

सुमित कुमार

जलविज्ञान और कम्प्यूटर विज्ञान: जल सुरक्षा के लिए एक एकीकृत दृष्टिकोण

जलविज्ञान में कम्प्यूटर विज्ञान के एकीकरण ने पूर्वानुमान और परिदृश्य विश्लेषण के क्षेत्र में एक नए युग की शुरुआत की है। अब आधुनिक जलविज्ञान केवल पूर्वव्यापी आंकलन या स्थिर पूर्वानुमानों तक ही सीमित नहीं है वरन् अब यह दूरदर्शी और अनुकूलनात्मक भी है। पारंपरिक निदर्शों के शीर्ष पर मशीन लर्निंग तकनीक और कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) के साथ, जलवैज्ञानिक अधिक शुद्ध पूर्वानुमान प्राप्त कर सकते हैं और जटिल पद्धतियों की व्याख्या को स्वचालित कर सकते हैं। उदाहरण के लिए, पूर्वानुमान निदर्श को बाढ़, सूखे या संदूषण की घटनाओं के प्रारंभिक संकेतों की पहचान करने और स्वचालित अलर्ट या तंत्र को समायोजित करने के लिए प्रशिक्षित किया जा सकता है।

जल सुरक्षा वर्तमान समय की सबसे प्रमुख चुनौतियों में से एक है। वैश्विक जनसंख्या में निरंतर वृद्धि और जलवायु परिवर्तन के तीव्र प्रभावों के कारण स्वच्छ जल संसाधनों पर दबाव निरन्तर बढ़ रहा है। स्वच्छ, सुलभ और सतत जल की माँग केवल जनस्वास्थ्य और कल्याण से ही सम्बद्ध नहीं है, वरन् यह आर्थिक स्थिरता, खाद्य सुरक्षा और पर्यावरण संरक्षण से भी गहराई से सम्बद्ध है। परिणामस्वरूप, जल सुरक्षा सुनिश्चित करने के लिए जलविज्ञान प्रणालियों की गहन समझ और सुदृढ़, दूरदर्शी प्रबंधन रणनीतियों के विकास की आवश्यकता अनिवार्य हो गई है।

पारंपरिक जलविज्ञान ने जल की गति, वितरण और गुणवत्ता के अध्ययन में महत्वपूर्ण प्रगति की है। वर्षा, भूजल प्रवाह, अपवाह, वाष्पोत्सर्जन जैसी

घटनाओं को समझने के लिए ऐतिहासिक रूप से क्षेत्रीय मापन, प्रेक्षण तकनीकों और गणितीय निदर्शन का सहारा लिया गया है। यद्यपि, आज चरम मौसम की घटनाएं, भूजल क्षरण, शहरी बाढ़ और सीमा-पार जल संघर्ष जैसी चुनौतियां पारंपरिक तकनीकों से कहीं अधिक जटिल समाधान की माँग करती हैं। अब वास्तविक समय प्रबोधन, शुद्ध पूर्वानुमान और गतिशील निदर्शन अनिवार्य हो गया है, जिसे कम्प्यूटर विज्ञान के एकीकरण ने संभव बनाया है।

जलविज्ञान और कम्प्यूटर विज्ञान के अभिसरण ने जल प्रबंधन के क्षेत्र में एक नई क्रांति ला दी है। प्रोग्रामिंग, आंकड़ा विज्ञान, आंकड़ावेस प्रबंधन और भू-स्थानिक प्रौद्योगिकियाँ आज जलविज्ञान के क्षेत्र में अपरिहार्य तकनीकें बन चुकी हैं। ये नवाचार न

केवल विशाल मात्रा में आंकड़ों के संग्रहण और विश्लेषण को संभव बनाते हैं, वरन् वैज्ञानिकों और नीति निर्माताओं को उन्नत पूर्वानुमान मॉडल तैयार करने, अनुकरणीय वातावरण बनाने और निर्णय-समर्थन प्रणालियाँ विकसित करने में भी सहायता करते हैं, जो जल संसाधनों के सतत प्रबंधन के लिए मार्गदर्शक की भूमिका निभा सकते हैं।

21वीं सदी में वैश्विक जल सुरक्षा सुनिश्चित करना, मानवता के समक्ष सर्वाधिक महत्वपूर्ण और जटिल मिशन में से एक है। शहरीकरण, जनसंख्या वृद्धि, औद्योगीकरण और कृषि गहनता की बढ़ती माँगों के साथ-साथ जलवायु परिवर्तन के अप्रत्याशित प्रभावों ने उपग्रह के स्वच्छ जल संसाधनों पर अभूतपूर्व दबाव डाला है। इस संदर्भ में, जल सुरक्षा का अर्थ केवल स्वच्छ पेयजल

की उपलब्धता से नहीं है; वरन् इसमें मानव जीवन और पर्यावरणीय स्वास्थ्य के सभी पहलुओं के लिए जल का सतत प्रबंधन, समान वितरण और दीर्घकालिक संरक्षण भी शामिल हैं।

जलविज्ञान, पर्यावरण में जल के अध्ययन के लिए समर्पित एक वैज्ञानिक अनुशासन, दीर्घाधि से नदियों, झीलों, जलभृतों और वायुमंडल में जल के व्यवहार और वितरण के क्षेत्र में कार्यरत है। पारंपरिक जलविज्ञान उपकरण और पद्धतियाँ जैसे: क्षेत्रीय मापन, अनुभवजन्य समीकरण और मैनुअल निदर्शन तकनीकें, जल प्रणालियों के सम्बन्ध में हमारे ज्ञान में वृद्धि करने में सहायक रही हैं। हालाँकि, जैसे-जैसे जल संबंधी चुनौतियाँ अधिक जटिल और बहुआयामी होती गई हैं, ये पारंपरिक दृष्टिकोण अधिकांशतः अपर्याप्त सिद्ध

हुए हैं। यह पारम्परिक दृष्टिकोण समय-साध्य, संसाधन-पूर्ण हो सकते हैं और वैश्विक जलविज्ञान के क्षेत्र में वृहत् पैमाने पर घटनाओं की गतिशीलता और तीव्रता से बदलती प्रकृति पर सीमित प्रभाव डाल सकते हैं।

इन सीमाओं को दूर करने और आधुनिक युग में जल प्रबंधन की भावी आवश्यकताओं को पूर्ण करने के लिए, जलविज्ञान ने कंप्यूटर विज्ञान की परिवर्तनकारी क्षमताओं को तीव्रता से स्वीकार किया है। गणितीय प्रौद्योगिकियों के एकीकरण ने जलविज्ञानीय अनुसंधान और अनुप्रयोगों की विश्लेषणात्मक क्षमता, मापनीयता और वास्तविक समय में प्रतिक्रियात्मक दक्षता में अद्भुत वृद्धि की है। प्रोग्रामिंग भाषाओं, आंकड़ा विश्लेषण, अनुकरणीय निदर्शन और बुद्धिमत्तापूर्ण प्रणालियों के उपयोग के माध्यम से, जलवैज्ञानिक अब वृहत् मात्रा में आंकड़ों को संसाधित करने, जटिल प्रक्रियाओं का अनुकरण करने और अभूतपूर्व तीव्रता और शुद्धता वाले पूर्वानुमान ज्ञात करने में सक्षम हो गये हैं।

इस अभिसरण ने जलविज्ञान को एक अधिक समग्र और प्रणाली-उन्मुख दृष्टिकोण अपनाने में क्षमता प्रदान की है जिसमें विविध आंकड़ा समूहों को एकीकृत करने, प्राकृतिक और मानव प्रणालियों के बीच पारस्परिक क्रियाओं के निदर्शन, और बाढ़, सूखे तथा जल प्रदूषण जैसे उभरते जोखिमों का शीघ्रता से सामना करना शामिल है। इस प्रक्रिया में, कंप्यूटर विज्ञान ने न केवल जलविज्ञान अनुसंधान की शुद्धता और सघनता में वृद्धि की है, वरन् कृषि, शहरी नियोजन, आपदा प्रबंधन और पर्यावरण संरक्षण सहित कई क्षेत्रों में इसके व्यावहारिक अनुप्रयोगों में भी विस्तार किया है।

जलविज्ञान में कंप्यूटर विज्ञान का उदय

कंप्यूटर विज्ञान और जलविज्ञान के मध्य का पारस्परिक सम्बन्ध जल प्रणालियों के अध्ययन, प्रबंधन और

संरक्षण तकनीकों के विकास में एक क्रान्तिकारी परिवर्तन सिद्ध हुआ है। जो क्षेत्र पहले अनुभवजन्य आंकड़ों और मैनुअल प्रक्रियाओं पर काफी हद तक निर्भर थे, वह अब आंकड़ा-संचालित और गणितीय रूप से उन्नत बन गये हैं, जो विशाल, जटिल और गतिशील प्रणालियों के उपयुक्त समाधान में सक्षम हैं। इस एकीकरण ने जलविज्ञानियों को अधिक शुद्धता के साथ जलीय वातावरण के प्रबोधन, जटिल प्रक्रियाओं के अनुकरण और शुद्ध पूर्वानुमान ज्ञात करने में सक्षम बनाया है। इसका परिणाम एक अधिक संवेदनशील, मापनीय और पूर्वानुमानशील विज्ञान के रूप में सामने आया है, जो 21वीं सदी में वैश्विक जल सुरक्षा की बढ़ती मांगों को बेहतर ढंग से पूर्ण करने में सक्षम सिद्ध



कंप्यूटर प्रोग्रामिंग द्वारा सतही जल प्रवाह का आंकलन

हुआ है।

कंप्यूटर विज्ञान द्वारा प्रमुख क्षेत्रों के माध्यम से जलविज्ञान का सशक्तिकरण: आंकड़ा अधिग्रहण

इंटरनेट ऑफ थिंग्स (IoT) तकनीक, उपग्रह प्लेटफॉर्म और सेंसर नेटवर्क के प्रसार ने जलविज्ञान संबंधी आंकड़ों के एकीकरण की तकनीकों में क्रान्तिकारी परिवर्तन किया है। पर्यावरण में स्थापित स्मार्ट प्रवाह मीटर, वर्षा सेंसर, मृदा आर्द्रता अन्वेषक और भूजल जांच जैसे IoT संयंत्र निरंतर आंकड़ों को एकत्र कर सकते हैं और उन्हें वास्तविक समय में वायरलेस तकनीक से प्रसारित कर सकते हैं। इससे जल सम्बन्धी विश्लेषणों का अधिक सूक्ष्म और

स्थानीयकृत आंकलन संभव हुआ है।

उपग्रह प्रणाली द्वारा व्यापक स्तर पर वर्षा पद्धति, हिम संचयन, भूमि सतह तापमान और वनस्पति स्वास्थ्य जैसी जलविज्ञानीय प्रक्रियाओं के महत्वपूर्ण संकेतकों का प्रबोधन संभव हो सकता है। इन तकनीकों के एकीकरण ने जल चक्र के बहुस्तरीय और निर्बाध प्रबोधन को संभव बनाया है जो पारंपरिक उपकरणों से संभव नहीं था।

आंकड़ा प्रबंधन

विविध स्रोतों से जलविज्ञान संबंधी श्रेष्ठ आंकड़ों की उपलब्धता के साथ, प्रभावी आंकड़ा प्रबंधन, आधुनिक जलविज्ञान की आधारशिला बन गया है। कंप्यूटर विज्ञान ने SQL और NoSQL आंकड़ा समूह तंत्र प्रस्तुत किए हैं, जो वृहत् मात्रा में विविध आंकड़ा

समूहों के कुशल भंडारण, संगठन और पुनर्प्राप्ति की सुविधा प्रदान करते हैं। ये प्रणालियाँ आंकड़ों की अखंडता को सुनिश्चित करती हैं, और स्थानिक व कालिक आयामों में जटिल समस्याओं का समाधान प्रदान करती हैं। साथ ही, Amazon Web Services (AWS), Google Cloud और Microsoft Azure जैसी इंटरनेट आधारित तकनीकों ने मापनीय और सहयोगी आंकड़ा प्रबंधन हेतु उपयुक्त वातावरण प्रदान किए हैं। जल वैज्ञानिक अब पृथ्वी पर कहीं से भी वृहत् आंकड़ा समूहों का वास्तविक समय विश्लेषण कर सकते हैं और आंकड़ों का स्वचालित बैकअप ले सकते हैं। इंटरनेट आधारित क्लाउड

संरचना का यह विकास पारस्परिक, अंतः संचालनीय आंकड़ा समूहों के निर्माण को भी प्रोत्साहन प्रदान करता है, जो सहयोगी अनुसंधान और जल प्रबंधन प्राथमिकताओं को सक्षम बनाता है।

निदर्शन और अनुकरण

कंप्यूटर विज्ञान का सबसे प्रभावशाली योगदान, जलविज्ञानीय निदर्शन और अनुकरण के क्षेत्र में रहा है। MODFLOW (भूजल प्रवाह अनुकरण), HEC-HMS (जलविभाजक निदर्शन) और SWAT (मृदा और जल निर्धारण तकनीक) जैसे सॉफ्टवेयर आज उद्योगों में मानक बन चुके हैं। ये तकनीकें भूजल पुनर्भरण, सतही अपवाह, नदी बेसिन जलगतिकीय और प्रदूषकों के परिवहन जैसी जटिल प्रक्रियाओं के अनुकरण और विश्लेषण को सक्षम बनाती हैं। साथ ही ये अनुकरणीय तकनीकें न केवल वर्तमान प्रणाली/व्यवहार को समझने में सहायक हैं, वरन् जलवायु परिवर्तन, भूमि उपयोग परिवर्तनों या नीति परिवर्तनों के विभिन्न परिदृश्यों का आंकलन करने के लिए भी महत्वपूर्ण हैं। उदाहरणार्थ परिदृश्य विश्लेषण (Scenario analysis) की सहायता से जल प्रबंधक, शहरी क्षेत्रों में स्थित जल विभाजकों के जल की गुणवत्ता का मानव स्वास्थ्य पर पड़ने वाले प्रभावों का पूर्वानुमान लगा सकते हैं या हिमपात में कमी के दीर्घकालिक प्रभावों की भविष्यवाणी कर सकते हैं। पुनरावृत्ति निदर्शन द्वारा, वैज्ञानिक सुरक्षित और नियंत्रित वातावरण में अपनी परिकल्पनाओं का परीक्षण कर और जल तंत्रों के व्यवहार की जानकारी प्राप्त कर सकते हैं।

आंकड़ों की परिकल्पना

जलविज्ञान में जटिल सूचनाओं को सुलभ और क्रियाशील बनाने के लिए आंकड़ों की परिकल्पना (Data visualisation) अत्यंत महत्वपूर्ण भूमिका प्रदान करती है। भौगोलिक सूचना तंत्र (GIS) तकनीक स्थानिक

पद्धति के मानचित्रण, भूभाग विश्लेषण और जल विभाजक विशेषताओं की परिकल्पना के लिए आवश्यक तकनीक सिद्ध हुई है। समय-श्रृंखला आंकड़ों के साथ भौगोलिक सूचना तंत्र (GIS) का संयोजन सूखा, बाढ़ और भूमि उपयोग परिवर्तन जैसी घटनाओं को स्थानिक-कालिक स्तर पर प्रभावी ढंग से प्रदर्शित कर सकता है।

इसके अतिरिक्त, वेब-आधारित संकल्पनात्मक प्लेटफॉर्म और वास्तविक समय प्रबोधन तकनीकें, वैज्ञानिकों, नीति निर्माताओं और आम जनता को जटिल आंकड़ों के सरल व गतिशील प्रस्तुतिकरण के माध्यम से सम्बद्ध करते हैं। पुनरावृत्ति मानचित्र, ग्राफ और

बाढ़, सूखे या संदूषण की घटनाओं के प्रारंभिक संकेतों की पहचान करने और स्वचालित अलर्ट या तंत्र को समायोजित करने के लिए प्रशिक्षित किया जा सकता है। उन्नत पूर्वानुमान और परिदृश्य विश्लेषण की यह क्षमता वैश्विक जलवायु परिवर्तन के संदर्भ में महत्वपूर्ण है, जहाँ चरम मौसम की घटनाओं की आवृत्ति और गंभीरता बढ़ रही है। सरकारों, जल संस्थानों और पर्यावरण संगठनों ने न केवल समस्याओं का उत्तर देने के लिए वरन् सक्रिय रूप से योजना बनाने और दीर्घकालिक शिथिलता स्थापित करने के लिए भी गणितीय जलविज्ञान का प्रयोग किया है।

अंततः जलविज्ञान में कंप्यूटर

प्रबंधन करने की हमारी क्षमता में भी वृद्धि होगी।

प्रोग्रामिंग: आधुनिक जलविज्ञान में डिजिटल परिवर्तन और आंकड़ा-संचालित विज्ञान के युग में, प्रोग्रामिंग, जलविज्ञानियों के लिए एक आवश्यक तकनीक के रूप में उभरी है। यह अब केवल कंप्यूटर वैज्ञानिकों या सॉफ्टवेयर इंजीनियरों तक ही सीमित नहीं रही है, बल्कि एक ऐसी आधारभूत आवश्यकता बन गई है जो जलविज्ञानियों को आधुनिक तकनीकों की पूर्ण क्षमता का उपयोग करने में सक्षम बनाती है। परिष्कृत निदर्श विकसित करने से लेकर वृहत् आंकड़ा समूह का विश्लेषण करने और पूर्वानुमान प्रणालियों को लागू करने

SWAT जैसे वाणिज्यिक जलविज्ञान सॉफ्टवेयर शक्तिशाली निदर्शन की क्षमताएं प्रदान करते हैं, वास्तविक दुनिया के परिदृश्यों में अधिकांशतः ऐसे अनुकूलित समाधानों की आवश्यकता होती है जो इन सॉफ्टवेयर की डिफॉल्ट कार्यक्षमता से परे हों। प्रोग्रामिंग, स्थानीय परिस्थितियों या शोध आवश्यकताओं के लिए विशिष्ट नए प्राचल या प्रमेय को परस्पर सम्बद्ध करते हुए नए निदर्श विकसित करने या मौजूदा निदर्शों का विस्तार करने की सुविधाएं प्रदान करती है। इसके लिए Python, MATLAB, R और C++ जैसी भाषाओं का व्यापक उपयोग किया जाता है। उदाहरणार्थ, जलविज्ञानीय वर्षा-अपवाह निदर्श, भूजल प्रवाह समीकरण या अवसाद परिवहन अनुकरण का संकेतन (Coding) कर सकते हैं, जो क्षेत्रीय आंकड़ा समूह और उपयोगकर्ता-परिभाषित मान्यताओं को एकीकृत करते हैं। इस अनुकूलनशीलता से निदर्शन के प्रयासों की प्रासंगिकता में वृद्धि होती है।

दूसरा, प्रोग्रामिंग, वृहत् पैमाने पर आंकड़ों के विश्लेषण को स्वचालित करने की सुविधा प्रदान करती है। आधुनिक जलविज्ञान में सेंसर, उपग्रह, सुदूर संवेदन तकनीकें और ऐतिहासिक अभिलेखों से उत्पन्न आंकड़ों का बड़ी मात्रा में संग्रहण एक चुनौती है। मैनुअल विश्लेषण न केवल अक्षम बल्कि त्रुटिपूर्ण भी हो सकता है। प्रोग्रामिंग, जलविज्ञानियों को आंकड़ों में

जनसंख्या वृद्धि, शहरीकरण, प्रदूषण और जलवायु परिवर्तनशीलता के कारण वैश्विक जल प्रणालियाँ निरन्तर जटिल होती जा रही हैं, और पारंपरिक जलविज्ञान विधियाँ आधारभूत होने के बाद भी पर्याप्त नहीं हैं। इन्हें आंकड़ा-केंद्रित, प्रमेय-संचालित और प्रौद्योगिकी-सक्षम समाधानों द्वारा संवर्धित किया जाना चाहिए। इस संदर्भ में, कंप्यूटर विज्ञान एक महत्वपूर्ण प्रवर्तक के रूप में उभरा है, जो आधुनिक जलविज्ञान प्रणालियों की मांग के अनुसार मापनीयता, गति और शुद्धता प्रदान करता है।

लाइव सेंसर रीडिंग जैसी सुविधाओं के माध्यम से ये प्लेटफॉर्म विज्ञान और निर्णायक क्षमता के मध्य की दूरी को दूर करते हैं, जिससे जल से संबंधित समस्याओं के लिए अधिक तीव्र प्रतिक्रियाएँ संभव होती हैं।

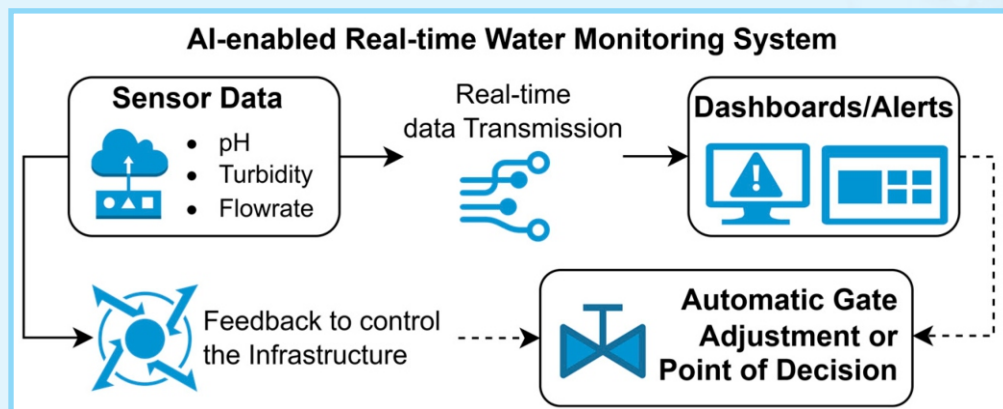
पूर्वानुमान और परिदृश्य विश्लेषण का एक नवीनतम युग

जलविज्ञान में कंप्यूटर विज्ञान के एकीकरण ने पूर्वानुमान और परिदृश्य विश्लेषण के क्षेत्र में एक नए युग की शुरुआत की है। अब आधुनिक जलविज्ञान केवल पूर्वव्यापी आंकलन या स्थिर पूर्वानुमानों तक ही सीमित नहीं है वरन् अब यह दूरदर्शी और अनुकूलनात्मक भी है। पारंपरिक निदर्शों के शीर्ष पर मशीन लर्निंग तकनीक और कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) के साथ, जलवैज्ञानिक अधिक शुद्ध पूर्वानुमान प्राप्त कर सकते हैं और जटिल पद्धतियों की व्याख्या को स्वचालित कर सकते हैं। उदाहरण के लिए, पूर्वानुमान निदर्श को

विज्ञान का उदय, इस क्षेत्र को पारंपरिक रूप से अवलोकन विज्ञान से एक बुद्धिमत्तापूर्ण, उत्तरदायी और तंत्र-उन्मुख अनुशासन में परिवर्तन करने हेतु, एक प्रतिमान परिवर्तन का प्रतिनिधित्व करता है। इस क्षेत्र में जैसे-जैसे तकनीकी नवाचार विकसित होते रहेंगे, वैसे-वैसे दुनिया के सबसे महत्वपूर्ण संसाधन: जल को समझने, भविष्यवाणी करने और उसका उपयुक्त

तक, प्रोग्रामिंग, जलविज्ञानीय विशेषज्ञों को जटिल जलविज्ञानीय चुनौतियों के लिए अनुकूलित, शिथिल और सुलभ समाधान प्रदान करने में समर्थ बनाती है।

जलविज्ञान में प्रोग्रामिंग का एकीकरण अनेक प्रमुख क्षमताएं प्रदान करता है। सबसे पहले, यह जलविज्ञानियों को कस्टम निदर्श निर्मित करने में सक्षम बनाता है। जबकि MODFLOW, HEC-HMS या



वास्तविक समय जल प्रबोधन तंत्र

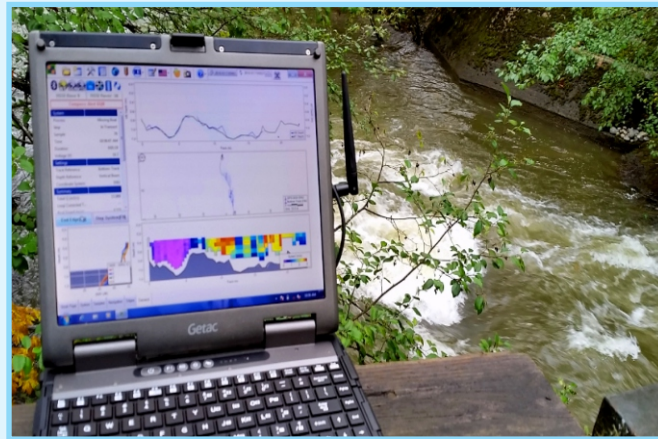
विसंगतियों का पता लगाने और सांख्यिकीय विश्लेषण जैसे कार्यों के लिए स्क्रिप्ट तैयार करने की सुविधा प्रदान करती है। Python के अन्तर्गत Pandas, NumPy और SciPy जैसे प्रोग्राम, तथा R के अन्तर्गत Tidyverse और HydroTSM जैसे प्रोग्राम, समय-श्रृंखला आंकड़ों के प्रबंधन, भू-स्थानिक गणना करने और वृहत आंकड़ा समूहों पर बैच प्रक्रमण के प्रचालन के लिए अत्यंत उपयोगी तकनीक प्रदान करते हैं। इससे न केवल कार्य समय की बचत होती है बल्कि पुनरुत्पादकता और मापनीय क्षमता में भी सुधार होता है।

तीसरा, प्रोग्रामिंग, जटिल जलविज्ञानीय आंकड़ों की परिकल्पना करने में भी सहायता करती है। जल तंत्रों के व्यवहार को समझने और प्रस्तुत करने के लिए मात्र आंकड़े और सारांश ही पर्याप्त नहीं होते, वरन् इसके लिए प्रभावी एवं दृश्यात्मक प्रस्तुतियों की आवश्यकता होती है। प्रोग्रामिंग के माध्यम से जलविज्ञानीय आंकड़ों का समृद्ध और अंतः क्रियात्मक अवलोकन कर सकते हैं, जो प्रवृत्तियों, सहसंबंधों और विसंगतियों को उजागर करते हैं। Python के Matplotlib, Seaborn और Plotly जैसे प्रोग्राम या R के ggplot2 और Leaflet जैसी तकनीकें, उच्च-गुणवत्ता वाले चार्ट, ऊष्मा मानचित्र और भू-स्थानिक मानचित्र तैयार करने में सहायता करती हैं। इसके अतिरिक्त, Dash और Shiny जैसी संरचनाओं का उपयोग करके कस्टम डैशबोर्ड भी निर्मित किये जा सकते हैं, जो उपयोगकर्ताओं को वेब ब्राउज़र के माध्यम से लाइव आंकड़ों के साथ वार्तालाप करने की अनुमति प्रदान करते हैं।

अंततः, प्रोग्रामिंग, जलविज्ञान में कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) और मशीन लर्निंग (ML) आधारित पूर्वानुमान प्रणालियां विकसित करने में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। प्रोग्रामिंग

के माध्यम से, जलविज्ञानीय ऐतिहासिक आंकड़ों से प्रशिक्षु, उन्नत प्रमेय का प्रयोग कर सकते हैं, जो बाढ़ के जोखिमों की भविष्यवाणी करने, भूजल पुनर्भरण का अनुमान लगाने, उपग्रह प्रतिबिम्बों से भूमि उपयोग का वर्गीकरण करने और जल गुणवत्ता आंकड़ों में विसंगतियों का चयन करने में सक्षम हैं। Scikit & learn, Tensor Flow, PyTorch और XGBoost जैसी तकनीकों का उपयोग करके ऐसे निदर्श निर्मित किये जा सकते हैं, जो समय के साथ नवीनतम आंकड़ों के सम्बद्ध होने पर और अधिक शुद्धता प्रदान करते हैं, जिससे वे वास्तविक समय प्रबोधन और निर्णय समर्थन के लिए आदर्श स्थापित करते हैं।

जलविज्ञान में प्रोग्रामिंग का रणनीतिक महत्व: प्रोग्रामिंग, अंतःविषयक सहयोग को समर्थन प्रदान करती है।



सतही जल एवं भूजल आंकलन के लिए विभिन्न कम्प्यूटर आधारित तकनीकें

साथ ही यह संकेतों (Coding) की समझ रखने वाले जलवैज्ञानिकों, अभियन्ताओं और सॉफ्टवेयर डेवलपर्स के साथ मिलकर अनुप्रयोगों को सह-अभिकल्पित करने, कार्यप्रवाह को सुव्यवस्थित करने और जल प्रबंधन के लिए एकीकृत प्रणालियां विकसित करने में सक्षम होती हैं। यह सहयोग आज के बहु-विषयक अनुसंधान परिवेश में अत्यंत महत्वपूर्ण हैं, जहाँ जलवायु शिथिलीकरण, सतत सिंचाई और शहरी जल नियोजन जैसे जटिल विषयों को संबोधित करने के लिए विभिन्न तकनीकी क्षेत्रों में अन्तर्वेश की

आवश्यकता होती है।

साथ ही, कई प्रोग्रामिंग तकनीकों की ओपन-सोर्स प्रकृति, वैश्विक समुदाय को प्रोत्साहित करती है, जहाँ जलवैज्ञानिक और डेवलपर्स, मॉडल, आंकड़ा समूह और सर्वोत्तम तकनीकों को परस्पर साझा करते हैं। GitHub और Stack Overflow जैसे प्लेटफॉर्म ज्ञान-विनिमय में वृद्धि करते हैं, जबकि जलग्राफिक, pySWAT और हाइड्रोक्लिम्पी जैसे ओपन-सोर्स पैकेज, जल वैज्ञानिकों को एक-दूसरे के कार्यों पर पारस्परिक निर्माण करने और क्षेत्र को सामूहिक रूप से प्रोन्नत करने का अवसर प्रदान करते हैं।

शैक्षणिक स्तर पर, विश्वविद्यालय और अनुसंधान संस्थान, जलविज्ञानीय पाठ्यक्रमों में प्रोग्रामिंग को शामिल कर रहे हैं ताकि वैज्ञानिकों की नई पीढ़ी को

गणितीय और संकेतक (Coding) की जानकारी प्रदान की जा सके। जैसे-जैसे जलवायु परिवर्तन, जनसंख्या वृद्धि और संसाधन तनाव जैसे वैश्विक कारक, नवीनतम जल समाधानों की आवश्यकता में वृद्धि करेंगे, जलविज्ञान में नवाचार और वैश्विक जल सुरक्षा को सशक्त बनाने में प्रोग्रामिंग एक मुख्य तकनीक के रूप में बनी रहेगी।

निष्कर्ष: प्रोग्रामिंग अब केवल एक पूरक विशेषज्ञता ही नहीं रही, बल्कि आधुनिक जलविज्ञान का एक आधारभूत स्तंभ बन गई है। यह न केवल शुद्धता और दक्षता में वृद्धि करती

है, वरन् नवीनतम तकनीकों को भी प्रोत्साहित करती है और वैज्ञानिक शोध तथा व्यावहारिक अनुप्रयोग के लिए नई संभावनाएं प्रदान करती है। हम एक ऐसे युग की ओर बढ़ रहे हैं जिसमें अनिश्चितता और जटिलता को परिभाषित करना आवश्यक है। इय युग में संकेतक (Coding) को लिखने, समझने और उसका प्रभावी ढंग से उपयोग करने की क्षमता जलविज्ञान के भविष्य को उज्ज्वल बनाने में मुख्य भूमिका प्रदान करेगी।

जलविज्ञान में आंकड़ा बेस तंत्र का विकास

पिछले कुछ दशकों में जलविज्ञान में आंकड़ों की भूमिका में अद्भुत परिवर्तन आया है, और इस परिवर्तन का केंद्र आंकड़ा बेस तंत्रों का विकास रहा है। पूर्वकाल में जलविज्ञान क्षेत्र मैनुअल लॉगिंग और बिखरे हुए संचयित आंकड़ों पर निर्भर था, लेकिन वर्तमान में वह एक संचित, मापनीय और शोध योग्य अंकीय पारिस्थितिकी तंत्र में परिवर्तित हो चुका है। आधुनिक आंकड़ा तकनीकें अब जलविज्ञान अनुसंधान, प्रबोधन और निर्णय-निर्धारण प्रक्रियाओं के क्षेत्र में महत्वपूर्ण हो गई हैं।

मैनुअल लॉग और साधारण स्प्रेडशीट का प्राचीन युग

प्राचीन काल में जलविज्ञानीय आंकड़ों का संग्रहण अधिकांशतः मैनुअल होता था। भूजल स्तर, वर्षा और प्रवाह जैसे क्षेत्रीय आंकड़ों को नोटबुक या मुद्रित लॉग शीट में रिकॉर्ड किया जाता था बाद में भी, यदि कभी इन आंकड़ों का अंकीकरण किया जाता था, तो वह Microsoft Excel या Lotus 1-2-3 जैसे मूल स्प्रेडशीट सॉफ्टवेयर में किया जाता था। इस प्रणाली की कई प्रमुख बाधाएं थीं:

भंगुरता: प्राचीन समय में हस्तलिखित लॉग्स की भौतिक क्षति, गुम होने या नष्ट होने की संभावना रहती थी। अंकीय स्प्रेडशीट में भी उपलब्ध आंकड़े प्रदूषण या आकस्मिक विलोपन

के खतरे से मुक्त नहीं थे। परिणामस्वरूप इनसे जनित त्रुटियाँ आंकड़ों को अनुपयोगी बना देती थी।

सीमित पहुँच: प्राचीन काल में आंकड़ों को परस्पर साझा करना और पारस्परिक सहयोग करना कठिन कार्य था। अधिकतर आंकड़े एकल संस्थाओं या दलों तक ही सीमित रहते थे।

कम मापनीयता: जैसे-जैसे आंकड़ों के प्रबोधन का दायरा बढ़ा, स्प्रेडशीट सिस्टम वृहत् आंकड़ा समूह को संभालने में असमर्थ हो गए।

न्यूनतम खोज योग्यता: प्राचीन साफ्टवेयर में आंकड़ों के विभिन्न मानदंडों पर आंकड़ों को पुनः प्राप्त करना समय-साध्य और त्रुटिपूर्ण होता था।

उपरोक्त बाधाओं ने आंकड़ा संचालित कार्यप्रवाह की दक्षता और वृहत् पैमाने पर उनकी विश्लेषण की क्षमताओं दोनों में बाधा उत्पन्न की।

उन्नत आंकड़ा बेस प्रणालियों का वर्तमान युग

अंकीय युग में आधुनिक आंकड़ाबेस प्रणालियाँ जलविज्ञान आंकड़ा प्रबंधन के क्षेत्र में क्रांति लाई हैं।

आदि) का प्रबंधन करते हैं। PostgreSQL का PostGIS विस्तार, भू-स्थानिक आंकड़ों के विश्लेषण के लिए अत्यंत उपयोगी है।

NoSQL आंकड़ाबेस : MongoDB, CouchDB और Firebase जैसे NoSQL तंत्र असंरचनात्मक और अर्ध-संरचनात्मक आंकड़ों के प्रबंधन के लिए आदर्श हैं, जो पारंपरिक RDBMS की सुदृढ़ संरचना के बिना शिथिलता प्रदान करने की सुविधा प्रदान करते हैं।

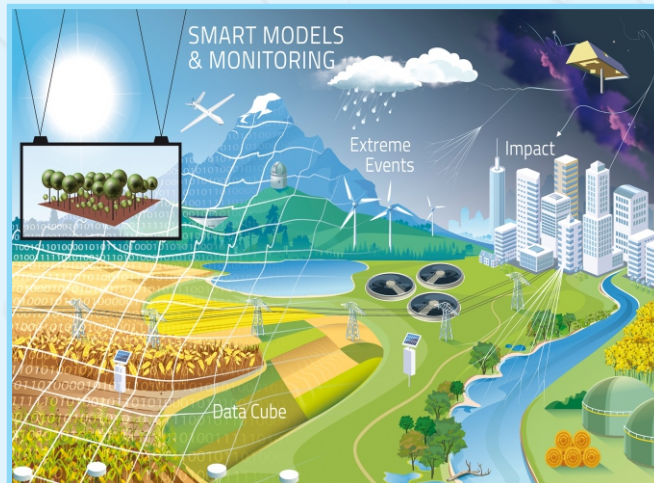
समय-श्रृंखला आंकड़ाबेस (TSDB): InfluxDB, OpenTSDB और Prometheus जैसे आंकड़ाबेस विशेष रूप से टाइम-स्टैम्पड सेंसर आंकड़ों के कुशल प्रबंधन के लिए अनुकूलित हैं। ये बाढ़ पूर्वानुमान, सूखा प्रबोधन और बाढ़ चेतावनी प्रणालियों में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं।

क्लाउड-आधारित वास्तविक समय प्रणालियाँ: Google Cloud, AWS और Azure जैसे प्लेटफॉर्म, क्लाउड पर आधारित आंकड़ाबेस प्रदान करते हैं जो मापनीयता, निरर्थकता और वैश्विक पहुँच सुनिश्चित करते हैं। IoT

स्तर के रूप में कार्य करते हैं।

निर्देश का अंशांकन और अनुकरण

ऐतिहासिक और वास्तविक समय के आंकड़ों को जलविज्ञानीय निर्देशों में समाविष्ट करके, आंकड़ाबेस, शुद्ध अनुकरण और पूर्वानुमान निर्माण में सहायता करते हैं।



जलविज्ञान में स्मार्ट जल निर्देश एवं प्रबोधन

निर्णय समर्थन प्रणाली

परिचालन जल प्रबंधन प्रणालियाँ जैसे जलाशयों का जल निकासी प्रबंधन, सिंचाई कार्यक्रमों का अनुकूलन और बाढ़ प्रतिक्रिया रणनीतियाँ, आंकड़ाबेस

पारदर्शिता बढ़ाने, नागरिक विज्ञान में वृद्धि करने और जल-संबंधी नीतियों के निर्माण के लिए ओपन-सोर्स वाले जलविज्ञान आंकड़ाबेस का उपयोग करते हैं।

हस्तलिखित लॉग से लेकर वास्तविक समय, क्लाउड-आधारित

आंकड़ाबेस प्रणालियों तक का विकास जलविज्ञान के इतिहास में सबसे महत्वपूर्ण परिवर्तनों में से एक है। इसने जलविज्ञान के क्षेत्र को 21वीं सदी की जटिल जल सम्बन्धी चुनौतियों, चाहे वह सीमा पार नदी बेसिन का प्रबंधन हो या शहरी बाढ़ घटनाओं के शुद्ध पूर्वानुमान, का सामना करने के लिए आवश्यक गति, शिथिलता और बुद्धिमत्ता प्रदान की है।

जलविज्ञान में अंकीय अनुप्रयोग: वेब, मोबाइल और निर्देशन समाधानों की भूमिका

जलविज्ञान संबंधी जानकारी को क्षेत्रीय और सार्वजनिक डोमेन तक लाने के लिए, डेवलपर्स वेब और मोबाइल अनुप्रयोग निर्मित कर रहे हैं जो आंकड़ों और निर्देशन तकनीकों तक पहुँच को सुनिश्चित करते हैं।

वेब आधारित भौगोलिक सूचना तंत्र (GIS) अनुप्रयोग

वेब-आधारित भौगोलिक सूचना तंत्र (Web-GIS) उपयोगकर्ताओं को ब्राउज़र इंटरफ़ेस के माध्यम से स्थानिक

भूस्थानिक प्रणालियाँ समान रूप से अपरिहार्य हैं। वे जल संसाधनों के बहु-स्तरीय विश्लेषण की अनुमति देती हैं, स्थानिक प्रवृत्तियों के दृश्य को सुविधाजनक बनाती हैं, और निर्णयकर्ताओं को गहरी भौगोलिक और पर्यावरणीय समझ के साथ कार्य करने में सक्षम बनाती हैं। QGIS, ArcGIS और Web GIS प्लेटफॉर्म जैसे सॉफ्टवेयर के माध्यम से, जलविज्ञान संबंधी अंतर्दृष्टि को वैज्ञानिकों, नीति निर्माताओं और जनता के मध्य की खाई को दूर करके इंटरैक्टिव रूप से और वास्तविक समय में संप्रेषित किया जा सकता

ये प्रणालियाँ अब वृहत् आंकड़ा समूह को संग्रहित करने, वास्तविक समय में आंकड़ों तक पहुँच प्रदान करने, आंकड़ों की अखंडता सुनिश्चित करने और अंतः-संस्थागत सहयोग को सुलभ बनाने के लिए अभिकल्पित की गई हैं। प्रमुख आधुनिक तकनीकें निम्नलिखित हैं:

RDBMS आंकड़ा बेस: PostgreSQL, MySQL और SQLite जैसे तंत्र, संरचनात्मक योजनाओं और SQL का उपयोग कर जलविज्ञानीय आंकड़ों (जैसे वर्षा रिकॉर्ड, नदी प्रवाह

सॉफ्टवेयर से आंकड़े एकत्र कर वास्तविक समय में प्रक्रमण किया जा सकता है, जिससे उपयोगी जलविज्ञानीय प्रबोधन और स्वचालित जल प्रबंधन संभव होता है।

आंकड़ाबेस: जलविज्ञान संबंधी महत्वपूर्ण जानकारी

आधुनिक आंकड़ाबेस तंत्र केवल आंकड़ा कोष नहीं हैं वरन् वह बुद्धिमत्तापूर्ण जलविज्ञानीय संरचना का प्रमुख घटक है। ये आंकड़ा कोष निम्नलिखित कार्यों के लिए आधारभूत

में संग्रहित आंकड़ों की विश्वसनीय पहुँच पर निर्भर करती हैं।

वैज्ञानिक अनुसंधान

आंकड़ाबेस, शोधकर्ताओं को आंकड़ों का जटिल विश्लेषण करने, अध्ययनों की पुनरावृत्ति करने और दशकों तक विभिन्न भौगोलिक क्षेत्रों में एकत्रित आंकड़ों के आधार पर निष्कर्षों का मान्यकरण करने में सक्षम बनाते हैं।

सार्वजनिक सहभागिता और नीति निर्माण

सरकारी और गैर-सरकारी संगठन

आंकड़ों का पता लगाने की अनुमति प्रदान करता है।

वेब आधारित भौगोलिक सूचना तंत्र के अन्तर्गत प्रयोग किये जाने वाले संयंत्रों में Leaflet, Mapbox. एवं Geo server+PostGIS प्रमुख हैं। इनकी सहायता से इस क्षेत्र में किये जाने वाले उपयोगों में वास्तविक समय बाढ़ मानचित्रण, विभिन्न क्षेत्रों में जलदायक स्तर को दर्शाने वाला भूजल स्तर एवं एकीकृत उपयोग सैन्सर द्वारा वर्षा प्रबोधन प्रमुख हैं।

निष्कर्ष:

जलविज्ञान और कंप्यूटर विज्ञान का अभिसरण जल जैसे पृथ्वी के सर्वाधिक महत्वपूर्ण संसाधनों को समझने, प्रबंधित करने और उसकी सुरक्षा तकनीक में एक आदर्श परिवर्तन का प्रतिनिधित्व करता है। जलविज्ञान में गणितीय तकनीकों का समावेश केवल सुविधा या नवाचार का विषय नहीं है, वरन् यह बढ़ती पर्यावरणीय, सामाजिक और जलवायु चुनौतियों के समक्ष एक मूलभूत आवश्यकता है।

जनसंख्या वृद्धि, शहरीकरण, प्रदूषण और जलवायु परिवर्तनशीलता के कारण वैश्विक जल प्रणालियाँ निरन्तर जटिल होती जा रही हैं, और पारंपरिक जलविज्ञान विधियाँ आधारभूत होने के बाद भी पर्याप्त नहीं हैं। इन्हें आंकड़ा-केंद्रित, प्रमेय-संचालित और प्रौद्योगिकी-सक्षम समाधानों द्वारा संवर्धित किया जाना चाहिए। इस संदर्भ में, कंप्यूटर विज्ञान एक महत्वपूर्ण प्रवर्तक के रूप में उभरा है, जो आधुनिक जलविज्ञान प्रणालियों की मांग के अनुसार मापनीयता, गति और शुद्धता प्रदान करता है।

प्रोग्रामिंग, जो कभी एक विशिष्ट तकनीक थी, अब जलविज्ञान संबंधी कार्यप्रवाह का केंद्र बिन्दु बन गयी है। आंकड़े पाइपलाइनों को स्वचालित करने और कस्टम अनुकरण निर्मित करने से लेकर बाढ़ के पूर्वानुमान या सूखे के जोखिम के आंकलन के लिए मशीन

लर्निंग निदर्श को प्रशिक्षित करने तक महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। प्रोग्रामिंग जलवैज्ञानिकों को अधिक कुशलतापूर्वक और नवीनतापूर्वक काम करने में सक्षम बनाती है। Python और R जैसी ओपन-सोर्स भाषाएँ इस परिवर्तन में शक्तिशाली सहयोगी बन गई हैं, जिन्हें जीवंत समुदायों और व्यापक वैज्ञानिक पुस्तकालयों का समर्थन प्राप्त है।

भूस्थानिक प्रणालियाँ समान रूप से अपरिहार्य हैं। वे जल संसाधनों के बहु-स्तरीय विश्लेषण की अनुमति देती हैं, स्थानिक प्रवृत्तियों के दृश्य को सुविधाजनक बनाती हैं, और निर्णयकर्ताओं को गहरी भौगोलिक और पर्यावरणीय समझ के साथ कार्य करने में सक्षम बनाती हैं। QGIS, ArcGIS और Web GIS प्लेटफॉर्म जैसे सॉफ्टवेयर के माध्यम से, जलविज्ञान संबंधी अंतर्दृष्टि को वैज्ञानिकों, नीति निर्माताओं और जनता के मध्य की खाई को दूर करके इंटरैक्टिव रूप से और वास्तविक समय में संप्रेषित किया जा सकता है।

इस बीच, आंकड़ा आधारित तंत्र और क्लाउड प्लेटफॉर्म ने जलविज्ञानीय आंकड़ों को संग्रहित करने, एक्सेस करने और साझा करने की तकनीक में क्रांति ला दी है। IoT सेंसर और उपग्रह के प्रसार के साथ, जलविज्ञान एक महत्वपूर्ण विज्ञान बन गया है। सूचना के इस प्रवाह को प्रबंधित करने के लिए असंरचनात्मक, अर्ध-संरचनात्मक या असंरचनात्मक-परिष्कृत मूल संरचना की आवश्यकता होती है। रिलेशनल और NoSQL आंकड़ाबेस, क्लाउड कंप्यूटिंग वातावरण और समय-श्रेणी संचयन सीरीज़ स्टोरेज तंत्र, वैश्विक जल प्रबोधन और पूर्वानुमान नेटवर्क के लिए महत्वपूर्ण हैं।

महत्वपूर्ण बात यह है कि ये तकनीकें जलवैज्ञानिकों का स्थान ही नहीं ले रही हैं, वरन् उनकी विशेषज्ञता में वृद्धि भी कर रही हैं। नियमित कार्यों को स्वचालित करके और पूर्वानुमानित



जलविज्ञान एवं जल संसाधनों के आंकलन में कंप्यूटर विज्ञान का अनुप्रयोग

अंतर्दृष्टि प्रदान करके, अंकीय सॉफ्टवेयर, वैज्ञानिकों को उच्च-स्तरीय विश्लेषण, व्याख्या और रणनीति पर ध्यान केंद्रित करने के लिए स्वतन्त्रता प्रदान करते हैं। वे सरकारों, गैर सरकारी संगठनों, किसानों, शहरी नियोजकों और यहां तक कि नागरिकों के लिए भी वास्तविक समय के आंकड़े और निदर्श सुलभ रूप से उपलब्ध कराकर जलविज्ञान को लोकतांत्रिक भी बनाते हैं।

भविष्य की ओर देखते हुए, जलविज्ञान का भविष्य आंकड़ों के एकीकरण, अंतः-संचालन और कृत्रिम बुद्धिमत्ता द्वारा परिभाषित किया जाएगा। भविष्य में जलविज्ञानीय तंत्रों के संचालन में जलवायु निदर्श, जल मांग अनुमान, बुनियादी ढांचे के आंकड़ाबेस और साझा प्लेटफॉर्मों का प्रयोग सफलतापूर्वक किया जाएगा। कृत्रिम बुद्धिमत्ता और मशीन लर्निंग, पूर्वानुमान को बेहतर बनाने, संसाधन आवंटन को अनुकूलित करने और जल आंकड़ा पद्धति को उजागर करने में मदद करेंगे, जिनका मैनुअल विश्लेषण के माध्यम से पता लगाना असंभव होगा।

इसके अतिरिक्त, जैसे-जैसे जलवायु परिवर्तन जलविज्ञानीय चरम सीमाओं में वृद्धि करेगा, परिदृश्यों का तीव्रता से अनुकरण करने और हस्तक्षेपों का मूल्यांकन करने की क्षमता में महत्वपूर्ण वृद्धि होगी। बाढ़ की पूर्व चेतावनी प्रणालियों से लेकर सूखे की

अनुकूल रणनीतियों तक, आंकड़े, संचालित जलविज्ञान समुदायों और पारिस्थितिकी तंत्रों की सुरक्षा में महत्वपूर्ण भूमिका निभाएंगे।

इस क्षमता को पूरी तरह से साकार करने के लिए, क्षमता निर्माण और शिक्षा में निवेश होना चाहिए। विश्वविद्यालयों में जलविज्ञान पाठ्यक्रम में गणितीय प्रशिक्षण शामिल होना चाहिए; आंकड़ों द्वारा वैज्ञानिकों और पर्यावरण शोधकर्ताओं के बीच अंतःविषय सहयोग को प्रोत्साहित किया जाना चाहिए और जल क्षेत्र में ओपन स्रोत आंकड़ों और अंकीय बुनियादी संरचना का समर्थन करने के लिए नीतिगत संरचनाओं को विकसित किया जाना चाहिए।

अंततः जलविज्ञान में कंप्यूटर विज्ञान का एकीकरण एक अंतिम बिंदु नहीं बल्कि एक नई शुरुआत है, जो 21वीं सदी में वैश्विक जल सुरक्षा की आधारशिला स्थापित करता है। अंकीय उपकरणों और पद्धतियों को अपनाकर, जलविज्ञान प्रतिक्रियात्मक आंकलन से सक्रिय नियोजन, बिखरे हुए आंकड़ों से एकीकृत ज्ञान तक और स्थानीय हस्तक्षेप से वैश्विक शिथिलता की ओर बढ़ सकता है।

संपर्क करें:

सुमित कुमार

राष्ट्रीय जलविज्ञान संस्थान,
रुड़की।