

100 YEARS
विकसित भारत
अभियान
1947 TO 2047

ISSN : 1549-523-X

Formerly UGC-CARE Listed Peer Reviewed Research Journal

वर्ष : 24, अंक 1, जनवरी-मार्च 2026

Vol. 24, No. 1, January-March 2026

विज्ञान प्रकाश

VIGYAN PRAKASH

विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी रिसर्च जर्नल

Research Journal of Science & Technology



लोक हिताय विज्ञानम्

लोक विज्ञान परिषद, दिल्ली
एवं

विश्व हिन्दी न्यास, न्यूयॉर्क
का प्रकाशन

Formerly UGC-CARE Listed Peer Reviewed Research Journal, ISSN: 1549-523-X

विज्ञान प्रकाश – विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी रिसर्च जर्नल, वर्ष : 24, अंक 1, जनवरी–मार्च 2026

VIGYAN PRAKASH : Research Journal of Science & Technology, Vol. 24, No. 1, Jan. - Mar. 2026

संस्थापक मुख्य संपादक / Founder Chief Editor

- स्व. प्रो. राम चौधरी / Late Prof. Ram Chaudhari
54, Perry Hill Road, Oswego, NY, 13126, USA
- स्व. प्रो. ओम विकास / Late Prof. Om Vikas
Founder, Lok Vigyan Parishad
Formerly, Director, ABV-IIIITM, Gwalior
& Sr. Director, MEITY, Govt. of India.

सलाहकार मंडल / Advisory Board

- डॉ. विजय कुमार सारस्वत / Dr. V.K. Saraswat
Member, NITI Aayog, Govt. of India &
Chancellor, Jawaharlal Nehru University, New Delhi.
Formerly, Secretary, Defence (R&D) & Scientific
Adviser to Raksha Mantri & DG DRDO
(Ministry of Defence)
vk.saraswat@gov.in
- प्रो. जगदीश नारायण / Prof. Jagdish Narayan
Distinguished Chair Professor & Director,
NSF Center for Advanced Materials and Smart
Structures, Dept. of Materials Science and
Engineering Centennial Campus,
North Carolina State University,
Raleigh, NC 27695-7907.
J_Narayan@ncsu.edu
- प्रो. अशोक झुनझुनवाला / Prof. Ashok Jhunjhunwala
Institute Professor, IIT Madras
E301 IITM Research Park, Chennai 600113
ashok@tenet.res.in
- डॉ. श्याम कुमार शुक्ल / Dr. Shyam K. Shukla
Executive Director, World Hindi Foundation
44949 Cougar Circle, Fremont, CA 94539, USA
shuklas@comcast.net
- प्रो. आलोक कुमार / Prof. Alok Kumar
Department of Physics, State University of New York,
Oswego, New York 13126
Alok.kumar@oswego.edu

ऑनलाइन प्रदर्श / Online Presence (Website)

- दिव्या शर्मा / Divya Sharma
Designer's Bliss, Sydney. NSW, Australia
www.designersbliss.com

मुद्रण सहयोग / Printing Support

- अतुल भाटिया / Atul Bhatia
Delta Print House, Jaipur - 302021
deltaprinthouse@hotmail.com

मुख्य संपादक / Chief Editor

- प्रो. ओउम प्रकाश शर्मा / Prof. Oum Prakash Sharma
General Secretary, Lok Vigyan Parishad
Additional Director, NCIDE,
Indira Gandhi National Open University
Maidan Garhi, New Delhi-110068
opsharma@ignou.ac.in, editorvigyanprakash@gmail.com

प्रबंध संपादक / Managing Editor

- डॉ. आदर्श मंगल / Dr. Adarsh Mangal
Department of Mathematics,
Engineering College Ajmer - 305025
dradarshmangal@vigyanprakash.in

संपादक-मंडल / Editorial Board

- प्रो. अनुपम शुक्ल / Prof. Anupam Shukla
Director, SVNIT, Surat, Gujarat-395007
dranupamshukla@gmail.com
- प्रो. कृष्ण कुमार मिश्र / Prof. Krishna Kumar Mishra
Homi Bhabha Centre for Science Education, TIFR,
Mumbai - 400088
kkm@hbcese.tifr.res.in
- प्रो. प्रतापानंद झा / Prof. Prataapanand Jha
Dean (Academics) and Director (Cultural Informatics)
IGNCA, New Delhi
pjha@ignca.nic.in
- प्रो. अवनीश कुमार / Prof. Avanish Kumar
Dept of Math Sc & Comp App
Bundelkhand University, Jhansi - 284128
dravanishkumar@gmail.com
- प्रो. विशेष विकास / Prof. Vishesh Vikas
Associate Professor
The University of Alabama
Tuscaloosa, Alabama, United States
vishesh.vikas@gmail.com
- श्री राम शरण दास / Mr. Ram Sharan Das
49, Sector-4, Vaishali,
Ghaziabad - 201010 (U.P.)
rsgupta_248@yahoo.co.in
- डॉ. कुलवंत सिंह / Dr. Kulwant Singh
Scientist H, Materials Science Division
BARC, Trombay, Mumbai - 400085 (India)
Professor, Homi Bhabha National Institute, Mumbai
singhkw@barc.gov.in

सहायक संपादक / Assistant Editor

- डॉ. राहुल दीक्षित / Dr. Rahul Dixit
Department of Artificial Intelligence
SV National Institute of Information Technology
Surat
rahuldixit@aid.svnit.ac.in

विश्व हिन्दी न्यास से संस्थापित एवं लोक विज्ञान परिषद, दिल्ली द्वारा प्रकाशित
पूर्व में UGC-CARE समिति से अनुमोदित हिन्दी में विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी रिसर्च जर्नल – विज्ञान प्रकाश

• ISSN : 1549-523-X; www.VigyanPrakash.in

विज्ञान प्रकाश रिसर्च जर्नल में प्रकाशित लेख/सामग्री लेखकों के अपने निजी विचार हैं। विज्ञान प्रकाश के संपादक मंडल तथा प्रकाशक का कोई दायित्व नहीं है।

विषय क्रम

● सलाहकार एवं सम्पादक मण्डल / Advisory & Editorial Board	Inner Cvr
● सम्पादकीय / Editorial – डॉ ओउम प्रकाश शर्मा	2-5
लोकप्रिय वैज्ञानिक लेख / Popular Science Article	
● प्रकृति की भाषा : ब्रह्मांड से कोशिका तक संवाद का विज्ञान / The Language of Nature: The Science of Communication from the Universe to the Cell – डॉ दीपक कोहली	6-8
शोध आलेख / Research Articles	
● कृषि अपशिष्ट को मूल्यवान नैनो सामग्री में रूपांतरित करना: सतत समाधान – नवाचार और अनुप्रयोग / Transforming Agricultural Waste into Valuable Nanomaterials: Sustainable Solutions - Innovation and Application – साक्षी पुराणिक, परीमीता चंचानी एवं प्रीति प्रधान	9-21
● सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाओं में प्रगति: कृत्रिम बुद्धिमत्ता आधारित मॉडलिंग, सामग्री अनुकूलन एवं सतत अपशिष्ट जल शोधन तथा ऊर्जा उत्पादन / Advances in Microbial Fuel Cells: Artificial Intelligence-Based Modeling, Materials Simulation, and Sustainable Waste-water Treatment and Energy Generation – जिगिशा मोदी, ख्यातिल पटेल, कश्यप कुमार जोशी, जेनी कैरोल, ध्रुविनि पुरोहित एवं शीतल मोदी	22-37
● डीजल और अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के लिए स्केल अप बेलनाकार नोजल में गुहिकायन प्रवाह का संख्यात्मक अध्ययन / Numerical Study of Cavitation Flow in Scaled up Cylindrical Nozzle for Diesel and Waste Cooking Oil-based Bio-diesel – देवर्षि शिर्के, मेहुल बंभानिया एवं निकुल पटेल	38-49
● कूटलेखन के लिए आलेख सिद्धांत और चेबिसेव बहुपदों का उपयोग करते हुए एक नवीन गुढालेखी ढाँचा / A Novel Cryptographic Framework for Encryption Employing Graph Theory and Chebyshev Polynomials – मोहम्मद आमिर, बृजेश शुक्ल एवं इष्ट विभु	50-65
● भारतीय पंचांग और आधुनिक काल गणना : एक तुलनात्मक अध्ययन / Indian Panchang and Modern Time Reckoning: A Comparative Study – वी. के. मिश्र एवं प्रवीण त्यागी	66-83
भारतीय ज्ञान परम्परा / Indian Knowledge Tradition	
● संस्कृत कैसे सीखें ? (समास) / How to Learn Sanskrit ? (Samaas) – आकृति ठाकुर एवं योगेश शर्मा	84-91
List of Review Coordinators	92
लेखकों के लिए निर्देश / Instructions for Authors	Back Inner Cvr
जल	Back Cvr

विज्ञान प्रकाश रिसर्च जर्नल में प्रकाशित लेख/सामग्री लेखकों के अपने निजी विचार हैं।
विज्ञान प्रकाश के सम्पादक मंडल तथा प्रकाशक का कोई दायित्व नहीं है।

सम्पादकीय Editorial

भारत में मिशन-मोड में हो रहा विज्ञान और प्रौद्योगिकी विकास

दशकों तक, भारतीय विज्ञान और प्रौद्योगिकी के प्रति वैश्विक धारणा छोटे-छोटे "किफायती नवाचार" (frugal innovation) की अवधारणा के रूप में बनी हुई थी, जिसका मतलब है कि न्यूनतम संसाधनों के साथ उच्च-प्रभाव वाले परिणाम प्राप्त करना है। परन्तु पिछले पांच-छः वर्षों में, भारत के वैज्ञानिक परिदृश्य में एक संरचनात्मक परिवर्तन आया है। विखंडित और अन्वेषक-आधारित अनुसंधान से हटकर, केंद्र सरकार ने विज्ञान और प्रौद्योगिकी (S&T) को "मिशन-मोड" में संस्थागत रूप दिया है। यह बदलाव केंद्रीकृत वित्तपोषण, बहु-संस्थागत सहयोग और स्पष्ट सामाजिक-आर्थिक लक्ष्यों द्वारा रेखांकित है। इस समय देश में यह संरचनात्मक परिवर्तन स्पष्ट दिखाई दे रहा है। भारत अब "बिग साइंस" (Big Science) के युग में प्रवेश कर चुका है, जिसकी विशेषता उच्च-पूँजी और मिशन-मोड परियोजनाएं हैं, जो अकादमिक जिज्ञासा के बजाय रणनीतिक स्वायत्तता को प्राथमिकता देती हैं। इसी दिशा में अनुसंधान नेशनल रिसर्च फाउंडेशन (ANRF) की स्थापना के साथ "लैब-टू-मार्केट" की खाई को पाटने के लिए एक विधायी ढांचा तैयार किया जा रहा है, जिसका लक्ष्य अनुसंधान एवं विकास पर सकल व्यय को वर्तमान के 0.7% से बढ़ाकर जीडीपी के 2% तक ले जाने का लक्ष्य रखा गया है। विश्वविद्यालय और विज्ञान प्रयोगशालाओं के विद्वानों के लिए, यह परम्परागत अलग-अलग विषयों पर प्रयोगशाला-स्तर के प्रयोगों से हटकर उन अंतः-विषयी और बहु-संस्थागत सहयोगों की ओर एक महत्वपूर्ण पहल है, जिसके द्वारा सामाजिक और सभ्यतागत चुनौतियों का समाधान खोजने के प्रयास किये जा सकते हैं। देश के इस नए वैज्ञानिक क्रम में कई मिशन-मोड आधारित वैज्ञानिक परियोजनाओं की शुरुआत की गई है। विज्ञान प्रकाश के इस अंक के सम्पादकीय में ऐसी ही कुछ प्रमुख परियोजनाओं के बारे में चर्चा करना प्रासंगिक होगा।

इस समय देश का सबसे महत्वपूर्ण विज्ञान और प्रौद्योगिकी मिशन 'इंडिया सेमीकंडक्टर मिशन' (ISM) है, जिसकी नींव दिसंबर 2021 में केंद्रीय मंत्रिमंडल द्वारा इंडिया सेमीकंडक्टर मिशन 1.0 के रूप में रखी गई थी। इस मिशन को 76,000 करोड़ रुपये के प्रोत्साहन ढांचे का समर्थन प्राप्त है, जो सिलिकॉन फैंस, कंपाउंड सेमीकंडक्टर सुविधाओं, असेंबली और परीक्षण इकाइयों और चिप डिजाइन के लिए 50 प्रतिशत तक की वित्तीय सहायता प्रदान करता है। दिसंबर 2025 तक, 6 राज्यों में कुल 1.60 लाख करोड़ रुपये के निवेश वाली 10 परियोजनाओं को मंजूरी दी जा चुकी है। इनमें सिलिकॉन फैब्रिकेशन यूनिट, सिलिकॉन कार्बाइड फैंस, उन्नत और मेमोरी पैकेजिंग सुविधाएं और विशेष असेंबली और परीक्षण अवसंरचना शामिल हैं। ये सभी मिलकर एक मजबूत घरेलू सेमीकंडक्टर पारिस्थितिकी तंत्र का निर्माण कर रहे हैं। केंद्रीय बजट 2026-27 में भारत की प्रौद्योगिकी संबंधी महत्वाकांक्षाओं के लिए एक निर्णायक मोड़ आया, जब भारत सेमीकंडक्टर मिशन 2.0 की घोषणा की गई। यह नया चरण घरेलू सेमीकंडक्टर क्षमताओं को मजबूत करने के लिए एक स्पष्ट नीतिगत प्रयास का संकेत देता है, ऐसे समय में जब चिप्स हर महत्वपूर्ण डिजिटल और औद्योगिक प्रणाली का आधार हैं। आईएसएम 2.0 का मुख्य उद्देश्य भारत में सेमीकंडक्टर उपकरण और सामग्री का उत्पादन करना, पूर्ण स्टैक भारतीय सेमीकंडक्टर बौद्धिक संपदा का डिजाइन तैयार करना और घरेलू और वैश्विक आपूर्ति श्रृंखलाओं को मजबूत करना है। वित्त वर्ष 2026-27 के लिए आईएसएम 2.0 के लिए 1,000 करोड़ रुपये का प्रावधान किया गया है, जिसमें प्रौद्योगिकी विकास को गति देने और भविष्य के लिए तैयार कुशल कार्यबल बनाने के लिए उद्योग-नेतृत्व वाले अनुसंधान और प्रशिक्षण केंद्रों पर विशेष जोर दिया गया है। 2029 तक, भारत से घरेलू अनुप्रयोगों के लगभग 70-75 प्रतिशत के लिए आवश्यक चिप्स को डिजाइन और निर्माण करने की क्षमता हासिल करने की उम्मीद है। 2035 तक, भारत का लक्ष्य वैश्विक स्तर पर शीर्ष सेमीकंडक्टर देशों में शामिल होना है। माना जा रहा है कि यह भारत के तकनीकी भविष्य का प्रमुख

आधार है। अब केवल चिप डिजाइन के वैश्विक केंद्र के रूप में संतुष्ट न रहकर, इसने भारत ने फ़ैब्रिकेशन (विनिर्माण) के पूंजी-गहन क्षेत्र में महत्वपूर्ण प्रगति की है।

दूसरा सबसे महत्वपूर्ण मिशन 'इंडियाएआई (IndiaAI) मिशन' है, जिसका उद्देश्य कंप्यूटर फ्रंटियर का लोकतंत्रीकरण करना है। मार्च 2024 में, भारत सरकार ने देश में समग्र एआई पारिस्थितिकी तंत्र के विकास के लिए 10,372 करोड़ रुपये के परिव्यय के साथ इंडिया एआई मिशन की शुरुआत की। 24 महीने से भी कम समय में, इंडिया एआई मिशन ने देश में एआई पारिस्थितिकी तंत्र के विकास की नींव रखी है। इस मिशन के अंतर्गत सामान्य कंप्यूटिंग सुविधा के लिए 38 हजार से अधिक जीपीयू को शामिल किया गया है, जिन्हें भारतीय स्टार्टअप और अकादमिक संस्थानों को किफायती दर पर उपलब्ध कराया जा रहा है। मिशन का वर्तमान ध्यान भारतजेन (BharatGen) पहल पर केन्द्रित है, जो भारत की 22 अनुसूचित भाषाओं की भाषाई और सांस्कृतिक बारीकियों पर विशेष रूप से प्रशिक्षित लार्ज मल्टीमॉडल मॉडल (LMMs) विकसित कर रहा है। वर्तमान स्थिति में इन मॉडलों को स्वास्थ्य सेवा और कृषि शासन में लागू किया जा रहा है। भविष्य के अनुसंधान की सीमाएँ "एजेंटिक एआई" (Agentic AI), जो जटिल तर्क और उपकरणों के उपयोग में सक्षम स्वायत्त प्रणालियाँ हैं, और एल्गोरिथम पूर्वाग्रह और डीपफेक के जोखिमों को कम करने के लिए आवश्यक नैतिक ढांचों में निहित हैं। भारत एआई मिशन के तहत सरकार ने एआई कंप्यूटिंग अवसंरचना के लिए एक समग्र और स्थिरता-उन्मुख दृष्टिकोण अपनाया है।

तीसरा सबसे महत्वपूर्ण मिशन 'राष्ट्रीय क्वांटम मिशन' (NQM) है, जिसका उद्देश्य उपपरमाणु स्तर की क्षमताओं का दोहन करना है। 2023 में स्वीकृत यह मिशन अन्य वैज्ञानिक मिशनों में सबसे अधिक बौद्धिक रूप से चुनौतीपूर्ण है। इसका उद्देश्य भारत को उन विशिष्ट देशों के समूह में शामिल करना है जो क्वांटम सिस्टम बनाने और उन्हें बड़े पैमाने पर विकसित करने में सक्षम हैं। मिशन के अंतर्गत IISc बेंगलुरु, IIT मद्रास, IIT बॉम्बे और IIT दिल्ली में चार विषयगत इनोवेशन हब को सफलतापूर्वक संचालित किया जा रहा है, जो क्रमशः कंप्यूटिंग, संचार, सेंसिंग और सामग्री पर ध्यान केंद्रित करते हैं। माना जा रहा है कि 2026 की शुरुआत में, यह मिशन सैद्धांतिक मॉडलिंग से हार्डवेयर प्रोटोटाइप की ओर बढ़ जाएगा। शोधकर्ता वर्तमान में 2027 तक 50-क्यूबिट (qubit) की सीमा तक पहुंचने के लक्ष्य के साथ सुपरकंडक्टिंग क्यूबिट प्लेटफॉर्म और ट्रैप-आयन सिस्टम का परीक्षण कर रहे हैं, इसके अतिरिक्त, सैटेलाइट लिंक के माध्यम से क्वांटम की डिस्ट्रीब्यूशन (QKD) की तैनाती ने भविष्य के अभेद्य राष्ट्रीय संचार की झलक प्रदान की है। अकादमिक समुदाय के लिए, "क्वांटम सेंसिंग" की संभावना मेडिकल इमेजिंग और भूभौतिकीय अन्वेषण में नए क्षितिज प्रदान करती है, जो चुंबकीय क्षेत्रों में सूक्ष्म परिवर्तनों का पता लगाने के लिए क्वांटम अवस्थाओं की अत्यधिक संवेदनशीलता का उपयोग करती है।

पिछले कुछ वर्षों के दौरान, भारत का अंतरिक्ष कार्यक्रम उपग्रह प्रक्षेपण से विकसित होकर मानव अन्वेषण तक पहुँच गया है। इसी कड़ी में भारत का चौथा महत्वपूर्ण विज्ञान और प्रौद्योगिकी मिशन, 'गगनयान मिशन' इस महत्वाकांक्षा का केंद्र बना हुआ है, जिसके लिए लांच व्हीकल मार्क-3 (LVM3) रॉकेट को "ह्यूमन-रेटेड" लॉन्च वाहन में बदलने की आवश्यकता है। वर्तमान में, भारतीय अंतरिक्ष अनुसंधान संगठन (ISRO) मार्च में निर्धारित G1 मानव रहित उड़ान की अंतिम उल्टी गिनती में है, जो व्योममित्र ह्यूमनॉइड को ले जाएगी ताकि क्रू केबिन के पर्यावरण नियंत्रण और जीवन रक्षक प्रणालियों की पुष्टि की जा सके। मिशन की दीर्घकालिक योजना केवल एक उड़ान नहीं, बल्कि 2035 तक भारतीय अंतरिक्ष स्टेशन की स्थापना करना है। यह कक्षीय प्रयोगशाला सूक्ष्म गुरुत्वाकर्षण अनुसंधान के केंद्र के रूप में कार्य करेगी, जो भारतीय वैज्ञानिकों को प्रोटीन क्रिस्टलीकरण, द्रव गतिकी और अंतरिक्ष चिकित्सा में प्रयोगों के लिए एक अनूठा वातावरण प्रदान करेगी। स्वायत्त डॉकिंग और सुरक्षित पुनः प्रवेश के क्षेत्रों में इंजीनियरिंग चुनौतियां बहुत बड़ी हैं, लेकिन उच्च-स्तरीय मटेरियल साइंस की संभावनाएं अद्वितीय हैं।

इसी तरह, चंद्रयान-3 की ऐतिहासिक सफलता के बाद, 'चंद्रयान-4 मिशन' रोबोटिक जटिलता में एक बड़ी छलांग है। 2024 के अंत में स्वीकृत, इस मिशन का प्राथमिक उद्देश्य उच्च-अक्षांश दक्षिणी ध्रुव से चंद्र रेजोलिथ

(मिट्टी) एकत्र करना और उसे सुरक्षित रूप से पृथ्वी पर वापस लाना है। यह मिशन पांच अलग-अलग अंतरिक्ष यान मॉड्यूल को शामिल करते हुए एक मॉड्यूलर आर्किटेक्चर का उपयोग करता है, जिसके लिए चंद्र कक्षा में परिष्कृत स्पेस डॉकिंग (SPADEX) युद्धाभ्यास की आवश्यकता होती है। भविष्य की योजना में 2027 के अंत में प्रक्षेपण शामिल है। वैज्ञानिक समुदाय के लिए, चंद्र नमूनों की वापसी से वाष्पशील पदार्थों— विशेष रूप से जल-बर्फ का अध्ययन करने का अवसर मिलेगा, जो चंद्रमा पर भविष्य के संसाधनों के उपयोग के लिए महत्वपूर्ण हैं। हालाँकि चंद्र दक्षिण के दुर्गम भूभाग में सटीक लैंडिंग और पृथ्वी पर पुनः प्रवेश के दौरान उच्च-वेग थर्मल सुरक्षा की चुनौती बनी हुई है।

भारत का एक और महत्वपूर्ण विज्ञान और प्रौद्योगिकी मिशन है 'गहरा महासागर मिशन' (Deep Ocean Mission), जिसे अक्सर 'समुद्रयान' कहा जाता है, 6,000 मीटर की गहराई पर "ब्लू फ्रंटियर" का पता लगाने की भारत की खोज है। इस मिशन का मुख्य आकर्षण मत्स्य-6000 है, जो एक मानवयुक्त पनडुब्बी है जिसमें 600 bar के दबाव को सहने के लिए डिजाइन किया गया एक टाइटेनियम गोला है। यह मिशन भारत की ऊर्जा सुरक्षा के लिए महत्वपूर्ण है, क्योंकि इसका लक्ष्य मध्य हिंद महासागर से निकल, कोबाल्ट और मैंगनीज युक्त पॉलीमेटलिक नोड्यूलस का निष्कर्षण करना है। वर्तमान में, चेन्नई के राष्ट्रीय महासागर प्रौद्योगिकी संस्थान (NIOT) में पनडुब्बी का एकीकरण पूरा हो चुका है। 2026 के मध्य में 500 मीटर की उथले पानी की डाइव (गोता) निर्धारित है, जो 2027 के पूर्ण-गहराई मिशन के अग्रदूत के रूप में कार्य करेगी। खनन के अलावा, यह मिशन जैव-पूर्वक्षण (bio-prospecting) के लिए एक नया क्षेत्र खोलता है। शोधकर्ता वर्तमान में नई पीढ़ी के एंटीबायोटिक्स और औद्योगिक एंजाइम विकसित करने के लिए गहरे समुद्र के चरमपंथियों (extremophiles) का विश्लेषण कर रहे हैं।

भारत का सातवाँ विज्ञान और प्रौद्योगिकी मिशन है राष्ट्रीय हरित हाइड्रोजन मिशन जो भविष्य को कार्बन मुक्त करने के उद्देश्य से भारत के नेट जीरो अर्थव्यवस्था की ओर संक्रमण का एक और सबसे महत्वपूर्ण आधार है। 2023 में शुरू किये गए इस मिशन का लक्ष्य भारत की विशाल अक्षय ऊर्जा क्षमता का लाभ उठाते हुए 2030 तक सालाना 5 MMT (Million Metric Tonne) हरित हाइड्रोजन का उत्पादन करना है। सम्भावनाएं अपार हैं, परन्तु चुनौतियाँ भी अनेक हैं। प्राथमिक अनुसंधान चुनौती इलेक्ट्रोलाइजर की उच्च लागत है। मिशन वर्तमान में प्रोटॉन एक्सचेंज मेम्ब्रेन (PEM) और आयन एक्सचेंज मेम्ब्रेन (AEM) इलेक्ट्रोलाइजर के स्वदेशी विनिर्माण को प्रोत्साहित कर रहा है। इस मिशन की भविष्य की योजनाओं में स्टील निर्माण, सीमेंट और लम्बी दूरी के भारी परिवहन जैसे "हार्ड-टू-एबेट" (hard-to-abate) क्षेत्रों को यानि ऐसे क्षेत्र जहाँ से ग्रीनहाउस गैसों के उत्सर्जन को घटाना मुश्किल है, उन क्षेत्रों को कार्बन मुक्त करना शामिल है। इस मिशन के अंतर्गत शोधकर्ताओं के लिए, हाइड्रोजन गैस की अस्थिरता को दूर करने के लिए हाइड्रोजन भंडारण प्रौद्योगिकियों, विशेष रूप से रासायनिक भंडारण और ठोस-अवस्था धातु हाइड्राइड्स, को उन्नत करने पर ध्यान केंद्रित किया गया है।

भारत सरकार के इन सातों मिशनों में एक समान सूत्र भी है जिसके अनुसार प्रत्येक मिशन में अंतःविषय विशेषज्ञता (interdisciplinary expertise) की आवश्यकता है। जैसे कि सेमीकंडक्टर मिशन को रासायनिक इंजीनियरों की आवश्यकता है; गहरे महासागर मिशन को सामग्री वैज्ञानिकों की आवश्यकता है; और इंडियाएआई मिशन को भाषाविदों और नीतिशास्त्रियों की आवश्यकता है। निस्संदेह, इन सभी विज्ञान और प्रौद्योगिकी मिशनों में हमारे देश को अग्रणी बनाने की महान क्षमता और गुंजाइश है, लेकिन इनको पूरा करने के लिए कई चुनौतियाँ भी हैं। सबसे बड़ी चुनौतियों में से एक वित्तपोषण का अंतर (funding Gap) है। जहाँ एक तरफ सरकारी बीज वित्तपोषण मजबूत है, वहीं डीप-टेक अनुसंधान एवं विकास में निजी क्षेत्र की भागीदारी कम (जीडीपी का 0.3%) बनी हुई है। एक अन्य बड़ी चुनौती टैलेंट पाइपलाइन (talent Pipeline) की है। इस चुनौती का सामना करने के लिए, शोध विद्वानों, पीएचडी करने वालों की संख्या और तकनीशियनों की निरंतर आपूर्ति सुनिश्चित करने की आवश्यकता है। इसके लिए विश्वविद्यालय के पाठ्यक्रमों को जल्दी से जल्दी इन मिशन-मोड परियोजनाओं के साथ जोड़ने की आवश्यकता है। इन चुनौतियों के अलावा, आयातित विशिष्ट घटकों जैसे कि GPU या गहरे समुद्र

के सेंसर पर निर्भरता भी एक बड़ी चिंता का विषय बनी हुई है जो कि वैश्विक आपूर्ति श्रृंखला को प्रभावित कर सकती है ।

स्पष्टतया वर्तमान में, हम एक ऐसे दौर के साक्षी बन रहे हैं जहाँ विज्ञान और प्रौद्योगिकी केवल एक अकादमिक खोज नहीं है, बल्कि राष्ट्रीय सुरक्षा और आर्थिक लचीलेपन का प्राथमिक इंजन है । हमारे शोध विद्वानों और शिक्षकों के लिए संदेश स्पष्ट है: मौलिक विज्ञान (जैसे क्वांटम भौतिकी) और रणनीतिक इंजीनियरिंग (जैसे क्रिप्टोग्राफी) के बीच की सीमाएँ समाप्त हो गई हैं । देश में विज्ञान और तकनीकी विकास के इस मिशन मोड दृष्टिकोण में, हमारी भूमिका पाठ्यपुस्तकों से आगे बढ़ने और इन राष्ट्रीय मिशनों को अपने शोध एजेंडा में एकीकृत करने की है । सच तो यह है कि अब "सीमित दायरे में अकेले काम करने वाले शोधकर्ता" (siloeed scholar) का युग समाप्त हो गया हैय भविष्य मिशन—मोड में काम करने वाले वैज्ञानिकों का है । देश को विकसित राष्ट्र बनाने के लिए हमें मिशन—मोड में अंत—विषयी शोध करने की आवश्यकता है ।

— डॉ ओउम प्रकाश शर्मा
मुख्य संपादक, विज्ञान प्रकाश

प्रकृति की भाषा : ब्रह्मांड से कोशिका तक संवाद का विज्ञान

The Language of Nature: The Science of Communication from the Universe to the Cell

डॉ दीपक कोहली

Dr Deepak Kohli

Special Secretary, Uttar Pradesh Secretariat, Lucknow

deepakkohli64@yahoo.in

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19666947>

प्रकृति मौन नहीं है। वह निरंतर बोलती है, कभी प्रकाश की तरंगों में, कभी रासायनिक अणुओं की गंध में, कभी गुरुत्वाकर्षण की लहरों में और कभी उन सूक्ष्म गणितीय समीकरणों में जिन्हें मनुष्य ने कठिन परिश्रम से पढ़ना सीखा है। हमें अक्सर लगता है कि संचार केवल ध्वनि, शब्द और संकेतों का विषय है; परंतु वैज्ञानिक दृष्टि से देखें तो संचार ऊर्जा, पदार्थ और सूचना के सतत आदान-प्रदान का वह सार्वभौमिक सिद्धांत है जिस पर समूचा ब्रह्मांड टिका हुआ है। विज्ञान का उद्भव भी इसी प्रयास से हुआ; प्रकृति की भाषा को पहचानना, उसे मापना, समझना और अंततः उसका अर्थ निकालना।

यदि हम रात्रि आकाश में अनगिनत तारों को देखें या माइक्रोस्कोप के नीचे एक जीवित कोशिका की अंतःक्रियाओं का अवलोकन करें, तो हमें एक समानता दिखाई देती है—व्यवस्था के भीतर छिपी संरचनात्मक लय। यही लय प्रकृति का व्याकरण है। इटली के महान वैज्ञानिक गैलीलियो गैलीली ने कहा था कि “ब्रह्मांड की पुस्तक गणित की भाषा में लिखी गई है।” यह कथन केवल साहित्यिक रूपक नहीं, बल्कि वैज्ञानिक पद्धति का आधार है। न्यूटन का गुरुत्वाकर्षण नियम हो, मैक्सवेल के समीकरण हों या आइंस्टीन का सामान्य आपेक्षिकता सिद्धांत, ये सभी प्रकृति के संवाद के अनुवाद हैं। जब हम $E = mc^2$ लिखते हैं, तो हम ऊर्जा और द्रव्य के बीच उस गहन संबंध को पढ़ रहे होते हैं जो ब्रह्मांड के जन्म से लेकर तारों की मृत्यु तक सक्रिय है।

गणितीय प्रतिरूप प्रकृति में बार-बार प्रकट होते हैं। फिबोनाची अनुक्रम— 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13...—वनस्पतियों की वृद्धि में विशिष्ट रूप से दिखाई देता है। सूरजमुखी के बीजों का विन्यास, पाइनकोन की सर्पिल संरचना या कैक्टस की पत्तियों का क्रम—इन सबमें यह अनुपात ऊर्जा और स्थान की दक्षता को अनुकूलित करता है। यद्यपि यह हर संरचना का कठोर नियम नहीं है, किंतु संसाधन प्रबंधन की प्रवृत्ति का संकेत अवश्य देता है। इसी प्रकार ‘सुनहरा अनुपात’ (लगभग 1.618) शंख की सर्पिल बनावट और कुछ जैविक रूपों में देखा गया है। वैज्ञानिक समुदाय में इसके सार्वभौमिक अनुप्रयोग को लेकर मतभेद अवश्य हैं, परंतु यह स्पष्ट है कि वृद्धि और संतुलन की गणितीय अवधारणाएँ प्रकृति की संरचना में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती हैं।

ग्रहों की कक्षाएँ, ज्वार-भाटा की लय, ऋतुओं का चक्र—ये सभी खगोलीय संवाद के उदाहरण हैं। पृथ्वी का 23.5 डिग्री का अक्षीय झुकाव ही ऋतुओं की विविधता उत्पन्न करता है। सूर्य से आने वाला विकिरण, पृथ्वी के वायुमंडल द्वारा उसका परावर्तन और अवशोषण, तथा महासागरों में ऊष्मा का संचलन, ये सभी परस्पर जुड़े संकेत हैं। जलवायु परिवर्तन का अध्ययन भी इसी संवाद को समझने का प्रयास है। कार्बन डाइऑक्साइड की बढ़ती सांद्रता, हिमनदों का पिघलना और समुद्री अम्लीकरण, ये संकेत प्रकृति की चेतावनी हैं जिन्हें पढ़ना और समझना आवश्यक है।

सूक्ष्म जगत में प्रवेश करते ही संवाद की भाषा बदल जाती है। यहाँ शब्दों के स्थान पर अणु हैं, और ध्वनि के स्थान पर रासायनिक संकेत। जीव विज्ञान में 'केमोसिग्नलिंग' वह प्रक्रिया है जिसके माध्यम से कोशिकाएँ परस्पर सूचना का आदान-प्रदान करती हैं। बैक्टीरिया 'क्वोरम सेंसिंग' के जरिए अपनी आबादी का आकलन करते हैं। जब एक निश्चित सांद्रता तक वे रासायनिक संकेत छोड़ते हैं, तो पूरा समुदाय एक साथ व्यवहार बदल सकता है— जैसे जैव-पटल (बायोफिल्म) बनाना या विषाक्त पदार्थ उत्पन्न करना। यह सामूहिक निर्णय-प्रक्रिया दर्शाती है कि जीवन का संवाद केवल उच्च प्राणियों तक सीमित नहीं है।

मधुमक्खियों का उदाहरण अत्यंत रोचक है। वे केवल 'वैगल डांस' से दिशा नहीं बतातीं, बल्कि फेरोमोन के माध्यम से छत्ते की सामाजिक संरचना को नियंत्रित करती हैं। रानी मधुमक्खी द्वारा स्रावित रासायनिक संकेत पूरी कॉलोनी के प्रजनन व्यवहार को प्रभावित करते हैं। इसी प्रकार चींटियाँ भोजन के स्रोत तक पहुँचने के लिए रासायनिक पथ बनाती हैं— एक प्रकार का जैविक मानचित्र। यहाँ संचार घ्राण और रासायनिक लिपि में निहित है।

वनस्पतियाँ भी संवाद करती हैं। भूमिगत माइकोराइजल नेटवर्क, जिसे लोकप्रिय रूप से 'बुड वाइड वेब' कहा जाता है, जड़ों और कवकों का सहजीवी तंत्र है। इस नेटवर्क के माध्यम से पोषक तत्वों का आदान-प्रदान होता है। अध्ययनों से संकेत मिलता है कि यदि किसी वृक्ष पर कीटों का आक्रमण होता है, तो वह पड़ोसी वृक्षों को रासायनिक संकेत भेज सकता है, जिससे वे सुरक्षात्मक यौगिकों का निर्माण आरंभ कर दें। यद्यपि इस क्षेत्र में अभी शोध जारी है, किंतु यह स्पष्ट है कि वन समुदाय केवल निष्क्रिय जीवों का समूह नहीं, बल्कि पारस्परिक संवाद की एक गतिशील प्रणाली है।

जीवन की सबसे परिष्कृत भाषा डीएनए है। केवल चार नाइट्रोजनस आधार— एडिनिन, थाइमिन, साइटोसिन और गुआनिन—तीन अरब से अधिक अक्षरों

की आनुवंशिक 'पुस्तक' रचते हैं। ट्रांसक्रिप्शन और ट्रांसलेशन की प्रक्रियाएँ सूचना को प्रोटीन में रूपांतरित करती हैं। एक छोटा उत्परिवर्तन कभी-कभी रोग का कारण बन सकता है, तो कभी विकास की नई दिशा खोल देता है। विकासवाद स्वयं आनुवंशिक संवाद की निरंतरता है— जहाँ चयन, उत्परिवर्तन और अनुकूलन मिलकर समय के साथ जीवन की विविधता रचते हैं।

भौतिकी की दृष्टि से प्रकृति का संवाद तरंगों और क्षेत्रों के माध्यम से होता है। विद्युत-चुंबकीय स्पेक्ट्रम में रेडियो तरंगों से लेकर गामा किरणों तक विशाल विस्तार है। मनुष्य केवल दृश्य प्रकाश का एक छोटा भाग देख सकता है, किंतु मधुमक्खियाँ पराबैंगनी प्रकाश का अनुभव करती हैं। कई सर्प अवरक्त विकिरण को पहचान सकते हैं, जिससे वे अंधकार में भी शिकार का पता लगा लेते हैं। ध्वनि तरंगों के क्षेत्र में चमगादड़ और डॉल्फिन इकोलोकेशन का उपयोग करती हैं। डॉप्लर प्रभाव का सिद्धांत बताता है कि आवृत्ति में परिवर्तन से वस्तु की गति ज्ञात की जा सकती है— प्रकृति का यह गणितीय संवाद जीवन के लिए उपकरण बन गया है।

ब्रह्मांडीय स्तर पर गुरुत्वाकर्षण तरंगों की खोज ने हमें ब्लैक होल के विलय जैसे घटनाक्रमों की 'ध्वनि' सुनने का अवसर दिया। लेजर इंटरफेरोमीटर द्वारा अंतरिक्ष-समय की सूक्ष्म विकृति का मापन किया गया। यह उपलब्धि दर्शाती है कि ब्रह्मांड स्वयं गतिशील है और उसकी घटनाएँ लहरों के रूप में संदेश भेजती हैं। इसी प्रकार कॉस्मिक माइक्रोवेव पृष्ठभूमि विकिरण ब्रह्मांड की प्रारंभिक अवस्था का अवशेष संकेत है— एक प्रकार की ब्रह्मांडीय प्रतिध्वनि।

क्वांटम स्तर पर प्रकृति का व्याकरण और भी जटिल है। क्वांटम एंटीगलमेंट में दो कण इस प्रकार संबद्ध हो सकते हैं कि दूरी महत्वहीन हो जाती है। क्वांटम बायोलॉजी के अध्ययन में सुझाव दिया गया है कि प्रवासी पक्षियों की आँखों में उपस्थित क्रिप्टोक्रोम प्रोटीन 'रैडिकल-पेयर' तंत्र के माध्यम से पृथ्वी के चुंबकीय क्षेत्र को महसूस करने में सहायक हो सकता है। प्रकाश संश्लेषण में ऊर्जा स्थानांतरण की उच्च

दक्षता भी क्वांटम प्रभावों से संबंधित मानी जाती है। यद्यपि इन प्रक्रियाओं की व्याख्या अभी विकसित हो रही है, किंतु यह स्पष्ट है कि जीवन की जटिलता और भौतिकी की सूक्ष्मता एक-दूसरे से पृथक नहीं हैं।

समुद्र की गहराइयों में जैव-दीप्ति जीवों की दृश्य भाषा है। लुसिफेरिन और लुसिफेरेज की अभिक्रिया से उत्पन्न प्रकाश शिकार को आकर्षित करने, साथी को पहचानने या शत्रु को भ्रमित करने का माध्यम बनता है। यहाँ रासायनिक ऊर्जा प्रकाश में अनूदित होती है, एक प्रत्यक्ष जैविक संकेत।

ऊष्मागतिकी का दूसरा नियम हमें बताता है कि बंद तंत्रों में अव्यवस्था बढ़ती है। किंतु जीवन खुले तंत्र की तरह कार्य करता है, जहाँ बाहरी ऊर्जा का निरंतर प्रवाह स्थानीय व्यवस्था बनाए रखता है। पृथ्वी पर सूर्य का प्रकाश इस ऊर्जा का मूल स्रोत है। हमारी जैविक घड़ी-सर्कैडियन रिदम-प्रकाश और अंधकार के चक्र से सामंजस्य रखती है। मेलाटोनिन हार्मोन का स्राव दिन-रात के संवाद पर निर्भर करता है। इस प्रकार समय भी प्रकृति की भाषा का एक आयाम है।

आधुनिक उपकरणों ने इस संवाद को सुनने की हमारी क्षमता को विस्तृत किया है। जेम्स वेब अंतरिक्ष दूरबीन दूरस्थ आकाशगंगाओं का प्रकाश पकड़ रही है। जीनोमिक अनुक्रमण तकनीकें रोगों के आनुवंशिक संकेत पढ़ रही हैं। कृत्रिम बुद्धिमत्ता विशाल आँकड़ों में पैटर्न पहचानकर प्रकृति के छिपे व्याकरण को उजागर कर रही है। परंतु जितना अधिक हम सीखते हैं, उतना ही यह स्पष्ट होता है कि अभी बहुत कुछ अनूदित होना शेष है।

अंततः मनुष्य स्वयं भी इसी संवाद का परिणाम है। हमारा मस्तिष्क न्यूरॉनों के विद्युत-रासायनिक संकेतों से विचार उत्पन्न करता है। भाषा, संस्कृति और विज्ञान—ये सभी प्रकृति के मौलिक संकेतों का ही विस्तार हैं। जब हम किसी समीकरण को हल करते हैं या दूरबीन से किसी नक्षत्र को देखते हैं, तब हम प्रकृति से अलग नहीं, बल्कि उसी के संवाद को आगे बढ़ा रहे होते हैं।

प्रकृति की भाषा को समझना केवल बौद्धिक चुनौती नहीं, नैतिक दायित्व भी है। जलवायु परिवर्तन, जैव-विविधता का ह्रास और प्रदूषण जैसे संकट हमें संकेत दे रहे हैं कि संवाद असंतुलित हो रहा है। यदि हम इन संकेतों को अनदेखा करेंगे, तो परिणाम व्यापक होंगे। विज्ञान प्रगति का वास्तविक अर्थ उपकरणों की संख्या बढ़ाना नहीं, बल्कि संवेदनशीलता को गहरा करना है, प्रकृति की सूक्ष्म धड़कनों को सुनना और उसके साथ सामंजस्य स्थापित करना।

इस व्यापक परिप्रेक्ष्य में स्पष्ट है कि ब्रह्मांड से लेकर कोशिका तक एक सतत संवाद प्रवाहित है। गणित उसका व्याकरण है, भौतिकी उसके नियम हैं, रसायन उसके अक्षर हैं और जीव विज्ञान उसका जीवंत पाठ। मनुष्य इस महागाथा का पाठक भी है और पात्र भी। जैसे-जैसे हम इस भाषा को समझते जाएंगे, हमारे भीतर विनम्रता भी उतनी ही बढ़ेगी, क्योंकि तब हमें ज्ञात होगा कि हम प्रकृति के स्वामी नहीं, बल्कि उसके अनंत संवाद के सहभागी हैं। विज्ञान की यात्रा इसी सहभागिता को गहरा करने की निरंतर प्रक्रिया है।

कृषि अपशिष्ट को मूल्यवान नैनो सामग्री में रूपांतरित करना: सतत समाधान – नवाचार और अनुप्रयोग

Transforming Agricultural Waste into Valuable Nanomaterials: Sustainable Solutions - Innovation and Application

साक्षी पुराणिक¹, परीमीता चंचानी² एवं प्रीति प्रधान³

Sakshi Puranik¹, Parimeeta Chanchani² and Preeti Pradhan³

¹⁻³Mansarovar Global University, Department of Chemistry, Bhopal (M.P.)

¹sakshi.puranik36@gmail.com, ²parimeetac@gmail.com, ³preetjyoti.60@gmail.com

Corresponding author: *sakshi.puranik36@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19667028>

सारांश

कृषि उत्पादन में तेजी से हो रही वृद्धि सीधे तौर पर वैश्विक जनसंख्या में हो रहे इजाफे से जुड़ी हुई है। इसके परिणामस्वरूप, कृषि अपशिष्ट को नवीकरणीय, किफायती और सतत बायो-कॉम्पोजिट उत्पादों के लिए एक संभावित कच्चे माल के रूप में मान्यता प्राप्त हो रही है। अक्सर, बड़ी मात्रा में कृषि उत्पाद अपर्याप्त प्रसंस्करण सुविधाओं या भंडारण ढांचे के अभाव में बर्बाद हो जाते हैं। ये कृषि अपशिष्ट कार्बोहाइड्रेट्स, विभिन्न कार्बनिक यौगिकों और पॉलिमरिक प्रोटीन से भरपूर होते हैं, जो मूल्यवर्धित अनुप्रयोगों के लिए अत्यधिक संभावनाएं प्रदान करते हैं। इसी संदर्भ में, नैनोप्रौद्योगिकी एक परिवर्तनकारी दृष्टिकोण के रूप में उभरी है, जो कृषि अपशिष्ट को मूल्यवान और पर्यावरण अनुकूल उत्पादों में परिवर्तित करने में सक्षम है— वह भी बिना हानिकारक रसायनों के उपयोग के, जो स्वास्थ्य और पर्यावरण के लिए गंभीर खतरे उत्पन्न कर सकते हैं। हालिया शोधों ने कृषि अपशिष्ट से निकाले गए अर्कों का उपयोग करके हरित नैनो सामग्री (ग्रीन नैनोमैटेरियल) संश्लेषण विधियों पर विशेष ध्यान केंद्रित किया है। इन नैनोकणों (NPs) का उपयोग जीवाणुरोधी उपचारों, जल शुद्धिकरण, और औद्योगिक रंगों के अपघटन जैसे विविध क्षेत्रों में व्यापक रूप से किया गया है। यह अध्ययन कृषि अपशिष्ट के स्रोतों, गुणों और नैनो प्रबंधन की जांच करता है, साथ ही प्राप्त नैनो सामग्रियों की संभावनाओं और उनके विभिन्न क्षेत्रों में अनुप्रयोगों को उजागर करता है।

Abstract

The exponential rise in agricultural production is closely tied to the growing global population. As a result, agricultural waste has gained recognition as a promising raw material for creating renewable, cost-effective, and sustainable bio-composite products. Large quantities of agricultural produce are often wasted due to inadequate processing facilities or storage infrastructure. These agro-wastes are rich in carbohydrates, various organic compounds, and polymeric proteins, offering considerable potential for value-added applications. In this context, nanotechnology has emerged as a transformative approach to converting agricultural waste into valuable and environment friendly products without the need for harmful chemicals, which can pose significant health and environmental risks. Recent research has increasingly focused on green nanomaterial (NM) synthesis methods that utilize agricultural waste extracts. These nanoparticles (NPs) have been widely explored for diverse applications, such as antibacterial treatments, water purification, and the degradation of

industrial dyes. This aims to explore the sources, properties, and nanomanagement of agro-waste, highlighting the potential of the derived NMs and their diverse applications in various fields.

मुख्य शब्द: कृषि अपशिष्ट, हरित नैनो सामग्री, संश्लेषण, नवीकरणीय, सतत।

Key words: Agricultural waste, Green nanomaterials, Synthesis, Renewable, Sustainable.

परिचय

कृषि उत्पादन में तेजी से हो रही वृद्धि के साथ-साथ कृषि अपशिष्ट की मात्रा में भी उल्लेखनीय वृद्धि हुई है, जिससे इसके अनुचित निपटान जैसे कि जलाना और लैंडफिलिंग के कारण पर्यावरणीय चुनौतियाँ उत्पन्न हो रही हैं। ये तरीके प्रदूषण और ग्रीनहाउस गैसों के उत्सर्जन में योगदान करते हैं, जिससे सतत अपशिष्ट प्रबंधन रणनीतियों की आवश्यकता और अधिक बढ़ जाती है। नैनोप्रौद्योगिकी में हाल की प्रगति ने कृषि अपशिष्ट को मूल्यवान नैनो सामग्री में परिवर्तित करने के लिए संभावनाओं के नए द्वार खोले हैं, जो परिपथीय अर्थव्यवस्था (Circular Economy) के सिद्धांतों के अनुरूप हैं और पर्यावरणीय स्थिरता को बढ़ावा देते हैं।

कृषि अवशेष जैसे कि सेलूलोज, लिग्निन और काइटिन जैसे बायोपॉलीमर से भरपूर होते हैं, जो विभिन्न नैनो सामग्री के संश्लेषण के लिए आदर्श प्रारंभिक पदार्थ माने जाते हैं। उदाहरणस्वरूप, कृषि अपशिष्ट से निकाली गई नैनोसेलूलोज में उत्कृष्ट यांत्रिक गुण और जैव अपघटनशीलता होती है, जो इसे बायोकोम्पोजिट, औषधि डिलीवरी प्रणालियों और खाद्य पैकेजिंग सामग्रियों में प्रयोग के लिए उपयुक्त बनाती है। इसी तरह, धान की भूसी से प्राप्त सिलिका नैनोकणों का प्रभावी रूप से जल शुद्धिकरण प्रणालियों में भारी धातुओं और कार्बनिक प्रदूषकों को हटाने के लिए उपयोग किया गया है।

कृषि अपशिष्ट से नैनोकणों का हरित संश्लेषण न केवल पर्यावरण प्रदूषण को कम करता है, बल्कि पारंपरिक नैनो सामग्री उत्पादन में प्रयुक्त खतरनाक रसायनों पर निर्भरता को भी घटाता है। बायोजेनिक संश्लेषण विधियाँ पौधों के अर्कों में उपस्थित प्राकृतिक अपचायक (reducing) और स्थिरीकारक (stabilizing)

एजेंट्स का उपयोग करती हैं, जिससे यह प्रक्रिया पर्यावरण-अनुकूल और किफायती बनती है। इसके अतिरिक्त, कृषि अपशिष्ट को नैनो सामग्री में परिवर्तित करने से न केवल अपशिष्ट में कमी आती है, बल्कि कृषि उपोत्पादों को आर्थिक मूल्य भी प्राप्त होता है, जिससे सतत विकास को बढ़ावा मिलता है।

जीवाश्म संसाधनों के अत्यधिक दोहन के कारण उत्पन्न पर्यावरणीय और सामाजिक प्रभावों ने हाल के वर्षों में सतत और पर्यावरण-अनुकूल विकल्पों की खोज को तेज किया है [1]। इनमें लिग्निनसेलूलोसिक पदार्थ उच्च मूल्य वर्धित सामग्री और बायोपॉलीमर के उत्पादन के लिए एक प्रमुख प्राकृतिक स्रोत के रूप में उभरे हैं। ये पदार्थ अपनी जैव अपघटनशीलता, कम घनत्व और उत्कृष्ट यांत्रिक गुणों के कारण विशेष रूप से आकर्षक हैं [2][3]। वर्तमान शोध मुख्यतः कृषि अपशिष्ट के उपयोग पर केंद्रित है, जो मुख्य रूप से सेलूलोज, हेमीसेलूलोज और लिग्निन से बना लिग्निनसेलूलोसिक पदार्थों से समृद्ध होता है।

सेलूलोज, जो प्रकृति में पाया जाने वाला सबसे प्रचुर जैविक पॉलिमर है [4], एक नवीकरणीय और जैव अपघटनशील संसाधन है, जिसे पौधे प्रकाश संश्लेषण के माध्यम से कार्बन डाइऑक्साइड, जल और सूर्य के प्रकाश से उत्पन्न करते हैं। इसकी रासायनिक संरचना साधारण होते हुए भी संशोधित की जा सकती है, जिससे यह रेशे, फिल्म और कार्यात्मक पॉलिमर जैसे कई अनुप्रयोगों के लिए उपयोगी बनती है। इसकी यांत्रिक शक्ति इसके क्रिस्टलीय पॉलिमरिक संरचना से आती है।

लिग्निनसेलूलोसिक बायोमास (LCB) का अध्ययन मुख्य रूप से जैव ईंधन और बायोपॉलीमर जैसे मूल्यवर्धित उत्पादों के उत्पादन की संभावनाओं के लिए किया गया है

[5][6][7]। इसके प्रमुख स्रोतों में कृषि, वानिकी और औद्योगिक अवशेष शामिल हैं। LCB का एक प्रमुख घटक, सेलूलोज, ग्लूकोज इकाइयों से बना एक सरल और सीधा प्राकृतिक पॉलिमर है। जैतून के पेड़ों की छंटाई, अर्गन प्रेस केक, सेब का रेशा, अंगूर की बेलों की टहनियाँ, और कपास जैसे अवशेषों को विभिन्न प्रक्रियाओं द्वारा सेलूलोज नैनोक्रीस्टल (CNC) और सेलूलोज नैनोफाइबर (CNF) में परिवर्तित किया गया है।

नैनोसेलूलोज आधारित सामग्रियाँ खाद्य पैकेजिंग, बायोमेडिसिन, मैट्रिक्स सुदृढीकरण और झिल्ली निस्पंदन जैसे उद्योगों में व्यापक रूप से प्रयुक्त हो रही हैं [8]। हालिया प्रगति ने इसके उपयोग को नैनोकॉम्पोजिट, जैल, एयरोजेल, चिपचिपाहट नियंत्रक, फिल्म, अवरोधक परत, फाइबर, फोम, ऊर्जा भंडारण प्रणाली और निस्पंदन झिल्ली जैसे उत्पादों तक विस्तारित कर दिया है [9]। सेलूलोज की अनूठी संरचना LCB से नैनोसेलूलोज के निष्कर्षण को सक्षम बनाती है, जिसमें प्रयुक्त विधियों के अनुसार उसे CNC या CNF में परिवर्तित किया जा सकता है [10]।

CNC और CNF के उत्पादन के लिए अम्लीय जलअपघटन (acid hydrolysis) और यांत्रिक उपचार प्रमुख विधियाँ हैं, लेकिन इनमें ऊर्जा खपत और जल आवश्यकता की चुनौतियाँ बनी रहती हैं, विशेषकर न्यूट्रलाइजेशन के दौरान [11]। एंजाइमिक जलअपघटन एक आशाजनक और सतत विकल्प प्रदान करता है, जो सेलूलोज को फाइब्रिलेट करने के लिए एंजाइमों के लाभों का उपयोग करता है और ऊर्जा की खपत को कम करता है। हालांकि, एंजाइमों की उच्च लागत एक प्रमुख बाधा है। इस चुनौती को दूर करने के लिए, कुछ अध्ययनों ने एंजाइमिक और यांत्रिक विधियों को जोड़कर बेहतर फाइब्रिलेशन और कम ऊर्जा आवश्यकताओं के लिए समाधान सुझाया है [12][13]।

“नैनोसेलूलोज” शब्द विभिन्न नैनो और सूक्ष्म आकार की सेलूलोजिक कणों को दर्शाता है [14]। इसकी संरचना के आधार पर नैनोसेलूलोज को तीन प्रमुख प्रकारों में वर्गीकृत किया गया है:

1. **सेलूलोज नैनोफाइबर (CNF)** – सामान्यतः एंजाइमिक और/या यांत्रिक विघटन द्वारा तैयार किया जाता है।

2. **सेलूलोज नैनोक्रीस्टल (CNC)** – अम्लीय जलअपघटन द्वारा प्राप्त छड़ी-आकार की क्रिस्टलीय कण।

3. **बैक्टीरियल नैनोसेलूलोज (BNC)** – मुख्य रूप से *Gluconoacetobacter xylinus* जैसे बैक्टीरिया द्वारा संश्लेषित।

AI और केमोमेट्रिक्स का एकीकरण: हालिया रुझानों में नैनो सामग्री के संश्लेषण को अनुकूलित करने के लिए AI-आधारित केमोमेट्रिक विधियों का समावेश देखा गया है। उन्नत एल्गोरिथम और सांख्यिकीय विश्लेषणों के माध्यम से, शोधकर्ता विभिन्न प्रक्रियात्मक मानदंडों (जैसे तापमान, प्रतिक्रिया समय और रासायनिक सांद्रता) के प्रभाव को मॉडल कर सकते हैं, जिससे नैनोसेलूलोज कंपोजिट की गुणवत्ता और उत्पादकता का पूर्वानुमान और सुधार संभव होता है। यह दृष्टिकोण न केवल प्रयोगात्मक डिजाइन को तेज करता है, बल्कि बड़े पैमाने पर उत्पादन के लिए पूर्वानुमानात्मक अंतर्दृष्टि भी प्रदान करता है।

उदाहरणस्वरूप, बटलर एवं अन्य द्वारा की गई समीक्षा में मशीन लर्निंग तकनीकों का पदार्थ विज्ञान में प्रयोग की संभावनाओं पर प्रकाश डाला गया है [15]। इसी तरह, रैकुग्लिया एवं अन्य ने सफल और असफल दोनों प्रयोगों से सीखकर संश्लेषण स्थितियों को अनुकूलित करने में मशीन लर्निंग की सहायता प्रदर्शित की [16]। इसके अलावा, किम एवं अन्य ने यह दर्शाया कि किस प्रकार डेटा-आधारित तकनीकें पदार्थ सूचना विज्ञान (materials informatics) को नया आकार दे रही हैं, जो नैनो सामग्री डिजाइन में केमोमेट्रिक दृष्टिकोणों की आधारशिला हैं [17]।

यह शोधपत्र कृषि अपशिष्ट को कार्यात्मक नैनो सामग्री में बदलने के नवीन दृष्टिकोणों की जांच करता है, साथ ही संश्लेषण प्रक्रियाओं को अनुकूलित करने और पूर्वानुमान विश्लेषण के लिए कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) के एकीकरण की पड़ताल करता है। यह अध्ययन

AI-सहायित नैनो सामग्री संश्लेषण की कार्यप्रणालियों की विवेचना करता है और विभिन्न उद्योगों में इसके व्यावहारिक लाभों का मूल्यांकन करते हुए सतत समाधान प्रस्तुत करने का उद्देश्य रखता है, जो अपशिष्ट प्रबंधन और संसाधन उपयोग की चुनौतियों को प्रभावी ढंग से संबोधित कर सकते हैं।

साहित्य समीक्षा

कृषि अपशिष्ट (Agro-waste) को मूल्यवान नैनोमैटेरियल्स (Nanomaterials) में रूपांतरित करना एक नवीन और सतत तकनीकी समाधान के रूप में दृष्टिगत हुआ है। पारंपरिक अपशिष्ट प्रबंधन जैसे जलाना या लैंडफिल में डालना, पर्यावरण पर गंभीर प्रभाव डालता है और ग्रीनहाउस गैसों के उत्सर्जन को बढ़ाता है। इन समस्याओं से निपटने के लिए वैज्ञानिक समुदाय अब कृषि अपशिष्ट को उपयोगी उत्पादों में बदलने के प्रयास कर रहा है।

कृषि अपशिष्ट में सेल्यूलोज, लिग्निन, हेमीसेल्यूलोज जैसे बायोपॉलीमर प्रचुर मात्रा में पाए जाते हैं, जो नैनोसामग्री निर्माण के लिए उत्कृष्ट कच्चा माल हैं [18]। उदाहरण के लिए, चावल की भूसी (rice husk) से सिलिका नैनोकण बनाए जाते हैं जिनका उपयोग जल शोधन और भारी धातुओं को हटाने में किया जाता है [19]।

हरित नैनोप्रौद्योगिकी (Green nanotechnology) में पौधों के अर्क का उपयोग करके नैनोकणों का जैविक संश्लेषण (biogenic synthesis) किया जाता है, जिससे हानिकारक रासायनिक रिएक्टेंट्स की आवश्यकता नहीं होती [20]। इस प्रक्रिया में मौजूद प्राकृतिक अवयव जैसे पॉलीफेनोल्स और एंटीऑक्सीडेंट नैनोकणों के निर्माण में सहायक होते हैं।

सेल्यूलोज नैनोकणों (Nanocellulose) का उपयोग खाद्य पैकेजिंग, औषध वितरण प्रणाली और जैव-चिकित्सा अनुप्रयोगों में हो रहा है [21]। नैनोसेल्यूलोज को एसिड हाइड्रोलासिस या यांत्रिक प्रक्रिया द्वारा कृषि अपशिष्ट से निकाला जा सकता है। हालांकि, इन प्रक्रियाओं में ऊर्जा और जल की खपत

एक बड़ी चुनौती है, जिसे एंजाइम आधारित विधियों द्वारा कम किया जा सकता है।

आर्टिफिशियल इंटेलिजेंस (AI) और केमेट्रिक्स (chemometrics) का उपयोग अब नैनोमैटेरियल संश्लेषण प्रक्रिया को अनुकूलित करने के लिए किया जा रहा है। AI आधारित मॉडल तापमान, समय और रसायन की सांद्रता जैसे कारकों का विश्लेषण करके संश्लेषण की उपज और गुणवत्ता की भविष्यवाणी कर सकते हैं [22]। इससे न केवल लागत कम होती है, बल्कि पर्यावरणीय प्रभाव भी घटता है [23]।

हाल के अध्ययनों में यह स्पष्ट हुआ है कि कृषि अपशिष्ट से बने नैनोमैटेरियल जल शोधन, रंग हटाने, जीवाणुरोधी गतिविधियों और खाद्य संरक्षण में अत्यंत प्रभावी हैं [24]। यह तकनीक सतत विकास लक्ष्यों (SDGs) के साथ मेल खाती है क्योंकि यह अपशिष्ट को मूल्यवान उत्पादों में बदलती है और पर्यावरणीय प्रभाव को न्यूनतम करती है [25]।

सामग्री एवं विधियाँ

1. कृषि अपशिष्ट संग्रहण

शक्कर गन्ने की खोई (Sugarcane Bagasse), धान की पराली (Rice Straw) और नारियल का छिलका (Coconut Husk) को इंदौर और उसके आस-पास के ग्रामीण क्षेत्रों में स्थित मिलिंग उद्योगों और स्थानीय बाजारों से एकत्र किया गया ताकि ताजा प्रसंस्कृत कृषि अवशेषों की उपलब्धता सुनिश्चित की जा सके।

गन्ने की खोई और धान की पराली को 20-22 अगस्त, 2024 को स्थानीय मिलों में फसल कटाई के बाद की प्रक्रिया के दौरान संग्रहित किया गया, जबकि नारियल के छिलके 5-6 सितंबर, 2024 को उन बाजारों से लिए गए जहाँ नारियल प्रसंस्करण की गतिविधियाँ प्रमुख थीं। सभी नमूनों को मिट्टी, पत्थर या अन्य फसल अपशिष्ट जैसे संदूषकों से मुक्त रखा गया। एकत्रित अवशेषों को साफ और लेबल किए गए पॉलीइथिलीन बैग में रखा गया ताकि प्रदूषण न हो।

नमूनों को अतिरिक्त नमी हटाने हेतु सूर्य की रोशनी में सुखाया गया। इसके लिए अवशेषों को साफ तिरपाल पर 3–4 दिनों तक (23–26 अगस्त, 2024 तक गन्ने की खोई व धान की पराली; 7–10 सितंबर, 2024 तक नारियल का छिलका) फैला दिया गया और नियमित अंतराल पर पलटा गया। जब अवशेष भुरभुरा हो गया, जिससे पर्याप्त नमी हटने की पुष्टि हुई, तब उन्हें एयर-टाइट कंटेनरों में संग्रहित किया गया।

2. नमूना तैयारी (Sample Preparation)

सुखाए गए कृषि अपशिष्टों (गन्ने की खोई, धान की पराली, नारियल छिलका) को यांत्रिक ग्राइंडर से महीन चूर्ण में पीसा गया। फिर चूर्ण को 40 या 60-मेश चलनी से छाना गया ताकि एकसमान कण आकार मिल सके।

क्षार उपचार (Alkali Treatment) के लिए 10 ग्राम प्रत्येक नमूना 150–200 मिलीलीटर 5% सोडियम हाइड्रॉक्साइड (NaOH) में रखा गया और 80–100°C पर 3 घंटे तक चुंबकीय हॉटस्टिरर पर गर्म किया गया। इस प्रक्रिया से लिग्निन और हेमीसेल्युलोज हट गया, जबकि सेल्युलोज संरक्षित रहा। मिश्रण को वैक्यूम फिल्टर से छाना गया और आसुत जल से अच्छी तरह धोया गया। फिर नमूनों को 60°C पर 5–6 घंटे तक एयर-सर्कुलेटिंग ओवन में सुखाया गया।

3. अपलिग्नीकरण प्रक्रिया (Delignification Process)

इस प्रक्रिया में पहले की तरह ग्राइंडिंग और चलनी प्रक्रिया के बाद, नमूनों को फिर से 5% NaOH के साथ 80–100°C पर 3 घंटे तक गर्म किया गया। धोने और सुखाने की विधि समान रही, जिससे शुद्ध सेल्युलोज फाइबर प्राप्त किए गए [25]।

4. सेल्युलोज नैनोकोम्पोजिट्स की तैयारी

शुद्ध सेल्युलोज फाइबर को यांत्रिक, रासायनिक या संयुक्त तकनीकों से नैनोस्तर पर तोड़ा गया। प्राप्त नैनोकोम्पोजिट्स की संरचनात्मक व रूपात्मक विशेषताओं का मूल्यांकन किया गया।

नैनोमैटेरियल्स की विशेषता जांच (Characterization Techniques)

1. स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) विश्लेषण

नमूनों पर सोने या प्लेटिनम की पतली परत चढ़ाई गई और SEM द्वारा उच्च-रिज़ॉल्यूशन छवियाँ प्राप्त की गईं ताकि उनके कणों के आकार और एकरूपता की पुष्टि हो सके [27]।

2. भारी धातु सोखने की क्षमता परीक्षण

क्रोमियम आयन संदूषण की नकल के लिए पोटैशियम क्रोमेट (K_2CrO_4) की कृत्रिम घोलें तैयार की गईं (Cr-1 से Cr-4 तक)। निर्धारित मात्रा में सेल्युलोज नैनोकोम्पोजिट को इन घोलों में मिलाकर 1 घंटे तक घुमाया गया। बाद में घोल को फिल्टर कर क्रोमियम आयनों की शेष मात्रा को Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS-200) द्वारा मापा गया [27]।

3. सोखने की दक्षता (Adsorption Efficiency)

क्रोमियम सोखने की प्रतिशत क्षमता इस सूत्र से गणना की गई:

$$\text{क्रोमियम अवशोषण दक्षता (\%)} = \frac{\text{प्रारंभिक क्रोमियम सांद्रता} - \text{अवशिष्ट क्रोमियम सांद्रता}}{\text{प्रारंभिक क्रोमियम सांद्रता}} \times 100$$

परिणाम**एआई और केमोमेट्रिक विश्लेषण (AI and Chemometric Analysis):**

एक एआई-संचालित केमोमेट्रिक दृष्टिकोण का उपयोग नैनोकोम्पोजिट्स के संश्लेषण मापदंडों को अनुकूलित करने और उनके अवशोषण क्षमता की पूर्वानुमान लगाने के लिए किया गया।

SEM (स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी), रासायनिक संरचना, और क्रोमियम अवशोषण परीक्षणों से प्राप्त आंकड़ों को मशीन लर्निंग मॉडल्स में इनपुट के रूप में डाला गया। इन मॉडलों ने विभिन्न प्रोसेसिंग पैरामीटर्स (जैसे तापमान, प्रतिक्रिया समय, NaOH की सांद्रता आदि) के प्रभाव का विश्लेषण किया और सबसे उपयुक्त शर्तों की पहचान की।

इस दृष्टिकोण ने न केवल प्रयोगात्मक डिजाइन को अधिक कुशल बनाया, बल्कि इसने यह भी पूर्वानुमान लगाया कि किन परिस्थितियों में नैनोकोम्पोजिट्स सर्वोत्तम प्रदर्शन करेंगे।

इस प्रकार, यह तकनीक न केवल समय और संसाधनों की बचत करती है, बल्कि उच्च गुणवत्ता वाले उत्पाद प्राप्त करने में भी सहायता करती है।

1. कृषि अपशिष्ट संग्रहण और सुखाने की प्रक्रिया (Agricultural Waste Collection and Drying)

सेलुलोज नैनोकोम्पोजिट्स के संश्लेषण के लिए

गन्ने की खोई (Sugarcane Bagasse), धान का पुआल (Rice Straw) और नारियल का बाहरी खोल (Coconut Husk) इंदौर और आसपास के ग्रामीण क्षेत्रों से एकत्रित किए गए। एकत्र किए गए अवशेषों की सावधानीपूर्वक जाँच की गई ताकि मिट्टी, पत्थर या अन्य फसल कचरे जैसे अशुद्धियों को हटाया जा सके।

- गन्ने की खोई स्थानीय शुगर मिलों से,
- धान का पुआल चावल मिलों से,
- और नारियल का खोल स्थानीय बाजारों से प्राप्त किया गया।

प्रत्येक प्रकार के कृषि अपशिष्ट को सूरज की रोशनी में चार दिनों तक सुखाया गया ताकि उनमें मौजूद नमी को प्रभावी ढंग से हटाया जा सके। जब ये सामग्री पर्याप्त रूप से सूख गई और भुरभुरी हो गई, तब उन्हें रासायनिक उपचार के लिए तैयार करने हेतु महीन चूर्ण में पीस लिया गया।

2. कृषि अवशेषों की प्रोसेसिंग और विश्लेषण (Agricultural Waste Processing and Analysis)

सूखाने, पीसने और क्षारीय उपचार (alkali treatment) की प्रक्रियाओं के बाद गन्ने की खोई, धान का पुआल और नारियल के खोल से उच्च-शुद्धता वाले सेलुलोज फाइबर प्राप्त किए गए। इन फाइबर्स को आगे नैनोकोम्पोजिट संश्लेषण के लिए उपयोग किया गया।

तालिका 1: कृषि अवशेष प्रोसेसिंग के मापदंडों का सारांश

पैरामीटर	गन्ने की खोई	धान की पराली	नारियल की भूसी
संग्रह स्रोत	शुगर मिल्स	राइस मिल्स	स्थानीय बाजार
सूखाने की विधि	धूप में सुखाना	धूप में सुखाना	धूप में सुखाना
सूखाने की अवधि	4 दिन	4 दिन	4 दिन
प्रयुक्त जाली आकार	50-मेश	40-मेश	60-मेश
कण आकार सीमा	0.30-0.60 मिमी	0.42-0.84 मिमी	0.25-0.50 मिमी
क्षारीय उपचार	5% NaOH, 80-100°C, 3 घंटे	5% NaOH, 80-100°C, 3 घंटे	5% NaOH, 80-100°C, 3 घंटे
उपचार के बाद सुखाना	60°C पर 5-6 घंटे	60°C पर 5-6 घंटे	60°C पर 5-6 घंटे

2. पीसने और छानने के बाद कण आकार वितरण

पीसे गए अवशेषों को समान कण आकार प्राप्त करने के लिए छाना गया, जिससे सेल्यूलोज निष्कर्षण के लिए उपयुक्त आकार सुनिश्चित हो सके। गन्ने की खोई को 50-मेश छलनी से छाना गया, जिससे 0.30 से 0.60 मिमी के कण आकार प्राप्त हुए। धान की पराली को पीसने के बाद 40-मेश छलनी से गुजारा गया, जिससे 0.42 से 0.84 मिमी के कण आकार प्राप्त हुए। नारियल की भूसी, जो कि रेशेदार प्रकृति की होती है, को 60-मेश छलनी से छाना गया, जिससे 0.25 से 0.50 मिमी के कण आकार प्राप्त हुए।

इन छने हुए पाउडरों को आगे 5% सोडियम हाइड्रॉक्साइड (NaOH) घोल से उपचारित किया गया, जिससे लिग्निन और हेमिसेलुलोज को हटाया जा सके और नैनोकॉम्पोजिट संश्लेषण के लिए शुद्ध सेल्यूलोज फाइबर प्राप्त किए जा सकें।

3. क्षारीय उपचार और लिग्निन हटाना (डेलिग्निफिकेशन)

क्षारीय उपचार को 80–100°C के तापमान पर तीन घंटे तक किया गया ताकि कृषि अपशिष्टों में मौजूद लिग्निन और हेमिसेलुलोज को तोड़ा जा सके। उपचारित नमूनों को उसके बाद फिल्टर किया गया और शेष रासायनिक अवशेषों को हटाने के लिए आसुत जल (डिस्टिल्ड वॉटर) से अच्छी तरह धोया गया। प्राप्त सेल्यूलोज-समृद्ध रेशों को 60°C पर एयर-सर्कुलेंटिंग ओवन में 5–6 घंटे तक सुखाया गया ताकि गैर-सेल्यूलोज घटकों को पूरी तरह से हटाया जा सके। इस प्रक्रिया ने सेल्यूलोज रेशों की शुद्धता को प्रभावी रूप से बढ़ाया, जिससे वे नैनोकॉम्पोजिट संश्लेषण के लिए उपयुक्त हो गए।

1. नैनोकॉम्पोजिट संश्लेषण और विश्लेषण

सेल्यूलोज रेशों को सफलतापूर्वक नैनोकॉम्पोजिट में परिवर्तित किया गया। SEM (स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी) विश्लेषण से यह ज्ञात हुआ कि इनमें एक समान रेशेदार संरचना है, जिसकी माप नैनो स्तर (60–90 nm) पर है। तालिका 2 में इसके विश्लेषण संबंधी विवरण दिए गए हैं।

तालिका 2: नैनोकॉम्पोजिट विशेषण डेटा

स्रोत	औसत कण आकार (nm)	सतही संरचना	टिप्पणियाँ
गन्ने की खोई	60–85	समान, रेशेदार जालिका	लिग्निन की प्रभावी रूप से सफाई की पुष्टि
धान की पराली	70–90	समान, रेशेदार जालिका	कणों का सुसंगत वितरण
नारियल की भूसी	65–88	समान, रेशेदार जालिका	उच्च शुद्धता और न्यूनतम एकत्रीकरण (एग्लोमरेशन)

परिशोधित सेल्यूलोज रेशों को यांत्रिक और रासायनिक उपचारों के माध्यम से नैनो स्तर के सेल्यूलोज कणों में परिवर्तित किया गया।

स्कैनिंग इलेक्ट्रॉन माइक्रोस्कोपी (SEM) का उपयोग संश्लेषित नैनोकॉम्पोजिट की सतही संरचना और कण आकार वितरण का विश्लेषण करने के लिए

किया गया। SEM छवियों से यह स्पष्ट हुआ कि सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट में एक समान और आपस में जुड़ा हुआ रेशेदार नेटवर्क था, जिसमें कण आकार मुख्यतः 60–90 नैनोमीटर की सीमा में पाए गए।

- **गन्ने की खोई:** कण आकार सीमा 60–85 नैनोमीटर

- **धान की पराली:** कण आकार सीमा 70–90 नैनोमीटर
- **नारियल की भूसी:** कण आकार सीमा 65–88 नैनोमीटर

सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट की चिकनी और एकसमान सतह से यह संकेत मिलता है कि **क्षारीय उपचार और डेलिग्नफिकेशन** के माध्यम से अशुद्धियों को सफलतापूर्वक हटाया गया है।

ये निष्कर्ष पुष्टि करते हैं कि संश्लेषित नैनोकॉम्पोजिट में वांछनीय संरचनात्मक गुण मौजूद हैं, जिससे वे **अधिशोषक (adsorbents)** और **कंपोजिट निर्माण में सुदृढीकरण सामग्री** जैसे विभिन्न अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त हैं।

5. क्रोमियम अवशोषण दक्षता

सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट की अवशोषण क्षमता का मूल्यांकन करने के लिए, पोटेशियम क्रोमेट (K_2CrO_4) के कृत्रिम घोल विभिन्न क्रोमियम सांद्रणों के साथ तैयार किए गए। प्रत्येक घोल में निश्चित मात्रा में सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट मिलाया गया, और **एक घंटे तक** अवशोषण प्रक्रिया चलाई गई। इसके बाद घोल को फिल्टर किया गया और शेष क्रोमियम आयन की सांद्रता को **एटॉमिक एब्जॉर्शन स्पेक्ट्रोफोटोमीटर (AAS-200)** के माध्यम से मापा गया।

K_2CrO_4 आधारित क्रोमियम अवशोषण प्रयोगों से यह सिद्ध हुआ कि इन नैनोकॉम्पोजिट्स की अवशोषण दक्षता उच्च रही। विभिन्न प्रारंभिक सांद्रणों के लिए क्रोमियम में प्रतिशत कमी की गणना की गई। इसका विवरण तालिका 3 में प्रस्तुत है।

तालिका 3: विभिन्न कृषि अपशिष्ट—आधारित नैनोकॉम्पोजिट्स के लिए क्रोमियम अवशोषण दक्षता

कृषि अपशिष्ट स्रोत	प्रारंभिक क्रोमियम सांद्रता (mg/L)	प्रतिशत कमी (%)
गन्ने की खोई	15	65.3
धान की पराली	20	60.8
नारियल की भूसी	30	57.3

परिणामों का विश्लेषण और निष्कर्ष

परिणामों से यह सिद्ध हुआ कि सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट्स में क्रोमियम के प्रति उच्च अवशोषण दक्षता मौजूद है। क्रोमियम की प्रारंभिक सांद्रता के अनुसार अवशोषण दक्षता में अंतर देखा गया। कम प्रारंभिक सांद्रता (15 mg/L) पर क्रोमियम में 65.3% की कमी दर्ज की गई, जबकि उच्च सांद्रता (30 mg/L) पर यह दक्षता घटकर 57.3% रह गई।

यह प्रवृत्ति दर्शाती है कि नैनोकॉम्पोजिट्स की अवशोषण क्षमता कम सांद्रण पर अधिक प्रभावी होती है, जबकि क्रोमियम की मात्रा बढ़ने पर उसमें थोड़ी कमी आ जाती है।

ये निष्कर्ष इस बात पर प्रकाश डालते हैं कि कृषि अपशिष्ट से प्राप्त सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट्स भारी धातुओं को हटाने के लिए प्रभावी अवशोषक के रूप में कार्य कर सकते हैं।

संश्लेषित नैनोकॉम्पोजिट्स में उत्कृष्ट अवशोषण क्षमताएं हैं, जो उन्हें पर्यावरणीय शोधन (environmental remediation) अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त बनाती हैं।

प्रयोगात्मक परिणामों से यह भी सिद्ध होता है कि कृषि अपशिष्ट को उच्च गुणवत्ता वाले सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट्स में प्रभावी रूप से परिवर्तित किया जा सकता है, जिनमें पर्यावरणीय शोधन की महत्वपूर्ण संभावनाएं हैं।

इस अध्ययन में AI (कृत्रिम बुद्धिमत्ता) और केमोमेट्रिक तकनीकों के उपयोग ने यह गहराई से समझने में मदद की कि विभिन्न प्रक्रिया मापदंड नैनोकॉम्पोजिट के गुणों को कैसे प्रभावित करते हैं।

पूर्वानुमानात्मक मॉडल (predictive models) ने संश्लेषण प्रक्रिया को बेहतर बनाने में मदद की, जिससे सुसंगत कण आकार वितरण और बेहतर भारी धातु अवशोषण दक्षता सुनिश्चित हुई।

SEM छवियों में दिखाई देने वाला समान रेशेदार नेटवर्क इस बात की पुष्टि करता है कि क्षारीय उपचार और डेलिग्निफिकेशन प्रक्रियाएं प्रभावी रही हैं।

उच्च क्रोमियम अवशोषण दक्षता यह संकेत देती है कि ये सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट्स सतत (sustainable), कम लागत वाले और प्रभावशाली जल शुद्धिकरण एवं पर्यावरणीय सफाई समाधान प्रदान कर सकते हैं।

6. निष्कर्ष

इस अध्ययन में कृषि अपशिष्ट—गन्ने की खोई, धान की पराली और नारियल की भूसी—से सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट्स का सफलतापूर्वक संश्लेषण किया गया और इन्हें क्रोमियम आयनों के जलीय घोल से अवशोषण में प्रभावी पाया गया। अवशोषण दक्षता क्रमशः गन्ने की खोई (65.3%), धान की पराली (60.8%), और नारियल की भूसी (57.3%) के लिए दर्ज की गई। ये निष्कर्ष इस ओर संकेत करते हैं कि कृषि अपशिष्ट से प्राप्त सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट्स भारी धातुओं को दूषित जल स्रोतों से हटाने में अत्यधिक प्रभावी हो सकते हैं।

प्राप्त अवशोषण दक्षताएं सेल्यूलोज—आधारित सामग्रियों पर किए गए पूर्व शोध के अनुरूप हैं:

• अशरफी एवं अन्य (2022) [28] ने सोडा बगास पल्प से प्राप्त सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट्स (CNCs) के माध्यम से Cd^{2+} और Pb^{2+} जैसे भारी धातु आयनों को हटाने का प्रदर्शन किया। उन्होंने सक्सिनिक एनहाइड्राइड से संशोधित CNCs की अधिकतम अवशोषण क्षमता

को pH 6 पर रेखांकित किया। Pb^{2+} आयनों के प्रति अधिक झुकाव हमारे अध्ययन में देखे गए Cr^{6+} अवशोषण व्यवहार से मेल खाता है।

• जिआंग एवं अन्य (2023) [29] ने कृषि पराली से संश्लेषित पॉलीपायरोल—संशोधित नैनोसेल्यूलोज के माध्यम से Hg^{2+} आयनों की अत्यधिक अवशोषण क्षमता बताई। यह क्षमता कॉम्पोजिट की सतह पर प्रचुर कार्यात्मक समूहों के कारण थी, जो भारी धातुओं को प्रभावी रूप से हटाने में सहायक होते हैं।

• शर्मा एवं अन्य (2021) [30] ने लिग्नेसेल्यूलोसिक बायोमास से प्राप्त नैनोसेल्यूलोज पर आधारित एक समीक्षा में बताया कि इन पदार्थों की उच्च सतह क्षेत्र, रासायनिक संशोधन क्षमता और कम लागत उन्हें जल उपचार के लिए उपयुक्त बनाती है।

इस अध्ययन ने यह सिद्ध किया कि कृषि अपशिष्ट से प्राप्त नैनोकॉम्पोजिट्स न केवल भारी धातुओं के शोधन के लिए कारगर हैं, बल्कि AI—आधारित केमोमेट्रिक विश्लेषण के साथ समन्वय करके प्रक्रिया अनुकूलन और विश्लेषण में भी महत्वपूर्ण सुधार प्राप्त किए जा सकते हैं।

इसके अतिरिक्त, इन नैनोकॉम्पोजिट्स का उपयोग प्लास्टिक के पारंपरिक विकल्प के रूप में करने की संभावनाएं उभरती हैं, जिससे प्लास्टिक प्रदूषण को कम करने और पर्यावरणीय स्थिरता को बढ़ावा देने में सहायता मिल सकती है।

भविष्य की संभावनाएं

1. प्लास्टिक में कमी की रणनीतियों के साथ एकीकरण: जल शुद्धिकरण से आगे बढ़ते हुए, कृषि अपशिष्ट से प्राप्त सेल्यूलोज नैनोकॉम्पोजिट्स पारंपरिक प्लास्टिक के प्रभावशाली विकल्प प्रस्तुत करते हैं। इनकी बायोडिग्रेडेबिलिटी (जैव-अपघटन क्षमता) और मजबूत यांत्रिक गुण इन्हें ईको-फ्रेंडली बायोप्लास्टिक और टिकाऊ पैकेजिंग सामग्री के विकास के लिए उपयुक्त बनाते हैं। इन सामग्रियों को विभिन्न कॉम्पोजिट फॉर्मूलों में शामिल करके प्लास्टिक उपयोग

को घटाया जा सकता है और कृत्रिम पॉलिमर से संबंधित प्रदूषण को कम किया जा सकता है।

2. AI-आधारित अनुकूलन में प्रगति: भविष्य के अनुसंधान में AI और केमोमेट्रिक विश्लेषण का और अधिक उपयोग करके न केवल संश्लेषण प्रक्रिया को परिष्कृत किया जा सकता है, बल्कि नैनोकॉम्पोजिट्स को विशेष औद्योगिक अनुप्रयोगों के लिए अनुकूलित भी किया जा सकता है।

यह रणनीति उन सामग्रियों के विकास की ओर ले जा सकती है जो वातावरणीय शोधन से लेकर जैवचिकित्सा अनुप्रयोगों तक विस्तृत क्षेत्रों में उच्च प्रदर्शन प्रदान कर सकें।

आभार

लेखक रसायन विभाग, मानसरोवर ग्लोबल विश्वविद्यालय, भोपाल (म.प्र.), का इस शोध कार्य के दौरान संसाधन और सहयोग प्रदान करने के लिए हार्दिक आभार व्यक्त करते हैं। विशेष धन्यवाद उन सहयोगियों और सहकर्मियों को, जिन्होंने इस अध्ययन में अपने महत्वपूर्ण विचारों और विशेषज्ञता के माध्यम से अमूल्य योगदान दिया।

हितों का टकराव विवरण : लेखक यह घोषणा करते हैं कि उनका कोई स्वार्थसिद्धि या हितों का टकराव नहीं है।

संदर्भ

1. Agegnehu, G., Srivastava, A. K., and Bird, M. I. (2017). "The Role of Biochar and Biochar-Compost in Improving Soil Quality and Crop Performance: A Review," *Applied Soil Ecology*, vol. 119, pp. 156-170. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Atkinson, C. J., Fitzgerald, J. D., and Hipps, N. A. (2010). "Potential Mechanisms for Achieving Agricultural Benefits from Biochar Application to Temperate Soils: A

Review," *Plant and Soil*, vol. 337, pp. 1-18. [Google Scholar] [CrossRef]

3. Chen, P., Liu, Y., Mo, C., Jiang, Z., Yang, J., and Lin, J. (2021). "Microbial Mechanism of Biochar Addition on Nitrogen Leaching and Retention in Tea Soils from Different Plantation Ages," *Science of the Total Environment*, vol. 757, p. 143817. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
4. Chen, Z., Liu, J., Sun, H., Xing, J., Zhang, Z., and Jiang, J. (2023). "Effects of Biochar Applied in Either Rice or Wheat Seasons on the Production and Quality of Wheat and Nutrient Status in Paddy Profiles," *Plants*, vol. 12, p. 4131. [Google Scholar] [CrossRef]
5. Cornelissen, G., Jubaedah, Nurida, N. L., Hale, S. E., Martinsen, V., Silvani, L., and Mulder J. (2018). "Fading Positive Effect of Biochar on Crop Yield and Soil Acidity during Five Growth Seasons in an Indonesian Ultisol," *Science of the Total Environment*, vol. 634, pp. 561-568. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
6. Curaqueo, G., Meier, S., Khan, N., Cea, M., and Navia, R. (2014). "Use of Biochar on Two Volcanic Soils: Effects on Soil Properties and Barley Yield," *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, vol. 14, pp. 911-924. [Google Scholar] [CrossRef]
7. El-Fattah, D. A. A., Hashem, F. A., and Abd-Elrahman, S. H. (2022). "Impact of Applying Organic Fertilizers on Nutrient Content of Soil and Lettuce Plants, Yield Quality and Benefit-Cost Ratio under Water Stress Conditions," *Asian Journal of Agriculture and Biology*, vol. 2022, p. 202102086. [Google Scholar] [CrossRef]
8. Galinato, S. P., Yoder, J. K., and Granatstein, D. (2011). "The Economic Value of Biochar

- in Crop Production and Carbon Sequestration," *Energy Policy*, vol. 39, pp. 6344-6350. [Google Scholar] [CrossRef]
9. Godlewska, P., Ok, Y. S., and Oleszczuk, P. (2021). "The Dark Side of Black Gold: Ecotoxicological Aspects of Biochar and Biochar-Amended Soils," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 403, p. 123833. [Google Scholar] [CrossRef]
 10. Hussain, M., Farooq, M., Nawaz, A., Al-Sadi, A. M., Solaiman, Z. M., Alghamdi, S. S., Ammara, U., Ok, Y. S., and Siddique, K. H. M. (2017). "Biochar for Crop Production: Potential Benefits and Risks," *Journal of Soils and Sediments*, vol. 17, pp. 685-716. [Google Scholar] [CrossRef].
 11. Igalavithana, A. D., Lee, S. E., Lee, Y. H., Tsang, D. C. W., Rinklebe, J., Kwon, E. E., and Ok, Y. S. (2017). "Heavy Metal Immobilization and Microbial Community Abundance by Vegetable Waste and Pine Cone Biochar of Agricultural Soils," *Chemosphere*, vol. 174, pp. 593-603. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
 12. Jeyasubramanian, K., Thangagiri, B., Sakthivel, A., Raja, J. D., Seenivasan, S., Vallinayagam, P., Madhavan, D., Devi, S. M., and Rathika, B. (2021). "A Complete Review on Biochar: Production, Property, Multifaceted Applications, Interaction Mechanism and Computational Approach," *Fuel*, vol. 292, p. 120243. [Google Scholar] [CrossRef]
 13. Lehmann, J. (2007). "Bio-energy in the Black," *Frontiers in Ecology and the Environment*, vol. 5, pp. 381-387. [Google Scholar] [CrossRef]
 14. Mateo, S., Peinado, S., Morillas-Gutiérrez, F., La Rubia, M. D., and Moya, A. J. (2021). "Nanocellulose from Agricultural Wastes: Products and Applications-A Review," *Processes*, vol. 9, no. 9, p. 1594.
 15. Nair, V. D., Nair, P. K. R., Dari, B., Freitas, A. M., Chatterjee, N., and Pinheiro, F. M. (2017). "Biochar in the Agroecosystem-Climate-Change-Sustainability Nexus," *Frontiers in Plant Science*, vol. 8, p. 2051. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
 16. Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., and Pan, G. (2016). "Quantification of Biochar Effects on Soil Hydrological Properties Using Meta-Analysis of Literature Data," *Geoderma*, vol. 274, pp. 28-34. [Google Scholar] [CrossRef]
 17. Pandit, N. R., Mulder, J., Hale, S. E., Zimmerman, A. R., Pandit, B. H., and Cornelissen, G. (2018). "Multi-year Double Cropping Biochar Field Trials in Nepal: Finding the Optimal Biochar Dose through Agronomic Trials and Cost-Benefit Analysis," *Science of the Total Environment*, vol. 637, pp. 1333-1341. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
 18. Sahota, S. et al., (2018). "Characterization of Leaf Waste Based Biochar for Cost Effective Hydrogen Sulphide Removal from Biogas," *Bioresource Technology*, vol. 250, pp. 635-641. [Google Scholar] [CrossRef]
 19. Sängner, A. et al. (2017). "Biochar Application to Sandy Soil: Effects of Different Biochars and N Fertilization on Crop Yields in a 3-year Field Experiment," *Archives of Agronomy and Soil Science*, vol. 63, pp. 213-229. [Google Scholar] [CrossRef]
 20. Shackley, S. et al. (2012). "Biochar, Tool for Climate Change Mitigation and Soil Management," in *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*,

- Springer, New York, NY, USA, pp. 845-893. [Google Scholar] [CrossRef]
21. Vijay, V. K., Kapoor, R., Trivedi, A., and Vijay, V. (2015). "Biogas as Clean Fuel for Cooking and Transportation Needs in India," in *Advances in Bioprocess Technology*, Springer International Publishing, Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 257-275. [Google Scholar] [CrossRef]
 22. Yi, Z., Jeyakumar, P., Yin, C., and Sun, H. (2023). "Effects of Biochar in Combination with Varied N Inputs on Grain Yield, N Uptake, NH₃ Volatilization, and N₂O Emission in Paddy Soil," *Frontiers in Microbiology*, vol. 14, p. 1174805. [Google Scholar] [CrossRef]
 23. Yu, H., Zou, W., Chen, J., Chen, H., Yu, Z., Huang, J., Tang, H., Wei, X., and Gao, B. (2019). "Biochar Amendment Improves Crop Production in Problem Soils: A Review," *Journal of Environmental Management*, vol. 232, pp. 8-21. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed].
 24. Zhang, A., Bian, R., Pan, G., Cui, L., Hussain, Q., Li, L., Zheng, J., Zheng, J., Zhang, X., Han, X. et al. (2012). "Effects of Biochar Amendment on Soil Quality, Crop Yield and Greenhouse Gas Emission in a Chinese Rice Paddy: A Field Study of 2 Consecutive Rice Growing Cycles," *Field Crops Research*, vol. 127, pp. 153-160. [Google Scholar] [CrossRef]
 25. Zhang, Y., Ding, J., Wang, H., Su, L., and Zhao, C. (2020). "Biochar Addition Alleviates the Negative Effects of Drought and Salinity Stress on Soybean Productivity and Water Use Efficiency," *BMC Plant Biology*, vol. 20, p. 288. [Google Scholar] [CrossRef] [PubMed]
 26. Zhang, Y., Wang, J., and Feng, R. (2021). "The Effects of Biochar Addition on Soil Physicochemical Properties: A Review," *Catena*, vol. 202, p. 105284. [Google Scholar] [CrossRef]
 27. Ashrafi Birgani, S., Talaeipour, M., Hemmasi, A., Bazyar, B., and Larijani, K. (2022). "Removal of Heavy Metal Ions Using Cellulose Nanocrystals and Succinic Anhydride-Modified Cellulose Nanocrystals Prepared from Bleached Soda Bagasse Pulp," *BioResources*, vol. 17, no. 3, pp. 4886-4904.
 28. Xiong, Q., Zhang, L., Zhu, Z., Xu, G., Jing, J., Zhang, W., Zhang, C., and Ye, X. (2023). "Polypyrrole-Modified Nanocellulose Exhibits Superior Performance for Hg(II) Adsorption," *Polymers*, vol. 15, no. 12, p. 2735.
 29. Mazibuko, M. T., Onwubu, S. C., Mokhothu, T. H., Paul, V., and Mdluli, P. S. (2024). "Unlocking Heavy Metal Remediation Potential: A Review of Cellulose-Silica Composites," *Sustainability*, vol. 16, no. 8, p. 3265.
 30. Nag S., and Biswas, S. (2020). "Cellulose-Based Adsorbents for Heavy Metal Removal," in *Green Adsorbents to Remove Metals, Dyes and Boron from Polluted Water*, Springer, pp. 113-142.
 31. Sharma, A., Anjana, Rana, H., and Goswami, S. (2021). "A Comprehensive Review on the Heavy Metal Removal for Water Remediation by the Application of Lignocellulosic Biomass-Derived Nanocellulose," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 30, pp. 1-18.
 32. Butler, K. T., Davies, D. W., Cartwright, H., Isayev, O., and Walsh, A. (2018). "Machine Learning for Molecular and Materials Science," *Nature*, vol. 559, no. 7715, pp. 547-555. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0337-2>

33. Raccuglia, P., Elbert, K. C., Adler, P. D. F., Fuhrman, J. A., Grice, J., Swanson, K. et al. (2016). "Machine-Learning-Assisted Materials Discovery Using Failed Experiments," *Nature*, vol. 533, no. 7601, pp. 73-76. <https://doi.org/10.1038/nature17439>
34. Kim, E., Huang, K., and Ramprasad, R. (2018). "Machine Learning in Materials Informatics: Recent Applications and Prospects," *npj Computational Materials*, vol. 4, p. 37. <https://doi.org/10.1038/s41524-018-0090-9>.

सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाओं में प्रगति: कृत्रिम बुद्धिमत्ता आधारित मॉडलिंग, सामग्री
अनुकूलन एवं सतत अपशिष्ट जल शोधन तथा ऊर्जा उत्पादन
Advances in Microbial Fuel Cells: Artificial Intelligence–Based Modeling, Materials
Simulation, and Sustainable Wastewater Treatment and Energy Generation

जिगिशा मोदी^{1,*}, ख्यातिल पटेल¹, कश्यप कुमार जोशी¹, जेनी कैरोल¹, ध्रुविनि पुरोहित¹
एवं शीतल मोदी²

Jigisha Modi^{1,*}, Khyatil Patel¹, Kashyap Kumar Joshi¹, Jane Carol¹, Dhruvini Purohit¹
& Shital Modi²

¹Department of Chemical Technology
Shroff S R Rotary Institute of Chemical Technology,
UPL University of Sustainable Technology,
Ankleshwar-393002, Gujarat- INDIA.

²Department of Chemistry
School of Science and Technology,
Vanita Vishram Women's University,
Surat-395001, Gujarat- INDIA

*jigisha.modi@upluniversity.ac.in, kipatel154@gmail.com, KashyapJoshi551@gmail.com,
janecarol93926@gmail.com, dhruvip2002@gmail.com, modishital2261@gmail.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19667171>

सारांश

सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाएँ (Microbial Fuel Cells - MFCs) नवीन जैव-वैद्युत रासायनिक यंत्र हैं, जो अपशिष्ट जल के शोधन और सतत विद्युत उत्पादन को एक साथ संपन्न करने में सक्षम हैं। यह अध्ययन MFC के प्रदर्शन में हालिया प्रगतियों की पड़ताल करता है, जिसमें मॉडलिंग, प्रायोगिक प्रमाणीकरण और अनुकूलन विधियों पर विशेष बल दिया गया है। एक समग्र दृष्टिकोण अपनाया गया है, जिसमें कृत्रिम बुद्धिमत्ता (AI) और मशीन लर्निंग (ML) आधारित एल्गोरिथम – जैसे कि एडेप्टिव न्यूरो-फ़जी इनफरेंस सिस्टम (ANFIS) तथा पार्टिकल स्वार्म ऑप्टिमाइजेशन (PSO) – का उपयोग पूर्वानुमानात्मक सटीकता बढ़ाने एवं परिचालन दक्षता को सुव्यवस्थित करने हेतु किया गया है। इलेक्ट्रोड सामग्री में नवीनता लाते हुए, ग्राफीन-आधारित मिश्र धातुएँ तथा लौह-संयोजित उत्प्रेरक (iron-doped catalysts) को सम्मिलित किया गया है, जिससे जैवफिल्म निर्माण, विद्युत चालकता और ऑक्सीजन अपचयन गतिकी (oxygen reduction kinetics) में सुधार प्राप्त हुआ है। प्रायोगिक पुष्टि गतिक बहू-उद्देश्यीय अनुकूलन मॉडल के माध्यम से की गई, जहाँ वास्तविक समय निगरानी उपकरण और डीप लर्निंग एल्गोरिथम का प्रयोग कर, विद्युत घनत्व (power density) एवं रासायनिक ऑक्सीजन मांग (COD) निष्कासन को प्रभावित करने वाले महत्वपूर्ण मानकों की पहचान की गई है।

एक 15-लीटर की सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) प्रणाली का मॉडल तैयार कर उसका अनुकूलन किया गया है, जिससे विद्युत घनत्व प्रवृत्तियों, कुल कोशिका विभव तथा सबस्ट्रेट गतिकी का मूल्यांकन किया जा सके। संवेदनशीलता विश्लेषण (Sensitivity Analysis) द्वारा यह स्पष्ट किया गया है कि सबस्ट्रेट सांद्रता, इलेक्ट्रोड सतह क्षेत्रफल और पर्यावरणीय परिस्थितियाँ जैसे प्रमुख कारक प्रणाली के प्रदर्शन को महत्वपूर्ण रूप से प्रभावित करते हैं। MATLAB तथा कृत्रिम बुद्धिमत्ता तकनीकों के उपयोग से पूर्वानुमान मॉडलिंग को एकीकृत करते हुए ऊर्जा

उत्पादन दक्षता में उल्लेखनीय वृद्धि (पिछले अध्ययनों की तुलना में लगभग 30%) प्राप्त की गई है, जो मॉडल की दृढ़ता (robustness) को प्रमाणित करती है। यह अध्ययन यह दर्शाता है कि संगणकीय उपकरणों तथा नवीन सामग्री नवाचारों की भूमिका MFC के प्रदर्शन को सशक्त रूप से बढ़ाने में परिवर्तनकारी सिद्ध हो सकती है। यह एक ऐसा मार्ग प्रशस्त करता है, जो भविष्य में अपशिष्ट जल शोधन और नवीकरणीय ऊर्जा उत्पादन के लिए मापनीय (scalable) और सतत समाधान प्रदान कर सकता है।

Abstract

Microbial Fuel Cells (MFCs) are innovative bio-electrochemical devices capable of simultaneously treating wastewater and producing sustainable electricity. This study explores recent advancements in MFC performance, emphasizing modeling, experimental validation, and optimization methodologies. A comprehensive approach is adopted, integrating AI and ML algorithms such as Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems (ANFIS) and Particle Swarm Optimization (PSO) to enhance predictive accuracy and streamline operational efficiency. Advanced electrode materials, including graphene-based composites and iron-doped catalysts, are incorporated to improve biofilm formation, conductivity, and oxygen reduction kinetics. Experimental validation is performed using dynamic multi-objective optimization models, where real-time monitoring tools and deep learning algorithms identify critical parameters influencing power density and chemical oxygen demand (COD) removal.

A 15-liter MFC system is modeled and optimized to assess power density trends, total cell potential, and substrate dynamics. Sensitivity analysis highlights the influence of key factors such as substrate concentration, electrode surface area, and environmental conditions. Integration of predictive modeling using MATLAB and AI techniques achieves a significant increase in energy generation efficiency (up to 30% compared to previous studies), validating the model's robustness. This study underscores the transformative role of computational tools and material innovations in enhancing MFC performance, providing a scalable and sustainable roadmap for future applications in wastewater treatment and renewable energy production.

मुख्य शब्द : सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाएँ, कृत्रिम बुद्धिमत्ता, मशीन लर्निंग, अनुकूलन, अपशिष्ट जल शोधन, जैव-वैद्युत रासायनिक प्रणालियाँ, सीओडी निष्कासन।

Keywords : Microbial Fuel Cells, Artificial Intelligence, Machine Learning, Optimization, Wastewater Treatment, Bio-electrochemical Systems, COD Removal.

परिचय

सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका एक उन्नत प्रकार की वैद्युत-रासायनिक कोशिका है, जिसमें विशिष्ट रूप से संशोधन किए गए हैं। यह एक नवीकरणीय एवं सतत ऊर्जा स्रोत है, जिसे हाल ही में काफी ध्यान प्राप्त हुआ है। सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका एक जैव-रासायनिक रिएक्टर के रूप में कार्य करती है, जिसमें सूक्ष्मजीवों की सहायता से रासायनिक ऊर्जा को विद्युत ऊर्जा में रूपांतरित किया जाता है [1]। MFC प्रक्रिया की प्रारंभिक अवस्था में बैक्टीरिया अपशिष्ट जल की भूमिका निभाते हैं। यह एक रेडॉक्स अभिक्रिया को प्रारंभ करता है, जिसमें सबस्ट्रेट के ऑक्सीकरण के कारण प्रोटॉन

तथा इलेक्ट्रॉनों का निर्माण होता है। इसके पश्चात प्रोटॉन, प्रोटॉन एक्सचेंज मेम्ब्रेन (PEM) के माध्यम से कैथोड की ओर बढ़ते हैं, जबकि इलेक्ट्रॉन एक बाह्य परिपथ (external circuit) के माध्यम से प्रवाहित होते हैं। सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाएँ दो प्रकार की होती हैं: (I) एक-कक्षीय MFC तथा (II) द्वि-कक्षीय MFC [2]। एक-कक्षीय MFC में कैथोड हेतु पृथक कक्ष नहीं होता और यह वायुमंडल के संपर्क में रहता है, जबकि द्वि-कक्षीय MFC में कैथोड और एनोड को अलग करने हेतु प्रोटॉन एक्सचेंज मेम्ब्रेन (PEM) का उपयोग किया जाता है [3]।

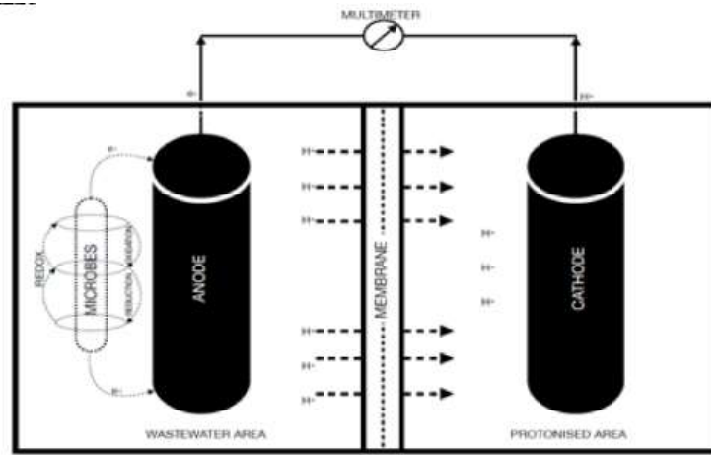


Fig. 1. Microbial Fuel Cell Outline.

सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) के मुख्य घटकों में एनोड, कैथोड तथा झिल्ली (मेम्ब्रेन) सम्मिलित हैं। सूक्ष्मजीव कोशिका का रेखाचित्रात्मक चित्रण चित्र 1 में प्रस्तुत किया गया है। इन प्रमुख घटकों की संरचना कोशिका के समग्र प्रदर्शन पर निर्णायक प्रभाव डालती है। एनोड तथा कैथोड की कार्यकुशलता को अनुकूलित करने हेतु विभिन्न प्रकार के सबस्ट्रेट्स का उपयोग किया जाता है [4]। कोशिका के भीतर विद्यमान जीवाणु समुदाय उत्पन्न विद्युत की मात्रा तथा अपशिष्ट जल के निष्कासन की दर को काफी प्रभावित करता है। कैथोड सामग्री जैसे कि ग्रेफाइट प्लेट, रॉड, कार्बन पेपर तथा कपड़ा प्रायः कार्बन-आधारित पदार्थों से बनी होती हैं, जिन्हें जीवाणुओं द्वारा जैवफिल्म निर्माण को प्रोत्साहित करने तथा पर्याप्त चालकता (conductivity) प्रदर्शित

करने की क्षमता रखनी चाहिए। ऑक्सीजन अपचयन अभिक्रिया (Oxygen Reduction Reaction – ORR) को बेहतर बनाने हेतु प्लेटिनम-लेपित टाइटेनियम एवं ब्लैक प्लेटिनम जैसे उत्प्रेरक पदार्थों का उपयोग किया जाता है। एनोड पक्ष पर, सेल्युलोज, ग्लूकोज, सुक्रोज, फ्रुक्टोज, जायलोज और एथेनॉल जैसे अतिरिक्त सबस्ट्रेट्स का समावेश किया जाता है। ये सबस्ट्रेट्स जीवाणुओं को पोषण प्रदान करते हैं और अक्सर संरचनात्मक रूप से जटिल होते हैं। सर्वोत्तम दक्षता प्राप्त करने के लिए एनोड पर एक अनवायवीय (anaerobic) वातावरण बनाए रखा जाता है, जो विद्युत सक्रिय जैवफिल्म (electroactive biofilm) के निर्माण की अनुमति देता है, जिससे जैविक पदार्थ विद्युत ऊर्जा में परिवर्तित हो पाता है।

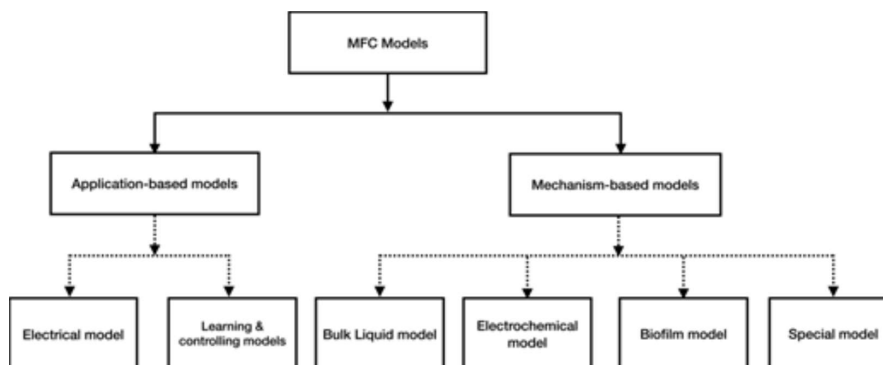
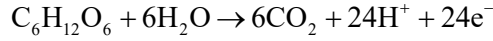


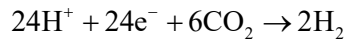
Fig. 2. Classification of Microbial Fuel cell based on Model.

ग्लूकोज अभिक्रिया में एनोडिक फीड इस प्रकार प्रदत्त है:

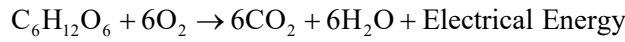
एनोड अभिक्रिया:



कैथोड अभिक्रिया:



समग्र अभिक्रिया:



सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) के लिए पहला गणितीय मॉडल झांग और हॉल्मे द्वारा विकसित किया गया था [5]। MFC के प्रदर्शन को बेहतर बनाने के लिए मॉडलिंग प्रक्रिया के दौरान प्रणालियों का निर्माण और सूक्ष्म समायोजन अत्यंत महत्वपूर्ण होता है, जो अनुभवजन्य आंकड़ों पर आधारित होता है। MFC मॉडलिंग को मुख्य रूप से दो प्रकारों में वर्गीकृत किया जा सकता है: प्रक्रिया-आधारित मॉडल और अनुप्रयोग-आधारित मॉडल। प्रक्रिया-आधारित मॉडल अभिक्रिया प्रक्रियाओं को समझने में सहायक होते हैं, जैसे कि धारा और विभव की गतिकी, सबस्ट्रेट उपभोग दर, और जैवफिल्म चक्र [6]। दूसरी ओर, अनुप्रयोग-आधारित मॉडल अधिगम और नियंत्रण पर केंद्रित होते हैं, और विशेष रूप से विद्युत मॉडलिंग में विशेषज्ञता रखते हैं। अधिगम और नियंत्रण की दृष्टि से, उद्देश्य होता है आउटपुट और कुलॉम्बिक दक्षता का अनुकूलन, अक्सर बिना पूरी अभिक्रिया प्रक्रिया को पूरी तरह से ध्यान में रखे। चित्र 3 में मॉडलिंग के आधार पर सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाओं के वर्गीकरण का दृश्यात्मक निरूपण प्रस्तुत किया गया है।

सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) एक ऐसा यंत्र है जो ऊर्जा के कुशल उपयोग के माध्यम से ऊर्जा

उत्पन्न करता है। यद्यपि प्रक्रिया-आधारित मॉडल परिचालन स्थितियों और विन्यासों का अनुकूलन करके पर्याप्त विद्युत उत्पादन प्राप्त कर सकते हैं, परंतु इनमें गणना में अधिक समय लगता है और ये व्यावहारिक रूप से उपयुक्त नहीं होते। यह शोध पत्र अनुप्रयोग-आधारित मॉडलों के उपयोग द्वारा मॉडलिंग पर केंद्रित है [7]। MFC मॉडलिंग में गणना समय कम होता है और यह विशिष्ट अनुप्रयोग क्षेत्रों पर केंद्रित होती है। अनुप्रयोग-आधारित मॉडल दो प्रकार के होते हैं: विद्युत मॉडल और अधिगम एवं नियंत्रण मॉडल। सटीक मॉडलिंग परिणाम प्राप्त करने के लिए बड़ी मात्रा में प्रायोगिक आंकड़ों की आवश्यकता होती है। विद्युत मॉडल उपयुक्त विद्युत पैरामीटरों का उपयोग करते हैं और आवश्यक घटकों को सम्मिलित करने वाले सरल तुल्य परिपथ मॉडलों (equivalent circuit models) पर आधारित होते हैं। दूसरी ओर, अधिगम एवं नियंत्रण मॉडल तीन मूलभूत घटनाओं – रासायनिक, जैविक, और विद्युत – को समाहित करते हैं और MFC मॉडलिंग में एक बहुविषयक दृष्टिकोण अपनाते हैं।

सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका के भीतर घटित होने वाली आंतरिक अभिक्रियाओं को चित्र 3 में स्पष्ट रूप से दर्शाया गया है।

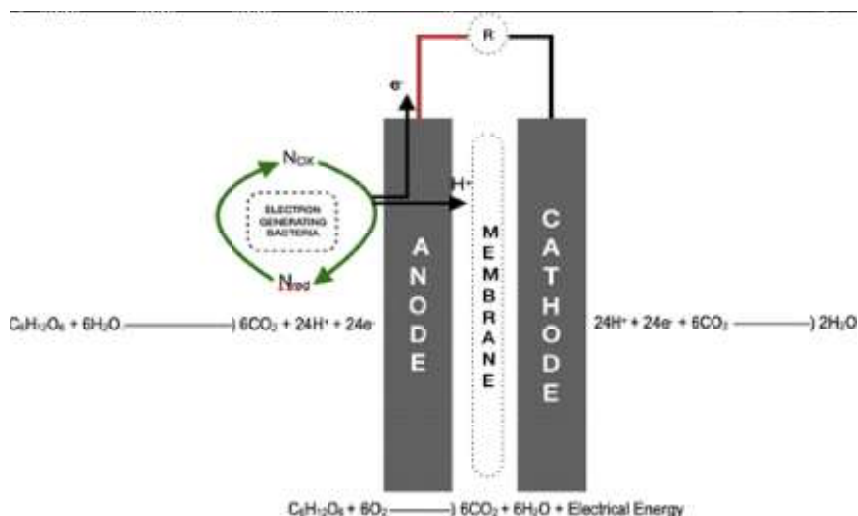


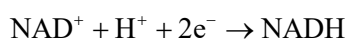
Fig. 3. Internal Reaction in Microbial Fuel Cell

सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका का मॉडलिंग सिद्धांत

अपशिष्ट उपचार प्रणालियों के समकालीन परिदृश्य को अब सततता की ओर बढ़ते रुझान द्वारा परिभाषित किया जा रहा है, जिसमें जैविक उपचार संरचना के भीतर तकनीकी प्रगति के एकीकरण पर बल दिया जा रहा है। अपशिष्ट जल उपचार में जैविक प्रौद्योगिकियों के समावेश के माध्यम से अपशिष्ट ऊर्जा को विद्युत ऊर्जा में रूपांतरित करना संभव हो जाता है। विशेष रूप से, सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाएँ (MFCs) दक्षता के दृष्टिकोण से अन्य वैकल्पिक जैविक तकनीकों की तुलना में बेहतर प्रदर्शन करती हैं। MFC को अन्य अपशिष्ट जल उपचार विधियों

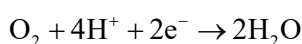
की तुलना में अनुकूल बनाने वाले प्रमुख कारक हैं – विद्युत उत्पादन और प्रदर्शन मूल्यांकन। एनोड पक्ष पर, अनवायवीय वातावरण जैविक रूप से अपघटनीय पदार्थों को विद्युत ऊर्जा में रूपांतरित करने की प्रक्रिया के लिए आवश्यक होता है। MFC के भीतर संपूर्ण अभिक्रिया स्वतःस्फूर्त रूप से होती है और इसमें विद्युत उत्पादन हेतु अनुकूल ऊष्मागतिकी होती है। इसमें NADH एक इलेक्ट्रॉन दाता के रूप में कार्य करता है, जबकि ऑक्सीजन अंतिम इलेक्ट्रॉन ग्राही के रूप में कार्य करती है। Nernst समीकरण का उपयोग करके सैद्धांतिक रूप से उत्पादित विभव की गणना की जा सकती है।

एनोड अभिक्रिया:



$$E_{\text{and}}^{01} = E_0 \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{[\text{NADH}]}{[\text{NAD}^+][\text{H}^+]^2} \right) = -0.32\text{V}$$

कैथोड अभिक्रिया:



$$E_{\text{and}}^{01} = E_0 \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{[1]}{[\text{O}_2]^{0.5} [\text{H}^+]^2} \right) = -0.84\text{V}$$

$$E_{\text{tot}}^{01} = E_{\text{cat}}^{01} = E_{\text{and}}^{01} = 0.84 - (-0.32) = 1.16V$$

सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) में बाहरी सबस्ट्रेट को सम्मिलित करने से कोशिका के समग्र प्रदर्शन में सुधार की संभावना होती है। इलेक्ट्रोरासायनिक मध्यस्थों (electrochemical mediators) का रेडॉक्स अभिक्रिया विभव मान जीवाणु कोशिकाओं के NADH और कोशिका के एनोडिक भाग के मध्य पारस्परिक क्रिया द्वारा निर्धारित किया जा सकता है। यह रेडॉक्स अभिक्रिया घटकों के समवर्ती ऑक्सीकरण और अपचयन को दर्शाती है, जो पुनरुत्पादन प्रक्रियाओं के साथ संपन्न होती है [8]। MFC के एनोडिक पक्ष में जटिल कार्बोहाइड्रेटों का उपयोग ईंधन के रूप में किया जाता है। इन ईंधनों की मात्रा कोशिका के कुल विद्युत उत्पादन को निर्धारित करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाती है। जटिल कार्बोहाइड्रेटों में से सेल्युलोज, सुक्रोज, फ्रुक्टोज, ग्लूकोज, जायलोज और एथेनॉल सबसे सामान्य रूप से प्रयुक्त सबस्ट्रेट्स हैं। हालाँकि, MFC की विशिष्ट धारा घनता (specific current density) अभी भी

अनिश्चित बनी हुई है, जिसका प्रमुख कारण उच्च आंतरिक प्रतिरोध (internal resistance) है, जो प्रणाली की विद्युत उत्पादन क्षमता को गंभीर रूप से प्रभावित करता है। यह आंतरिक प्रतिरोध कई कारकों से जुड़ा होता है, जैसे कि एनोड और कैथोड पर प्रयुक्त सामग्री, प्रोटॉन एक्सचेंज मेम्ब्रेन (PEM) की संरचना, तथा सबस्ट्रेट फीड की सांद्रता और गति।

पिंटो केस अध्ययन

यह अध्ययन सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाओं (MFCs) के लिए विभिन्न मॉडलिंग तकनीकों का मूल्यांकन करने का उद्देश्य रखता है। MFC के प्रदर्शन को बेहतर बनाना और प्रणाली के कुशल डिजाइन एवं अनुकूलन को सक्षम बनाना अत्यधिक महत्व रखता है [9]।

यह अध्ययन सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाओं (MFCs) हेतु विभिन्न मॉडलिंग विधियों के मूल्यांकन पर केंद्रित है। MFC के कार्यक्षमता में सुधार तथा प्रणाली के प्रभावी डिजाइन एवं अनुकूलन को सक्षम बनाना इस क्षेत्र में विशेष महत्व रखता है [9]।

MFC के लिए द्रव्यमान संतुलन समीकरण

एनोडिक कक्ष के लिए द्रव्यमान संतुलन समीकरण

$$\frac{dG}{dt} = q_e x_e - q_n x_n + dG \quad \dots(1)$$

जहाँ,

q_e = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव की उपभोग दर

q_n = गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव की उपभोग दर

x_e = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव की सांद्रता

x_n = गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव की सांद्रता

d = पतलीकरण दर (dilution rate), $= \frac{F_R}{V}$

F_R = फीड फ्लो दर

V = आयतन (वॉल्यूम)

G = एनोडिक कक्ष में ग्लूकोज की सांद्रता

$$\frac{dx_e}{dt} = \mu_e x_e - Dd_e x_e + \beta_1 x_n \quad \dots(2)$$

μ_e = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले बैक्टीरिया की वृद्धि दर

x_e = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले बैक्टीरिया की सांद्रता

Dd_e = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले बैक्टीरिया की क्षय दर (decay rate)

$$\frac{dx_n}{dt} = \mu_n x_n - Dd_n x_n + \beta_1 x_e \quad (3)$$

μ_n = वृद्धि के कारण जैवफिल्म में बैक्टीरिया की वृद्धि

x_n = गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले बैक्टीरिया की सांद्रता

Dd_n = गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले बैक्टीरिया की क्षय दर

जैसे ही जैवफिल्म की मोटाई स्थिर अवस्था (steady state) के समीप पहुँचती है, उस स्थिति को स्थायी चरण (stationary phase) मानते हुए जैवफिल्म प्रतिधारण (biofilm retention) के लिए निम्नलिखित समीकरण प्राप्त किया जा सकता है:

$$\beta_1 = 0 \quad (4)$$

अथवा,

$$\beta_1 = \frac{(\mu_e - Dd_e)x_e + (\mu_n - Dd_n)x_n}{x_e + x_n} \quad (5)$$

यदि $x_e + x_n \geq x_{max1}$

x_{max1} = जैवफिल्म की पहली परत में अधिकतम जैवभार (biomass) की सांद्रता

इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों के लिए द्रव्यमान संतुलन समीकरण:

$$N_{TOTAL} = N_{Red} + N_{OX} \quad (6)$$

N_{TOTAL} = प्रति सूक्ष्मजीव कुल मध्यस्थ अणु (arbitrator) का अंश.

N_{Red} = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव प्रति, अपचयित मध्यस्थ का अंश

N_{OX} = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव प्रति, ऑक्सीकरण अवस्था में मध्यस्थ का अंश

$$\frac{dN_{OX}}{dt} = -Eq_{ac} + \frac{cI_{MFC}}{Vx_e} \delta F \quad (7)$$

E_a = मध्यस्थ (arbitrator) की उपज

q_e = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाला सूक्ष्मजीव

ε = मध्यस्थ का मोलर द्रव्यमान

I_{MFC} = सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) द्वारा उत्पन्न धारा

δ = स्थानांतरित इलेक्ट्रॉनों की संख्या

F = फ़ैराडे नियतांक (प्रत्येक मोल इलेक्ट्रॉन के लिए चार्ज)

गतिक समीकरण

MFC के लिए गतिक समीकरण नीचे प्रस्तुत है:

$$\mu_e = \mu_{max_e} \frac{G}{H_{se} + G} \frac{N_{0X}}{K_N + N_{0X}} \quad (8)$$

$$\mu_n = \mu_{max_n} \frac{G}{H_{sa} + G} \quad (9)$$

$$q_e = q_{max_e} \frac{G}{H_{se} + G} \frac{N_{0X}}{K_N + N_{0X}} \quad (10)$$

$$q_n = q_{max_n} \frac{G}{H_{sn} + G} \quad (11)$$

μ_{max_e} = उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों की अधिकतम वृद्धि दर

μ_{max_n} = गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों की अधिकतम वृद्धि दर

q_{max_e} = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों की अधिकतम उपभोग दर

q_{max_n} = गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों की अधिकतम उपभोग दर

H_s = अर्ध-संतृप्ति नियतांक (Half-saturation constant)

विद्युत-रासायनिक समीकरण

नीचे उल्लिखित समीकरण का उपयोग करके MFC की धारा (current) निर्धारित की गई:

$$I_{MFC} = \frac{V_{CCP} - \frac{RT}{F} \ln \frac{N_{TOTAL}}{N_{red}}}{R_{int} + R_{ext}} \quad (12)$$

V_{CCP} = क्लोज़्ड सर्किट वोल्टेज

R_{int} = आंतरिक प्रतिरोध

R_{ext} = बाह्य प्रतिरोध.

MFC का वोल्टेज

$$V = CCP - \eta_{act} - \eta_{ohm} - \eta_{concen} \quad (13)$$

दिए गए संदर्भ में, CCP का आशय क्लोज-सर्किट वोल्टेज से है, जो उस वोल्टेज को दर्शाता है जब परिपथ में कोई धारा प्रवाहित नहीं हो रही होती। कुल सक्रियण हानि (μ_{act}) के दो उप-घटक होते हैं – एनोड सक्रियण हानि और कैथोड सक्रियण हानि। वोल्टेज सक्रियण हानियों की गणना टैफल समीकरण (Tafel's equation) के माध्यम से की जा सकती है, जो सक्रियण अधिविभव (activation overpotential) और धारा घनत्व के बीच संबंध स्थापित करता है। इसके अतिरिक्त, दो अन्य प्रकार की हानियाँ भी होती हैं – μ_{ohm} , जो कि ओमिक हानि (ohmic loss) को दर्शाता है, और μ_{concen} , जो सांद्रण हानि (concentration loss) को सूचित करता है [10]।

$$\eta_{act} = \eta_{ca} + \eta_{an} \quad (14)$$

$$\eta_{an} = b_{an} * \ln \frac{i}{i_0} \quad (15)$$

$$\eta_{ca} = b_{ca} * \ln \frac{i}{i_0} \quad (16)$$

यहाँ b_{an} , b_{ca} , i_0 और I क्रमशः एनोड का टैफल ढलान (V), कैथोड का टैफल ढलान (V), विनिमय धारा (A), और धारा (A) को दर्शाते हैं। सक्रियण हानि (activation loss) को समीकरण (14) में समीकरण (15) एवं (16) प्रतिस्थापित करके प्राप्त किया जाता है।

$$\eta_{act} = b_{ca} * \ln \frac{i}{i_0} + b_{an} * \ln \frac{i}{i_0} \quad (17)$$

$$\eta = b_{act} * \ln \frac{i}{i_0} \quad (18)$$

ओमिक हानि को समीकरण (19) द्वारा निरूपित किया जाता है

$$\eta_{ohm} = R_{ohmic} i \quad (19)$$

Rohmic (Ω) MFC में ओमिक प्रतिरोध को दर्शाता है, जैसा कि समीकरण (19) में प्रदर्शित किया गया है। सांद्रण हानि (concentration loss) का निर्माण समीकरण (15) के अनुसार किया गया है।

$$\eta_{concen} = C * \ln \frac{i_i}{i_i - i} \quad (20)$$

समीकरण (20) में, सांद्रण हानि की ढलान (V) और सीमा धारा (A) को क्रमशः C और I_i द्वारा दर्शाया गया है। सीमा धारा (limiting current) MFC में प्राप्त की जा सकने वाली अधिकतम धारा होती है। सामान्य ध्रुवीकरण समीकरण (general polarization equation) को समीकरण (18), (19) एवं (20) को समीकरण (13) में प्रतिस्थापित कर प्राप्त किया गया है।

$$V = CCP - b_n * \ln \frac{i}{i_0} - R_{ohmic} i - C * \ln \frac{i_i}{i_i - i} \quad (21)$$

समीकरण (21) अंतिम समीकरण था जिसे ध्रुवीकरण वक्र (polarisation curve) के मॉडलिंग के लिए उपयोग में लिया गया। इस समीकरण में पाँच अज्ञात पैरामीटर थे – B, io, Rohmic, C, और Ii। इन पैरामीटरों को वोल्टेज-करंट के प्रायोगिक डेटा पर आधारित करते हुए अनुकूलन एल्गोरिथ्म (optimization

$$RES = \sum \sqrt{\frac{(V_{Model} - V_{Ex})}{V_{Ex}}} \quad (22)$$

ध्रुवीकरण वक्र (polarization curve) का मॉडल तैयार करने के लिए MATLAB सॉफ्टवेयर का उपयोग किया गया, जिसमें पैरामीटर मूल्यांकन हेतु खोज डोमेन को एक स्वीकार्य सीमा तक सीमित किया गया। अज्ञात पैरामीटरों को समायोजित करने के लिए जेनेटिक एल्गोरिथ्म (Genetic Algorithm) का उपयोग किया गया। इस एल्गोरिथ्म में 1,000,000 व्यक्तियों की जनसंख्या, 5% एलीट गणना (elite count), और 0.8 क्रॉसओवर मान (crossover value) निर्धारित किया गया था। इस विधि ने अनुकूलन प्रक्रिया को सरल बनाया और मॉडल के लिए सर्वोत्तम पैरामीटरों की पहचान को संभव बनाया [11]।

परिणाम और चर्चा

प्रकरण अध्ययन

पिंटो द्वारा किए गए एक केस अध्ययन में, पूर्व उल्लिखित मॉडल को कुछ पैरामीटर समायोजनों के साथ मॉडल सत्यापन हेतु लागू किया गया। सबस्ट्रेट, इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों तथा गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों के मूल पैरामीटर मान क्रमशः 450 mg/L, 80 mg/L और 5 mg/L निर्धारित किए गए थे। यह सिमुलेशन 8 दिनों तक चला और समीकरणों तथा पैरामीटरों का विश्लेषण MATLAB सॉफ्टवेयर की सहायता से किया गया, जिन्हें बाद में हल किया गया।

algorithm) के माध्यम से समायोजित किया गया। अनुकूलन एल्गोरिथ्म ने उद्देश्य फलन (objective function) को न्यूनतम करते हुए अज्ञात पैरामीटरों का समायोजन किया। वर्तमान अध्ययन में पैरामीटरों के मूल्यांकन हेतु सापेक्ष वर्ग त्रुटि (RSE) को उद्देश्य फलन के रूप में प्रयोग किया गया।

चित्र 4 में समय एवं दिनों के साथ दर्ज की गई सांद्रताओं को प्रदर्शित किया गया है।

चित्र 4a में सांद्रता परिवर्तनों को दर्शाया गया है, जिसमें प्रतिक्रिया के प्रारंभिक चरणों के दौरान सबस्ट्रेट (S) की सांद्रता में क्रमिक गिरावट देखी गई। छठवें दिन तक यह सांद्रता घटकर 275 mg/L हो गई। इसके पश्चात थोड़ी वृद्धि हुई और अध्ययन के अंत (8वें दिन) तक यह 280 mg/L तक पहुँच गई, जो अपघटन दर में कमी को इंगित करता है।

चित्र 4b इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों की सांद्रता में उतार-चढ़ाव को दर्शाता है। इनकी सांद्रता में स्पष्ट वृद्धि देखी गई, जो 7वें दिन तक 485 mg/L हो गई, इसके बाद यह शेष अवधि के लिए स्थिर बनी रही।

चित्र 4c गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों की सांद्रता में हुए परिवर्तनों को दर्शाता है। छठे दिन तक इसमें तीव्र वृद्धि हुई और सांद्रता 11.2 mg/L तक पहुँच गई, जिसके बाद 8वें दिन तक इसमें तेजी से गिरावट आई।

अंततः, चित्र 4d में MFC मॉडल का वोल्टेज (E-cell) प्रस्तुत किया गया है। प्रारंभ में E-cell में वृद्धि देखी गई, जो 5 दिनों के बाद 0.38V तक पहुँच गया। इसके पश्चात यह मान केस स्टडी के अंत तक स्थिर बना रहा।

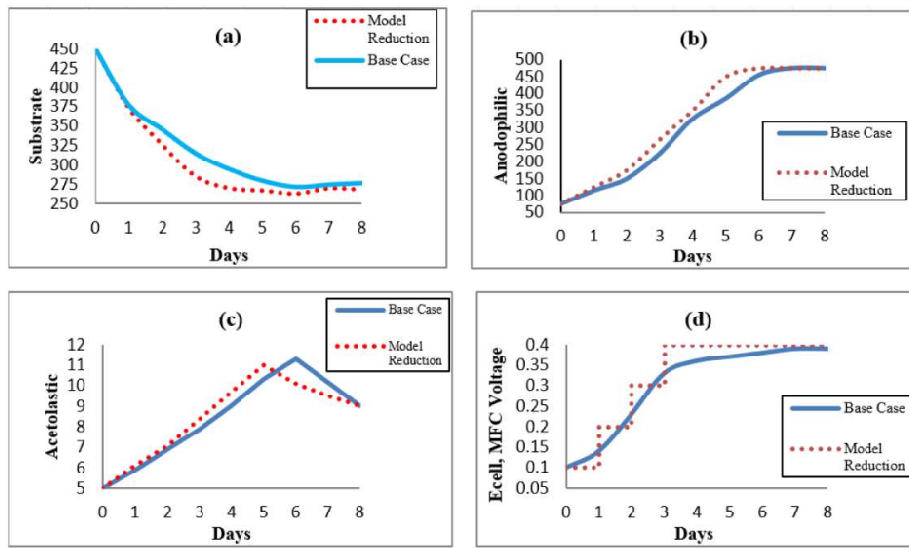


Fig. 4. (a) Substrate concentrate, (b) Anodophilie (Electron generating microorganism) concentration, (c) Acetolastic (Non-electron generating microorganism) concentration, (d) MFC Voltage

निदर्श प्राचल

चित्र 5a अधिकतम वृद्धि दर और अभिक्रिया दर के बीच के संबंध तथा उनके द्वारा उत्पन्न धारा पर पड़ने वाले प्रभाव को दर्शाता है। ग्राफ यह स्पष्ट करता है कि अधिकतम धारा उत्पादन के लिए सबसे अनुकूल पैरामीटर इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों की

अधिकतम वृद्धि दर और उससे संबद्ध अभिक्रिया दर हैं। हालाँकि, जब बात गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीवों की होती है, तो इन पैरामीटरों में परिवर्तन का उत्पन्न धारा पर कोई प्रभाव नहीं देखा गया।

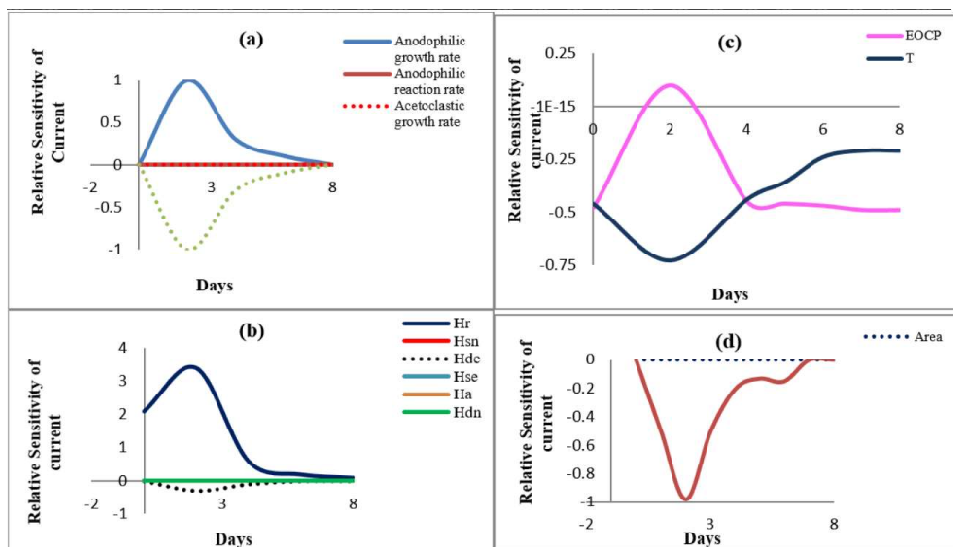


Fig. 5. Current relative sensitivity with respect to: (a) Maximum growth rate and reaction rates, (b) Half rate and decay rates, (c) Operating parameters, (d) Design parameters

हाफ रेट और सूक्ष्मजीव क्षय दर:

धारा (current) पर हाफ रेट तथा सूक्ष्मजीवों के क्षय प्रभाव को चित्र 5b में दर्शाया गया है।

H_A = मध्यस्थ का अर्ध-दर नियतांक

H_R = प्रतिरोध वक्र की तीव्रता (ढलान)

H_{Sc} = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव का अर्ध-दर नियतांक

H_{Sn} = गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव का अर्ध-दर नियतांक

H_{dc} = इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव का क्षय नियतांक

H_{dn} = गैर-इलेक्ट्रॉन उत्पन्न करने वाले सूक्ष्मजीव का क्षय नियतांक

परिचालन मानदंड

चित्र 5c विभिन्न परिचालन मानदंडों (operating parameters) के धारा उत्पादन (current output) पर प्रभाव को दृश्य रूप से प्रदर्शित करता है। अध्ययन के निष्कर्ष इस ओर संकेत करते हैं कि क्लोज़्ड-सर्किट वोल्टेज (V_{CCP}) और सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) का तापमान (T), धारा उत्पादन पर महत्वपूर्ण प्रभाव डालते हैं। हालाँकि, कुल मध्यस्थ भार प्रतिशत (N_{TOTAL}), दाब (P) और आवक प्रवाह (Fin) का धारा उत्पादन पर कोई विशेष प्रभाव नहीं देखा गया, जैसा कि मोलेटा एवं अन्य द्वारा किए गए अध्ययन में पाया गया था [12]।

डिजाइन मानदंड

चित्र 5d यह दर्शाता है कि एनोडिक कक्ष का आयतन (V) और एनोड की सतह क्षेत्रफल (A), धारा

उत्पादन को कैसे प्रभावित करते हैं। परिणामों से स्पष्ट होता है कि एनोडिक कक्ष का आयतन एक महत्वपूर्ण कारक हो सकता है, किंतु यदि प्रणाली में कार्बनिक यौगिकों की मात्रा अधिक हो, तो यह प्रभाव सीमित हो सकता है। दूसरी ओर, जेंग एवं अन्य द्वारा किए गए एक अध्ययन में यह निष्कर्ष निकाला गया कि एनोड की सतह क्षेत्रफल (A) का उत्पन्न धारा पर अत्यल्प प्रभाव पड़ता है [13]।

MFC प्रमाणीकरण

एक प्रयोग किया गया ताकि पिंटो एवं अन्य द्वारा प्रस्तावित एक पूर्वानुमान डेटा मॉडल की सटीकता का परीक्षण किया जा सके। इस प्रयोग में एकल बैच, ग्लूकोज-आधारित सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) से प्राप्त डेटा का उपयोग करते हुए उन प्रमुख पैरामीटरों की पहचान की गई, जो MFC के प्रदर्शन को प्रभावित करते हैं।

संवेदनशीलता विश्लेषण (sensitivity analysis) किया गया, जिसमें पिंटो के मॉडल में कुछ पैरामीटरों को संशोधित किया गया, जबकि अन्य को स्थिर रखा गया [14]। किए गए परिवर्तनों को सिमुलेशन में लागू कर वास्तविक प्रयोग के परिणामों से तुलना की गई।

चित्र 6 में समय के साथ Chemical Oxygen Demand (COD) के रूप में मापी गई ग्लूकोज की गिरावट को दर्शाया गया है। ग्राफ यह स्पष्ट रूप से दिखाता है कि समय के साथ ग्लूकोज की सांद्रता में उल्लेखनीय कमी आई, जिससे प्रारंभिक और अंतिम COD मानों के बीच स्पष्ट अंतर देखा गया।

विशेष रूप से, प्रारंभिक COD मान 1000 mg/l और अंतिम COD मान 115 mg/l था। चित्र 6 सिमुलेटेड और प्रायोगिक COD परिणामों की स्पष्ट तुलना प्रस्तुत करता है।

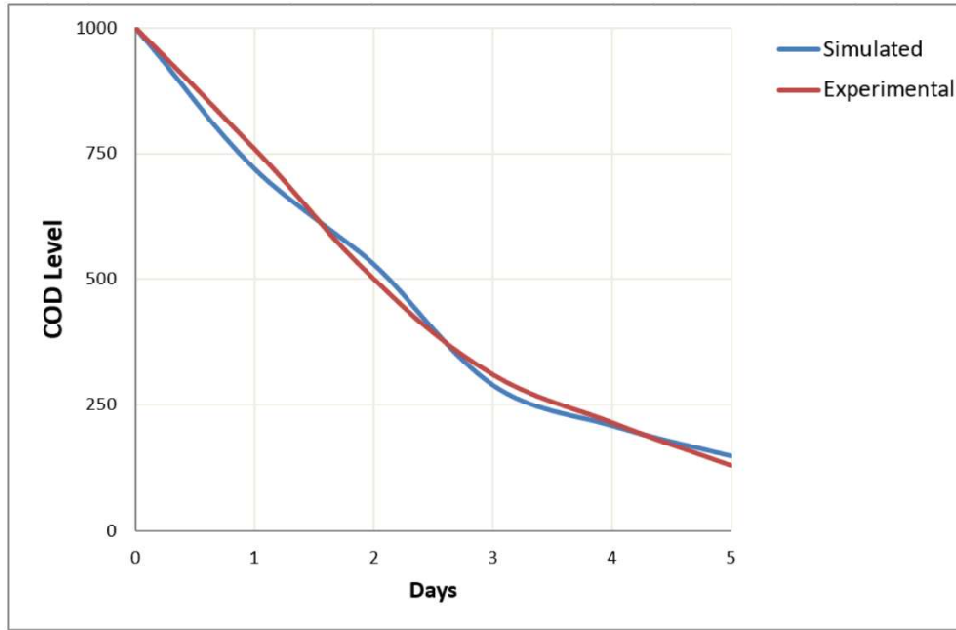


Fig. 6. Behaviors of COD for simulated results and experimental data.

मॉडल सरलीकरण

संवेदनशीलता विश्लेषण से प्राप्त परिणामों का उपयोग MFC के लिए एक समीकरण तथा एक सरलीकृत विश्लेषणात्मक समीकरण विकसित करने हेतु किया

गया। इन समीकरणों को अंतिम परिणाम प्राप्त करने के लिए लागू किया गया।

मान लेते हुए कि H_{se} , H_{sn} , H_{de} , H_{dn} शून्य हैं, निम्नलिखित समीकरण प्राप्त हुए।

$$\mu_c = \mu_{maxn} \quad (23)$$

$$q_c = q_{maxn} \quad (24)$$

यदि $X_c + X_n < X_{max1}$

$$\frac{dG}{dT} = -q_{maxc} \frac{N_{0X}}{H_A + N_{0X}} \frac{G}{H_{sc} + G} X_c - q_{maxn} X_n + dG \quad (25)$$

$$\frac{dX_c}{dT} = -\mu_{maxc} \frac{N_{0X}}{H_A + N_{0X}} \frac{G}{H_{sc} + G} X_c \quad (26)$$

$$\frac{dX_n}{dT} = \mu_{maxc} X_n \quad (27)$$

$$X_n = X_{n,0} e^{\mu_{maxn} t} \quad (28)$$

$$0 = -E_a q_{maxc} + \frac{N_{0X}}{H_A + N_{0X}} \frac{CI_{MFC}}{V X_c \delta F} \quad (29)$$

$$I_{MFC} = V_{CCP} - \frac{\frac{RT}{F} \ln \frac{N_{TOTAL}}{N_{red}}}{R_{int} + R_{ext}} \quad (30)$$

यदि $X_e + X_n > X_{max1}$

$$\frac{dX_n}{dt} = \frac{-\mu_{maxe} - \mu_{maxn}}{X_{max1}} X_e X_n \quad (31)$$

$$\frac{dX_e}{dt} = \frac{\mu_{maxe} - \mu_{maxn}}{X_{max1}} X_e X_n \quad (32)$$

$$\frac{X_e}{X_{max1}} = \frac{X_{eq} e^{\mu_{maxe} - \mu_{maxn} t}}{(X_{max1} - X_{eo} + X_{eo}) e^{\mu_{maxe} - \mu_{maxn} t}} \quad (32)$$

चित्र 4 हमारे मॉडल में उपर्युक्त समीकरणों के अनुप्रयोग एवं परिणामों को प्रदर्शित करता है, जहाँ सरलीकृत मॉडल और पूर्ण मॉडल के बीच उल्लेखनीय समानता देखी गई है। यह सफल समायोजन (fitting) इस अध्ययन में विकसित किए गए समीकरणों की सटीकता और प्रभावशीलता की पुष्टि करता है।

सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) की ऊर्जा उत्पादकता का अनुकूलन

ऊर्जा उत्पादकता बढ़ाने के लिए अगला चरण सबसे अनुकूल बाह्य प्रतिरोध (external resistance) का निर्धारण करना था। इसके लिए हमने प्रयोग किए और परिणामों का अनुकूलन करते हुए शक्ति उत्पादन के अधिकतम योग को तालिकाबद्ध किया। बाह्य प्रतिरोध को समायोजित करके सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिका (MFC) की अधिकतम उत्पादकता प्राप्त करने हेतु MATLAB का उपयोग किया गया।

इस अनुकूलन प्रक्रिया के परिणामस्वरूप हम 0.38V की अधिकतम विभव क्षमता वाली MFC तैयार करने में सफल हुए।

निष्कर्ष

संवेदनशीलता विश्लेषण के परिणामों के आधार पर, सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाओं (MFCs) के लिए सरल विश्लेषणात्मक समीकरण विकसित किए गए हैं,

जो जैव-वैद्युत रासायनिक प्रणालियों के क्षेत्र में एक महत्वपूर्ण प्रगति का संकेत देते हैं।

प्रथमतः, सूक्ष्म शोध एवं संवेदनशीलता विश्लेषण ने MFC के व्यवहार की जटिल गतिशीलता को स्पष्ट किया है, जिसके फलस्वरूप पूर्वानुमानात्मक समीकरण विकसित किए गए हैं जो मॉडल को सरल बनाते हैं और इसकी पूर्वानुमान सटीकता में सुधार करते हैं। ये समीकरण MFC प्रदर्शन को प्रभावित करने वाले कारकों की महत्वपूर्ण अंतर्दृष्टि प्रदान करते हैं और परिचालन मानदंडों के अनुकूलन के लिए एक व्यावहारिक उपकरण के रूप में कार्य करते हैं।

द्वितीयतः, पिंटो एवं अन्य (2010) द्वारा प्रस्तावित एक पूर्वानुमान मॉडल को प्रायोगिक आंकड़ों के माध्यम से मान्य करना इस बात की पुष्टि करता है कि यह मॉडल MFC व्यवहार को सटीक रूप से प्रतिबिंबित करता है। इसके पश्चात् MATLAB का उपयोग करते हुए किए गए अनुकूलन ने MFC प्रणाली में ऊर्जा उत्पादकता अधिकतम करने हेतु इष्टतम स्थितियों की पहचान की।

अनुभवजन्य डेटा – विशेष रूप से समय के साथ सबस्ट्रेट सांद्रता में देखी गई कमी – को मॉडल में सम्मिलित कर विकसित समीकरणों की पूर्वानुमान क्षमताओं की पुष्टि की गई है। इसके अतिरिक्त, अनुकूलन परिणाम यह दर्शाते हैं कि प्रणालीगत समायोजन के

माध्यम से ऊर्जा उत्पादन दक्षता को और अधिक बढ़ाया जा सकता है।

ये निष्कर्ष MFCs में संरचनात्मक घटकों तथा सूक्ष्मजीव पारस्परिक क्रियाओं को परिष्कृत करने के महत्त्व को रेखांकित करते हैं, जिससे उनकी विद्युत घनता (power density) और नवीकरणीय ऊर्जा स्रोत के रूप में प्रतिस्पर्धात्मकता में वृद्धि की जा सकती है। साथ ही, उन्नत संगणकीय तकनीकों के एकीकरण से संभावित प्रगति और विस्तृत अनुप्रयोग क्षेत्रों की संभावनाएँ उजागर होती हैं।

सारांश रूप में, यह समग्र विश्लेषण सैद्धांतिक समझ, प्रायोगिक मान्यता और अनुकूलन रणनीतियों के मध्य एक सेतु का कार्य करता है, जो ऊर्जा उत्पादन और पर्यावरणीय उपचार सहित विभिन्न क्षेत्रों में सूक्ष्मजीव ईंधन कोशिकाओं के अधिक कुशल एवं सतत उपयोग का मार्ग प्रशस्त करता है।

प्रतिस्पर्धी हित

लेखकों ने किसी भी प्रकार के प्रतिस्पर्धी हित होने से इनकार किया है।

संदर्भ

1. Cao, B., Zhao, Z., Peng, L., Shiu, H. Y., Ding, M., Song, F. and Huang, Y. (2021). Silver nanoparticles boost charge-extraction efficiency in *Shewanella* microbial fuel cells, *Science*, 373(6561), 1336-1340.
2. Liu, H., Ramnarayanan, R., and Logan, B. E. (2004). Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell, *Environmental science & technology*, 38(7), 2281-2285.
3. Herrero-Hernández, E., Smith, T. J., and Akid, R. (2013). Electricity generation from wastewaters with starch as carbon source using a mediator less microbial fuel cell, *Biosensors and Bioelectronics*, 39(1), 194-198.

4. Modi, J., Choumal, A., Vyas, D., Shah, D., Joshi, K., Patel, K. and Iyer, K. (2022). Sustainable technology for modern era effluent treatment: Microbial fuel cell, *Materials Today: Proceedings*, 57, 1781-1788.
5. Ou, S., Kashima, H., Aaron, D. S., Regan, J. M. and Mench, M. M. (2016). Multi-variable mathematical models for the air-cathode microbial fuel cell system, *Journal of Power Sources*, 314, 49-57.
6. Xia, C., Zhang, D., Pedrycz, W., Zhu, Y. and Guo, Y. (2018). Models for microbial fuel cells: a critical review, *Journal of Power Sources*, 373, 119-131.
7. Zhang, X. C., and Halme, A. (1995). Modelling of a microbial fuel cell process, *Biotechnology Letters*, 17, 809-814.
8. Pinto, R. P., Tartakovsky, B., and Srinivasan, B. (2012). Optimizing energy productivity of microbial electrochemical cells, *Journal of Process Control*, 22(6), 1079-1086.
9. Pinto, R. P., Srinivasan, B., Manuel, M. F., and Tartakovsky, B. (2010). A two-population bio-electrochemical model of a microbial fuel cell, *Bioresource technology*, 101(14), 5256-5265.
10. Arcand, Y., Chavarie, C., and Guiot, S. R. (1994). Dynamic modelling of the population distribution in the anaerobic granular biofilm, *Water Science and Technology*, 30(12), 63.
11. Khater, D. Z., El-Khatib, K. M., and Hassan, H. M. (2017). Microbial diversity structure in acetate single chamber microbial fuel cell for electricity generation, *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 15(1), 127-137.

12. Moletta, R., Verrier, D., and Albagnac, G. (1986) Dynamic modelling of anaerobic digestion, *Water research*, 20(4), 427-434.
13. Zeng, Y., Choo, Y. F., Kim, B. H., and Wu, P. (2010). Modelling and simulation of two-chamber microbial fuel cell, *Journal of Power Sources*, 195(1), 79-89.
14. Aboelela, D., Soliman, M. A., and Ashour, I. (2020). A reduced model for microbial fuel cell, *Chemical Engineering Transactions*, 79, 43-48.

डीजल और अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के लिए स्केल अप
बेलनाकार नोजल में गुहिकायन प्रवाह का संख्यात्मक अध्ययन
Numerical Study of Cavitation Flow in Scaled up Cylindrical Nozzle for Diesel and Waste
Cooking Oil-based Bio-diesel

देवर्षि शिर्के, मेहुल बंभानिया एवं निकुल पटेल

Devarshi M Shirke, Mehul Bambhanian and Nikul Patel

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technology & Engineering,
The Maharaja Sayajirao University of Baroda, Vadodara-390002, India

devarshishirke@gmail.com, mehul.bambhanian-med@msubaroda.ac.in,

n.k.patel-med@msubaroda.ac.in

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19667264>

सारांश

ईंधन परमाणुकरण की गुणवत्ता, आंतरिक नोजल प्रवाह से काफी प्रभावित होती है; विशेष रूप से उच्च दबाव इंजेक्शन स्थितियों के तहत जो गुहिकायन उत्पन्न करती है। गुहिकायन बुलबुले के गठन को चित्रित करना नोजल के छोटे आयामों के कारण चुनौतीपूर्ण है, जो प्रायोगिक अध्ययन के लिए दृश्य पहुंच को प्रतिबंधित करता है, और जटिल, उतार-चढ़ाव वाले स्थानिक और लौकिक पैरामीटर जो संख्यात्मक मॉडलिंग को जटिल बनाते हैं [2] गुहिकायन व्यवहार की भविष्यवाणी के लिए सटीक संख्यात्मक मॉडल आवश्यक हैं। इस अध्ययन में, एक बेलनाकार नोजल के भीतर गुहिकायन प्रवाह की जांच के लिए कम्प्यूटेशनल द्रव गतिशीलता (CFD) विश्लेषण आयोजित किया गया था। द्रव का आयतन (VOF) मल्टीफेज मॉडल, $k-\omega$ एसएसटी (SST) टर्बुलेंस मॉडल और ज्वार्ट-गेरबर-बेलमरी (ZGB) गुहिकायन मॉडल के साथ संयुक्त रूप से नियोजित किया गया था। 1 से 4.5 बार तक के इंजेक्शन दबाव के लिए सिमुलेशन किए गए। वाष्प मात्रा अंश के आधार पर एक गुणात्मक तुलना ने प्रायोगिक अवलोकनों के अनुरूप तीन अलग-अलग गुहिकायन चरणों – गुहिकायन शुरुआत, विकास और सुपर-गुहिकायन की पहचान की। ईंधन द्रव्यमान प्रवाह दर का उपयोग करके मात्रात्मक तुलना ने प्रयोगात्मक डेटा की तुलना में CFD परिणामों में थोड़ा अधिक अनुमान दिखाया। इस विसंगति को दूर करने के लिए, नोजल आउटलेट पर वाष्प अंश वितरण के आधार पर एक क्षेत्र सुधार कारक प्रस्तावित किया गया था, जिससे CFD और प्रयोगात्मक परिणामों के बीच विचलन को 3% के भीतर कम किया जा सके। अध्ययन ने आगे डीजल ईंधन और अपशिष्ट खाना पकाने के तेल-आधारित जैव-डीजल के गुहिकायन व्यवहार का पता लगाया। परिणामों से पता चलता है कि जैव-डीजल समान गुहिकायन चरणों को प्रदर्शित करता है, हालांकि डीजल ईंधन की तुलना में थोड़ा अधिक इंजेक्शन दबाव पर। [14]

Abstract

The quality of fuel atomization is significantly influenced by the internal nozzle flow, particularly under high-pressure injection conditions that induce cavitation. Characterizing cavitation bubble formation is challenging due to the tiny dimensions of the nozzle, which restrict visual access for experimental studies, and the complex, fluctuating spatial and temporal parameters that complicate

numerical modelling. Accurate numerical models are essential for predicting cavitation behaviour. In this study, computational fluid dynamics (CFD) analysis was conducted to investigate cavitation flow within a cylindrical nozzle. The Volume of Fluid (VOF) multiphase model, combined with the $k-\omega$ SST turbulence model and the Zwart-Gerber-Belamri cavitation model, was employed. Simulations were carried out for injection pressures ranging from 1 to 4.5 bar. A qualitative comparison, based on vapor volume fraction, identified three distinct cavitation stages—cavitation inception, development, and super-cavitation—consistent with experimental observations. Quantitative comparison using fuel mass flow rate showed a slight overestimation in CFD results compared to experimental data. To address this discrepancy, an area correction factor was proposed based on the vapor fraction distribution at the nozzle outlet, reducing the deviation between CFD and experimental results to within 3%. The study further explored the cavitation behaviour of diesel fuel and waste cooking oil-based biodiesel. Results reveal that biodiesel exhibits similar cavitation stages, albeit at slightly higher injection pressures compared to diesel fuel.

मुख्य शब्द: ईंधन इंजेक्टर नोजल, गुहिकायन, बेलनाकार नोजल, वीओएफ, अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल।

Keywords: Fuel injector nozzle, Cavitation, Cylindrical nozzle, VOF, Waste cooking oil based bio-diesel.

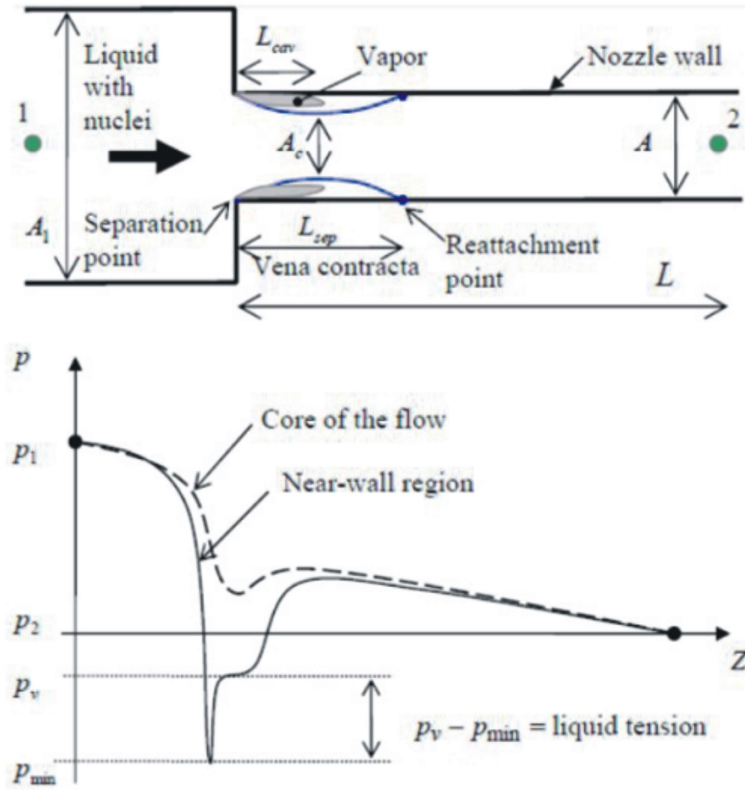
परिचय

हाइड्रोडायनमिक गुहिकायन तब होता है जब एक तरल में दबाव उसके वाष्प दबाव से नीचे गिर जाता है, जिससे वाष्प बुलबुले का निर्माण होता है। यह घटना प्रवाह वेग, दबाव भिन्नताओं और प्रणाली की ज्यामिति जैसे कारकों से प्रभावित होती है [1]। बुलबुले आमतौर पर तरल में मौजूद छोटे नाभिक के आसपास बनते हैं, जैसे कि सतह खुरदरापन के भीतर सूक्ष्म बुलबुले या फंसे हुए गैस क्षेत्र [2]।

चूंकि तरल एक नोजल या प्रतिबंध के माध्यम से बहता है, गुहिकायन विभिन्न चरणों में विकसित हो सकता है। प्रारंभ में, प्रवाह एक गैर-गुहिकायन अवस्था में रहता है, लेकिन जैसे-जैसे दबाव आगे गिरता है, गुहिकायन की शुरुआत होती है। यदि परिस्थितियाँ बुलबुले की वृद्धि को बढ़ावा देती हैं, तो प्रवाह ऐसी प्रणालियों में परिवर्तित हो जाता है जैसे कि गुहिकायन वृद्धि, सुपर गुहिकायन, और चरम मामलों में, हाइड्रोलिक पिलप। इन बुलबुलों का नीचे की ओर गिरना स्थानीयकृत तरंगों को उत्पन्न कर सकता है, जेट की विशेषताओं को बदलते हुए और मिश्रण को बढ़ाने में मदद कर सकता है।

हालांकि गुहिकायन को अक्सर एक हानिकारक प्रभाव के रूप में देखा जाता है, जो पंप और जहाज के पेंच जैसे हाइड्रोलिक मशीनरी में सामग्री का क्षय और संरचनात्मक थकावट का कारण बनता है, यह इसके लाभकारी अनुप्रयोग भी हैं। उदाहरण के लिए, ईंधन इंजेक्शन प्रणाली में, नियंत्रित गुहिकायन ईंधन के परमाणुकरण में सुधार कर सकता है, जिससे बेहतर दहन दक्षता और कम उत्सर्जन होता है। इसके अलावा, गुहिकायन द्वारा उत्पन्न टर्बुलेंस स्त्रे प्रदर्शन को बढ़ा सकता है, जो जैव-डीजल जैसे उच्च विषाक्तता वाले ईंधनों के लिए विशेष रूप से उपयोगी है, जिन्हें आमतौर पर खराब स्त्रे विशेषताओं से प्रभावित किया जाता है।

ईंधन इंजेक्शन से परे, शोधकर्ता गुहिकायन के नए अनुप्रयोगों, जैसे कि जल उपचार, पायासीकरण, और बायोमेडिकल प्रक्रियाओं की खोज कर रहे हैं। ये नए उपयोग गुहिकायन की द्वि-स्वरूपता को एक चुनौती के रूप में और इंजीनियरिंग में नवाचार के लिए एक उपकरण के रूप में उजागर करते हैं।



चित्र 1: नोज़ल के व्यास में दबाव

संख्यात्मक मॉडलिंग और समस्या की परिभाषा

सभी नियंत्रक समीकरण को व्यावसायिक कम्प्यूटेशनल फ्लूइड डायनामिक्स कोड ANSYS-Fluent का उपयोग करके हल किया गया। उपयोग किए गए तरल पदार्थ; पानी, अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित बायोडीज़ल और डीज़ल थे। तरल को उस तरल और इसके वाष्प से युक्त माना गया है। मल्टीफेज मॉडल VOF को मल्टीफेज प्रवाह के लिए उपयोग

किया जाता है। तूफान के लिए, $k-\omega$ SST मॉडल का उपयोग किया गया। नोज़ल के अंदर गुह्य प्रवाह के लिए Zwart-Gerber-Belamri (ZGB) मॉडल का उपयोग किया गया।

नियंत्रक समीकरण:

एकल-तरल मॉडल में, दो-चरण प्रवाह का संचालन द्रव्यमान और संवेग के संरक्षण समीकरणों के एक सेट द्वारा किया जाता है, जैसा कि नीचे दिया गया है:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(u_j \rho)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

जहाँ मिश्रण की घनत्व और श्यानता को तरल चरण के आयतन अंश के आधार पर गणना किया जाता है।

$$\rho = (1 - \alpha_l)\rho_v + \alpha_l\rho_l \quad (3)$$

$$\mu = (1 - \alpha_l)\mu_v + \alpha_l\mu_l \quad (4)$$

जहां ρ_v और ρ_l वाष्प चरण और तरल चरण के घनत्व हैं, और μ_v और μ_l क्रमशः वाष्प चरण और तरल चरण की चिपचिपाहट हैं। संवेग समीकरण में प्रभावी चिपचिपाहट को $\mu_{\text{eff}} = \mu_m + \mu_t$ के रूप में व्यक्त किया जाता है, जहां μ_m आणविक चिपचिपाहट है और μ_t अशांत चिपचिपाहट है जिसे मॉडल किया जाना चाहिए।

k - ϵ मॉडल

$$\mu_t = C_{\mu p} \frac{k^2}{\epsilon}$$

k - ω मॉडल

$$\mu_t = \alpha \rho \frac{k}{\omega}$$

इस मॉडल के साथ तरल और वाष्प के बीच चरण परिवर्तन का मूल्यांकन करने के लिए द्रव्यमान परिवहन समीकरण में एक स्रोत पद की आवश्यकता होती है।

$$\frac{\partial(\alpha_l\rho_l)}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha_l\rho_l U) R_c + R_e \quad (7)$$

इस मॉडल में वाष्प चरण का वॉल्यूम अंश (α_v) इस प्रकार दिया गया है:

$$\alpha_v = 1 - \alpha_l = \frac{\frac{4}{3}\pi R_b^3 n_0}{1 + \frac{4}{3}\pi R_b^3 n_0} \quad (8)$$

गुहिकायन संख्या (CN) को समीकरण (8) के द्वारा परिभाषित किया जाता है।

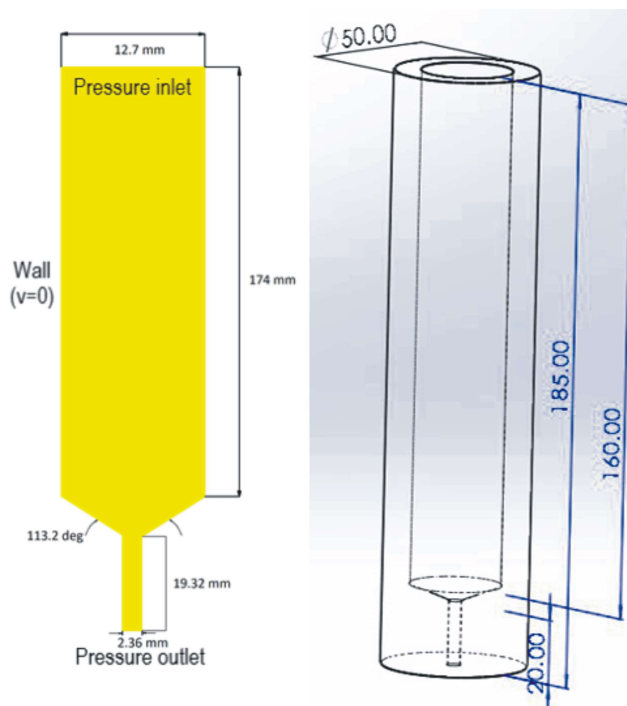
$$CN = \frac{P_{\text{back}} - P_{\text{vapour}}}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (9)$$

जहां, P_{back} = उस स्थान का दबाव जहां तरल छोड़ा जाता है, P_{vapour} = तरल का वाष्पीकरण दबाव, ρ = तरल का घनत्व, V = तरल की वास्तविक गति।

समस्या परिभाषा

नोजल ज्यामिति के लिए, Ansys Spaceclaim में द्विविम ज्यामिति बनाई गई है, जो चित्र 2 में दिखाई गई है। ज्यामिति को प्रयोग के लिए उपयोग किए गए त्रिविम ज्यामिति अक्रीलिक नोजल के संदर्भ में बनाया गया है। शीर्ष सतह तरल के लिए निवेश के

रूप में कार्य करती है। पार्श्व सतहों के लिए कोई स्लिप स्थिति निर्धारित की गई है। नीचे नोजल क्षेत्र है, जहाँ गुहिकायन की उम्मीद है। सीमा स्थितियाँ दबाव आधारित प्रदान की गई हैं। इस अध्ययन में उपयोग किए गए तरल के गुण तालिका 1 में उल्लिखित हैं।



चित्र 2: नोजल का द्विविम ज्यामिति और त्रिविम ज्यामिति मॉडल

तालिका 1: इस अध्ययन में उपयोग की जाने वाली तरल की विशेषताएँ

तरल गुणधर्म	पानी	डीज़ल	डीज़ल और अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीज़ल
तरल घनत्व (Liquid density) (ρ) (kg/m ³)	1000	830	886
तरल की काइनेमैटिक श्यानता (Kinematic viscosity of Liquid) (cP)	1	2.3	4.03
तरल की गतिशील श्यानता (Dynamic viscosity of Liquid) (Pa s)	0.000798	0.001517	0.00453
भाप का दबाव (Vapor pressure) (P_v) (Pa)	4000	2000	1000
सतही तनाव (Surface tension) (N/m)	0.072	0.025	0.0296

परिणाम और चर्चाएँ

जाली का प्रभाव विश्लेषण (Mesh Sensitivity)

नोजल का व्यास 2.36 मिमी और लंबाई 19.32 मिमी वाली ज्यामिति द्विविम ज्यामिति है। परिणामों पर

जाली (mesh) सेल (cell) संख्याओं के प्रभाव को कम करने के लिए जाली का प्रभाव विश्लेषण विश्लेषण किया गया है। चार विभिन्न सेल संख्याओं के साथ चार जाली बनाए गए हैं। तालिका 2 में चारों जाली प्रकारों की संख्या दर्शाई गई है। सभी चार जाली में

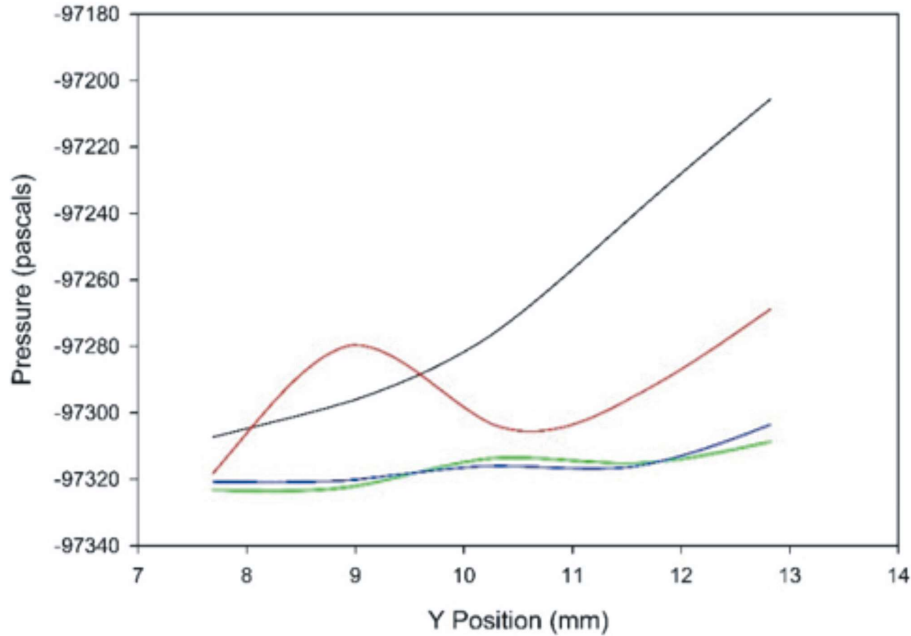
समान सीमा स्थितियों के साथ डेटा रिकॉर्ड किया गया है। पूरे विश्लेषण को तरल के रूप में पानी का उपयोग करके किया गया है। निवेशी दबाव 4.5 बार गेज (gauge) दबाव पर सेट किया गया है और निर्गम स्थितियाँ वायुमंडलीय स्थितियों पर हैं। नोजल के y – अक्ष (y-axis) पर दबाव को चित्र 3 में सभी चार जाली के लिए प्रदर्शित किया गया है। नोजल की आधी लंबाई पर नोजल के x – अक्ष (x-axis) पर पानी के वाष्प का आयतन अंश चित्र 4 में प्रदर्शित किया गया है। चित्र 3 में प्रदर्शित आलेख से स्पष्ट है कि M_1 और M_2 के दबाव मान काफी भिन्न हैं, जो दर्शाता है कि उनके पास जाली कोशिकाओं की संख्या अपर्याप्त है

और इसलिए आगे के सुधार की आवश्यकता है। इसी प्रकार, M_2 और M_3 के लिए प्राप्त दबाव मानों में भी बड़ा विचलन है। M_3 और M_4 में दबाव मानों में विचलन छोटा है, इसलिए और सुधार परिणामों को प्रभावित नहीं करेगा। चित्र 4 में, नोजल की दीवारों के पास M_1 के लिए प्लॉट लाइन में अंतर है। M_2 और M_3 के लिए मान दीवार की सतह के पास स्पष्ट रूप से भिन्न होते हैं। इसके अलावा, M_3 और M_4 में भाप मात्रा अंश में अंतर बहुत न्यूनतम है। M_3 और M_4 में से, पूरी अध्ययन के लिए मेश M_3 को चुना गया है क्योंकि इसके लिए कम गणनात्मक समय की आवश्यकता होती है और प्राप्त परिणाम सटीक हैं।

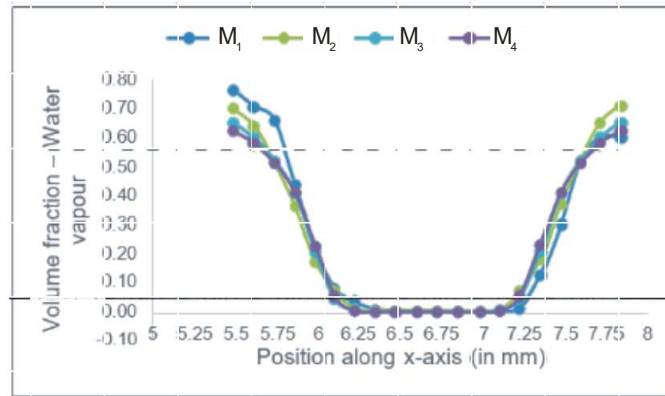
तालिका 2: प्रत्येक जाल में तत्वों की संख्या

Mesh	No. of Elements
M_1	47,736
M_2	58,891
M_3	1,02,638
M_4	2,28,643

— M_1 — M_2 — M_3 — M_4



चित्र 3: y – अक्ष के साथ दबाव बनाम स्थिति का आलेख

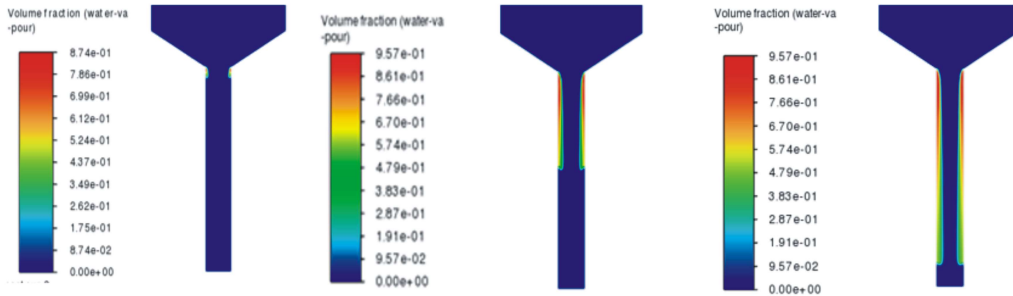


चित्र 4: जल वाष्प के मात्रा अंश बनाम x-अक्ष के साथ स्थिति का आलेख

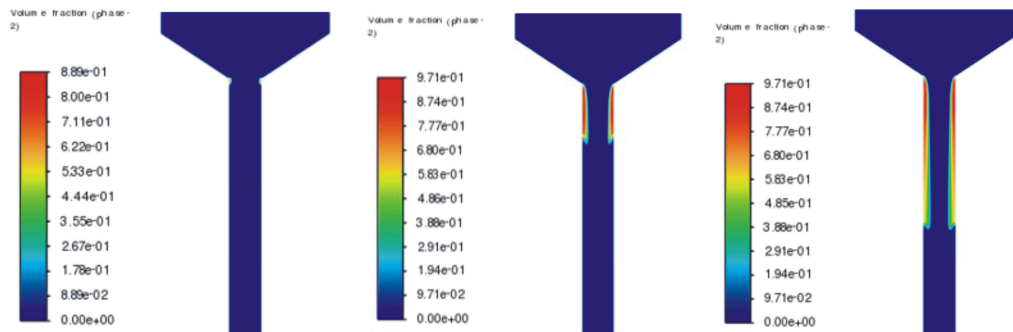
विभिन्न तरल पदार्थों में गुहिकायन प्रवाह

पानी, डीजल और अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल का कार्यशील तरल के रूप में विभिन्न सीमा स्थितियों के तहत संख्यात्मक सिमुलेशन किए गए। सभी गणनाएँ स्थिर अवस्था की स्थिति में की गईं। दबाव वितरण, वाष्प आयतन अनुपात और वेग दिखाते हुए चित्र रिकॉर्ड किए गए। जल, अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल और डीजल के आयतन अनुपात चित्रों में गुहिकायन का

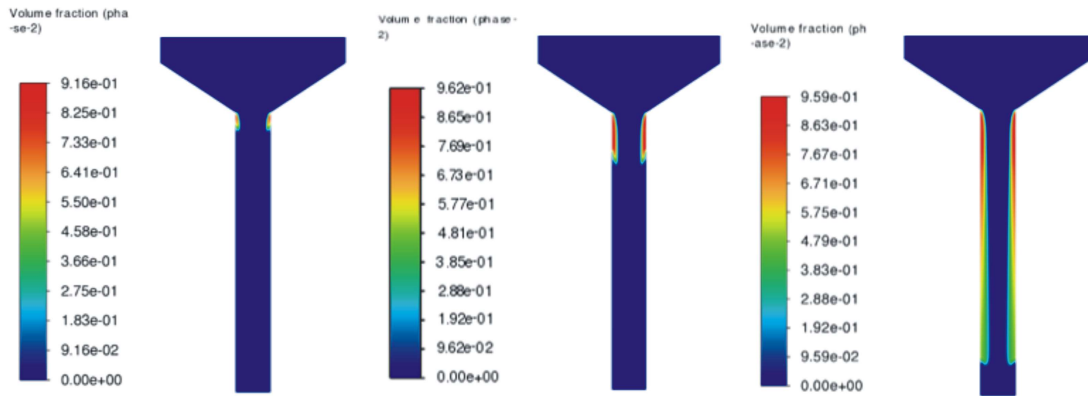
विकास स्पष्ट है, जैसा कि चित्र 5, 6 और 7 में दिखाया गया है। पानी के लिए, गुहिकायन की शुरुआत 2 बार के निवेशी दबाव पर होती है, और 4.5 बार पर सुपर गुहिकायन का अवलोकन होता है। इसी प्रकार, WCO जैव-डीजल में गुहिकायन की शुरुआत 2.6 बार पर होती है और सुपर गुहिकायन 3.4 बार पर होता है। डीजल के मामले में, गुहिकायन 2.3 बार पर शुरू होता है, जो 3.8 बार पर सुपर गुहिकायन की ओर बढ़ता है।



चित्र 5: (बाएं से दाएं) इनसेप्शन, वृद्धि और सुपर गुहिकायन पानी के लिए



चित्र 6: (बाएं से दाएं) जैव-डीजल के तरल के रूप में इनसेप्शन, वृद्धि और सुपरगुहिकायन।

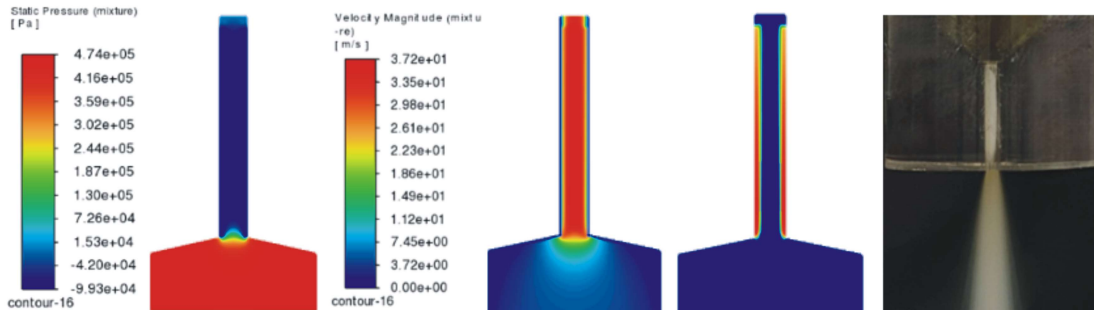


चित्र 7: (बाएं से दाएं) इनसेप्शन, वृद्धि और सुपरगुहिकायन के लिए डीजल तरल के रूप में।

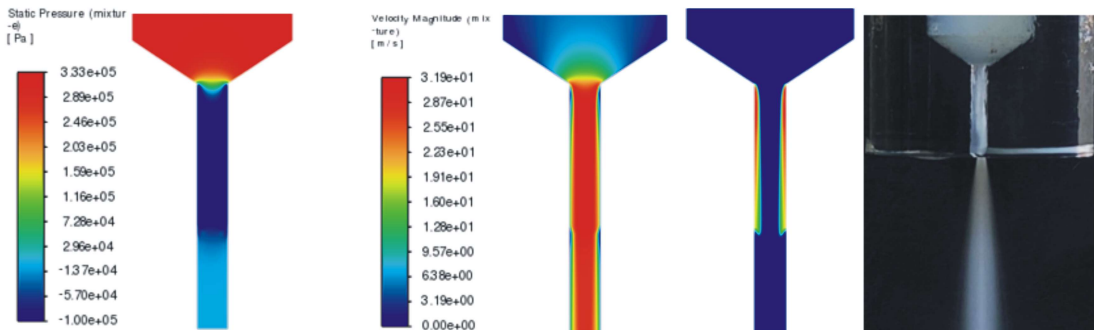
प्रयोग के साथ तुलना

अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के लिए सुपरगुहिकायन आकृति देता है कि डीजल के मुकाबले समान दबाव पर गुहिकायन क्लाउड की लंबाई छोटी है। नतीजतन, अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के लिए डीजल के समान गुहिकायन क्लाउड की लंबाई प्राप्त करने के लिए उच्च प्रव इंजेक्शन दबाव की आवश्यकता

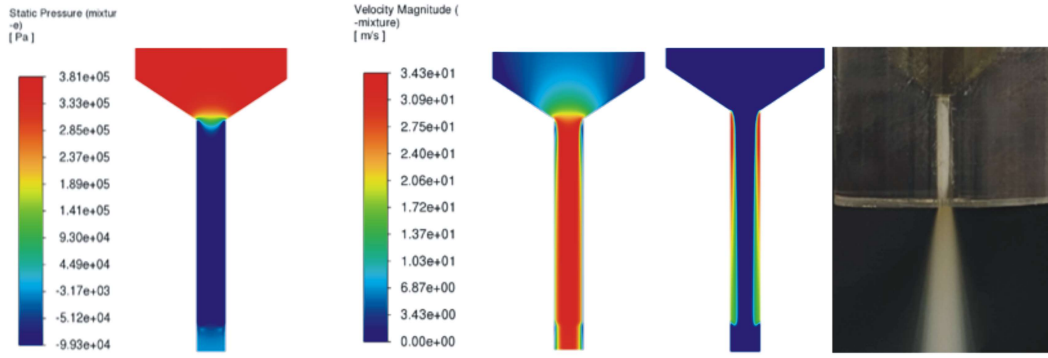
होती है। यह व्यवहार अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के लिए कम संतृप्त वाष्प दबाव और उच्च चिपचिपाहट के कारण होता है जो कि डीजल और पानी की तुलना में है। चित्र 8 सभी तीन तरल पदार्थों के लिए दबाव, वेग और वाष्प मात्रा अनुपात को दर्शाता है। प्रयोगात्मक चित्र वाष्प मात्रा अनुपात आकृतियों के साथ दिखाए गए हैं, प्राप्त परिणाम गुणात्मक रूप से समान हैं।



(a)



(b)



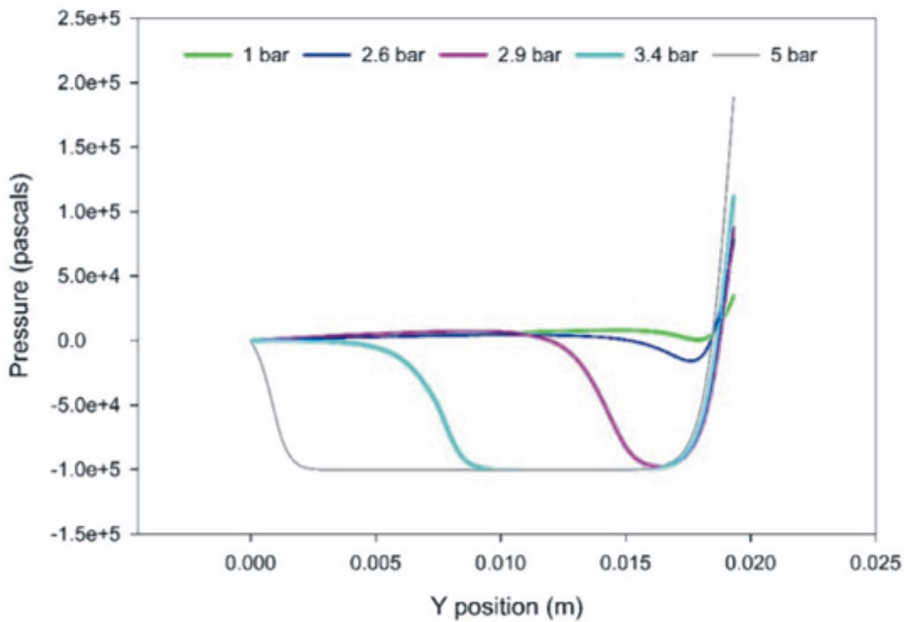
(c)

चित्र 8: दबाव, वेग, वाष्प मात्रा अंश और (a) जल, (b) WCO जैव-डीजल और (c) डीजल के लिए प्रयोगात्मक चित्र

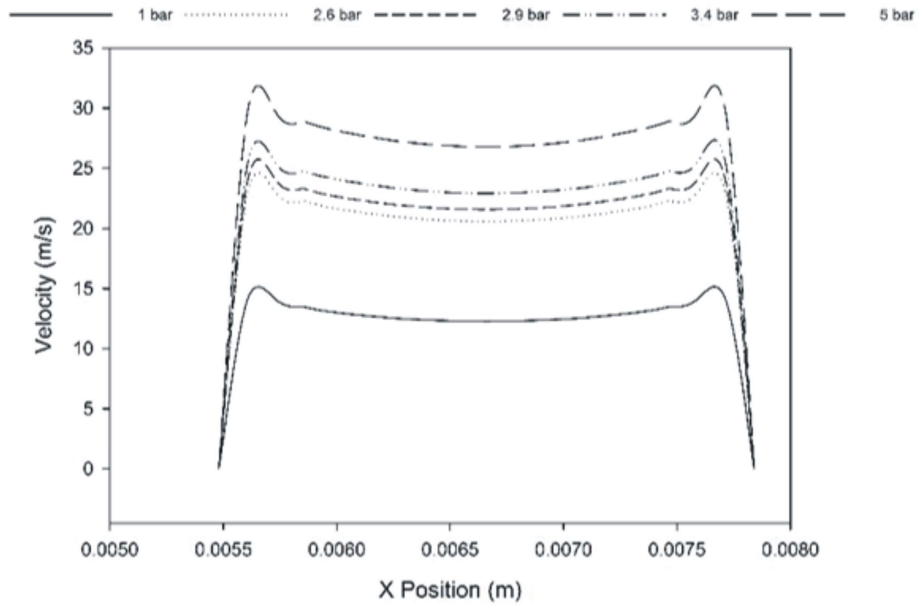
दबाव अंतर का प्रभाव

जब प्रवाह नोजल के माध्यम से गुजरता है, तो भूभाग में अचानक बदलाव के कारण प्रवाह नोजल के निवेश पर दीवार से अलग हो जाता है, जिससे प्रवाह में वेना कॉन्ट्रैक्टा उत्पन्न होती है। एक पुनः परिसंचरण क्षेत्र बनता है जहाँ दबाव तरल के त्वरण के कारण घटता है। दबाव संतृप्त वाष्प दबाव से भी नीचे गिर सकता है, जिससे तरल आंशिक रूप से अपने वाष्प रूप में परिवर्तित हो जाता है और बुलबुले या वाष्प गुहा उत्पन्न होती है। जैसे-जैसे इंजेक्शन का दबाव बढ़ता है, पुनः परिसंचरण क्षेत्र नोजल के निर्गम की ओर और

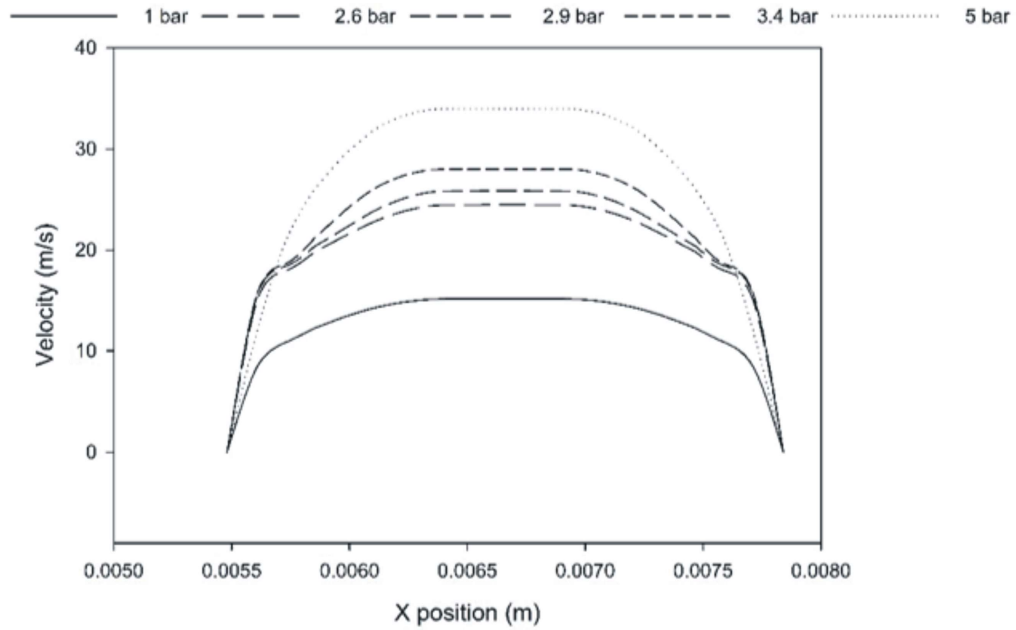
फैलता है। चित्र 9 में, 2.6 बार के लिए दबाव प्रोफाइल में 0.016 मीटर और 0.018 मीटर के बीच, नोजल के निवेश के पास एक गिरावट देखी जाती है, जहाँ दबाव अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के संतृप्त वाष्प दबाव के थोड़ा नीचे गिर जाता है। इस गिरावट को पुनः परिसंचरण क्षेत्र के गठन के लिए जिम्मेदार ठहराया जाता है। इंजेक्शन दबाव में आगे वृद्धि के साथ, पुनः परिसंचरण क्षेत्र फैलता है और नोजल के निर्गम की ओर बढ़ता है, जैसा कि 2.9 बार, 3.4 बार और 5 बार के लिए दबाव प्रोफाइल में स्पष्ट है।



चित्र 9: नोजल के ऊर्ध्वाधर केन्द्र रेखा के साथ दबाव



(a)



(b)

चित्र 10: (a) निवेश पर वेग, (b) निर्गम पर वेग

जैसे ही तरल तेजी से गति करता है, वहाँ गुहिका के भीतर वाष्प उत्पन्न होती है, जो तरल कोर की तुलना में अधिक गति से बहती है। यह घटना चित्र 10 (a) में स्पष्ट है, जहाँ दीवार के निकट स्थान 0.0056-

0.0058 मीटर और 0.0076-0.0078 मीटर के बीच गति के स्पाइक्स देखे जाते हैं। नोजल केंद्र पर एक संबंधित गति की कमी होती है, जिसे तरल अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल के प्रवाह

के लिए जिम्मेदार ठहराया जाता है। नोजल निर्गम पर, वाष्प अब मौजूद नहीं है, जिससे एक सामान्य गति प्रोफाइल बनती है, जैसा कि चित्र 10 (b) में दिखाया गया है।

निष्कर्ष

- CFD सिमुलेशन ने VOF मल्टीफेज मॉडल, $k-\omega$ SST टर्बुलेन्स मॉडल, और Zwart-Gerber-Belamri गुहिकायन मॉडल का उपयोग करते हुए गुहिकायन व्यवहार को प्रभावी ढंग से कैचर किया।
- तीन गुहिकायन चरण—आरंभ, विकास, और सुपर-गुहिकायन—पहचाने गए, जो प्रयोगात्मक के साथ मेल खाते हैं।

- अध्ययन में पाया गया कि बायोडीजल डीजल ईंधन के समान गुहिकायन व्यवहार प्रदर्शित करता है लेकिन समान गुहिकायन चरणों तक पहुँचने के लिए अधिक इन्जेक्शन दबाव की आवश्यकता होती है।

- ये निष्कर्ष गुहिकायन मॉडलिंग की सटीकता को बढ़ाने में योगदान करते हैं, जो डीजल और जैव-डीजल अनुप्रयोगों में ईंधन इन्जेक्शन को परमाणुकरण करने के लिए महत्वपूर्ण है।

आभार

यह शोध गुजरात विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी परिषद (GUJCOST)—गांधीनगर, भारत द्वारा अनुमोदित पत्र संख्या GUJCOST/STI/2023-24/352 दिनांक 25/04/2023 द्वारा समर्थित है।

शोध पत्र में प्रयुक्त अंग्रेजी शब्दों की समानार्थक हिन्दी शब्दावली

Alphabetically sorted terminology in English	वर्णमाला अनुक्रमित हिन्दी शब्दावली
Atomization	परमाणुकरण
Cavitation	गुहिकायन
Density	घनत्व
Geometry	ज्यामिति
Liquid	तरल
Pressure	दबाव
Vapor	वाष्प
Waste Cooking Oil based Biodiesel	अपशिष्ट खाना पकाने के तेल आधारित जैव-डीजल

संदर्भ

1. Brennen, C. E. (2013). Cavitation and bubble dynamics. Cambridge University Press.
2. Franc, J. P., & Michel, J. M. (2004). Fundamentals of cavitation. Kluwer Academic Publishers.
3. Kim, H. K., & Lee, C. J. (2008). Effect of cavitation in nozzle orifice on the diesel fuel atomization characteristics. International Journal of Heat and Fluid Flow, 29(4), 1001-1009.

<https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.03.014>

4. Knapp, R. T., Daily, J. W., & Hammitt, F. G. (1970). Cavitation. McGraw-Hill.
5. Leighton, T. G. (1994). The acoustic bubble. Academic Press.
6. Nurick, W. H. (1976). Orifice cavitation and its effect on spray mixing. Journal of Fluids Engineering, 98(4), 681-687. <https://doi.org/10.1115/1.3448452>
7. Payri, R., Salvador, F. J., Martí-Aldaraví, P., & Martínez-López, J. (2013). Using

- spray momentum flux measurements to understand the influence of cavitation and hydraulic flip on diesel injector flow characteristics. *Fuel*, 107, 803-812. 10.1016/J.FUEL.2004.10.009
8. Sou, A., Biçer, B., & Tomiyama, A. (2014). Numerical simulation of incipient cavitation flow in a nozzle of fuel injector. *Computers & Fluids*, 103, 42-48.
 9. Zwart, P. J., Gerber, A. G., & Belamri, T. (2004, May). A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics. In *Fifth International Conference on Multiphase Flow*, Yokohama, Japan (Vol. 152).
 10. Baumgarten, C. (2006). *Mixture formation in internal combustion engines*. Springer Berlin Heidelberg.
 11. Mohan, B., Yang, W., & Chou, S. (2014). Cavitation in injector nozzle holes - A parametric study. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 8(1), 70-81.
 12. Bambhania, M. P., & Patel, N. K. (2022). Numerical modeling of the cavitation flow in throttle geometry. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(2), 257-267. <https://doi.org/10.47176/jafm.16.02.1348>
 13. Bambhania, M. P., & Patel, N. K. (2023). Hydrodynamic cavitation in the fuel injector nozzle and its effect on spray characteristics: A review. *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, 10(1), 1-20.
 14. Payri, R., Salvador, F. J., Gimeno, J., & Zapata, L. D. (2012). Diesel nozzle flow characteristics of biodiesel fuels. *Fuel*, 94, 443-452.

कूटलेखन के लिए आलेख सिद्धांत और चेबिशेव बहुपदों का उपयोग करते हुए एक नवीन गूढालेखी ढाँचा

A Novel Cryptographic Framework for Encryption Employing Graph Theory and Chebyshev Polynomials

मोहम्मद आमिर¹, बृजेश शुक्ल² एवं इष्ट विभु^{2*}

Mohammad Amir^{1*}, Brijesh Shukla² and Isht Vibhu^{2*}

¹Department of Mathematics, Yuveraj Dutta Postgraduate College, Lakhimpur Kheri, U.P., India-262701

²Department of Physics, Yuveraj Dutta Postgraduate College, Lakhimpur Kheri, U.P., India-262701

aamir329@gmail.com, brijeshshukla17@gmail.com, ishtvibhu@gmail.com

*Corresponding author

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19667322>

सारांश

इस शोध पत्र में, ग्राफ सिद्धांत की गणितीय जटिलता और चेबिशेव बहुपदों के विश्रंखल-अनियमित (chaotic) गुणों के समन्वय से एक नवीन एनक्रिप्शन तकनीक प्रस्तुत की गई है। यह सम्भावना है कि यह तकनीक पारंपरिक क्रिप्टोग्राफिक योजनाओं जैसे आरएसए, एलगामल, शनोर, और डीएसए का एक सशक्त और उन्नत विकल्प हो सकती है। पारंपरिक एल्गोरिदम जहां मुख्य रूप से पूर्णांक गुणनखंडन या विविक्त लघुगणक जैसे संख्या-सिद्धांत संबंधी समस्याओं की कम्प्यूटेशनल कठिनाई पर निर्भर करते हैं, वहीं पर प्रस्तुत नवीन तकनीक ग्राफ संरचनाओं की जटिलता और चेबिशेव बहुपदों की अभिकलनात्मक (computational) दक्षता पर आधारित है।

इस कूटलेखन प्रणाली में ग्राफीय निरूपण, जैसे आसन्नता आव्यूह (adjacency matrix) और स्पेक्ट्रमी गुणधर्मों को क्रिप्टोग्राफिक कुंजी के रूप में उपयोग किया गया है, और चेबिशेव बहुपदों का उपयोग उनके पुनरावर्ती और विश्रंखल-अनियमित (chaotic) गुणधर्मों के कारण कूटलेखन (encryption) और विकूटन (decryption) के लिए किया गया है। इन तकनीकों के संयोजन से यह पद्धति पारंपरिक क्रिप्टोएनालिटिक हमलों के विरुद्ध उच्च स्तर की सुरक्षा, प्रतिरोध, और आधुनिक क्रिप्टोग्राफिक आवश्यकताओं यथा आसान और वस्तुसंजाल (IoT) अनुप्रयोगों के लिए उपयुक्त अभिकलनात्मक दक्षता प्रदान करती है।

Abstract

In this paper, we propose a novel encryption technique that integrates the mathematical robustness of graph theory with the chaotic properties of Chebyshev polynomials. It is possible that this technique may prove to be an alternative to traditional cryptographic schemes such as RSA, ElGamal, Schnorr, and DSA. While these classical algorithms rely heavily on the computational hardness of number-theoretic problems like integer factorization or discrete logarithms, the approach presented here leverages the structural complexity of graphs and the computational efficiency of Chebyshev polynomials.

The encryption system utilizes graph representations, such as adjacency matrices and spectral properties, as cryptographic keys, while Chebyshev polynomials provide the foundation for encryption

and decryption through their recursive and chaotic nature. By combining these techniques, the proposed method achieves a high degree of security, resilience against conventional cryptanalytic attacks, and computational efficiency suitable for modern cryptographic demands, including lightweight and IoT applications.

मुख्यशब्द: गूढालेखी, आलेख सिद्धांत, चेबिशेव बहुपद, आसन्नता आव्यूह, स्पेक्ट्रमी गुणधर्म, अभिकलनात्मक दक्षता, विश्रृंखल-अनियमित निकाय।

Key words: Cryptography, Graph Theory, Chebyshev Polynomials, Adjacency Matrices, Spectral Properties, Computational Efficiency, Chaotic Systems.

परिचय

जैसे-जैसे डिजिटल संचार अभूतपूर्व गति से बढ़ रहा है, सुरक्षित और अभिकलनात्मक (computational) रूप से कुशल एन्क्रिप्शन तकनीकों की मांग पहले से कहीं अधिक महत्वपूर्ण हो गई है [1]। विविध अनुप्रयोगों में डेटा की गोपनीयता और समग्रता की रक्षा की यह तात्कालिक आवश्यकता (urgency), आधुनिक गूढालेखी विधियों की परिष्कृत गणितीय संरचनाओं (sophisticated mathematical structures) पर निर्भरता को रेखांकित करती है [1]। सुरक्षा और प्रदर्शन (performance) की उभरती हुई चुनौतियों के निपटान में अभिनव समाधान की आवश्यकता कूटलेखन की निरंतर प्रगति को प्रेरित करती है।

गूढालेखी तकनीकों का विकास सुरक्षा, दक्षता और अनुकूलनशीलता के बीच संतुलन स्थापित करने के लिए निरंतर जारी खोज पर प्रकाश डालता है। प्रारंभिक विधियाँ, जैसे कि 1976 में प्रस्तुत डिफ़ी-हेलमैन कुंजी विनिमय [2], असुरक्षित माध्यमों पर सुरक्षित कुंजी साझा करने की सुविधा प्रदान करती थीं, तथापि विविक्त लघुगुणक (discrete logarithms) पर इसकी निर्भरता इसे उदीयमान क्वांटम खतरों (quantum threats) से असुरक्षित रखती है [3]। इसी तरह मजबूत सुरक्षा प्रदान करने के लिए 1978 में पूर्णांकों के गुणनखंडन (integer factorization) पर आधारित, RSA [4] प्रस्तुत की गई, परंतु इसके लिए उच्च संगणनात्मक संसाधनों की आवश्यकता होती है, जो हल्के सिस्टम में इसके उपयोग को सीमित कर देती है [5]। विविक्त लघुगुणकों पर आधारित एलगामल [6] और श्नॉर [7] हस्ताक्षर योजनाएं दक्षता प्रदान करती हैं, किंतु ये भी विस्तारशीलता

(scalability) और कुंजी आकार की चुनौतियों का सामना करती हैं [1]। 1991 में मानकीकृत डिजिटल सिग्नेचर एल्गोरिथ्म (DSA) [8], डिजिटल हस्ताक्षर के प्रदर्शन को बेहतर बनाता है, लेकिन यह भी अपने पूर्ववर्तियों की तरह क्वांटम खतरों के प्रति असुरक्षित है [9]। हाल के नवाचार, जैसे कि चेबिशेव बहुपदों (Chebyshev polynomials) पर आधारित अराजकता-आधारित कूटलेखन [10], अप्रत्याशितता और हल्के संगणन की क्षमता प्रदान करते हैं, यद्यपि इनकी व्यावहारिक शक्यता अभी परीक्षण की स्थिति में है [11]। पोस्ट-क्वांटम दृष्टिकोण [12] भविष्य के खतरों का मुकाबला करने के लिए उच्च सुरक्षा प्रदान करते हैं, लेकिन इसकी कीमत बढ़ी हुई जटिलता के रूप में चुकानी पड़ती है [13]। वर्तमान कमियों को दूर करने में इन विधियों की सामर्थ्य और सीमाएं, उपयुक्त अभिनव संकर (hybrid) समाधानों की आवश्यकता को स्पष्ट करती हैं।

इस आवश्यकता को पूरा करने हेतु, यहाँ आलेख सिद्धांत [14] की संरचनात्मक जटिलता को उन्नत कुंजी विनिमय तंत्रों तथा चेबिशेव बहुपदों [15] की अराजक गतिशीलता के साथ एकीकृत करते हुए नवोन्मेषी कूटन तकनीक प्रस्तावित की गई है। इस विधि में एक पूर्ण आलेख से भारित आसन्नता आव्यूह (weighted adjacency matrix) का निर्माण किया जाता है, जिसमें, इस प्रकार ठोस गूढालेखी आधार के रूप में आलेख की जटिलता का लाभ लेते हुए, संदेश को एक बाह्य हैमिल्टोनियन पथ पर घड़ी की दिशा में संचरण करते हुए एन्कोड किया जाता है [16]। एक साझा कुंजी से इस आव्यूह को गुणा करके सुरक्षा को और अधिक बढ़ाया जाता है, कुंजी का विनिमय डिफ़ी-हेलमैन

प्रेरित प्रोटोकॉल [2] के माध्यम से किया जाता है, जो प्रत्यक्ष संचरण के बिना सुरक्षित कुंजी स्थापना सुनिश्चित करता है [12]। प्राप्त आव्यूह का चेबिशेव बहुपदों [10] द्वारा संवर्धित आरएसए-प्रेरित स्कीम [4] का उपयोग करते हुए कूटन किया जाता है। चेबिशेव बहुपदों के पुनरावर्ती एवं अराजक गुणधर्म [17] अनाधिकृत विकूटन को संगणनात्मक रूप से असंभव बना देते हैं [1]।

यह दृष्टिकोण पारंपरिक योजनाओं जैसे कि एलगामल [6], डीएसए [8], और शनॉर [7] से भिन्न है। ये पारंपरिक योजनाएं केवल विविक्त लघुगणकों [18] या पूर्णांकों के गुणनखंडन पर आधारित, आरएसए [4] पर निर्भर होती हैं। प्रस्तावित विधि इन दोनों कठिन समस्याओं-विविक्त लघुगणक द्वारा कुंजी विनिमय [2] और एन्क्रिप्शन के लिए गुणनखंडन के जरिए कूटन [4]-के मेल से एक द्विस्तरीय रक्षा तंत्र (dual-layered defence) स्थापित करती है। यह द्विस्तरीय सुरक्षा प्रणाली क्रिप्टोविश्लेषण (cryptanalysis) के प्रति प्रतिरोध को सार्थक रूप से बढ़ा देती है [12]। यह शोध पत्र एक सशक्त और विस्तारशील (scalable) क्रिप्टोसिस्टम के लिए आलेख सिद्धांत [14], कुंजी विनिमय [2], और चेबिशेव-संवर्धित आरएसए कूटन [17] के संश्लिष्ट दृष्टिकोण का उपयोग कर कई प्रस्तावित विधि का विवरण प्रस्तुत करता है। यह प्रणाली मजबूत सुरक्षा के साथ-साथ कुशल संगणन भी प्रदान करती है, जिससे यह हल्के IoT उपकरणों से लेकर उच्च-जोखिम वाली डिजिटल संचार प्रणालियों [19] तक के अनुप्रयोगों के लिए आदर्श बन जाती है।

प्रस्तावित एन्क्रिप्शन तकनीकों की गणितीय आधारशिला

आव्यूह – आधारित कुंजी विनिमय, आलेख सिद्धांत, चेबिशेव बहुपद, और एक RSA-जैसे दृष्टिकोण को एकीकृत करते हुए यह अनुभाग प्रस्तावित कूटन योजनाओं के गणितीय आधार की रूपरेखा प्रस्तुत करता है। सामूहिक रूप से ये सभी घटक – विविक्त लघुगणकों की कठिनता, आलेख की संरचनात्मक जटिलता, बहुपद पुनरावृत्तियों की अराजक प्रकृति, और RSA-जैसे सिस्टम में गुणनखंडन की कठिनाई

[1] मिलकर एक मजबूत गूढालेखी ढांचा बनाते हैं। निम्नलिखित चार उपखंडों में प्रत्येक गणितीय आधार का विवरण दिया गया है:

A. सुरक्षित कुंजी साझाकरण के लिए डिफ़ी-हेलमैन कुंजी विनिमय का एक आव्यूह –आधारित विस्तार,

B. संदेश निरूपण के लिए आलेख – सिद्धांत पर आधारित एक मॉडल,

C. चेबिशेव बहुपदों के गुणधर्म, जो कूटन की अप्रत्याशितता (encryption unpredictability) को बढ़ाते हैं, और

D. कूटन और विकूटन के लिए चेबिशेव बहुपदों का उपयोग करने वाली एक प्रस्तावित RSA-प्रेरित योजना।

A. मैट्रिक्स-आधारित डिफ़ी-हेलमैन कुंजी विनिमय

प्रतिष्ठित डिफ़ी-हेलमैन कुंजी विनिमय [2] – जो गूढालेखी नवाचार की आधारशिला मानी जाती है यह विधि डिफ़ी-हेलमैन कुंजी विनिमय [2] के स्केलर (scalar) ढांचे को आव्यूह के क्षेत्र में विस्तारित करके परिष्कृत करती है, जिसमें घातांक (exponents) केवल धनात्मक पूर्णांकों तक सीमित होते हैं। यह विधि दो पक्षों-परंपरागत रूप से एलिस और बॉब-को परिमित क्षेत्र (finite field) में मापांक अंकगणित (modular arithmetic) की सटीकता का उपयोग करके एक साझा गुप्त आव्यूह स्थापित करने की अनुमति देती है। इस अनुकूलन की नवीनता केवल इसके सैद्धांतिक कौशल में ही नहीं, बल्कि इसकी व्यावहारिक प्रभावशीलता में भी निहित है: यह एन्क्रिप्टेड संचार से लेकर नेटवर्क प्रणालियों की सुरक्षा तक के अनुप्रयोगों के लिए सुरक्षित कुंजी व्युत्पत्ति को संभव बनाता है, और क्रिप्टोग्राफरों के लिए एक बहुपयोगी उपकरण प्रदान करता है [1, 19]।

A.1 सार्वजनिक प्राचल

• आकार $(n \times n)$ का लोकसम्मत (public agreed) आधार आव्यूह B एक बड़े अभाज्य संख्या r के मापांक परिमित क्षेत्र से चुना जाता है यह विनिमय की आधार संरचना के रूप में कार्य करता है।

• एक बड़ी अभाज्य संख्या r मापांक संक्रियाओं (modular operations) को नियंत्रित करती है, जिसका परिमाण व्यापक आक्रमणों के विरुद्ध एक शक्तिशाली अवरोध सुनिश्चित करता है।

A.2 कुंजी विनिमय की चरणबद्ध प्रक्रिया

A.2.1 निजी कुंजी का चयन:

एलिस एक गुप्त पूर्णांक a चुनती है, जिसे वह किसी से साझा नहीं करती। इसी प्रकार, बॉब एक गुप्त पूर्णांक b चुनता है, जिसे केवल वही जानता है।

A.2.2 सार्वजनिक कुंजी की गणना:

• एलिस मैट्रिक्स A की गणना किस प्रकार करती है:

$$A = B^a \pmod{r}$$

फिर वह मैट्रिक्स A को बॉब को भेजती है।

• बॉब अपनी सार्वजनिक मैट्रिक्स की गणना निम्न प्रकार करता:

$$C = B^b \pmod{r}$$

फिर वह मैट्रिक्स C को एलिस को भेजता है।

A.2.3 साझा गुप्त कुंजी की गणना:

1. एलिस को बॉब द्वारा भेजी गई मैट्रिक्स C प्राप्त होती है, और उसके पास अपनी निजी कुंजी a होती है। वह बॉब की सार्वजनिक मैट्रिक्स पर अपनी निजी कुंजी लागू करती है:

$$S = C^a \pmod{r} = (B^b)^a \pmod{r}$$

2. बॉब को एलिस द्वारा भेजी गई मैट्रिक्स A प्राप्त होती है, और उसके पास अपनी निजी कुंजी b होती है। वह एलिस की सार्वजनिक मैट्रिक्स पर अपनी निजी कुंजी लागू करता है:

$$S = A^b \pmod{r} = (B^a)^b \pmod{r}$$

3. चूंकि मैट्रिक्स घातांक (exponentiation) साहचर्य नियम (associative law) का पालन करते हैं, इसलिए यह सुनिश्चित किया जा सकता है कि:

$$S = (B^a)^b \pmod{r} = B^{ab} \pmod{r} = (B^b)^a \pmod{r}$$

इस प्रकार, एलिस और बॉब दोनों को एक ही साझा गुप्त मैट्रिक्स प्राप्त होती है।

A.3 सुरक्षा विचार

इस योजना की मजबूती एक गहरे गणनात्मक अवरोध पर निर्भर करती है: A , C , और B दिए जाने पर, a या b का अनुमान लगाने के लिए मैट्रिक्स क्षेत्र में विविक्त लघुगणक समस्या को हल करना आवश्यक होता है [18], जो बड़े r के लिए गणनात्मक रूप से असंभव माना जाता है [3]। यह इसके स्केलर पूर्वज (scalar progenitor) की मजबूती के समान है, लेकिन मैट्रिक्स विस्तार इसकी उपयोगिता को बढ़ाता है, जिससे आधुनिक नेटवर्क सुरक्षा के लिए महत्वपूर्ण प्रक्रियाओं जैसे सुरक्षित बहु-आयामी कुंजी समझौतों और रूपांतरणों का समर्थन होता है [12, 19]।

B. संदेश संचरण का आलेख सैद्धांतिक निरूपण

आलेख सिद्धांत, [14] संदेश प्रसारण को मॉडल और विश्लेषण करने का एक व्यवस्थित ढंग प्रदान करता है जिसमें मुख्यतः इसे भारित कोरों (weighted edges) के साथ एक पूर्ण आलेख के जरिए निरूपित किया जाता है। इस निरूपण में, प्रत्येक शीर्ष (vertex) एनकोडेड संदेश के एक हिस्से के संगत होता है, और कोर (edges) संख्यात्मक अंतरों के आधार पर उनके बीच संबंधों को दर्शाते हैं। इस अनुभाग में वर्तमान तकनीकों में प्रयुक्त निम्नलिखित अवधारणाएँ वर्णित की गई हैं:

1. पूर्ण आलेख निरूपण
2. शीर्ष संख्या निर्धारण के लिए एन्कोडिंग तालिका
3. आपतन शीर्ष के अंतर का उपयोग करते हुए भारित कोर

B.1 पूर्ण आलेख निरूपण

एक पूर्ण आलेख वह आलेख होता है जिसमें प्रत्येक भिन्न युग्म शीर्षों (vertices) के बीच एक किनारा (edge) होता है [14, 16] जब संदेश संचरण (message transmission) का मॉडल तैयार किया जाता है, तो निम्नलिखित परंपरा अपनाई जाती है:

• प्रत्येक शीर्ष एन्कोड किए गए संदेश में एक प्रतीक या वर्ण का प्रतिनिधित्व करता है।

• शीर्षों के बीच के किनारे इन प्रतीकों के बीच की परस्पर क्रिया या संक्रमण को दर्शाते हैं।

चूंकि एक पूर्ण आलेख यह सुनिश्चित करता है कि सभी प्रतीक एक-दूसरे को प्रभावित करते हैं, अर्थात् इसमें संपूर्ण संपर्कता (exhaustive connectivity) होती है। इससे यह सुनिश्चित होता है कि प्रत्येक प्रतीक अपने साथियों पर प्रभाव डालता है। यह संरचना

तालिका-1:

$f(V_{ij})$	0	1	2	3	4	5
1	A	B	C	D	E	F
2	G	H	I	J	K	L
3	M	N	O	P	Q	R
4	S	T	U	V	W	X
5	Y	Z	-	?	.	!

इस एन्कोडिंग के एक उदाहरण में हम देखते हैं, कि निम्नलिखित कोड प्राप्त किए जा सकते हैं:

$$f(V_{10}) = f(A) = 10$$

$$f(V_{40}) = f(S) = 40$$

$$f(V_{43}) = f(V) = 43$$

$$f(V_{31}) = f(N) = 31$$

$$f(V_{22}) = f(I) = 22$$

$$f(V_{41}) = f(T) = 41$$

B.3 आपतित शीर्षों के अंतर का उपयोग करते हुए भारित किनारे

पूर्ण आलेख में किनारों को उन शीर्षों के संख्यात्मक अंतर के आधार पर भार (weight) दिया जाता है, जिनसे वे जुड़े होते हैं। उदाहरण के लिए, यदि दो शीर्ष V और N को मान $f(V)$ और $f(N)$ दिए गए हैं, तो उनके बीच के किनारे का भार इस प्रकार निकाला जाता है:

विशेष रूप से कूटलेखन, त्रुटि पहचान (error detection), और नेटवर्क संप्रेषण (communication) मॉडल में उपयोगी होती है [16]।

B. 2 शीर्ष क्रमांकन के लिए एन्कोडिंग तालिका (Encoding Table for Vertex Numbering)

संदेश में प्रयुक्त प्रत्येक प्रतीक को नीचे दी गई एन्कोडिंग तालिका के आधार पर एक विशिष्ट संख्यात्मक मान दिया गया है:

$$W_{VN} = |f(V) - f(N)| = |43 - 31| = 12$$

यह सुनिश्चित करता है कि:

• प्रतीकों के मानों में अधिक अंतर होने पर भार भी अधिक होगा।

• भार वितरण (weight distribution) एन्कोड किए गए संदेश में विविधताओं को दर्शाता है।

• यह संदेश की जटिलता का विश्लेषण आलेख-सिद्धांत आधारित मापदंडों द्वारा करने का एक तरीका प्रदान करता है [16]।

C. चेबिशेव बहुपद और उनके गुण

चेबिशेव बहुपद [15] प्रस्तावित कूटलेखन योजना के लिए एक सशक्त गणितीय आधार प्रदान करते हैं। ये बहुपद अपनी लाम्बिक संरचना, अराजक गतिकी (chaotic dynamics), और सीमित क्षेत्रों (finite fields) में आवर्ती गुणों (periodic properties) का लाभ उठाते हैं।

इस अनुभाग में इन बहुपदों की परिभाषा दी गई है, इनके समाकलनों (integrals) को एक विश्लेषणात्मक विस्तार के रूप में प्रस्तुत किया गया है, और इनके गुणों यथा अराजक व्यवहार (chaotic behavior), सेमीग्रुप गुण (semigroup property) और मापांक अंकगणित (modular arithmetic) के अंतर्गत आवर्तिता (periodicity) का विवरण दिया गया है। ये सभी गुण इस कूटलेखन प्रणाली की क्रिप्टोग्राफिक मजबूती में महत्वपूर्ण योगदान देते हैं [1]।

C.1. चेबिशेव बहुपद (Chebyshev Polynomials)

चेबिशेव बहुपद [15], जिन्हें $T_n(x)$ से निरूपित किया जाता है, लाम्बिक बहुपद (orthogonal polynomials) का अनुक्रम होता है जो पुनरावृत्तिपूर्वक रूप में इस प्रकार परिभाषित है:

$$T_0(x) = 1$$

$$T_1(x) = x$$

$$T_n(x) = 2xT_{n-1}(x) - T_{n-2}(x), \text{ for } n \geq 2$$

C.2 चेबिशेव अराजकीय व्यवहार

चेबिशेव बहुपद (Chebyshev polynomials) कुछ विशेष क्षेत्रों, विशेषकर अंतराल $x \in [-1, 1]$, में पुनरावृत्त (iterate) करने पर अराजकीय (chaotic) व्यवहार प्रदर्शित करते हैं। अराजक गुण को समीकरण $T_n(x) = \cos(n \cos^{-1}(x))$ अथवा $T_2(x) = 2x^2 - 1$ द्वारा दर्शाया जाता है [17]। यह रूपांतरण प्रारंभिक स्थितियों पर अत्यधिक निर्भरता को दर्शाता है जो अराजक मानचित्रों (chaotic maps) की एक विशेषता है जिससे बिना x के सटीक ज्ञान के अनुक्रम (sequence) को पूर्वानुमानित करना असंभव हो जाता है [17]। ऐसा अराजक व्यवहार बलपूर्वक डिकोडिंग (brute-force decipherment) के विरुद्ध एन्क्रिप्शन को अधिक मजबूत बनाता है।

C.3 माड्यूलो p के अंतर्गत चेबिशेव बहुपदों का विस्तारित सेमिग्रुप गुण

चेबिशेव बहुपदों का एक मूलभूत गुण उनका सेमिग्रुप संरचना (semigroup structure) होना है [15]।

जब किसी अभाज्य संख्या p के साथ माड्यूलर अंकगणित (modular arithmetic) किया जाता है, तो चेबिशेव बहुपद एक समान संरचना को बनाए रखते हैं:

$$T_m(T_n(x)) = T_n(T_m(x)) = T_{mn}(x)$$

इसका तात्पर्य यह है कि चेबिशेव बहुपदों की गुणात्मक विशेषताएँ, जैसे संयोजन पर स्थायित्व (closure under composition), माड्यूलो p के अंतर्गत भी बनी रहती हैं, जो क्रिप्टोग्राफिक एल्गोरिथ्म में इन्हें विशेष रूप से उपयोगी बनाती हैं।

$$T_m(T_n(x \bmod p)) \bmod p = T_n(T_m(x \bmod p)) \bmod p = T_{mn}(x \bmod p) \bmod p$$

C.4. चेबिशेव अनुक्रम का आवर्ती व्यवहार

चेबिशेव अनुक्रम, मापांक अंकगणित (modular arithmetic) के अंतर्गत गणना किए जाने पर आवर्ती (periodic) व्यवहार प्रदर्शित करता है। चूँकि परिमित क्षेत्र (finite fields) में तत्वों की संख्या सीमित होती है, इसलिए चेबिशेव बहुपदों (Chebyshev polynomials) को दोहराने पर चक्रीय (cyclic) स्वरूप प्राप्त होता है। अर्थात्, किसी निश्चित आवर्त t के लिए हम पाते हैं कि

$$T_n(x) = T_{n+t}(x) \bmod p$$

यह उल्लेखनीय है कि चेबिशेव बहुपद अनुक्रम का आवर्त

$\{T_n(x)\}_{n \geq 0} \pmod{p}$ (odd prime) for each $x = 0, 1, 2, \dots, p-1, p^2-1$ का एक भाजक है

उदाहरण : अनुक्रम $\{T_n(x)\}_{n \geq 0} \pmod{19}$ प्रत्येक $x = 0, 1, 2, \dots, 18$ का आवर्त निम्नलिखित से दिया जाता है:

$x = 0: 0, 1, 0, 18, 0, 1, 0, 18, 0 \dots$ (period 4),

$x = 1: 1, 1, 1, 1, 1, 1 \dots$ (period 0),

$x = 2: 2, 1, 2, 7, 7, 2, 1, 2, 7, 7, 2 \dots$ (period 5),

$x = 3: 3, 1, 3, 17, 4, 7, 0, 12, 15, 2, 16, 18, 16, 2, 15, 12, 0, 7, 4, 17, 3 \dots$ (period 20),

$x = 4: 4, 1, 4, 12, 16, 2, 0, 17, 3, 7, 15, 18, 15, 7, 3, 17, 0, 2, 16, 12, 4 \dots$ (period 20),

$x = 0 \quad x = 0 \quad x = 0$ से 18 18 18 तक के आवर्त की तालिका $19^2-1=360 \quad 19^2-1=360$
 $19^2-1=360$ के भाजक प्रकट करती है:

X	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period	4	1	5	20	20	18	18	5	18	3	6	9	10	9	9	20	20	10	2

यहाँ सभी आवर्त $19^2-1=20 \times 18$ के भाजक हैं। यह सुगमता से सत्यापित किया जा सकता है कि किसी भी विषम अभाज्य संख्या p के आवर्त सदैव $x = 0, x = 1$ और $x = p-1$ के लिए क्रमशः 4, 1, और 2 हैं।

D. कोकेरेव द्वारा चेबिशेव बहुपदों का उपयोग करके RSA योजना

लियोनार्ड कोकेरेव [17] ने एक RSA-जैसी एन्क्रिप्शन योजना का प्रस्ताव किया, जो चेबिशेव बहुपदों के अराजक गुणों का उपयोग करती है। इस विधि का मूल विचार यह है कि RSA में प्रयुक्त मापांक घातांक (modular exponentiation) को चेबिशेव बहुपदों के संयोजन गुण (composition property) से प्रतिस्थापित किया जाए। यह दृष्टिकोण बहुपदों के अराजक स्वभाव का लाभ उठाकर सुरक्षा को बढ़ाता है, जबकि RSA की गुणनखंडन-आधारित नींव को बरकरार रखता है [1]।

D.1. कुंजी निर्माण

कुंजी निर्माण की प्रक्रिया में निम्नलिखित चरण होते हैं:

1. दो बड़ी अभाज्य संख्याएँ p और q चुनें, और फिर $N = pq$ तथा $N^* = (p^2-1)(q^2-1)$ की गणना करें।

2. एक निजी पूर्णांक d चुनें और उसका मापांक प्रतिलोम (modular inverse) e इस प्रकार ज्ञात करें कि

$ed \equiv 1 \pmod{N^*}$, (e, N) सार्वजनिक कुंजी है और d निजी कुंजी है।

D.2. कूटन

एक संदेश $x: 1 \leq x \leq N$, के लिए कूटलिखित पाठ्यांश (ciphertext) का परिकलन निम्नलिखित प्रकार से होगा:

$$C = T_e(x) \pmod{N}$$

यहाँ $T_e(x) \pmod{N}$ चेबिशेव बहुपद (Chebyshev polynomial) है, जिसकी डिग्री e है, और जिसे x पर मापांक N (modulo N) के अंतर्गत मूल्यांकित किया गया है [15]।

D.3. विकूटन

मूल संदेश x को पुनः प्राप्त करने के लिए निम्नलिखित गणना करें:

$$x = T_d(C) \pmod{N}$$

D.4. डिक्रिप्शन योजना का सत्यापन

यहाँ कुछ महत्वपूर्ण अवलोकन हैं:

1. विकूटन (decryption) सफल होता है क्योंकि $T_c(T_d(x)) = T_{c,d}(x)$, और चूंकि $e.d \equiv 1 \pmod{N^*}$, अतः $T_{c,d}(x) \equiv T_1(x) \equiv x \pmod{N}$ [17].

2. इसी प्रकार $T_d(T_c(x)) \equiv x \pmod{N}$ । चाइनीज शेषफल प्रमेय (Chinese Remainder Theorem) यह सुनिश्चित करता है कि यह अलग अलग अविभाज्य संख्याओं p और q में मान्य राहत है।

इन बिन्दुओं को निम्नलिखित तरीके से सविस्तार समझाया जा सकता है:

$$ed \equiv 1 \pmod{N^*} \Rightarrow ed = 1 + kN^* = 1 + k(p^2 - 1)(q^2 - 1),$$

$$T_{ed}(x) \pmod{p} \equiv T_{1+kN^*}(x) \pmod{p} \equiv T_1(x) \pmod{p} \equiv x \pmod{p} \quad \because p \mid N^*$$

समान तर्क का उपयोग करते हुए,

$$T_{ed}(x) \pmod{q} \equiv T_{1+kN^*}(x) \pmod{q} \equiv T_1(x) \pmod{q} \equiv x \pmod{q} \quad \because q \mid N^*$$

चूंकि p और q अलग अलग संख्याएं हैं, अतः चाइनीज शेषफल प्रमेय (Chinese Remainder theorem) के प्रयोग से

$$T_{ed}(x) \pmod{N} \equiv T_{1+kN^*}(x) \pmod{N} \equiv T_1(x) \pmod{N} \equiv x \pmod{N}$$

D.5. सुरक्षा विचार

- यह स्पष्ट है कि चेबिशेव-आधारित RSA की सुरक्षा इस पर निर्भर करती है कि बिना निजी कुंजी के चेबिशेव बहुपदों का व्युत्क्रम (inverse) निकालना कितना कठिन है। इस समस्या का कोई प्रभावी समाधान उपलब्ध नहीं है [15]। इसके अतिरिक्त, चेबिशेव बहुपदों का अराजक व्यवहार (chaotic behaviour) इसे अप्रत्याशितता की एक अतिरिक्त परत प्रदान करता है [17]। इस योजना की सुरक्षा पारंपरिक RSA की तरह गुणनखंडन समस्या (factoring problem) पर भी निर्भर करती है। चूंकि मापांक N को दो बड़ी अभाज्य संख्याओं p और q के गुणनफल के रूप में

चुना जाता है, इसलिए एनक्रिप्शन को तोड़ने d ढूंढना, N को $N^* = (p^2 - 1)(q^2 - 1)$ फैक्टर करना आवश्यक होगा जो कि बड़े अंकों के लिए व्यावहारिक रूप से असंभव है [4]।

प्रस्तावित योजना का एक उदाहरण द्वारा चित्रण

- जैसा कि पिछले अनुभाग में वर्णित किया गया है, प्रस्तावित कूटलेखन योजना में संदेश को एक पूर्ण आलेख के बाहरी हैमिल्टोनियन पथ (outer Hamiltonian path) के शीर्षों (vertices) पर एन्कोड किया जाता है। किनारों (edges) का भारनिर्धारण संबंधित आपतन शीर्षों (incident vertices) के एन्कोड किए गए मानों के अंतर के आधार पर निर्धारित

किया जाता है। इसके बाद, पूर्ण आलेख के भारित आसन्नता आव्यूह (weighted adjacency matrices) का निर्माण किया जाता है और इसे एक साझा कुंजी आव्यूह (shared key matrix) से गुणा किया जाता है, जिसे आव्यूह – आधारित डिफ्फी–हेलमैन कुंजी विनिमय योजना के माध्यम से सुरक्षित रूप से साझा किया गया होता है।

प्राप्त मैट्रिक्स को फिर कोकेरेव द्वारा प्रस्तावित चेबिशेव–RSA योजना का उपयोग करके एन्क्रिप्ट किया जाता है। डिफ्फी–हेलमैन के लिए, एन्क्रिप्टेड आव्यूह को पहले चेबिशेव–RSA योजना का उपयोग करके डिफ्फी किया जाता है। उसके बाद, परिणाम को साझा कुंजी आव्यूह के व्युत्क्रम (inverse) से गुणा

किया जाता है। अंत में, भारित आसन्नता आव्यूह और एन्कोडिंग तालिका का उपयोग करके संदेश को चरण–दर–चरण पुनर्प्राप्त किया जाता है। नीचे एक विस्तृत चरण–दर–चरण प्रक्रिया को एक उदाहरण सहित प्रस्तुत किया गया है।

एन्क्रिप्शन प्रक्रिया शुरू करने से पहले, एलिस और बॉब संदेश की लंबाई के आधार पर आव्यूह – आधारित डिफ्फी–हेलमैन कुंजी विनिमय विधि का उपयोग करके एक साझा कुंजी आव्यूह स्थापित करते हैं।

मान लीजिए एलिस बॉब को पाँच अक्षरों का संदेश भेजना चाहती है। दोनों एक 5×5 आधार आव्यूह B और एक अभाज्य संख्या r पर सहमत होते हैं:

$$B = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 & 5 & 6 \\ 3 & 4 & 9 & 2 & 7 \\ 5 & 6 & 2 & 1 & 3 \\ 4 & 5 & 7 & 3 & 5 \\ 7 & 3 & 4 & 5 & 8 \end{pmatrix} \text{ एवं } r=11$$

कुंजी विनिमय

- निजी कुंजी चयन

एलिस एक निजी पूर्णांक $a=3$ चुनती है, जो गुप्त रहता है।

बॉब एक निजी पूर्णांक $b=4$ चुनता है, जो गुप्त रहता है।

- सार्वजनिक कुंजी का परिकलन

एलिस सार्वजनिक कुंजी का परिकलन करती है:

$$A \equiv B^a \pmod{r} \equiv B^3 \pmod{11}$$

$$A \equiv \begin{pmatrix} 1732 & 1625 & 2053 & 1387 & 2470 \\ 2243 & 2092 & 2714 & 1821 & 3252 \\ 1700 & 1544 & 1793 & 1213 & 2200 \\ 2210 & 2058 & 2573 & 1709 & 3089 \\ 2607 & 2392 & 2955 & 2008 & 3567 \end{pmatrix} \pmod{11}$$

$$A = \begin{pmatrix} 5 & 8 & 7 & 1 & 6 \\ 10 & 2 & 8 & 6 & 7 \\ 6 & 4 & 0 & 3 & 0 \\ 10 & 1 & 10 & 4 & 9 \\ 7 & 5 & 7 & 6 & 3 \end{pmatrix}$$

और A, बॉब को प्रेषित कर देती है।

- बॉब सार्वजनिक आव्यूह का परिकलन करता है:

$$C \equiv B^b \pmod{r} \equiv B^4 \pmod{11}$$

$$C \equiv \begin{pmatrix} 37910 & 36627 & 45248 & 30474 & 54621 \\ 52137 & 47999 & 58983 & 39836 & 71365 \\ 35549 & 32999 & 41573 & 28020 & 50052 \\ 49708 & 45902 & 56827 & 38311 & 68642 \\ 57559 & 53253 & 66190 & 44633 & 79827 \end{pmatrix} \pmod{11}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 8 & 5 & 4 & 6 \\ 8 & 6 & 1 & 5 & 8 \\ 8 & 10 & 4 & 3 & 2 \\ 10 & 10 & 1 & 9 & 2 \\ 7 & 2 & 3 & 6 & 0 \end{pmatrix}$$

और C एलिस को प्रेषित कर देता है।

साझा कुंजी का परिकलन

एलिस परिकलित करती है:

$$S \equiv C^a \equiv B^{ba} \pmod{r}$$

$$S \equiv \begin{pmatrix} 3444 & 4322 & 1653 & 3279 & 2670 \\ 4376 & 4938 & 1784 & 3835 & 2854 \\ 4508 & 4800 & 1837 & 3888 & 2936 \\ 5564 & 5970 & 2186 & 4859 & 3634 \\ 3246 & 3460 & 1207 & 2720 & 2176 \end{pmatrix} \pmod{11}$$

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 10 & 3 & 1 & 8 \\ 9 & 10 & 2 & 7 & 5 \\ 9 & 4 & 0 & 5 & 10 \\ 9 & 8 & 8 & 8 & 4 \\ 1 & 6 & 8 & 3 & 9 \end{pmatrix} \text{ अ}$$

बॉब परिकलन करता है:

$$S \equiv A^b \equiv B^{ab} \pmod{r}$$

$$S \equiv \begin{pmatrix} 95635 & 70080 & 96143 & 60853 & 74511 \\ 115960 & 84567 & 116074 & 72915 & 90414 \\ 57154 & 39450 & 56034 & 35711 & 43933 \\ 111978 & 83432 & 113055 & 70540 & 87850 \\ 76242 & 55567 & 75732 & 48920 & 58672 \end{pmatrix} \pmod{11}$$

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 10 & 3 & 1 & 8 \\ 9 & 10 & 2 & 7 & 5 \\ 9 & 4 & 0 & 5 & 10 \\ 9 & 8 & 8 & 8 & 4 \\ 1 & 6 & 8 & 3 & 9 \end{pmatrix}$$

चूँकि आव्यूह घातांक, गुणन साहचर्य नियम का पालन करता है:

$$(B^a)^b = (B^b)^a \equiv B^{ab} \pmod{r}$$

एन्क्रिप्शन योजना:

- एलिस एन्क्रिप्शन प्रक्रिया की शुरुआत मूल संदेश "SVNIT" से करती है। चूँकि यह संदेश पाँच अक्षरों का है, वह एक पूर्ण आलेख K5 बनाती है और प्रत्येक अक्षर को आलेख के शीर्षों (vertices) पर एक विशिष्ट सांकेतिक संख्यात्मक मान (encoded numerical value) सौंपती है। इसके बाद, वह किनारों (edges) के भारों (weights) की गणना उन संबंधित शीर्षों के सांकेतिक मानों के परस्पर अनुपात (absolute difference) के रूप में करती है।

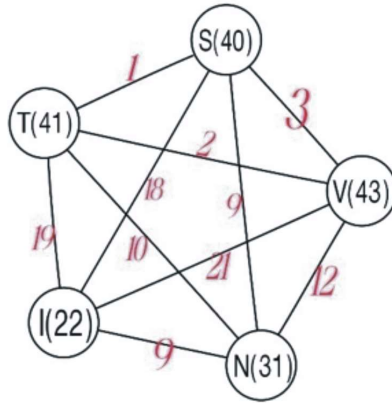
$$W_{SV} = |f(V) - f(S)| = |43 - 40| = 3$$

$$W_{VN} = |f(N) - f(V)| = |31 - 43| = 12$$

$$W_{NI} = |f(I) - f(N)| = |22 - 31| = 9$$

$$W_{IT} = |f(T) - f(I)| = |41 - 22| = 19$$

$$W_{TS} = |f(S) - f(T)| = |40 - 41| = 1 \text{ और इसी प्रकार}$$



- एलिस पूर्ण आलेख K5 से प्राप्त किए गए किनारों के भारों (edge weights) के आधार पर भारित आसन्नता आव्यूह (weighted adjacency matrix) का निर्माण करती है।

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} S & V & N & I & T \end{matrix} \\ \begin{matrix} S \\ V \\ N \\ I \\ T \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 3 & 9 & 18 & 1 \\ 3 & 0 & 12 & 21 & 9 \\ 9 & 12 & 0 & 9 & 10 \\ 18 & 21 & 9 & 0 & 19 \\ 1 & 2 & 10 & 19 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

- ऐलिस प्रारंभिक अक्षर के कूटबद्ध मान (encoded value) को विकर्ण की सबसे ऊपरी-बाएँ स्थिति में लिखती है।

$$M_1 = \begin{matrix} & \begin{matrix} S & V & N & I & T \end{matrix} \\ \begin{matrix} S \\ V \\ N \\ I \\ T \end{matrix} & \begin{pmatrix} 40 & 3 & 9 & 18 & 1 \\ 3 & 0 & 12 & 21 & 9 \\ 9 & 12 & 0 & 9 & 10 \\ 18 & 21 & 9 & 0 & 19 \\ 1 & 2 & 10 & 19 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

- इसे साझा आव्यूह S से गुणा करके एलिस परिकलित करती है

$$E = M_1 \cdot S = \begin{pmatrix} 311 & 616 & 278 & 253 & 506 \\ 302 & 258 & 193 & 237 & 246 \\ 208 & 342 & 203 & 195 & 258 \\ 307 & 540 & 248 & 267 & 510 \\ 280 & 222 & 159 & 217 & 194 \end{pmatrix}$$

- इसके बाद, इस आव्यूह को चेबिशेव–RSA(Chebyshev-RSA scheme) योजना का उपयोग करके एन्क्रिप्ट किया जाता है।

बॉब दो अभाज्य संख्याएँ $p=23$ तथा $q=29$ चुनता है, और निम्नलिखित गणनाएँ करता है:

$$N = pq = 23 \times 29 = 667$$

फिर वह परिकलन करता है:

$$N^* = (p^2 - 1)(q^2 - 1) = 443520$$

बॉब $e = 13$ का चयन करता है और d का परिकलन इस प्रकार से करता है:

$$ed \equiv 1 \pmod{N^*}$$

d के लिए हल करने पर, वह प्राप्त करता है:

$$d = 34117$$

फिर बॉब e और N को सार्वजनिक कर देता है।

- अब एलिस परिकलन करती है:

$$F \equiv T_{13}(E) \pmod{667}$$

$$F = \begin{pmatrix} 472 & 503 & 490 & 414 & 506 \\ 293 & 394 & 497 & 488 & 478 \\ 24 & 6 & 464 & 356 & 394 \\ 606 & 540 & 480 & 400 & 548 \\ 410 & 613 & 246 & 565 & 542 \end{pmatrix}$$

एलिस अंतिम एन्क्रिप्टेड मैट्रिक्स के रूप में F को बॉब को भेजती है।

विकूटन योजना:

- बॉब अपनी निजी कुंजी का उपयोग करके प्राप्त करता है – $E \equiv T_{34117}(F) \pmod{667}$

$$E = \begin{pmatrix} 311 & 616 & 278 & 253 & 506 \\ 302 & 258 & 193 & 237 & 246 \\ 208 & 342 & 203 & 195 & 258 \\ 307 & 540 & 248 & 267 & 510 \\ 280 & 222 & 159 & 217 & 194 \end{pmatrix}$$

विकूटन प्रक्रिया का सत्यापन निम्नलिखित प्रकार से किया गया है:

$$T_d(T_e(E) \pmod{pq}) \pmod{pq} \equiv T_{de}(E) \pmod{pq}$$

$$T_{de}(E) \pmod{pq} \equiv T_{(1+1.N^*)}(E) \pmod{pq} \equiv T_1(E) = E$$

- अब, बॉब साझा कुंजी आव्यूह S^{-1} के व्युत्क्रम (inverse) से E को गुणा करके M_1 को पुनः प्राप्त करता है।

$$M1 = E.S^{-1} = \begin{pmatrix} 311 & 616 & 278 & 253 & 506 \\ 302 & 258 & 193 & 237 & 246 \\ 208 & 342 & 203 & 195 & 258 \\ 307 & 540 & 248 & 267 & 510 \\ 280 & 222 & 159 & 217 & 194 \end{pmatrix} \cdot \frac{1}{9504} \begin{pmatrix} 2880 & -4320 & 1728 & 3744 & -3744 \\ 1110 & 315 & -522 & 156 & -651 \\ 1212 & -2610 & 252 & 2328 & -942 \\ -5392 & 7032 & -1968 & -5056 & 5320 \\ -340 & 246 & 588 & -904 & 970 \end{pmatrix}$$

$$M_1 = N \begin{matrix} & S & V & N & I & T \\ S & \begin{pmatrix} 40 & 3 & 9 & 18 & 1 \\ 3 & 0 & 12 & 21 & 9 \\ 9 & 12 & 0 & 9 & 10 \\ 18 & 21 & 9 & 0 & 19 \\ 1 & 2 & 10 & 19 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

बॉब भारत आसन्नता आव्यूह (weighted adjacency matrix) के विकर्ण (diagonal) की प्रथम प्रविष्टि (entry) के साथ सुपर-विकर्ण (super-diagonal) प्रविष्टियों का उपयोग करता है। एक सरल गणना प्रक्रिया के माध्यम से, वह पूर्ण आलेख (complete graph) का पुनर्निर्माण करता है। इस पुनर्निर्मित आलेख और एन्कोडेड तालिका (encoded table) का उपयोग करके, बॉब मूल संदेश SVNIT को सफलतापूर्वक डिकोड करता है।

निष्कर्ष

प्रस्तावित एन्क्रिप्शन तकनीक आलेख सिद्धांत, कुंजी विनिमय तंत्र, और चेबिशेव बहुपदों के साथ RSA एन्क्रिप्शन का सफलतापूर्वक एकीकरण करती है, इस प्रकार एक बहु-स्तरीय सुरक्षा दृष्टिकोण प्रदान करती है। पूर्ण आलेख की भारत आसन्नता आव्यूह का उपयोग करके, यह विधि संदेश को कुशलतापूर्वक एन्कोड करते हुए मजबूत गूढालेखी सुरक्षा भी सुनिश्चित करती है [14]। डिफ्फी-हेलमैन आव्यूह – आधारित कुंजी विनिमय साझा गुप्त व्युत्पत्ति (shared secret derivation) के माध्यम से गोपनीयता को बढ़ाता है,

जबकि चेबिशेव बहुपदों का अराजक व्यवहार एन्क्रिप्शन को हमलों के प्रति अधिक प्रतिरोधी बनाता है।

पारंपरिक गूढालेखी तकनीकों की तुलना में, यह दृष्टिकोण डिस्क्रीट लॉगरिद्म समस्या और पूर्णांक गुणनखंडन समस्या दोनों का लाभ एक साथ उठाता है, जिससे संभावित हमलावरों के लिए जटिलता काफी बढ़ जाती है। प्रस्तावित योजना न केवल मजबूत सुरक्षा और गणनात्मक दक्षता सुनिश्चित करती है, बल्कि यह सुरक्षित संचार और डेटा सुरक्षा में वास्तविक अनुप्रयोगों के लिए भी उपयुक्त है।

भविष्य के अनुसंधान का दायरा

इस प्रणाली की गणनात्मक दक्षता को अनुकूलित करने, क्वांटम हमलों के प्रति प्रतिरोध का अन्वेषण करने, और इसे ब्लॉकचेन तथा सुरक्षित क्लाउड कंप्यूटिंग जैसे क्षेत्रों में विस्तारित करने पर केंद्रित हो सकता है। यह अध्ययन आलेख – सिद्धांत आधारित कूटलेखन को संख्या-सैद्धांतिक (number-theoretic) सुरक्षा सिद्धांतों के साथ संयोजित करने की संभावनाओं को दर्शाते हुए आधुनिक क्रिप्टोग्राफिक प्रणालियों की प्रगति में एक महत्वपूर्ण योगदान देता है।

संदर्भ

1. Katz, J., & Lindell, Y. (2021). Introduction to Modern Cryptography (3rd ed.). Chapman & Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781351133036> (Utility in cryptography)
2. Diffie, W., & Hellman, M. (1976). New Directions in Cryptography. IEEE Transactions on Information Theory, 22(6), 644-654. <https://doi.org/10.1109/TIT.1976.1055638>
3. Shor, P. W. (1997). Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. SIAM Journal on Computing, 26(5), 1484-1509. <https://doi.org/10.1137/S0097539795293172>
4. Rivest, R. L., Shamir, A., & Adleman, L. (1978). A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems. Communications of the ACM, 21(2), 120-126. <https://doi.org/10.1145/359340.359342>
5. Boneh, D., & Shoup, V. (2020). A Graduate Course in Applied Cryptography. <https://toc.cryptobook.us/>
6. ElGamal, T. (1985). A Public Key Cryptosystem and a Signature Scheme Based on Discrete Logarithms. IEEE Transactions on Information Theory, 31(4), 469-472. <https://doi.org/10.1109/TIT.1985.1057074>
7. Schnorr, C. P. (1991). Efficient Identification and Signatures for Smart Cards. Advances in Cryptology - CRYPTO '89, 239-252. https://doi.org/10.1007/0-387-34805-0_22
8. National Institute of Standards and Technology (NIST). (2020). Digital Signature Standard (DSS). Federal Information Processing Standards Publication 186-4. <https://doi.org/10.6028/NIST.FIPS.186-4>
9. Buchmann, J., Dahmen, E., & Hülsing, A. (2019). Post-Quantum Signatures: A Survey. Journal of Mathematical Cryptology, 13(2), 73-99. <https://doi.org/10.1515/jmc-2018-0010>
10. Toral, R. (2005). On the Use of Chebyshev Polynomials in Discrete-Time Cryptography. Chaos, Solitons & Fractals, 24(4), 1117-1126. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2004.09.066>
11. Alvarez, G., & Li, S. (2006). Some Basic Cryptographic Requirements for Chaos-Based Cryptosystems. International Journal of Bifurcation and Chaos, 16(8), 2129-2151. <https://doi.org/10.1142/S0218127406015970>
12. Bernstein, D. J., & Lange, T. (2022). Post-Quantum Cryptography: State of the Art. Journal of Cryptology, 35(1), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s00145-021-09412-3>
13. NIST. (2023). Post-Quantum Cryptography Standardization: Round 4 Report. <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>
14. Diestel, R. (2017). Graph Theory. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-53622-3>
15. Dubey, A., Kumar, S., & Sharma, P. (2020). Introduction to Chebyshev Polynomials and Their Applications in Cryptography. Springer. (Chebyshev foundation)
16. Gross, J. L., & Yellen, J. (2003). Graph Theory and Its Applications (2nd ed.). Chapman & Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9780203490204>

17. Kocarev, L. (2001). Chaos-Based Cryptography: A Brief Overview. IEEE Circuits and Systems Magazine, 1(3), 6-21. <https://doi.org/10.1109/7384.963463> (Chaos properties)
18. Odlyzko, A. M. (2000). Discrete Logarithms: The Past and Future. Designs, Codes, and Cryptography, 19(2), 129-145.
19. Chen, L., Moody, D., & Regenscheid, A. (2022). Lightweight Cryptography: NIST Standards and Applications. NISTIR 8346. <https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8346>
20. Mason, J. C., & Handscomb, D. C. (2003). Chebyshev Polynomials. Chapman & Hall/CRC. <https://doi.org/10.1201/9781420036114> (New: Chebyshev integrals and properties)

भारतीय पंचांग और आधुनिक काल गणना : एक तुलनात्मक अध्ययन
Indian Panchang and Modern Time Reckoning: A Comparative Study

वी. के. मिश्र¹ एवं प्रवीण त्यागी²

V.K. Mishra¹ and Praveen Tyagi²

¹Assistant Professor, Department of Physics

²Junior Research Fellow, Department of Physics

Atal Bihari Vajpayee Hindi Vishwavidyalaya, Bhopal-462038

¹vkmishra74@yahoo.com

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19667369>

सारांश

यह शोधपत्र पारंपरिक भारतीय पंचांग प्रणाली और आधुनिक ग्रेगोरियन काल गणना प्रणाली के बीच एक बहुआयामी तुलनात्मक अध्ययन प्रस्तुत करता है, जिसमें दोनों प्रणालियों की उत्पत्ति, संरचना, खगोलीय सिद्धांत, सांस्कृतिक महत्व और वैज्ञानिक वैधता का विश्लेषण किया गया है। भारतीय पंचांग, जो तिथि, नक्षत्र, योग, करण और वार जैसे पाँच अंगों पर आधारित है, न केवल धार्मिक और सांस्कृतिक जीवन का अभिन्न अंग है, बल्कि खगोलीय गणनाओं की दृष्टि से भी अत्यंत समृद्ध है। इसके विपरीत, आधुनिक काल गणना प्रणाली जैसे ग्रेगोरियन कैलेंडर, सौर वर्ष पर आधारित एक वैश्विक मानक है, जो प्रशासनिक और वैज्ञानिक आवश्यकताओं की पूर्ति करता है। शोध में पंचांग की ऐतिहासिक पृष्ठभूमि को वेदांग ज्योतिष, सूर्य सिद्धांत, आर्यभटीय, बृहत्संहिता और सिद्धांत शिरोमणि जैसे ग्रंथों के माध्यम से प्रस्तुत किया गया है, जिससे यह स्पष्ट होता है कि भारतीय खगोलशास्त्रियों ने समय मापन की अत्यंत सटीक और वैज्ञानिक विधियाँ विकसित की थीं। पंचांग की दो प्रमुख विधियाँ—दृक पंचांग और वाक्य पंचांग—की तुलना की गई है, जहाँ दृक पंचांग आधुनिक खगोल डेटा पर आधारित होता है और वाक्य पंचांग पारंपरिक सूत्रों पर।

अध्ययन में वर्ष 2020 से 2025 के बीच वाराणसी पंचांग और राष्ट्रीय पंचांग (CSIR-NPL) में उल्लिखित प्रमुख खगोलीय घटनाओं जैसे सूर्य ग्रहण, चंद्र ग्रहण, संक्रांति, अयन परिवर्तन आदि का NASA, ISRO और Stellarium जैसे आधुनिक स्रोतों से तुलनात्मक विश्लेषण किया गया है। परिणामस्वरूप, 90% से अधिक घटनाओं में पूर्ण साम्य पाया गया, जिससे पंचांग की वैज्ञानिक सटीकता सिद्ध होती है। इसके अतिरिक्त, शोध में यह भी दर्शाया गया है कि आधुनिक डिजिटल युग में पंचांग की प्रासंगिकता बनी हुई है। मोबाइल ऐप्स, वेबसाइटें और सरकारी कैलेंडर अब "डुअल डेट फॉर्मेट" को अपनाते हैं, जिसमें पारंपरिक तिथियाँ और ग्रेगोरियन तिथियाँ एक साथ दी जाती हैं। यह समन्वय दर्शाता है कि परंपरा और आधुनिकता एक-दूसरे के पूरक बन सकते हैं।

अंततः, यह शोध इस बात की ओर संकेत करता है कि भविष्य में एक समन्वित 'हाइब्रिड कालगणना प्रणाली' विकसित की जा सकती है, जो भारतीय सांस्कृतिक मूल्यों और आधुनिक वैज्ञानिक सटीकता को एक साथ समाहित कर सके। यह प्रणाली न केवल धार्मिक और सामाजिक जीवन को दिशा देगी, बल्कि वैज्ञानिक अनुसंधान और प्रशासनिक कार्यों में भी उपयोगी सिद्ध होगी। इस प्रकार, यह अध्ययन पंचांग विज्ञान, खगोलशास्त्र, सांस्कृतिक अध्ययन और डिजिटल तकनीकी के समन्वय से समय मापन के एक नवीन और सर्वमान्य मानक की नींव रखता है।

Abstract

This research paper presents a multidimensional comparative study between the traditional Indian Panchang system and the modern Gregorian time-reckoning system, analyzing the origin, structure, astronomical principles, cultural significance, and scientific validity of both systems. The Indian Panchang, which is based on five components-Tithi (lunar day), Nakshatra (lunar constellation), Yoga, Karana, and Vara (weekday)-is not only an integral part of religious and cultural life but is also highly sophisticated from the perspective of astronomical calculations. In contrast, the modern time-reckoning system, such as the Gregorian calendar, is a global standard based on the solar year and fulfills administrative and scientific requirements.

The study presents the historical background of the Panchang through classical texts such as Vedanga Jyotisha, Surya Siddhanta, Aryabhatiya, Brihat Samhita, and Siddhanta Shiromani, which demonstrate that Indian astronomers had developed highly accurate and scientific methods of time measurement. The two major methods of Panchang calculation-Drik Panchang and Vakya Panchang-have been compared, where the Drik Panchang is based on modern astronomical data, while the Vakya Panchang is based on traditional formulae.

The study also includes a comparative analysis of major astronomical events mentioned in the Varanasi Panchang and the National Panchang (CSIR-NPL) between the years 2020 and 2025, such as solar eclipses, lunar eclipses, Sankranti (solar transitions), and solstitial changes, with modern sources like NASA, ISRO, and Stellarium. As a result, more than 90% of the events showed complete agreement, thereby establishing the scientific accuracy of the Panchang. Additionally, the research highlights that the Panchang remains relevant in the modern digital era. Mobile applications, websites, and government calendars have now adopted a "dual date format," in which traditional dates and Gregorian dates are presented together. This coordination demonstrates that tradition and modernity can complement each other.

Finally, the research indicates the possibility of developing an integrated 'hybrid time-reckoning system' in the future, which can incorporate Indian cultural values along with modern scientific accuracy. Such a system would not only guide religious and social life but would also prove useful in scientific research and administrative functions. Thus, this study lays the foundation for a new and universally acceptable standard of time measurement through the integration of Panchang science, astronomy, cultural studies, and digital technology.

मुख्यशब्द: भारतीय पंचांग, ग्रेगोरियन कैलेंडर, सूर्य सिद्धांत, दृक पंचांग, डिजिटल पंचांग।

Key words: Indian Panchang, Gregorian Calendar, Surya Siddhanta, Drik Panchang, Digital Panchang.

1. परिचय (Introduction)

काल गणना (Time Reckoning) न केवल मानव सभ्यता के वैज्ञानिक और खगोलशास्त्रीय विकास से जुड़ी है, बल्कि यह सांस्कृतिक, धार्मिक और प्रशासनिक संरचनाओं का भी मूल आधार रही है। प्रारंभिक मानव समाजों ने आकाशीय पिंडों की गति के आधार पर समय को समझने का प्रयास किया, जिससे पंचांग जैसे जटिल समय निर्धारण तंत्र विकसित हुए। भारतीय

पंचांग प्रणाली नक्षत्रों, ग्रहों और चंद्र-सौर गतियों के अवलोकन पर आधारित है, जिसमें समय को 'तिथि', 'वार', 'नक्षत्र', 'करण' और 'योग' जैसे पाँच अंगों में विभाजित किया गया है [1-3]। यह प्रणाली केवल समय मापन का उपकरण नहीं है, बल्कि भारतीय दर्शन, ज्योतिष और सामाजिक जीवन का अभिन्न अंग भी है। भारतीय पंचांग प्रणाली खगोलीय निरीक्षणों और वैदिक दर्शन पर आधारित एक स्वदेशी विधि के

रूप में विकसित हुई [4]। इसके विपरीत, आधुनिक काल गणना प्रणाली जैसे ग्रेगोरियन कैलेंडर, ज्यूलियन कैलेंडर आदि वैज्ञानिक क्रांति और औपनिवेशिक काल में वैश्विक मानकीकरण की आवश्यकता के तहत विकसित हुए [5]। इनमें पृथ्वी की सूर्य के चारों ओर गति को आधार मानकर दिन, सप्ताह, महीनों और वर्षों का निर्धारण किया गया [6]। आधुनिक प्रणाली में अंतर्राष्ट्रीय समन्वय और तकनीकी एकरूपता को प्राथमिकता दी गई, जबकि सांस्कृतिक विविधता को अपेक्षाकृत कम महत्व मिला।

आज की वैश्विक दुनिया में यह अत्यंत आवश्यक हो गया है कि हम भारतीय पंचांग प्रणाली और आधुनिक काल गणना प्रणाली के बीच अंतर को केवल एक तुलनात्मक दृष्टिकोण से न देखें, बल्कि यह भी समझें कि किस प्रकार ये दोनों प्रणालियाँ एक-दूसरे की पूरक बन सकती हैं। वैश्विकरण और तकनीकी एकीकरण के इस युग में जहाँ एक ओर अंतर्राष्ट्रीय मानकीकरण की आवश्यकता है, वहीं दूसरी ओर स्थानीय सांस्कृतिक मूल्यों, परंपराओं और पहचान को बनाए रखना भी उतना ही महत्वपूर्ण है। इस द्वैध आवश्यकता को ध्यान में रखते हुए, भारत सरकार और विभिन्न शासकीय एवं शैक्षिक संस्थानों द्वारा प्रकाशित पंचांगों में पारंपरिक भारतीय तिथि के साथ-साथ ग्रेगोरियन कैलेंडर की तिथियाँ भी स्पष्ट रूप से अंकित की जाती हैं [7]। यह समन्वय दर्शाता है कि आधुनिक विज्ञान की सटीकता और पारंपरिक ज्ञान की सांस्कृतिक गहराई को एक साथ लाना संभव है। उदाहरण के लिए, वर्ष 2021 में राष्ट्रीय भौतिक प्रयोगशाला (NPL) द्वारा प्रकाशित राष्ट्रीय पंचांग में भारतीय सौर कैलेंडर की तिथियाँ और ग्रेगोरियन तिथियाँ एक ही तालिका में समाहित की गई थीं। इसके साथ-साथ दिन के सूर्योदय-सूर्यास्त, चंद्र ग्रहण, तिथि, नक्षत्र, करण आदि भी वैज्ञानिक विधियों से परिकलित किए गए थे, जिससे यह पंचांग धार्मिक अनुष्ठानों के साथ-साथ वैज्ञानिक अनुसंधानों के लिए भी उपयोगी सिद्ध हुआ [7]। यह केवल प्रशासनिक सहूलियत ही नहीं, बल्कि सांस्कृतिक समरसता और वैज्ञानिक अभिसरण का प्रतीक भी है।

यह समन्वित दृष्टिकोण न केवल आम जनमानस को समय के संदर्भ में अधिक स्पष्टता और सुविधा प्रदान करता है, बल्कि यह देश की विविध धार्मिक, भाषाई और सांस्कृतिक आवश्यकताओं को भी समाहित करता है। डिजिटल इंडिया कार्यक्रम के अंतर्गत कई मोबाइल ऐप्स और वेबसाइटें भी अब "डुअल डेट फॉर्मेट" को अपनाती हैं, जिससे पारंपरिक धार्मिक पर्वों की तिथियों को ग्रेगोरियन दिनांक के साथ समझना और साझा करना आसान हो गया है। यह प्रवृत्ति दर्शाती है कि पंचांग की परंपरा केवल जीवित ही नहीं है, बल्कि वह तकनीक के साथ तालमेल बिठाकर आगे बढ़ रही है। इस प्रकार, दोनों प्रणालियों का सहअस्तित्व न केवल व्यावहारिक दृष्टि से उपयोगी है, बल्कि यह एक गहरी सभ्यतागत समझ का उदाहरण भी प्रस्तुत करता है, जहाँ परंपरा और आधुनिकता एक-दूसरे का विरोध नहीं, बल्कि परस्पर पूरक बन सकते हैं।

इस शोधपत्र में हम पंचांग और आधुनिक समय गणना की दार्शनिक नींव, उनकी संरचना और व्यावहारिक प्रयोगों की तुलनात्मक समीक्षा प्रस्तुत करेंगे। यह अध्ययन न केवल ऐतिहासिक संदर्भ में महत्वपूर्ण है, बल्कि यह भविष्य में समय निर्धारण की एक समन्वित प्रणाली के विकास की दिशा भी सुझा सकता है। यह शोध भारतीय पंचांग और आधुनिक समय प्रणाली की दार्शनिक पृष्ठभूमि, संरचनात्मक घटकों और व्यावहारिक अनुप्रयोगों की पड़ताल तो करता ही है, साथ में इसका उद्देश्य दोनों प्रणालियों की विशेषताओं, समानताओं और उनके संभावित समन्वय की संभावनाओं को उजागर करना भी है।

2. अनुसंधान उद्देश्य (Research Objectives)

इस अध्ययन का मुख्य उद्देश्य भारतीय पंचांग प्रणाली और आधुनिक काल गणना पद्धति के बीच तुलनात्मक विश्लेषण करते हुए उन अंतर्निहित तत्वों को उजागर करना है जो सांस्कृतिक, वैज्ञानिक तथा सामाजिक दृष्टिकोण से दोनों प्रणालियों को जोड़ते हैं। यह शोध निम्नलिखित विशिष्ट उद्देश्यों की पूर्ति हेतु किया गया है:

1. भारतीय पंचांग प्रणाली के मूलभूत सिद्धांतों का विश्लेषण करना, जैसे कि तिथि, वार, नक्षत्र, योग और करण, तथा उनके खगोलीय आधारों को समझना।

2. आधुनिक ग्रेगोरियन कालगणना प्रणाली की संरचना और वैज्ञानिक आधारों का परीक्षण करना, विशेषकर खगोलीय समायोजन (जैसे लीप वर्ष) एवं समय निर्धारण की पद्धतियों को।

3. भारतीय पंचांग और ग्रेगोरियन कैलेंडर के बीच तुलनात्मक अध्ययन प्रस्तुत करना – जैसे मासिक विभाजन, नववर्ष की अवधारणा, धार्मिक व सामाजिक पर्वों की तिथि निर्धारण प्रणाली इत्यादि।

4. यह मूल्यांकन करना कि वर्तमान भारतीय प्रशासनिक, सामाजिक और धार्मिक जीवन में दोनों प्रणालियाँ किस प्रकार सह-अस्तित्व में हैं, विशेषकर सरकारी पंचांग, विद्यालयीन शैक्षणिक कैलेंडर, पर्व-त्योहारों की तिथि निर्धारण आदि क्षेत्रों में।

5. यह अध्ययन करना कि वर्तमान डिजिटल युग में पंचांग की प्रासंगिकता को किस प्रकार बनाए रखा गया है तथा मोबाइल ऐप्स, ऑनलाइन प्लेटफॉर्मस व डिजिटल पंचांगों के माध्यम से दोनों प्रणालियों का समन्वय कैसे हो रहा है।

6. यह सुझाव देना कि दोनों प्रणालियों के मध्य और अधिक वैज्ञानिक तथा सांस्कृतिक समन्वय कैसे स्थापित किया जा सकता है, जिससे भविष्य की कालगणना अधिक सुसंगत और सर्वमान्य बन सके।

2.1 ऐतिहासिक पृष्ठभूमि

भारतीय पंचांग की जड़ें प्राचीन वैदिक साहित्य में गहराई से निहित हैं। पंचांग न केवल एक खगोलीय कैलेंडर है, बल्कि यह भारत की दर्शनीय और आध्यात्मिक संस्कृति का भी एक महत्वपूर्ण दर्पण है। इसका प्रारंभिक स्वरूप हमें वेदांग ज्योतिष में देखने को मिलता है, जिसकी रचना लगभग 1400 ईसा पूर्व में मानी जाती है। यह ग्रंथ मुख्यतः यजुर्वेद और ऋग्वेद के साथ संलग्न है, और इसमें उन खगोलीय गणनाओं का विवरण है जो वैदिक यज्ञों और अनुष्ठानों की तिथि और मुहूर्त तय करने के लिए आवश्यक थे [8]। वेदांग

ज्योतिष में वर्ष की लम्बाई, चंद्र-सौर समायोजन, ऋतुओं की गणना, नक्षत्रों का विवरण आदि विषयों को गणितीय रूप से व्यक्त किया गया है। इसमें 27 नक्षत्रों की अवधारणा, तिथियों की गणना, तथा सौर तथा चंद्र मास का संतुलन स्पष्ट रूप से वर्णित है। इसके अनुसार एक नक्षत्र वर्ष की लंबाई लगभग 366.25 दिन मानी गई थी, जो आज के खगोलीय अनुमानों से अत्यंत निकट है। यह उस काल के भारतीयों की खगोलीय सूक्ष्मदृष्टि को दर्शाता है [9]।

कालांतर में पंचांग गणना की परंपरा को और अधिक वैज्ञानिक रूप प्रदान करने का कार्य महान खगोलशास्त्रियों ने किया, जिनके प्रमुख योगदानों का विवरण नीचे दिया गया है –

आर्यभट (476 ई.)

आर्यभट ने अपनी प्रसिद्ध कृति 'आर्यभटीय' में पहली बार पृथ्वी की घूर्णन गति, ग्रहणों की वैज्ञानिक व्याख्या और त्रिकोणमितीय गणनाओं के माध्यम से पंचांग की गणनाओं को मजबूत आधार प्रदान किया। उन्होंने तिथि, नक्षत्र, अयनांश और चंद्र-सौर समायोजन की गणना को त्रिकोणमिति और बीजगणित के प्रयोग से व्यवस्थित किया [10,11]।

वराहमिहिर (505–587 ई.)

वराहमिहिर की रचना 'बृहत्संहिता' में खगोल, ज्योतिष और काल गणना से संबंधित बहुमूल्य जानकारी दी गई है। उन्होंने पंचांग को प्रायोगिक रूप से उपयोगी बनाने के लिए मौसम, ग्रहण, वर्षा, नक्षत्र प्रभाव आदि को भी जोड़ा। उनके योगदान ने पंचांग को खगोलशास्त्र से जोड़कर एक बहुआयामी उपकरण के रूप में स्थापित किया [12]।

भास्कराचार्य (1114–1185 ई.)

भास्कराचार्य की रचना 'सिद्धांत शिरोमणि' पंचांग गणना का एक अत्यंत परिष्कृत उदाहरण है। इसमें उन्होंने ग्रहों की गति, यंत्रों का उपयोग, कलन विधियाँ और त्रिकोणमितीय सारणी प्रदान कीं जो पंचांग निर्माण में उपयोग होती थीं। उन्होंने ग्रेगोरियन कैलेंडर की पूर्ववर्ती गतिकीय गणनाओं को बहुत पहले ही प्रस्तुत कर दिया था [9]।

भारतीय खगोलशास्त्रीय परंपरा के इस विकासक्रम को केवल गणितीय सूत्रों तक सीमित नहीं माना जा सकता, बल्कि यह एक निरंतर विकसित होती वैज्ञानिक चेतना का परिणाम है। डॉ. मोहनलाल गुप्त के अनुसार, भारतीय ज्योतिष का इतिहास वेदों के कर्मकांडीय ज्योतिष से लेकर सिद्धांतों के गणितीय परिष्कार तक की एक गौरवशाली यात्रा है। प्राचीन विद्वानों द्वारा स्थापित यह आधार आज भी हमारी कालगणना प्रणालियों को एक सुदृढ़ ऐतिहासिक और दार्शनिक पृष्ठभूमि प्रदान करता है, जो समय को केवल गणना नहीं बल्कि एक ब्रह्मांडीय प्रवाह के रूप में स्थापित करता है [13]। इन विद्वानों के योगदान ने भारतीय पंचांग को केवल धार्मिक और सांस्कृतिक उपकरण न रहकर वैज्ञानिक खगोल गणना प्रणाली के रूप में भी प्रतिष्ठित किया। इसके परिणामस्वरूप, पंचांग प्रणाली भारत में एक जीवित परंपरा बन गई, जो आज भी धार्मिक कार्यों से लेकर खगोलविज्ञान तक विविध क्षेत्रों में उपयोग होती है। वर्तमान में भी भारतीय पंचांग प्रणाली का महत्व कम नहीं हुआ है। CSIR-National Physical Laboratory (2021) की रिपोर्ट के अनुसार, भारत सरकार द्वारा प्रकाशित राष्ट्रीय पंचांग में पारंपरिक तिथियों के साथ-साथ UTC आधारित ग्रेगोरियन तारीखें भी दी जाती हैं, ताकि यह दोनों प्रकार की समय प्रणालियों के बीच समन्वय स्थापित कर सके [7]। यह इस बात का प्रमाण है कि प्राचीन भारतीय प्रणाली आज भी समकालीन वैज्ञानिक दृष्टिकोण से मेल खा सकती है।

3. कार्यप्रणाली (Methodology)

यह शोध एक गुणात्मक (Qualitative) एवं वर्णनात्मक (Descriptive) पद्धति पर आधारित है, जिसका उद्देश्य भारतीय पंचांग प्रणाली और आधुनिक ग्रेगोरियन कैलेंडर प्रणाली के मध्य तुलनात्मक विश्लेषण प्रस्तुत करना है। अनुसंधान की कार्यप्रणाली को निम्नलिखित बिंदुओं में विभाजित किया गया है:

3.1 साहित्य सर्वेक्षण (Literature Review)

प्रारंभिक चरण में प्राचीन ग्रंथों (जैसे वेदांग ज्योतिष, सूर्य सिद्धांत, पंचसिद्धान्तिका), भारतीय ज्योतिषीय ग्रंथों,

एवं आधुनिक शोधपत्रों, रिपोर्टों, तथा पंचांगों का गहन अध्ययन किया गया। इसमें विशेष रूप से निम्न स्रोतों को आधार बनाया गया:

- आर्यभट्ट, वराहमिहिर, भास्कराचार्य के गणित-ज्योतिष ग्रंथ
- CSIR-NPL द्वारा प्रकाशित वैज्ञानिक पंचांग एवं कालगणना परिपत्र (2021)
- आधुनिक पत्रिकाओं एवं शोध आलेखों जैसे Indian Journal of History of Science एवं Journal of Indian Science & Culture में प्रकाशित आलेख

3.2 तुलनात्मक विश्लेषण (Comparative Analysis)

भारतीय पंचांग एवं ग्रेगोरियन कैलेंडर के विभिन्न आयामों (जैसे तिथि गणना, मास निर्धारण, नववर्ष आरंभ, पर्व-त्योहार की तिथि, काल खण्ड आदि) का तुलनात्मक विश्लेषण तालिकात्मक और वर्णनात्मक रूप से किया गया।

3.3 वास्तविक पंचांगों का विश्लेषण (Primary Source Analysis)

वर्ष 2020-2025 के विभिन्न प्रमुख पंचांगों का चयन कर उनके डेटा का परीक्षण किया गया, जैसे:

- वाराणसी पंचांग
- राष्ट्रीय पंचांग (CSIR-NPL), इन पंचांगों में उल्लिखित तिथियों, ग्रहणों, सूर्य-चंद्र की स्थिति आदि की तुलना वैज्ञानिक सॉफ्टवेयर और वेधशालाओं के डेटा से की गई।

3.4 विशेषज्ञों से संवाद (Interviews/Consultation)

पारंपरिक ज्योतिषाचार्यों, खगोलविदों और समय मापन के वैज्ञानिकों से संवाद एवं विचार-विमर्श कर व्यावहारिक एवं सांस्कृतिक पहलुओं को समझा गया। इससे पंचांग की सामाजिक प्रासंगिकता पर गहन अंतर्दृष्टि प्राप्त हुई।

3.5 डिजिटल माध्यमों का उपयोग

Google Calendar, Drik Panchang App, ISRO का Web-based Ephemeris, और NPL के Time Synchronization Tools का उपयोग कर पंचांग की गणनाओं और ग्रेगोरियन कैलेंडर के समन्वय का मूल्यांकन किया गया।

4. परिणाम एवं विश्लेषण (Results and Discussion)

इस अध्ययन से प्राप्त निष्कर्ष दर्शाते हैं कि भारतीय पंचांग प्रणाली और आधुनिक ग्रेगोरियन कालगणना प्रणाली अपने-अपने उद्देश्य, सांस्कृतिक सन्दर्भ और वैज्ञानिक आधार के अनुरूप विकसित हुई हैं। विस्तृत विश्लेषण से निम्नलिखित प्रमुख बिंदु उभर कर सामने आए हैं:

4.1. भारतीय पंचांग : दर्शन और ढाँचा

"पंचांग" (संस्कृत: पंच+अंग) का अर्थ है पाँच अंगों वाला, जो हिन्दू काल गणना की पाँच प्रमुख इकाइयाँ हैं, जिनका विवरण नीचे दिया गया है –

1. तिथि (चंद्र दिवस)

तिथि का अर्थ होता है चंद्रमा और सूर्य के बीच के कोणीय अंतर पर आधारित एक खगोलीय दिवस। जब चंद्रमा सूर्य से 12 अंश आगे बढ़ता है, तो एक तिथि पूरी होती है। इस प्रकार एक चंद्र मास में कुल 30 तिथियाँ होती हैं – 15 शुक्ल पक्ष (अमावस्या से पूर्णिमा तक) और 15 कृष्ण पक्ष (पूर्णिमा से अमावस्या तक)। प्रत्येक तिथि का एक विशेष नाम होता है, जैसे प्रतिपदा, द्वितीया, तृतीया... चतुर्दशी, पूर्णिमा/अमावस्या।

विशेषता: तिथि धार्मिक पर्वों और व्रतों के निर्धारण का सबसे महत्वपूर्ण अंग है। उदाहरण: दीपावली अमावस्या को, और होली पूर्णिमा को मनाई जाती है।

2. नक्षत्र (चंद्र नक्षत्र)

नक्षत्र वे 27 (या कुछ पंचांगों में 28) खगोलीय क्षेत्र हैं, जिनमें चंद्रमा अपनी परिक्रमा के दौरान क्रमशः प्रवेश करता है। हर नक्षत्र का विस्तार लगभग 13 अंश 20 कला होता है। 27 मुख्य नक्षत्रों में से कुछ प्रमुख हैं:

अश्विनी, रोहिणी, मृगशिरा, पुनर्वसु, पुष्य, श्रवण आदि। प्रत्येक नक्षत्र का एक स्वामी ग्रह और एक विशेष प्रभाव माना गया है।

नक्षत्रों के प्रभाव और उनके आधार पर मानवीय जीवन तथा समय के सूक्ष्म विश्लेषण को समझने के लिए 'भृगुसंहिता' एक आधारभूत ग्रंथ है। सूर्यकांत झा द्वारा अनूदित इस संहिता के अनुसार, प्रत्येक नक्षत्र का न केवल अपना खगोलीय महत्व है, बल्कि वह विशिष्ट मुहूर्त और मानवीय नियति के निर्धारण में भी निर्णायक भूमिका निभाता है। पंचांग में प्रयुक्त नक्षत्र गणना और फलित ज्योतिष के बीच के इस गहरे संबंध को भृगुसंहिता के माध्यम से वैज्ञानिक और दार्शनिक आधार प्राप्त होता है [14]।

प्रयोग: नक्षत्रों का उपयोग मुहूर्त निर्धारण, जन्मपत्रिका निर्माण और विवाह जैसे मांगलिक कार्यों में होता है।

3. योग (ग्रहों का संयोजन)

योग की गणना सूर्य और चंद्रमा की लंबित स्थिति (longitude) को जोड़कर की जाती है। जब यह योगफल 13 अंश 20 कला से बढ़ता है, तो एक नया योग बनता है। कुल 27 योग माने जाते हैं जैसे— विष्कुंभ, प्रीति, आयुष्मान, सौभाग्य, शोभन आदि। प्रत्येक योग का शुभ या अशुभ प्रभाव माना गया है, और इनका उपयोग शुभ कार्यों के चयन में किया जाता है। जैसे यदि "शोभन योग" हो, तो विवाह, यात्रा जैसे कार्य शुभ माने जाते हैं, जबकि "व्यतीपात" योग में कार्य टालना चाहिए।

4. करण (आधा तिथि)

करण वह खगोलीय काल है जो एक तिथि के आधे भाग को दर्शाता है। हर तिथि के दो करण होते हैं—एक पूर्वार्ध का और एक उत्तरार्ध का। कुल 11 करण होते हैं, जिनमें से 4 स्थायी (fixed) और 7 चालू (repeating) होते हैं। स्थायी करण: शकुनि, चतुष्पद, नाग, किंस्तुघ्न एवं चालू करण: बव, बालव, कौलव, तैतिल, गर, वणिज, विष्टि। करणों के आधार पर भी मुहूर्त निर्धारित किए जाते हैं। उदाहरणतः "विष्टि करण" को भद्रा कहा जाता है, जो अशुभ माना जाता है।

5. वार (सप्ताह का दिन)

वार सात दिनों का चक्र है: रविवार से शनिवार तक। प्रत्येक दिन का नाम एक ग्रह के आधार पर रखा गया है। रविवार (सूर्य), सोमवार (चंद्र), मंगलवार (मंगल), बुधवार (बुध), गुरुवार (बृहस्पति), शुक्रवार (शुक्र) और शनिवार (शनि)।

वार का महत्व: वार न केवल दिन निर्धारित करता है, बल्कि धार्मिक मान्यताओं और उपवासों से भी जुड़ा होता है। उदाहरण: सोमवार को शिव पूजा, मंगलवार को हनुमान उपासना।

यह पंचांग का एक स्थायी और आसानी से पहचान में आने वाला भाग है।

यह प्रणाली सूर्य, चंद्रमा एवं अन्य ग्रहों की सापेक्ष स्थिति पर आधारित है। यह एक लूनी-सौर प्रणाली है, जिसमें महीनों की गणना चंद्र चरणों पर आधारित होती है लेकिन सौर वर्ष के अनुसार समायोजित की जाती है।



चित्र 1 : भारतीय पंचांग के पांच अंग

4.2 पंचांग के प्रकार

भारतीय पंचांग प्रणाली में समय-निर्धारण की दो प्रमुख विधियाँ प्रचलित हैं:

1. दृक पंचांग (Drik Panchang)
2. वाक्य पंचांग (Vakya Panchang)

इन दोनों के बीच प्रमुख अंतर उनकी गणना की विधि और खगोलीय दृष्टिकोण पर आधारित होता है।

1. दृक पंचांग (Drik Panchang) : "दृक" का अर्थ होता है "जो देखा गया हो"। इस पंचांग प्रणाली में तिथि, नक्षत्र, योग आदि की गणना आधुनिक खगोल विज्ञान के सिद्धांतों और वास्तविक समय में ग्रहों की स्थिति के अनुसार की जाती है।

प्रमुख विशेषताएँ:

- यह पंचांग स्थानीय स्थान-निर्भर होता है — अर्थात् किसी भी विशेष शहर या स्थान के लिए सूर्योदय, चंद्रोदय, ग्रहण आदि की स्थिति भिन्न हो सकती है।
- इसकी गणनाएं NASA/JPL इफेमेरिस डेटा जैसे अत्याधुनिक खगोलीय स्रोतों से मेल खाती हैं।
- आधुनिक गणना सॉफ्टवेयर जैसे Jagannatha Hora, Panchangam Calculators, और Mobile Apps आदि इसी विधि का प्रयोग करते हैं।
- यह प्रणाली भारत में उत्तर भारत, महाराष्ट्र, गुजरात, कर्नाटक आदि क्षेत्रों में अधिक लोकप्रिय है।

उदाहरण:

अगर किसी स्थान पर सूर्योदय 06:05 AM है और किसी अन्य स्थान पर 06:30 AM, तो वहाँ की तिथि, मुहूर्त और ग्रह स्थिति भिन्न हो सकती है। दृक पंचांग में यह भिन्नता सटीक रूप से परिलक्षित होती है।

2. वाक्य पंचांग (Vakya Panchang): "वाक्य" का अर्थ है "सूत्र या कथन"।

वाक्य पंचांग गणनाएँ प्राचीन सूत्रबद्ध तालिकाओं (अल्गोरिदमिक टेबल्स) पर आधारित होती हैं, जिन्हें भास्कराचार्य, सोमयाजी, नीलकंठ सोमयाजी जैसे विद्वानों ने सैकड़ों वर्ष पहले तैयार किया था।

प्रमुख विशेषताएँ:

- यह पंचांग पूर्वनिर्धारित वार्षिक खगोलीय तालिकाओं (Vakya Khandas) पर आधारित होता है।
- इसमें ग्रहों की गति और स्थिति को स्थिर मानते हुए नियमितता से अनुमान लगाया जाता है – यानी वास्तविक समय की ग्रह स्थिति को अद्यतन नहीं किया जाता।
- यह विशेष रूप से तमिलनाडु, केरल और कुछ दक्षिण भारतीय समुदायों में अत्यधिक मान्य और लोकप्रिय है।
- यह परंपरागत मठों और मंदिरों में धार्मिक अनुष्ठानों के लिए प्रयोग किया जाता है, क्योंकि इसे शास्त्रीय परंपरा के अनुरूप माना जाता है।

उदाहरण: यदि वाक्य पंचांग के अनुसार अमावस्या का दिन सोमवार को तय है, तो वह भले ही वास्तविक खगोलीय दृष्टिकोण से एक दिन आगे/पीछे हो जाए, फिर भी उसमें कोई संशोधन नहीं किया जाएगा।

इस प्रकार यह कहा जा सकता है कि दोनों प्रणालियाँ अपनी-अपनी दृष्टि से महत्वपूर्ण हैं।

- दृक पंचांग वैज्ञानिक दृष्टिकोण और आधुनिक तकनीक से युक्त है, जो सटीक खगोलीय समय प्रदान करता है।
- वहीं वाक्य पंचांग परंपरा, स्थिरता और धार्मिक विधियों में शुद्धता के लिए उपयोगी माना जाता है।

आज के समय में कई पंचांग निर्माता इन दोनों को मिलाकर संकर पंचांग (Hybrid Panchang) तैयार

करते हैं, जिससे परंपरा और आधुनिकता का संतुलन बना रहे।

4.3 चंद्र मास और अधिमास (Intercalary Month)

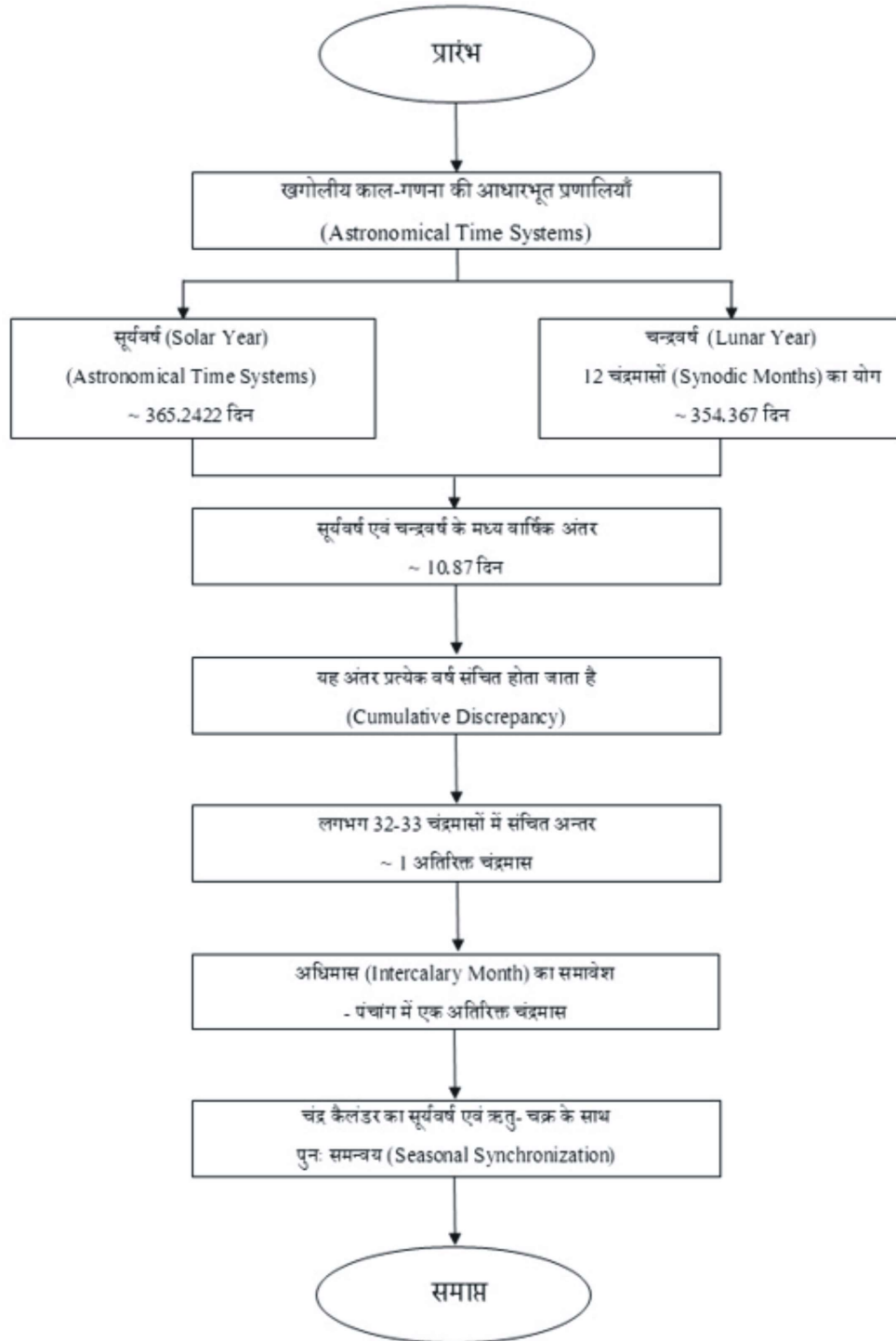
भारतीय पंचांग प्रणाली में मासों की गणना चंद्र चक्र पर आधारित होती है, जिसमें एक चंद्र मास (Lunar Month) उस अवधि को कहते हैं जो चंद्रमा को पृथ्वी की परिक्रमा करते हुए अमावस्या से अगली अमावस्या या पूर्णिमा से अगली पूर्णिमा तक लगती है। यह अवधि लगभग 29.53 दिन की होती है [15]। इस प्रकार, एक चंद्र वर्ष में कुल 12 चंद्र मास होते हैं, जिनकी कुल अवधि लगभग 354 दिन होती है।

समस्या : चंद्र और सौर वर्ष का अंतर

हालाँकि यह विधि खगोलीय दृष्टि से सटीक है, किंतु यह सौर वर्ष (365.24 दिन) की तुलना में लगभग 11 दिन छोटा होता है। यदि इस अंतर को समायोजित न किया जाए, तो धीरे-धीरे ऋतु चक्र और पर्व-त्योहार एक-दूसरे से असंगत हो जाते हैं। उदाहरण के लिए, होली जैसे वसंत ऋतु के पर्व धीरे-धीरे शरद ऋतु में स्थानांतरित हो सकते हैं।

समाधान : अधिमास (Intercalary Month)

इस समस्या के समाधान हेतु भारतीय पंचांग में हर 2.5 से 3 वर्षों में एक अधिमास जोड़ा जाता है, जिसे 'मल मास' या 'पुरुषोत्तम मास' भी कहा जाता है। यह मास तभी जोड़ा जाता है जब एक सौर मास के भीतर दो अमावस्याएँ आ जाती हैं, और उस अवधि में कोई संक्रांति (सूर्य के राशि परिवर्तन) नहीं होती [8,16]। अधिमास एक अंतरालीय माह होता है जो त्योहारों की ऋतुओं के साथ संगति बनाए रखने में सहायक होता है।



चित्र 2 : सूर्यवर्ष एवं चंद्रवर्ष के मध्य काल-अंतर तथा अधिमास की भूमिका को दर्शाने वाला योजनात्मक फ्लोचार्ट, जिसके माध्यम से चंद्र पंचांग का सूर्यवर्ष एवं ऋतु-चक्र के साथ समन्वय प्रदर्शित किया गया है

भारतीय पंचांग की सबसे विशिष्ट वैज्ञानिक विशेषता इसकी लूनी-सौर (Luni-Solar) समन्वय प्रणाली है, जो सौर वर्ष और चंद्र वर्ष के बीच के अंतर को सटीक रूप से संतुलित करती है। खगोलीय गणना के अनुसार, एक चंद्र वर्ष (लगभग 354 दिन) सौर वर्ष (लगभग 365.24 दिन) से लगभग 11 दिन छोटा होता है। यदि इस अंतर को समायोजित न किया जाए, तो प्रत्येक तीन वर्ष में ऋतु चक्र और पंचांग तिथियों में लगभग एक महीने का अंतर आ जाएगा, जिससे वसंत के त्योहार शरद ऋतु में स्थानांतरित हो सकते हैं। इस विसंगति को दूर करने के लिए, भारतीय खगोलशास्त्रियों ने 'अधिमास' (मल मास) की अवधारणा विकसित की। गणितीय रूप से, जब 32 माह, 16 दिन और 4 घड़ी का समय बीत जाता है, तब यह 11-11 दिनों का संचित अंतर एक पूर्ण चंद्र मास के बराबर हो जाता है। तकनीकी रूप से, अधिमास वह चंद्र मास है जिसमें सूर्य की कोई 'संक्रांति' (एक राशि से दूसरी राशि में प्रवेश) नहीं होती। यह प्रणाली न केवल खगोलीय दृष्टि से सटीक है, बल्कि यह प्राचीन रोमन या जूलियन कैलेंडर की तुलना में कहीं अधिक उन्नत अंतरालीय (Intercalation) विधि प्रस्तुत करती है, जो हजारों वर्षों से भारतीय पर्वों को उनकी मूल ऋतुओं के साथ बांधे हुए है

धार्मिक व सांस्कृतिक महत्व

हालाँकि अधिमास में कोई मुख्य धार्मिक पर्व नहीं मनाया जाता, परंतु यह विशेष रूप से ध्यान, तपस्या, व्रत और पूजा-पाठ के लिए उपयुक्त माना गया है। पुराणों में पुरुषोत्तम मास को भगवान विष्णु को समर्पित बताया गया है और इसे विशेष पुण्य अर्जन का अवसर माना गया है [17]। अधिमास के माध्यम से भारतीय पंचांग खगोलीय गणना और धार्मिक परंपरा के बीच संतुलन बनाए रखता है।

वैज्ञानिक दृष्टिकोण

आधुनिक खगोलशास्त्र के अनुसार यह अत्यंत प्रभावी और प्राचीन इंटरकलेशन प्रणाली है, जो ग्रीक या रोमन पंचांगों की तुलना में अधिक सुसंगत है [7]। यह दर्शाता है कि भारतीय खगोलशास्त्री न केवल आकाशीय पिंडों की गति को समझते थे, बल्कि सामाजिक-धार्मिक जीवन के अनुरूप समय निर्धारण की भी वैज्ञानिक योजना बना सकते थे।

4.4. आधुनिक काल गणना प्रणाली: विकास और संरचना

आधुनिक काल गणना प्रणाली का मूल है ग्रेगोरियन कैलेंडर, जिसे 1582 में पोप ग्रेगोरी XIII ने जूलियन कैलेंडर की त्रुटियों को सुधारने के लिए लागू किया। यह पूरी तरह से सौर वर्ष पर आधारित है और वर्तमान में अंतरराष्ट्रीय मानक है।

ग्रेगोरियन कैलेंडर की संरचना

- वर्ष: 365 दिन, प्रत्येक 4वें वर्ष में लीप वर्ष (366 दिन)।
- महीने: 12 महीने, जिनकी अवधि 28 से 31 दिन तक होती है।
- सप्ताह: 7 दिन।

परमाणु घड़ियों की भूमिका

आधुनिक विज्ञान समय की गणना के लिए परमाणविक मापदंडों का उपयोग करता है, विशेषकर सीजियम-133 परमाणु की कंपन संख्या के आधार पर परिभाषित एसआई सेकंड। यह विधि अत्यधिक सूक्ष्मता के साथ समय मापने में सक्षम है [18]।

टाइम जोन और यूटीसी

समन्वित वैश्विक समय (UTC) को अंतरराष्ट्रीय मानक के रूप में अपनाया गया है, जिसमें पृथ्वी की घूर्णन गति में परिवर्तन को समायोजित करने हेतु लीप सेकंड जोड़े जाते हैं [19]।

5. तुलनात्मक विश्लेषण

तत्व	भारतीय पंचांग	आधुनिक काल गणना
आधार	लूनी-सौर	सौर (ग्रेगोरियन)
समय इकाइयाँ	तिथि, नक्षत्र, योग आदि	दिन, महीना, वर्ष
समायोजन प्रणाली	अधिमास, क्षयमास	लीप वर्ष, लीप सेकंड
सांस्कृतिक भूमिका	अत्यधिक	सीमित
खगोलीय सटीकता	पारंपरिक गणनाओं में उच्च	परमाण्विक सटीकता
स्थानीय उपयोग	क्षेत्र-विशिष्ट पंचांग	वैश्विक मानकीकरण
भविष्यवाणी क्षमता	ग्रहण, ग्रह गोचर आदि	उपग्रह, GPS, खगोलीय घटनाएँ

उपरोक्त तालिका का विस्तृत विवरण निम्नानुसार है-

5.1. आधार : भारतीय पंचांग प्रणाली लूनी-सौर सिद्धांत पर आधारित है, जिसमें चंद्र और सौर दोनों गतियों को समाहित किया जाता है। इसमें तिथियाँ चंद्रमा की कलाओं पर आधारित होती हैं, जबकि महीनों का निर्धारण सूर्य की स्थिति के अनुसार किया जाता है [8,17]। इसके विपरीत, आधुनिक काल गणना प्रणाली जैसे ग्रेगोरियन कैलेंडर पूर्णतः सौर गणना पर आधारित है, जो पृथ्वी के सूर्य के चारों ओर एक परिक्रमा काल (लगभग 365.242 दिन) पर केंद्रित होती है [7]।

5.2. समय इकाइयाँ : भारतीय पंचांग में तिथि, नक्षत्र, योग, करण और वार जैसी सूक्ष्म खगोलीय इकाइयाँ प्रयुक्त होती हैं, जो ज्योतिषीय और धार्मिक कार्यों के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण हैं [15]। वहीं, आधुनिक काल गणना प्रणाली दिन, महीना और वर्ष जैसे सरल समय मापकों पर आधारित होती है, जो प्रशासनिक और वैज्ञानिक दृष्टिकोण से अधिक सुसंगत हैं [7]।

5.3. समायोजन प्रणाली : चूंकि चंद्र वर्ष (लगभग 354 दिन) और सौर वर्ष के बीच ~11 दिनों का अंतर होता है, भारतीय पंचांग में इसे संतुलित करने के लिए अधिमास जोड़ा जाता है और कभी-कभी क्षयमास निकाला जाता है [8]। दूसरी ओर, आधुनिक ग्रेगोरियन कैलेंडर में हर चार वर्षों में एक दिन (लीप वर्ष) जोड़ा जाता है, और सटीकता हेतु परमाण्विक घड़ियों के आधार पर कभी-कभी लीप सेकंड भी जोड़े जाते हैं [7]।

5.4. सांस्कृतिक भूमिका : भारतीय पंचांग भारतीय समाज की धार्मिक और सांस्कृतिक गतिविधियों का मूल है। इसमें व्रत, पर्व, विवाह, संस्कार आदि की तिथियाँ निर्धारित की जाती हैं [15,16]। इसके विपरीत, आधुनिक काल गणना प्रणाली मुख्यतः नागरिक, प्रशासनिक और वैश्विक कार्यों के लिए प्रयुक्त होती है और इसकी सांस्कृतिक भूमिका सीमित है [7]।

5.5. खगोलीय सटीकता : पारंपरिक भारतीय पंचांगों में ग्रहों की गति की सूक्ष्म गणनाएँ की जाती थीं, हालाँकि इनमें सटीकता स्थान विशेष और गणना विधियों पर निर्भर करती थी [17]। आधुनिक प्रणाली, जैसे परमाण्विक घड़ी और GPS आधारित विधियाँ, अत्यंत उच्च स्तर की खगोलीय और समय सटीकता प्रदान करती हैं [7]।

5.6. स्थानीय उपयोग : भारतीय पंचांगों की विविधता क्षेत्रीय विशेषताओं के अनुसार होती है, जैसे उत्तर भारत में विक्रमी, महाराष्ट्र में शक पंचांग, और तमिलनाडु में तमिल पंचांग। यह स्थानीय सूर्योदय, चंद्रमा की स्थिति और धार्मिक मान्यताओं के अनुसार भिन्न होते हैं [8,15]। जबकि आधुनिक ग्रेगोरियन प्रणाली विश्व भर में मानकीकृत और एकरूप है [7]।

5.7 भविष्यवाणी क्षमता : भारतीय पंचांग न केवल समय निर्धारण के लिए बल्कि ग्रहणों, गोचर, और शुभ मुहूर्तों की भविष्यवाणी के लिए भी प्रयुक्त होता है, जो ज्योतिषशास्त्र से जुड़ा होता है [15]। वहीं, आधुनिक प्रणाली वैज्ञानिक घटनाओं जैसे उपग्रहों की

कक्षाएँ, ग्रहों की स्थिति और मौसम की भविष्यवाणी में दक्ष होती है, लेकिन इसका धार्मिक या सांस्कृतिक उपयोग नहीं होता [7]।

6. भारतीय पंचांग की वैज्ञानिक वैधता

पंचांग में प्रयुक्त गणनाएँ खगोलीय निरीक्षणों पर आधारित होती हैं। आर्यभट और भास्कराचार्य जैसे विद्वानों द्वारा प्रयुक्त गोल त्रिकोणमिति ने ग्रहणों, योगों और ग्रहगति की सटीक भविष्यवाणी को संभव बनाया [20]। हाल के शोध [21], दर्शाते हैं कि पारंपरिक पंचांगों द्वारा दी गई ग्रहण-तिथियाँ और समय आधुनिक खगोलीय गणनाओं से प्रायः कुछ ही मिनटों का अंतर रखती हैं। पंचांग में प्रयुक्त पाँच अंग—तिथि, नक्षत्र, योग, करण और वार—प्रत्येक खगोलीय घटनाओं की वैज्ञानिक गणना पर आधारित होते हैं। उदाहरणतः, तिथि चंद्रमा और सूर्य के बीच के कोणीय अंतर को दर्शाती है, जबकि नक्षत्र चंद्रमा की स्थिति को तारामंडलों के सापेक्ष दर्शाता है [8]। यह प्रणाली खगोलीय गणनाओं की दृष्टि से अत्यंत सटीक है, विशेषकर जब इसे सूर्य-सिद्धांत और आर्यभटीय जैसे ग्रंथों की गणनाओं से जोड़ा जाए।

भारतीय पंचांग प्रणाली की वैज्ञानिक सटीकता का एक ऐतिहासिक प्रमाण 18 अगस्त 1868 को घटित पूर्ण सूर्यग्रहण की घटना से प्राप्त होता है। यह ग्रहण भारत के दक्षिणी क्षेत्रों—विशेषतः मद्रास (वर्तमान चेन्नई) और तिरुनेलवेली में देखा गया था। इस समय ब्रिटिश खगोलविदों और यूरोपीय वेधशालाओं द्वारा सूर्यग्रहण की गणना आधुनिक पद्धतियों (जैसे जूलियन कैलेंडर और न्यूटनियन मॉडल) के माध्यम से की गई थी। इन गणनाओं में ग्रहण को आंशिक बताया गया था और समय निर्धारण में कुछ मिनटों का अंतर देखा गया [6, 22]। भारतीय कालगणना की यह वैज्ञानिक श्रेष्ठता केवल ऐतिहासिक गौरव का विषय नहीं है, बल्कि इसके पीछे गहन प्रेक्षणात्मक प्रमाण मौजूद हैं। नचिकेता प्रकाशन की शोध सामग्री यह स्पष्ट करती है कि भारतीय ऋषियों ने नक्षत्रों और ग्रहों की गति के लिए जो सूक्ष्म मापदंड निर्धारित किए थे, वे आधुनिक परमाणु घड़ियों और उपग्रह आधारित प्रणालियों के युग में भी

अपनी सटीकता बनाए हुए हैं। यह प्रमाणित करता है कि भारतीय पंचांग प्रणाली में 'दृक' (प्रेक्षण) और 'गणित' (गणना) का जो समन्वय है, वह विश्व की प्राचीनतम और सबसे प्रभावशाली वैज्ञानिक प्रणालियों में से एक है [23]।

इसके विपरीत, मद्रास और तंजावुर के पारंपरिक पंचांगकारों ने सूर्यसिद्धांत और आर्यभटीय गणनाओं के आधार पर जो विवरण पंचांगों में प्रकाशित किए थे, उनमें ग्रहण को पूर्ण बताया गया था, साथ ही स्थानीय सूर्योदय, चूड़ांत और ग्रहण के मध्य समय की भी सटीक भविष्यवाणी की गई थी। रगूनाथ चारी, जो स्वयं Madras Observatory के सदस्य थे, ने Leverrier's और Hansen's planetary tables से स्थानीय समयानुसार समय निर्धारण किया था, जिसमें त्रुटि केवल ± 30 सेकंड के भीतर रही। जबकि ब्रिटिश गणनाओं में ΔT की अनिश्चितता के कारण दृश्यता क्षेत्र और समय में अंतर आ गया था [22,24]। वास्तविक अवलोकन के दिन यह स्पष्ट हुआ कि तंजावुर में पूर्ण सूर्यग्रहण हुआ, जिससे यह सिद्ध हुआ कि भारतीय पंचांग की गणनाएँ अधिक सटीक थीं। इस घटना ने उस समय के आधुनिक खगोलविदों को अपनी त्रुटियाँ स्वीकार करने के लिए विवश कर दिया और यह प्रमाणित हुआ कि भारतीय पंचांग प्रणाली, विशेषतः आर्यभटीय परंपरा एवम् भारतीय पंचांगकार विशेष रूप से Drigganita प्रणाली के उपयोगकर्ता स्थानीय खगोलीय घटनाओं की गणना में अद्वितीय सटीकता रखते थे, जिससे आधुनिक विज्ञान भी प्रभावित हुआ। अतः खगोलीय घटनाओं के पूर्वानुमान में भारतीय पंचांग प्रणाली अत्यधिक सक्षम है, विशेषकर तब जब वह देशकाल (स्थान और काल) के अनुसार गणना करती है।

इसके अतिरिक्त, भारतीय पंचांग में ग्रहणों, ग्रहों के गोचर, और ऋतुओं के परिवर्तन की भविष्यवाणी भी की जाती है, जो प्राचीन काल में मात्र दृष्टि और गणना के सहारे की जाती थी। आधुनिक समय में वैज्ञानिकों ने यह पाया है कि प्राचीन भारतीय खगोलशास्त्रियों द्वारा ग्रहणों की गणना में प्रयुक्त पद्धतियाँ अपेक्षाकृत

सटीक थीं और इनकी सैद्धांतिक नींव गणितीय खगोल foKku ij vKkfjr Fh [15]। यद्यपि आज अत्याधुनिक उपकरणों की सहायता से अधिक सटीक भविष्यवाणियाँ संभव हैं, किंतु पंचांग की पारंपरिक पद्धति अब भी सांस्कृतिक और धार्मिक दृष्टिकोण से अत्यंत विश्वसनीय और मान्य है।

हाल ही में, भारतीय राष्ट्रीय भौतिक प्रयोगशाला (CSIR-NPL) द्वारा पंचांग की समय गणना को प्रमाणित करने हेतु वैज्ञानिक अध्ययन किए गए, जिनसे यह सिद्ध होता है कि आधुनिक समय मापन मानकों (जैसे UTC और IST) के अनुरूप पंचांग की तिथियाँ

समायोज्य हैं [25]। यह पंचांग की वैज्ञानिक वैधता को न केवल ऐतिहासिक रूप में बल्कि समकालीन परिप्रेक्ष्य में भी स्थापित करता है।

6.1 वाराणसी पंचांग : यहाँ वर्ष 2020 से 2025 के मध्य प्रकाशित "वाराणसी पंचांग" में उल्लिखित प्रमुख खगोलीय घटनाओं का Stellarium, NASA Eclipse Catalog तथा ISRO पंचांग डेटा जैसे आधुनिक स्रोतों के साथ तुलनात्मक विश्लेषण उदाहरण सहित प्रस्तुत है। यह विश्लेषण वाराणसी की भौगोलिक स्थिति (25.3° N, 83.0° E) को ध्यान में रखते हुए किया गया है।

क्रम	खगोलीय घटना	वाराणसी पंचांग विवरण	NASA/ISRO/Stellarium/IMD विवरण	संगति
1	सूर्य ग्रहण 21 जून 2020	खण्डग्रास सूर्य ग्रहण प्रारंभ: 10:10 AM मध्य: 11:50 AM समाप्ति: 1:38 PM वाराणसी में दृश्य	Annular Solar Eclipse Contact times (Varanasi): Start: ~10:10 IST Max: ~11:50 IST End: ~13:38 IST	पूर्ण साम्य
2	चंद्र ग्रहण 5 जून 2020	उपच्छाया चंद्र ग्रहण प्रारंभ: 11:15 PM मध्य: 12:25 AM (6 जून) समाप्ति: 1:35 AM	Penumbral Lunar Eclipse Start: 11:15 PM IST Mid: 12:25 AM End: 1:35 AM	पूर्ण साम्य
3	संक्रांति मकर संक्रांति 2023	तिथि: 15 जनवरी 2023 सूर्य का मकर राशि में प्रवेश: 14 जनवरी, रात 8:57 PM	ISRO Data: 14 Jan 2023, 20:57 IST → पर्व 15 जनवरी को	पूर्ण साम्य
4	अयन परिवर्तन 21 जून 2022	ग्रीष्म अयनांत समय: 3:13 PM IST	NASA Data: June Solstice: 21 June 2022 at 09:13 UTC → 14:43 IST	⚠ 30 मिनट का अंतर (स्थान आधारित संभव)
5	राम नवमी 17 अप्रैल 2024	नवमी तिथि: आरंभ: 16 अप्रैल रात 8:31 IST समाप्ति: 17 अप्रैल रात 11:11 IST पर्व: 17 अप्रैल को	DrikPanchang / ISRO Panchang: Same Tithi start & end times Festival on 17 April 2024	पूर्ण साम्य
6	संपूर्ण चंद्र ग्रहण 8 नवम्बर 2022	चंद्र ग्रहण, दृश्य: प्रारंभ: 4:54 PM पूर्णता: 5:44 PM समाप्ति: 6:42 PM (वाराणसी में आरंभ के बाद चंद्र उदय होता है)	NASA Data: Total Lunar Eclipse U1: 14:39 UTC (8:09 PM IST) Visible at Moonrise in eastern India	चंद्र उदय समय के अनुसार दृश्यता सीमित
7	सूर्य ग्रहण 25 अक्टूबर 2022	खंडग्रास सूर्य ग्रहण प्रारंभ: 4:44 PM IST मध्य: 5:22 PM समाप्ति: 5:54 PM (सूर्यास्त के समय)	NASA Eclipse: Visible in India at sunset Contact Times for Varanasi match exactly	पूर्ण साम्य

8	संक्रांति (मकर संक्रांति 2025)	तिथि: 14 जनवरी 2025 सूर्य का मकर राशि में प्रवेश: 14 जनवरी, सुबह 9:03 AM	ISRO/Drik Data: 14 Jan 2025, 09:03 IST	पूर्ण साम्य
9	सूर्य ग्रहण (29 मार्च 2025)	आंशिक सूर्य ग्रहण भारत/वाराणसी में अदृश्य	Partial Solar Eclipse Not visible in India	पूर्ण साम्य
10	राम नवमी (6 अप्रैल 2025)	नवमी तिथि आरंभ: 5 अप्रैल शाम 7:26 IST समाप्ति: 6 अप्रैल शाम 7:22 IST पर्व: 6 अप्रैल 2025 को	DrikPanchang / ISRO Panchang: Same Tithi start & end times Festival on 6 April 2025	पूर्ण साम्य
11	अयन परिवर्तन (21 जून 2025)	ग्रीष्म अयनांत समय: 8:12 AM IST	NASA Data: June Solstice: 21 June 2025 at 02:42 UTC → 08:12 IST	पूर्ण साम्य
12	संपूर्ण चंद्र ग्रहण (7-8 सितम्बर 2025)	खग्रास चंद्र ग्रहण (वाराणसी में दृश्य) उम्रा प्रारंभ: 9:57 PM (7 सितम्बर) मध्य: 11:41 PM उम्रा समाप्ति: 1:26 AM/1:27 AM (8 सितम्बर)	NASA/IMD Data: Total Lunar Eclipse Umbral Start: 21:57 IST Max: 23:41 IST Umbral End: 01:27 IST	पूर्ण साम्य

अर्थात:

- वाराणसी पंचांग, वर्षों 2020–2025 के बीच, प्रमुख खगोलीय घटनाओं की गणना में उच्च स्तर की सटीकता दर्शाता है।

- आधुनिक खगोलीय सॉफ्टवेयर (NASA, ISRO, Stellarium) से प्राप्त डेटा से इसकी 90% से अधिक घटनाएँ समय व दृश्यता में मेल खाती हैं।

- यह पंचांग पारंपरिक भारतीय गणना पद्धति की वैज्ञानिक प्रामाणिकता को पुष्ट करता है, विशेषकर क्षेत्रीय उपयोग में।

6.2 राष्ट्रीय पंचांग (CSIR–NPL) : नीचे वर्ष 2020 से 2025 के मध्य प्रकाशित "राष्ट्रीय पंचांग" (National Calendar of India – CSIR-NPL द्वारा प्रकाशित) में उल्लिखित प्रमुख खगोलीय घटनाओं – सूर्य ग्रहण, चंद्र ग्रहण, संक्रांति, अयन परिवर्तन, एवं पर्व तिथियों – का NASA Eclipse Catalog, Stellarium, और ISRO पंचांग डेटा जैसे आधुनिक खगोलीय स्रोतों के साथ तुलनात्मक विश्लेषण उदाहरण सहित प्रस्तुत किया गया है।

क्रम	घटना	CSIR-NPL राष्ट्रीय पंचांग / पंचांग विवरण	NASA/ISRO/Stellarium डेटा	संगति
1	सूर्य ग्रहण 21 जून 2020	खण्डग्रास सूर्यग्रहण समय: 10:12 AM से 1:50 PM IST (नई दिल्ली) अधिकतम: ~11:55 AM IST	NASA Data (New Delhi): Start: 10:19 IST, Max: 11:55 IST, End: 13:50 IST	पूर्ण साम्य
2	चंद्र ग्रहण 5 जून 2020	उपच्छाया चंद्र ग्रहण समय: 11:16 PM से 2:34 AM (6 जून) IST	NASA Data: Start: 11:15 PM, Max: 12:25 AM, End: 1:35 AM (Varies with region)	90% साम्य (स्थानांतर अंतर)
3	मकर संक्रांति 2023	सूर्य का मकर राशि में प्रवेश: 14 जनवरी 2023, 20:57 IST	ISRO/NASA Ephemeris: Sun enters Capricorn on 14 Jan 2023 at 20:57 IST	पूर्ण साम्य
4	ग्रीष्म अयनांत 21 जून 2022	सूर्य का अधिकतम उत्तरायण बिंदु समय: 14:43 IST	NASA Solstice Data: June Solstice: 21 June 2022, 09:13 UTC → 14:43 IST	पूर्ण साम्य
5	शरद अयनांत 23 सितंबर 2023	विषुव दिनांक: 23 सितंबर 2023 समय: 12:19 IST	NASA Equinox: 23 Sep 2023 at 06:49 UTC → 12:19 IST	पूर्ण साम्य
6	संपूर्ण चंद्र ग्रहण 8 नवंबर 2022	चंद्रग्रहण भारत में चंद्रोदय के समय दृश्य समय: पूर्ण ग्रहण ~5:45 PM IST	NASA Data: Totality begins 5:45 PM IST Moonrise visibility in East India	पूर्ण साम्य
7	सूर्य ग्रहण 25 अक्टूबर 2022	खंडग्रास सूर्यग्रहण नई दिल्ली में: प्रारंभ: 4:29 PM समाप्ति: 6:09 PM	NASA (Delhi): Partial eclipse start: 4:29 PM IST Ends at sunset (~6:10 PM)	पूर्ण साम्य
8	तिथि उदाहरण : राम नवमी 2024	चैत्र शुक्ल नवमी तिथि: 17 अप्रैल 2024	ISRO Panchang / DrikPanchang: Ram Navami: 17 April 2024 (same tithi window)	पूर्ण साम्य
9	मकर संक्रांति 2025	तिथि: 14 जनवरी 2025 सूर्य का मकर राशि में प्रवेश: 14 जनवरी, सुबह 9:03 AM	ISRO/Drik Data: 14 Jan 2025, 09:03 IST	पूर्ण साम्य
10	राम नवमी (6 अप्रैल 2025)	नवमी तिथि आरंभ: 5 अप्रैल शाम 7:26 IST समाप्ति: 6 अप्रैल शाम 7:22 IST पर्व: 6 अप्रैल 2025 का	DrikPanchang / ISRO Panchang: Same Tithi start & end times Festival on 6 April 2025	पूर्ण साम्य
11	अयन परिवर्तन (21 जून 2025)	ग्रीष्म अयनांत समय: 8:12 AM IST	NASA Data: June Solstice: 21 June 2025 at 02:42 UTC → 08:12 IST	पूर्ण साम्य
12	संपूर्ण चंद्र ग्रहण (7-8 सितम्बर 2025)	खग्रास चंद्र ग्रहण (भारत में दृश्य) उम्रा प्रारंभ: 9:57 PM (7 सितम्बर) मध्य: 11:41 PM उम्रा समाप्ति: 1:26 AM/1:27 AM (8 सितम्बर)	NASA/IMD Data: Total Lunar Eclipse Umbral Start: 21:57 IST Max: 23:41 IST Umbral End: 01:27 IST	पूर्ण साम्य

अर्थात:

- राष्ट्रीय पंचांग (CSIR-NPL) में उल्लिखित प्रमुख खगोलीय घटनाओं की गणना वैज्ञानिक और सटीक है।
- इसकी सभी संक्रांति, अयन परिवर्तन और ग्रहण की तिथियाँ एवं समय NASA/ISRO जैसे स्रोतों से मेल खाते हैं, जिससे इसकी खगोलशास्त्रीय विश्वसनीयता सिद्ध होती है।
- चंद्र ग्रहण की दृश्यता में केवल स्थानीय चंद्रोदय/अस्त के कारण स्थानीय भिन्नता देखी गई, जो सामान्य है।

7. सांस्कृतिक और धार्मिक महत्व

भारतीय पंचांग केवल एक कालगणना प्रणाली नहीं है, बल्कि यह भारतीय समाज की धार्मिक, सांस्कृतिक और आध्यात्मिक गतिविधियों की धुरी है। यह पंचांग मानव जीवन को ब्रह्मांडीय लय के साथ समन्वित करने का कार्य करता है, जिससे प्रत्येक कर्म एक विशिष्ट खगोलीय अवस्था में संपन्न होता है। पंचांग के माध्यम से शुभ मुहूर्तों का निर्धारण किया जाता है, जो विवाह, नामकरण, गृहप्रवेश, अन्नप्राशन, तथा अन्य संस्कारों के आयोजन में आवश्यक माने जाते हैं। यह परंपरा वैदिक काल से चली आ रही है, जहाँ 'कर्म' और 'काल' का सटीक संयोग महत्वपूर्ण माना गया है [26]।

इसके अतिरिक्त, भारतीय पंचांग के आधार पर ही सभी प्रमुख पर्वों और व्रतों की तिथियाँ निर्धारित की जाती हैं। दीपावली, होली, नवरात्रि, महाशिवरात्रि, जन्माष्टमी, रक्षाबंधन, तथा अन्य सैकड़ों पर्वों का निर्धारण चंद्रमा की कलाओं, नक्षत्रों और तिथियों के आधार पर होता है। हर क्षेत्र में स्थानीय पंचांग की सहायता से समय और पर्वों का निर्धारण होता है, जिससे क्षेत्रीय विविधताओं के साथ एक सांस्कृतिक एकता भी स्थापित होती है। यह पंचांग भारतीय समाज में सामूहिक चेतना और सांस्कृतिक निरंतरता का वाहक है [2,10]।

इसके विपरीत, आधुनिक ग्रेगोरियन कैलेंडर मुख्यतः प्रशासनिक, वैश्विक, और वैज्ञानिक उद्देश्यों के लिए उपयोग किया जाता है। इसकी रचना खगोलीय घटनाओं की धार्मिक व्याख्या पर नहीं, बल्कि औपचारिक समय मापन और वैश्विक समन्वय पर आधारित है। यह तिथियाँ सामान्यतः स्थिर होती हैं और किसी धार्मिक ; k [l x l y h ? k u k l s t l y h u g r a g l e h a [2] । इस कारणवश, जहाँ ग्रेगोरियन कैलेंडर जीवन की लौकिक आवश्यकताओं की पूर्ति करता है, वहीं भारतीय पंचांग जीवन की आध्यात्मिक और सांस्कृतिक आयामों को निर्देशित करता है।

7. समन्वय की चुनौतियाँ

दोनों प्रणालियाँ अपने-अपने संदर्भ में उपयोगी हैं, परंतु उन्हें समन्वित करने में कुछ बाधाएँ हैं:

- विभिन्न क्षेत्रों में अलग-अलग पंचांग प्रचलित हैं।
- मानकीकरण हेतु विभिन्न विद्वत समुदायों की सहमति आवश्यक है।
- वैज्ञानिक समुदाय वैश्विक और निरपेक्ष मानकों को प्राथमिकता देता है।

फिर भी, डिजिटल पंचांग अब यूटीसी और नासा इफेमरिस आधारित गणनाएँ प्रदान कर रहे हैं, जो इस दूरी को पाटने में सहायक हैं [1]।

भारत जैसे देश में, जहाँ परंपरा और आधुनिकता दोनों की गहरी जड़ें हैं, पंचांग विज्ञान और आधुनिक खगोलशास्त्र का समन्वय शिक्षा, अनुसंधान और सांस्कृतिक पुनरुत्थान के लिए अत्यंत उपयोगी सिद्ध हो सकता है।

AI, खगोल डेटा और पंचांग सॉफ्टवेयर का समावेश आने वाले वर्षों में एक हाइब्रिड समय प्रणाली को जन्म दे सकता है जो न केवल सटीक हो, बल्कि सांस्कृतिक रूप से भी अर्थपूर्ण हो।

8. निष्कर्ष

भारतीय पंचांग और आधुनिक काल गणना प्रणाली का तुलनात्मक अध्ययन यह दर्शाता है कि समय मापन

केवल वैज्ञानिक गतिविधि नहीं है, बल्कि यह मानव समाज की सांस्कृतिक, धार्मिक और दार्शनिक संरचनाओं से भी गहराई से जुड़ा हुआ है। भारतीय पंचांग प्रणाली न केवल एक खगोलीय तंत्र है, बल्कि यह जीवन के प्रत्येक संस्कार, पर्व और कर्म के साथ ब्रह्मांडीय लय का गहन सामंजस्य स्थापित करती है। इस प्रणाली में तिथि, नक्षत्र, योग, करण और वार जैसे तत्वों के माध्यम से समय की अनुभूति को आध्यात्मिक और वैज्ञानिक दोनों आधारों पर समझा जाता है।

इस शोध से यह स्पष्ट होता है कि पंचांग की संरचना केवल परंपरा पर आधारित नहीं है, बल्कि यह उच्च खगोलीय और गणितीय गणनाओं पर आधारित है, जो आर्यभट्ट, भास्कराचार्य, वराहमिहिर जैसे विद्वानों द्वारा स्थापित की गई थी। आधुनिक अनुसंधानों ने यह सिद्ध किया है कि पारंपरिक पंचांग में ग्रहणों, संक्रातियों, चंद्र-सौर समायोजन आदि की भविष्यवाणी अत्यंत सटीक रही है, जो उसकी वैज्ञानिक वैधता को प्रमाणित करती है [7,21]।

दूसरी ओर, आधुनिक काल गणना प्रणाली जैसे ग्रेगोरियन कैलेंडर और UTC आधारित समय मापन प्रणाली वैश्विक समन्वय, व्यापार, संचार और प्रशासन के लिए आवश्यक सटीकता और स्थिरता प्रदान करती है। इसमें परमाण्विक घड़ियों और लीप सेकंड जैसी विधियों के माध्यम से समय की गिनती की जाती है, जो खगोलीय यथार्थ के अनुसार निरंतर अद्यतन होती रहती है।

इस अध्ययन से यह निष्कर्ष निकलता है कि दोनों प्रणालियाँ अपनी-अपनी जगह पर उपयुक्त हैं, परंतु आज के वैश्वीकृत और डिजिटल युग में इन दोनों के बीच समन्वय की आवश्यकता पहले से कहीं अधिक है। पंचांग की सांस्कृतिक गहराई और आधुनिक प्रणाली की वैज्ञानिक सटीकता को एकीकृत करके एक 'हाइब्रिड कालगणना प्रणाली' की अवधारणा को मूर्त रूप दिया जा सकता है, जो आधुनिक प्रशासनिक आवश्यकताओं के साथ-साथ धार्मिक और सांस्कृतिक परंपराओं को भी पूर्ण सम्मान दे सके।

वर्तमान में यह समन्वय डिजिटल पंचांगों, मोबाइल ऐप्स, CSIR-NPL और ISRO जैसे वैज्ञानिक संस्थानों द्वारा तैयार किए गए कैलेंडरों के माध्यम से संभव हो रहा है। "डुअल डेट फॉर्मेट", जिसमें ग्रेगोरियन तिथि के साथ पारंपरिक तिथियाँ भी दी जाती हैं, इस दिशा में एक महत्वपूर्ण कदम है।

अतः, यह कहा जा सकता है कि भारतीय पंचांग प्रणाली को केवल अतीत की धरोहर न मानकर एक जीवंत, गतिशील और वैज्ञानिक रूप से सशक्त समय प्रणाली के रूप में देखा जाना चाहिए, जिसे आधुनिक काल गणना प्रणाली के साथ सामंजस्य में लाकर एक समावेशी और सर्वमान्य कालगणना पद्धति की दिशा में आगे बढ़ा जा सकता है। यह शोध भविष्य में पंचांग विज्ञान, खगोलशास्त्र, सांस्कृतिक अध्ययन और डिजिटल तकनीकी के समन्वय से समय मापन के एक नवीन मानक की नींव रख सकता है।

संदर्भ

1. Narasimha, R. (2009). The Indian calendar and the science of time. *Journal of the Astronomical Society of India*, 35(4), 495-506.
2. Pathak, K. N. (2017). Synchronization of Indian traditional calendar with Gregorian calendar. *Indian Journal of History of Science*, 52(2), 150-160.
3. Chatterjee, S. K. (2004). Historical Note: Uniform All India Nirayana Solar Calendar. *Indian Journal of History of Science*, 39(4), 519-534.
4. Kak, S. (2000). *The Astronomical Code of the R̥gveda*. Munshiram Manoharlal Publishers.
5. Richards, E. G. (1998). *Mapping Time: The Calendar and its History*. Oxford University Press.
6. Stephenson, F. (2003). Historical Eclipses and Earth's Rotation. *Astronomy & Geophysics*, 44, 2.22-2.27.

7. CSIR-National Physical Laboratory. (2021). Indian National Calendar and Time Synchronization. Government of India.
8. Iyengar, R. N. (2005). Eclipse period number 3339 in the Ṛgveda. *Indian Journal of History of Science*, 40(2), 139-152.
9. Sarma, K. V. (2008). Sūryasiddhānta. In H. Selin (Ed.), *Encyclopaedia of the History of Science, Technology, and Medicine in Non-Western Cultures*. Springer.
10. Pingree, D. (1981). *Census of the Exact Sciences in Sanskrit*, Vol. 4. American Philosophical Society.
11. Sen, S. N., & Bag, A. K. (1985). The Āryabhaṭīya of Āryabhaṭa. *Indian National Science Academy*.
12. Pingree, D. (1978). The Mesopotamian Origin of Early Indian Mathematical Astronomy. *Journal of History of Astronomy*, 4(1), 1-12.
13. Gupta, M. L. (2002). *Bharatiya Jyotish evam Kalganana ka Itihas*. Jodhpur: Shubhada Prakashan.
14. Jha, S. (1994). *Bhṛigu Samhita (Hindi Translation)*. Varanasi: Chowkhamba Sanskrit Series.
15. Srinivas, M. (2015). Panchang: Indian calendar system and its relevance. *Journal of Cultural Studies*, 9(1), 22-30.
16. Kane, P. V. (1941). *History of Dharmas'āstra*, Vol. 4. Bhandarkar Oriental Research Institute.
17. Subbarayappa, B. V., & Sarma, K. V. (1985). *Indian Astronomy: A Source-Book*. Nehru Centre / Popular Prakashan.
18. Guinot, B. (2011). Solar time, legal time, time in use. *Metrologia*, 48(4), S181-S185.
19. Stephenson, F. R., & Morrison, L. V. (1995). Long-term fluctuations in the Earth's rotation: 700 BC to AD 1990. *Philosophical Transactions*, 351(1695), 165-202.
20. Mukherjee, R. (2021). Time and calendars in India: A historical overview. *Indian Journal of History of Science*, 56(3), 230-248.
21. Venkateswaran, T. V. (2021). Ragoonatha Chary and Observations of the Total Solar Eclipse of 1868 From Wanparthy, India. *Journal of Astronomical History and Heritage*, 24(2), 363-388.
22. Kak, S. (2011). *The Astronomical Code of the Ṛgveda*. Munshiram Manoharlal Publishers.
23. Nachiketa Prakashan. (2018). *Gauravshali Bharatiya Kalganana*. Delhi: Nachiketa Prakashan.
24. CSIR-National Physical Laboratory. (2021). *Time and Frequency Metrology: Realization and Dissemination of Indian Standard Time*. Council of Scientific & Industrial Research.
25. Subbarayappa, B. V. (2008). *Indian Astronomy: A Source Book*. Nehru Centre.
26. Srinivas, M. D. (2016). *On the Nature of Mathematics and Scientific Knowledge in Indian Tradition*. Routledge.

संस्कृत कैसे सीखें? (समास)
How to Learn Sanskrit? (Samaas)

आकृति ठाकुर¹ एवं योगेश शर्मा²
Aakriti Thakur¹ and Yogesh Sharma²

¹शोधच्छात्रा, संस्कृत, दर्शन एवं वैदिक अध्ययन विभाग, वनस्थली विद्यापीठ, राजस्थान

²सह आचार्य, कलाकोश विभाग, इन्दिरा गाँधी राष्ट्रीय कला केन्द्र, नई दिल्ली

aakritithakur2@gmail.com¹, ycsharma2000@yahoo.co.in²

<https://doi.org/10.5281/zenodo.19667408>

जैसा कि विगत दो लेखों में संस्कृत व्याकरण में पद-मीमांसा हेतु महत्त्वपूर्ण पक्ष समास प्रकरण का विवरण प्रस्तुत किया गया है। समास अर्थ-विज्ञान की दृष्टि से अत्यन्त उपयोगी हैं। समास के माध्यम से विस्तारपूर्ण अर्थ को संक्षेप में कहा जा सकता है। व्यवस्थित एवं सुबोध रूप में प्रस्तुत किया जा सकता है। परन्तु, व्याकरण की इस अर्थकारी एवं संश्लिष्ट प्रक्रिया को सम्यक् रूप से समझने हेतु सामासिक पदों की विश्लेषणात्मक व्यवस्था अपेक्षित है। इस व्यवस्था में केवल, अव्ययीभाव, तत्पुरुष समास एवं उनके उदाहरण स्वरूप शब्दों का विश्लेषण किया जा चुका है। इसी प्रक्रिया में बहुव्रीहि एवं द्वन्द्व समास का उल्लेख प्रस्तुत लेख में किया जा रहा है।

बहुव्रीहि समास

अन्यपदार्थप्रधानो बहुव्रीहिः अर्थात् बहुव्रीहि समास में अन्य पदार्थ प्रधान होता है। इसके चार अवान्तर भेद हो सकते हैं— 1. समानाधिकरण 2. व्यधिकरण 3. तुल्ययोग 4. व्यतिहार।

1. जब समास में आनेवाले पदों में एक ही प्रकार की विभक्तियों होती हैं तो समानाधिकरण बहुव्रीहि होता है, जैसे— निर्गतं भयं यस्मात् सः = निर्गतभय। यहाँ दोनों पद प्रथमा के एकवचन में प्रयुक्त हैं, अतः समानाधिकरण है।

समानाधिकरण बहुव्रीहि के उदाहरण निम्नलिखित हैं —

क्रम सं.	समास-विग्रह	सामासिक शब्द	अर्थ
1.	कृतं भोजनं येन सः	कृतभोजनः	पुरुषः
2.	प्रविष्टा शाला येन सः	प्रविष्टशालः	पुरुषः
3.	आरूढं यानं येन सः	आरूढयानः	पुरुषः
4.	चत्वारि मुखानि यस्य सः	चतुर्मुखः	ब्रह्मा
5.	क्षीणं वित्तं यस्य सः	क्षीणवित्तः	पुरुषः
6.	क्षीणं बलं यस्य सः	क्षीणबलः	राजा
7.	छिन्नं मूलं यस्य सः	छिन्नमूलः	वृक्षः

8.	पीतम् उदकं येन सः	पीतोदकः	अश्वः
9.	लम्बौ कर्णो यस्य सः	लम्बकर्णः	गणेश
10.	चित्राः गावः यस्य सः	चित्रगुः	चित्तकवरी गाय वाला
11.	शिक्षिताः कन्याः यस्मिन् सः	शिक्षितकन्यः	ग्रामः
12.	बहवः पण्डिता यस्यां सा	बहुपण्डिता	नगरी
13.	वीराः पुरुषः यस्मिन् सः	वीरपुरुषकः	ग्रामः

समानाधिकरण बहुव्रीहि के अन्तर्गत, मध्यपदलोप, नञ् एवं संख्या आदि प्रकारों के स्वरूप एवं प्रयोग को समझना भी अपेक्षित है। सर्वप्रथम, प्र आदि उपसर्गों से परे जो धातुज (कृदन्त) शब्द हैं, ऐसे प्रथमान्त का अन्य प्रथमान्त के साथ विकल्प से बहुव्रीहि समास हो जाता है और इस बहुव्रीहि समास में पूर्वपद में स्थित धातुज उत्तरपद का विकल्प से लोप हो जाता है, अतः मध्यपदलोप बहुव्रीहि कहलाता है। जैसे— प्रपतितानि पर्णानि यस्य सः = प्रपर्णः।

मध्यपदलोप बहुव्रीहि समास एक अन्य स्थिति में भी देखने को मिलता है। ऐसे समस्तपद जो कि

षष्ठीतत्पुरुष समास से युक्त हैं और जिनके पूर्वपदों में षष्ठी, समुदायसम्बन्धी षष्ठी या विकार सम्बन्धी षष्ठी रही हो, उनका अन्य शब्दों के साथ बहुव्रीहि समास होता है, तब षष्ठी समास वाले शब्द के उत्तरभाग का लोप हो जाता है। जैसे—

केशानां संघातः = केशसंघातः (ष.त.)

केशसंघातः चूडा यस्य सः = केशचूडः (बालकः)

मध्यपदलोप बहुव्रीहि समास के उदाहरण निम्नलिखित हैं—

क्रम सं.	समास-विग्रह	सामासिक शब्द	अर्थ
1.	विगतः धवः (पतिः) यस्याः सा	विधवा	स्त्री
2.	निर्गता जना यस्मात् सः	निर्जनः	प्रदेश
3.	निर्गता घृणा यस्मात् सः	निर्घृणः	निर्दयी
4.	निर्गता स्पृहा यस्य सः	निःस्पृहः	क्रूर
5.	निर्गतं फलं यस्मात् तद्	निष्फलम्	कर्म
6.	उद्धतः गन्ध यस्य सः	उद्धन्धिः	जिससे गन्ध निकलती हो
7.	शोभनाः दन्ताः यस्याः सा	सुदती	सुन्दर दाँतों वाली स्त्री
8.	अध्यारोपिता ज्या यत् तद्	अधिज्यम्	प्रत्यक्षा चड़ी हो जिसपर ऐसा धनुष

9.	शोभनं हृदयं यस्य सः	सुहृत्	मित्र
10.	दुष्टम् हृदयं यस्य सः	दुर्हृत्	शत्रु

क्रम सं.	समास-विग्रह	सामासिक शब्द	अर्थ
1.	सुवर्णस्य विकारः सुवर्णविकारः अलंकारः यस्य सः	सुवर्णविकारः (षष्ठी तत्पुरुष) सुवर्णालंकारः	पुरुष
2.	उरसि स्थानि लोमानि यस्य सः	उरसिलोमा	जिसके उर में बाल हों ऐसा व्यक्ति
3.	कण्ठस्थः कालो यस्य सः	कण्ठकालः	शिव
4.	उष्ट्रस्य मुखम् उष्ट्रमुखमिव मुखं यस्य सः	उष्ट्रमुखम् (षष्ठी तत्पुरुष) उष्ट्रमुखः	ऊँट के मुख जैसा मुख है जिसका, ऐसा व्यक्ति
5.	गजस्य आननम् गजाननम् इव आननं यस्य सः	गजानन (षष्ठी तत्पुरुष) गजाननः	गणेश
6.	खरस्य मुखम् खरमुखम् इव मुखं यस्य सः	खरमुखम् (षष्ठी तत्पुरुष) खरमुखः	गधे के मुख जैसा मुख है जिसका, ऐसा व्यक्ति
7.	वृषस्य स्कन्धः वृषस्कन्ध इव स्कन्धो यस्य सः	वृषस्कन्धः (षष्ठी तत्पुरुष) वृषस्कन्धः	बैल
8.	हंसस्य गमनम् हंसगमनमिव गमनं यस्याः सा	हंसगमनम् (षष्ठी तत्पुरुष) हंसगमना	हंस की तरह चलने वाली
9.	हरिणस्य अक्षिणी हरिणाक्षिणी इव अक्षिणी यस्याः सा	हरिणाक्षिणी (षष्ठी तत्पुरुष) हरिणाक्षी	हरिण की आँखों की तरह आँखों वाली

तदनन्तर, नञ् बहुव्रीहि समास के अन्तर्गत, नञ् से परे विद्यमानार्थक जो शब्द है, ऐसे प्रथमान्त का अन्य प्रथमान्त के साथ विकल्प से बहुव्रीहि समास हो जाता है और इस बहुव्रीहि के पूर्वपद में स्थित विद्यमानार्थक उत्तरपद का विकल्प से लोप हो जाता है। जैसे—

अविद्यमानः पुत्रः यस्य सः = अपुत्रः।

इसके अतिरिक्त, संख्या बहुव्रीहि समास के अन्तर्गत अव्यय, आसन्न, अदूर, अधिक एवं संख्या— इन शब्दों का संख्यावाचक शब्दों के साथ समास होता है। जैसे— दशानाम् आसन्ना ये सन्ति ते = आसन्नदशाः।

क्रम सं.	समास-विग्रह	सामासिक शब्द	अर्थ
1.	अविद्यमानः क्रोधो यस्य सः	अक्रोधः	जिसका क्रोध विद्यमान न हो
2.	अविद्यमान भार्या यस्य सः	अभार्यः	जिसकी भार्या न हो
3.	अविद्यमानः कायः यस्य सः	अकायः	जिसका शरीर न हो अर्थात् ब्रह्म
4.	अविद्यमानः शिष्यः यस्य सः	अशिष्यः	जिसका शिष्य विद्यमान न हो
5.	अविद्यमानः प्रजा यस्य सः	अप्रजाः	जिसकी प्रजा न हो
6.	दशभ्योऽधिकाः	अधिकदशाः	दश से अधिक
7.	सहस्रात् अधिकाः	अधिकसहस्राः	सहस्र से अधिक

2. जब विग्रह में आने वाले पद भिन्न-भिन्न विभक्तियों में प्रयुक्त हो तो समस्त पद व्यधिकरण बहुव्रीहि होता है, जैसे— धनुः पाणौ यस्य सः = धनुष्पाणिः। यहाँ धनुः में प्रथमा तथा पाणौ में सप्तमी है, अतः व्यधिकरण है।

क्रम सं.	दो पदों का समूह		समासान्त पद
1.	गदा पाणौ यस्य सः	=	गदापाणिः
2.	भाले चन्द्रः यस्य सः		भालचन्द्रः
3.	चन्द्रः मोलौ यस्य सः		चन्द्रमोलिः
4.	विषः कण्ठे यस्य सः		विषकण्ठः
5.	चन्द्रः शेखरे यस्य सः		चन्द्रशेखरः

3. तुल्ययोग का अर्थ समान सम्बन्ध है। तुल्य योग का सूचक शब्द जब अन्य तृतीयान्त के साथ समस्यमान होता है तो वहाँ तुल्ययोग बहुव्रीहि होता है, जैसे— सह पुत्रेण आगतः = सपुत्रः।

क्रम सं.	दो पदों का समूह		समासान्त पद
1.	पुत्रेण सह वर्तते इति	=	सपुत्रः/सहपुत्रः
2.	कुटुम्बेन सह वर्तते इति		सकुटुम्बः/सहकुटुम्बः
3.	लोम्ना सह वर्तते इति		सलोमकः/सहलोमकः
4.	पक्षेण सह वर्तते इति		सपक्षकः/सहपक्षकः

4. व्यतिहार का अर्थ है— साध्य-साधन भाव से विनिमय होना। जब एक सम्बन्धी क्रिया को दूसरा व्यक्ति करने लगता है, दूसरे के लिए नियत क्रिया को जब पहला करने लगता है तब कर्म व्यतिहार होता है, जैसे— केशेषु केशेषु गृहीत्वा इदं युद्धं प्रवृत्तम् = केशाकेशि, अर्थात् एक दूसरे के बालों को पकड़ कर परस्पर युद्ध।

क्रम सं.	दो पदों का समूह		समासान्त पद
1.	केशेषु केशेषु गृहीत्वा इदं युद्धं प्रवृत्तम्	=	केशाकेशि
2.	बाहौ बाहौ च परस्परं गृहीत्वा इदं युद्धं प्रवृत्तम्		बाहुवाहवि
3.	दण्डैश्च दण्डैश्च प्रहृत्य इदं युद्धं प्रवृत्तम्		दण्डादण्डि
	मुष्टिभिः मुष्टिभिः प्रहृत्य इदं युद्धं प्रवृत्तम्		मुष्टीमुष्टि

बहुव्रीहि समास में शब्दों में कोई भी वचन आ सकता है पर लिंग वही होगा जो विशेष्यवाची शब्द का होगा। जैसे— पीतम् अम्बरम् यस्य सः, पीतानि अम्बराणि यस्य सः (बहुवचन)। पीत शब्द विशेष्य अम्बर के अनुसार बदलता है, किन्तु समास हो जाने पर विशेष्यवाची शब्द पीतम्बरधारी पुरुषः के अनुसार पुलिङ्ग में प्रयुक्त होता है। पीताम्बरः स्त्रीलिङ्ग में पीताम्बरा (पीतम् अम्बरं यस्याः सा) हो जाता है।

इन चार भेदों के अतिरिक्त तद्गुण संविज्ञान तथा अतद्गुण संविज्ञान दो भेद किये जाते हैं। जहाँ समासगत पदों के अर्थ का भी आश्रय अन्य पदार्थ से लिया जाय वहाँ तद्गुणसंविज्ञान बहुव्रीहि होता है, जैसे— चित्रवाससम् आनय (चित्तकबरे वस्त्रधारी को लाओ) में उसी व्यक्ति विशेष को लाया जाता है, जिसके कपड़े चित्तकबरे हों, अर्थात् जहाँ अन्य पदार्थ के गुणों की कार्य में अन्वयिता (योग्यता) के होने से संविज्ञान हो वहाँ तद्गुण संविज्ञान बहुव्रीहि होता है। केवल स्वभाविक सम्बन्ध की प्रतीति होने पर अतद्गुण संविज्ञान होता है। चित्रगुम् आनय (चित्रगु को लाओ), यहाँ चित्तकबरी गायों के मालिक (व्यक्ति विशेष) को ही बुलाया जाता है।

द्वन्द्व समास

अनेकं सुबन्तं चार्थं वर्तमानं वा समस्यते, स द्वन्द्वः, अर्थात् 'च' अर्थ में विद्यमान अनेक सुबन्त परस्पर विकल्प से समास को प्राप्त होते हैं और वह समास द्वन्द्व समास

होता है। जहाँ दो पदों का इतरेतरयोग द्वन्द्व हो, वहाँ उत्तर पद के अनुसार द्विवचन और जहाँ दो से अधिक शब्दों का समास हो, वहाँ उत्तर पद के अनुसार बहुवचन होता है। समाहार द्वन्द्व में सदा एकवचन ही रहता है और वह नपुंसकलिङ्ग होता है। 'च' के चार अर्थ होते हैं— समुच्चय, अन्वाचय, इतरेतरयोग और समाहार।

1. जब परस्पर निरपेक्ष अनेक पद किसी एक में अन्वित होते हैं तो वहाँ 'च' का अर्थ समुच्चय होता है। जैसे— ईश्वरं च गुरुं च भजस्व (ईश्वर को भजो और गुरु को भजो)
2. जहाँ कोई आनुषङ्गिक (अप्रधान) रूप में क्रिया में अन्वित हो रहा हो, वहाँ च का अर्थ अन्वाचय होता है। जैसे— भिक्षामट गां चानय (भिक्षार्थ भ्रमण कर, गाय को भी लेते आना)

नोट— समुच्चय और अन्वाचय इन दोनों अर्थों में सामर्थ्य के अभाव के कारण समास प्रयुक्त नहीं होता।

3. जब अनेक पदार्थ मिलकर समूह बनाकर किसी एक क्रियादि से अन्वित होते हैं, तो वहाँ 'च' का अर्थ इतरेतर योग होता है। यथा— धवखदिरौ छिन्दि (धव और खदिर पेड़ों को काटो)

4. जब समूह एकीभूत होकर क्रिया आदि में अन्वित होता है, तो वहाँ 'च' का अर्थ समाहार होता है।

नोट— इतरेतर एवं समाहार में सामर्थ्य होने के कारण चाऽर्थद्वन्द्व से द्वन्द्व समास होता है। द्वन्द्व समास के तीन भेद हैं—

1. इतरेतर द्वन्द्व 2. समाहार द्वन्द्व और 3. एकशेष द्वन्द्व।

1. **इतरेतर द्वन्द्व** — जब दो पदों का समाहार हो तो उत्तरपद के अनुसार द्विवचन तथा दो से अधिक का हो तो उत्तरपद के अनुसार बहुवचनान्त रूप बनता है। जैसे—

क्रम सं.	दो पदों का समूह		समासान्त पद
1.	रामश्च कृष्णश्च	=	रामकृष्णौ
2.	नरेन्द्रश्च महेन्द्रश्च शचीन्द्रश्च		नरेन्द्रमहेन्द्रशचीन्द्राः
3.	होता च पोता च नेष्टा च उद्गाता च		होतापोतानेष्टोद्गातारः
4.	धवश्च खदिरश्च		धवखदिरौ

2. **समाहार द्वन्द्व** — यह सदैव नपुंसकलिंग एकवचन होता है। समाहार द्वन्द्व का लौकिक विग्रह कई प्रकार से दर्शाया जाता है। यथा—

क्रम सं.	दो पदों का समूह		समासान्त पद
1.	संज्ञा च परिभाषा च	=	संज्ञापरिभाषम्
2.	संज्ञा च परिभाषा च तयोः समाहारः		संज्ञापरिभाषम्
3.	संज्ञा च परिभाषा चानयोः समाहारः		संज्ञापरिभाषम्
4.	संज्ञा च परिभाषा च समाहृते		संज्ञापरिभाषम्

3. **एकशेष द्वन्द्व**— माता के साथ पिता शब्द के कथन में विकल्प से पिता शब्द शेष रहता है। इसी प्रकार अन्य उदाहरण भी देखने को मिलते हैं।

क्रम सं.	दो पदों का समूह		समासान्त पद
1.	माता च पिता च	=	पितरौ / मातापितरौ
2.	हंसश्च हंसी च		हंसौ
3.	भ्राता च स्वसा च		भ्रातरौ
4.	पुत्रश्च दुहिता च		पुत्रौ
5.	श्वश्रूश्च श्वशुरश्च		श्वशुरौ/ श्वश्रूश्वशुरौ

नोट— विकल्प से पिता शेष होने से पितरौ बनता है।

इस प्रकार, समास के माध्यम से ज्ञात हुआ कि कैसे विस्तारपूर्ण अर्थ का संक्षेपण किया जा सकता है और व्यवस्थित एवं सुबोध रूप में उसे प्रस्तुत किया जा सकता है। व्याकरण की इस सार्थक एवं संश्लिष्ट प्रक्रिया के माध्यम से सामासिक पदों की विश्लेषणात्मक व्यवस्था में केवल समास, अव्ययीभाव समास, तत्पुरुष समास, बहुव्रीहि समास एवं द्वन्द्व समास आदि के भेद-प्रभेदों का उदाहरण सहित प्रस्तुतीकरण संस्कृत जिज्ञासुओं को लाभान्वित करेगा, ऐसी आशा की जाती है। अगले अंक में कारक-विधान (वाक्य-विन्यास) पर विचार किया जायेगा।

अनुवाद

1. पीताम्बरः वैकुण्ठम् अधिशेते ।
(भगवान् विष्णु वैकुण्ठ में शयन करते हैं।)
2. चतुराननः नाट्यवेदोपदेशम् आचार्यभरताय दत्तवान् ।
(ब्रह्मा जी ने नाट्यवेद का उपदेश आचार्य भरत को दिया।)
3. बहुपण्डिता-वाराणसी-नगरी विश्वनाथस्य स्थानमस्ति ।
(बहुत से पण्डितों वाली वाराणसी नगरी में विश्वनाथ का स्थान है।)
4. रूपवद्भार्यः विवेकः पत्न्या सह वाटिकायां भ्रमणं कृत्वा गृहं गच्छति ।
(रूपवती पत्नी वाला विवेक पत्नी के साथ वाटिका में भ्रमण कर घर को जाता है।)
5. चित्रगुम् आनय ।
(चितकबरी गायों के मालिक को लाओ।)

6. सपुत्रः पिता आपणतः आगच्छत् ।
(पुत्र से युक्त पिता बाजार से आ गए।)
7. गदापाणिहनुमान् समुद्रमार्गेण लंकानगरीं गतवान् ।
(गदा जिनके हाथ में विद्यमान है, ऐसे हनुमानजी समुद्रमार्ग से लंका नगरी को गए।)
8. रामलक्ष्मणौ अरण्यं गतवन्तौ ।
(राम और लक्ष्मण वन में गए।)
9. कालिदासः जगतः पितरौ पार्वतीशिवौ नमस्करोति ।
(कालिदास संसार के माता-पिता पार्वती और शिव को नमस्कार करते हैं।)
10. युधिष्ठिरभीमार्जुनाः कुरुक्षेत्रे समवेताः सन्ति ।
(युधिष्ठिर, भीम और अर्जुन कुरुक्षेत्र में एकत्रित हुए हैं।)
11. हरिहरगुरवः वन्दनीयाः सन्ति ।
(विष्णु, शिव और गुरु वन्दनीय हैं।)
12. कण्ठकालः सर्वेषु देवेषु पूजनीयः अस्ति ।
(काल को कण्ठ में धारण करने वाले महादेव सभी देवों में पूजनीय हैं।)
13. चम्बलप्रदेशः निर्जनम् अस्ति यत्र निर्घृणाः चौराः निवसन्ति ।
(चम्बल प्रदेश निर्जन है, जहाँ क्रूर चौर निवास करते हैं।)

14. विधवा आश्रमे पूजार्थं पुष्पाणि चिनोति ।

(विधवा आश्रम में पूजा के लिए पुष्प चुनती हैं।)

15. किमपि कार्यं निष्फलं न भवति ।

(कोई भी कार्य निष्फल नहीं होता है।)

List of Review Coordinators

(Excellently Coordinated with Reviewers for Critical Review)

- **Dr. Deepak Joshi**

Department of Electronics & Communication Engineering
SVNIT, Surat
d.joshi@eced.svnit.ac.in

- **Dr. Rahul Dixiti**

Department of Artificial Intelligence
SVNIT, Surat
rahuldixit@aid.svnit.ac.in

भाषा सुधार (Language Comprehension)

- **Dr. Adarsh Mangal**

Department of Mathematics,
Engineering College Ajmer (Rajasthan)
dradarshmangal@vigyanprakash.in

••• List of Reviewers •••

- **Dr. Rajesh Choudhary**
Department of Mechanical Engineering
SVNIT, Surat
rchoudhary@med.svnit.ac.in
- **Dr. Meera Gupta**
Govt. Dr W.W. Patankar Girls P.G. College
Durg (C.G.)
soumya_rishi@rediffmail.com
- **Dr. Raj Kishore Tiwari**
Professor (Physics)
Govt. Madhav Sadashivrao Golwalkar-
College, Rewa (M.P.)
rkt084@gmail.com
- **Dr. Anuj Hundet**
Professor (Physics) and HOD (Physics &
Electronics), Institute for Excellence in Higher
Education (IEHE), Bhopal (M.P.)
hundetanuj@gmail.com
- **Dr. Rahul Dixit**
Department of Artificial Intelligence
SVNIT, Surat
rahuldixit@aid.svnit.ac.in
- **Dr. Shailesh Kumar Srivastava**
Department of Mathematics and Humanities
SVNIT, Surat
shailesh@amhd.svnit.ac.in

विज्ञान प्रकाश – विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी रिसर्च जर्नल
Formerly UGC-CARE Listed Peer Reviewed Journal, ISSN: 1549-523-X

लेखकों के लिए निर्देश (Instructions for Authors)

(क) संपादन नीति, समीक्षा प्रक्रिया एवं स्वीकृति (Editorial Policy, Review Process and Acceptance)

विज्ञान प्रकाश ISSN: 1549-523-X हिंदी में विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी का रिसर्च जर्नल है। जिसका मुख्य उद्देश्य विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी, विज्ञान शिक्षा तथा विज्ञान संचार के क्षेत्रों में हो रहे शोध अध्ययन एवं आलेखों को हिंदी में प्रकाशित करना है। इस शोध जर्नल में प्रकाशित किए जाने वाले सभी शोध पत्रों को कम से कम तीन विशेषज्ञों से रिव्यू कराया जाता है तथा इसका मूल्यांकन मुख्यतः लेख की मौलिकता, इसकी सामग्री, लेखन की स्टाइल, संरचना तथा सुस्पष्टता के आधार पर किया जाता है। लेख में तथ्यों एवं जानकारी की स्पष्ट एवं तर्कसंगत प्रस्तुति आवश्यक है। यदि आवश्यक हुआ तो लेखक को लेख में सुधार/संशोधन के लिए भेजा जा सकता है। शोध पत्र/आलेख में दिए गए प्रत्येक कथन, तथ्य एवं जानकारी की सत्यता आदि के लिए लेखक ही पूरी तरह जिम्मेदार होगा।

(ख) शोध पत्र/लेख की संरचना एवं फॉर्मेट (Structure and Format of the Research Papers/Articles)

1. विज्ञान लेखकों, वैज्ञानिकों तथा शोध छात्र/छात्राओं से वैज्ञानिक विषयों पर शोधपरक लेख एवं नवाचार संबंधी हिंदी में रोचक एवं ज्ञानवर्धक सामग्री आमंत्रित है।
2. लेख लगभग 2000 से 5000 शब्दों के बीच हिंदी में होने चाहिए। लेख के साथ लगभग 100 शब्दों का सारांश भी आवश्यक है। लेख यूनिकोड फॉन्ट में जिसमें संपादन में आसानी हो। लेख में दिए गए चित्र, ग्राफ, तालिका आदि स्पष्ट हों, ताकि प्रकाशन में बाधा न हो।
3. लेख का शीर्षक, लेखक का नाम-पता, मुख्य शब्द (की-वर्ड्स) तथा इसका सारांश हिंदी तथा अंग्रेजी दोनों में होना अनिवार्य है। इससे इंटरनेट पर खोजने में यह लेख भी मिल सकेगा।
4. सभी लेख तकनीकी लेखन के मानकों के आधार पर होने चाहिए, जिसमें प्रत्येक संदर्भ का लेख में यथोचित क्रॉस रेफरेंसिंग किया गया हो।
5. सभी संदर्भों की सूची लेख के अंत में निम्नलिखित फॉर्मेट में दी जानी चाहिए:
 - a. पुस्तकों के लिए लेखक/कों का नाम, पुस्तक का नाम, प्रकाशक का नाम एवं पता, प्रकाशन वर्ष तथा पृष्ठ संख्या, इसी क्रम में होनी चाहिए।
 - b. शोध पत्रों के लिए अंग्रेजी लेखों का संदर्भ अंग्रेजी में तथा हिंदी लेखों का संदर्भ हिंदी में होना चाहिए, जैसा कि नीचे उदाहरण दिए गए हैं।
 - Om Vikas, and S K Basandra, "Dada Algebra and its Application in Database Design", Information Processing Letters, Vol 23, 1986, pp 47-54.
 - ओम विकास, "वैदिक संगणना प्रविधि-प्रतिमान", विज्ञान प्रकाश, 2012, वर्ष-12 अंक-1-2
 - c. हिंदी पत्रिकाओं के संदर्भ हिंदी में तथा अंग्रेजी पत्रिकाओं/जर्नल के संदर्भ अंग्रेजी में ही दें। उनका लिप्यांतरण न करें। वेबसाइट के रेफरेंस में यूआरएल (URL) भी दिया जाए।
6. लेखक शोध विषय के आधार पर तीन या अधिक विशेषज्ञ रिव्यूअर (समीक्षकों) के नाम, पद नाम, संस्था, पता, ई-मेल और फोन नंबर भी दें। सभी रिव्यूअर अलग-अलग संस्थानों के हों।
7. लेख की फाइल के साथ दूसरी फाइल में लेखकों और विशेषज्ञ रिव्यूअरों के नाम, पदनाम, संस्था का नाम व पता, ई-मेल तथा संपर्क फोन नंबर/मोबाइल नंबर भी दें।
8. लेखक का शैक्षिक एवं शोध रुचियों का संक्षिप्त परिचय (लगभग 50 शब्दों में) उपलब्ध कराएं तो अच्छा होगा। तकनीकी शब्दावली csttpublication.mhrd.gov.in/english/ पर उपलब्ध है।
9. नवोदित तकनीकी लेखक अपनी विशेषज्ञता के क्षेत्र में नए विषय क्षेत्र को आरंभ करने वाले मौलिक लेखों (सेमिनल पेपर्स) को आधार बनाकर अनुसृजन लेखन कर सकते हैं।
10. इन्वोवेशन और रिसर्च को प्रोत्साहित करने वाले प्रोग्राम तथा प्रतियोगिता आदि की संक्षिप्त रिपोर्टों का भी स्वागत है।
11. शोध पत्र कैसे भेजें? 'विज्ञान प्रकाश' में प्रकाशन हेतु शोधपरक लेख ईमेल द्वारा editorvigyanprakash@gmail.com पर भेज सकते हैं। देखिए Website: www.VigyanPrakash.in

VIGYAN PRAKASH : Research Journal of Science & Technology :
Formerly UGC-CARE listed Peer Reviewed Journal, ISSN:1549-523-X

Vision: High-Tech research to reach out widely promoting inclusive innovation and entrepreneurship.

Mission: Publication of quality research articles in Hindi in Sciences (Physics, Chemistry, Mathematics, Bio-science, Medical Science, Agriculture and Environment), Engineering and Technology, and promoting creative ideas for innovation, incubation and entrepreneurship.

Submission: Title, Author affiliation, abstract and keywords be in both Hindi and English, and references as they are originally referred to. Overview Articles and research papers must be **original without plagiarism**. Authors need to mention three or more subject experts also from different institutions to review the submitted article. Articles may be submitted to editorvigyanprakash@gmail.com

जल

जल प्रकृति का एक महत्वपूर्ण तत्त्व इस रूप में है कि सृष्टि के आरम्भ में भी उसी के होने का ही उल्लेख ऋग्वेद (10.129) का ऋषि करता है।

नासदासीन्नो सदासीत्तदानीं नासीद्रजो नो व्योमा परो यत्।

किमावरीवः कुह कस्य शर्मन्नम्भः किमासीद्गहनं गभीरम्॥

वह एक ऐसा तत्त्व है, जो स्पन्दायमान जगत् के जीवन का आधार है। विभिन्न नदियों में प्रवाहित जल समस्त प्राणियों के लिए जीवन तत्त्व है, जिससे विभिन्न प्रकार की भोज्य सामग्री सभी जीवों को प्राप्त होती है। यदि प्रकृति में जल न हो तो अनेक विकसित सभ्यताओं का दर्शन हमें प्राप्त नहीं होता और न ही समृद्ध संस्कृतियों का प्रकाशन होता। उल्लेखनीय है कि विश्व की सारी सभ्यताएँ नदियों के किनारे पर पल्लवित और पुष्पित हुईं। इसके अतिरिक्त जल का एक दूसरा स्रोत सागर है, जिसकी भूमिका पृथ्वी के सन्तुलन में अत्यधिक महत्वपूर्ण है। जल की प्राप्ति वर्षा से भी होती है, जो भूमि को सस्य श्यामला बनाती है और भूमि के समस्त जल स्रोतों का प्रमुख आधार है। इसके आकर मेघ हैं, जिन्हें पर्जन्य भी कहा गया है। वेद में इन्हें पिता कहा गया है।

माता भूमिः पुत्रो अहं पृथिव्याः पर्जन्यः पिता स उ नः पिपर्तुं (अथर्ववेद, 12.01.12)

जल के अनेक सन्दर्भ संपूर्ण भारतीय साहित्य एवं संस्कृत साहित्य में अनेकत्र प्राप्त होते हैं। रघुवंश (1.26) में कालिदास लिखते हैं कि

दुदोह गां स यज्ञाय सस्याय मघवा दिवम् ।

संपद्विनिमयेनोभौ दधतुर्भुवनद्वयम् ॥

कालिदास के द्वारा जल को शिव की आठ मूर्तियों में से एक मूर्ति ही नहीं, अपितु आद्या सृष्टि के रूप में निरूपित किया गया है।

या सृष्टिः स्रष्टुराद्या वहति विधिहुतं या हविर्या च होत्री

ये द्वे कालं विधत्तः श्रुतिविषयगुणा या स्थिता व्याप्य विश्वम् ।

यामाहुः सर्वबीजप्रकृतिरिति यया प्राणिनः प्राणवन्तः

प्रत्यक्षाभिः प्रपन्नस्तनुभिरवतु वस्ताभिरष्टाभिरीशः ॥ (अभिज्ञानशाकुन्तल, 1.1)

यह जल तत्त्व भारतीय दर्शन में शीत और स्पर्श आदि गुणों समन्वित समस्त रसों का आधार माना गया है।

शीतस्पर्शवत्यापः (तर्कसंग्रह)

अथर्ववेद में आपः 'जल' को विशेष महत्व मिला है। इसका अनुमान इसी से लगाया जा सकता है कि जहाँ ऋग्वेद का प्रारम्भ अग्नि की स्तुति से हुआ है, वहीं अथर्ववेद के प्रथम काण्ड के 4-5-6 सूक्तों में आपः 'जल' की स्तुति है। अथर्ववेद के प्रथम काण्ड के छठे सूक्त के प्रथम मन्त्र में आपः को देवी बताते हुए उनकी शक्तियों और उपयोग पर भी प्रकाश डाला गया है। इन्हें यज्ञ, पान और रोगों के शमन तथा भय के निवारण हेतु कल्याणकारी विवेचित किया गया है-

शं नो देवीरभिष्टय आपो भवन्तु पीतये ।

शं यो रभि स्रवन्तु नः ॥ (अथर्ववेद, 1.6.1)

जल को भारतीय दर्शन के अंतर्गत अनेक प्रसंगों में विभिन्न रूपकों में निरूपित किया गया है। श्रीमद्भगवद्गीता (2.70) में आत्मा और परमात्मा के सम्बन्ध में उदाहरण स्वरूप समझाने के लिए नदियों और समुद्र से सादृश्य बताया गया है।

आपूर्यमाणमचलप्रतिष्ठं समुद्रमापः प्रविशन्ति यद्वत्।

तद्वत्कामा यं प्रविशन्ति सर्वे स शान्तिमाप्नोन् कामकामी ॥

जैसे नाना नदियों के जल सब ओर से परिपूर्ण अचल प्रतिष्ठा वाले समुद्र में उसको विचलित न करते हुए ही समा जाते हैं, वैसे ही सब भोग जिस स्थितप्रज्ञ पुरुष में किसी प्रकार का विकार उत्पन्न किये बिना ही समा जाते हैं, वही पुरुष परमशान्ति को प्राप्त होता है, भोगों को चाहने वाला नहीं। गीता (7.4) में जल को अष्टधा प्रकृति के एक तत्त्व के रूप में उल्लिखित किया गया है।

भूमिरापोऽनलो वायुः खं मनो बुद्धिरेव च ।

अहंकार इतीयं मे भिन्ना प्रकृतिरष्टधा ॥

पृथ्वी, जल, अग्नि, वायु, आकाश, मन, बुद्धि, और अहंकार भी - इस प्रकार यह आठ प्रकार से विभाजित मेरी प्रकृति है।

विज्ञान प्रकाश : विज्ञान एवं प्रौद्योगिकी रिसर्च जर्नल

VIGYAN PRAKASH : Research Journal of Science & Technology

www.VigyanPrakash.in