

Assessment the impacts of Metaverse industry on flood modeling visualization

Ansari Ghojghar, M.¹  | Pourmohammad, P.² 

1. Assistant Professor, Department of Reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.
2. Ph.D. candidate, Department of Reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: Ansari.ghojghar@ut.ac.ir

(Received: 03 Dec 2024, Revised: 04 Jan 2025, Accepted: 08 Jan 2025, Published online: 09 Apr 2025)

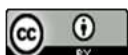
Abstract

Climate change and rapid urbanization, particularly in cities with inadequate infrastructure, have significantly increased the frequency and intensity of destructive floods. Beyond the devastation of physical infrastructure, floods pose grave threats to human health and the environment. Addressing these challenges necessitates the adoption of hydrological modeling and simulation to predict and manage floods effectively. This research explores the potential of metaverse technologies in flood modeling and visualization. Virtual reality (VR) and augmented reality (AR) tools offer highly precise simulations of flood scenarios, enabling planners, citizens, and stakeholders across communities to make informed, practical decisions based on complex datasets. These technologies facilitate more effective risk mitigation and damage reduction strategies. By offering more immersive and realistic simulations, metaverse technologies greatly enhance predictive accuracy and decision-making in flood crisis management. Consequently, they hold a transformative role in reducing vulnerabilities and strengthening community resilience against natural disasters.

Keywords: Natural Hazards, Augmented Reality, Virtual Reality, Mixed Reality, Internet of Things

Cite this article: Ansari ghojghar, M. and Pourmohammad, P. (2025). Assessment the impacts of Metaverse industry on flood modeling visualization. Journal of the Nivar, 49(128-129), 145-157. DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.491959.1314>

E-mail: (2) Paria.pormohamad7@ut.ac.ir



بررسی تاثیر فناوری‌های صنعت متاورس در عینیت بخشی مدل سازی سیلاب

محمد انصاری قوجقار^۱ | پریا پورمحمد^۲

۱. استادیار، گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.
۲. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: Ansari.ghojghar@ut.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۳، بازنگری: ۱۴۰۳/۱۰/۱۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۱۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۱/۲۰)

چکیده

تغییرات اقلیمی و رشد سریع شهرنشینی، به ویژه در شهرهایی با زیرساخت‌های ضعیف، سبب افزایش وقوع سیلاب‌های مخرب با شدت زیاد شده است. سیلاب علاوه بر تخریب زیرساخت‌های فیزیکی، تهدیدات جدی برای سلامت انسان‌ها و محیط‌زیست به همراه دارند. در این راستا و به منظور جلوگیری از وقوع و کاهش شدت تخریب‌های حاصله، استفاده از مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌های هیدرولوژیکی برای پیش‌بینی و مدیریت سیلاب‌ها، امری ضروری است. پژوهش حاضر، به بررسی تاثیر فناوری‌های متاورس در مدل‌سازی و تصویرسازی سیلاب پرداخته شده است. فناوری‌های واقعیت مجازی و واقعیت افزوده، قادر به ارائه شبیه‌سازی‌های بسیار دقیقی از سناریوهای سیلابی هستند. بدین ترتیب به برنامه‌ریزان، شهروندان و ذی‌نفعان در جوامع مختلف کمک می‌کنند تا با استفاده از داده‌های پیچیده، تصمیم‌گیری‌های بهتر و کاربردی‌تری به منظور کاهش خطرات و آسیب‌ها اتخاذ کنند. از آنجا که شبیه‌سازی عینی‌تر و ملموس‌تر کمک شایانی به بهبود پیش‌بینی‌ها و اخذ تصمیم‌های بهتر در مدیریت بحران‌های سیلابی می‌کنند، لذا فناوری‌های متاورس نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری جوامع در برابر بلایای طبیعی ایفا خواهند کرد.

کلیدواژه‌ها: مخاطرات طبیعی، واقعیت افزوده، واقعیت مجازی، واقعیت ترکیبی، اینترنت اشیا

۱. مقدمه

منفی گسترده‌ای دارند که نه تنها انسان، بلکه تمامی موجودات زنده را تحت تاثیر قرار داده است. برخی از پیامدهای مخرب این تغییرات اقلیمی شامل افزایش خطرات سلامتی، بارش‌های سیل‌آسا، شدید و مکرر، همراه با دوره‌های خشک‌سالی، آتش‌سوزی جنگل‌ها، سیلاب‌ها و ذوب یخچال‌های طبیعی است که به بالا رفتن سطح آب دریاها منجر می‌شود (سازمان ملل متحد، ۲۰۲۲). در واقع، به‌طور خاص، مناطق مختلف جهان شاهد بارش‌های سنگین‌تر و رویدادهای جوی مانند

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و افزایش فراوانی و شدت بلایای طبیعی به‌ویژه سیلاب‌ها، توجه جهانی را به‌خود جلب کرده است (IPCC 2021). تغییر اقلیم^۱ و گرمایش جهانی^۲ از بزرگ‌ترین چالش‌های جهان در دهه‌های اخیر محسوب می‌شوند (پاچائوری و همکاران، ۲۰۰۷؛ راجک، ۲۰۲۱؛ سیوارامانان، ۲۰۱۵) که الگوها و پدیده‌های جوی سراسر جهان را دستخوش تغییر کرده‌اند. تغییرات اقلیمی تاثیرات

² Global warming

¹ Climate change

استناد: انصاری قوجقار، محمد؛ و پورمحمد، پریا. (۱۴۰۴). بررسی تاثیر فناوری‌های صنعت متاورس در عینیت بخشی مدل‌سازی سیلاب. مجله نیوار، ۱۲۹-۱۲۸، ۱۵۷-۱۴۵

DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.491959.1314>

رایانامه: Paria.pormohamad7@ut.ac.ir (۲)



مدیریت یکپارچه منابع آب و تکنیک‌های مهندسی رودخانه، همراه با راهکارهای غیرسازه‌ای مثل توسعه فضای سبز نفوذپذیر و بهینه‌سازی سامانه‌های زهکشی، نقش مهمی در کاهش اثرات سیلاب‌های شهری ایفا می‌کنند. با این وجود، موفقیت راهکارهای ذکر شده، به مشارکت فعال ذی‌نفعان و ذی‌مدخلان وابسته است (رفیعی سارودی، ۲۰۲۱). مشارکت و همکاری مؤثر میان تمامی ذینفعان تضمین‌کننده نگرش جامع بر ابعاد مختلفی چون تحلیل هیدرولوژیکی، طراحی سامانه‌های کنترل سیلاب، و مدیریت پیامدهای اجتماعی و محیط‌زیستی است. این رویکرد نه تنها امکان توسعه و اجرای موفق برنامه‌های مدیریت ریسک سیلاب^۳ را فراهم می‌کند، بلکه به افزایش تاب‌آوری جوامع و زیرساخت‌ها در برابر این مخاطرات کمک می‌کند (گیوز و همکاران، ۲۰۱۶). پیش‌بینی افزایش در شدت و فراوانی این سیلاب‌ها، درک خطرات مرتبط و تدوین سیاست‌هایی به‌منظور مقابله با آن‌ها، بخش جدایی‌ناپذیر برنامه‌ریزی شهری محسوب می‌شود. تصویرسازی‌ها (عینیت بخشی)^۴، نقش مهمی در درک و انتشار اطلاعات حاصل از شبیه‌سازی سیلاب‌ها و مدل‌سازی سناریوها برای برنامه‌ریزان ایفا می‌کنند (اسمیت و همکاران، ۱۹۹۸). با توجه به ماهیت نهادی مدیریت ریسک سیلاب، پیش‌تر تصویرسازی‌ها سعی بر هماهنگی زیرساخت‌های موجود در برنامه‌ریزی و مدیریت ریسک دارند. بدین ترتیب، این یکپارچگی، حوزه تصویرسازی سیلاب را به زمینه‌ای جذاب تبدیل کرده است (ریدوانسکی و همکاران، ۲۰۲۱). در مواجهه با این تهدید فزاینده، نگرانی‌ها درباره اثربخشی راهبردهای پاسخ به سیلاب افزایش یافته است. این موضوع ضرورت بهبود مستمر در روش‌ها و استراتژی‌های مدیریت سیلاب را بیش از پیش برجسته می‌سازد. در این بین، پیشرفت‌های فناوری‌های دیجیتال می‌توانند نقش کلیدی در بهبود آمادگی و واکنش به این پدیده ایفا کنند و به توسعه راه‌حل‌های نوین و کارآمد برای مقابله با اثرات مخرب سیلاب‌ها کمک کنند (ترنر و همکاران، ۲۰۲۴).

طوفان‌های گرمسیری و بادهای سهمگین هستند که این تغییرات عمدتاً ناشی از افزایش تبخیر و رطوبت در جو به دلیل افزایش دما است (وولوی و همکاران، ۲۰۲۰). این پدیده‌ها به‌ویژه در مناطق شهری که اغلب فاقد زیرساخت‌های مناسب مدیریت آب و زهکشی هستند، خطرات قابل توجهی ایجاد کرده‌اند (سوراو و همکاران، ۲۰۲۱).

با توجه به روند فزاینده شهرسازی و شدت یافتن پدیده‌های جوی ناشی از تغییرات اقلیمی، وقوع سیلاب‌های شهری در آینده‌ای نه چندان دور بیش از پیش افزایش خواهد یافت. سیلاب‌های شهری از جمله مخرب‌ترین پدیده‌هایی است که با شدت زیاد وقوع و گسترش مکانی بالا، تاثیرات مخربی بر زیرساخت‌های فیزیکی و پایداری جوامع دارد. این سیلاب‌ها با تخریب سازه‌ها، تضعیف پی‌ها، انسداد سامانه‌های زهکشی و افزایش فرسایش خاک، خسارات جبران‌ناپذیری ایجاد می‌کنند. چنین خساراتی به‌ویژه در زیرساخت‌های حیاتی مانند جاده‌ها، پل‌ها و شبکه‌های حمل و نقل که نقش کلیدی در مدیریت هیدرولوژیکی شهری دارند، مشهود است (پاده و همکاران، ۲۰۲۳). اثرات سیلاب‌های شهری از منظر انسانی و اجتماعی، بسیار گسترده و ویرانگر می‌باشند. رواناب و جریان‌های سطحی شدید سبب غرق شدن، جراحات جدی و تخریب اموال می‌شوند (بختیاری و همکاران، ۲۰۲۳). علاوه بر این موارد، نفوذ سیلاب به سیستم‌های فاضلاب ترکیبی و انتقال مواد شیمیایی و آلاینده‌ها و ترکیب آن‌ها با رواناب، خطر شیوع بیماری‌های قابل انتقال از طریق آب را به شدت افزایش می‌دهند. سیلاب‌ها علاوه بر خسارات فیزیکی، خسارت‌های محسوس^۱ و نامحسوس^۲ نیز دارند که خود به دو دسته اثرات مستقیم و غیرمستقیم تقسیم‌بندی می‌شوند. اثرات روانی سیلاب‌ها و رویدادهای این‌چنینی نیز قابل توجه است. استرس و اضطراب ناشی از سیلاب اغلب اثرات بلندمدتی بر سلامت روان افراد برجای می‌گذارد (سارما و همکاران، ۲۰۲۰)، که این اثرات از جمله خسارات نامحسوس به‌شمار می‌روند. در سال‌های اخیر، استفاده از رویکردهای

³ Flood Risk Management

⁴ Visualization

¹ Tangible

² Intangible

حالی که روش‌های سنتی مدل‌سازی سیلاب مانند روش‌های هیدرولیکی و هیدرولوژیکی، به خوبی قادر به شبیه‌سازی رفتار سیلاب‌ها هستند، ولی این روش‌ها معمولاً با محدودیت‌هایی در دقت، سرعت، زمان و ... مواجه می‌باشند. همچنین، حجم بالای داده‌ی موجود و پیچیدگی‌هایی که مدل‌های سه‌بعدی دارند، فرآیند ارزیابی، تجزیه و تحلیل و درک نتایج را برای محققان و تصمیم‌گیران سخت می‌کنند (انیس و همکاران، ۲۰۱۶).

متاورس^۷ می‌تواند کارایی مدل‌سازی‌های صورت گرفته را با ارائه تجسم‌های تعاملی و محیط‌های شبیه‌سازی شده ارتقا دهد. یکی از راه‌های جدید و نوآورانه به منظور عینیت‌بخشی و تصویرسازی سیلاب و افزایش کارایی مدل‌سازی‌ها در این زمینه، استفاده از فناوری‌های واقعیت افزوده^۸، واقعیت مجازی^۹ و واقعیت ترکیبی^{۱۰} صنعت متاورس است که پتانسیل زیادی در ارائه مدل‌های سه‌بعدی واقع‌گرایانه و ایجاد تعاملات مجازی فراهم می‌کند (ژائو و همکاران، ۲۰۲۲). در حوزه مدیریت سیلاب، ابزارهای واقعیت افزوده برای نمایش تاثیرات سیلاب به صورت حضوری (مانند مشاهده در محل وقوع) و به صورت غیرحضوری (مانند ارزیابی از راه دور) توسعه یافته‌اند. علاقه به این موضوع همزمان با پیشرفت فناوری‌ها و رابط‌های واقعیت ترکیبی که قابلیت بهبود تعامل و درک داده‌های پیچیده سه‌بعدی را دارد، بیش از پیش، افزایش یافته است. مول و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهش خود از فناوری واقعیت افزوده به منظور شبیه‌سازی سیلاب و بررسی تاثیر آن بر سیاست‌گذاران در راستای کاهش خطرات، استفاده کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که درک خطراتی که احتمال وقوع کم اما با شدتی زیاد دارند، مانند سیلاب‌های شدید، برای افرادی که به صورت ملموس و عینی با این چنین خطراتی آشنا نیستند، دشوار است. پس از تصویرسازی و شبیه‌سازی این وقایع، افراد تمایل بیشتری به کاهش خطرات و اقدامات پیش‌گیرانه نشان دادند. سیمپسون

سیلاب‌ها با ویژگی‌هایی چون پیشرفت سریع، تاثیرات وسیع مکانی و همچنین تعاملات پیچیده محیط‌زیستی خود، نیازمند شبیه‌سازی دقیق و به موقع به منظور مدیریت بحران و جلوگیری از خسارات می‌باشند (بیلاسکو و همکاران، ۲۰۲۰؛ آنیسا و همکاران، ۲۰۲۳). در دهه‌های گذشته، تصویرسازی سه‌بعدی اثرات سیلاب به طور فزاینده‌ای مورد توجه مدیران، برنامه‌ریزان و محققان قرار گرفته است (ژاکوئینو و همکاران، ۲۰۱۹). این تصویرسازی‌ها عمدتاً با هدف تحلیل ریسک طراحی شده و معمولاً بر این فرض استوارند که نسبت به محیط طبیعی برای افراد غیرمتخصص ملموس‌تر و قابل درک‌تر هستند (لای و همکاران، ۲۰۱۱). با وجود جذابیت و کاربردهای فراوان بسیاری از این ابزارها، هنوز تحقیقات کافی برای اثبات ارزش و کارایی واقعی آن‌ها در بهبود درک داده‌ها و رخدادهای محیطی برای کاربران وجود ندارند (ریدوانسکی و همکاران، ۲۰۲۱). یکی از پیش‌نیازهای اصلی و اساسی در تصویرسازی سیلاب، محاسبات عددی^۱ است (لو و همکاران، ۲۰۲۲). در این خصوص، از انواع مختلف معادلات دیفرانسیل جزئی نظیر معادلات سنت و نان^۲ (SV)، ناویر-استوکس^۳ (NS) و معادلات آب کم‌عمق^۴ (SW) به منظور تحلیل کمی رویدادهای سیلاب استفاده می‌شود. با این حال، این معادلات، چالش‌های محاسباتی قابل توجهی را در پی داشته و نیاز به گسسته‌سازی دارند (چورین، ۱۹۶۸؛ استرلکف و همکاران، ۱۹۷۰؛ فروگدن‌هیل، ۱۹۹۴). این روش‌ها شامل روش تفاضلات محدود^۵ (FDM)، المان محدود^۱ (FEM) هستند (هیوز، ۲۰۱۲). انجام محاسبات عددی سیلاب سه‌بعدی به دلیل محدود بودن قدرت پردازش رایانه‌ها در گذشته، کار دشواری بود (جودی و همکاران، ۲۰۱۱؛ لیو و همکاران، ۲۰۱۸). ولی در سال‌های اخیر و با پیشرفت‌های چشمگیر فناوری‌های اطلاعات و ارتباط و شبکه‌های عصبی، انجام این محاسبات به صورت قابل توجهی ساده‌تر و رایج‌تر شده است (لیا و همکاران، ۲۰۱۴). در

⁶ Finite element method

⁷ Metaverse

⁸ Augmented Reality

⁹ Virtual Reality

¹⁰ Mixed Reality

¹ Numerical calculations

² Saint-Venant's equations

³ Navier-Stokes equations

⁴ Shallow water equations

⁵ Finite difference method

متاورس ترکیبی از واژه‌های ^۱ متا (به معنی فراتر و برتر) و ^۲ ورس (به معنی جهان) است. متاورس در واقع فضایی سه‌بعدی و مجازی است که در آن افراد با استفاده از آواتارها و به کمک فناوری‌های واقعیت افزوده ^۳ و واقعیت مجازی ^۴ و از اینترنت اشیا ^۵ با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند. در این فضا، آواتارها نسخه دیجیتالی از افراد هستند که قابلیت تعامل و حرکت در محیط‌های مجازی را دارند. تحولات گسترده‌ای که با گسترش فضای مجازی پس از دوران کشاورزی و صنعتی به وجود آمده است، چشم‌اندازی تازه به دوران پسامردن ارائه کرده و تمامی جنبه‌های زندگی فردی و اجتماعی مردم جهان را تحت تأثیر قرار داده است. این تغییرات در حال شکل‌دهی به تمدنی جدید هستند، تمدنی که در آن مرزها و حکومت‌ها به معنای سنتی خود تعریف نمی‌شوند. به همین دلیل، حکمرانی در فضای مجازی به یکی از پیچیده‌ترین چالش‌ها برای دولت‌ها تبدیل شده است. متاورس به‌عنوان نوعی واقعیت مجازی شناخته می‌شود. محیطی دیجیتال و ساختگی که کاربران می‌توانند در آن در جهانی متفاوت فعالیت کنند و تجربه‌هایی مشابه با دنیای واقعی داشته باشند. این تجربیات حتی می‌توانند تأثیرات ملموس و فیزیکی بر زندگی واقعی افراد داشته باشند (میستاکیدیس، ۲۰۲۲). با وجود فاصله زیاد تا نمونه‌های عملی و کاربردی فناوری متاورس، این مفهوم از دهه‌ها پیش در داستان‌ها، بازی‌های ویدیویی و فناوری‌های دیجیتال مطرح بوده است. اصطلاح متاورس نخستین بار در دهه ۱۹۹۰ میلادی توسط نیل استفسون در کتاب *اسنو کرش* معرفی شد. در این کتاب، انسان‌ها قادرند از دنیای واقعی پرمشقت خود به یک جهان مجازی و دیجیتال نقل‌مکان کنند و در آن زندگی جدیدی را آغاز کنند (دیونیسو و همکاران، ۲۰۱۳). تحولات مختلف، از ایده‌های اولیه گرفته تا تغییر نام فیس‌بوک به متا، بیانگر توجه گسترده و برنامه‌ریزی‌های طولانی‌مدت برای توسعه متاورس است. این فناوری، جهانی موازی و مجازی که با استفاده از گرافیک‌های رایانه‌ای ساخته

و همکاران (۲۰۲۲) تاثیر فناوری‌های واقعیت مجازی و شبیه‌سازی را در تحلیل خطرات ناشی از طوفان‌های دریایی بررسی کرده‌اند. یافته‌های آنان نشان داد که ابزارها و روش‌های سنتی مانند نقشه‌ها در انتقال کامل و دقیق خطرات ناتوان هستند. اما واقعیت مجازی به کاربران این امکان را می‌دهد که با درک تاثیر ارتفاع آب، ارزیابی مناسب‌تر و تحلیل دقیق‌تری از نیازهای امداد و کمک‌رسانی داشته باشند. بدین ترتیب خطرات جانی ناشی از چنین بحران‌هایی نیز کاهش می‌یابد. توشیو و همکاران (۲۰۲۰) از فناوری واقعیت مجازی برای شبیه‌سازی سیلاب‌های ناگهانی، به منظور بررسی تاثیر آن‌ها بر تصمیم‌گیری‌های فوری برای تخلیه شهر، پرداختند. در پژوهش آنان، ۱۰۳ دانشجوی دانشگاه کوماموتو ژاپن شرکت کردند. نتایج بررسی‌های آن‌ها نشان داد که این شبیه‌سازی سبب اخذ تصمیم‌های سریع‌تر، دقیق‌تر و موثرتری برای تخلیه شده است. یافته‌های آنان نشان دهنده این مورد بود که تغییرات شبیه‌سازی شده اجتماعی-محیطی در محیط واقعیت مجازی، سبب بهبود رفتار و واکنش افراد در برابر بلایا می‌شود. بدین ترتیب و با توجه به پیشینه تحقیق صورت گرفته مشخص می‌شود که تغییرات اقلیمی به‌طور فزاینده‌ای موجب افزایش وقوع بلایای طبیعی مانند سیلاب که تأثیرات منفی زیادی بر محیط زیست و جوامع بشری دارند، شده است. لذا در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر فناوری‌های صنعت متاورس در عینیت بخشی مدل‌سازی سیلاب پرداخته شده است. پیشرفت‌های تکنولوژیکی، به‌ویژه در زمینه مدل‌سازی سیلاب، می‌توانند نقش کلیدی در بهبود آمادگی و واکنش در برابر این پدیده داشته باشند. تصویرسازی سیلاب با استفاده از فناوری‌های نوین مانند واقعیت مجازی و واقعیت افزوده می‌تواند به بهبود درک و تحلیل داده‌ها و به‌دنبال آن، بهبود تصمیم‌گیری در شرایط بحرانی کمک کند.

۲. روش تحقیق

۱-۲. متاورس

⁴ Virtual reality

⁵ Internet of things

¹ Meta

² Verse

³ Augmented reality

را از دنیای واقعی جدا و تعاملات آن‌ها یکدیگر و محیط واقعی را محدود می‌کند. با استفاده از VR، تصویرسازی‌های سیلاب در محیط واقعی قرار می‌گیرند و امکان مشاهده سیلاب‌های مجازی در محیط واقعی به‌طور همزمان وجود دارد. بدین ترتیب محدودیت تجسم سیلاب‌های واقعیت مجازی برطرف می‌شود.

۲-۱-۲. واقعیت مجازی (VR)

VR امکان شبیه‌سازی دقیق و تعاملی محیط‌های سیلابی را در یک فضای مجازی فراهم می‌کند (شکل ۱). از واقعیت مجازی به‌منظور شبیه‌سازی سناریوهای سیلاب، بررسی اثرات آن بر زیرساخت‌ها و برنامه‌ریزی برای مدیریت بحران سیلاب استفاده می‌شود. در این محیط، کاربران می‌توانند در فضای شبیه‌سازی شده از سیلاب قدم بزنند و آن را از زوایای مختلف مشاهده و ارزیابی کنند. بدین ترتیب درک بهتر و عمیق‌تری از اثرات سیلاب به کاربران ارائه می‌شود (شکل ۲). لذا از واقعیت مجازی در آموزش و شبیه‌سازی، تحلیل اثرات سیلاب و مدیریت بحران استفاده می‌شود. ابزار و وسایل مورد نیاز برای تحقق این امر شامل هدست (برای مشاهده محیط‌های مجازی)، دستگاه‌های ورودی که شامل دسته‌های بازی، کنترلرهای حرکتی یا دستکش‌های VR، ایستگاه‌های پردازش قدرتمند شامل رایانه‌هایی با پردازشگر گرافیکی قدرتمند برای رندینگ سیلاب در محیط سه‌بعدی هستند. مدل‌های سه‌بعدی دقیق از محیط، شامل داده‌های LiDAR، داده‌های بارش، جریان، دبی، دما و داده‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده سطح آب مورد نیاز است.

شده است را به نمایش می‌گذارد. کاربران با استفاده از ابزارهایی مانند هدفون‌ها و عینک‌های ویژه به این دنیا متصل می‌شوند و در قالب آواتارهایی، که تجسم دیجیتالی آن‌هاست، حضور پیدا می‌کنند (هانگ و همکاران، ۲۰۲۲). یکی از کاربردهای کلیدی متاورس، در کاهش خطر بلایا و تصویرسازی آن‌هاست. بدین ترتیب افراد می‌توانند با استفاده از آواتارهای خود، شرایط وقوع بلایای طبیعی در محیط مجازی را تجربه کنند. این شبیه‌سازی به شهروندان و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا خطرات را بهتر و ملموس‌تر درک و آمادگی بیشتری برای مواجهه با شرایط و بحران‌های واقعی پیدا کنند. متاورس فرصتی بی‌نظیر برای یادگیری عمیق برای شهروندان، سیاست‌گذاران و مدیران فراهم می‌کند تا تاثیر بلایا و راهکارهای پیشگیری از بحران را بهتر درک کنند. استفاده از فناوری‌های واقعیت مجازی به‌واسطه استفاده از متاورس، امکان آگاهی بیشتر و بهبود اقدامات پیشگیرانه برای کاهش خطرات بلایا را فراهم کرده است (محمودی و همکاران، ۱۴۰۱).

۲-۲. فناوری‌های صنعت متاورس

واقعیت مجازی و واقعیت افزوده تکنیک‌های جدیدی برای تصویرسازی و تجسم سیلاب هستند. عینیت‌بخشی سیلاب در واقعیت مجازی معمولاً بصری‌تر و واقعی‌تر از تجسم‌های سه‌بعدی مبتنی بر صفحه نمایش است و تعاملات طبیعی‌تری میان انسان و کامپیوتر برقرار می‌کند (فیلیس و همکاران، ۲۰۱۵؛ چن و لین، ۲۰۱۸؛ مساعی و همکاران، ۲۰۱۸). با این وجود، محیط مجازی و غوطه‌ور ایجادشده در VR، کاربران



شکل ۱- استفاده از واقعیت مجازی به‌منظور عینیت‌بخشی سیلاب شهری (چن و همکاران، ۲۰۲۳)



شکل ۲- تصویرسازی سیلاب شهری شبیه سازی شده با VR (سرمت و همکاران، ۲۰۲۰)

۲-۲-۲. واقعیت افزوده (AR)

این فناوری امکان افزودن لایه های مجازی به محیط واقعی به منظور مشاهده و تعامل با سیلاب ها در زمان واقعی وقوع را فراهم می کند. لذا می توان مدل های سیلاب را بر محیط های واقعی مانند شهرها یا مناطق آسیب دیده از سیلاب در دنیای فیزیکی اعمال و تاثیرات سیلاب را مشاهده کرد. با استفاده از این فناوری، امکان پایش و نظارت بر وقوع سیلاب در محیط های واقعی و فیزیکی وجود دارد. به این منظور، از دستگاه های موبایل، تبلت، عینک های واقعیت افزوده و پروژکتور های تعاملی برای نمایش تغییرات سیلاب بر سطوح فیزیکی استفاده می شود. در این مورد نیز مانند مورد قبلی، از داده های توپوگرافی، داده های سیلاب های واقعی و سیلاب های تاریخی و داده های حاصل از حسگر و سنجنده ها به منظور عینیت بخشی مدل سازی سیلاب استفاده می شود (سرمت و همکاران، ۲۰۲۰).

۲-۲-۳. واقعیت ترکیبی^۱ (MR)

واقعیت ترکیبی طی سه دهه گذشته پیشرفت چشمگیری داشته و ابزارهای آن می توانند در فعالیتهای روزمره به کار گرفته شوند. با پیشرفت در فناوری هایی مانند نمایشگرها، قدرت پردازش، ردیابی حرکات و ... ابزارهای واقعیت ترکیبی فرصت های متنوعی برای تعامل بهتر با داده ها فراهم کرده اند. جذابیت این فناوری تنها به سخت افزار یا نرم افزار آن محدود نمی شود، بلکه به تعامل میان داده ها و کاربران بستگی دارد. رابط های واقعیت ترکیبی می توانند درک افراد

از موضوعاتی مانند خطر سیلاب (مانند عمق و وسعت آن) یا رفتارهای مرتبط با آن (مانند تمایل به واکنش) را تحت تأثیر قرار دهند. این رابطه فراتر از ابزارهای صرفاً نمایشی هستند و به عنوان ابزاری برای تعامل حسی، حرکتی و فضایی عمل می کنند. واقعیت ترکیبی قابلیت ها و ویژگی های منحصر به فردی برای استفاده عملی از داده های مکانی، به خصوص در محیط های مشترک و کارهای گروهی، ارائه می دهد (شکل ۳). برخلاف واقعیت مجازی که به فضای کاملاً مجزا نیاز دارد، واقعیت ترکیبی بسیاری از مزایای VR مانند حضور مجازی و تجربه غوطه وری، نمایش سه بعدی واقعیت را دارا است ولی این ویژگی ها به صورتی ادغام شده اند که توانایی کاربرد در محیط های کاری معمولی متناسب با نیازهای روزمره را نیز دارند. در محیط واقعیت ترکیبی، امکان تعامل با محیط مجازی، سایر افراد و محیط واقعی به طور همزمان وجود دارد. لذا کاربران می توانند بدون نیاز به خروج از این محیط، به ابزارها، نقشه ها، کاغذها و یا طرح های خود دسترسی داشته باشند. با وجود عدم دسترسی گسترده به دستگاه های MR، زیرساخت های لازم برای توسعه ابزارهای بصری و کاربردی در این حوزه، در حال حاضر در دسترس است و در حال بروزرسانی و گسترش است. علاوه بر این، تحقیقات بیشتری به منظور درک بهتر نقش اجزای مختلف رابط های واقعیت ترکیبی (مانند داده ها، نمایشگرها، روش های تعامل کاربران و تکنیک های بصری سازی) به منظور درک بهتر کاربران، مورد نیاز است (ریدوانسکی و همکاران، ۲۰۲۱).

¹ Mixed reality



شکل ۳- استفاده از فناوری واقعیت ترکیبی (ریدوانسکی و همکاران، ۲۰۲۱)

۳. بحث

۱-۳. عینیت بخشی مدل سازی سیلاب

مسکونی را مشاهده کنند. همچنین، متاورس قابلیت‌هایی مانند ایجاد تعاملات میان ذینفعان مختلف را در بر دارد. این ویژگی به‌ویژه در مدیریت بحران‌های سیلابی اهمیت دارد زیرا وجود همکاری میان ذینفعان مختلف از جمله مقامات محلی، برنامه‌ریزان شهری، متخصصان محیط زیست و جوامع محلی ضروری است. متاورس با فراهم آوردن فضایی مشترک برای تعامل و تبادل اطلاعات، می‌تواند فرآیند تصمیم‌گیری را تسهیل کرده و به تحلیلگران کمک کند تا به‌طور دقیق‌تر به نیازها و شرایط مختلف پاسخ دهند (هیوز و همکاران، ۲۰۲۱). به علاوه، این محیط‌ها به دلیل قابلیت تعامل در زمان واقعی، می‌توانند ابزارهای موثری برای آموزش و آگاه‌سازی عمومی در زمینه مدیریت بحران سیلاب نیز باشند. در نهایت، استفاده از فناوری‌های صنعت متاورس در مدل‌سازی سیلاب می‌تواند به توسعه راهکارهای نوآورانه برای مدیریت پایدار منابع آب و کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها کمک کند. با شبیه‌سازی دقیق‌تر و عینی‌تر تأثیرات سیلاب‌ها و بهینه‌سازی استراتژی‌های مقابله، این فناوری قادر به اتخاذ تصمیم‌های بهتری در زمینه مدیریت سیلاب و حفاظت از زیرساخت‌های شهری خواهد بود. لذا درک و ارزیابی تأثیرات این فناوری‌ها بر مدل‌سازی سیلاب نه تنها در بهبود پیش‌بینی‌ها موثر است، بلکه می‌تواند نقشی کلیدی در کاهش ریسک و آسیب‌پذیری جوامع در برابر بلایای طبیعی داشته باشد.

با افزایش فراوانی و شدت وقوع سیلاب‌ها در سال‌های اخیر، عملیات‌های اضطراری و نجات با چالش‌های قابل توجهی روبه‌رو شده است. روش‌های ارزیابی ریسک و مسیریابی در

متاورس به عنوان فضایی مجازی و پویا، قادر است به شیوه‌ای تعاملی داده‌های مدل‌سازی سیلاب را در قالب محیط‌های سه‌بعدی تصویرسازی کند که نه تنها دقت و وضوح مدل‌ها را بهبود می‌بخشد بلکه قابلیت‌های جدیدی را برای بررسی سناریوهای مختلف و پیش‌بینی اثرات آن‌ها در شرایط واقعی فراهم می‌آورد. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های متاورس، امکان برقراری تعاملات چندجانبه همزمان با استفاده از فناوری‌های واقعیت مجازی و واقعیت افزوده است که می‌تواند درک بهتری از رفتار سیلاب‌ها و تأثیرات آن بر زیرساخت‌ها و جوامع مختلف فراهم کند. بدین ترتیب، داده‌های پیچیده و بزرگ مرتبط با سیلاب‌ها، به شکلی ملموس، عینی و قابل درک برای ذینفعان مختلف، از جمله متخصصان و شهروندان، قابل استفاده باشد. از مهم‌ترین فواید استفاده از متاورس در مدل‌سازی سیلاب، می‌توان به توانایی ایجاد محیط‌های شبیه‌سازی شده واقعی اشاره کرد که به شهروندان، برنامه‌ریزان و متخصصان کمک می‌کند تا سناریوهای مختلف در زمان وقوع سیلاب را در زمان واقعی و هنگام وقوع مشاهده و پاسخ‌های مختلف را به‌طور موثر و کارآمد مورد آزمایش و تحلیل قرار دهند. در این راستا، کاربران می‌توانند با استفاده از فناوری‌های AR و VR، به‌طور تعاملی وارد محیط‌های شبیه‌سازی شده شوند و از نزدیک اثرات مختلف ایجاد تغییر در شدت بارش، ارتفاع رواناب و روند تغییرات و تخریب‌های ایجادشده در سازه‌های حفاظتی و

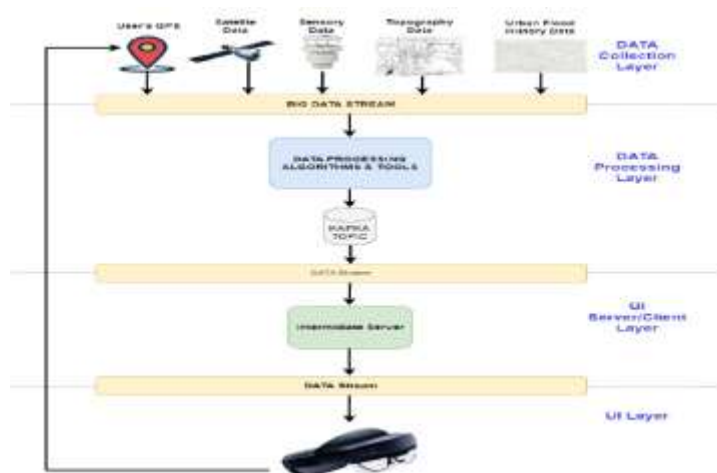
فراهم شده است که این موضوع، تجربه‌ی ملموس‌تر و تعاملی جذاب‌تر را برای آنان فراهم میکند. در این خصوص، یک نمونه واقعیت افزوده موبایلی (MAR) توسعه یافته است. این فناوری به صورت بلادرنگ مدل‌های ساختمانی موجود را بروزرسانی کرده و تجسم تعاملی از سیلاب را همراه با ترکیبی از اطلاعات دریافتی از حسگرهای هوشمند و زنده (مانند سطح آب دریاها، رطوبت هوا و رطوبت خاک) ارائه می‌دهد (هینز و همکاران، ۲۰۱۸).

امدادگران و پرسنل مدیریت بحران با استفاده از هدست‌های واقعیت افزوده، به تصاویر بلادرنگ سیلاب‌های شهری دسترسی خواهند داشت. تصویرسازی‌ها شامل نمایش سطح آب، نمایش مناطق آسیب‌دیده و مسیرهای ایمن هستند. ترکیب فناوری واقعیت افزوده با تحلیل داده‌های بزرگ مقیاس امکان ترکیب پویای پیش‌بینی‌های هواشناسی، داده‌های تاریخی سیلاب و توپوگرافی شهری را فراهم می‌کند. نتایج پردازش داده‌ها ذخیره و هدست‌ها با استفاده از یک کلاینت به پدیده مدنظر مرتبط و پیام‌های مناسب را دریافت می‌کنند. پس از دریافت پیام از دستگاه‌ها و هدست‌های واقعیت افزوده، پیام‌ها جهت استخراج اطلاعات ضروری برای تصویرسازی پردازش می‌شوند. داده‌های جغرافیایی، اطلاعات حسگرهای هواشناسی، داده‌های توپوگرافی، سوابق سیلاب‌های گذشته و سیلاب‌های تاریخی، تصاویر ماهواره‌ای و موقعیت جغرافیایی از جمله داده‌های موردنیاز برای ترکیب هستند (شکل ۴). علاوه بر این موارد، زیرساخت‌های حیاتی برای حفاظت در برابر سیلاب، نتایج مدل‌سازی‌های عددی سیلاب و اطلاعاتی مانند ابعاد زیرساخت‌های شبکه فاضلاب، کانال‌ها در تصویرسازی‌ها لحاظ می‌شوند. نقشه خطر سیلاب و همچنین اطلاعات جمعیتی و ساختمان‌ها نیز در مدیریت سیلاب موثرند. در نهایت، زیرساخت‌های شهری مانند جاده‌ها، سیستم‌های آب شرب، فاضلاب، بهداشتی و آموزشی به این تصویرسازی‌ها افزوده می‌شوند تا نقش آن‌ها در تاب‌آوری شهرها در برابر سیلاب مشخص شود (استاوروولاکیس و همکاران، ۲۰۲۴). زمانی که کاربر در محل حضور پیدا می‌کند، هدست‌های

محیط‌های سیلابی که به‌طور مداوم در حال تغییر هستند، وابسته به روش‌های تجسم سیلاب هستند. این روش‌ها باید به‌طور موثری خطرات را منتقل کنند بدون آن‌که برای امدادگران خطرات اضافی ایجاد کنند (کارور، ۲۰۱۹). ابزارهای دیجیتال مدرن تصویرسازی و تجسم، نقش مهمی در بهبود مدیریت خطرات سیلاب در مناطق شهری دارند (لسکنس و همکاران، ۲۰۱۷). در این بین، همان‌طور که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد، به‌جای استفاده از تصویرسازی‌های دو بعدی رایج (تو و همکاران، ۲۰۲۰)، فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند واقعیت مجازی، واقعیت افزوده و شبیه‌سازی‌های دوقلوی دیجیتال برای نمایش و تصویرسازی سناریوهای سیلاب شهری به‌طور گسترده به کار می‌روند (اوئی‌شی و همکاران، ۲۰۲۲). در این بین، واقعیت مجازی جهت تصویرسازی نتایج شبیه‌سازی سناریوها بدون آگاهی از دنیای واقعی به‌طور خاص بیش‌تر استفاده شده است (کالیل و همکاران، ۲۰۲۱؛ سرمت و همکاران، ۲۰۱۹). با این‌که تحقیقات در زمینه تصویرسازی سیلاب شهری بیش‌تر بر مراحل آمادگی و پیشگیری از وقوع متمرکز بوده است، اما هنوز شکاف‌های قابل‌توجهی در مدیریت و مشاهده آنی حوادث سیلاب شهری در محیط واقعیت افزوده وجود دارد (بختیاری و همکاران، ۲۰۲۳). کاربرد تلفن‌های همراه و تبلت‌ها در تجسم سیلاب‌های شهری با واقعیت افزوده (MAR)، عملیات‌های میدانی را با مشکل و محدودیت مواجه می‌کند چون استفاده از آن‌ها بدون دست ممکن نیست (میراثودا و همکاران، ۲۰۱۸). به‌منظور رفع این محدودیت، می‌توان از هدست‌های واقعیت افزوده استفاده کرد. این هدست‌ها به کاربران امکان می‌دهد تا بدون دخالت دست کار کنند. علاوه بر این، پیش‌بینی رویدادهای پیش‌رو و احتمالی، به‌صورت بلادرنگ به کاربران منتقل می‌شود. بدین صورت، کاربران با استفاده از یک برنامه واقعیت افزوده که مدل‌های سه‌بعدی ساده‌ای از ساختمان‌ها و رودخانه‌ها را در کنار هم نمایش می‌دهند، می‌توانند سطح سیلاب‌های احتمالی را در منطقه خود مشاهده کنند (استاوروولاکیس و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین امکان تغییر سطح سیلاب توسط کاربران نیز

شامل دقت داده‌ها، پیچیدگی تعاملات محیطی، پردازش‌های فشرده و محدودیت‌های مقیاس‌پذیری می‌باشد. استفاده از داده‌های سه‌بعدی دقیق و به‌روز از منابع مختلف به‌منظور شبیه‌سازی سیلاب، امری ضروری است زیرا هر گونه نقص یا عدم دقت در این داده‌ها می‌تواند به نتایج غیرقابل اعتماد و نادرست منتهی شود. پیچیدگی تعاملات محیطی، همچون تغییرات خاک، پوشش گیاهی و توپوگرافی، نیازمند توسعه و به‌کارگیری الگوریتم‌های پیچیده و پردازش‌های محاسباتی توانمند است. علاوه بر این، محدودیت‌های سخت‌افزاری و نیاز به پردازنده‌های گرافیکی با توان پردازشی بالا، به ویژه برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیلاب، از موانع اساسی در این زمینه به‌شمار می‌آید. در نهایت، طراحی رابط‌های کاربری ساده و قابل فهم برای کاربران غیرمتخصص و همچنین هزینه‌های بالای پیاده‌سازی فناوری‌های متاورس، از دیگر چالش‌های مهم این حوزه هستند.

واقعیت افزوده (دستگاه Hololens) را می‌پوشد. پس از متصل شدن دستگاه به سرور، داده‌های موردنیاز برای تصویرسازی و تجسم دریافت می‌شوند. در مرحله بعدی، داده‌های دریافتی در محیط سه‌بعدی تصویرسازی می‌شوند. تجسم داده‌ها در نقشه‌ای دوبعدی در گوشه بالا سمت راست میدان دید دستگاه قرار می‌گیرد (شکل ۵). یکی از چالش‌های اصلی در استفاده از واقعیت افزوده در چنین نمونه‌هایی، تطبیق صحیح مختصات در واقعیت با مختصات متناظر در محیط واقعیت مجازی است که از طریق نمایشگر دستگاه نمایش داده می‌شود. در این مورد، حداقل آگاهی از سه جفت نقطه متناظر به‌منظور تعیین دقیق موقعیت اشیاء روی صفحه نمایش، به‌صورتی که در دنیای واقعی دیده می‌شوند، ضروری است. افزون بر این، اطلاع از فواصل فیزیکی بین نقاط مذکور برای نمایش صحیح فاصله‌ها در محیط AR لازم است (همینز و همکاران، ۲۰۱۸). مدل‌سازی سیلاب با بهره‌گیری از دنیای متاورس با مجموعه‌ای از چالش‌های پیچیده مواجه است که



شکل ۴- طراحی سیستم و لایه‌ها (استاوروولاکیس و همکاران، ۲۰۲۴)



شکل ۵- تصویرسازی در واقعیت افزوده (استاوروولاکیس و همکاران، ۲۰۲۴)

۴. نتیجه‌گیری

بسیاری از افراد در درک و آماده‌سازی برای خطراتی که احتمال وقوعی کم اما تاثیری شدید دارند، مانند بلایای طبیعی، با مشکل مواجه هستند که این مشکلات ممکن است به دلیل فقدان تجربه مستقیم آن‌ها از چنین رویدادهایی باشد. لذا فرصت اندکی نیز برای یادگیری و شناخت پیامدهای حاصل از این پدیده‌ها وجود دارد. اغلب افراد تمایل به پیروی از قواعد ذهنی خود دارند که سبب بروز سوگیری‌های سامانمند می‌شود. لذا در مواجه با چنین خطرات و بحران‌های با احتمال وقوع کم، افراد تمایل به نادیده گرفتن آن‌ها دارند، به این صورت که این مورد برای من رخ نمی‌دهد هر چند ممکن است در صورت وقوع این امر عواقب ویرانگری را به همراه داشته باشد. سیلاب نیز از جمله بلایای طبیعی است که هر ساله خسارات جانی و مالی فراوانی را در سرتاسر دنیا به بار می‌آورد. یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌روی برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران این است که آمادگی لازم را قبل از رخداد یک رویداد مهیا کنند و شهروندان را در مورد احتمالات پیش‌رو و خطرات و پیامدهای چنین رویدادهای ویرانگری آگاه کنند. بدین ترتیب لزوم عینیت‌بخشی و تصویرسازی از وضعیت پیش‌رو در صورت وقوع وقایعی مانند سیلاب قبل از وقوع به‌منظور جلوگیری از پیامدهای مخرب آن امری ضروری است که می‌تواند با متاورس محقق شود. فناوری‌های صنعت متاورس به دلیل قابلیت‌های پیشرفته خود در عینیت‌بخشی، تجسم داده‌ها و تعامل، فرصت‌های بی‌نظیری برای تصویرسازی برون‌داد مدل‌سازی سیلاب فراهم کرده‌اند. فناوری‌های واقعیت افزوده و واقعیت مجازی صنعت متاورس به همراه مدل‌های سه‌بعدی تعاملی، امکان تجربه خطرات و پیامدهای سیلاب در یک محیط واقعی شبیه‌سازی شده را به شهروندان و کاربران می‌دهد. این فناوری‌ها به تصمیم‌گیران کمک می‌کنند تا داده‌های پیچیده مرتبط با سیلاب را در قالب‌هایی ملموس‌تر و قابل درک‌تر نمایش دهند. بدین ترتیب، درک بهتری از شدت و پیامدهای سیلاب و واکنش‌های مناسب برای کاهش اثرات آن ایجاد می‌شود. چنین رویکردی، علاوه بر افزایش آگاهی عمومی شهروندان،

سبب تسهیل فرآیندهای تصمیم‌گیری مدیران و سیاست‌گذاران در راستای بهبود زیرساخت‌های مدیریت بحران می‌شود. با این وجود، تحقق کامل پتانسیل‌ها و کاربردهای متاورس در حوزه عینیت‌بخشی سیلاب شبیه‌سازی شده، نیازمند غلبه بر چالش‌هایی مانند دسترسی به داده‌های دقیق، توسعه زیرساخت‌های پردازشی، حجم بالای اطلاعات، توجه به مسائل امنیتی و ... است. بنابراین، توسعه زیرساخت‌های پردازشی قوی‌تر و ایمن‌تر، ارتقای الگوریتم‌های پردازش داده و افزایش دسترسی به فناوری‌های متاورس از جمله اقدامات ضروری برای استفاده موثر از این فناوری‌ها هستند. از سوی دیگر، ادغام فناوری‌های متاورس با هوش مصنوعی، شبکه‌های عصبی مصنوعی و اینترنت اشیا می‌تواند مسیرهای جدیدی به‌منظور مدیریت ریسک سیلاب‌ها و طراحی استراتژی‌های موثر در این زمینه ایجاد کند. بدین ترتیب، متاورس علاوه بر ارائه راه‌حل‌های نوآورانه به‌منظور مدیریت بلایا، فرصت‌های بیش‌تری برای همکاری، یادگیری و توسعه پایدار فراهم می‌کند.

منابع

1. Agonafir, C., Lakhankar, T., Khanbilvardi, R., Krakauer, N., Radell, D. and Devineni, N., 2023. A review of recent advances in urban flood research. *Water Security*, 19, p.100141.
2. Anees, M. T., Abdullah, K., Nawawi, M. N. M., Ab Rahman, N. N. N., Piah, A. R. M., Zakaria, N. A., ... & Omar, A. M. (2016). Numerical modeling techniques for flood analysis. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 478-486.
3. Bakhtiari, V., Piadeh, F., Behzadian, K. and Kapelan, Z., 2023. A critical review for the application of cutting-edge digital visualisation technologies for effective urban flood risk management. *Sustainable Cities and Society*, p.104958.
4. Bakhtiari, V., Piadeh, F., Chen, A.S. and Behzadian, K., 2024. Stakeholder analysis in the application of cutting-edge digital visualisation technologies for urban flood risk management: A critical review. *Expert Systems with Applications*, 236, p.121426.

- Conference on Scour and Erosion, Perth, Australia, 2-4 December 2014 (pp. 373-380).
15. Mirauda, D., Erra, U., Agatiello, R. and Cerverizzo, M., 2018. Mobile augmented reality for flood events management. *Water Studies*, 47, pp.418-424.
 16. Mystakidis, Stylianos (2022) Metaverse, *Encyclopedia* 2022, 2, 486-497. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010031>.
 17. Mol, J.M., Botzen, W.W. and Blasch, J.E., 2022. After the virtual flood: Risk perceptions and flood preparedness after virtual reality risk communication. *Judgment and Decision Making*, 17(1), pp.189-214.
 18. Oyshi, M.T., Maleska, V., Schanze, J., Bormann, F., Dachsel, R. and Gumhold, S., 2022, June. FloodVis: Visualization of Climate Ensemble Flood Projections in Virtual Reality. In *EnvirVis@ EuroVis* (pp. 1-9).
 19. Pachauri, R.K., 2007. Sustainable well-being. *Science*, 315(5814), pp.913-913.
 20. Rafiei-Sardooi, E., Azareh, A., Choubin, B., Mosavi, A.H. and Clague, J.J., 2021. Evaluating urban flood risk using hybrid method of TOPSIS and machine learning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 66, p.102614.
 21. Rajak, J., 2021. A preliminary review on impact of climate change and our environment with reference to global warming. *Int. J. Environ. Sci*, 10, pp.11-14.
 22. Rydvanskiy, R. and Hedley, N., 2021. Mixed reality flood visualizations: reflections on development and usability of current systems. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(2), p.82.
 23. Rydvanskiy, R., 2020. Mixed reality interfaces in flood risk management.
 24. Saurav, K.C., Shrestha, S., Ninsawat, S. and Chonwattana, S., 2021. Predicting flood events in Kathmandu Metropolitan City under climate change and urbanisation. *Journal of environmental management*, 281, p.111894.
 25. Sermet, Y. and Demir, I., 2019. Flood action VR: a virtual reality framework for disaster awareness and emergency response training. In *ACM SIGGRAPH 2019 Posters* (pp. 1-2).
 26. Sermet, Y. and Demir, I., 2020. Virtual and augmented reality applications for environmental science education and
 5. Change, I.C., 2013. The physical science basis.
 6. Chow, Y.W., Susilo, W., Li, Y., Li, N. and Nguyen, C., 2022. Visualization and cybersecurity in the metaverse: A survey. *Journal of Imaging*, 9(1), p.11.
 7. Geaves, L., 2016. Public priorities and public goods: The drivers and responses to transitions in flood risk management (Doctoral dissertation, University of Oxford).
 8. Haynes, P. and Lange, E., 2016. Mobile augmented reality for flood visualisation in urban riverside landscapes. *JoDLA-Journal of Digital Landscape Architecture*, 1, pp.254-262.
 9. Haynes, P., Hehl-Lange, S. and Lange, E., 2018. Mobile augmented reality for flood visualisation. *Environmental modelling & software*, 109, pp.380-389.
 10. Herman, L., Russnák, J. and Řezník, T., 2017. Flood modelling and visualizations of floods through 3D open data. In *Environmental Software Systems. Computer Science for Environmental Protection: 12th IFIP WG 5.11 International Symposium, ISESS 2017, Zadar, Croatia, May 10-12, 2017, Proceedings 12* (pp. 139-149). Springer International Publishing.
 11. Hsu, H.M. and Gourbesville, P., 2023. Introduction of integrated decision support system for flood disaster management. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1136, No. 1, p. 012019). IOP Publishing.
 12. Hughes, J.D., Langevin, C.D., Chartier, K.L. and White, J.T., 2012. Documentation of the surface-water routing (SWR1) process for modeling surface-water flow with the US Geological Survey modular ground-water model (MODFLOW-2005) (No. 6-A40, pp. i-113). US Geological Survey.
 13. Jacquino, F. and Bonaccorsi, J., 2019. Studying social uses of 3D geovisualizations: Lessons learned from action-research projects in the field of flood mitigation planning. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(2), p.84.
 14. Liao, C., Yeh, K., Jia, Y., Liao, J., Cheng, L., Draper, S., & An, H. (2014, November). Three dimensional numerical simulations of hydrodynamics and morphodynamics on rapidly varied channel. In *Scour and Erosion: Proceedings of the 7th International*

32. Turner, R. and Sun, C., 2024. Near Real-Time Responsive Flood Event Representation: An Open-Source Interactive Web Application Architecture. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 10, pp.365-372.
33. Vreugdenhil, C.B., 2013. Numerical methods for shallow-water flow (Vol. 13). Springer Science & Business Media.
34. Woolway, R.I., Kraemer, B.M., Lenters, J.D., Merchant, C.J., O'Reilly, C.M. and Sharma, S., 2020. Global lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(8), pp.388-403.
35. Sermet, Y., & Demir, I. (2020). Virtual and augmented reality applications for environmental science education and training. In *New perspectives on virtual and augmented reality* (pp. 261-275). Routledge.
27. Sivaramanan, S., 2015. Global Warming and Climate change, causes, impacts and mitigation. Central environmental authority, 2(4).
28. Smith, K., & Ward, R. (1998). *Floods: physical processes and human impacts*.
29. Stavroulakis, A., Dimelli, D., Roumeliotis, M. and Mania, A., 2024. An Augmented Reality System Architecture for Flood Management. In *GISTAM* (pp. 211-218).
30. Strelkoff, T., 1970. Numerical solution of Saint-Venant equations. *Journal of the Hydraulics division*, 96(1), pp.223-252.
31. Tomkins, A. and Lange, E., 2019. Interactive landscape design and flood visualisation in augmented reality. *Multimodal Technologies and Interaction*, 3(2), p.43.