ژو و لی^۲ (۲۰۲۱) دریافتند که استفاده از واقعیت مجازی (VR^۳) در تمرینات اضطراری می‌تواند دقت واکنش و حافظه کارآموزان را بیش از ۲۰٪ نسبت به تمرینات سنتی بهبود بخشد.

- در مرحله واکنش: ابزارهای هوش مصنوعی برای سریع‌تر و دقیق‌تر کردن ارزیابی خسارت به کار گرفته شده‌اند. برای مثال، نابی^۴ و همکاران (۲۰۲۲) یک مدل ترکیبی U-Net را برای شناسایی خسارت سیل در تصاویر ماهواره‌ای به کار بردند که بر این مهم تأکید دارد که بسیار بهتر از روش‌های سنتی عمل نموده و می‌تواند فرآیند تصمیم‌گیری را تسریع کرده و دقت آن را افزایش دهد.

- در مرحله بازیابی و بازسازی: هوش مصنوعی در شناسایی خسارت و حمایت روانی به کار گرفته می‌شود. چنگ^۵ و همکاران (۲۰۲۴ a) از یادگیری عمیق برای بازرسی خسارت ساختمان استفاده کردند که می‌تواند میزان نیروی انسانی در محل را بیش از ۴۰٪ کاهش دهد. همچنین، لی^۶ و همکاران (۲۰۲۳) از نظرسنجی‌های واقعیت مجازی (VR) برای درک احساسات بازماندگان و طراحی برنامه‌های بازیابی بهتر استفاده کردند.

نیمه‌نظارت‌شده، یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی، یادگیری عمیق تقویتی دسته‌بندی شدند و کاربردهای مختلف AI در بحران آب در هر یک از این حوزه‌ها به طور تفکیک شده بررسی و تحلیل شد. به کمک نتایج تحلیل محتوای مطالعات، شکاف‌های پژوهشی و حوزه‌هایی که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند شناسایی شدند. مهم‌ترین این شکاف‌ها عبارتند از نیاز به تقویت تاب‌آوری پیش از بحران و پس از بحران، توسعه و مقاوم‌سازی زیرساخت‌های حیاتی مبتنی بر AI، طراحی شبکه‌های بهینه تخلیه بحران، مدل‌سازی و برنامه‌ریزی بازسازی بلندمدت و پایدار پس از بحران، کمبود مدل‌های هوشمند برای پیش‌بینی چندمتغیره بحران آب و چالش کیفیت داده، کمبود داده و عدم دسترسی به داده‌های بلندمدت. در این مطالعه، ضمن طبقه‌بندی فناوری‌ها، ارتباط بین نوع بحران، مرحله مدیریت بحران، نوع فناوری هوش مصنوعی توسط یک رویکرد تلفیقی تحلیل شد تا الگوی جامعی از کارآمدترین روش‌ها ارائه شود.

۴- یافته‌های پژوهش

۴-۱ کاربرد فناوری‌های هوش مصنوعی در حوزه مدیریت بحران منابع آب

بدون شک، در پژوهش و عملکردهای مدرن مدیریت بحران منابع آب، فناوری هوش مصنوعی پیشگام تحول است؛ به‌ویژه با افزایش دقت هشدارها، سرعت واکنش‌ها و کارایی تلاش‌های امدادرسانی، روش‌های سنتی مقابله با پیشگیری و کاهش احتمال بروز و خسارات، آمادگی، واکنش، بازیابی و بازسازی را دگرگون می‌سازد. مرور بر مطالعات بیانگر آن است که هوش مصنوعی در هر مرحله از مدیریت بحران منابع آب پیشرفت‌های قابل توجهی داشته است. در جدول ۱، تأثیرات دگرگون‌کننده فناوری‌های هوش مصنوعی را در مراحل مختلف مدیریت بحران منابع آب به‌طور کامل نشان می‌دهد. این موارد عبارتند از: یادگیری عمیق بر روی تصاویر سنجش از دور، یادگیری ماشین برای پیش‌بینی و هشدار

¹ Aamir

² Zhu & Li

³ Virtual Reality

⁴ Nabiee

⁵ Cheng

⁶ Li

جدول ۱- مقایسه مدیریت سنتی و مدیریت مبتنی بر هوش مصنوعی در بحران‌های منابع آب

فاز مدیریت بحران	رویکرد سنتی	تغییرات پس از معرفی هوش مصنوعی
پیشگیری و کاهش خطر	پیش‌بینی بحران: عمدتاً بر اساس تجربه و داده‌های تاریخی نقشه‌برداری مناطق پرخطر: استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و سنجش از دور تدوین برنامه‌ها: فرمولاسیون دستی برنامه‌های واکنش به سوانح و حوادث و اقدامات کاهش خطر	ارزیابی و پیش‌بینی دقیق‌تر: استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و یادگیری عمیق برای ارزیابی دقیق‌تر ریسک و پیش‌بینی تحلیل پیشرفته سنجش از دور: ادغام تحلیل‌های پیشرفته سنجش از دور، مانند شبکه‌های عصبی برای تشخیص خودکار تصاویر و شناسایی مناطق پرخطر و تغییرات آن تدوین خودکار برنامه‌ها: استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوش مصنوعی برای تدوین خودکار برنامه‌های کاهش خطر
آمادگی	تخصیص منابع: اتکا به برنامه‌های ثابت برای مسیرهای تخلیه و تخصیص منابع آموزش و تمرین: اتکا به روش‌های دستی برای رزمایش‌ها و آموزش‌های اضطراری جمع‌آوری و انتشار اطلاعات: اتکا به رسانه‌های سنتی و روش‌های ارتباطی	بهینه‌سازی پویا منابع: استفاده از یادگیری عمیق و یادگیری تقویتی برای بهینه‌سازی پویا تخصیص منابع پیش از وقوع فاجعه، با قابلیت انطباق با شرایط متغیر رزمایش‌های واقع‌گرایانه: استفاده از فناوری‌های واقعیت مجازی (VR) و واقعیت افزوده (AR) برای رزمایش‌های اضطراری بلایای واقع‌گرایانه‌تر و تعاملی‌تر انتشار سریع اطلاعات: استفاده از تحلیل داده‌های بلادرنگ هوش مصنوعی و ابزارهای نظارت بر شبکه‌های اجتماعی برای انتشار سریع اطلاعات و راهنمایی‌های واکنش به بلایا
پاسخگویی	عملیات امدادی: اغلب بر اساس اطلاعات محدود بلادرنگ تخصیص منابع: اتکا به الگوریتم‌های بهینه‌سازی سنتی که در انطباق با تغییرات محیطی پویا مشکل دارند تصمیم‌گیری: تصمیم‌گیری‌های واکنش به بلایا بر اساس ورودی‌های داده محدود، منجر به فرآیند تصمیم‌گیری کندتر می‌شود	اطلاعات میدانی بلادرنگ: استفاده از تحلیل داده‌های بلادرنگ و فناوری پهپادها برای ارائه اطلاعات فوری در محل، هدایت عملیات امدادی بهینه‌سازی تخصیص منابع: استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق برای بهینه‌سازی تخصیص منابع، اطمینان از تحویل سریع و مؤثر منابع تسریع و دقت تصمیم‌گیری: ادغام ورودی‌های داده متعدد و مدل‌های تحلیل پیشرفته برای تسریع و تدقیق فرآیند تصمیم‌گیری
بازیابی	ارزیابی سازه‌ها: ارزیابی ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها بر اساس بررسی‌های میدانی بازیابی اکولوژیکی: استراتژی‌های احیای اکولوژیکی بر اساس تجربه تاریخی و داده‌های علمی محدود بازیابی اقتصادی و روانی: استراتژی‌های بازیابی اقتصادی و روانی بر اساس رفتارسنجی	تحلیل میزان خسارت: استفاده از تشخیص تصویر و یادگیری عمیق برای تجزیه و تحلیل میزان خسارت بهینه‌سازی برنامه‌های احیا: استفاده از مدل‌های اکولوژیک و رویکردهای یادگیری ماشین برای پیش‌بینی اثربخشی راهبردهای احیای اکولوژیک و بهینه‌سازی برنامه‌های احیا تحلیل وضعیت روانی: استفاده از رویکرد داده‌محور و فناوری‌های واقعیت مجازی برای تحلیل وضعیت روانی و توسعه استراتژی‌های بازیابی هدفمند برای جمعیت

۴-۲ تأثیر فناوری‌های هوش مصنوعی در ارتقاء

بهره‌وری در فرایند مدیریت بحران منابع آب

استفاده از شبکه‌های عصبی، توان پردازش داده‌های تصویری جمع‌آوری شده از ماهواره‌ها و پهپادها را به‌طور چشمگیری بهبود داده است [۷۸-۹۱]. این الگوریتم‌ها می‌توانند به‌صورت خودکار خسارت را در مناطق آسیب‌دیده شناسایی، طبقه‌بندی و کمی‌سازی کنند و از ارزیابی ریسک پیش از وقوع و ارزیابی خسارت پس از وقوع پشتیبانی کنند. از منظر

نوآوری فناوریانه، الگوریتم‌های یادگیری عمیق دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به الگوریتم‌های معمول دارند، زیرا می‌توانند با آموزش یک شبکه عصبی عمیق و استفاده از حجم زیادی از داده‌های تصویری مرتبط با حوادث و سوانح که برچسب‌گذاری شده‌اند، ویژگی‌های پیچیده تصویر را یاد بگیرند و پیش‌بینی‌های بسیار دقیق‌تری بر روی تصاویر جدید انجام دهند. هوش مصنوعی می‌تواند دقت پیش‌بینی در سامانه‌های پیش‌بینی و هشدار زود هنگام و همچنین

سناریوهای مختلف امدادی را شبیه‌سازی کرده و از طریق آزمون و خطا، مناسب‌ترین طرح اقدام را شناسایی کند [۱۱۲-۱۱۳]. این شامل بهینه‌سازی مسیرهای تخلیه، انتخاب مناسب‌ترین مسیر برای تیم‌های امدادی و مدیریت زمان است. افزون بر آن، یادگیری تقویتی می‌تواند برای تصمیم‌گیری‌های پیشرفته‌تر به کار رود؛ مانند تنظیم راهبردهای نجات در حین پاسخ به بحران و سازگار شدن با روندهای نوظهور در الگوی گسترش بحران [۱۱۴-۱۱۷]. نوآوری یادگیری تقویتی در امداد رسانی، عمدتاً در توانایی یادگیری سازگاران، قابلیت بهینه‌سازی چندهدفه و تصمیم‌گیری بلادرنگ آن نهفته است؛ ویژگی‌هایی که باعث می‌شوند این روش بتواند از تغییرات همراه با پویایی و عدم قطعیت پویا، یادگیری مؤثرتری داشته باشد [۱۱۸-۱۲۰]. به‌کارگیری فناوری ادغام داده‌های ناهمگن چندمنبعی در مدیریت بحران می‌تواند یک تصویر جامع و بلادرنگ از وضعیت بحران در اختیار تصمیم‌گیران قرار دهد. با ادغام اطلاعات منابع مختلف داده، سرعت و کارایی واکنش در مدیریت بحران به‌طور چشمگیری بهبود می‌یابد [۱۲۱-۱۲۴]. این منابع داده شامل رسانه‌های اجتماعی، داده‌های حسگرها، تصاویر ماهواره‌ای و گزارش‌های رسانه‌های سنتی هستند. نوآوری فناوری ادغام داده در عرصه مدرن مدیریت بحران در این است که می‌تواند منابع داده ساختاریافته و غیرساختاریافته را در قالب یک رابط یکپارچه پشتیبان تصمیم ترکیب کند [۱۲۵-۱۲۶]. فناوری ادغام داده‌های چندمنبعی عمدتاً داده‌های چندسطحی و چندوجهی را یکپارچه می‌کند، می‌تواند پویایی‌های بحران را به‌صورت بلادرنگ به‌روزرسانی کند و در تصمیم‌گیری‌های مدیریت بحران نقش حمایتی ایفا نماید [۱۲۳، ۱۲۷-۱۲۸].

۴-۳ چالش‌های هوش مصنوعی در مدیریت بحران منابع آب

اگرچه پژوهش‌های موجود پیشرفت‌های معناداری در نوسازی مدیریت بحران از طریق فناوری‌های پیشرفته داشته‌اند، ما همچنان با مجموعه‌ای از چالش‌ها و شکاف‌های پایدار در مراحل مختلف چرخه مدیریت بحران روبه‌رو هستیم. با تأمل بر این محدودیت‌ها، هدف دستیابی به درک

کارایی واکنش به حوادث و سوانح را بهبود دهد [۹۲-۹۳]. با استفاده از داده‌های تاریخی هواشناسی، اطلاعات جغرافیایی و سایر شاخص‌های محیط‌زیستی مرتبط، مدل می‌تواند پیش‌نشانگرهای رخداد‌های اقلیمی حدی و دیگر فجایای طبیعی را یاد گرفته و شناسایی کند [۹۸-۹۴]. همچنین الگوریتم‌هایی نظیر درخت تصمیم و ماشین بردار پشتیبان در وظایف طبقه‌بندی به کار گرفته می‌شوند [۱۰۲-۹۹].

این مدل‌ها با تحلیل داده‌های رویدادهای تاریخی، عوامل و الگوهای کلیدی منجر به وقوع حوادث و سوانح را شناسایی می‌کنند. مهم‌تر از آن، شبکه‌های عصبی عمیق برای پردازش و تحلیل مجموعه‌داده‌های هواشناسی بزرگ مقیاس و با ابعاد بالا استفاده می‌شوند. این شبکه‌ها به‌ویژه برای ثبت روابط غیرخطی پیچیده مناسب‌اند و توانایی پیش‌بینی رویدادهای نادر یا پیچیده را بهبود می‌بخشند [۱۰۴-۱۰۳]. مدل‌های یادگیری عمیق همچنین قادرند به‌صورت خودکار در گذر زمان و با انباشت داده‌ها، دقت مدل پیش‌بینی را ارتقاء می‌دهند. برای مثال، در پیش‌بینی مسیر و شدت توفان‌های حاره‌ای و پیش‌بینی دوره‌های بازگشت سیلاب این مدل‌ها نسبت به مدل‌های سنتی دقت بالاتری دارند [۱۰۵]. این فناوری می‌تواند به تصمیم‌گیران کمک کند تا برنامه‌ریزی تخلیه و تخصیص منابع را مؤثرتر انجام دهند و بدین ترتیب، تلفات احتمالی جانی و خسارت‌های مالی را به‌طور چشمگیری کاهش دهند.

روش‌های یادگیری تقویتی می‌توانند فرایندهای امداد رسانی، تخصیص منابع و برنامه‌ریزی عملیات نجات را به‌صورت پویا بهینه کنند؛ امری که به تصمیم‌گیران کمک می‌کند در شرایط پویا و نامطمئن بحران، تصمیم‌های بهینه اتخاذ کنند [۹۶، ۱۰۶-۱۰۹]. یادگیری تقویتی قادر است منابع محدود امدادی را به‌طور پویا تخصیص دهد. با یادگیری از مأموریت‌های امدادی گذشته، مدل‌های یادگیری تقویتی می‌توانند تحت شرایط مشخص، بهینه‌ترین راهبرد تخصیص منابع را پیش‌بینی کنند [۱۱۰-۱۱۱]. طبق پژوهش‌ها، این فناوری به‌ویژه برای مراحل اولیه بروز بحران مناسب است؛ زمانی که شرایط محیط و نیازها به‌طور مداوم در حال تغییر هستند. علاوه بر این، از یادگیری تقویتی در برنامه‌ریزی مأموریت‌های نجات نیز استفاده می‌شود تا

نگرانی‌ها با یافته‌های اخیر محققانی نظیر آدامز و همکاران (۲۰۲۴) همسو است که بر ضرورت بهبود درک، گردآوری و توزیع داده‌های مرتبط با بحران برای پشتیبانی از نتایج قابل‌اعتماد و کاربردی مبتنی بر هوش مصنوعی تأکید می‌کنند.

۴-۳-۲ چالش‌های فناوری هوش مصنوعی در مرحله آمادگی در برابر بحران منابع آب

در مرحله آمادگی در برابر بحران‌هایی نظی سیل، خشکسالی و... برنامه‌ریزی لجستیک تخلیه، برای مواجهه با سوانح و حوادث قریب‌الوقوع مانند سیل، اهمیتی اساسی دارد. هرچند پژوهش‌های موجود از مدل‌های یادگیری عمیق برای بهینه‌سازی مسیرهای تخلیه و توزیع لجستیک [۱۳۳-۱۳۲] و نیز از تحلیل مبتنی بر هوش مصنوعی برای مطالعه رفتار تخلیه استفاده کرده‌اند [۱۳۴-۱۳۵]، اما کاربرد و پژوهش یکپارچه هوش مصنوعی در برنامه‌ریزی و طراحی شبکه‌های تخلیه پیش از بحران همچنان محدود است. در حال حاضر، طراحی شبکه‌های تخلیه پیش از بروز سیلاب غالباً بر روش‌های سنتی مانند مدل‌سازی بهینه‌سازی چندهدفه و الگوریتم‌های ابتکاری مدرن متکی است [۱۳۶-۱۳۷]. این روش‌ها نمی‌توانند به‌طور کامل از داده‌های بلادرنگ و مدل‌های پیش‌بینی‌کننده بهره ببرند تا برنامه‌های تخلیه را به صورت پویا بهینه کنند و با عدم قطعیت و پویایی‌های فرایند تخلیه سازگار شوند. تقویت کاربرد هوش مصنوعی در طراحی شبکه تخلیه پیش از بحران می‌تواند انطباق‌پذیری و سرعت واکنش برنامه‌های تخلیه را بهبود دهد، و با شبیه‌سازی و تحلیل سناریوهای مختلف تخلیه، گلوگاه‌ها و مسائل بالقوه را از پیش شناسایی کرده و بدین‌ترتیب اقدامات تخلیه در عمل را کارآمدتر هدایت کند.

۴-۳-۳ چالش‌های فناوری هوش مصنوعی در مرحله پاسخ به بحران منابع آب

پژوهش‌ها درباره مرحله پاسخ به بحران که در آن از هوش مصنوعی بهره گرفته می‌شود، گسترده‌تر از سایر مراحل است و جنبه‌های متعددی از تحلیل داده تا پشتیبانی از تصمیم‌گیری را در بر می‌گیرد. با این حال، علی‌رغم برخی

جامع‌تری از ظرفیت‌ها و محدودیت‌های فناوری‌های نوظهور در این حوزه و همچنین شناسایی مسیرهای امیدبخش برای پژوهش‌های آینده و اجرای عملی است.

۴-۳-۱ چالش‌های فناوری هوش مصنوعی در مرحله پیشگیری و کاهش خطر

اگرچه برخی پژوهش‌ها به تقویت تاب‌آوری پیش از وقوع بحران با استفاده از هوش مصنوعی اشاره کرده‌اند [۴۲، ۱۲۹-۱۳۰]. تاب‌آوری پیش از بحران شامل ابعاد متعددی از جمله ارزیابی و برنامه‌ریزی ریسک، تقویت زیرساخت‌های حیاتی، و آموزش و آمادگی برای بلایای احتمالی است [۱۳۱]. اگرچه فناوری‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی و ارزیابی ریسک، عملکرد برجسته‌ای دارند، اما کاربرد آن‌ها در افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها و جوامع همچنان محدود است. ادغام فناوری‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مدل‌های ریاضی در برنامه‌ریزی و طراحی زیرساخت‌های حیاتی مانند مسیل‌ها می‌تواند تاب‌آوری سیستم را در مرحله پیشگیری به‌طور چشمگیری افزایش دهد. با این حال، یکی از گلوگاه‌های اساسی که سهم هوش مصنوعی در ارتقای تاب‌آوری پیش از بحران را محدود می‌کند، همچنان کیفیت داده‌ها است. فراتر از مسئله بهنگام بودن داده‌ها، قابلیت اطمینان کاربردهای هوش مصنوعی در بستر بحران به‌شدت تحت تأثیر صحت داده‌ها و نبود فراداده‌های استاندارد شده قرار دارد. داده‌های مرتبط با بحران اغلب گذرا، با قالب‌های ناسازگار و گردآوری‌شده از منابع ناهمگن مانند ماهواره‌ها، رسانه‌های اجتماعی و دستگاه‌های اینترنت اشیا هستند. این ناهماهنگی‌ها می‌تواند منجر به مجموعه‌داده‌های ناقص یا نادقیق شود که عملکرد مدل‌های هوش مصنوعی را به‌ویژه در وظایفی مانند پیش‌بینی بلادرنگ، هشدار زودهنگام و ارزیابی زیرساخت‌ها، تضعیف می‌کند. این مسائل موجب ورود عدم‌قطعیت قابل‌توجه به داده‌های آموزشی می‌شود و در نهایت اعتبار و بازتولیدپذیری سامانه‌های هوشمند مدیریت بحران را تضعیف می‌کند. پرداختن به این چالش‌ها مستلزم توسعه استانداردهای مشترک فراداده، بهبود پروتکل‌های اعتبارسنجی داده، و تقویت سازوکارهای حکمرانی داده در سراسر زنجیره مدیریت بحران است. این

پیشرفت‌ها، همچنان چالش‌های کلیدی و حوزه‌های کاوش‌نشده باقی مانده‌اند. اگرچه فناوری‌های اخیر توانمندی‌های بالایی در پردازش و تحلیل حجم عظیمی از داده‌های مرتبط با بحران نشان داده‌اند، همچنان با چالش‌هایی در تضمین بهنگام‌بودن، دقت و کامل‌بودن داده‌ها مواجه هستند [۱۳۸-۱۳۹]. به‌خصوص در زمان وقوع بحران، دسترسی به داده‌ها اغلب به‌شدت محدود می‌شود و این موضوع اثربخشی مدل‌های هوش مصنوعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، سازگاری و تاب‌آوری سامانه‌های هوش مصنوعی در محیط‌های پیچیده و پویای بحران، یک چالش پژوهشی مهم به شمار می‌آید. محیط به‌سرعت در حال تغییر که با سطح بالایی از ناپایداری و عدم قطعیت همراه است، مستلزم آن است که سامانه‌های هوش مصنوعی بتوانند به‌سرعت با وضعیت‌های جدید سازگار شده و به‌طور مؤثر پاسخ دهند.

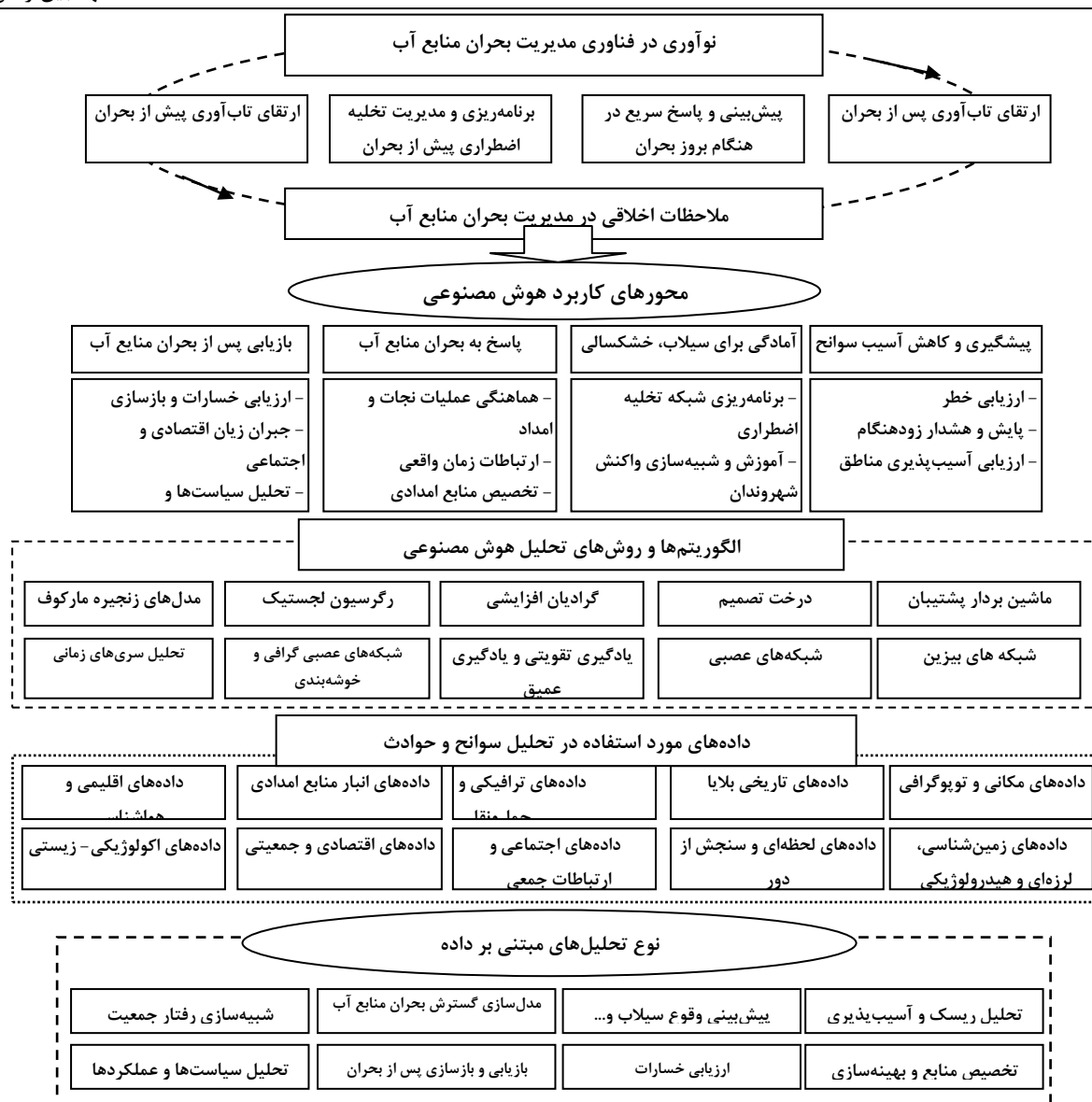
۴-۴ نقشه فناوریانه در کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت بحران منابع آب

نقشه فناوریانه در کاربردهای بالقوه هوش مصنوعی را در کل چرخه مدیریت بحران، از پیشگیری و واکنش اضطراری گرفته تا بازسازی پس از بحران منابع آب را به تصویر می‌کشد. این کاربردها سناریوهای مشخصی از استفاده از هوش مصنوعی برای تحلیل داده و پشتیبانی از تصمیم‌گیری را پوشش می‌دهند و نشان می‌دهند که چگونه نوآوری‌های فناوریانه می‌توانند به چالش‌های کلیدی مدیریتی پاسخ دهند. استفاده یکپارچه از این فناوری‌ها، نویدبخش سیستمی هوشمندتر، کارآمدتر و عادلانه‌تر در مدیریت بحران است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که تحقیقات و توسعه فناوریانه آینده، بر پرداختن به چالش‌های عملی که در حین پیاده‌سازی این فناوری‌ها با آن‌ها روبرو است، تمرکز یابد؛ چالش‌هایی مانند کیفیت داده‌ها، سازگاری مدل‌ها، یکپارچه‌سازی سیستم‌ها در مدیریت بحران.

پیشرفت‌ها، همچنان چالش‌های کلیدی و حوزه‌های کاوش‌نشده باقی مانده‌اند. اگرچه فناوری‌های اخیر توانمندی‌های بالایی در پردازش و تحلیل حجم عظیمی از داده‌های مرتبط با بحران نشان داده‌اند، همچنان با چالش‌هایی در تضمین بهنگام‌بودن، دقت و کامل‌بودن داده‌ها مواجه هستند [۱۳۸-۱۳۹]. به‌خصوص در زمان وقوع بحران، دسترسی به داده‌ها اغلب به‌شدت محدود می‌شود و این موضوع اثربخشی مدل‌های هوش مصنوعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. علاوه بر این، سازگاری و تاب‌آوری سامانه‌های هوش مصنوعی در محیط‌های پیچیده و پویای بحران، یک چالش پژوهشی مهم به شمار می‌آید. محیط به‌سرعت در حال تغییر که با سطح بالایی از ناپایداری و عدم قطعیت همراه است، مستلزم آن است که سامانه‌های هوش مصنوعی بتوانند به‌سرعت با وضعیت‌های جدید سازگار شده و به‌طور مؤثر پاسخ دهند.

۴-۳-۴ چالش‌های فناوری هوش مصنوعی در تقویت تاب‌آوری پس از بحران منابع آب

تقویت تاب‌آوری پس از بروز بحران‌هایی نظیر سیلاب یا خشکسالی با تقویت تاب‌آوری پیش از بحران تفاوت دارد؛ به گونه‌ای که تمرکز آن عمدتاً بر بازگشت سریع، بازسازی، بهبود و نیز اصلاح سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌ها است [۱۴۰]. هدف این مرحله آن است که ضمن بازگرداندن وضعیت به حالت پیش از بحران، از طریق اقدامات اصلاحی، قابلیت مواجهه با بلاهای آینده نیز تقویت شود [۱۴۱]. پژوهش‌های موجود در این حوزه برخی پیشرفت‌ها نظیر استفاده از هوش مصنوعی برای ارزیابی خسارت پس از بحران و پیش‌بینی نیازهای بازسازی، که می‌تواند کارایی و اثربخشی تلاش‌های بازسازی را به‌طور قابل‌توجهی ارتقاء دهد، را رقم زده‌اند [۱۴۲-۱۴۴]. افزون بر این، فناوری‌های هوش مصنوعی در



شکل ۳- نقشه فناوریانه در کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت بحران منابع آب

۵-۴ راهبردهای کاربردی هوش مصنوعی در مدیریت بحران‌های آب

۵-۴-۱ پیش‌بینی و کاهش خطر سوانح و بحران‌های آب

۱. مدل‌های آینده‌نگر پایش منابع آب سطحی و زیرزمینی: استفاده از شبکه‌های عصبی بازگشتی، برای پیش‌بینی تغییرات سطح سفره‌های آب زیرزمینی با داده‌های بارش، دما و برداشت چاه‌ها

۲. تشخیص مناطق مستعد سیل یا خشکسالی با تحلیل مکانی هوش مصنوعی

۳. پایش هوشمند کیفیت آب منابع سطحی و زیرزمینی: یادگیری ماشین بر داده‌های حسگرها برای تخمین آلودگی، شوری و نیترات

۵-۴-۲ آمادگی در برابر بحران‌های آبی

۱. بهینه‌سازی شبکه‌های توزیع و انتقال آب در شرایط اضطراری: الگوریتم‌های تصمیم‌گیری و یادگیری تقویتی برای طراحی مسیرهای جایگزین در مواقع کمبود یا قطع تأمین

افزایش عدم قطعیت در سامانه‌های هیدرولوژیک، به کارگیری هوش مصنوعی و متادیتاها در مدیریت بحران آب (به‌ویژه خشکسالی و کم‌آبی) به یک ضرورت راهبردی بدل شده است. هوش مصنوعی با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، یادگیری عمیق و مدل‌های هوشمند پیش‌بین، امکان ادغام و تحلیل داده‌های کلان و ناهمگون حاصل از سنجش‌ازدور، شبکه ایستگاه‌های هیدرو-هواشناسی، سامانه‌های پایش کیفی و کمی منابع آب، داده‌های اقتصادی-اجتماعی و اطلاعات کاربری اراضی را فراهم می‌کند و بدین‌وسیله تصویر یکپارچه و پویایی از وضعیت منابع آب در مقیاس‌های مکانی و زمانی مختلف ارائه می‌دهد. داده‌های کلان با استانداردسازی، توصیف و مستندسازی خصوصیات داده‌ها (مانند منبع، دقت، مقیاس، زمان‌مندی و عدم قطعیت) زمینه را برای تلفیق چندمنبعی داده‌ها، ردیابی تغییرات و ارزیابی اعتمادپذیری خروجی مدل‌ها مهیا می‌کنند؛ موضوعی که در محیط‌های پرریسک و ناپایدار، برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد، حیاتی است. ترکیب هوش مصنوعی و داده‌های کلان در عمل به توسعه سامانه‌های هشدار سریع خشکسالی، پیش‌بینی کاهش ذخایر سطحی و زیرزمینی، شناسایی الگوهای پنهان مصرف و اتلاف آب، سناریونویسی تغییرات اقلیمی و ارزیابی تاب‌آوری سامانه‌های انسانی-طبیعی کمک کرده و با کاهش عدم قطعیت، افزایش سرعت و دقت تحلیل‌ها و امکان‌پذیر ساختن مدیریت تطبیقی و چابک، ظرفیت نظام‌های حکمرانی آب را برای مواجهه با پویایی محیطی و بحران‌های پیچیده عصر حاضر به‌طور معناداری ارتقاء می‌دهد.

به کارگیری فناوری‌های نوین مانند یادگیری عمیق^{۱۶}، یادگیری تقویتی^{۱۷} و مدل‌های ترکیبی^{۱۸} هوش مصنوعی می‌تواند موجب تحول در رویکردهای سنتی مدیریت بحران منابع آب و کاهش خطر سیلاب شود. این فناوری‌ها به‌ویژه در حوزه پیش‌بینی هیدرولوژیک، پایش بلادرنگ و تصمیم‌یارهای حوضه‌ای، نقش مهمی در ارتقاء بهره‌وری فرایندهای مدیریت مراحل چهارگانه بحران ایفا کنند. در مرحله پیشگیری، استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق قادر

۲. مدل‌سازی رفتار مصرف‌کنندگان آب در بحران: تحلیل کلان داده‌های اجتماعی جهت پیش‌بینی واکنش جامعه در کمبود منابع
۳. طراحی سامانه هشدار سریع سیل و خشکسالی: بهره‌گیری از حسگرهای اینترنت اشیا (IoT) و مدل‌های یادگیری عمیق برای ارسال هشدار آنی

۴-۵-۳ پاسخ در زمان بروز سوانح و حوادث آبی

۱. تخصیص بهینه منابع آب به مناطق بحرانی: مدل‌های بهینه‌سازی چندهدفه با یادگیری ماشین برای تخصیص آب بین کشاورزی، شرب و صنعت
۲. مدیریت هم‌زمان داده‌های لحظه‌ای از شبکه‌های حسگر آب و هوا: تحلیل داده‌های واقعی با الگوریتم‌های سری زمانی و مدل‌های پیش‌بینی زمانی
۳. هماهنگی عملیات امداد آبی: استفاده از عامل‌های هوشمند و ربات‌های تصمیم‌یار برای مدیریت توزیع تانکرها و واحدهای تصفیه در بحران

۴-۵-۴ بازبازی و بازسازی پس از سوانح و حوادث آبی

۱. ارزیابی خسارت‌های زیرساخت آبی نیر سدها، کانال‌ها، تأسیسات شبکه آب با سنجش از دور
۲. تحلیل اقتصادی و اجتماعی پس از بحران کم‌آبی یا سیلاب: استخراج روند مهاجرت، تغییر کاربری زمین و تأثیر اقتصادی با تحلیل داده‌های اجتماعی و اقتصادی
۳. بازسازی طرح‌های مدیریت منابع آب با یادگیری سیاستی: استفاده از یادگیری تقویتی برای بهبود تصمیمات تخصیص بلندمدت آب پس از بحران

۵- نتیجه‌گیری

این مطالعه با مرور سیستماتیک و جامع بر ادبیات موضوع، پژوهش‌ها و مطالعات مرتبط با کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت بحران انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد با توجه به تشدید هم‌زمان بحران‌های طبیعی، ناپایداری اقلیم و

¹⁶ Deep Learning

¹⁷ Reinforcement Learning

¹⁸ Hybrid Models

داده در بسیاری از نقاط مختل می‌شود، بر کارآمدی مدل‌های هوش مصنوعی تأثیر می‌گذارد. در مرحله بازیابی پس از سیلاب، ادغام مدل‌های پیشرفته هوش مصنوعی با راهبردهای فعلی بازسازی زیرساخت‌های آبی هنوز به‌طور جامع بررسی نشده است.

از منظر اخلاقی، کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت سیلاب هنوز با کاستی‌هایی مواجه است. اگرچه این فناوری می‌تواند کارایی تخصیص منابع آبی و امدادی را افزایش دهد، اما تضمین عدالت در توزیع امکانات به‌ویژه برای جوامع آسیب‌پذیر در معرض سیلاب‌های مکرر نیازمند توجه بیشتری است. به‌طور کلی، با وجود مزایای بالقوه قابل توجه هوش مصنوعی در مدیریت بحران‌های مرتبط با منابع آب و سیلاب، چالش‌های اخلاقی، اجتماعی و داده‌محور همچنان پابرجاست. با اتکا به تحلیل ادبیات موجود و چالش‌های شناسایی‌شده، این مطالعه یک نقشه‌راه پژوهشی برای ادغام بهینه هوش مصنوعی در تمامی مراحل مدیریت بحران سیلاب و منابع آب ارائه می‌کند. این نقشه‌راه بر بهره‌گیری از فناوری‌هایی نظیر یادگیری عمیق، یادگیری تقویتی متمرکز است تا محدودیت‌های کنونی برطرف شده و فرایندهای پیشگیری، آمادگی، واکنش و بازیابی در بحران‌های هیدرولوژیک بهینه شوند.

۷- مراجع

[1] MANFRÉ LA, Hirata E, Silva JB, Shinohara EJ, Giannotti MA, Larocca APC, Quintanilha JA (2012) An analysis of geospatial technologies for risk and natural disaster management. ISPRS Int J Geo-Inf 1:166–185

[2] Seaberg D, Devine L, Zhuang J (2017) A review of game theory applications in natural disaster management research. Nat Hazards 89:1461–1483

[3] Yu M, Yang C, Li Y (2018) Big data in natural disaster management: a review. Geosciences 8:165.

[4] Tan L, Guo J, Mohanarajah S, Zhou K (2021) Can we detect trends in natural disaster management with artificial intelligence? A

است دقت پیش‌بینی سیلاب، رفتار حوضه‌های آبریز، تغییرات رطوبتی خاک و شدت-مدت بارش را افزایش دهد و در نتیجه سامانه‌های هشدار سریع و تنظیم‌گری را بهینه‌سازی کند. در مرحله آمادگی، کاربرد هوش مصنوعی در شبیه‌سازی سناریوهای وقوع سیلاب، تخصیص پویا و پیش‌دستانه منابع آب و تجهیزات امدادی، برنامه‌ریزی عملیاتی را تقویت می‌نماید.

در مرحله واکنش اضطراری، پردازش بلادرنگ داده‌های چندمنبعی از جمله تصاویر ماهواره‌ای، رادار هواشناسی، حسگرهای سطح رودخانه و داده‌های پهپادی، امکان هدایت دقیق عملیات نجات، مدیریت گشودگی سازه‌های کنترل سیلاب و پشتیبانی از تصمیم‌گیری سریع در حوضه‌های حساس را فراهم می‌سازد. همچنین، در مرحله بازیابی، فناوری‌های هوش مصنوعی از طریق ارزیابی خودکار خسارت وارده به زیرساخت‌های آبی، تحلیل تخریب سازه‌های کنترل سیلاب، مدل‌سازی بازسازی شبکه‌های انتقال آب و پیش‌بینی نیازهای بازتوانی حوضه، روند احیا و بازسازی را تسریع کرده و توسعه راهبردهای بازسازی پایدارتر را پشتیبانی می‌کنند. افزون بر این، طراحی سیستم‌های پشتیبان تصمیم شفاف و مسئولانه، فرصت‌های جدیدی برای توجه به ملاحظات اخلاقی در توزیع منابع آبی و اجرای برنامه‌های مدیریت بحران ایجاد می‌کند.

با وجود این ظرفیت‌ها، نتایج تحلیل ادبیات نشان می‌دهد که چالش‌هایی همچنان در مسیر ادغام هوش مصنوعی با مدیریت بحران منابع آب و سیلاب وجود دارد. در مرحله پیشگیری، اگرچه هوش مصنوعی در ارزیابی ریسک سیلاب و مدل‌سازی هیدرولوژیک توانمند ظاهر شده است، اما کاربرد آن در تقویت تاب‌آوری زیرساخت‌های آبی از جمله پایداری سازه‌های کنترل سیلاب، شبکه‌های زهکشی شهری و زیرساخت‌های انتقال آب هنوز محدود است. از نظر آمادگی، علی‌رغم بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری عمیق در بهینه‌سازی مسیرهای تخلیه اضطراری، مطالعات اندکی به طراحی شبکه‌های تخلیه و مدیریت فضای سیلابی پیش از وقوع بحران پرداخته‌اند. در مرحله واکنش، چالش‌های مرتبط با کیفیت، پوشش و زمان‌مندی داده‌ها به‌ویژه در رویدادهای سیلابی شدید که دسترسی به

- [14] Abid SK, Sulaiman N, Chan SW, Nazir U, Abid M, Han H, Ariza-Montes A, VEGA-MUÑOZ A (2021) Toward an integrated disaster management approach: how artificial intelligence can boost disaster management. *Sustainability* 13:12560.
- [15] Albahri A, Khaleel YL, Habeeb MA, Ismael RD, Hameed QA, Deveci M, Homod RZ, Albahri O, Alamoodi A, Alzubaidi L (2024) A systematic review of trustworthy artificial intelligence applications in natural disasters. *Comput Electr Eng* 118:109409.
- [16] Munawar HS, Hammad AW, Waller ST (2022a) Remote sensing methods for flood prediction: a review. *Sensors (Basel)* 22:960.
- [17] Huang D, Wang S, Liu Z (2021) A systematic review of prediction methods for emergency management. *Int J Disaster Risk Reduct* 62:102412.
- [18] Akhyar A, Zulkifley MA, Lee J, Song T, Han J, Cho C, Hyun S, Son Y, Hong B-W (2024) Deep artificial intelligence applications for natural disaster management systems: a methodological review. *Ecol Indic* 163:112067.
- [19] Kouadio IK, Aljunid S, Kamigaki T, Hammad K, Oshitani H (2012) Infectious diseases following natural disasters: prevention and control measures. *Expert Rev Anti Infect Ther* 10:95–104.
- [20] Chen B, Xia Y (2017) *Advanced technologies in disaster prevention and mitigation*. SAGE Publications Sage UK, London, England.
- [21] Yu D, He Z (2022) Digital twin-driven intelligence disaster prevention and mitigation for infrastructure: advances, challenges, and opportunities. *Nat Hazards* 112:1–36
- [22] Kapucu N (2008) Culture of preparedness: household disaster preparedness. *Disaster Prev Manag* 17:526–535.
- [23] Kohn S, Eaton JL, Feroz S, Bainbridge AA, Hoolachan J, Barnett DJ (2012) Personal disaster preparedness: an integrative review of review of modeling practices. *Nat Hazards* 107:2389–2417.
- [5] Xu J, Nair DJ, Waller ST (2025a) Implementing equitable wildfire response plans. *Science* 388:158–159.
- [6] Fan C, Zhang C, Yahja A, Mostafavi A (2021) Disaster city digital twin: a vision for integrating artificial and human intelligence for disaster management. *Int J Inf Manage* 56:102049.
- [7] Munawar HS, Mojtahedi M, Hammad AW, Kouzani A, Mahmud MP (2022b) Disruptive technologies as a solution for disaster risk management: a review. *Sci Total Environ* 806:151351.
- [8] Linardos V, Drakaki M, Tzionas P, Karnavas YL (2022) Machine learning in disaster management: recent developments in methods and applications. *Mach Learn Knowl Extr*. <https://doi.org/10.3390/make4020020>.
- [9] Jiang S, Li J, Zhang S, Gu Q, Lu C, Liu H (2022) Landslide risk prediction by using GBRT algorithm: application of artificial intelligence in disaster prevention of energy mining. *Process Saf Environ Prot* 166:384–392
- [10] Liu Y, Li X, Zheng Z (2024) Smart natural disaster relief: assisting victims with artificial intelligence in lending. *Inf Syst Res* 35:489–504.
- [11] Xu C, Xue Z (2024) Applications and challenges of artificial intelligence in the field of disaster prevention, reduction, and relief. *Nat Hazards Res* 4(1):169–172.
- [12] Xu J, Nair DJ, Waller ST (2025b) Pre-disaster evacuation transport network design under uncertain demand and connectivity reliability: a novel bi-level programming model. *Transp Res Interdiscip Perspect* 32:101556.
- [13] Sun W, Bocchini P, Davison BD (2020) Applications of artificial intelligence for disaster management. *Nat Hazards* 103:2631–2689.

- [33] Gevaert CM, Carman M, Rosman B, Georgiadou Y, Soden R (2021) Fairness and accountability of AI in disaster risk management: opportunities and challenges. *Patterns*. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100363>
- [34] Akter S, Wamba SF (2019) Big data and disaster management: a systematic review and agenda for future research. *Ann Oper Res* 283:939–959
- [35] Zeng F, Pang C, Tang H (2023) Sensors on the internet of things systems for urban disaster management: a systematic literature review. *Sensors* 23:7475
- [36] Lettieri E, Masella C, Radaelli G (2009) Disaster management: findings from a systematic review. *Disaster Prev Manag* 18:117–136
- [37] Tierney K (2012) Disaster governance: social, political, and economic dimensions. *Annu Rev Environ Resour* 37:341–363
- [38] Tiernan A, Drennan L, Nalau J, Onyango E, Morrissey L, Mackey B (2019) A review of themes in disaster resilience literature and international practice since 2012. *Policy des Pract* 2:53–74
- [39] Ryan B, Johnston KA, Taylor M, McAndrew R (2020) Community engagement for disaster preparedness: a systematic literature review. *Int J Disaster Risk Reduct* 49:101655.
- [40] Chumachenko D, Morita PP, Ghaffarian S, Chumachenko T (2024) Artificial intelligence solutions for global health and disaster response: challenges and opportunities. *Front Public Health* 12:1439914
- [41] Qin F, Huang C, Lin Z (2024) Big data and artificial intelligence-driven natural disaster prediction and prevention: technological advances and prospects. *Geogr Res Bull* 3:381–398
- [42] Zolkafli A, Mansor NS, Omar M, Ahmad M, Ibrahim H, Yasin A (2024) AI for smart the literature. *Disaster Med Public Health Prep* 6:217–23.
- [24] Labrague LJ, Hammad K, Gloe D, Mckenroe-Petite D, Fronda D, Obeidat A, Leocadio M, Cayaban A, Mirafuentes E (2018) Disaster preparedness among nurses: a systematic review of literature. *Int Nurs Rev* 65:41–53.
- [25] Berkoune D, Renaud J, Rekik M, Ruiz A (2012) Transportation in disaster response operations. *Socio-Econ Plann Sci* 46:23–32.
- [26] Tomaszewski B, Judex M, Szarzynski J, Radestock C, Wirkus L (2015) Geographic information systems for disaster response: a review. *J Homeland Secur Emerg Manag* 12:571–602.
- [27] Chang SE (2010) Urban disaster recovery: a measurement framework and its application to the 1995 Kobe earthquake. *Disasters* 34:303–327.
- [28] Vallance S (2015) Disaster recovery as participation: lessons from the Shaky Isles. *Nat Hazards* 75:1287–1301
- [29] Jamali M, Nejat A, Ghosh S, Jin F, Cao G (2019) Social media data and post-disaster recovery. *Int J Inf Manage* 44:25–37.
- [30] Rouhanizadeh B, Kermanshachi S, Nipa TJ (2020) Exploratory analysis of barriers to effective post-disaster recovery. *Int J Disaster Risk Reduct* 50:101735.
- [31] Meyer V, Priest S, Kuhlicke C (2012) Economic evaluation of structural and non-structural flood risk management measures: examples from the Mulde River. *Nat Hazards* 62:301–324
- [32] Coutinho RQ, Lucena R, Henrique HM (2020) Disaster risk governance: institutional vulnerability assessment with emphasis on non-structural measures in the municipality of Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco (PE), Brazil. *Disaster Prevent Manag Int J* 29:711–729

- [51] Shahina K, Pradeep Kumar T (2022) Similarity-based clustering and data aggregation with independent component analysis in wireless sensor networks. *Trans Emerg Telecommun Technol* 33:e4462.
- [52] Shafapourtehrany M, Yariyan P, Özener H, Pradhan B, Shabani F (2022) Evaluating the application of K-mean clustering in earthquake vulnerability mapping of Istanbul, Turkey. *Int J Disaster Risk Reduct* 79:103154
- [53] Albahri A, Khaleel YL, Habeeb MA, Ismael RD, Hameed QA, Deveci M, Homod RZ, Albahri O, Alamoodi A, Alzubaidi L (2024) A systematic review of trustworthy artificial intelligence applications in natural disasters. *Comput Electr Eng* 118:109409.
- [54] Xu C, Xue Z (2024) Applications and challenges of artificial intelligence in the field of disaster prevention, reduction, and relief. *Nat Hazards Res* 4(1):169–172
- [55] van Engelen JE, Hoos HH (2020) A survey on semi-supervised learning. *Mach Learn* 109:373–440
- [56] Chen Y, Mancini M, Zhu X, Akata Z (2022) Semi-supervised and unsupervised deep visual learning: a survey. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 46:1327–1347
- [57] Duarte JM, Berton L (2023) A review of semi-supervised learning for text classification. *Artif Intell Rev* 56:9401–9469
- [58] Maulik U, Chakraborty D (2011) A self-trained ensemble with semisupervised SVM: an application to pixel classification of remote sensing imagery. *Pattern Recogn* 44:615–623
- [59] Chen N, Liu W, Bai R, Chen A (2019) Application of computational intelligence technologies in emergency management: a literature review. *Artif Intell Rev* 52:2131–2168
- [60] Lecun Y, Bengio Y, Hinton G (2015) Deep Learning. *Nature* 521:436–444
- disaster resilience among communities. In: Abdul Karim SA (ed) *Intelligent systems modeling and simulation III: artificial intelligent, machine learning, intelligent functions and cyber security*. Springer, Cham
- [43] Nettleton DF, Orriols-Puig A, Fornells A (2010) A study of the effect of different types of noise on the precision of supervised learning techniques. *Artif Intell Rev* 33:275–306.
- [44] Jiang T, Gradus JL, Rosellini AJ (2020) Supervised machine learning: a brief primer. *Behav Ther* 51:675–687
- [45] Uddin S, Khan A, Hossain ME, Moni MA (2019) Comparing different supervised machine learning algorithms for disease prediction. *BMC Med Inform Decis Mak* 19:1–16.
- [46] Costache R, Popa MC, Bui DT, Diaconu DC, Ciubotaru N, Minea G, Pham QB (2020) Spatial predicting of flood potential areas using novel hybridizations of fuzzy decision-making, bivariate statistics, and machine learning. *J Hydrol* 585:124808
- [47] Naito S, Tomozawa H, Mori Y, Nagata T, Monma N, Nakamura H, Fujiwara H, Shoji G (2020) Building-damage detection method based on machine learning utilizing aerial photographs of the Kumamoto earthquake. *Earthq Spectra* 36:1166–1187.
- [48] Dy JG, Brodley CE (2004) Feature selection for unsupervised learning. *J Mach Learn Res* 5:845–889.
- [49] Ezugwu AE, Ikotun AM, Oyelade OO, Abualigah L, Agushaka JO, Eke CI, Akinyelu AA (2022) A comprehensive survey of clustering algorithms: State-of-the-art machine learning applications, taxonomy, challenges, and future research prospects. *Eng Appl Artif Intell* 110:104743.
- [50] Verbeeck N, Caprioli RM, VAN DE Plas R (2020) Unsupervised machine learning for exploratory data analysis in imaging mass spectrometry. *Mass Spectrom Rev* 39:245–291

- [71] Chen S-A, Tangkaratt V, Lin H-T, Sugiyama M (2020) Active deep Q-learning with demonstration. *Mach Learn* 109:1699–1725
- [72] Yi W, Qu R, Jiao L (2023) Automated algorithm design using proximal policy optimisation with identified features. *Expert Syst Appl* 216:119461
- [73] Wei P, Zeng Y, Yan B, Zhou J, Nikougoftar E (2023) VMP-A3C: virtual machines placement in cloud computing based on asynchronous advantage actor-critic algorithm. *J King Saud Univ-Comput Inf Sci* 35:101549
- [74] Cui P, Chen X-Q, Zhu Y-Y, Su F-H, Wei F-Q, Han Y-S, Liu H-J, Zhuang J-Q (2011) The Wenchuan earthquake (May 12, 2008), Sichuan province, China, and resulting geohazards. *Nat Hazards* 56:19–36
- [75] Sun Y, Peng M, Zhou Y, Huang Y, Mao S (2019) Application of machine learning in wireless networks: key techniques and open issues. *IEEE Commun Surv Tutor* 21:3072–3108
- [76] Anuar WK, Lee LS, Pickl S, Seow H-V (2021) Vehicle routing optimisation in humanitarian operations: a survey on modelling and optimisation approaches. *Appl Sci* 11:667
- [77] Li D, Zhang Z, Alizadeh B, Zhang Z, Duffield N, Meyer MA, Thompson CM, Gao H, Behzadan AH (2024) A reinforcement learning-based routing algorithm for large street networks. *Int J Geogr Inf Sci* 38:183–215.
- [78] Arulkumaran K, Deisenroth MP, Brundage M, Bharath AA (2017) Deep reinforcement learning: a brief survey. *IEEE Signal Process Mag* 34:26–38
- [79] Ladosz P, Weng L, Kim M, Oh H (2022) Exploration in deep reinforcement learning: a survey. *Inf Fusion* 85:1–22
- [80] Heuillet A, Couthouis F, DíAZ-RODRÍGUEZ N (2021) Explainability in deep reinforcement learning. *Knowl-Based Syst* 214:106685
- [61] Rusk N (2016) Deep learning. *Nat Methods* 13:35–35
- [62] Alam M, Samad MD, Vidyaratne L, Glandon A, Iftekharruddin KM (2020) Survey on deep neural networks in speech and vision systems. *Neurocomputing* 417:302–321
- [63] Otter DW, Medina JR, Kalita JK (2020) A survey of the usages of deep learning for natural language processing. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst* 32:604–624
- [64] Wang M, Ma H, Wang Y, Sun X (2024a) Design of smart home system speech emotion recognition model based on ensemble deep learning and feature fusion. *Appl Acoust* 218:109886
- [65] Zhao J, Han X, Ouyang M, Burke AF (2023) Specialized deep neural networks for battery health prognostics: opportunities and challenges. *J Energy Chem.* <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.08.047>
- [66] Wang Y, Chen X, Wang L (2023a) Deep reinforcement learning-based rescue resource distribution scheduling of storm surge inundation emergency logistics. *IEEE Trans Ind Inform* 19:10004–10013
- [67] Yu S, Ma J (2021) Deep learning for geophysics: current and future trends. *Rev Geophys* 59:e2021RG000742
- [68] Wiering MA, van Otterlo M (2012) Reinforcement learning. *Adapt Learn Optim* 12:729.
- [69] Ding Z, Huang Y, Yuan H, Dong H (2020) Introduction to reinforcement learning. In: Dong H, Ding Z, Zhang S (eds) *Deep reinforcement learning: fundamentals, research and applications*. Springer, Singapore, pp 47–123.
- [70] Carta S, Ferreira A, Podda AS, Recupero DR, Sanna A (2021) Multi-DQN: an ensemble of deep q-learning agents for stock market forecasting. *Expert Syst Appl* 164:113820

and Intelligent Computing (IES-KCIC), IEEE, pp. 239–245.

[89] Ma H, Liu Y, Ren Y, Wang D, Yu L, Yu J (2020) Improved CNN classification method for groups of buildings damaged by earthquake, based on high resolution remote sensing images. *Remote Sens* 12:260

[90] Qing Y, Ming D, Wen Q, Weng Q, Xu L, Chen Y, Zhang Y, Zeng B (2022) Operational earthquake-induced building damage assessment using CNN-based direct remote sensing change detection on superpixel level. *Int J Appl Earth Obs Geoinf* 112:102899

[91] Yang L, Cervone G (2019) Analysis of remote sensing imagery for disaster assessment using deep learning: a case study of flooding event. *Soft Comput* 23:13393–13408.

[92] Saad OM, Hafez AG, Soliman MS (2020) Deep learning approach for earthquake parameters classification in earthquake early warning system. *IEEE Geosci Remote Sens Lett* 18:1293–1297.

[93] Lamsal R, Kumar TV (2020) Artificial intelligence and early warning systems. In: Kumar TVV, Sud K (eds) *AI and robotics in disaster studies*. Palgrave Macmillan, Singapore., pp 13–32.

[94] Abdalzaher MS, Soliman MS, El-Hady SM, Benslimane A, Elwekeil M (2021) A deep learning model for earthquake parameters observation in IoT system-based earthquake early warning. *IEEE Internet Things J* 9:8412–8424

[95] Wei C-C (2021) Collapse warning system using LSTM neural networks for construction disaster prevention in extreme wind weather. *J Civil Eng Manag* 27:230–245

[96] Wang Y, Chen X, Wang L (2023a) Deep reinforcement learning-based rescue resource distribution scheduling of storm surge inundation emergency logistics. *IEEE Trans Ind Inform* 19:10004–10013

[81] Wang Z, Yan H, Wei C, Wang J, Bo S, Xiao M (2024c) Research on autonomous driving decision-making strategies based deep reinforcement learning. In: *Proceedings of the 2024 4th International Conference on Internet of Things and Machine Learning*, pp. 211–215.

[82] Wu J, Cheng L, Chu S, Song Y (2024) An autonomous coverage path planning algorithm for maritime search and rescue of persons-in-water based on deep reinforcement learning. *Ocean Eng* 291:116403

[83] Sun G, He L, Sun Z, Wu Q, Liang S, Li J, Niyato D, Leung VC (2024b) Joint task offloading and resource allocation in aerial-terrestrial UAV networks with edge and fog computing for post-disaster rescue. *IEEE Trans Mob Comput*. <https://doi.org/10.1109/TMC.2024.3350886>

[84] Huang C, Chen G, Xiao P, Xiao Y, Han Z, Chambers JA (2024) Joint offloading and resource allocation for hybrid cloud and edge computing in SAGINs: a decision assisted hybrid action space deep reinforcement learning approach. *IEEE J Sel Areas Commun*. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2024.3365899>.

[85] Xiang H, Zhang M, Jian C (2024) Federated deep reinforcement learning-based online task offloading and resource allocation in harsh mobile edge computing environment. *Cluster Comput* 27:3323–3339

[86] Pappayan N, Kulhandjian M, Kulhandjian H, Aslanyan L (2024) AI-based drone assisted human rescue in disaster environments: challenges and opportunities. *Pattern Recognit Image Anal* 34:169–186

[87] Li XY, Wang X (2024) Rescue path planning for urban flood: a deep reinforcement learning-based approach. *Risk Anal*. <https://doi.org/10.1111/risa.17599>.

[88] Amit SNKB, Aoki, Y (2017) Disaster detection from aerial imagery with convolutional neural network. In: *2017 International Electronics Symposium on Knowledge Creation*

- [105] Devaraj J, Ganesan S, Elavarasan RM, Subramaniam U (2021) A novel deep learning based model for tropical intensity estimation and post-disaster management of hurricanes. *Appl Sci* 11:4129
- [106] Yu L, Zhang C, Jiang J, Yang H, Shang H (2021) Reinforcement learning approach for resource allocation in humanitarian logistics. *Expert Syst Appl* 173:114663
- [107] Li X, Liang X, Wang X, Wang R, Shu L, Xu W (2023b) Deep reinforcement learning for optimal rescue path planning in uncertain and complex urban pluvial flood scenarios. *Appl Soft Comput* 144:110543
- [108] Li XY, Wang X (2024) Rescue path planning for urban flood: a deep reinforcement learning-based approach. *Risk Anal.* <https://doi.org/10.1111/risa.17599>
- [109] Song G, Xia M, Zhang D (2023) Deep reinforcement learning for risk and disaster management in energy-efficient marine ranching. *Energies* 16:6092
- [110] van Steenberg R, Mes M, van Heeswijk W (2023) Reinforcement learning for humanitarian relief distribution with trucks and UAVs under travel time uncertainty. *Transp Res Part C Emerg Technol* 157:104401
- [111] Ma Z, Gong H, Xiong J, Wang X (2025) Heterogeneous multi-agent task allocation based on graph-based convolutional assignment neural network. *IEEE Internet Things J* 12:17281–17299.
- [112] Pfeiffer M, Shukla S, Turchetta M, Cadena C, Krause A, Siegwart R, Nieto J (2018) Reinforced imitation: sample efficient deep reinforcement learning for mapless navigation by leveraging prior demonstrations. *IEEE Robot Autom Lett* 3:4423–4430.
- [113] Zhang D, Meng H, Wang M, Xu X, Yan J, Li X (2024a) A multi-objective optimization method for shelter site selection based on deep reinforcement learning. *Trans GIS* 28:2722–2741.
- [97] Wen H, Yan L, Jin Y, Wang Z, Guo J, Deng J (2023) Coalbed methane concentration prediction and early-warning in fully mechanized mining face based on deep learning. *Energy* 264:126208.
- [98] Oluwadare SA, Alakuro MA, Sarumi OA (2023) Early warning system for flood disaster risk reduction using predictive analytics. In: *International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, Springer, pp. 180–190.
- [99] Jahani A, Saffariha M (2021) Modeling of trees failure under windstorm in harvested Hyrcanian forests using machine learning techniques. *Sci Rep* 11:1124
- [100] Zhang S, Zhang J, Li X, Du X, Zhao T, Hou Q, Jin X (2022) Estimating the grade of storm surge disaster loss in coastal areas of China via machine learning algorithms. *Ecol Indic* 136:108533
- [101] Jahanbani M, Vahidnia MH, Aghamohammadi H, Azizi Z (2024) Flood susceptibility mapping through geoinformatics and ensemble learning methods, with an emphasis on the AdaBoost-Decision Tree algorithm, in Mazandaran. *Iran Earth Sci Inf* 17:1433–1457.
- [102] Alshammari RK, Alrwais O, Aksoy MS (2022) Machine learning applications to dust storms: a meta-analysis. *Aerosol Air Quality Res* 22:220183.
- [103] Padmaja S, Naveenkumar R, Kumari NL, Pimo ESJ, Bindhu M, Konduri B, Jangir P (2024) Deep learning in remote sensing for climate-induced disaster resilience: a comprehensive interdisciplinary approach. *Remote Sens Earth Syst Sci* 8(1):145–160
- [104] Demiss BA, Elsaigh WA (2024) Application of novel hybrid deep learning architectures combining convolutional neural networks (CNN) and recurrent neural networks (RNN): construction duration estimates prediction considering preconstruction uncertainties. *Eng Res Exp* 6:032102.

- [123] Sun B, Li Y, Zhang Y, Guo T (2024a) Multi-source heterogeneous data fusion prediction technique for the utility tunnel fire detection. *Reliab Eng Syst Saf* 248:110154
- [124] Cai G, Zheng X, Guo J, Gao W (2025) Real-time identification of borehole rescue environment situation in underground disaster areas based on multi-source heterogeneous data fusion. *Saf Sci* 181:106690
- [125] Sun B, Guo T (2024) Evidential reasoning and lightweight multi-source heterogeneous data fusion-driven fire danger level dynamic assessment technique. *Process Saf Environ Prot* 185:350–366.
- [126] Zhang Z, Ma Y, Liu P (2024c) A global multimodal flood event dataset with heterogeneous text and multi-source remote sensing images. *Big Earth Data*. <https://doi.org/10.1080/20964471.2024.2358615>
- [127] Qiu S, Zhao H, Jiang N, Wang Z, Liu L, An Y, Zhao H, Miao X, Liu R, Fortino G (2022) Multi-sensor information fusion based on machine learning for real applications in human activity recognition: state-of-the-art and research challenges. *Inf Fusion* 80:241–265
- [128] Fei L, Feng Y, Wang H (2021) Modeling heterogeneous multi-attribute emergency decision-making with Dempster-Shafer theory. *Comput Ind Eng* 161:107633
- [129] Cao L (2023) AI and data science for smart emergency, crisis and disaster resilience. *Int J Data Sci Anal* 15:231–246
- [130] Rane N, Choudhary S, Rane J (2024) Artificial intelligence for enhancing resilience. *J Appl Artif Intell* 5:1–33
- [131] Jia C, Zhang C, Li Y-F, Li Q-L (2023) Joint pre-and post-disaster planning to enhance the resilience of critical infrastructures. *Reliab Eng Syst Saf* 231:109023
- [114] Wang Q, Liu H, Gao K, Zhang L (2019) Improved multi-agent reinforcement learning for path planning-based crowd simulation. *IEEE Access* 7:73841–73855
- [115] Singh V, Chen S-S, Singhanian M, Nanavati B, Gupta A (2022) How are reinforcement learning and deep learning algorithms used for big data based decision making in financial industries—a review and research agenda. *Int J Inf Manag Data Insights* 2:100094
- [116] Razzaghi P, Tabrizian A, Guo W, Chen S, Taye A, Thompson E, Bregeon A, Baheri A, Wei P (2024) A survey on reinforcement learning in aviation applications. *Eng Appl Artif Intell* 136:108911
- [117] Mohr F, van Rijn JN (2024) Learning curves for decision making in supervised machine learning: a survey. *Mach Learn* 113:8371–8425.
- [118] Lee H-R, Lee T (2021) Multi-agent reinforcement learning algorithm to solve a partially-observable multi-agent problem in disaster response. *Eur J Oper Res* 291:296–308
- [119] Wang C, Deng D, Xu L, Wang W (2022) Resource scheduling based on deep reinforcement learning in UAV assisted emergency communication networks. *IEEE Trans Commun* 70:3834–3848
- [120] Pan W, Liu SQ (2023) Deep reinforcement learning for the dynamic and uncertain vehicle routing problem. *Appl Intell* 53:405–422.
- [121] Li J, Liu Z, Lei X, Wang L (2021) Distributed fusion of heterogeneous remote sensing and social media data: a review and new developments. *Proc IEEE* 109:1350–1363
- [122] Li B, Han L, Li L (2022a) A spatiotemporal fusion network to multi source heterogeneous data for landslide recognition. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci* 10:77–84.

review and improved conceptual framework. *Int J Disaster Risk Reduct*. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2024.104629>.

[141] Wan H, Liu W, Zhang S, Qie D, Shi Q, Cheng R (2025) Pre-disaster allocation and post-disaster dispatch strategies of power emergency resources for resilience enhancement of distribution networks. *Electr Power Syst Res* 238:111038

[142] Cheng C-S, Luo L, Murphy S, Lee Y-C, Leite F (2024b) A framework to enhance disaster debris estimation with AI and aerial photogrammetry. *Int J Disaster Risk Reduct* 107:104468

[143] Ro SH, Gong J (2024) Scalable approach to create annotated disaster image database supporting AI-driven damage assessment. *Nat Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06641-x>

[144] Al Shafian S, Hu D (2024) Integrating machine learning and remote sensing in disaster management: a decadal review of post-disaster building damage assessment. *Buildings* 14:2344

[145] Greenal S, Anilkumar S (2024) Development of decision support tools for post-disaster infrastructure reconstruction and recovery: a scoping study. *Sustain Resils Infrastructure*. <https://doi.org/10.1080/23789689.2024.2365502>

[146] Rawat A, Witt E, Roumyeh M, Lill I (2024) Advanced digital technologies in the post-disaster reconstruction process—a review leveraging small language models. *Buildings* 14:3367

[132] Takabatake T, Asai K, Kakuta H, Hasegawa N (2025) Optimizing evacuation paths using agent-based evacuation simulations and reinforcement learning. *Int J Disaster Risk Reduct* 117:105173

[133] Tsai Y-L, Rastogi C, Kitanidis PK, Field CB (2021) Routing algorithms as tools for integrating social distancing with emergency evacuation. *Sci Rep* 11:19623

[134] Karampotsis E, Kioskli K, Tsirimpa A, Dounias G, Polydoropoulou A (2024) Understanding evacuation behavior for effective disaster preparedness: a hybrid machine learning approach. *Nat Hazards* 120:13627–13665

[135] Chen K, Li F, Ji Q, You Q, Feng Z (2023a) Emergency evacuation behavior characteristics classification of aircraft cabin passengers based on deep learning network model SMCNN-LSTM. *Phys A* 626:129097

[136] Xu J, Nair DJ (2024) Pre-disaster evacuation network design with uncertain demand and behavioural choices: a bi-criteria generalized cost perspective. *Transp Res Interdiscip Perspect* 26:101186

[137] Xu J, Nair DJ, Waller ST (2024b) Exploring the pre-disaster evacuation network design problem under five traffic equilibrium models. *Computers Ind Eng* 196:110506

[138] Jayawardene V, Huggins TJ, Prasanna R, Fakhruddin B (2021) The role of data and information quality during disaster response decision-making. *Prog Disaster Sci* 12:100202

[139] Adams RM, Evans CM, Peek L (2024) Defining, collecting, and sharing perishable disaster data. *Disasters* 48:e12592

[140] Lagap U, Ghaffarian S (2024) Digital post-disaster risk management twinning: a

Artificial Intelligence: The Transition from Response to Resilience in the Water Resource Crisis Management Cycle

Mahjabin Radaei1

1- Assistant Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, University of Maragheh, Maragheh, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received:

Received in revised form:

Accepted:

Available online:

*Correspondence:

m.radaei@maragheh.ac.ir

Keywords:

Artificial Intelligence

Crisis Management, Flood,

Water Resource, Resilience

ABSTRACT

The increasing frequency and severity of catastrophic events have made water resource crisis management a global priority, in which technological innovations play a pivotal role. The integration of artificial intelligence has fundamentally reshaped traditional crisis management paradigms and charted new paths to increase response effectiveness and operational efficiency. Despite these transformative impacts, several significant challenges and unresolved issues remain. This study systematically analyzed 258 studies indexed in the Web of Science and Google Scholar databases, focusing on the intersection of AI and disaster management, particularly water-related crises. Using a content analysis approach, the application of various AI technologies was examined across four standard phases of crisis management: prevention and mitigation, preparedness, response, and recovery. Furthermore, this study identified and synthesized research gaps in the current landscape of AI-based water crisis management, specifically addressing pre- and post-crisis resilience enhancement, strengthening critical infrastructure, optimizing evacuation network design, and long-term and sustainable post-disaster reconstruction. The findings provide important insights for policymakers, researchers, and practitioners while highlighting the untapped potential of advanced AI applications to drive further progress and innovation in the field of water crisis management.