चक्रीवादळामुळे झालेल्या नुकसानाचे अधिक अचूक मूल्यमापन करण्यासाठी स्थानिक भान असलेले नवीन एआय मॉडेल

*आयआयटी मुंबईद्वारे विकसित नवीन डीप-लर्निंग फ्रेमवर्क **SpADANet** (स्पाडानेट) मर्यादित लेबल्स वापरूनही अनेक चक्रीवादळांमधील संरचनात्मक नुकसान अधिक अचूकपणे वर्गीकृत करू शकते.*

मायकेल चक्रीवादळासाठी इमारत नुकसान वर्गीकरण : (डावीकडून उजवीकडे) उद्ध्वस्त, गंभीर नुकसान, किरकोळ नुकसान, आणि नुकसान नाही. (तलरेजा आणि दुर्भा २०२५)

शक्ती, मोंथा, सेन्यार, दितवाह… हिंदी महासागरामध्ये, ऑक्टोबर आणि नोव्हेंबर २०२५ या अवघ्या दोन महिन्यांमध्ये चार मोठी चक्रीवादळे निर्माण झाली. या वादळांच्या तडाख्यामुळे भारत, श्रीलंका, पूर्व आशिया येथील किनारपट्टीवरील जनजीवनाचे प्रचंड नुकसान झाले. शेकडो लोक मृत्युमुखी पडले. सर्वाधिक संहारक नैसर्गिक संकटांमध्ये चक्रीवादळांची वर्णी लागते. कारण एखाद्या वादळाच्या आघातामुळे केवळ काही तासांतच शहरेच्या शहरे, गावेच्या गावे उद्ध्वस्त होतात. अशा आपत्तीमुळे इमारती व पायाभूत सुविधांचे जे नुकसान होते त्याचा आढावा घेण्यासाठी जगभरातील आपत्ती निवारण गट हवाई प्रतिमांचा आधार घेतात. परंतु, मदतकार्य लवकरात लवकर सुरू करण्याच्या दृष्टीने, या प्रतिमांमधून मिळालेल्या दृश्यात्मक माहितीचे (व्हिजयूअल डेटासेट) प्रभावी विश्लेषण करता येणे महत्वाचे ठरते.

ड्रोन व उपग्रहांद्वारे घेतल्या गेलेल्या प्रतिमा बरेच वेळा अस्पष्ट आणि बऱ्याच भिन्न गोष्टींनी भरलेल्या असतात. प्रदेशानुसार त्यातील वैशिष्ट्यांमध्ये मोठे फरक दिसतात. मानवी पद्धतीने मूल्यमापन करण्यासाठी अधिक वेळ लागत असल्यामुळे अलीकडे यासाठी कृत्रिम बुद्धिमत्ता (एआय) मॉडेल्सचा अधिकाधिक वापर करण्यात येत आहे. परंतु, यामध्ये प्रत्येक वादळ वेगळे दिसते. प्रकाश स्थिती, भू-दृश्ये, कॅमेरा सेटिंग्ज, नुकसानाचे पॅटर्न, आणि अगदी इमारतींच्या बांधकामासाठी वापरलेले साहित्यसुद्धा वेगवेगळे असते. उदाहरणार्थ, आंध्र प्रदेशातील मोंथा या चक्रीवादळानंतर पडझड झालेल्या इमारती ओळखण्यासाठी प्रशिक्षित केलेले एआय मॉडेल, श्रीलंकेतील दितवाह चक्रीवादळानंतर घेतलेल्या हवाई प्रतिमांचे विश्वासार्हरित्या मूल्यमापन करू शकेलच असे नाही. या समस्येला ‘डोमेन गॅप’ असे म्हणतात, ज्यामध्ये एका माहितीसंचावर प्रशिक्षित मॉडेल तशाच प्रकारच्या दुसऱ्या माहितीसंचावर प्रभावी काम करू शकत नाही.

ही ‘डोमेन गॅप’ची समस्या सोडवण्यासाठी भारतीय तंत्रज्ञान संस्था मुंबई येथील संशोधकांनी एक नवा उपाय शोधला : ‘स्पेशियली अवेअर डोमेन ॲडाप्टेशन नेटवर्क’ (SpADANet - स्पाडानेट). नावाप्रमाणेच या मॉडेलला ‘स्थानाचे भान’ आहे. म्हणजेच ते केवळ रंग आणि आकारच नव्हे तर स्थान आणि संदर्भानुसार तयार झालेले नुकसानाचे पॅटर्न ओळखू शकते. तसेच, ‘डोमेन ॲडाप्टेशन’ करू शकते, म्हणजेच मॉडेल

त्यामध्ये प्रशिक्षित केलेले आधीचे ज्ञान पुन्हा वापरू शकते व मोजकी चिन्हित (लेबल्ड) उदाहरणे वापरून त्वरित अनुकूल बनू शकते. तर, 'नेटवर्क' म्हणजे मॉडेलचे कृत्रिम न्यूरल नेटवर्क, म्हणजेच मॉडेलची रचना. कृत्रिम न्यूरल नेटवर्क ही मानवी मेंदू मधील जैविक चेतापेशींच्या संरचना आणि कार्यप्रणाली वरून प्रेरित संगणन मॉडेल असतात.

एकूण, स्पाडानेट हे एक असे एआय मॉडेल आहे जे प्रत्यक्ष स्थळावरील मोजक्या चिन्हित नमुन्यांच्या आधारे सुद्धा विविध वादळांच्या माहितीचे विश्लेषण करण्यासाठी अनुकूल बनू शकते. *आयइइइ जिओसायन्सेस अँड रिमोट सेन्सिंग लेटर्स* या जर्नलमध्ये नुकत्याच प्रकाशित झालेल्या अभ्यासातील शोधांवरून असे दिसते की आत्तापर्यंत विविध चक्रीवादळांच्या वेळी वापरल्या गेलेल्या पद्धतींच्या तुलनेत स्पाडानेटने नुकसान-वर्गीकरणाच्या अचूकतेमध्ये ५% पेक्षा अधिक सुधारणा साध्य केली.

आयआयटी मुंबई येथील पीएचडीचे विद्यार्थी व पंतप्रधान रिसर्च फेलो तसेच सदर शोधनिबंधाचे प्रमुख लेखक श्री. प्रत्यूष तलरेजा म्हणाले, *"सध्या उपलब्ध असलेली मॉडेल्स डोमेन गॅपच्या प्रश्नाचा संख्याशास्त्रीय दृष्टीने विचार करतात. तर, स्पाडानेट प्रामुख्याने स्थानिक संदर्भ, म्हणजेच प्रतिमेमध्ये असलेल्या कोणत्याही स्थानिक वस्तूंची (उदा. इमारतींची) मांडणी आणि परस्पर संबंध यांचा विचार करते."*

यापुढे जाऊन संशोधकांनी हे मॉडेल मर्यादित संगणन क्षमतेवर चालू शकेल अशा पद्धतीने अनुकूल केले आहे. तसेच ते टॅब्लेट व मोबाइल फोनवर देखील वापरता येते. त्यामुळे प्रत्यक्ष घटनास्थळावर सोप्या पद्धतीने वापर करण्यासाठी ते अत्यंत उपयुक्त ठरते. विशेषतः साधनांची उपलब्धता कमी असलेल्या प्रदेशांमध्ये हे मॉडेल अतिशय महत्वाचे ठरू शकते. यामुळे आपत्ती व्यवस्थापनातील एक मोठा अडथळा दूर होऊ शकतो. संशोधकांनी अमेरिकेतील चक्रीवादळांवर या मॉडेलच्या चाचण्या घेतल्या. परंतु, योग्य स्थानिक प्रतिमा उपलब्ध असलेल्या जगभरातील कोणत्याही ठिकाणी नुकसानाचे मूल्यमापन करण्यासाठी ही पद्धती वापरता येईल याविषयी संशोधकांना विश्वास आहे. स्पाडानेट बऱ्याच वेगवेगळ्या प्रकारच्या परिसरांचे किंवा परिस्थितींचे प्रभावीपणे विश्लेषण करू शकते. परंतु, चिन्हित स्थानिक माहितीचे किमान काही प्रमाणात नमुने उपलब्ध असतील तर स्पाडानेटचे अनुकूलन अधिक चांगल्या प्रकारे होऊन आणखी विश्वासार्ह निष्कर्ष प्राप्त होतात अशी माहिती श्री. तलरेजा यांनी दिली.

"हवाई प्रतिमांच्या वैशिष्ट्यांचे विश्लेषण करताना राष्ट्रीय आपत्ती व्यवस्थापन प्राधिकरण (एनडीएमए) सारख्या संस्थांना तीन प्रमुख आव्हानांना सामोरे जावे लागते : चिन्हित माहितीचा अभाव, मर्यादित संगणन क्षमता आणि स्थाननिहाय फरक (डोमेन गॅप). स्पाडानेट मॉडेल या समस्येवर मात करू शकते कारण ते अगदी मोजक्या चिन्हित माहिती नमुन्यांवरून स्वयंप्रशिक्षण घेऊ शकते व नव्या प्रदेशांशी अनुकूल होऊ शकते, तसेच एकदा प्रशिक्षित झाल्यावर ते माफक हार्डवेअरसह काम करू शकते. शासकीय संस्था आणि संशोधक यांच्यातील सहयोग वाढत गेला तर अशी एआय मॉडेल्स लवकरच 'नियर-रिअल-टाईम' आपत्ती प्रतिसाद प्रणालींचा महत्वाचा भाग बनतील," श्री. तलरेजा यांनी अधोरेखित केले.

स्पाडानेटच्या रचनेसाठी रेसनेट (ResNet) या मॉडेलचा आधार म्हणून वापर केला गेला. हे एक प्रकारचे 'डीप न्यूरल नेटवर्क' असून प्रतिमांमधील नमुने अधिक अचूकपणे ओळखण्याची (पॅटर्न रेकग्निशन) त्याची क्षमता यापूर्वी सिद्ध झालेली आहे. सदर अभ्यासात, हार्वे (२०१७), मैथ्यू (२०१६) आणि मायकेल (२०१८) या हरिकेन वर या मॉडेलच्या चाचण्या घेण्यात आल्या. नवीन आपत्तीतील केवळ १०% प्रतिमांना मानवीरीत्या पडताळलेले निर्देशन (लेबल्स) उपलब्ध असतानाही, वर्गीकरणाच्या अचूकतेत आणि विश्वासार्हतेत स्पाडानेटने विद्यमान पद्धतींपेक्षा (डीएएनएन, एमडीडी, एमसीसी आणि रेसनेट + कोरल) अधिक चांगली

कामगिरी केली.

उपग्रहांद्वारे घेतल्या गेलेल्या प्रतिमांचे निर्देशन करणे, म्हणजेच त्यांना लेबल करणे ही प्रदीर्घ आणि खर्चिक प्रक्रिया आहे. कारण एखादी इमारत उद्ध्वस्त झाली आहे की तिचे किरकोळ नुकसान झाले आहे हे ओळखण्यासाठी मानवी डोळ्यांनी प्रतिमेचे मूल्यमापन करणे अनिवार्य असते. परंतु, आपत्ती निवारणाच्या दृष्टीने त्वरित प्रतिसाद देण्यासाठी कमीतकमी चिन्हित नमुने घेऊन विश्वासार्ह मूल्यमापन होण्याची गरज वाढते. याचमुळे, प्रत्यक्ष स्थितीतील आपत्ती प्रतिसाद व्यवस्थेमध्ये 'डोमेनचे (स्थानीय) भान असलेल्या' प्रशिक्षणाचा प्रभावीपणा सदर अभ्यासातील निष्कर्षांद्वारे अधोरेखित होतो. अभ्यासाचे निष्कर्ष उत्साहवर्धक असून डोमेन ॲडाप्टेशन करण्यासाठी स्पाडानेट जे मार्ग अवलंबते ते देखील अभिनव आहेत.

अभ्यासाचे प्रमुख, प्रा. सूर्या दुर्भा स्पाडानेटची कार्यपद्धती विशद करताना म्हणाले *"सुरुवातीला स्पाडानेट डोमेनमधील (चक्रीवादळ अभ्यास क्षेत्र) अचिन्हित प्रतिमांचा अभ्यास करून 'सेल्फ सुपरवाईज्ड लर्निंग', म्हणजे स्वयं-पर्यवेक्षित प्रशिक्षण पद्धतीने स्वतः शिकते. या प्राथमिक प्रशिक्षणातून स्पाडानेट मॉडेलला, नुकसान न झालेल्या आणि नुकसान झालेल्या इमारती हवाई प्रतिमांमध्ये साधारणपणे कशा दिसतात इत्यादी तपशील समजतात. त्यानंतर जेव्हा ते चिन्हित माहिती पाहते तेव्हा त्या माहितीमध्ये काय शोधायचे याचे पुरेसे भान त्याला आलेले असते."*.

सेल्फ-सुपरवाईज्ड लर्निंग चा वापर केल्यानंतर संशोधकांनी या मॉडेलला पुढे अधिक सक्षम करण्यासाठी त्यामध्ये बायलॅटरल लोकल मोरॅन्स-आय (बीएलएमआय) नावाचे नवीन मोडयूल वापरले. एकमेकांच्या जवळ दिसणाऱ्या एकसारख्या नमुन्यांचे समूह ओळखण्यासाठी मोरॅन्स-आय हे मोडयूल संख्याशास्त्रीय पद्धतींमध्ये मोठ्या प्रमाणात वापरले जाते. या संकल्पनेचा आधार घेऊन हे मोडयूल जवळजवळच्या पिक्सेल्समधील परस्परसंबंध समजून घेण्यासाठी मॉडेलला मदत करते. याचा अर्थ, मॉडेल केवळ नुकसान "कसे" दिसते आहे हे पाहत नाही, तर ढोबळमानाने ते "कोठे" व "किती" दिसते आहे हे देखील समजून घेते. म्हणजेच, मॉडेल एखाद्या प्रतिमेतील छोट्या भागाचे मूल्यमापन केवळ त्याच्या रंग किंवा आकारावर करत नाही, तर एकमेकांच्या शेजारी असलेल्या भागांचा एकमेकांशी कसा संबंध आहे यावरूनही करते. त्यामुळे स्पाडानेटला स्थान आणि परिस्थितीचा संदर्भ यांच्या आधारे नुकसानाचे नमुने ओळखणे शक्य होते.

स्पाडानेट हे निश्चित करते की 'नुकसान नाही', किरकोळ नुकसान', 'गंभीर नुकसान' आणि 'उद्ध्वस्त' या नुकसान वर्गीकरण श्रेणी विविध वादळांच्या स्थितीत मिळालेल्या प्रतिमांमध्ये योग्य प्रकारे जुळतील. इमारतीचे मटेरियल, रचना वेगळी असेल किंवा प्रकाश कमी-अधिक असेल तरीही एका वादळतील 'उद्ध्वस्त' इमारत आणि दुसऱ्या वादळतील 'उद्ध्वस्त' इमारत ही एकसारखी दिसली पाहिजे हे ते शिकते. याचा अर्थ असा की एका चक्रीवादळातील कोसळलेले छत दुसऱ्या चक्रीवादळातील कोसळलेल्या छतासारखेच हाताळले जाते, जेणेकरून भौगोलिक प्रदेशानुसार होणारा गोंधळ टाळता येईल. बीएलएमआय मोडयूलमुळे मॉडेलची स्थानिक नमुने (स्थानाशी संबंधित पॅटर्न्स) ओळखण्याची क्षमता मजबूत होते, तर सेल्फ-सुपरवाईज्ड लर्निंग मुळे मॉडेल नव्या चक्रीवादळाच्या महितीशी अगदी कमी चिन्हित माहिती उपलब्ध असली तरीही विना-अडथळा अनुकूल बनू शकते.

या मॉडेलचा त्वरित मोठ्या प्रमाणात वापर होण्यामधील एक अल्पकालीन अडचण म्हणजे संस्थांकडून येणाऱ्या प्रमाणिकृत महितीसंच आणि माहिती-वाटपातील मर्यादा असे संशोधक अधोरेखित करतात. या अडचणींची संशोधकांना जाणीव आहे व त्या सोडवण्यासाठी ते प्रयत्नशील आहेत. भविष्यात, हे मॉडेल अधिक विकसित करण्याचा संशोधकांचा मानस आहे. प्रतिमा व लायडार (LiDAR) डेटाची जोडणी व

यासारख्या उपायांनी मल्टिमोडल डेटा एकत्रित करणे हा संशोधनातील पुढचा टप्पा आहे. जागतिक तापमानवाढीला सामोरे जाताना, चक्रीवादळांची तीव्रता आणि वारंवारता वाढत चालली आहे. अशा काळात नुकसानाचे मूल्यमापन त्वरेने आणि विश्वासार्ह पद्धतीने करण्यासाठी स्पाडानेट सारखे वेगवान आणि कमी खर्चिक साधन अत्यंत महत्त्वाचे ठरू शकते.

टीप :
या वर्षी जपानमधील एका वेगळ्या गटाने याच नावाशी साधर्म्य असलेल्या नावाचे (SPADANet) एक मॉडेल *इंटरनॅशनल जर्नल ऑफ डिसास्टर रिस्क रिडक्शन* या पत्रिकेमध्ये प्रकाशित केले. हे मॉडेल आयआयटी मुंबईच्या स्पाडानेट मॉडेलपेक्षा पूर्णपणे भिन्न असून नावातील साधर्म्य हा केवळ योगायोग असल्याचे आयआयटी मुंबईच्या संशोधकांनी स्पष्ट केले आहे. *“आमचे स्पाडानेट (SpADANet) हे डोमेन-ॲडाप्टिव्ह नेटवर्क म्हणून विकसित केले आहे. यात नव्या बीएलएमआय मॉड्यूलचा आणि त्यामध्ये डोमेन ॲडाप्टेशन शक्य करण्यासाठी ‘क्लास-वाईज कोरल लॉस फंक्शन’ (CORAL - CORrelation ALignment) चा उपयोग केला गेला आहे. तर, जपानी संशोधकांच्या कामाचा डोमेन ॲडाप्टेशन हा उद्देशही नाही आणि कामात त्याचा कोठेही उल्लेखही नाही. त्यांचे संशोधन हे हानी-मूल्यांकन आणि प्रतिमांमधील बदल ओळखणे याच्याशी संबंधित आहे. आमच्या पद्धतीत, आम्ही लक्ष्यित डोमेनमधील नमुन्यांच्या विविध टक्केवारी लक्षात घेऊन सेल्फ-सुपरवाईज्ड डोमेन ॲडाप्टेशन करतो, जेणेकरून डोमेननुसार न बदलणारी वैशिष्ट्ये शिकता येतात. या सर्व कारणांमुळे आमचे SpADANet हे जपानने विकसित केलेल्या SPADANet मॉडेलपेक्षा मूलतः वेगळे आहे,”* श्री. तलरेजा यांनी स्पष्ट केले. भारतीय मॉडेल चक्रीवादळामुळे होणाऱ्या नुकसानाच्या मूल्यमापनासाठी स्वतंत्रपणे विकसित केले असून, यामध्ये आधार म्हणून रेसनेट (ResNet) चा वापर करण्यात आला आहे व स्थानासंबंधित भान आणि सेल्फ-सुपरवाईज्ड लर्निंग या वैशिष्ट्यांची जोड देऊन डोमेन ॲडाप्टेशन साध्य केले आहे.

VETTED / UNVETTED	Vetted
Title of Research Paper	SpADANet: A Spatially Aware Domain Adaptation Network for Hurricane Damage Assessment
DOI of the Research Paper as a link	https://doi.org/10.1109/LGRS.2025.3601507
List of all researchers with affiliations	Pratyush V. Talreja, Centre of Studies in Resources Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai Surya S. Durbha, Centre of Studies in Resources Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai
Email of researcher/s	Surya Durbha <sdurbha@iitb.ac.in>, Pratyush Talreja <pratyushtalreja@iitb.ac.in>
Writer name	Deekshith Pinto
Transcreator name	Shweta Bhide

VETTED / UNVETTED	Vetted
Credits to Graphic:	Talreja and Durbha, 2025. (Authors of the study)
Subject [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED (Multiple allowed)	Science/Technology/Engineering/Ecology/Health/Society
Article to be Sectioned Under [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED	Deep Dive/Friday Features/Fiction Friday/Joy of Science/News+Views/News/Scitoons/Catching up/OpEd/Featured/Sci-Qs/Infographics/Events
Social Media TAGS separated by Comma	
Social Media Posts Suggestions/ Links to interesting relevant content [optional] [writer]	IIT Bombay researchers have proposed an improved domain-adaptive deep learning framework, SpADANet, which is a spatially aware AI model that enhances damage classification accuracy using limited labels across multiple hurricanes. The model blends self-supervised learning and a novel module for reliable damage mapping to aid a timely response.
Social Media Handles to be added	@iitbombay
Social Media handles of writer	LinkedIn: Deekshith Pinto (https://www.linkedin.com/in/deekshith-pinto-editor/) Twitter: deekshith_np
Social Media handles of researchers	https://www.linkedin.com/in/pratyushtalreja/ https://x.com/PratyushTalreja
Funding information (Source: Research paper)	None
Conflict of Interest/Competing Interest information (Source: Research paper)	None
Co-PI information (Source: Research paper)	None

VETTED / UNVETTED	Vetted
Location:	Mumbai