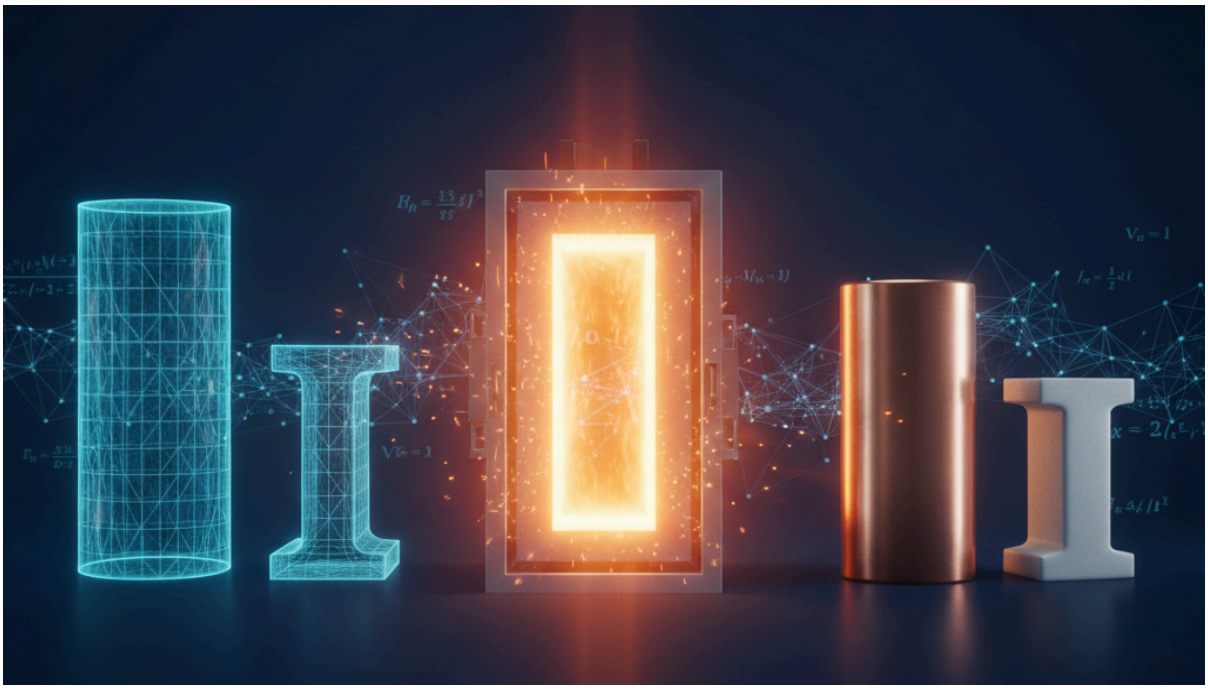
भट्टीमध्ये तापवल्या जाणाऱ्या थ्रीडी प्रिंटेड भागांच्या संकुंचनाचे अचूक भाकीत

उच्च तापमानाखाली प्रक्रिया करताना सिरॅमिक तसेच धातूपासून बनलेले ३डी-प्रिंटेड भाग कसे वाकतात व संकुंचन पावतात याचा अचूक अंदाज वर्तवणारी मशीन-लर्निंग टूल्स व गणितीय प्रतिमाने संशोधकांनी विकसित केली आहेत.



प्रतिमा श्रेय : जेमिनी नॅनोबनाना प्रो

तुमच्या दाताच्या इम्प्लांटचा उच्च तापमानाच्या भट्टीशी काय बरे संबंध असू शकेल? बहुत करून हा इम्प्लांट, ज्या प्रक्रियेत शेवटच्या टप्प्यात भट्टीमध्ये उच्च तापमानाखाली तापवून (सिंटरिंग) वस्तू तयार करतात अश्या सिंटरिंग-आधारित त्रिमितीय-मुद्रण (थ्रीडी प्रिंटिंग) प्रक्रियेने बनवलेला असण्याची शक्यता आहे. नैसर्गिक दाताची जागा घेण्यासाठी आवश्यक मजबूती असणारे आणि दातांसारखे दिसणारे टणक पदार्थ वापरावे लागतात. त्यांना पारंपरिक पद्धती वापरून पाहिजे तसा आकार देणे अवघड असते. अगदी नेहमीच्या त्रिमितीय मुद्रण, म्हणजेच ॲडिटीव्ह मॅन्युफॅक्चरिंग पद्धती - ज्यांमध्ये पदार्थाचा थर देता देताच लेझरच्या सहाय्याने पदार्थाचे एकजीविकरण करतात - त्यांचाही वापर करणे अवघड असते. त्यामुळे, इम्प्लांटसाठी वापरलेल्या पदार्थाचे सूक्ष्म कण एका बांधून ठेवणाऱ्या पदार्थामध्ये मिसळून (बाइंडिंग एजंट) त्याचे थरावर थर चढवत इम्प्लांट तयार केला जातो आणि त्यानंतर त्याचे सिंटरिंग करून त्यातील बंधक किंवा बांधून ठेवणारा पदार्थ (बाइंडर) जाळून टाकला जातो. या प्रकारे सर्व सूक्ष्म कण एका घन संरचनेमध्ये एकसंध बांधले जाऊन इम्प्लांट आकार घेतो.

लेझर फ्यूझिंगद्वारे (लेझरने वितळवून एकजीव करणे) ॲडिटीव्ह मॅन्युफॅक्चरिंग करण्याची पद्धत झिरकोनियासारख्या उच्च द्रवणांक असलेल्या सिरॅमिक पदार्थांसाठी किंवा तांब्यासारख्या अत्यंत परावर्तक धातूंसाठी वापरणे व्यवहार्य ठरत नाही. असे पदार्थ आधी मुद्रित करून मग भट्टीत त्यांचे सिंटरिंग करावे लागते. सिंटरिंग करताना मुद्रित भाग साधारणपणे १०% ते १५% ने आकुंचन पावतात. या आकुंचनामुळे व शिवाय जड भाग स्वतःच्या वजनाने खाली झुकत असल्यामुळे सिंटरिंग केल्यावर तयार झालेल्या वस्तूचा आकार आणि मापे अनेक वेळा मुळातल्या डिजिटल संरचनेशी जुळत नाहीत. यावर उपाय म्हणून सुरुवातीच्या संरचनेचीच मापे वाढवणे साहजिक आणि तर्कसुसंगत वाटत असले तरी अनेक वेळा पदार्थ असमानपणे आकुंचन पावत असल्याने समस्या पूर्णपणे सुटत नाही. अंतिम

उत्पादनाच्या आकारमानात पडणारे फरक टाळण्यासाठी बहुतांशी उत्पादक प्रयोग-प्रमाद पद्धतीचा अवलंब करत अचूक मापे प्राप्त करतात. परंतु यासाठी वेळ व खर्च अधिक लागतो.

भारतीय तंत्रज्ञान संस्थेच्या यंत्र अभियांत्रिकी विभागातील प्राध्यापक गुरमिंदर सिंग आणि त्यांच्या सहकाऱ्यांनी ॲडिटीव्ह मॅन्युफॅक्चरिंगद्वारे तयार करून भट्टित सिंटरिंग केलेल्या घटकांमध्ये सिंटरींगमुळे होणारे संकुंचन व विरुपण (पदार्थाचा आकार बदलणे) कसे व किती होईल याचा पूर्वानुमान देणारी प्रगत प्रतिमाने (प्रेडिक्टिव्ह मॉडेल्स) विकसित केली आहेत. सिरॅमिक्स व तांबे या दोन पदार्थांवर केंद्रित असलेल्या दोन अभ्यासांमध्ये प्रकाशित झालेली त्यांची निरीक्षणे असे दर्शवतात की संरचना (डिझाइन) करत असतानाच सिंटरिंगदरम्यान घटकाचा आकार कसा बदलेल याची अचूक गणना करणे शक्य आहे. या माहितीमुळे त्रिमितीय मुद्रित घटकांसाठी सुयोग्य मोजमापे संरचना करतानाच निश्चित करण्यासाठी मदत मिळू शकेल.

प्रणित कुमार रेड्डी पुचकायला, प्रा. प्रसन्न गांधी आणि प्रा. गुरमिंदर सिंग या संशोधकांनी सिरॅमिक्सवरील अभ्यासामध्ये ३ मोल% इट्रिया-स्टॅबिलाईझ्ड झिरकोनिया (3-YSZ) वापरले. एक श्यान (घट्ट व चिकट) प्रवाही द्रव म्हणून उष्मनादरम्यान पदार्थाचे वर्तन कसे असेल हे सांगणारे घटकात्मक प्रतिमान — म्हणजे गणितीय समीकरणांचा संच — तयार करण्यासाठी त्यांनी भौतिकशास्त्रीय दृष्टिकोनाचा आधार घेतला. त्यांना असे दिसून आले की तापमानानुसार पदार्थाची घनता आणि श्यानता (चिकटपणा किंवा घट्टपणा) कशी बदलते याचे मापन करून, दंडगोल आणि "पाइन ट्री" सारखे गुंतागुंतीचे आकार असलेल्या भागांचे सिंटरिंग नंतरचे मोजमाप काय असेल याचे अत्यंत अचूक भाकीत ते करू शकतात.

"मुद्रणाच्या वेळी पदार्थाचे वर्तन त्याच्या श्यानतेनुसार नियंत्रित होते. आणि त्यावरून पदार्थ किती सहजतेने वाहतो, त्याचे एकावर एक थर चांगले बसतात का आणि मुद्रित केलेल्या घटकात अंतर्गत ताण किती प्रमाणात साठतो हे निश्चित होते. याउलट, सिंटरिंग प्रक्रियेपूर्वीचे वर्तन सापेक्ष घनतेद्वारे (मुद्रित घटकाची घनता आणि पदार्थाच्या सैद्धांतिक घनतेचे गुणोत्तर) ठरते. तसेच घटकामध्ये घन पदार्थ किती आणि छिद्रे (मधल्या मोकळ्या सुटलेल्या जागा) किती हे ही त्यावरून ठरते. सिंटरिंगच्या आधी घनता कमी असेल तर आकुंचन जास्त आणि आकारात होणारा बदल अधिक," प्रा. गुरमिंदर सिंग यांनी स्पष्ट केले. श्यानता मोजल्याने मुद्राणाच्या वेळी घटकाचा आकार का व कशा प्रकारे बदलतो ते आपल्याला समजते, आणि सापेक्ष घनता मोजल्याने घटक किती प्रमाणात आकार बदलेल हे कळते.

सिंटरिंग केल्यानंतर त्रिमितीय मुद्रित घटक अधिक घन होतो. पदार्थाच्या घनीकरणाचे विश्लेषण करण्यासाठी संशोधकांनी टप्प्याटप्प्याने उष्णता वाढवत नेली. घनता आणि संकुंचनाचा घनीकरणाच्या वेगावर कसा परिणाम होतो याचे निरीक्षण करण्यासाठी ठराविक टप्प्यांवर ठराविक वेळ तापमान कायम ठेवत तापमान वाढवत नेले. दुसऱ्या प्रयोगात, संशोधकांनी तापमानाच्या प्रत्येक टप्प्यावर ठराविक वजनाचा भार लागू केला आणि त्या तापमानाशी संलग्न घनीकरणाच्या पातळीला श्यानतेचे अनुमान केले. एकाच तापमानाखाली घनीकरणाच्या विविध पातळ्यांना श्यानतेचे अनुमान करण्यासाठी, संशोधकांनी तापमानाचे टप्पे अधिक कालावधीचे ठेवून प्रत्येक टप्प्यावर वजनाचा भार वाढवत नेला.

"प्रत्यक्ष स्थितीमधील यांत्रिक भाराच्या अवस्थेसारखीच अवस्था प्रयोगशाळेत निर्माण करण्यासाठी आम्ही वजनाचा भार लागू केला. वजन लागू न केल्यास निव्वळ औष्णिक संकुंचन पाहावयास मिळते. वजन दिले असता, औष्णिक-यांत्रिक भारामुळे होणाऱ्या आकारातील बदलाचे निरीक्षण करता येते. हे वर्तन प्रत्यक्ष औद्योगिक वापरात येणाऱ्या घटकांच्या वर्तनाच्या सर्वात जवळ जाणारे आहे. वजन वापरून केलेल्या अभ्यासामुळे सिंटरिंग प्रक्रियेदरम्यान रचनात्मक स्थैर्य किती व कसे राहते हे तपासता येते," प्रा. गुरमिंदर सिंग यांनी स्पष्ट केले. ही माहिती संशोधकांनी सिम्युलेशनमध्ये समाविष्ट केली. दंडगोल, इंग्रजी

I आकाराचा सेक्शन व अनेक अधांतरी फांद्या असलेली "पाईन ट्री" सारखी रचना, असे तीन अनुक्रमे जटिलता वाढत जाणारे आकार वापरून त्यांनी या सिम्युलेशनची पडताळणी केली.

सदर मॉडेलच्या सहाय्याने अंतिम मोजमापांचे अंदाज लावले असता त्रुटींचे प्रमाण केवळ ०.८% ते २.०३% होते असे दिसल्यामुळे हे मॉडेल अत्यंत प्रभावी असल्याचे संशोधक गटाने नमूद केले. यातील एक महत्त्वाचा निष्कर्ष म्हणजे सिरॅमिकच्या स्लरीमध्ये (कणयुक्त द्राव) विविध आकारांच्या सिरॅमिक कणांचे विशिष्ट प्रमाणात मिश्रण केल्यामुळे घटकांचे "क्रीपिंग" किंवा विसर्पण (स्वतःच्या वजनामुळे हळूहळू वाकणे) मोठ्या प्रमाणात रोखता आले. यामुळे लांब अधांतरी फांद्यांसारखे भागदेखील सिंटरिंग प्रक्रियेदरम्यान सरळ राहू शकले. सिम्युलेशनमध्ये अंतर्गत ताणाचे अचूक नकाशारेखन करून प्रक्रियेदरम्यान घटक तडकणार नाहीत किंवा निकामी होणार नाहीत हे निश्चित झाले.

तांब्याविषयी झालेल्या दुसऱ्या संशोधनात, श्री भरणी घंटसाला आणि प्रा. गुरमिंदर सिंग यांनी पारंपरिक भौतिकशास्त्राधारित सिम्युलेशन, आणि कृत्रिम बुद्धिमत्ता व मशीन लर्निंग एकत्र करून एक हायब्रिड मॉडेल विकसित केले. संशोधक गटाने सिंटरिंग प्रक्रियेचे आठ प्रयोग केले. त्यामध्ये त्यांनी सिंटरिंगचे तापमान, तापमान एका पातळीला ठेवण्याचा कालखंड, विशिष्ट तापमान गाठण्यासाठी तापमानवाढीचा दर, थंड होण्याचा दर, प्रक्रियेचा एकूण वेळ आणि नमुन्याची सुरुवातीची सापेक्ष घनता अशा सात 'इनपुट पॅरामीटर्स'मध्ये (परिमाणे) फरक करून चाचण्या घेतल्या. वास्तविक प्रयोगांमधून गोळा झालेली माहिती आणि संगणक-जनित निष्कर्ष यांचा समावेश असलेल्या प्रचंड माहितीसाठ्याचे कृत्रिम न्यूरल नेटवर्कला (एएनएन) प्रशिक्षण देऊन त्यांनी या प्रणालीला उष्मन आवर्तनादरम्यान पदार्थाची घनता कशी बदलते याचे भाकीत करण्यास शिकवले.

सदर प्रयोगासाठी संशोधकांनी SHapley Additive exPlanations - शेप्ली ॲडिटीव्ह एक्सप्लेनेशन्स ही पद्धत वापरली. मशीन लर्निंग मॉडेलच्या भाकीतांचे स्पष्टीकरण देणारी ही पद्धत, मशीन लर्निंगद्वारे मिळालेल्या अंतिम भाकितामध्ये किंवा भविष्यकथनामध्ये प्रत्येक 'इनपुट पॅरामीटर'ने (परिमाणे) किती वाटा उचलला याचे संख्यात्मक मापन करते. यामुळे घटकाचा आकार बदलण्यामध्ये प्रक्रियेतील कोणत्या परिमाणाचा अधिक प्रभाव असतो आणि कोणत्या परिमाणामुळे आकारातील बदल वाढतो व कोणत्या परिमाणामुळे तो कमी होतो हे समजते. प्रयोगांच्या निष्कर्षांतून असे दिसले की, नमुना अंतिमतः कसा आकार घेतो हे ठरवण्यात प्रक्रियेचा कालावधी आणि उष्मन दर या बाबी सर्वाधिक प्रभावी ठरतात. एखाद्या नमुन्यातील अधांतरी भाग गुरुत्वाकर्षणामुळे नेमके कोणत्या प्रकारे झुकतात याचा अंदाज हे कृत्रिम-बुद्धिमत्ताधारित मॉडेल करू शकते का हे तपासण्यासाठी संशोधकांनी 'I' (आय) -सेक्शनसारख्या गुंतागुंतीच्या आकाराच्या नमुन्यांवर या मॉडेलची चाचणी केली.

या हायब्रिड मॉडेलचा उपयोग करून प्राप्त झालेल निष्कर्ष प्रायोगिक निष्कर्षांशी ९८% जुळले. अधांतरी भागांच्या झुकावाचा अंदाज देण्यात पारंपरिक संगणकीय मॉडेल्सच्या तुलनेत याची कामगिरी अधिक प्रभावी ठरली.

या दोन्ही अभ्यासांतून असे स्पष्ट होते की ॲडिटीव्ह मॅन्युफॅक्चरिंग व त्यानंतरच्या सिंटरिंग प्रक्रियेत घटकांचे होणारे संकुंचन व त्यांचा आकार बदलणे हे यादृच्छिक नसते, तर त्यांचे अनुमान करणे शक्य असते. *"यामुळे चुकत, प्रयोग करत केलेल्या सिंटरिंगकडून भाकित करता येण्यासारख्या, मॉडेल-आधारित निर्मितीकडे या क्षेत्राचा कल झुकत आहे. प्रगत ॲडिटीव्ह मॅन्युफॅक्चरिंग विज्ञानात हा एक मोठा दृष्टिकोनात्मक बदल आहे. अशा कार्यचौकटीमुळे पुढे जाऊन स्मार्ट कॅड (CAD) (संगणक आधारित संरचना) साधने विकसित होतील. त्यामध्ये अंदाजित संकुंचन क्षेत्रे आपोआप संरचना करतानाच (डिझाईन) लागू होतील आणि पुढे होणाऱ्या त्रुटींचे भाकीत लक्षात घेऊन आधीच बदल केलेल्या भूमितीय रचना आकार घेतील,"* प्रा. गुरमिंदर सिंग शेवटी म्हणाले.

VETTED / UNVETTED	Vetted
Title of Research Paper	(1) Digital light processing based additive manufacturing of 3-YSZ: A constitutive modeling driven finite element analysis for sintering shrinkage and deformation (2) Hybrid machine learning and finite element modeling for accurate prediction of sintering-induced deformation in material extrusion additive manufacturing
DOI of the Research Paper as a link	https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.10.086 https://doi.org/10.1016/j.actamat.2025.121225
List of all researchers with affiliations	Gurminder Singh, G Sri Bharani, Praneeth Reddy, P Gandhi, 'Department of Mechanical Engineering, IIT Bombay'
Email of researcher/s	gurminder.singh@iitb.ac.in
Writer name	Arati Halbe
Transcreator name	Shweta Bhide
Credits to Graphic:	Gemini Nano Banana Pro
Subject [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED (Multiple allowed)	Science/Technology/Engineering/Ecology/Health/Society
Article to be Sectioned Under [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED	Deep Dive/Friday Features/Fiction Friday/Joy of Science/News+Views/News/Scitoons/Catching up/OpEd/Featured/Sci-Qs/Infographics/Events
Social Media TAGS separated by Comma	#AdditiveManufacturing, #Sintering, #ceramics, #copper, #3Dprinting, #iitbombay
Social Media Posts Suggestions/ Links to interesting relevant content [optional] [writer]	
Social Media Handles to be added	@iitbombay @ANRFIndia
Social Media handles of writer	X : @Ar_SH LinkedIn : www.linkedin.com/in/aratihalbe
Social Media handles of researchers	https://www.linkedin.com/in/dr-gurminder-singh-09895480/

Funding information (Source: Research paper)	Ministry of Human Resource Development (MHRD), India, for providing a research fellowship. IIT Bombay through Institute of Eminence (IoE) grant. IRCC IITB for RD/0522-IRCCSH0–027 grant. Anusandhan National Research Foundation (ANRF) for ANRF/ECRG/2024/003599/ENS grant. DRDO NMRL Lab for NMRL/25CR0008/CER/GN/CMS-III grant. Ministry of Education, India for PhD fellowship support under the Prime Minister's Research Fellowship Lateral Entry Scheme.
Conflict of Interest/Competing Interest information (Source: Research paper)	None
Co-PI information (Source: Research paper)	Prof Prasanna Gandhi, Department of Mechanical Engineering, IIT Bombay
Location:	Mumbai