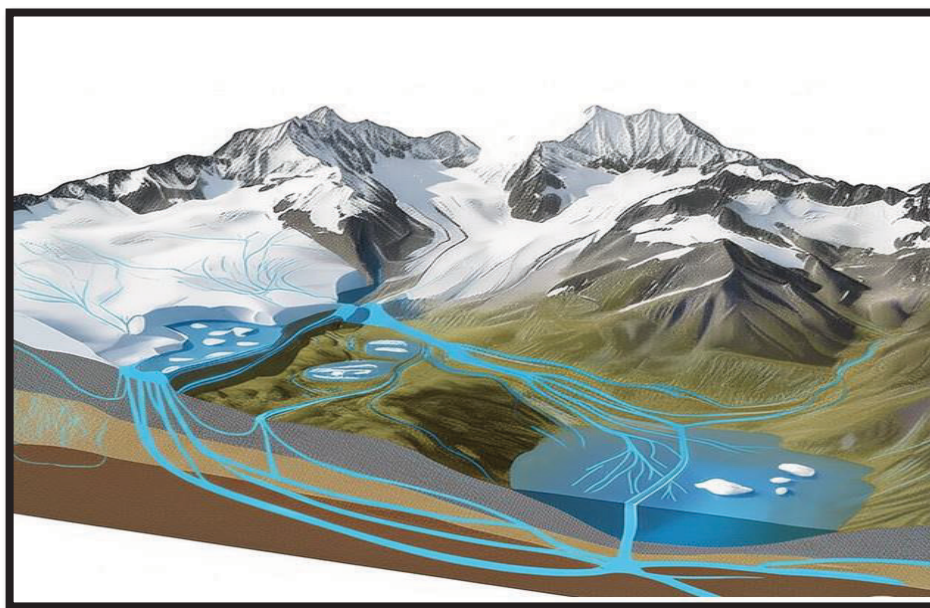


जलवायु परिवर्तन के संकेतक हिमनद: प्रभाव, संरक्षण और अंतर्राष्ट्रीय प्रयास

जतिन मल्होत्रा
राष्ट्रीय जलविज्ञान संस्थान,
रुड़की



पृथ्वी के ध्रुवीय और पर्वतीय क्षेत्रों में फैले विशाल हिमनद, सदियों से जमे हुए समय के साक्षी और मीठे पानी के अटूट भंडार, आज एक अभूतपूर्व संकट का सामना कर रहे हैं। ये केवल बर्फ के विशालकाय पिंड नहीं, बल्कि पृथ्वी की जलवायु प्रणाली के ऐसे महत्वपूर्ण 'थर्मामीटर' हैं जो मौसम में हो रहे बदलावों को सीधे तौर पर दर्शाते हैं और उनके प्रति प्रतिक्रिया व्यक्त करते हैं। ये पृथ्वी की जलवायु प्रणाली के गतिशील अंग हैं, जो तापमान, वर्षा, बादल, आर्द्रता और विकिरण जैसे महत्वपूर्ण मौसमी कारकों को प्रतिबिंबित करते हैं। उनका अस्तित्व और व्यवहार हमें ग्रह के स्वास्थ्य के बारे में अमूल्य जानकारी प्रदान करता है। अन्य जलवायु आंकड़ों की तुलना में, हिमनदों का सिकुड़ना या गायब होना जलवायु परिवर्तन का प्रभावशाली प्रमाण है। वर्तमान शताब्दी में हिमनदों के पिघलने की गति चिंताजनक है। 21वीं सदी के कई शोधों से पता चलता है कि यदि पिघलने की मौजूदा रफ्तार बनी रहती है या और बढ़ती है, तो इस सदी में ही कई हिमनद पूरी तरह से खत्म हो सकते हैं। जिस तेजी से ये हिमनद पिघल रहे हैं, वह न केवल जल सुरक्षा, पारिस्थितिक संतुलन और प्राकृतिक आपदाओं के जोखिम को बढ़ा रहा है, बल्कि दुनिया भर के लाखों लोगों की आजीविका और सांस्कृतिक विरासत को भी खतरे में डाल रहा है। विशेष रूप से, हिमालय जैसे क्षेत्रों में, जहाँ अरबों लोग हिमनद-पोषित नदियों पर निर्भर हैं, यह संकट एक गंभीर मानवीय चुनौती बन चुका है। हिमनद पृथ्वी की जलवायु प्रणाली और जल विज्ञान में एक मौलिक भूमिका निभाते हैं, जिससे उनका संरक्षण मानव अस्तित्व और पारिस्थितिक संतुलन के लिए अपरिहार्य हो जाता है।

हिमनदों की प्रकृति और प्रकार

हिमनद बर्फ के विशाल और गतिशील द्रव्यमान होते हैं, जो वर्षों तक जमी हुई बर्फ के जमाव से बनते हैं और अपने ही भार से धीरे-धीरे खिसकते हैं। इनकी संरचना एक प्राकृतिक संतुलन बनाए रखती है, जिसमें बर्फबारी से द्रव्यमान में वृद्धि (संचयन) होती है और पिघलने से हानि (अपक्षरण) होती है। यह संतुलन हिमनद के स्वास्थ्य का एक महत्वपूर्ण संकेतक है। इस प्राकृतिक संतुलन का बिगड़ना, जहाँ पिघलने की दर बर्फबारी से अधिक हो जाती है, सीधे तौर पर जलवायु परिवर्तन के

प्रभाव को दर्शाता है। हिमनद का सिकुड़ना इस बिगड़े हुए संतुलन का प्रत्यक्ष प्रमाण है, जो केवल एक भौतिक परिवर्तन नहीं, बल्कि एक पर्यावरणीय चेतावनी है। हिमनद को उनके स्थान और आकार के आधार पर मुख्य रूप से दो वर्गों में बांटा गया है: महाद्वीपीय हिमनद और अल्पाइन हिमनद। ये वर्गीकरण उनकी भौगोलिक उपस्थिति और विशेषताओं को समझने में मदद करते हैं:

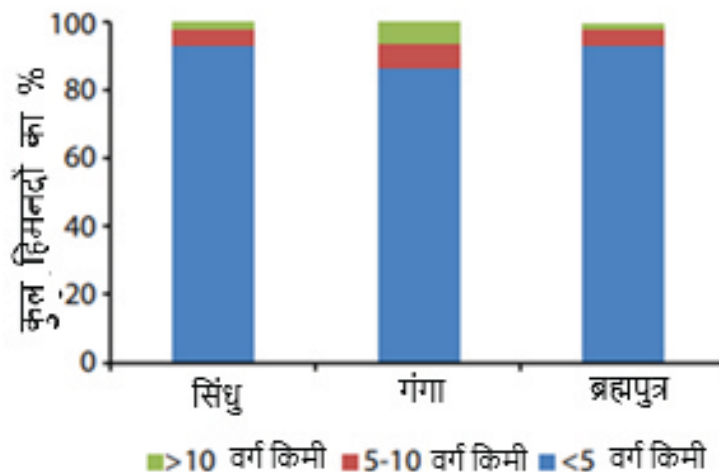
- **महाद्वीपीय हिमनद (Continental Glaciers):** ये विशाल और व्यापक बर्फ की चादरें होती हैं जो पूरे महाद्वीप को ढक लेती हैं। इनका क्षेत्रफल हजारों वर्ग किलोमीटर तक होता है और ये समतल तथा व्यापक भू-भाग पर पाए जाते हैं। ये पृथ्वी के सबसे बड़े हिमनद हैं और इनमें मीठे पानी का एक बड़ा हिस्सा संग्रहित है। अंटार्कटिका की बर्फ की चादरें (आइस शीट) और "ग्रीनलैंड" की आइस शीट इसके प्रमुख उदाहरण हैं।
- **अल्पाइन हिमनद (Alpine Glaciers):** इन्हें घाटी हिमनद (Valley Glacier) भी कहा जाता है। ये पर्वतीय क्षेत्रों में पाए जाते हैं और इनका आकार तथा विस्तार सीमित होता है। ये ढलानों पर गुरुत्वाकर्षण के प्रभाव से घाटियों में बहते हैं। इनका आकार प्रायः संकीर्ण और लंबवत होता है। अल्पाइन हिमनद नदियों के स्रोत होते हैं और कृषि, पीने के जल व ऊर्जा संसाधनों के लिए अत्यंत आवश्यक हैं। गंगोत्री हिमनद (भारत, हिमालय) और गॉर्नर हिमनद (स्विट्जरलैंड) इसके प्रमुख उदाहरण हैं।

हिमनदों का महत्व: 'जल मीनार' और उससे कहीं अधिक

हिमनद पृथ्वी के पर्यावरण और जलवायु तंत्र में एक महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। उन्हें अक्सर 'जल मीनार' कहा जाता है क्योंकि उनमें दुनिया के लगभग 70% मीठे जल को संग्रहित करने की अपार क्षमता होती है। यह उन्हें वैश्विक जल सुरक्षा के लिए अपरिहार्य बनाता है। यह संग्रहित जल धीरे-धीरे पिघले हुए जल (हिमजल) के रूप में निकलता है, जो पीने, कृषि और जलविद्युत के लिए आवश्यक आपूर्ति प्रदान करता है, खासकर शुष्क मौसम या सूखे की अवधि के दौरान। यह उनकी मौसमी भण्डारण क्षमता को दर्शाता है, जिससे वे लाखों लोगों के लिए जीवनरेखा बन जाते हैं। सिंधु, गंगा और ब्रह्मपुत्र जैसी प्रमुख नदियाँ, जो एशिया में लाखों लोगों की प्यास बुझाती हैं, हिमनदों के गलित जल से संचालित होती हैं। यह निर्भरता कृषि और ऊर्जा उत्पादन में उनकी महत्वपूर्ण भूमिका को रेखांकित करती है।

	महाद्वीपीय हिमनद	अल्पाइन हिमनद
स्थान	पूरे महाद्वीप को ढँकते हैं	पर्वतीय क्षेत्रों में, घाटियों में
आकार	विशाल बर्फ की चादरें	सीमित आकार में
महत्व	सबसे बड़े हिमनद, मीठे पानी का भंडार	नदियों के स्रोत, जल के लिए आवश्यक
उदाहरण	अंटार्कटिका, ग्रीनलैंड की बर्फ की चादरें	गंगोत्री (भारत),

चित्र: 1—हिमनदों का वर्गीकरण



चित्र: 2— सिंधु, गंगा और ब्रह्मपुत्र हिमनद बेसिनों में हिमनदों का वितरण और उनके आकार की संख्या

जलचक्र में अपनी भूमिका के अलावा, हिमनद अल्बेडो प्रभाव के माध्यम से पृथ्वी के तापमान विनियमन को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करते हैं। उनकी चमकदार, परावर्तक सतहें आने वाले सौर विकिरण के एक बड़े हिस्से को अंतरिक्ष में वापस उछाल देती हैं, जिससे ग्रह के तापीय संतुलन को बनाए रखने में मदद मिलती है। कम अल्बेडो का मतलब है कि पृथ्वी अधिक सौर ऊर्जा अवशोषित करती है, जिससे तापमान और बढ़ता है। यह बढ़ा हुआ तापमान बदले में हिमनदों के पिघलने की दर को और तेज करता है। यह दर्शाता है कि हिमनदों का पिघलना केवल जल आपूर्ति का संकट नहीं है, बल्कि एक त्वरित जलवायु परिवर्तन तंत्र है जो ग्रह के तापीय संतुलन को बिगाड़ता है, जिससे समस्या एक साधारण जल संकट से कहीं अधिक जटिल और व्यापक हो जाती है।

हिमनद, जैव विविधता के लिए भी महत्वपूर्ण हैं, क्योंकि उनके आसपास के पारिस्थितिकी तंत्र में अनोखी वनस्पतियाँ और जीव पाए जाते हैं। ये विशिष्ट प्रजातियाँ ठंडे और चुनौतीपूर्ण बर्फीले वातावरण में पनपने के लिए विकसित हुई हैं। पर्यावरणीय भूमिका के अलावा, हिमनद सांस्कृतिक और आर्थिक महत्व भी रखते हैं। वे कई समुदायों के लिए पवित्र स्थल माने जाते हैं तथा यूनेस्को विश्व धरोहर का हिस्सा हैं, और पर्यटन तथा जलविद्युत के माध्यम से अर्थव्यवस्थाओं का समर्थन करते हैं। यह उनके बहुआयामी मूल्य को दर्शाता है, जो उन्हें केवल प्राकृतिक संरचनाओं से कहीं अधिक महत्वपूर्ण बनाता है।

जलवायु परिवर्तन और हिमनदों का पिघलना: एक वैश्विक चुनौती

जलवायु परिवर्तन के कारण हिमनद का पिघलना एक गंभीर वैश्विक चुनौती है, जिसके दूरगामी प्रभाव समुद्र के स्तर में वृद्धि, जल संसाधनों और प्राकृतिक खतरों पर पड़ते हैं। वैश्विक स्तर पर हिमनद के तेजी से पिघलने का मूल कारण मानव-प्रेरित ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन है, जहां कार्बन डाइऑक्साइड (CO₂) और मीथेन (CH₄) की बढ़ी हुई वायुमंडलीय सांद्रता अवरक्त विकिरण को रोकती है, जिससे वायुमंडल और महासागर दोनों का तापमान बढ़ता रहता है। यह समस्या के मूल कारण को स्पष्ट करता है, जो औद्योगिक गतिविधियों और जीवाश्म ईंधन के अत्यधिक उपयोग से जुड़ा है।

भविष्य के अनुमान और संभावित परिणाम गंभीर चेतावनी देते हैं। विश्व मौसम विज्ञान संगठन (WMO) के अनुसार, अगले पांच वर्षों (2025–2029) में से कम से कम एक वर्ष, 2024 में रिकॉर्ड किये गए सबसे गर्म वर्ष के रूप में पार कर जाएगा, जिससे हिमनद प्रणालियों पर बढ़ता तापीय प्रभाव उजागर होगा। यह भविष्य की गंभीर स्थिति का संकेत देता है, जहाँ तापमान वृद्धि हिमनदों के पिघलने की गति को और तेज करेगी। वर्तमान उत्सर्जन 1.5 डिग्री सेल्सियस के वैश्विक तापमान वृद्धि के लक्ष्य को पूरा करने के लिए अपर्याप्त हैं, जिससे कुछ क्षेत्रों में 2.7 डिग्री सेल्सियस की वृद्धि और लगभग पूर्ण "विहिमनदन (Deglaciation)" हो सकता है। यह केवल एक संख्यात्मक विफलता नहीं है, बल्कि एक गंभीर, नीतिगत और सामाजिक विफलता है। 2.7 डिग्री सेल्सियस की वृद्धि का अर्थ है कि हिमनद पिघलने की दर में और तेजी आएगी, जिससे

अस्थायी जल वृद्धि जल्दी आएगी और उसके बाद जल संकट और गहरा होगा। लगभग पूर्ण “विहिमनदन” का अर्थ है कि जल मीनार स्थायी रूप से सूख जाएगी, जिससे अरबों लोगों के लिए जल सुरक्षा का भविष्य संकटमय हो जाएगा। यह एक अपरिवर्तनीय क्षति है, जो दर्शाती है कि वर्तमान वैश्विक प्रयास समस्या की गंभीरता के अनुपात में नहीं हैं। यह एक गंभीर चेतावनी है कि हमें केवल लक्ष्यों को निर्धारित करने की बजाय उन्हें प्राप्त करने के लिए कठोर उपाय करने होंगे।

हिमनद हानि के दूरगामी प्रभाव

हिमनदों का तेजी से पिघलना कई तरह के प्रभावों को जन्म देता है जो सिर्फ बर्फ से ढके क्षेत्रों तक ही सीमित नहीं हैं, बल्कि पृथ्वी की महत्वपूर्ण प्रणालियों और दुनिया भर के मानव समाज को प्रभावित करते हैं।

जल सुरक्षा पर संकट

हिमनद दुनिया भर में हिमालय, एंडीज और यूरोपीय आल्प्स जैसे घनी आबादी वाले क्षेत्रों के दो अरब से ज्यादा लोगों के लिए ताजे पानी का एक आवश्यक स्रोत हैं। हिमनदों से पिघला हुआ पानी (हिमजल) नदियों के प्रवाह को बनाए रखता है। शुरुआत में, हिमनदों के तेजी से पिघलने से निचले इलाकों में पानी की उपलब्धता अस्थायी रूप से बढ़ सकती है, जिसे अक्सर “शिखर जल (Peakwater)” कहा जाता है। पानी के प्रवाह में इस वृद्धि के बाद अनिवार्य रूप से हिमनदों के कम होने के कारण लंबे समय तक पानी की कमी और गंभीर जल संकट आता है, जिससे नदियों का प्रवाह तेजी से अस्थिर और कम हो जाता है। यह जलवैज्ञानिक बदलाव एक बड़ा जोखिम पैदा करता है, क्योंकि समुदाय और अर्थव्यवस्थाएं अनजाने में उच्च जल स्तर के अनुकूल हो सकती हैं, जिससे पानी की उपलब्धता में अंततः और अपरिहार्य गिरावट और भी विनाशकारी हो सकती है।

पारिस्थितिकी तंत्र और जैव विविधता पर प्रभाव

हिमनद पारिस्थितिकी तंत्र अद्वितीय आवास हैं जो विशिष्ट जैव विविधता का समर्थन करते हैं, जिसमें ठंडे-अनुकूलित सूक्ष्मजीव, पौधे और यहां तक कि कशेरुकी भी शामिल हैं। ये प्रजातियां हिमनद-पोषित वातावरण की चुनौतीपूर्ण, बर्फीली परिस्थितियों में पनपने के लिए विकसित हुई हैं। हालांकि, तेजी से हिमनद पीछे हटने से इन विशिष्ट प्रजातियों की गंभीर आवास हानि और विलुप्त होने का खतरा सीधे तौर पर होता है। नदियों में जल प्रवाह की मात्रा और समय में बदलाव से जीवों के प्राकृतिक आवासीय प्रभावित होते हैं। प्रवाह में तीव्र उतार-चढ़ाव कई संवेदनशील प्रजातियों के लिए अनुकूल परिस्थितियों को समाप्त कर सकते हैं, जिससे जैव विविधता में कमी आ सकती है। इसके अतिरिक्त, तापमान में वृद्धि और बर्फ के पिघलने से जल की गुणवत्ता और पारदर्शिता भी बदलती है, जो खाद्य श्रृंखला चक्रों को बाधित कर सकती है। जैसे-जैसे वातावरण गर्म होता है, वैसे-वैसे अन्य क्षेत्रों से आक्रामक या प्रतिस्पर्धी प्रजातियाँ इन जल प्रणालियों में प्रवेश कर सकती हैं। ये नई प्रजातियाँ स्थानीय जीवों के लिए खतरा बन सकती हैं और पारिस्थितिक संतुलन को बिगाड़ सकती हैं।

प्राकृतिक खतरों में वृद्धि

हिमनदों का पिघलना प्राकृतिक आपदाओं, विशेष रूप से हिमनद झील के विस्फोट से उत्पन्न बाढ़ (GLOFs) और भूस्खलन के जोखिम को काफी बढ़ा देता है। जैसे-जैसे हिमनद पीछे हटते हैं, वे अक्सर ऐसे गर्त छोड़ जाते हैं जो हिमगलित जल से भर जाते हैं, जिससे बड़ी, अस्थिर झीलें बनती हैं जो अक्सर अस्थिर बर्फ या मोरेन बांधों से घिरी होती हैं। इन झीलों के निर्मित होने का एक प्रमुख कारक “बर्फ की स्थायी रूप से जमी हुई पर्त (Permafrost)” का पिघलना है। जैसे-जैसे यह पर्त पिघलती है, ठोस चट्टान भी कम स्थिर और टूटने के लिए अधिक संवेदनशील हो जाती है, जबकि बर्फ और मलबा अधिक आसानी से अलग हो जाते हैं और विनाशकारी मलबे के प्रवाह में बदल जाते हैं। ये अस्थिर ढलान, हिमस्खलन चट्टान गिरने और भूस्खलन के जोखिम को बढ़ाते हैं, जो बदले में हिमनद झीलों में गिर सकते हैं और GLOFs का कारण बन सकते हैं। विश्व स्तर पर, खतरा काफी है, जो न केवल स्थानीय समुदायों बल्कि निचले इलाकों के बुनियादी ढांचे और अर्थव्यवस्थाओं को भी खतरे में डालता है।

सामाजिक-आर्थिक और सांस्कृतिक कमजोरियाँ

हिमनद हानि के प्रभाव मानव समाज में गहराई तक फैलते हैं, जिससे कल्याण और सांस्कृतिक पहचान के मौलिक पहलू प्रभावित होते हैं।

- **खाद्य और आजीविका असुरक्षा:** कम पिघला हुआ पानी सीधे सिंचित कृषि को प्रभावित करता है, जिससे लाखों लोगों, विशेष रूप से हिंदू कुश हिमालय जैसे क्षेत्रों में किसानों के लिए खाद्य असुरक्षा बढ़ जाती है। समुदायों, जिनकी आजीविका पशुधन, कृषि, जलविद्युत और पर्यटन के लिए हिमनद-पोषित नदियों पर निर्भर करती है, उन्हें

महत्वपूर्ण आर्थिक व्यवधान और नुकसान का सामना करना पड़ता है।

- **ऊर्जा सुरक्षा:** हिमनद गलित पानी में गिरावट सीधे जलविद्युत उत्पादन को प्रभावित करती है, जो कई हिमनद-निर्भर देशों के लिए एक महत्वपूर्ण ऊर्जा स्रोत है। पानी के प्रवाह में यह कमी ऊर्जा आपूर्ति को अस्थिर कर सकती है, जिसके महत्वपूर्ण आर्थिक परिणाम हो सकते हैं।
- **प्रवासन और संघर्ष:** जैसे-जैसे पानी की कमी तीव्र होती जाती है, फसल की विफलताएं अधिक होती जाती हैं, समुदायों को अक्सर अपने घरों को छोड़ने और सुरक्षित क्षेत्रों में पलायन करने के लिए मजबूर होना पड़ता है। यह बड़े पैमाने पर आंतरिक विस्थापन का कारण हो सकता है, जिससे मौजूदा घटते संसाधनों पर संघर्ष बढ़ सकता है।
- **सांस्कृतिक विरासत पर प्रभाव:** हिमनदों का कई स्वदेशी समुदायों के लिए गहरा सांस्कृतिक, आध्यात्मिक और प्रतीकात्मक महत्व है, जो पैतृक भूमि और उनकी पहचान के अभिन्न घटकों का प्रतिनिधित्व करते हैं। उनका गायब होना विरासत और सांस्कृतिक निरंतरता की एक अमूर्त हानि है। हिमनद का पिघलना सिर्फ एक भौगोलिक परिवर्तन नहीं है, यह मानव भावनाओं, पहचान और सांस्कृतिक निरंतरता की गहराई से जुड़ा हुआ संकट है।



तटीय क्षेत्रों पर प्रभाव और समुद्र स्तर में वृद्धि

- **समुद्र स्तर में वृद्धि का तंत्र:** हिमनदों का पिघलना सिर्फ पर्वतीय क्षेत्रों तक सीमित नहीं है, बल्कि इसके दूरगामी परिणाम वैश्विक स्तर पर तटीय समुदायों और पारिस्थितिक तंत्रों पर पड़ते हैं। हिमनदों और ध्रुवीय बर्फ की चादरों (विशेषकर अंटार्कटिका और ग्रीनलैंड की) से पिघला हुआ पानी सीधे तौर पर समुद्र में जुड़ता है, जिससे वैश्विक समुद्र स्तर में वृद्धि होती है।
- **निम्न-तटीय क्षेत्रों और द्वीपों पर खतरा:** समुद्र स्तर में यह वृद्धि निम्न-तटीय क्षेत्रों, नदी डेल्टाओं और छोटे द्वीप राष्ट्रों के लिए गंभीर खतरा पैदा करती है। भूमि के नुकसान, तूफान की लहरों के प्रति संवेदनशीलता में वृद्धि जैसी चुनौतियाँ इन क्षेत्रों में रहने वाले लाखों लोगों के जीवन और आजीविका को प्रभावित करती हैं।
- **सामाजिक-आर्थिक प्रभाव:** इसके सामाजिक-आर्थिक प्रभावों में तटीय समुदायों का विस्थापन, बंदरगाहों, सड़कों और हवाई अड्डों जैसे महत्वपूर्ण बुनियादी ढांचे को नुकसान, और तटीय पर्यटन की हानि शामिल है। यह न केवल स्थानीय अर्थव्यवस्थाओं पर दबाव डालता है, बल्कि बड़े पैमाने पर आंतरिक विस्थापन और जल संसाधनों को लेकर संभावित संघर्षों को भी जन्म दे सकता है।

हिमनद विज्ञान में आधुनिक अनुसंधान और निगरानी

हिमनदों का अध्ययन, जिसे पहले "हिमनद विज्ञान (Glaciology)" अनुसंधान के शुरुआती दिनों में हिमनद की सतह पर यात्रा करके और माप तथा तरवीरें लेकर किया जाता था, अब आधुनिक तकनीक के आगमन के साथ नाटकीय रूप से बदल गया है। आज हिमनद के कार्य करने और बदलने के तरीके को बेहतर ढंग से समझने के लिए विभिन्न प्रकार की अत्याधुनिक तकनीकों का उपयोग किया जाता है, जो अनुसंधान की नई दिशाओं को खोल रहा है।

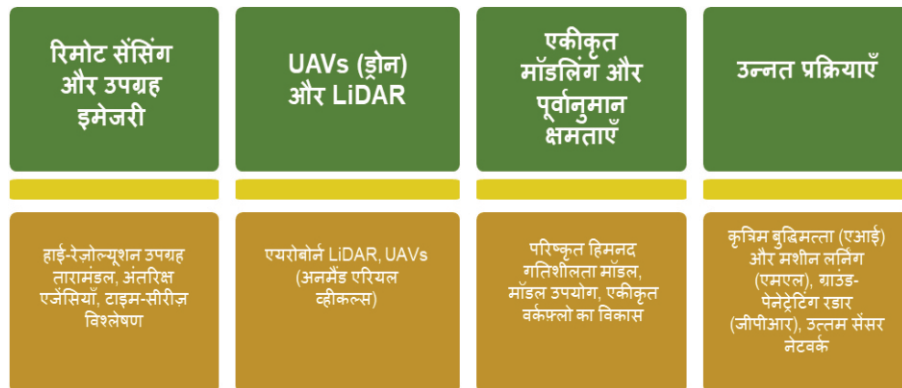
सुदूर संवेदी तकनीक और उपग्रहों का उपयोग सुदूर संवेदन हिमनद में बड़े पैमाने पर परिवर्तनों की निगरानी करने

का एक महत्वपूर्ण तरीका बन गया है। सेंटिनल जैसे उच्च-विभेदन के उपग्रह तारामंडल, सिंथेटिक अपरचर रडार (SAR) और इंटरफेरोमेट्री सिंथेटिक अपरचर रडार (InSAR) 1970 के दशक से हिमनद गतिशीलता, द्रव्यमान संतुलन और पिघलने के प्रणाली की व्यवस्थित निगरानी को सक्षम कर रहे हैं। NASA, ISRO और ESA जैसे अंतरिक्ष संगठनों द्वारा उपलब्ध कराए गए उच्च-विभेदन उपग्रह चित्र समय-श्रेणी विश्लेषण में सहायक होते हैं, जिससे हिमनद में हो रहे बदलावों की प्रवृत्तियों का विश्लेषण संभव हो पाता है।

ड्रोन (UAVs) और LiDAR तकनीक के जरिए वैज्ञानिक अल्पाइन क्षेत्रों में बर्फ की मोटाई, हिमनद की सतही ऊँचाई और उसकी मात्रा में समय के साथ हो रहे परिवर्तनों का सटीक रूप से अध्ययन कर सकते हैं। यह तकनीक मुश्किल भौगोलिक परिस्थितियों में भी, जहाँ परंपरागत स्थल परीक्षण संभव नहीं होते, आंकड़े एकत्रित कर सकती है। मानवरहित हवाई वाहन (UAV) की मदद से वैज्ञानिक नियमित अंतराल पर हिमनद की स्थिति दर्ज कर सकते हैं, जिससे सतही पिघलन, दरारें, बर्फ के प्रवाह की दिशा और द्रव्यमान संतुलन का मूल्यांकन किया जा सकता है। साथ ही, इसकी उच्च-विभेदन छवियाँ छोटे पैमाने के परिवर्तनों को भी पकड़ सकती हैं, जो जलवायु परिवर्तन की निगरानी के लिए महत्वपूर्ण हैं।

एकीकृत मॉडलिंग और पूर्वानुमान क्षमता परिष्कृत हिमनद गतिशीलता मॉडल विकसित करने में महत्वपूर्ण प्रगति हुई है जो पूर्वानुमान क्षमताओं को बढ़ाती है। जेयूएलईएस (JULES) और ओपन सार्वभौम हिमनद निदर्श (OGGM) जैसे उन्नत निदर्श अब जटिल हिमनद गतिशीलता, जिसमें द्रव्यमान संतुलन और बर्फ का प्रवाह शामिल है, अग्रभूमि जलविज्ञान के साथ उनकी जटिल अंतःक्रियाओं का अनुकरण करने के लिए नियमित रूप से उपयोग किए जाते हैं। शोधकर्ता इन मॉडलों को संयोजित करने वाले एकीकृत कार्यप्रवाह को तेजी से विकसित कर रहे हैं।

कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) और मशीन लर्निंग (ML) की भूमिका: कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) और मशीन लर्निंग (ML) का एकीकरण हिमनद विज्ञान अनुसंधान, विशेष रूप से डेटा अंतराल को संबोधित करने में मौलिक रूप से बदल रहा है। “डीप लर्निंग मॉडल”, खुले ऑप्टिकल और सिंथेटिक अपरचर रडार (SAR) उपग्रह आंकड़ों का लाभ उठाते हुए, वैश्विक हिमनद मानचित्रण में उच्च-पर्वतीय एशिया जैसे मलबे से ढके क्षेत्रों में भी विशेषज्ञ-स्तर की शुद्धता प्राप्त कर रहे हैं। ये मॉडल नियमित रूप से अद्यतन हिमनद ज्यामिति और कैल्विंग गतिशीलता के बेहतर प्रतिनिधित्व को शामिल करने की अनुमति देकर हिमनद विकास मॉडल विकास को बढ़ा रहे हैं। मशीन लर्निंग दृष्टिकोण, जैसे कि मासिक संतुलन मशीन (MBM) में उपयोग की जाने वाली एक्सजीबूस्ट वास्तुकला, असंबद्ध हिमनदों के लिए मौसमी और वार्षिक द्रव्यमान संतुलन भविष्यवाणियों में सुधार कर रही है। यह क्षमता पहले से दुर्गम हिमनदों में परिवर्तनों की निगरानी और भविष्यवाणी करने के लिए महत्वपूर्ण है, जिससे वैश्विक आंकलन की व्यापकता और सटीकता में काफी वृद्धि होती है।



भू-भेदी रडार (GPR) और भूकम्पविज्ञान: भू-भेदी रडार (GPR) एक शक्तिशाली भूभौतिकीय विधि है जिसका उपयोग हिमनदों की आंतरिक और आधारभूत संरचनाओं की जांच के लिए, विशेष रूप से उन समशीतोष्ण हिमनदों में जहाँ पिघलता पानी और जटिल परतें पारंपरिक तकनीकों को चुनौती देती हैं, किया जाता है। भूकंपीय सेंसर का उपयोग हिमनदों के भीतर और नीचे की घटनाओं, जैसे कि पिघलने वाले पानी की गति और हिमनदों की अंतर्निहित सतह की संरचना, को मापने के लिए किया जाता है।

स्वचालित मौसम स्टेशन और बोरहोल मापन: स्वचालित मौसम स्टेशन, हिमनदों की सतह पर मौसम की स्थिति की निगरानी करते हैं। ये दूरस्थ, स्वचालित उपकरण हैं जिन्हें हिमनदों की सतह पर या उनके निकटवर्ती क्षेत्रों में स्थापित किया जाता है, जहाँ मानव उपस्थिति अक्सर चुनौतीपूर्ण या असंभव होती है। ये स्टेशन विभिन्न पर्यावरणीय मापदंडों को लगातार मापते और रिकॉर्ड करते हैं, जो हिमनद-जलवायु संबंधों की गहन समझ प्रदान करने के लिए आवश्यक हैं। इन स्टेशनों द्वारा एकत्र किए गए प्रमुख आंकड़ों में वायु तापमान, सापेक्ष आर्द्रता, वायु गति और दिशा, सौर विकिरण और वर्षा शामिल हैं।

संरक्षण के समाधान और अनुकूलन रणनीतियाँ

हिमनदों के पीछे हटने के व्यापक और बढ़ते संकट को उल्लेखित करने के लिए एक बहुआयामी दृष्टिकोण की आवश्यकता है जो आक्रामक वैश्विक शमन प्रयासों, स्थानीय अनुकूलन रणनीतियों और मजबूत अंतर्राष्ट्रीय सहयोग को एकीकृत करता है।

1. **जीवाश्म ईंधन पर निर्भरता में कमी:** हिमनदों के संरक्षण और जलवायु परिवर्तन की गति को धीमा करने के लिए जीवाश्म ईंधन पर निर्भरता को कम करना एक मूलभूत कदम है। यह ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन को नियंत्रित करने के लिए आवश्यक है, जो समस्या के मूल कारण को उल्लेखित करता है।
2. **नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों को बढ़ावा देना:** सौर और पवन ऊर्जा जैसे नवीकरणीय ऊर्जा स्रोतों का व्यापक उपयोग ग्रीनहाउस गैस उत्सर्जन को कम करने और जलवायु परिवर्तन से निपटने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है। यह वैश्विक, राष्ट्रीय और स्थानीय स्तर पर समन्वित प्रयासों का एक अभिन्न अंग है।
3. **व्यापक जल प्रबंधन रणनीतियाँ:** जल संसाधनों की स्थिरता सुनिश्चित करने में मदद करने के लिए प्रभावी जल प्रबंधन रणनीतियाँ आवश्यक हैं। इसमें जल संचयन, कुशल सिंचाई प्रणालियाँ, और जल पुनर्चक्रण जैसे उपाय शामिल हैं, ताकि हिमनद पर निर्भरता कम की जा सके और जल संकट का सामना किया जा सके।
4. **हिम स्तूप और कृत्रिम हिमनद विकास:** हिम स्तूप (ice stupas) और कृत्रिम हिमनद विकास (Artificial glacier growth) जैसी अभिनव तकनीकों का उपयोग हिमालय में मौसमी जल उपलब्धता को बढ़ाने के लिए किया जा रहा है। ये स्थानीय, समुदाय-आधारित समाधानों के उदाहरण हैं जो शुष्क अवधि के दौरान सिंचाई के लिए जल उपलब्ध कराकर सीधे तौर पर जल सुरक्षा में सुधार करते हैं।
5. **सामुदायिक-आधारित अनुकूलन और स्थानीय ज्ञान का उपयोग:** स्थानीय समुदायों को अनुकूलन रणनीतियों के विकास और कार्यान्वयन में सक्रिय रूप से शामिल करना महत्वपूर्ण है। उनके पारंपरिक ज्ञान और अनुभवों का लाभ उठाना, जो सदियों से पर्वतीय वातावरण में रहते आ रहे हैं, अधिक प्रभावी और स्थायी समाधानों को जन्म दे सकता है।
6. **प्रारंभिक चेतावनी प्रणाली का विकास और कार्यान्वयन:** हिमनद झील के फटने से आने वाली बाढ़ (GLOFs) और अन्य हिमनद-संबंधी आपदाओं के जोखिम को कम करने के लिए प्रभावी प्रारंभिक चेतावनी प्रणालियों को विकसित करना और उन्हें लागू करना आवश्यक है। यह जोखिम वाले समुदायों की सुरक्षा सुनिश्चित करने और संभावित नुकसान को कम करने में मदद करेगा।
7. **सतत पर्यटन और पारिस्थितिकीय संवेदनशीलता:** हिमनद क्षेत्रों में पर्यटन को इस तरह से बढ़ावा देना जिससे पर्यावरण पर नकारात्मक प्रभाव कम हो और स्थानीय समुदायों को आर्थिक लाभ हो, एक महत्वपूर्ण अनुकूलन रणनीति है। पारिस्थितिकीय संवेदनशीलता बनाए रखते हुए उत्तरदायी पर्यटन प्रथाओं को लागू करना हिमनद पारिस्थितिकी तंत्र के संरक्षण में योगदान देगा।

हिमनद संरक्षण के लिए वैश्विक और नीतिगत प्रयास

हिमनदों का पिघलना सिर्फ एक स्थानीय समस्या नहीं है, बल्कि एक वैश्विक चुनौती है जिसके लिए समन्वित अंतर्राष्ट्रीय प्रयासों और सुदृढ़ नीतिगत ढाँचे की आवश्यकता है।

अंतर्राष्ट्रीय सहयोग की अनिवार्यता: हिमनदों का पिघलना एक ऐसी समस्या है जिसके लिए किसी एक देश के

प्रयास पर्याप्त नहीं हैं। जल सुरक्षा, पारिस्थितिक संतुलन और प्राकृतिक आपदाओं के जोखिम को देखते हुए, उन नदी घाटियों के लिए साझा रणनीतियों की तत्काल आवश्यकता है जो कई देशों में फैली हुई हैं। यह सुनिश्चित करना कि वैश्विक नीतियां और वित्तपोषण स्थानीय समुदायों की विशिष्ट आवश्यकताओं और कमजोरियों को संबोधित करें, और उन्हें अनुकूलन रणनीतियों में सक्रिय रूप से शामिल करें, एक जटिल लेकिन आवश्यक कार्य है।

शमन और अनुकूलन रणनीतियों का एकीकरण: प्रभावी हिमनद संरक्षण के लिए शमन (उत्सर्जन में कमी) और अनुकूलन (बदलते प्रभावों के लिए तैयारी) दोनों रणनीतियों का एक साथ और एकीकृत तरीके से कार्यान्वयन महत्वपूर्ण है। केवल उत्सर्जन कम करना पर्याप्त नहीं है क्योंकि हिमनदों का पिघलना पहले से ही शुरू हो चुका है, जिसके लिए अनुकूलन की आवश्यकता है। साथ ही, केवल अनुकूलन उपाय भी समस्या के मूल कारण को संबोधित नहीं करते हैं, जिससे दीर्घकालिक समाधान संभव नहीं है।

मौजूदा वैश्विक समझौते और पहल: जलवायु परिवर्तन पर संयुक्त राष्ट्र फ्रेमवर्क कन्वेंशन (UNFCCC) और पेरिस समझौता जैसे वैश्विक जलवायु समझौते हिमनद संरक्षण सहित जलवायु कार्रवाई के लिए प्राथमिक अंतर्राष्ट्रीय कानूनी ढाँचे प्रदान करते हैं। संयुक्त राष्ट्र ने 2025 को 'अंतर्राष्ट्रीय हिमनद संरक्षण वर्ष' घोषित किया है, जिसका उद्देश्य हिमनद के महत्व और उनके क्षरण के प्रभाव के प्रति वैश्विक जागरूकता बढ़ाना है। इस पहल के अंतर्गत प्रतिवर्ष 21 मार्च को 'अंतर्राष्ट्रीय हिमनद संरक्षण वर्ष' भी मनाया जाएगा। यह वर्ष वैश्विक हिमनद निगरानी प्रणालियों का विस्तार करने, प्रारंभिक चेतावनी प्रणालियों को विकसित करने, स्थायी जल संसाधन प्रबंधन को बढ़ावा देने, सांस्कृतिक विरासत को संरक्षित करने और युवाओं को शामिल करने पर केंद्रित होगा। यह वैश्विक ध्यान आकर्षित करने और समन्वित कार्रवाई को बढ़ावा देने का एक महत्वपूर्ण प्रयास है।



नीतिगत चुनौतियों का समाधान: वैश्विक सहयोग के बावजूद, हिमनद संरक्षण नीतियों के कार्यान्वयन में कई बाधाएँ हैं, जिनमें विभिन्न देशों के बीच राष्ट्रीय हितों का टकराव, आँकड़ा साझाकरण की कमी, पर्याप्त वित्तीय संसाधनों की अनुपलब्धता और राजनीतिक इच्छाशक्ति की कमी शामिल है। वास्तविक चुनौती, वैश्विक जागरूकता को स्थानीय और राष्ट्रीय स्तर पर ठोस, प्रभावी कार्रवाई में बदलने में निहित है।

विज्ञान, स्थानीय ज्ञान और नीति का समन्वय: वैज्ञानिक अनुसंधान और हिमनदों पर सटीक डेटा नीति-निर्माण के लिए आधारशिला हैं। नीति निर्माताओं को विश्वसनीय और अद्यतन जानकारी उपलब्ध कराने के लिए तंत्र को मजबूत करना महत्वपूर्ण है। उन्नत रिमोट सेंसिंग और GIS प्रौद्योगिकियों का लाभ लेकर वैज्ञानिक निगरानी क्षमता को उन्नत किया जा सकता है। साथ ही LiDAR, AI/ML जैसे आधुनिक विज्ञान और निगरानी तकनीकों का प्रभावी उपयोग सुनिश्चित करने के लिए प्रौद्योगिकी हस्तांतरण भी महत्वपूर्ण है।

सामुदायिक भागीदारी और सशक्तिकरण: प्रभावी कार्यान्वयन के लिए केवल “शीर्ष-डाउन” नीतियां पर्याप्त नहीं हैं। जमीनी स्तर पर प्रभावी कार्यान्वयन के लिए स्थानीय ज्ञान, क्षमता निर्माण और समुदायों को सशक्त बनाना महत्वपूर्ण है। स्थानीय समुदायों को अनुकूलन रणनीतियों में सक्रिय रूप से शामिल करना उनकी विशिष्ट आवश्यकताओं और कमजोरियों को संबोधित करने के लिए आवश्यक है।

भारत की प्रतिबद्धताएं और पहलें, भारत हिमालयी पारिस्थितिकी तंत्र से गहराई से जुड़ी हुयी हैं और हिमनद निगरानी और जलवायु अनुकूलन के लिए कई पहल कर रही हैं। इसमें राष्ट्रीय हिमालयी पारिस्थितिकी तंत्र को बनाए रखने के लिए राष्ट्रीय मिशन (NMSHE) और “हिममंडल” और जलवायु परिवर्तन अध्ययन केंद्र की स्थापना शामिल है।



भविष्य की दिशा और आशा

हिमनद संरक्षण केवल एक पर्यावरणीय अनिवार्यता नहीं है, बल्कि मानव अस्तित्व और सतत विकास के लिए एक महत्वपूर्ण निवेश है। 'अंतरराष्ट्रीय हिमनद संरक्षण वर्ष 2025' जैसी पहलें, वैश्विक समुदाय को एक साथ आने और इन अमूल्य प्राकृतिक भंडारों को बचाने के लिए ठोस कार्रवाई करने का अवसर प्रदान करती हैं। सामूहिक इच्छाशक्ति और वैज्ञानिक नवाचार के साथ, हम भविष्य की पीढ़ियों के लिए जल सुरक्षा, पारिस्थितिक संतुलन और जलवायु स्थिरता सुनिश्चित करने की आशा कर सकते हैं। यदि ग्लोबल वार्मिंग और ग्रीनहाउस गैसों के उत्सर्जन पर नियंत्रण नहीं किया गया, तो हिमनद के पिघलने के परिणाम और भी गंभीर हो सकते हैं, जिससे मानव जीवन और पृथ्वी के नाजुक पारिस्थितिकी तंत्र पर अपरिवर्तनीय प्रभाव पड़ेगा। वैश्विक समुदाय को इस चुनौती का सामना करने के लिए मिलकर काम करना होगा, ताकि इन अमूल्य प्राकृतिक भंडारों को बचाया जा सके।