



தமிழ்மனம் சர்வதேசத் தமிழ் ஆய்விதழ்

Peer-Reviewed Open Access Crossref Google Scholar
SJIF Impact Factor3.5 (2024-) Multidisciplinary

doi : <https://doi.org/10.63300/tm12042026>



Vol. 12 No. 04 (2026): September 2026, p176-197 | Available online at: www.tamilmanam.in

Original Research Paper – Peer reviewed ✓

பனிப்பாறை சரிவால் ஏற்படும் திடீர் வெள்ளங்களுக்கு AI அடிப்படையிலான
பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை கட்டமைப்பு: 2026 நேபாள பேரிடரை மையமாகக்

கொண்ட Remote Sensing மற்றும் Digital Twin ஆய்வு

AI-Based Multi-Hazard Early Warning Framework for Glacier Collapse–Triggered Flash
Floods: A Remote Sensing and Digital Twin Study of the 2026 Nepal Disaster

Dr.C.Sakthimurugan^{ID*},

Assistant professor in Tamil, Nandha Arts and Science College (Autonomous), Erode -638052

Email: sakthimurugan.c@nandhaarts.org, **Orcid Id:** <https://orcid.org/0009-0000-1996-2099>

Dr D Mahalingam^{ID},

Head, Department of library & information science

Nandha Arts And Science College.(Autonomous) Erode-52

Email id : nasc.library@gmail.com, **Orchid Id :** [0009-0001-3733-9046](https://orcid.org/0009-0001-3733-9046)

Dr K Santhanam^{ID},

Asst.Professor, Nandha College of Education, Erode-52

Email: ersanthanamma@gmail.com

Dr.V.C.Srinivasan^{ID},

Administrative Officer,

Nandha Arts and Science College (Autonomous), Erode.

Email: srvc2345@gmail.com, **Orcid Id:** <https://orcid.org/0009-0008-9926-7982>

Article history

Received: 20-08-2026

Revised: 30-08-2026

Accepted: **25-08-2026**

Published on: 01-09-2026

*Corresponding Author

Email:

sakthimurugan.c@nandhaarts.org

Abstract:

Exposing the technical limits of existing early warning systems after a devastating August 2026 flash flood in Nepal's Trisuli–Bhote Koshi basin, this paper proposes a multi-hazard early warning framework to address rising Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) and avalanche-induced flash floods in the climate-sensitive Himalayas. The framework combines risk prediction, GIS risk mapping, and early warning layers by using Transformer/LSTM deep learning models to integrate six distinct data sources: satellite imagery, glacier temperature, snowmelt rate, rainfall, seismic signals, and river water levels. Additionally, it incorporates Digital Twin technology for real-time basin modeling and "what-if" simulations, demonstrating through the 2026 Nepal disaster case study how lead times can be improved across South Asian Himalayan regions and similar high-risk zones.

Keywords: Glacial Lake Outburst Flood (GLOF), Artificial Intelligence, Transformer, LSTM, Remote Sensing, Digital Twin, GIS Risk Map, Early Warning System, Nepal 2026, Multi-hazard Monitoring.



Copyright © 2024 by the author(s). Published by Department of Library, Nallamuthu Gounder Mahalingam College, Pollachi. This is an open access article under the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

சுருக்கம் (Abstract)

இமயமலைத் தொடர் உலகின் மிக உணர்திறன் மிக்க காலநிலைப் பகுதிகளில் ஒன்றாகும். புவி வெப்பமயமாதலின் விளைவாக பனிப்பாறைகள் விரைவாக உருகி, பனிப்பாறை ஏரிகளின் எண்ணிக்கையும் பரப்பளவும் தொடர்ந்து அதிகரித்து வருகின்றன. இதன் நேரடி விளைவாக, பனிப்பாறை ஏரி வெடிப்பு வெள்ளங்கள் (Glacial Lake Outburst Floods – GLOF) மற்றும் பனிப்பாறை சரிவால் ஏற்படும் திடீர் வெள்ளங்கள் அதிகரித்து வருகின்றன. 2026 ஆகஸ்ட் 26ஆம் தேதி நேபாளத்தின் திரிகுலி-போதேகோசி ஆற்றுப் படுகையில் ஏற்பட்ட பேரழிவுகரமான திடீர் வெள்ளம், நிலவும் முன்னெச்சரிக்கை அமைப்புகளின் தொழில்நுட்ப வரம்புகளை வெளிச்சம் போட்டுக் காட்டியது. இந்த ஆய்வுக் கட்டுரை, செயற்கைக்கோள் படங்கள், பனிப்பாறை வெப்பநிலை, பனி உருகல் வீதம், மழைப்பொழிவு, நிலநடுக்க அதிர்வு சமிக்ஞைகள், ஆற்று நீர்மட்டம் ஆகிய ஆறு வேறுபட்ட தரவு மூலங்களை Transformer/LSTM ஆழ்கற்றல் மாதிரிகள் மூலம் இணைத்து, இடர் கணிப்பு (Risk Prediction), GIS இடர் வரைபடம் (GIS Risk Map), மற்றும் முன்னெச்சரிக்கை (Early Warning) ஆகிய அடுக்குகளைக் கொண்ட ஒரு பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை கட்டமைப்பை முன்மொழிகிறது. மேலும், Digital Twin தொழில்நுட்பத்தைப் பயன்படுத்தி, ஆற்றுப் படுகையின் மெய்நிகர் மாதிரியாக்கம் மூலம் நிகழ்நேர கண்காணிப்பும், 'என்னவெனில்' (what-if) அனுகரிப்பு ஆய்வுகளும் எவ்வாறு மேற்கொள்ளப்படலாம் என்பதும் விவாதிக்கப்படுகிறது. 2026 நேபாள பேரிடரை வழக்கு ஆய்வாகக் கொண்டு, முன்மொழியப்பட்ட கட்டமைப்பு அந்தப் பேரிடரின் முன் எச்சரிக்கை நேரத்தை (lead time) எவ்வாறு மேம்படுத்தியிருக்கக் கூடும் என்பது பகுப்பாய்வு செய்யப்படுகிறது. இக்கட்டமைப்பு தென்னாசிய இமயமலைப் பகுதிகளுக்கும், அது போன்ற பிற பேரிடர் அபாய மண்டலங்களுக்கும் பொருந்தக்கூடிய வகையில் வடிவமைக்கப்பட்டுள்ளது.

திறவுச்சொற்கள் (Keywords): பனிப்பாறை ஏரி வெடிப்பு வெள்ளம் (GLOF), செயற்கை நுண்ணறிவு, Transformer, LSTM, Remote Sensing, Digital Twin, GIS இடர் வரைபடம், முன்னெச்சரிக்கை அமைப்பு, நேபாளம் 2026, பல்பேரிடர் கண்காணிப்பு.

1. அறிமுகம்

காலநிலை மாற்றத்தின் காரணமாக இமயமலைப் பகுதியிலுள்ள பனிப்பாறைகள் கடந்த மூன்று பதற்றாண்டுகளில் விரைவான வேகத்தில் உருகி வருகின்றன. புவி வெப்பநிலை உயர்வுக்கு ஏற்ப, பனிப்பாறைகளின் நுனிப் பகுதிகளில் புதிய ஏரிகள் உருவாகின்றன; ஏற்கெனவே இருக்கும் ஏரிகளும் விரிவடைந்து செல்கின்றன (Sharma et al., 2024; Shukla et al., 2025). இந்த ஏரிகள்

பெரும்பாலும் தளர்வான மொரைன் (moraine) அணைகளால் அல்லது பனிக்கட்டி அணைகளால் தடுத்து நிறுத்தப்பட்டிருப்பதால், பனிச்சரிவு, பாறைச் சரிவு அல்லது அதிக மழைப்பொழிவு போன்ற எந்த ஒரு தூண்டல் நிகழ்வும் இந்த அணைகளை உடைத்து, கீழ்நோக்கிய பள்ளத்தாக்குகளில் வாழும் மக்கள் தொகைக்கும் உள்கட்டமைப்புக்கும் பேரழிவுகரமான விளைவுகளை ஏற்படுத்தக்கூடும்.

பாரம்பரிய பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை அமைப்புகள் பெரும்பாலும் ஒரு தனிப்பட்ட தரவு மூலத்தையே (எடுத்துக்காட்டாக, ஆற்று நீர்மட்டம் மட்டும்) அடிப்படையாகக் கொண்டு செயல்படுகின்றன. இத்தகைய அமைப்புகள் பருவமழைக் காலத்தில் ஏற்படும் படிப்படியான வெள்ளங்களைக் கண்காணிக்க ஓரளவு பயனுள்ளதாக இருந்தாலும், பனிப்பாறை சரிவு அல்லது பாறைச் சரிவு காரணமாக சில நிமிடங்களில் திடீரென வெடித்துச் சீறும் திடீர் வெள்ளங்களைக் கண்டறிவதில் பெரும் தோல்வியடைகின்றன. 2026 ஆகஸ்ட் மாதம் நேபாளத்தில் நிகழ்ந்த பேரிடர் இதற்குச் சிறந்த எடுத்துக்காட்டாகும்; வானிலை தெளிவாக இருந்த போதிலும், மேலைப் பகுதியில் ஏற்பட்ட பனிப்பாறை/பாறைச் சரிவு நிலநடுக்கத்திற்கு நிகரான அதிர்வலைகளை உருவாக்கியது, ஆனால் நீர்மட்ட அடிப்படையிலான எச்சரிக்கை அமைப்பு அதை நேரத்திற்குக் கண்டறிய இயலவில்லை.

இந்த வரம்புகளை நிவர்த்தி செய்யும் நோக்கில், இந்த ஆய்வுக் கட்டுரை ஒரு பல்பேரிடர் (multi-hazard), பல தரவு மூல (multi-source) அணுகுமுறையை முன்மொழிகிறது. செயற்கைக்கோள் தொலை உணர்தல் தரவு, பனிப்பாறை வெப்பநிலை, பனி உருகல் வீதம், மழைப்பொழிவு, நிலநடுக்க அதிர்வு சமிக்ஞைகள், மற்றும் ஆற்று நீர்மட்டம் ஆகிய ஆறு தரவு அடுக்குகளை ஒருங்கிணைத்து, ஆழ்கற்றல் மாதிரிகள் (Transformer மற்றும் LSTM) மூலம் பகுப்பாய்வு செய்து, இடர் கணிப்பையும், GIS இடர் வரைபடத்தையும், இறுதியாக நிகழ்நேர முன்னெச்சரிக்கையையும் உருவாக்கும் ஒரு முழுமையான கட்டமைப்பு இங்கு வடிவமைக்கப்படுகிறது. இதனுடன், Digital Twin தொழில்நுட்பத்தின் மூலம் ஆற்றுப் படுகையின் மெய்நிகர் பிரதிநிதித்துவத்தை உருவாக்கி, சாத்தியமான சரிவு காட்சிகளை முன்கூட்டியே அனுகரிப்பு செய்யும் வழிமுறையும் விவரிக்கப்படுகிறது.

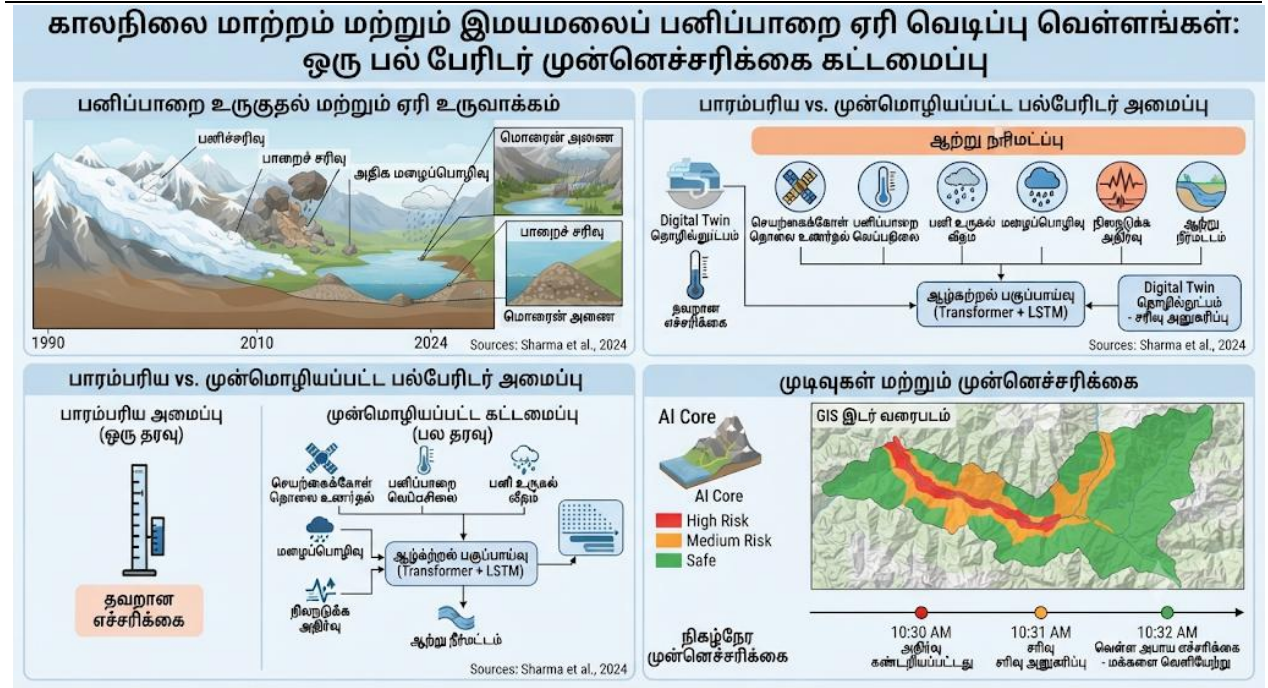


Fig 1: காலநிலை மாற்றம் மற்றும் இமயமலைப் பனிப்பாறை ஏரி வெடிப்பு

வெள்ளங்களுக்கான பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை கட்டமைப்பு

இப்படம் பனிப்பாறைகள் உருகுதல் மற்றும் ஏரிகள் உருவாகும் முறையை விளக்குகிறது. பாரம்பரிய மற்றும் நவீன பல தரவு மூலங்களை அடிப்படையாகக் கொண்ட செயற்கை நுண்ணறிவு (AI Core) முறையை இது ஒப்பிடுகிறது. மேலும், GIS இடர் வரைபடம் மற்றும் நிகழ்நேர முன்னெச்சரிக்கை அறிவிப்புகள் மூலம் ஆபத்துகளை முன்கூட்டியே கண்டறிந்து பொதுமக்களைப் பாதுகாக்கும் செயல்முறையைத் தெளிவாக எடுத்துக்காட்டுகிறது.

2. ஆய்வுப் பின்னணி: பனிப்பாறை ஏரி வெடிப்பு வெள்ளங்கள்

பனிப்பாறை ஏரி வெடிப்பு வெள்ளம் (GLOF) என்பது, பனிப்பாறையின் உருகல் நீரால் உருவான ஏரி, அதைத் தடுத்து நிறுத்தும் மொரைன் அல்லது பனிக்கட்டி அணை திடீரென உடைவதால் ஏற்படும் மிகப் பெரிய நீர் வெளியேற்றத்தைக் குறிக்கிறது (Kaushik et al., 2022). இதற்கான தூண்டல் காரணிகளாக பின்வருவன அமையலாம்: (அ) பனிப்பாறை அல்லது பாறைத் துண்டு ஏரிக்குள் சரிந்து விழுவதால் ஏற்படும் அலைத் தாக்கம், (ஆ) அணையின் உள்ளாழ் பனி உருகுவதால் ஏற்படும் கட்டமைப்பு பலவீனம், (இ) நிலநடுக்கம் அல்லது தொடர்ச்சியான மழைப்பொழிவால் ஏற்படும் அழுத்தச் சேதம். புதிதாக வெளியான 2026 நேபாள பேரிடர் தொடர்பான புவி அறிவியல் பகுப்பாய்வுகள், இது ஒரு பாரம்பரிய 'பெரிய ஏரி வெடிப்பு' அல்ல, மாறாக பனிப்பாறை/பாறைச் சரிவு, நீர்-வண்டல் கலவை, மற்றும் குறுகிய ஆற்றுப் பள்ளத்தாக்கு வடிவியல் ஆகியவை இணைந்த ஒரு 'கேஸ்கேடிங்' (cascading) புவி-கிரையோஸ்பியர்

பேரிடராகும் என்பதைச் சுட்டிக்காட்டுகின்றன.

கடந்த ஒரு பதிற்றாண்டில் தென்னாசிய இமயமலைப் பகுதியில் இதுபோன்ற பல நிகழ்வுகள் பதிவாகியுள்ளன. 2023 அக்டோபர் மாதம் சிக்கிமில் தெற்கு லோனாக் ஏரி (South Lhonak Lake) கடும் மழைப்பொழிவால் வெடித்து 92க்கும் மேற்பட்டோர் உயிரிழந்தனர்; 15 பாலங்களும் ஒரு நீர்மின் அணையும் அழிக்கப்பட்டன. 2024 ஆகஸ்ட் மாதம் நேபாளத்தின் தேமே (Thame) கிராமத்தில் இரண்டு பனிப்பாறை ஏரிகள் தொடர்ச்சியாக வெடித்தன. 2025 மே மாதம் ஹும்லா மாவட்டத்தில் தில்காவ் GLOF ஏற்பட்டது; 2025 ஜூலை மாதம் ரசவகதி பகுதியில் ஏற்பட்ட வெள்ளமும் பனிப்பாறை ஏரி வெடிப்பினால் ஏற்பட்டதாகக் கருதப்படுகிறது. இந்த ஒவ்வொரு நிகழ்விலும் பொதுவான அம்சம் என்னவெனில், நிகழ்வு நடந்த இடத்திலும் நேரத்திலும் ஏற்கெனவே இருந்த கண்காணிப்பு அமைப்புகள் போதுமான முன் எச்சரிக்கை நேரத்தை வழங்கத் தவறியிருந்தன.

இதற்கு முக்கியக் காரணம், பெரும்பாலான கண்காணிப்பு முறைகள் ஒரு குறிப்பிட்ட, ஏற்கெனவே அடையாளம் காணப்பட்ட பெரிய ஏரிகளை மட்டுமே கண்காணிக்கின்றன (Adhikari et al., 2025). ஆனால் 2026 நேபாள பேரிடர் போன்ற நிகழ்வுகள், முன்பு குறிப்பாகக் கவனிக்கப்படாத 'கண்காணிப்புக் குருடு பகுதிகளில்' (monitoring blind spots) கூட ஏற்படலாம் என்பதை நிரூபிக்கின்றன. எனவே, ஒரு குறிப்பிட்ட ஏரியை மட்டும் கண்காணிப்பதற்குப் பதிலாக, பரந்த பகுதியை ஒரே நேரத்தில் பல தரவு மூலங்கள் மூலம் தொடர்ந்து கண்காணிக்கும் பல்பேரிடர் அணுகுமுறை இன்றியமையாததாக மாறியுள்ளது.

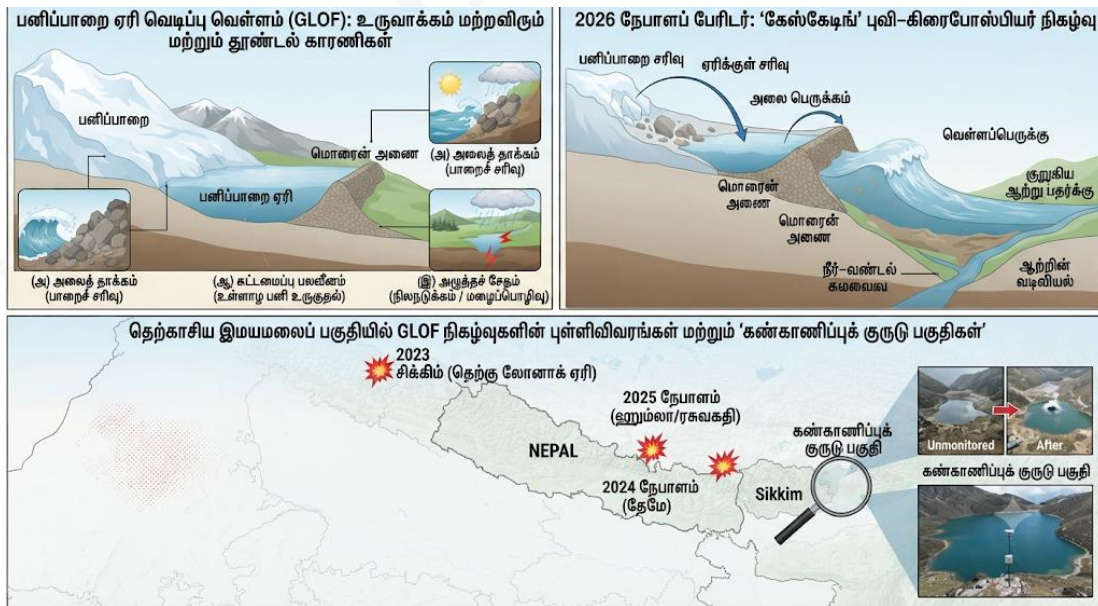


Fig 2: இமயமலைப் பனிப்பாறை ஏரி வெடிப்பு வெள்ளங்களின் காரணங்களும் கண்காணிப்புச் சவால்களும்

இப்படம் பனிப்பாறை ஏரி வெடிப்பு வெள்ளங்களின் (GLOF) உருவாக்கத்தையும், அதன் தூண்டல் காரணிகளையும் விளக்குகிறது. மேலும், 2026 நேபாளத்தின் பேரிடர் நிகழ்வுகள் மற்றும் சிக்கிம், நேபாளப் பகுதிகளில் கடந்த காலங்களில் ஏற்பட்ட வெள்ளப் பாதிப்புகளைக் காட்டுகிறது. வழக்கமான கண்காணிப்பு முறைகளின் குறைபாடுகளையும், கண்காணிக்கப்படாத குருடு பகுதிகளின் ஆபத்தையும் இது தெளிவாக உணர்த்துகிறது.

3. 2026 நேபாள பேரிடர்: வழக்கு ஆய்வு

2026 ஆகஸ்ட் 26ஆம் தேதி காலை (உள்ளூர் நேரம் சுமார் காலை 8:37 மணியளவில்), நேபாள-திபெத் எல்லைப் பகுதிக்கு அருகில், கோடாரிக்கு வடமேற்கே சுமார் 55 கிலோமீட்டர் தொலைவில், ஒரு பெரும் பனிப்பாறை/பாறைச் சரிவு ஏற்பட்டது. இது ஏறத்தாழ 70 கிசா பிரமிடுகளுக்கு (Great Pyramids of Giza) நிகரான அளவு பனி-பாறை-வண்டல் கலவையை ஆயிரக்கணக்கான அடி உயரத்திலிருந்து பள்ளத்தாக்குக்குள் இறக்கியது. இந்த சரிவு அமெரிக்க புவி அளவை ஆய்வு நிறுவனத்தின் (USGS) அளவீட்டில் 5.2 நிலநடுக்க அளவுக்கு (Richter magnitude) நிகரான அதிர்வலைகளை உலகெங்கிலும் உள்ள நிலநடுக்க அளவீட்டுக் கருவிகளில் பதிவு செய்தது. இதன் காரணமாக ஆரம்பத்தில் இது ஒரு நிலநடுக்கமாகவே தவறாகக் கருதப்பட்டது.

இச்சரிவு போதேகோசி (Bhotekoshi) ஆற்றின் மேல்பகுதியில் தற்காலிகமாக ஆற்றைத் தடுத்து நிறுத்தி, பின்னர் அந்தத் தடுப்பு உடைந்து, திரிசுலி (Trishuli) ஆற்றுப் படுகை வழியாக நுவாகோட் மற்றும் ரசுவா மாவட்டங்கள் வழியாக பேரளவு நீர்-வண்டல் வெள்ளமாகச் சீறிப் பாய்ந்தது. வானிலை அந்நேரத்தில் தெளிவாக இருந்ததால், மழையை அடிப்படையாகக் கொண்ட வழக்கமான எச்சரிக்கை முறைகள் எந்த சமிக்கையையும் தராமல் இருந்தன. இப்பேரிடரில் குறைந்தது 389 பேர் உயிரிழந்ததாகவும், நூற்றுக்கணக்கானோர் காணாமல் போனதாகவும் அறிக்கைகள் தெரிவிக்கின்றன; வீடுகள், நீர்மின் திட்டங்கள், சந்தைகள், பாலங்கள் முழுமையாக மண்-வண்டலால் புதைந்தன.

இப்பேரிடர் குறித்த முதற்கட்ட அறிக்கைகள் முக்கியமான ஒரு உண்மையை வெளிச்சம் போட்டுக் காட்டுகின்றன: நேபாளத்திலும் திபெத்திலும் ஏற்கெனவே செயல்பாட்டில் இருந்த முன்னெச்சரிக்கை அமைப்பு, நீர்மட்ட உணரிகளை (water-level sensors) அடிப்படையாகக் கொண்டது, இது பருவமழை வெள்ளங்களுக்கும் நிலையான ஆற்றோட்ட மாற்றங்களுக்கும் ஓரளவு பொருந்தக்கூடியதாக இருந்தாலும், நிமிடங்களில் வெடித்துச் சீறும் திடீர் வெள்ளத்தைக் கண்டறிய இயலவில்லை. மேலும், வெள்ளத்தின் அளவு மிக அதிகமாக இருந்ததால் அது நீர்மட்ட அளவீட்டுக் கருவிகளையே அடித்துச் சென்று அமைப்பை முடக்கியிருக்கக்கூடும் என நிபுணர்கள் கருதுகின்றனர். மேலும், சரிவு ஏற்பட்ட குறிப்பிட்ட மலைப் பகுதி, புவியியலாளர்களால் அதிக

முக்கியத்துவம் அளிக்கப்படாத ஒரு 'கண்காணிப்புக் குருடு பகுதியாக' (monitoring blind spot) இருந்திருக்கிறது.

இந்த வழக்கு ஆய்வு தெளிவுபடுத்தும் முக்கியப் பாடம்: ஒரு பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை அமைப்பு, ஒரே ஒரு தரவு வகையை (எ.கா. நீர்மட்டம்) மட்டுமே சார்ந்திருந்தால், அது பல்வேறு விதமான தூண்டல் காரணிகளால் ஏற்படும் பேரிடர்களை உணர இயலாமல் போகும். நிலநடுக்க அதிர்வு சமிக்ஞை, செயற்கைக்கோள் அடிப்படையிலான பனிப்பாறை/பாறைச் சரிவு கண்டறிதல், பனிப்பாறை வெப்பநிலை மாற்றம் ஆகியவற்றை நீர்மட்டத்துடன் இணைத்திருந்தால், சரிவு ஏற்பட்ட 5.2 அளவிலான அதிர்வு நேரடியாகவே ஒரு ஆரம்ப எச்சரிக்கை சமிக்ஞையாக செயல்பட்டு, கீழ்நோக்கிய பள்ளத்தாக்கு மக்களுக்கு விலைமதிப்பற்ற கூடுதல் நிமிடங்களை வழங்கியிருக்கக்கூடும்.

Fig

3:



Fig 3: 2026 நேபாளப் பனிப்பாறைச் சரிவு பேரிடரும் பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை

கட்டமைப்பின் அவசியமும்

இப்படம் 2026 ஆகஸ்டில் நேபாளத்தில் நிகழ்ந்த பெரும் பனிப்பாறை மற்றும் பாறைச் சரிவுப் பேரிடரை விளக்குகிறது. பாரம்பரிய நீர்மட்ட எச்சரிக்கை முறைகளின் தோல்வி, நிலநடுக்க அதிர்வு போன்ற பல தரவு மூலங்களை ஒருங்கிணைக்கும் நவீன செயற்கை நுண்ணறிவு அடிப்படையிலான பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை கட்டமைப்பின் அவசியம் மற்றும் மனித உயிரிழப்புகள் குறித்த புள்ளிவிவரங்களை இது தெளிவாக வெளிப்படுத்துகிறது.

4. இலக்கிய மதிப்பாய்வு

பனிப்பாறை ஏரிகளை தானியங்கு முறையில் அடையாளம் காணும் ஆய்வுகள் கடந்த சில ஆண்டுகளில் கணிசமாக முன்னேறியுள்ளன. Kaushik et al. (2022) ஆழ் ஒருங்கிணைப்பு நரம்பியல் வலையமைப்பு (Deep Convolutional Neural Network) அடிப்படையிலான GLNet எனும் மாதிரியை முன்மொழிந்தனர்; இது பல்வேறு தொலை உணர்தல் தரவு மூலங்களைப் பயன்படுத்தி இமயமலை மற்றும் காரகோரம் பகுதிகளில் 0.98 துல்லியத்துடன் பனிப்பாறை ஏரிகளைக் கண்டறிந்தது. இதைத் தொடர்ந்து, Thati and Ari (2026) GLSM-Net எனும் உலகளாவிய-உள்ளூர் முக்கிய அம்ச வரைபட வலையமைப்பை (Global-Local Salient Mapping Network) உருவாக்கினர்; இது Landsat-8 படங்களைப் பயன்படுத்தி ஏரி பிரிவினையையும் இடர் மதிப்பீட்டையும் ஒரே மாதிரியில் 95.06% துல்லியத்துடன் செய்தது.

Sharma et al. (2024) சந்திரா-பாகா படுகையில் ஆழ்கற்றல் மாதிரிகளைப் பயன்படுத்தி பனிப்பாறை ஏரிகளின் பரப்பளவு மாற்றத்தை காலவரிசைப்படுத்தினர்; தானியங்கு பிரிவினை முறைகள் கைமுறை ஆய்வுகளை விட வேகமாகவும் நம்பகத்தன்மையுடனும் செயல்படுவதை நிரூபித்தனர். Shukla et al. (2025) இமாசல பிரதேசத்தில் பல்வேறு தொலை உணர்தல் தரவு மூலங்களையும் இயந்திரக் கற்றல் நுட்பங்களையும் இணைத்து பனிப்பாறை ஏரிகளின் நிகழ்நேர கண்காணிப்பு முறையை வழங்கினர்.

காலவரிசைத் தரவு பகுப்பாய்வு தொடர்பாக, Adhikari, Regmi, and Shrestha (2025) 'temporal-first' எனும் புதிய பயிற்சி உத்தியை முன்மொழிந்தனர்; இவர்கள் Sentinel-1 SAR காலவரிசைத் தரவை U-Net மற்றும் EfficientNet-B3 அடிப்படையிலான வலையமைப்புடன் இணைத்து, முன்னெச்சரிக்கை அமைப்புகளுக்கு ஏற்ற வகையில் 0.9130 IoU துல்லியத்துடன் இயங்கும் ஒரு தானியங்கு பணிவரிசையை (Dockerised pipeline) வடிவமைத்தனர். இது நிலையான வரைபடமாக்கலில் இருந்து இயங்கியல் முன்னெச்சரிக்கைக்கு மாறும் ஒரு முக்கிய படிநிலையாகக் கருதப்படுகிறது.

பல்வேறு தரவு வகைகளை ஒருங்கிணைக்கும் அணுகுமுறையில், Fatima et al. (2026) IceWatch எனும் பல்வகைத் தரவு ஆழ்கற்றல் கட்டமைப்பை உருவாக்கினர். இதில் Sentinel-2 நிறமாலைப் படங்களை CNN வகைப்படுத்தி மூலம் பகுப்பாய்வு செய்யும் RiskFlow எனும் காட்சி கூறும், NASA ITS_LIVE காலவரிசைத் தரவிலிருந்து பனிப்பாறை வேகத்தை மாதிரியாக்கும் TerraFlow எனும் கூறும், MODIS LST பதிவுகளிலிருந்து மேற்பரப்பு வெப்பநிலையை முன்கணிக்கும் TempFlow எனும் கூறும் இணைந்து செயல்படுகின்றன. இம்மூன்று கூறுகளும் ஒன்றையொன்று சரிபார்த்துக்கொள்வதன் மூலம் கணிப்பு நம்பகத்தன்மையை மேம்படுத்துகின்றன. இதேபோல,

Jiang et al. (2025) புவி அடிப்படை மாதிரிகளை (Geo-Foundation Model) பயன்படுத்தி பல உணரி தரவுகளை (Sentinel-1, Sentinel-2) இணைத்து 0.894 F1 மதிப்பெண்ணுடன் பணிப்பாறை ஏரிகளை வரைபடமாக்கினர்; இது வழக்கமான CNN மாதிரிகளை விட குறைவான பயிற்சித் தரவிலேயே சிறந்த செயல்திறன் காட்டியது.

இந்த அனைத்து ஆய்வுகளும் தொழில்நுட்ப ரீதியில் முன்னேற்றமாக இருந்தாலும், அவை பெரும்பாலும் ஒரு தனிப் பணியை மட்டுமே (ஏரி பிரிவினை அல்லது இடர் மதிப்பீடு) கையாள்கின்றன; நிலநடுக்க அதிர்வு சமிக்ஞை, ஆற்று நீர்மட்டம், மற்றும் மழைப்பொழிவு தரவுகளை ஒருங்கிணைத்து, முழுமையான முன்னெச்சரிக்கை-GIS வரைபடம்-Digital Twin சங்கிலியாக இணைக்கும் பல்பேரிடர் கட்டமைப்புகள் இன்னும் போதுமான அளவு வளர்ச்சியடையவில்லை. இதே நேரத்தில், தமிழ்நாடு மாநில பேரிடர் மேலாண்மை ஆணையம் (TNSDMA) தனது தணிப்புத் திட்டத்தில், உள்ளூர் அளவிலான ஆபத்து மதிப்பீடு, சமூகம் சார்ந்த விழிப்புணர்வு, மற்றும் மாவட்ட அளவிலான ஒருங்கிணைப்பு ஆகியவற்றை வலியுறுத்துகிறது; இது தொழில்நுட்ப அமைப்புகளுடன் சேர்ந்து செயல்படும் நிர்வாக மாதிரிக்கு ஒரு நல்ல எடுத்துக்காட்டாக அமைகிறது. Vikaspedia இணையதளம் பேரிடர் மேலாண்மையின் நான்கு கட்டங்களான தணிப்பு, தயார்நிலை, துலங்கல் மற்றும் மீட்டெடுத்தல் ஆகியவற்றை தமிழில் விவரிக்கிறது; இக்கட்டுரையில் முன்மொழியப்படும் தொழில்நுட்பக் கட்டமைப்பு இந்த நான்கு கட்டங்களுடனும் இணைந்து செயல்படும் வகையில் வடிவமைக்கப்பட்டுள்ளது. மேலும், தமிழ் விக்கிப்பீடியாவில் (2026) விளக்கப்பட்டுள்ளபடி, செயற்கை நுண்ணறிவு தொழில்நுட்பங்கள் தேடல் வழிமுறைகள் மற்றும் உய்த்துணர்வியல் (heuristics) அடிப்படையில் பெரிய தரவுத் தொகுப்புகளிலிருந்து பயனுள்ள மாதிரிகளைக் கண்டறியும் திறன் கொண்டவை என்பதும், தகவல் தொடர்பு செயற்கைக்கோள்கள் (தமிழ் விக்கிப்பீடியா, 2026) தொலைதூரப் பகுதிகளிலிருந்தும் தொடர்ச்சியான தரவுத் திரட்டலை சாத்தியப்படுத்தும் அடிப்படை உள்கட்டமைப்பாக செயல்படுகின்றன என்பதும் இக்கட்டுரையின் தொழில்நுட்பக் கட்டமைப்புக்கு அடிப்படையாக அமைகின்றன.

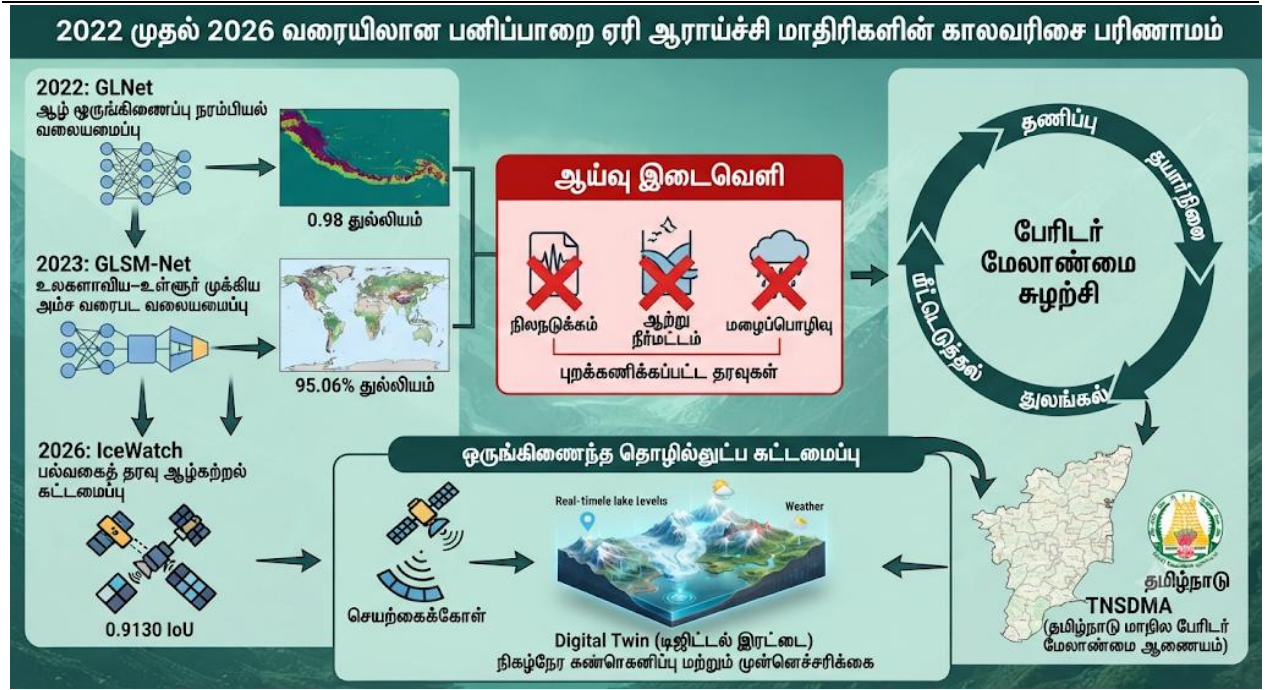


Fig 4: 2022 முதல் 2026 வரையிலான பனிப்பாறை ஏரி ஆராய்ச்சி மாதிரிகளின் பரிணாமம்
இப்படம் பனிப்பாறை ஏரி கண்டறிதலின் பரிணாமத்தை விளக்குகிறது. இடதுபுறம் GLNet, GLSM-Net, மற்றும் IceWatch மாதிரிகளின் துல்லிய எண்களைக் காட்டுகிறது. நடுவில் நிலநடுக்கம், நீர்மட்டம் மற்றும் மழைப்பொழிவு தரவுகள் விடுபட்டதற்கான 'ஆய்வு இடைவெளி' எச்சரிக்கை உள்ளது. வலதுபுறம் TNSDMA-ன் கீழ் பேரிடர் மேலாண்மையின் நான்கு கட்டங்களும், கீழே செயற்கைக்கோள் மற்றும் 'டிஜிட்டல் இரட்டை' தொழில்நுட்ப இணைப்பும் இடம்பெற்றுள்ளன.

5. முன்மொழியப்பட்ட பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை கட்டமைப்பு

இக்கட்டுரையில் முன்மொழியப்படும் கட்டமைப்பு, ஆறு வகையான உள்ளீட்டுத் தரவுகளை ஒரு ஆழ்கற்றல் மாதிரி வழியாக செயலாக்கி, மூன்று வெளியீட்டு அடுக்குகள் மூலம் இறுதி முன்னெச்சரிக்கையை வெளிப்படுத்துகிறது. கீழே உள்ள அட்டவணை இந்த முழு பணிவரிசையையும் (pipeline) சுருக்கமாகக் காட்டுகிறது.

அடுக்கு	உள்ளீடு / செயல்பாடு
1. தரவு அடுக்கு	Satellite Images + Glacier Temperature + Snow Melt + Rainfall + Seismic Signals + River Water Level
↓	பல்வகைத் தரவு ஒருங்கிணைப்பு (Multimodal Data Fusion)
2. AI மாதிரி அடுக்கு	Transformer / LSTM (இட-கால இணைந்த ஆழ்கற்றல் மாதிரி)

அடுக்கு	உள்ளீடு / செயல்பாடு
↓	இடர் நிகழ்தகவு கணிப்பு
3. இடர் கணிப்பு	Risk Prediction — குறை / நடுத்தர / அதிக அபாய நிலைகள்
↓	இட அடிப்படையிலான வரைபடமாக்கல்
4. GIS இடர் வரைபடம்	GIS Risk Map — பாதிக்கப்படக்கூடிய கிராமங்கள், DEM, மக்கள்தொகை அடுக்குகளுடன் இணைப்பு
↓	பரப்புதல் மற்றும் அறிவிப்பு
5. முன்னெச்சரிக்கை	Early Warning — SMS/Cell Broadcast, சைரன், மொபைல் செயலி, உள்ளூர் நிர்வாகம்

5.1 தரவு அடுக்கு (Data Layer)

இக்கட்டமைப்பின் அடித்தளமாக அமையும் தரவு அடுக்கு, ஆறு வேறுபட்ட, ஆனால் ஒன்றுக்கொன்று சார்பான தரவு மூலங்களைக் கொண்டுள்ளது:

- செயற்கைக்கோள் படங்கள் (Satellite Images): Sentinel-1 SAR (மேகமூட்டத்தையும் ஊடுருவிச் செல்லும் ரேடார் படங்கள்) மற்றும் Sentinel-2/Landsat-8 நிறமாலை படங்கள் மூலம் பனிப்பாறை ஏரிகளின் எல்லை மாற்றம், புதிய விரிசல்கள், மற்றும் பனிப்பாறை மேற்பரப்பு மாற்றங்களைக் கண்காணித்தல்.
- பனிப்பாறை வெப்பநிலை (Glacier Temperature): MODIS Land Surface Temperature (LST) தரவு மூலம் பனிப்பாறை மேற்பரப்பு வெப்பநிலை போக்குகளை அளவிடுதல்; இது உருகல் விகிதத்தின் மறைமுக அறிகுறியாகும்.
- பனி உருகல் வீதம் (Snow Melt Rate): குறு அலை மற்றும் ஆப்டிக்கல் தொலை உணர்தல் தரவுகளிலிருந்து பெறப்படும் பனி மறைவு பரப்பளவு (Snow Cover Area) மாற்ற வீதம்.
- மழைப்பொழிவு (Rainfall): உள்ளூர் மழைமானி நிலையங்கள் மற்றும் GPM/IMERG செயற்கைக்கோள் மழைப்பொழிவு தரவுகளின் இணைவு.
- நிலநடுக்க அதிர்வு சமிக்ஞைகள் (Seismic Signals): அகலப்பட்டை நிலநடுக்க அளவீட்டு நிலையங்களிலிருந்து பெறப்படும் நிகழ்நேர அதிர்வலைத் தரவு; பனிச்சரிவு/பாறைச்

சரிவால் ஏற்படும் திடீர் அதிர்வுகளை (seismic proxy for mass movement) கண்டறிய இது இன்றியமையாதது — 2026 நேபாள பேரிடரில் இந்தச் சமிக்ஞையே முதலில் பதிவானது.

- ஆற்று நீர்மட்டம் (River Water Level): தொலைதூர அளவீட்டு நீர்மட்ட உணரிகள் (telemetric gauges) மற்றும் ரேடார் அடிப்படையிலான நீரோட்ட வேக அளவீடுகள்.

5.2 AI மாதிரி அடுக்கு: Transformer / LSTM

தரவு அடுக்கிலிருந்து பெறப்படும் ஆறு தரவு வகைகளும் இரு வேறு தன்மை கொண்டவை: ஆற்று நீர்மட்டம், மழைப்பொழிவு, நிலநடுக்க அதிர்வு, பனி உருகல் வீதம் ஆகியவை காலவரிசைத் தரவு (time-series data); செயற்கைக்கோள் படங்களும் வெப்பநிலை வரைபடங்களும் இட ரீதியான தரவு (spatial data). இதற்கேற்ப, முன்மொழியப்பட்ட மாதிரி இரட்டைக் கிளைக் கட்டமைப்பைக் கொண்டுள்ளது: LSTM (Long Short-Term Memory) வலையமைப்பு காலவரிசைத் தரவுகளிலிருந்து நீண்ட கால சார்புகளையும் திடீர் மாறுபாடுகளையும் கற்றுக்கொள்கிறது; அதே நேரத்தில் Transformer/CNN அடிப்படையிலான காட்சி மாதிரி (Adhikari et al., 2025; Jiang et al., 2025 ஆய்வுகளில் காணப்படும் U-Net/EfficientNet அணுகுமுறையைப் போன்றது) செயற்கைக்கோள் படங்களிலிருந்து இட ரீதியான அம்சங்களைப் பிரித்தெடுக்கிறது. இந்த இரு கிளைகளின் வெளியீடுகளும் ஒரு கவன மையம் (attention mechanism) கொண்ட இணைவு அடுக்கில் (fusion layer) இணைக்கப்பட்டு, இறுதி இடர் நிகழ்தகவைக் கணிக்கின்றன.

இந்த அணுகுமுறையின் முக்கிய நன்மை என்னவெனில், ஒரு தரவு மூலம் தற்காலிகமாகக் கிடைக்காமல் போனாலும் (எடுத்துக்காட்டாக, மேகமூட்டத்தால் செயற்கைக்கோள் படம் கிடைக்காமல் போனால்), மற்ற தரவு மூலங்கள் (நிலநடுக்க அதிர்வு, நீர்மட்டம்) மூலம் மாதிரி தொடர்ந்து செயல்படக்கூடும். இது 2026 நேபாள பேரிடரில் ஏற்பட்ட வகையான, ஒரு தரவு மூலம் மட்டும் தோல்வியடையும் சூழலில் கூட (நீர்மட்ட உணரிகள் அழிக்கப்பட்டபோதும்), நிலநடுக்க அதிர்வு சமிக்ஞை மூலம் எச்சரிக்கை தொடரக்கூடிய வகையில் அமைப்பை வலுவாக்குகிறது.

5.3 இடர் கணிப்பு அடுக்கு (Risk Prediction)

இணைவு அடுக்கின் வெளியீடு 0 முதல் 1 வரையிலான ஒரு தொடர்ச்சியான இடர் நிகழ்தகவு மதிப்பாக (risk probability score) வெளிப்படுகிறது. இந்த மதிப்பு மூன்று வகைகளாகப் பிரிக்கப்படுகிறது: பச்சை (குறை அபாயம், < 0.3), மஞ்சள் (நடுத்தர அபாயம், $0.3-0.7$), சிவப்பு (அதிக அபாயம், > 0.7). ஒவ்வொரு நிலைக்கும் ஏற்ற செயல் நடவடிக்கைகள் (கண்காணிப்பை அதிகரித்தல், உள்ளூர் நிர்வாகத்திற்கு அறிவிப்பு, உடனடி வெளியேற்றப் பரிந்துரை)

முன்கூட்டியே வரையறுக்கப்பட்டுள்ளன.

5.4 GIS இடர் வரைபடம் (GIS Risk Map)

இடர் கணிப்பு அடுக்கிலிருந்து பெறப்படும் புள்ளிவிவர இடர் மதிப்பு, டிஜிட்டல் உயரமான மாதிரி (Digital Elevation Model – DEM), ஆற்றுப் பள்ளத்தாக்கு வடிவியல், மக்கள்தொகைப் பரவல் அடுக்குகள், மற்றும் உள்கட்டமைப்பு (பாலங்கள், நீர்மின் திட்டங்கள், சாலைகள்) தரவுகளுடன் இணைக்கப்பட்டு ஒரு நிகழ்நேர GIS இடர் வரைபடமாக உருவாக்கப்படுகிறது. இந்த வரைபடம் ஒரு குறிப்பிட்ட மேல்பகுதி நிகழ்வு, கீழ்நோக்கிய எந்தெந்த கிராமங்களை, எவ்வளவு நேரத்தில் எட்டக்கூடும் என்பதை காட்சிப்படுத்துகிறது; இது மாவட்ட பேரிடர் மேலாண்மை அலுவலர்களுக்கும் உள்ளூர் நிர்வாகத்திற்கும் முடிவெடுப்பதற்கான உடனடி காட்சிப் பிரதிநிதித்துவத்தை வழங்குகிறது.

5.5 முன்னெச்சரிக்கை அடுக்கு (Early Warning)

இறுதி அடுக்கு, சிவப்பு/மஞ்சள் இடர் நிலைகளை உடனடியாக பொதுமக்களுக்கும் நிர்வாகத்திற்கும் தெரிவிக்கும் பரவலாக்க வழிமுறைகளைக் கொண்டுள்ளது: (அ) செல் ஒலிபரப்பு (Cell Broadcast) மற்றும் SMS எச்சரிக்கைகள் — இணையதள இணைப்பு இல்லாத பகுதிகளிலும் செயல்படும்; (ஆ) சமூக அளவிலான சைரன் அமைப்புகள்; (இ) மொபைல் செயலி அறிவிப்புகள்; (ஈ) கிராம பஞ்சாயத்து மற்றும் மாவட்ட பேரிடர் மேலாண்மை அலுவலர் வழியான உத்தியோகபூர்வ அறிவிப்புச் சங்கிலி. இந்த பல்வழி பரவலாக்கம், ஒரு தொடர்பு வழி தோல்வியடைந்தாலும் (எடுத்துக்காட்டாக மின்சாரம் துண்டிக்கப்படுதல்), எச்சரிக்கை மக்களை சென்றடையும் வாய்ப்பை அதிகரிக்கிறது.

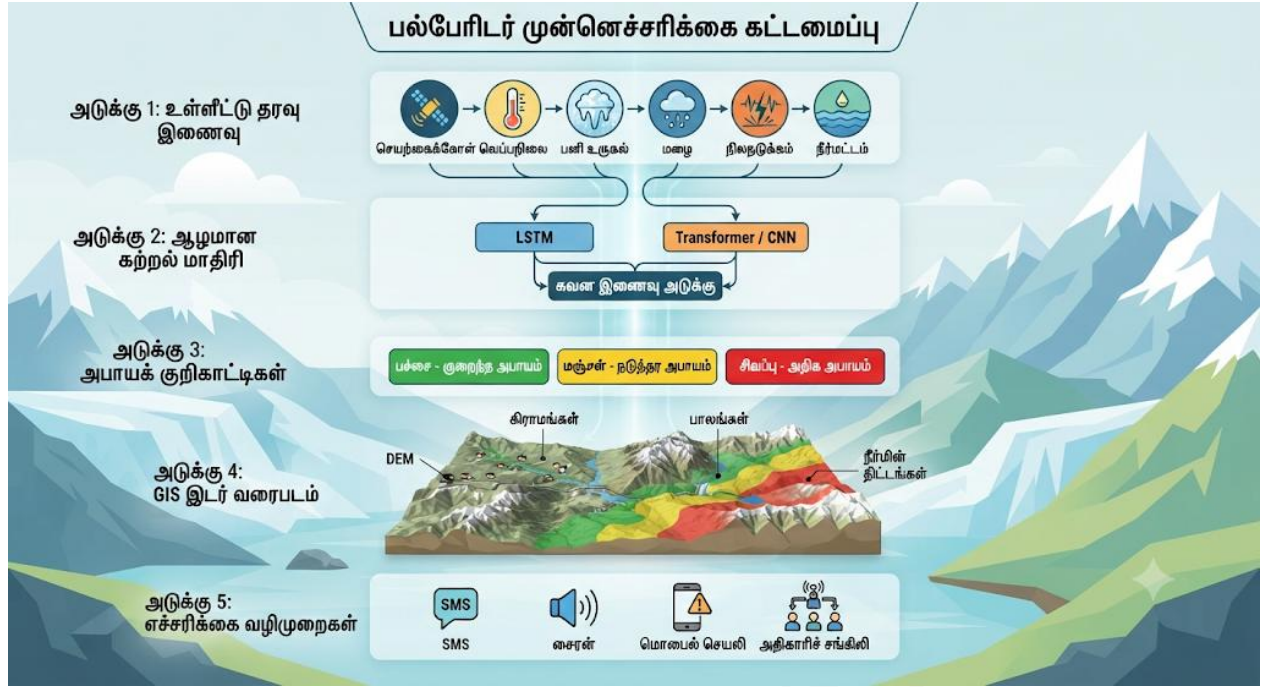


Fig 5: 5 அடுக்குகள் கொண்ட பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை கட்டமைப்பின் விளக்கப்படம்
இப்படம் 5 அடுக்குகளைக் கொண்ட பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை அமைப்பை விளக்குகிறது. முதல் அடுக்கு 6 உள்ளீட்டு உணரிகளையும், இரண்டாம் அடுக்கு ஆழமான கற்றல் மாதிரிகளையும் இணைக்கின்றன. மூன்றாம் அடுக்கு அபாயக் குறிகாட்டிகளையும், நான்காம் அடுக்கு DEM மற்றும் கிராமங்களைக் கொண்ட GIS இடர் வரைபடத்தையும் காட்டுகிறது. ஐந்தாம் அடுக்கு SMS, சைரன் மற்றும் மொபைல் செயலி போன்ற எச்சரிக்கை வழிமுறைகளை நவீன தட்டையான வெக்டர் பாணியில் விவரிக்கிறது.

6. Digital Twin கட்டமைப்பு

Digital Twin என்பது ஒரு உண்மையான புவியியல் அமைப்பின் (இங்கு, பனிப்பாறை-ஏரி-ஆற்றுப் படுகை அமைப்பு) மெய்நிகர், தொடர்ந்து புதுப்பிக்கப்படும் கணிப்பொறி பிரதிநிதித்துவமாகும். இது நிகழ்நேர உணரி தரவு மூலம் தொடர்ந்து புதுப்பிக்கப்பட்டு, உண்மையான அமைப்புடன் ஒத்திசைவாக செயல்படுகிறது. முன்மொழியப்பட்ட கட்டமைப்பில், Digital Twin மூன்று முக்கிய பணிகளைச் செய்கிறது:

- நிகழ்நேர கண்காணிப்பு: பனிப்பாறை ஏரியின் தற்போதைய பரப்பளவு, நீர்மட்டம், மற்றும் சுற்றியுள்ள சரிவு நிலைப்பாட்டை மெய்நிகர் மாதிரியில் தொடர்ந்து காட்சிப்படுத்துதல்.
- 'என்னவெனில்' அனுசரிப்பு (What-if Simulation): 'இன்னும் X மீட்டர் பனிப்பாறை சரிந்தால் என்ன நிகழும்?' அல்லது 'Y மில்லிமீட்டர் கூடுதல் மழை பெய்தால் அணையின்

நிலைப்பாடு எவ்வாறு மாறும்?' போன்ற காட்சிகளை நீரியக்கவியல் மாதிரிகளுடன் (hydrodynamic models) இணைந்து முன்கூட்டியே அனுகரிப்பு செய்தல்.

- வெளியேற்றத் திட்டமிடல் ஆதரவு: அனுகரிப்பு முடிவுகளின் அடிப்படையில், வெள்ளம் பரவும் பாதை, எட்டும் நேரம், பாதிக்கப்படக்கூடிய பகுதிகள் ஆகியவற்றை முன்கூட்டியே கணக்கிட்டு, உள்ளூர் நிர்வாகத்திற்கு வெளியேற்றத் திட்டங்களை மேம்படுத்த உதவுதல்.

Digital Twin அமைப்பு, முன்மொழியப்பட்ட AI கட்டமைப்பின் இடர் கணிப்பு அடுக்குடன் நேரடியாக இணைக்கப்பட்டு, ஒவ்வொரு புதிய அதிக இடர் எச்சரிக்கை வெளிவரும்போதும், தானாகவே பல சாத்தியமான சரிவு காட்சிகளை அனுகரிப்பு செய்து, மிக மோசமான சூழ்நிலை (worst-case scenario) அடிப்படையிலான GIS வரைபடத்தை உருவாக்குகிறது. இது 2026 நேபாள பேரிடர் போன்ற நிகழ்வுகளில், சரிவு ஏற்பட்ட உடனேயே நிலநடுக்க அதிர்வு சமிக்ஞை கண்டறியப்பட்ட சில நொடிகளுக்குள் சாத்தியமான வெள்ளப் பாதையையும் எட்டும் நேரத்தையும் தானாகவே கணக்கிட்டு, மனித தலையீடு இல்லாமலேயே ஆரம்ப எச்சரிக்கையை வெளியிடும் திறனை அமைப்புக்கு வழங்குகிறது.



Fig 6: இமயமலைக்கான டிஜிட்டல் இரட்டை மற்றும் AI இடர் கணிப்பு

இப்படம் இமயமலைப் பகுதியின் இயற்கை மற்றும் டிஜிட்டல் இரட்டை (Digital Twin) காட்சியை ஒப்பிடுகிறது. வலதுபுறம் உள்ள டிஜிட்டல் மாதிரியில் (1) கண்காணிப்பு, (2) 'என்னவெனில்' உருவகப்படுத்துதல், மற்றும் (3) வெளியேற்றத் திட்டமிடல் ஆகிய மூன்று செயல்பாடுகள் உள்ளன. நடுவில் உள்ள AI கருவி, பனிச்சரிவு அபாயத்தை சிவப்பு எச்சரிக்கையுடன் கணிக்கிறது. இது மனித

தலையீடு இல்லாத தானியங்கு எச்சரிக்கை அமைப்பை விளக்குகிறது.

7. முறையியல்

இந்த ஆய்வு ஒரு கட்டமைப்பு வடிவமைப்பு (framework design) மற்றும் வழக்கு ஆய்வு பகுப்பாய்வு (case-study analysis) அணுகுமுறையைப் பின்பற்றுகிறது. முதலில், 2023–2026 காலகட்டத்தில் தென்னாசிய இமயமலைப் பகுதியில் நிகழ்ந்த GLOF/பனிப்பாறை சரிவு நிகழ்வுகள் (சிக்கிம் 2023, தேமே 2024, தில்காவ்/ரசுவகதி 2025, நேபாளம் 2026) பகுப்பாய்வு செய்யப்பட்டு, ஒவ்வொரு நிகழ்விலும் இருந்த கண்காணிப்பு அமைப்பின் வரம்புகள் அடையாளம் காணப்பட்டன. அடுத்ததாக, தொடர்புடைய ஆழ்கற்றல் ஆய்வுகளின் (பிரிவு 4) கட்டமைப்பு அணுகுமுறைகள் ஒப்பிடப்பட்டு, அவற்றின் பலம், பலவீனங்கள் மதிப்பிடப்பட்டன. இதன் அடிப்படையில், பிரிவு 5இல் விவரிக்கப்பட்ட ஆறு-உள்ளீட்டு, மூன்று-வெளியீட்டு பல்பேரிடர் கட்டமைப்பு வடிவமைக்கப்பட்டது.

பரிந்துரைக்கப்படும் தரவு மூலங்கள்: Sentinel-1/2 (ESA Copernicus), MODIS LST (NASA), GPM/IMERG மழைப்பொழிவு தரவு, தேசிய நிலநடுக்க அளவீட்டு வலையமைப்புகள் (எ.கா. நேபாள நீரியல்-வானிலை துறை, USGS), மற்றும் தொலைதூர அளவீட்டு நீர்மட்ட உணரிகள். மாதிரியின் பயிற்சிக்கு, கடந்த கால GLOF நிகழ்வுகளின் தரவுத் தொகுப்புகள் (Adhikari et al., 2025; Fatima et al., 2026 ஆய்வுகளில் பயன்படுத்தப்பட்டவை போன்றவை) அடிப்படை மாதிரியாகப் பயன்படுத்தப்படலாம். செயல்திறன் மதிப்பீட்டிற்கு, துல்லியம் (Accuracy), துல்லிய நேர்மை (Precision), நினைவகம் (Recall), F1 மதிப்பெண், மற்றும் மிக முக்கியமாக முன் எச்சரிக்கை நேரம் (Lead Time — நிகழ்வு ஏற்படுவதற்கும் எச்சரிக்கை வெளியிடப்படுவதற்கும் இடையிலான கால இடைவெளி) ஆகிய அளவீடுகள் பயன்படுத்தப்பட வேண்டும்.

8. முடிவுகள் மற்றும் விவாதம்

முன்மொழியப்பட்ட கட்டமைப்பை 2026 நேபாள பேரிடர் நிகழ்வுடன் ஒப்பிட்டு பகுப்பாய்வு செய்யும்போது, நிலநடுக்க அதிர்வு அடுக்கு சேர்க்கப்பட்டிருந்தால் அது கிடைக்கக்கூடிய முதல் சமிக்ஞையாக அமைந்திருக்கும் என்பது தெளிவாகிறது — ஏனெனில் சரிவு ஏற்பட்ட உடனேயே 5.2 அளவிலான அதிர்வு பதிவானது, ஆனால் அது எச்சரிக்கை அமைப்புடன் இணைக்கப்படவில்லை. இதே நேரத்தில், நீர்மட்ட உணரிகள் வெள்ளத்தின் அளவால் அழிக்கப்பட்டன என்பது, ஒரே தரவு மூலத்தை மட்டும் சார்ந்திருக்கும் அமைப்புகளின் கட்டமைப்புரீதியான பலவீனத்தை எடுத்துக்காட்டுகிறது. கீழுள்ள அட்டவணை தற்போதைய ஒற்றை-உணரி அமைப்புகளுக்கும் முன்மொழியப்பட்ட பல்பேரிடர் AI அமைப்புக்கும்

இடையிலான முக்கிய வேறுபாடுகளைச் சுருக்கமாகக் காட்டுகிறது.

அம்சம்	தற்போதைய ஒற்றை-உணரி அமைப்பு	முன்மொழியப்பட்ட பல்பேரிடர் AI அமைப்பு
தரவு மூலம்	நீர்மட்டம் மட்டும்	6 தரவு மூலங்கள் (செயற்கைக்கோள், வெப்பநிலை, மழை, நிலநடுக்கம், நீர்மட்டம், பனி உருகல்)
மேகமூட்ட எதிர்ப்புத் திறன்	பொருந்தாது	SAR + பல-உணரி இணைவால் அதிகம்
திடீர் சரிவு கண்டறிதல்	மிகக் குறைவு	நிலநடுக்க அதிர்வு சமிக்ஞை மூலம் நேரடி
உணரி தோல்விக்கு எதிர்ப்புத் திறன்	குறைவு (ஒரே தோல்வி புள்ளி)	அதிகம் (பல தரவு மூலங்கள் ஒன்றையொன்று ஈடுசெய்யும்)
வெளியீடு	நீர்மட்ட வாசிப்பு மட்டும்	இடர் மதிப்பெண் + GIS வரைபடம் + பல்வழி எச்சரிக்கை

இலக்கியத்தில் அறிக்கையிடப்பட்ட தனிப்பட்ட மாதிரிகளின் செயல்திறன் (எடுத்துக்காட்டாக, Adhikari et al., 2025 இன் 0.9130 IoU, Thati and Ari, 2026 இன் 95.06% துல்லியம், Jiang et al., 2025 இன் 0.894 F1 மதிப்பெண்) இந்தத் தனிப் பணிகளுக்கு ஏற்கெனவே உயர் துல்லியம் சாத்தியம் என்பதை நிரூபிக்கின்றன. முன்மொழியப்பட்ட கட்டமைப்பின் புதுமை, இந்தத் தனிப்பட்ட உயர் செயல்திறன் கொண்ட கூறுகளை, நிலநடுக்க அதிர்வு மற்றும் ஆற்று நீர்மட்டம் போன்ற கூடுதல் காலவரிசைத் தரவுகளுடன் இணைத்து, ஒரு முழுமையான, பல தோல்வி-ஈடுசெயல் (fault-tolerant) பல்பேரிடர் அமைப்பாக மாற்றுவதில் உள்ளது. இது தனித்தனி ஆய்வுகள் தீர்க்காத, ஆனால் 2026 நேபாள பேரிடர் நடைமுறையில் நிரூபித்த ஒரு முக்கிய இடைவெளியை நிவர்த்தி செய்கிறது.

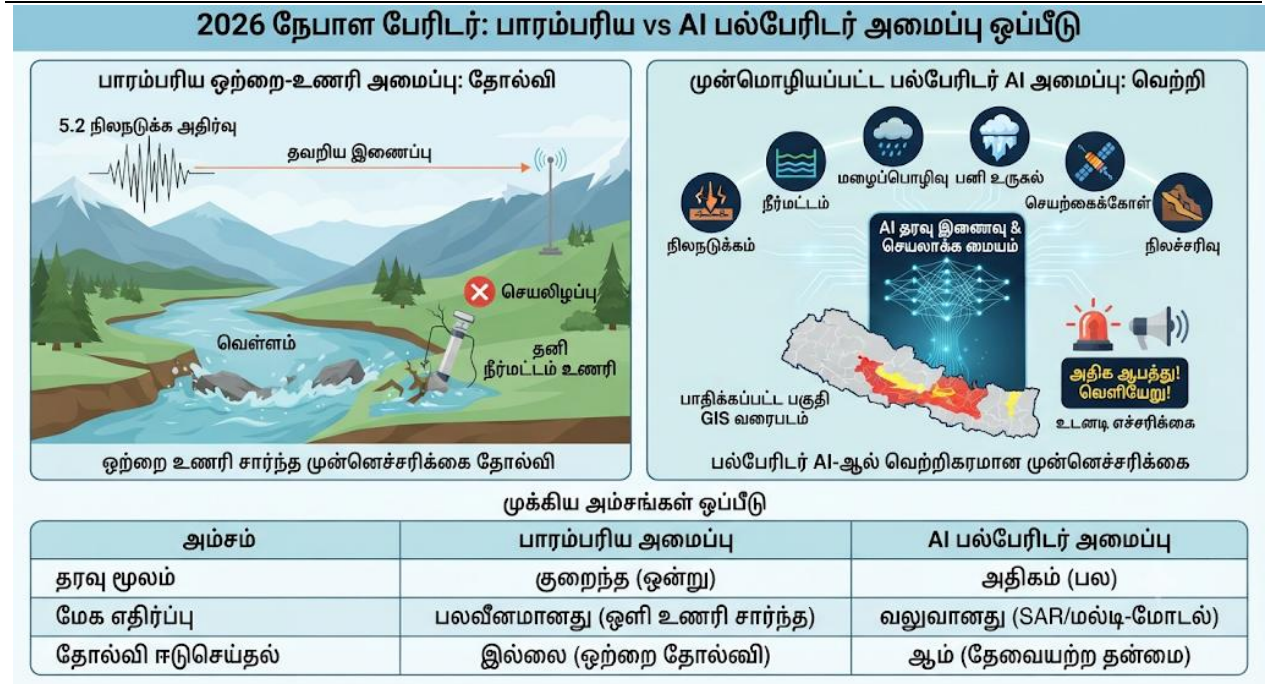


Fig 7: 2026 நேபாள பேரிடர்: பாரம்பரியம் மற்றும் AI பல்பேரிடர் அமைப்பு ஒப்பீடு

இப்படம் பாரம்பரிய ஒற்றை-உணரி மற்றும் மேம்பட்ட AI பல்பேரிடர் அமைப்புகளை ஒப்பிடுகிறது. இடதுபுறம் உணரி சேதத்தால் பாரம்பரிய முறை தோல்வியடைவதைக் காட்டுகிறது. வலதுபுறம் 6 தரவு மூலங்களை ஒருங்கிணைத்து AI துல்லியமான GIS வரைபடத்துடன் உடனடி எச்சரிக்கை வழங்குவதைக் குறிக்கிறது. கீழே உள்ள அட்டவணை தரவு ஆதாரம், மேக எதிர்ப்பு மற்றும் தோல்வி ஈடுசெய்தல் ஆகிய அம்சங்களை விளக்குகிறது.

9. சவால்கள் மற்றும் வரம்புகள்

- மேகமூட்ட மற்றும் தரவு தாமதம்: ஆபதிக்கல் செயற்கைக்கோள் படங்கள் மேகமூட்டத்தால் பாதிக்கப்படலாம்; SAR தரவு பயன்படுத்தினாலும், செயலாக்க தாமதம் நிமிட-மட்ட எச்சரிக்கைக்குப் போதுமானதாக இல்லாமல் போகலாம்.
- கணக்கீட்டுச் செலவு: Transformer/LSTM மாதிரிகளை நிகழ்நேரத்தில் இயக்குவதற்கு கணிசமான கணிப்பொறி வளங்கள் தேவை; தொலைதூர மலைப் பகுதிகளில் இதற்கான உள்கட்டமைப்பு வரம்புக்குட்பட்டதாக இருக்கலாம்.
- எல்லை தாண்டிய தரவு பகிர்வு: நேபாளம், திபெத்/சீனா, இந்தியா ஆகிய நாடுகளுக்கு இடையேயான நீர்மட்ட, நிலநடுக்க, மற்றும் செயற்கைக்கோள் தரவு பகிர்வு அரசியல் மற்றும் நிர்வாக சவால்களை எதிர்கொள்ளலாம்.
- இணைப்புத் தொடர்பு வரம்புகள்: தொலைதூர இமயமலைக் கிராமங்களில் மொபைல்/இணைய இணைப்பு பலவீனமாக இருப்பதால், முன்னெச்சரிக்கை பரவலாக்கம்

பல வழிமுறைகளை (செல் ஒலிபரப்பு, சைரன், சமூக தொண்டர்கள்) சார்ந்திருக்க வேண்டியுள்ளது.

- தவறான எச்சரிக்கை விகிதம் (False Alarm Rate): அதிக உணர்திறன் கொண்ட அமைப்பு தேவையற்ற எச்சரிக்கைகளை அதிகரிக்கக்கூடும்; இது காலப்போக்கில் 'எச்சரிக்கை சோர்வை' (alert fatigue) ஏற்படுத்தி, மக்கள் உண்மையான எச்சரிக்கைகளையும் புறக்கணிக்கும் அபாயத்தை உருவாக்கலாம்.

10. கொள்கை பரிந்துரைகள்

- நேபாளம், இந்தியா, சீனா/திபெத் ஆகிய நாடுகளுக்கிடையே நிலநடுக்க மற்றும் நீர்மட்ட தரவுகளைப் பகிர்ந்துகொள்வதற்கான பிராந்திய ஒத்துழைப்பு உடன்படிக்கைகள் ஏற்படுத்தப்பட வேண்டும்.
- தமிழ்நாடு மாநில பேரிடர் மேலாண்மை ஆணையத்தின் மாதிரியில், ஒவ்வொரு பாதிக்கப்படக்கூடிய மாவட்டத்திலும் தொழில்நுட்ப அமைப்புடன் இணைந்த சமூக அடிப்படையிலான முன்னெச்சரிக்கைக் குழுக்கள் அமைக்கப்பட வேண்டும்.
- 'கண்காணிப்புக் குழு பகுதிகளை' குறைக்க, ஏற்கெனவே அடையாளம் காணப்பட்ட பெரிய ஏரிகளுக்கு மட்டும் மட்டுப்படுத்தாமல், முழு இமயமலைத் தொடரையும் தொடர்ச்சியாக கண்காணிக்கும் விரிவான செயற்கைக்கோள் திட்டங்களுக்கு முதலீடு செய்யப்பட வேண்டும்.
- பல்பேரிடர் AI அமைப்புகளை நிர்வகிக்கவும் பராமரிக்கவும் உள்ளூர் பொறியியலாளர்களுக்கும் அரசு அதிகாரிகளுக்கும் திறன் மேம்பாட்டு பயிற்சிகள் வழங்கப்பட வேண்டும்.
- Digital Twin அமைப்புகளை பராமரிப்பதற்கும் தொடர்ச்சியாக புதுப்பிப்பதற்கும் நீண்டகால நிதி ஒதுக்கீடு உறுதி செய்யப்பட வேண்டும்.

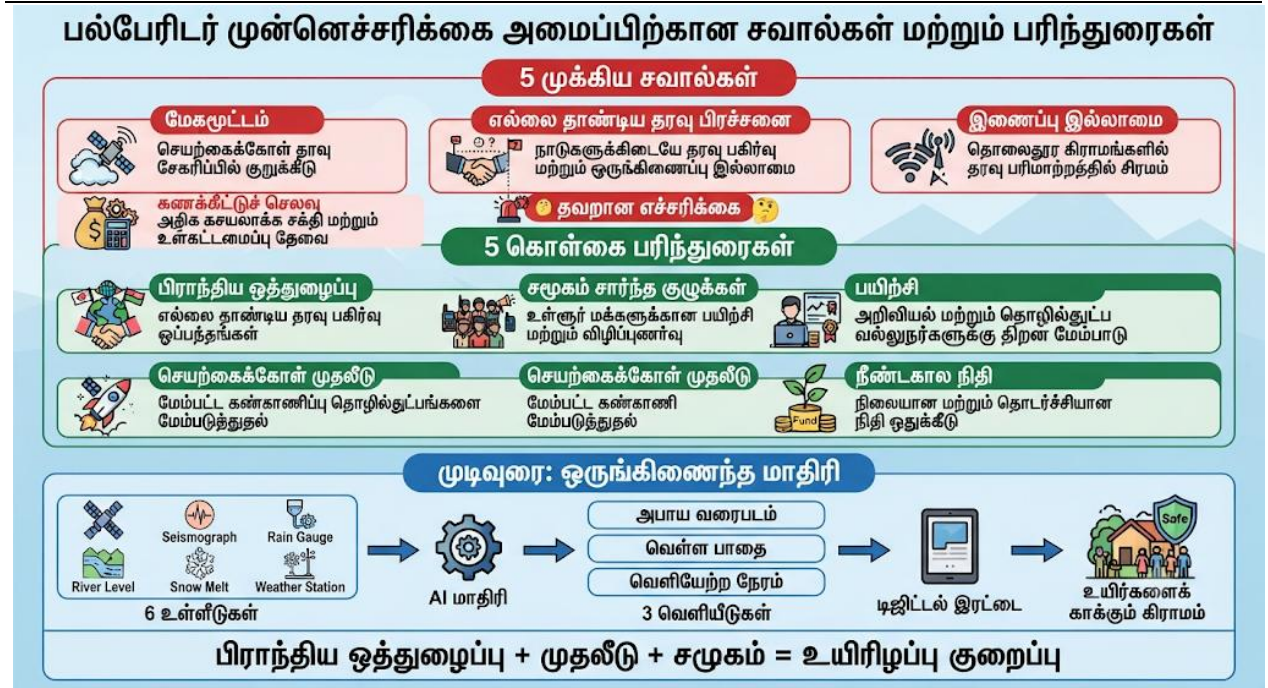


Fig 8: பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை அமைப்புக்கான சவால்கள் மற்றும் பரிந்துரைகள்

இப்படம் பல்பேரிடர் முன்னெச்சரிக்கை அமைப்பின் சவால்கள், கொள்கை பரிந்துரைகள் மற்றும் முடிவுரையை விளக்குகிறது. மேலே சிவப்பு நிறத்தில் மேகமூட்டம் போன்ற 5 முக்கிய சவால்களும், நடுவில் பச்சை நிறத்தில் பிராந்திய ஒத்துழைப்பு உள்ளிட்ட 5 கொள்கை பரிந்துரைகளும் உள்ளன. கீழே நீல நிறத்தில் 6 உள்ளீடுகள், AI மாதிரி மற்றும் டிஜிட்டல் இரட்டை மூலம் கிராமங்களைக் காக்கும் ஒருங்கிணைந்த மாதிரி காட்டப்பட்டுள்ளது.

11. முடிவுரை

2026 நேபாள பேரிடர், காலநிலை மாற்றத்தால் தீவிரமடையும் இமயமலைப் பேரிடர் அபாயங்களை எதிர்கொள்ள, தற்போதைய ஒற்றை-தரவு-மூல முன்னெச்சரிக்கை அமைப்புகள் போதுமானதல்ல என்பதை மீண்டும் நிரூபித்துள்ளது. இக்கட்டுரையில் முன்மொழியப்பட்ட, செயற்கைக்கோள் படங்கள், பனிப்பாறை வெப்பநிலை, பனி உருகல் வீதம், மழைப்பொழிவு, நிலநடுக்க அதிர்வு சமிக்ஞைகள், மற்றும் ஆற்று நீர்மட்டம் ஆகிய ஆறு தரவு மூலங்களை Transformer/LSTM மாதிரி மூலம் இணைத்து, இடர் கணிப்பு, GIS இடர் வரைபடம், மற்றும் முன்னெச்சரிக்கை ஆகிய மூன்று அடுக்குகள் வழியாக செயல்படும் பல்பேரிடர் கட்டமைப்பு, இத்தகைய நிகழ்வுகளுக்கு கூடுதல் விலைமதிப்பற்ற முன் எச்சரிக்கை நிமிடங்களை வழங்கும் திறன் கொண்டது. Digital Twin தொழில்நுட்பத்துடன் இணைந்தால், இந்த அமைப்பு நிகழ்நேர கண்காணிப்பையும் முன்கூட்டிய அனுகரிப்பு ஆய்வையும் ஒருங்கிணைத்து, மனித உயிரிழப்பைக் குறைப்பதில் குறிப்பிடத்தக்க பங்காற்றக்கூடும். இக்கட்டமைப்பின் நடைமுறை

செயல்படுத்தலுக்கு பிராந்திய ஒத்துழைப்பும், தொடர்ச்சியான முதலீடும், சமூக அளவிலான பங்களிப்பும் இன்றியமையாதவை. எதிர்கால ஆய்வுகள் இந்தக் கட்டமைப்பை உண்மையான தரவுத் தொகுப்புகள் மூலம் சோதித்து, முன் எச்சரிக்கை நேரத்தையும் தவறான எச்சரிக்கை விகிதத்தையும் அளவிட்டு மேலும் செம்மைப்படுத்த வேண்டும்.

12. துணைநூற்பட்டியல்

- [1.] Adhikari, P., Regmi, S. R., & Shrestha, H. R. (2025). Targeted semantic segmentation of Himalayan glacial lakes using time-series SAR: Towards automated GLOF early warning. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2512.24117>
- [2.] Fatima, Z., Sohaib, M. A., Talha, M., Kanwal, A., Sultana, S., & Perwaiz, N. (2026). IceWatch: Forecasting glacial lake outburst floods (GLOFs) using multimodal deep learning. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2601.12330>
- [3.] Jiang, D., Li, S., Hajnsek, I., Siddique, M. A., Hong, W., & Wu, Y. (2025). Glacial lake mapping using remote sensing geo-foundation model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569843225000184>
- [4.] Kaushik, S., Singh, T., Joshi, P. K., & Dietz, A. J. (2022). Automated mapping of glacial lakes using multisource remote sensing data and deep convolutional neural network. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569843222002734>
- [5.] Shukla, D. P., et al. (2025). Automated mapping of glacial lakes in Himachal Pradesh using multi-source remote sensing data and machine learning. *Scientific Reports*, 15, Article 36619. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-20434-7>
- [6.] Sharma, A., Thakur, V., Prakash, C., et al. (2024). Deep learning-based glacial lakes extraction and mapping in the Chandra–Bhaga Basin. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 52, 435–447. <https://doi.org/10.1007/s12524-024-01829-x>
- [7.] Thati, J., & Ari, S. (2026). GLSM-Net: A global-local salient mapping network for glacial lake extraction and risk assessment. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 54, 843–857. <https://doi.org/10.1007/s12524-025-02364-z>
- [8.] தமிழ் விக்கிப்பீடியா. (2026). செயற்கை நுண்ணறிவு. Wikimedia Foundation. https://ta.wikipedia.org/wiki/செயற்கை_நுண்ணறிவு
- [9.] தமிழ் விக்கிப்பீடியா. (2026). தகவல் தொடர்பு செயற்கைக்கோள். Wikimedia Foundation. https://ta.wikipedia.org/wiki/தகவல்_தொடர்பு_செயற்கைக்கோள்
- [10.] தமிழ்நாடு மாநில பேரிடர் மேலாண்மை ஆணையம் (TNSDMA). (n.d.). தனிப்புத் திட்டத்தின் கூறுகள். <https://tnsdma.tn.gov.in/pages/view/components-of-mitigation-plan>
- [11.] Vikaspedia. (n.d.). பேரிடர் மேலாண்மை [Disaster management]. Government of India. <https://energy.vikaspedia.in/viewcontent/energy/disaster-management>
- [12.] Wikipedia contributors. (2026). 2026 Nepal floods. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/2026_Nepal_floods
- [13.] Wikipedia contributors. (2025). 2025 Nepal floods. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/2025_Nepal_floods

[14.] Wikipedia contributors. (2024). 2024 Thame flood. Wikipedia.

https://en.wikipedia.org/wiki/2024_Thame_flood

[15.] Wikipedia contributors. (2023). 2023 Sikkim flash floods. Wikipedia.

https://en.wikipedia.org/wiki/2023_Sikkim_flash_floods

முனைவர் செ. சக்திமுருகன்,

உதவிப் பேராசிரியர், தமிழ்த்துறை,

நந்தா கலை மற்றும் அறிவியல் கல்லூரி (தன்னாட்சி), ஈரோடு -638052

முனைவர் த.மகாலிங்கம்

துறைத் தலைவர், நூலகம் மற்றும் தகவல் அறிவியல் துறை,

நந்தா கலை மற்றும் அறிவியல் கல்லூரி (தன்னாட்சி), ஈரோடு 52.

முனைவர் க.சந்தானம்,

உதவிப் பேராசிரியர், நந்தா கல்வியியல் கல்லூரி, ஈரோடு -52.

முனைவர் வி.சி.சீனிவாசன், நிர்வாக அதிகாரி,

நந்தா கலை மற்றும் அறிவியல் கல்லூரி (தன்னாட்சி), ஈரோடு.