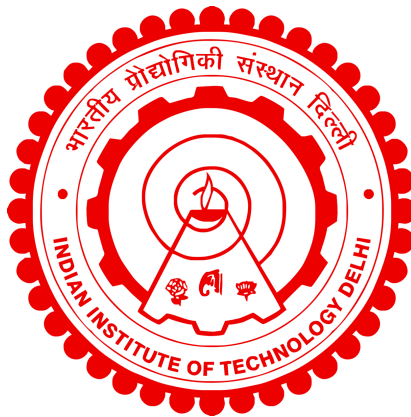


# **DETECTION & ATTRIBUTION OF EXTREME PRECIPITATION CHANGES OVER INDIA**

**CHAITHRA S T**



**CENTRE FOR ATMOSPHERIC SCIENCES**

**INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY DELHI**

**JUNE 2026**

# Abstract

Extreme precipitation events pose severe risks to life, infrastructure, and livelihoods across India, yet the extent to which observed changes in these events can be attributed to human influence has remained largely unexplored. This thesis presents the first comprehensive detection and attribution (D&A) study of changes in extreme precipitation over India during 1905-2014, using observational datasets, CMIP6 climate model simulations, process-based diagnostics, and formal D&A frameworks.

The thesis begins with a comprehensive assessment of extreme precipitation indices derived from multiple observational datasets. While the datasets show broad agreement in the spatial distribution of precipitation extremes, important differences exist in their representation of magnitude, variability, and rainfall persistence. High-resolution datasets such as IMD and TMPA generally capture stronger rainfall intensities and variability, whereas Aphrodite and GPCP tend to underestimate extreme rainfall intensity. In contrast, Aphrodite exhibits a pronounced positive bias in consecutive wet days (CWD) relative to IMD. These findings highlight the substantial uncertainties associated with observational estimates of precipitation extremes over India. Despite these uncertainties, the climatology of precipitation extremes exhibits strong spatial heterogeneity, with the highest rainfall intensity and frequency occurring over the Western Ghats and Northeast India due to the combined influence of monsoon circulation and orography. Long-term trends reveal pronounced regional contrasts. Intensification of rainfall extremes is evident over the West Central and Northwest regions, whereas Northeast India exhibits declining rainfall extremes and frequency. The results further demonstrate strong non-stationarity in precipitation trends, with multidecadal regime shifts and substantial modulation by large-scale climate modes such as the El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and the Indian Ocean Dipole (IOD). Across several regions, rainfall is increasingly concentrated into fewer but more intense events, indicating a reorganization of rainfall characteristics.

Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble confirms that climate models reproduce

the large-scale climatological distribution and historical evolution of precipitation extremes over India with reasonable fidelity despite limitations in representing localized orographic extremes. Analysis of individual forcing experiments reveals that greenhouse gas (GHG) forcing consistently intensifies precipitation extremes across all regions and indices, while anthropogenic aerosol forcing exerts a pervasive and opposing suppressive influence. The historical all-forcing response emerges as the net result of these competing anthropogenic influences, while natural forcing alone contributes comparatively little to long-term changes.

A diagnostic decomposition of extreme precipitation changes into thermodynamic and dynamic contributions demonstrates that thermodynamic intensification, driven primarily by GHG-induced warming and enhanced atmospheric moisture, constitutes the dominant externally forced component of long-term change. Dynamic contributions, associated with circulation variability, act as regional modulators that redistribute rather than systematically amplify or suppress the change. Signal-to-noise analyses demonstrate that the thermodynamic component is the only response that emerges clearly above internal climate variability, with GHG forcing identified as its dominant driver. Dynamic contributions, although important for regional patterns, remain largely indistinguishable from internal variability at the All-India scale.

Pattern-based D&A at the All-India level establishes that the observed intensification of heavy precipitation indices is inconsistent with internal climate variability and natural forcing alone and is primarily attributable to anthropogenic GHG forcing. Reductions in moderate-rainfall frequency and wet-spell duration are more closely associated with anthropogenic aerosol forcing, highlighting the distinct and competing roles of GHGs and aerosols in shaping the Indian hydroclimate.

Finally, a regression-based D&A analysis using the Regularized Optimal Fingerprinting (ROF) framework is performed for All-India and homogeneous monsoon regions. This constitutes the first comprehensive regional-scale attribution study of extreme precipitation changes over India. The analysis demonstrates robust detection and attribution of

GHG-driven intensification in extreme precipitation indices across the West Central and Central Northeast regions, as well as at the All-India scale for several intensity metrics. Anthropogenic aerosol forcing is also detected and attributed as a significant counteracting influence that has historically suppressed part of the GHG-induced increase in rainfall extremes. Attribution is strongest for intensity-based indices, while total precipitation, rainfall frequency, and duration indices exhibit weaker and more regionally dependent attribution. Northeast India emerges as a particularly complex region where multidecadal variability appears to play a dominant role in shaping observed rainfall changes.

The findings demonstrate that the historically modest observed increase in extreme precipitation over India does not reflect weak sensitivity but rather the approximate balance of two large opposing anthropogenic forcings. As aerosol emissions decline in response to air quality improvements while GHG concentrations continue to rise, the suppressive aerosol effect is expected to weaken, potentially unmasking a more rapid intensification of rainfall extremes. These results carry important implications for climate risk assessment, infrastructure planning, water-resource management, and adaptation strategies across the Indian subcontinent.

## शोध-सार

भारत में अतिवृष्टि की घटनाएँ जीवन, बुनियादी ढाँचे और आजीविका के लिए गंभीर संकट पैदा करती हैं, फिर भी इन घटनाओं के समकालीन परिवर्तनों में मानवीय योगदान का विषय अति अल्पान्वेषित (unexplored) है। यह शोध-प्रबंध (thesis) प्रेक्षणात्मक डेटासेट, CMIP6 जलवायु मॉडल सिमुलेशन, प्रक्रियात्मक निदान और संसूचन व गुणारोपण (Detection and Attribution - D&A) ढाँचे का उपयोग करते हुए, 1905-2014 के दौरान भारत में अतिवृष्टि की प्रवृत्ति में हुए परिवर्तनों का ऐसा पहला व्यापक अध्ययन प्रस्तुत करता है।

यह शोध-प्रबंध कई प्रेक्षणात्मक डेटासेट से प्राप्त अतिवृष्टि सूचकांकों के समग्र मूल्यांकन के अनुसार इन कोषों में अतिवृष्टि के स्थानिक वितरण में सहमति दिखती है, किंतु इसके परिमाण (magnitude), परिवर्तनशीलता (variability) और निरंतरता (persistence) के निरूपण में महत्वपूर्ण अंतर विद्यमान हैं। भारतीय मौसम विभाग (IMD) और TMPA प्रदत्त उच्च-विभेदन वाले डेटासेट सामान्यतः भारी वर्षा की तीव्रता और परिवर्तनशीलता को सही ढंग से पकड़ते हैं, जबकि Aphrodite और GPCP चरम वर्षा की तीव्रता को कम आंकते (underestimate) हैं। इसके विपरीत, Aphrodite, IMD की तुलना में अनवरत आर्द्र दिनों (CWD) में एक स्पष्ट सकारात्मक पूर्वाग्रह (bias) प्रदर्शित करता है। ये निष्कर्ष भारत के ऊपर चरम वर्षा के प्रेक्षणात्मक अनुमानों से जुड़ी पर्याप्त अनिश्चितताओं को उजागर करते हैं। इन अनिश्चितताओं के बावजूद, अतिवृष्टि की जलवायु स्थिति (climatology) में मजबूत स्थानिक विजातीयता (spatial heterogeneity) देखी जाती है, जिसमें मानसून परिसंचरण और पर्वतीय संरचना (orography) के संयुक्त प्रभाव के कारण पश्चिमी घाट और पूर्वोत्तर भारत में वर्षा की सबसे अधिक प्रचंडता और आवृत्ति दर्ज होती है। दीर्घकालिक प्रवृत्तियाँ (trends) स्पष्ट क्षेत्रीय विरोधाभासों को प्रकट करती हैं। पश्चिम-मध्य और उत्तर-पश्चिम क्षेत्रों में अतिवृष्टि का प्रचंड होना स्पष्ट है, जबकि पूर्वोत्तर भारत में अतिवृष्टि और उसकी आवृत्ति में गिरावट दिखती है। प्राप्त परिणाम आगे चलकर वर्षा की प्रवृत्तियों में प्रबल अस्तब्धता (non-stationarity) को दर्शाते हैं, जिसमें बहु-दशकीय अवस्था परिवर्तन (regime shifts) तथा अल नीनो-दक्षिणी दोलन (ENSO) और हिंद महासागर द्विध्रुव (IOD) जैसे बड़े पैमाने के जलवायु मॉड्यूलेशन शामिल हैं। कई क्षेत्रों में, वर्षा लगातार कम लेकिन अति तीव्र घटनाओं में केंद्रित होती जा रही है, जो वर्षा की कालावस्था प्रवृत्ति के पुनर्गठन का संकेत देती है।

CMIP6 बहु-मॉडल समूहन (ensemble) का मूल्यांकन इस बात की पुष्टि करता है कि स्थानीय पर्वतीय चरमास्थओं की चुनौतियों के बावजूद, जलवायु मॉडल उचित सत्यता (fidelity) के साथ भारत में अतिवृष्टि के बड़े पैमाने पर जलवायु वितरण और ऐतिहासिक क्रमिक विकास को पैदा कर पाते हैं। फोर्सिंग प्रयोगों के अलग-अलग विश्लेषण से पता चलता है कि ग्रीनहाउस गैस (GHG) फोर्सिंग सभी क्षेत्रों और सूचकांकों में अतिवृष्टि को लगातार प्रचंड करती है, जबकि मानवजनित एरोसोल फोर्सिंग एक विपरीत, व्यापक नियंत्रक (suppressive) प्रभाव डालती है। ऐतिहासिक सर्व-फोर्सिंग (all-forcing) प्रतिक्रिया इन प्रतिस्पर्धी मानवजनित प्रभावों के शुद्ध परिणाम के रूप में उभरती है, जबकि दीर्घकालिक परिवर्तनों में अकेले प्राकृतिक फोर्सिंग का योगदान तुलनात्मक रूप से अत्यल्प है।

अतिवृष्टि में होने वाले परिवर्तनों का ऊष्मागतिक (thermodynamic) और गतिक (dynamic) योगदानों में नैदानिक अपघटन (diagnostic decomposition) यह दर्शाता है कि ऊष्मागतिक

तीव्रीकरण, जो मुख्य रूप से GHG-प्रेरित ताप और वायुमंडलीय नमी में वृद्धि से संचालित होता है, दीर्घकालिक परिवर्तन का प्रमुख बाह्य रूप से प्रेरित घटक (**externally forced component**) है। परिसंचरण परिवर्तनशीलता से जुड़े गतिक योगदान क्षेत्रीय मॉड्युलेटर के रूप में कार्य करते हैं, जो परिवर्तन को व्यवस्थित रूप से बढ़ाने या दबाने के बजाय पुनर्वितरित (**redistribute**) करते हैं। सिंगल-टू-नॉइज विश्लेषण यह प्रदर्शित करते हैं कि ऊष्मागतिक घटक ही एकमात्र ऐसी प्रतिक्रिया है जो आंतरिक जलवायु परिवर्तनशीलता के ऊपर स्पष्ट रूप से उभरती है, जिसमें GHG फोर्सिंग को इसके प्रमुख चालक के रूप में पहचाना गया है। गतिक योगदान, हालांकि क्षेत्रीय पैटर्न के लिए महत्वपूर्ण हैं परंतु, अखिल-भारतीय (**All-India**) स्तर पर आंतरिक परिवर्तनशीलता से काफी हद तक अप्रभेद्य (**indistinguishable**) रहते हैं।

अखिल-भारतीय स्तर पर पैटर्न-आधारित D&A यह स्थापित करता है कि भारी वर्षा सूचकांकों में देखा गया तीव्रीकरण केवल आंतरिक जलवायु परिवर्तनशीलता और प्राकृतिक फोर्सिंग के साथ असंगत है, और यह मुख्य रूप से मानवजनित GHG फोर्सिंग के कारण है। मध्यम-वर्षा की आवृत्ति और गीले-दौर (**wet-spell**) की अवधि में कमी, मानवजनित एरोसोल फोर्सिंग के साथ अधिक निकटता से जुड़ी हुई है, जो भारतीय जल-जलवायु (**hydroclimate**) को आकार देने में GHG और एरोसोल की विशिष्ट और प्रतिस्पर्धी भूमिकाओं को उजागर करती है।

अंततः, अखिल-भारतीय और समरूप मानसून क्षेत्रों के लिए रेग्युलराइज्ड ऑप्टिमल फिंगरप्रिंटिंग (**Regularized Optimal Fingerprinting**) विधि का उपयोग करते हुए एक प्रतिगमन-आधारित (**regression-based**) D&A विश्लेषण किया गया है। यह भारत में अतिवृष्टि के परिवर्तनों के पहले व्यापक क्षेत्रीय-स्तर के गुणारोपण (**attribution**) अध्ययन है। यह विश्लेषण पश्चिम मध्य और मध्य पूर्वोत्तर क्षेत्रों में, साथ ही कई तीव्रता मेट्रिक्स के लिए अखिल-भारतीय स्तर पर अतिवृष्टि सूचकांकों में GHG-संचालित तीव्रीकरण के मजबूत संसूचन और गुणारोपण (D&A) को प्रदर्शित करता है। मानवजनित एरोसोल फोर्सिंग को भी एक महत्वपूर्ण प्रतिकारी (**counteracting**) प्रभाव के रूप में पहचाना और आरोपित किया गया है जिसने ऐतिहासिक रूप से अतिवृष्टि में GHG-प्रेरित वृद्धि के एक हिस्से को दबा दिया है। तीव्रता-आधारित सूचकांकों के लिए गुणारोपण सबसे मजबूत है, जबकि कुल वर्षा, वर्षा की आवृत्ति और अवधि सूचकांक कमजोर और अधिक क्षेत्र-निर्भर गुणारोपण प्रदर्शित करते हैं। पूर्वोत्तर भारत एक विशेष रूप से जटिल क्षेत्र के रूप में उभरता है जहां बहु-दशकीय परिवर्तनशीलता देखे गए वर्षा परिवर्तनों को आकार देने में प्रमुख भूमिका निभाती प्रतीत होती है।

निष्कर्ष यह प्रदर्शित करते हैं कि भारत भर में अतिवृष्टि में ऐतिहासिक रूप से देखी गई मामूली वृद्धि कमजोर संवेदनशीलता (**weak sensitivity**) को नहीं दर्शाती है, बल्कि यह दो बड़े विरोधी मानवजनित फोर्सिंग के अनुमानित संतुलन का प्रमाण है। वायु गुणवत्ता में सुधार के फलस्वरूप जैसे-जैसे एरोसोल उत्सर्जन में गिरावट आती है, वहीं GHG सांद्रता में वृद्धि जारी रहती है, तो एरोसोल का दमनकारी प्रभाव कमजोर होने की उम्मीद है, जिससे वर्षा की चरम सीमाओं का अधिक तेजी से तीव्रीकरण (**intensification**) संभावित रूप से सामने आ सकता है। ये परिणाम भारतीय उपमहाद्वीप में जलवायु जोखिम मूल्यांकन, बुनियादी ढांचे की योजना, जल-संसाधन प्रबंधन और अनुकूलन रणनीतियों (**adaptation strategies**) के लिए महत्वपूर्ण निहितार्थ (**implications**) रखते हैं।