

वीज निर्मितीचे बदलते गणित: राज्यांच्या समन्वयातून बचत आणि सुरक्षा

भारताच्या २०३० साठीच्या अक्षय ऊर्जा जनादेशातील उद्दिष्टांच्या पूर्तीचे मार्ग धुंडाळताना संशोधकांनी अतिशय सूक्ष्म स्तरावर काम करणारे वीज निर्मिती व ग्रिड प्रचालन मॉडेल विकसित केले. प्रादेशिक समन्वय आणि लवचिक अनुपालन यंत्रणा महत्त्वपूर्ण असल्याचे या अभ्यासामध्ये दिसून आले, शिवाय निर्धारित ऊर्जा साठवणूक आणि टप्प्याटप्प्याने कोळश्याचा वापर कमी करणे देखील महत्त्वाचे आहे, यामुळे देशात अक्षय उर्जेचा वापर वाढवण्यासाठी लवचिक, परवडण्याजोगा आणि विश्वासाई मार्ग मिळू शकेल.



भारतासारख्या वेगाने आर्थिक विकास करणाऱ्या देशाला आपल्या महत्त्वाकांक्षी हवामान उद्दिष्टांसाठी वेळेच्या मर्यादित धाव घ्यावी लागत आहे. देशाने ५०% पेक्षा जास्त अ-जीवाश्म इंधनावर आधारित वीज निर्मिती क्षमता आधीच साध्य केली आहे. तसेच, ऊर्जा मंत्रालयाने एकूण ऊर्जेचा ४३.३३% भाग अक्षय ऊर्जा (रिन्यूएबल एनर्जी) असावा, असा निर्देश दिला आहे. यामुळे, भारत एका मोठ्या ऊर्जा क्रांतीच्या उंबरठ्यावर उभा आहे. आंतरराष्ट्रीय अक्षय ऊर्जा संस्थेनुसार (International Renewable Energy Agency - IRENA), अक्षय ऊर्जा क्षमतेच्या बाबतीत जगात भारत चौथ्या क्रमांकावर, तर सौर ऊर्जा क्षमतेत तिसऱ्या क्रमांकावर आहे. अर्थात, एक अब्जहून अधिक लोकसंख्या असलेल्या आपल्या देशासाठी, स्वच्छ उर्जेचा वापर वाढवताना परवडण्याजोगे आणि भरवशाचे मार्ग शोधणे हे एक मोठे आव्हान आहे.

या आव्हानावर तोडगा काढण्यासाठी, भारतीय तंत्रज्ञान संस्था (आयआयटी) मुंबई, नॅशनल इन्स्टिट्यूट ऑफ अँडव्हान्स्ड स्टडीज (एनआयएएस) आणि भारतीय तंत्रज्ञान संस्था (आयआयटी) दिल्ली येथील संशोधकांनी भारताच्या शाश्वत ऊर्जा प्रणालीसाठी एक व्यापक रोडमॅप तयार केला आहे. याकरता त्यांनी विकसित केलेल्या नव्या संगणकीय मॉडेलमुळे (computational model) अक्षय ऊर्जेचे उद्दिष्ट पूर्ण करण्यासाठी येणाऱ्या खर्चाचा अंदाज घेता येतो आणि त्यानुसार वीज निर्मिती प्रकल्पांचे नियोजन व संचालन अधिक प्रभावीपणे करता येते.

या संशोधनाचे नेतृत्व करणारे, आयआयटी मुंबई येथील 'प्राइम मिनिस्टर रिसर्च फेलो' निखिल तेजेश वेंकटरमणा म्हणतात, “आमच्या अभ्यासात, भारताच्या वेगाने बदलणाऱ्या ऊर्जा प्रणालीचा अभ्यास करण्यासाठी एक नवीन तपशीलवार दृष्टीकोन वापरला आहे, विशेषतः जेव्हा देश अक्षय ऊर्जा मोठ्या प्रमाणावर वाढवण्याच्या व्यावहारिक आव्हानाचा सामना करत आहे.” निखिल यांनी हा अभ्यास प्रा. वेंकटसैलनाथन रामादेसिगन (आयआयटी मुंबई), प्रा. तेजल कानिटकर (एनआयएस), आणि प्रा. रंगन बॅनर्जी (आयआयटी दिल्ली) यांच्या मार्गदर्शनाखाली केला.

ऊर्जेची मागणी पूर्ण करण्यासाठी आणि राज्या-राज्यांमधील विजेच्या संचाराचा अभ्यास करण्यासाठी दोन मुख्य बाबी विचारात घेणे आवश्यक आहे: १) सध्या उपलब्ध आणि विकसित होत असलेल्या पायाभूत सुविधा (इन्फ्रास्ट्रक्चर) आणि २) ऊर्जा प्रणाली उभ्या करण्यासाठी व चालवण्यासाठी लागणारा खर्च. संशोधकांनी तयार केलेल्या एका विशेष संगणकीय मॉडेल मध्ये या दोनही बाबींचा विचार करणारे “क्षमता विस्तार” व “आर्थिक प्रेषण” असे दोन भाग आहेत. यातील क्षमता विस्तार (कॅपॅसिटी एक्सपान्शन) भागामध्ये, अक्षय ऊर्जेचे उद्दिष्ट पूर्ण करताना कमीतकमी खर्चात विजेची मागणी पूर्ण करत नवीन वीज निर्मिती प्रकल्प आणि बॅटरी स्टोरेज यांचा योग्य मेळ कसा साधता येईल, हे ठरवले जाते. तर, आर्थिक प्रेषण (इकॉनॉमिक डिस्पॅच) हा भाग, अतिशय बारकाईने काम करत दर १५ मिनिटांनी कोणत्या वीज प्रकल्पातून किती वीज तयार केली पाहिजे, याचे नियोजन करतो. यामुळे, संचलनात उपस्थित असलेल्या मर्यादा ध्यानात घेऊन कमीत कमी खर्चात विजेची मागणी पूर्ण करणे शक्य होते. हे दोन भाग जेव्हा एकत्र येतात तेव्हा नवीन वीज निर्मिती प्रकल्प उभारण्याचे निर्णय हे तो प्रकल्प प्रत्यक्षात किती कार्यक्षमतेने चालवला जाऊ शकतो याच बाबीवर आधारित राहतात.

निखिल स्पष्ट करतात, “आमच्या मॉडेलमध्ये क्षमता विस्तार आणि आर्थिक प्रेषण यांचा मेळ घालून अनुकूलनासाठीचा आराखडा (ऑप्टिमायझेशन फ्रेमवर्क) तयार केला आहे. यामुळे ऊर्जा प्रणालीचे अत्यंत बारकाईने अनुरूपण (सिम्युलेशन) आणि नियोजन करता येते. हे मॉडेल ‘जीएएमएस’ (जनरल अल्जेब्रिक मॉडेलिंग सिस्टिम) नावाच्या गणितीय प्रोग्रामिंग भाषेचा वापर करून तयार केले आहे.”

या अभ्यासात भारताच्या पश्चिम आणि दक्षिण भागातील नऊ राज्यांवर लक्ष केंद्रित केले गेले. निखिल यांच्या मते, ही राज्ये निवडण्याचे कारण “या प्रदेशांमध्ये देशाची अर्ध्याहून अधिक विजेची मागणी (आर्थिक वर्ष २०२२-२३ मध्ये सुमारे ५६% किंवा ९०५ टेरावॉट-तास) असून या राज्यांची एकत्रित लोकसंख्या देशाच्या ४२% आहे (२०२३ मध्ये ५९२ दशलक्ष) आणि भारताच्या एकूण देशांतर्गत उत्पादनात (जीडीपी) यांचा वाटा ५९% आहे. त्यामुळे हा अभ्यास भारताच्या एकूण ऊर्जा परिस्थितीसाठी प्रातिनिधिक मानला जाऊ शकतो.” त्यांच्या मॉडेलने २०२२-२३ हे वर्ष आधार मानून २०३० या लक्षित वर्षावर लक्ष केंद्रित केले आहे.

हे मॉडेल तयार करण्यासाठी संशोधकांनी राज्य आणि युनिट स्तरावर विजेची मागणी आणि निर्मिती यांचा डेटा (माहिती) दर १५ मिनिटांनी गोळा केला. निखिल म्हणतात, “ग्रीड-इंडिया (पूर्वीचे पॉवर सिस्टम ऑपरेशन कॉर्पोरेशन; POSOCO) बरोबर सामंजस्य करार करून आम्ही हा तपशीलवार डेटा वेस्टर्न रीजन लोड डिस्पॅच सेंटर (WRLDC) आणि नॅशनल लोड डिस्पॅच सेंटर (NLDC) यांच्या सहकार्याने मिळवला.”

हा तपशीलवार डेटा अत्यंत महत्त्वाचा आहे कारण अक्षय ऊर्जा स्रोत अस्थिर आणि हवामानावर अवलंबून असतात. १५-१५ मिनिटांच्या अंतराने असलेल्या तपशीलवार डेटा मुळे या वेगाने होणाऱ्या बदलांचा मागोवा मॉडेल मध्ये घेता येतो. त्यानुसार सौर आणि पवन ऊर्जेतील चढ-उतार, औष्णिक विद्युत प्रकल्पांचे कार्य, आणि बॅटरी तसेच पारेषण वाहिन्या (ट्रान्समिशन लाईन्स) यांसारख्या अनुकूलनशील साधनांची किती गरज आहे, हे मॉडेल अचूकपणे दर्शवू शकते.

सदर संशोधनाने असे दाखवून दिले की, भारताच्या स्वच्छ ऊर्जा भविष्याचा मार्ग राज्यांमध्ये समन्वित नियोजन आणि ऊर्जा साठवणीसाठी (एनर्जी स्टोरेज) एक धोरणात्मक दृष्टिकोन वापरण्यामध्ये दडलेला आहे. संशोधकांना असे लक्षात आले की राज्ये आणि प्रदेशांमध्ये विजेची देवाण-घेवाण अधिक मुक्तपणे होऊ दिल्यास, एकूण प्रणालीचा खर्च लक्षणीयरीत्या कमी होऊ शकतो, शिवाय एकूण ऊर्जेच्या वापरात मोठ्या प्रमाणात अक्षय ऊर्जा सामावून घेता येईल. या विश्लेषणानुसार, पश्चिम आणि दक्षिण भागातील राज्यांनी स्वतंत्रपणे काम करण्याऐवजी समन्वितपणे काम केल्यास एकूण स्थापित क्षमतेची आवश्यकता ३१४ गिगावॉटवरून २८८ गिगावॉटपर्यंत कमी होते. हे संशोधन २०% अक्षय ऊर्जा खरेदी बाध्यतेवर (आरपीओ; रिन्यूएबल पर्वेस ऑब्लिगेशन) आधारित होते. आरपीओ या सरकारी आदेशानुसार वितरण कंपन्या आणि मोठ्या वीज ग्राहकांना त्यांच्या एकूण वीज वापरापैकी किमान ठराविक टक्के वीज अक्षय ऊर्जा स्रोतांमधून खरेदी करणे बंधनकारक आहे.

राज्यांमधील या समन्वयामुळे एकूण प्रणालीच्या खर्चात २०३० या लक्ष्यवर्षापर्यंत सुमारे १२ लाख कोटी रुपयांची (जवळपास १४ अब्ज डॉलर) मोठी बचत होऊ शकते. विविध प्रकारच्या विजेच्या मागण्या आणि अक्षय ऊर्जा स्रोतांना एकीकृत करण्याच्या क्षमतेतून ही उच्च कार्यक्षमता साध्य होऊ शकते. उदाहरणार्थ, प्रत्येक राज्यामध्ये अतिउच्च वीज वापराच्या काही ठराविक वेळा असतात. राज्यांचे विद्युत जाळे जोडल्यामुळे, एकूण ग्रीडवर अतिउच्च किंवा अतिनिम्न वीज भार असण्याच्या वेळा कमी होऊन समतोल राखला जाऊ शकतो. तामिळनाडूसारखी पवन ऊर्जेत किंवा गुजरातसारखी सौर ऊर्जेत समृद्ध असलेली राज्ये अतिरिक्त स्वच्छ ऊर्जा निर्माण करून ती गरज असलेल्या राज्यांना पाठवू शकतात. यामुळे उपलब्ध अक्षय ऊर्जेचा उत्तम वापर होतो आणि प्रत्येक राज्याने महागडे अतिरिक्त (बॅकअप) वीज प्रकल्प उभारण्याची गरज कमी होते.

निखिल म्हणतात, “प्रादेशिक एकत्रिकरणातून होणाऱ्या लाभाचे प्रमाण आश्चर्यकारक होते. राज्यांच्या आपापसातील आणि अंतर्गत समन्वयामुळे प्रणालीच्या खर्चात १०-१५% बचत झाली आणि स्थापित क्षमतेत २०-३० गिगावॉटची घट झाली. यातून सहकार्यात्मक नियोजन आणि पारेषण (ट्रान्समिशन) यावर आधारित प्रणालीच्या लवचिकतेमुळे होणारे मोठे फायदे दिसून येतात.”

या अभ्यासात अक्षय ऊर्जा वाढवण्यासाठी एक महत्वाचा समतोल साधण्याची गरज देखील अधोरेखित केली आहे : कोळशावर आधारित ऊर्जा निर्मिती आणि बॅटरी स्टोरेज यांच्यातील समतोल. नवीन कोळसा आणि जलविद्युत प्रकल्प जर उभारणी चालू असलेल्या प्रकल्पांपुरतेच मर्यादित ठेवले, तरी त्यांतून निर्माण होणारी अक्षय ऊर्जा मोठ्या प्रमाणात वापरात आणायची असेल तर तशाच मोठ्या प्रमाणात बॅटरी स्टोरेजची गरज लागेल. मॉडेलच्या अंदाजानुसार, २९-४१% अक्षय ऊर्जा समाविष्ट करण्यासाठी देशाच्या पश्चिम भागात १२५ गिगावॉटपर्यंत आणि दक्षिण भागात ७० गिगावॉटपर्यंत बॅटरी स्टोरेज वाढवावे लागेल. हे तांत्रिकदृष्ट्या शक्य असले तरी, सध्याच्या किमतीनुसार २०३० पर्यंत बॅटरी अशा प्रकारे मोठ्या प्रमाणावर उपलब्ध करणे हा पर्याय कदाचित भारतासाठी सर्वात व्यावहारिक किंवा परवडणारा उपाय ठरणार नाही.

निखिल यांच्या मते, “२०३० पूर्वी बॅटरीची उपलब्धता कशी वाढवायची हा प्रश्न नसून, मध्यम ते दीर्घ काळाच्या मुदतीमध्ये, कोळशाचा वापर हळूहळू कमी कसा करायचा आणि बॅटरी साठवणूक क्षमतेत टप्प्याटप्प्याने परवडेल अशा प्रकारे वाढ कशी करायची, हा खरा प्रश्न आहे.”

संशोधकांनी या अभ्यासात एक वास्तववादी मार्ग सुचवला आहे. त्यात, जुने, कार्यक्षमता कमी असलेले कोळसा-आधारित प्रकल्प टप्प्याटप्प्याने बंद करणे, मोक्याच्या ठिकाणी बॅटरी स्टोरेजमध्ये हळूहळू वाढ करणे आणि देशांतर्गत उत्पादन व जागतिक प्रगतीद्वारे बॅटरीचा खर्च कमी करण्याचा प्रयत्न करणे, यांचा समावेश आहे.

भारताच्या सुधारित अक्षय ऊर्जा वापर जनादेशाचा विचार करताना तसेच आंतर-प्रादेशिक विद्युत पारेषणाची पुनर्रचना करताना या अभ्यासाद्वारे धोरणकर्त्यांना अधिक व्यावहारिक आणि जलद माहिती मिळू शकते. हे मॉडेल देशाच्या सध्याच्या आर्थिक मर्यादा देखील दर्शवते, ज्यामुळे अक्षय ऊर्जा साठवणुकीच्या विस्तारासाठी मोठ्या प्रमाणात खर्च कपात आणि धोरणात्मक पाठबळाची गरज असल्याचे सूचित होते. असे असूनही, विविध ऊर्जा स्रोतांमधील समतोलाचा आणि प्रादेशिक सहकार्याच्या फायद्यांचा पद्धतशीर अभ्यास करून, हा अभ्यास भारताला आपली महत्वाकांक्षी अक्षय ऊर्जा उद्दिष्टे पूर्ण करण्यासाठी आणि ऊर्जा-सुरक्षित भविष्य सुनिश्चित करण्यासाठी एक मार्ग दाखवतो.

निखिल शेवटी म्हणतात, “आमचा दृष्टिकोन धोरणांसाठी उपयुक्त आणि तपशीलवार आहे. भारताच्या शाश्वत ऊर्जा भविष्याच्या नियोजनासाठी तो उपयुक्त ठरू शकतो. क्षमतेचा समन्वित विस्तार, लक्षित स्टोरेज उपलब्ध करून देणे आणि पारेषणासाठी सुधारित पायाभूत सुविधा यांचा समन्वय किफायतशीर, विश्वासार्ह आणि पर्यावरणाला अनुकूल ऊर्जा प्रणाली तयार करू शकतात, याची जाणीव हा अभ्यास करून देतो.”

VETTED / UNVETTED	Vetted
Title of Research Paper	Optimizing renewable energy integration pathways: Inter-regional coordination and storage in India's power sector
DOI of the Research Paper as a link	https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126134
List of all researchers with affiliations	Nikhil Thejesh Venkataramana, Department of Energy Science and Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai 400076, India Tejal Kanitkar, School of Natural Sciences and Engineering, National Institute of Advanced Studies, Bengaluru 560012, India Venkatasailanathan Ramadesigan, Department of Energy Science and Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai 400076, India Rangan Banerjee, Department of Energy Science and Engineering, Indian Institute of Technology Delhi, Delhi, 110016, India
Email of researcher/s	Nikhil Thejesh Venkataramana <nikhilthejesh@iitb.ac.in> Venkatasailanathan Ramadesigan <venkatr@iitb.ac.in> Tejal Kanitkar <tejalk@nias.res.in> Rangan Banerjee <rangan@iitd.ac.in>
Writer name	Dennis C Joy

VETTED / UNVETTED	Vetted
Credits to Graphic:	Gubbi Labs
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]	1. Researchers developed a granular power generation and grid operations model to evaluate pathways to India's 2030 renewable energy mandate. The study shows that regional coordination, flexible compliance mechanisms, measured battery storage and a phased coal transition are the key to India's energy transition. Read on at <link> 2. The researchers propose a realistic pathway involving strategies for India's renewable energy transition. Regional coordination and phased storage growth are crucial, says study. Read details at <link>
Social Media Handles to be added	@iitbombay @EduMinOfIndia https://www.linkedin.com/school/iit-bombay-department-of-energy-science-engineering/ https://www.linkedin.com/school/indian-institute-of-technology-bombay/
Social Media handles of writer	
Social Media handles of researchers	Nikhil Thejesh V: www.linkedin.com/in/nikhilthejesh Venkatasailanathan Ramadesigan: https://www.linkedin.com/in/venkat-r/ Tejal Kanitkar: @kanitkarT, https://www.linkedin.com/in/tejal-kanitkar-1a41771b5/ Rangan Banerjee: https://www.linkedin.com/in/rangan-banerjee-7a35146/ ,

VETTED / UNVETTED	Vetted
Funding information (Source: Research paper)	Prime Minister's Research Fellowship Scheme
Conflict of Interest/Competing Interest information (Source: Research paper)	NA
Co-PI information (Source: Research paper)	Rangan Banerjee, Tejal Kanitkar
Location:	Mumbai