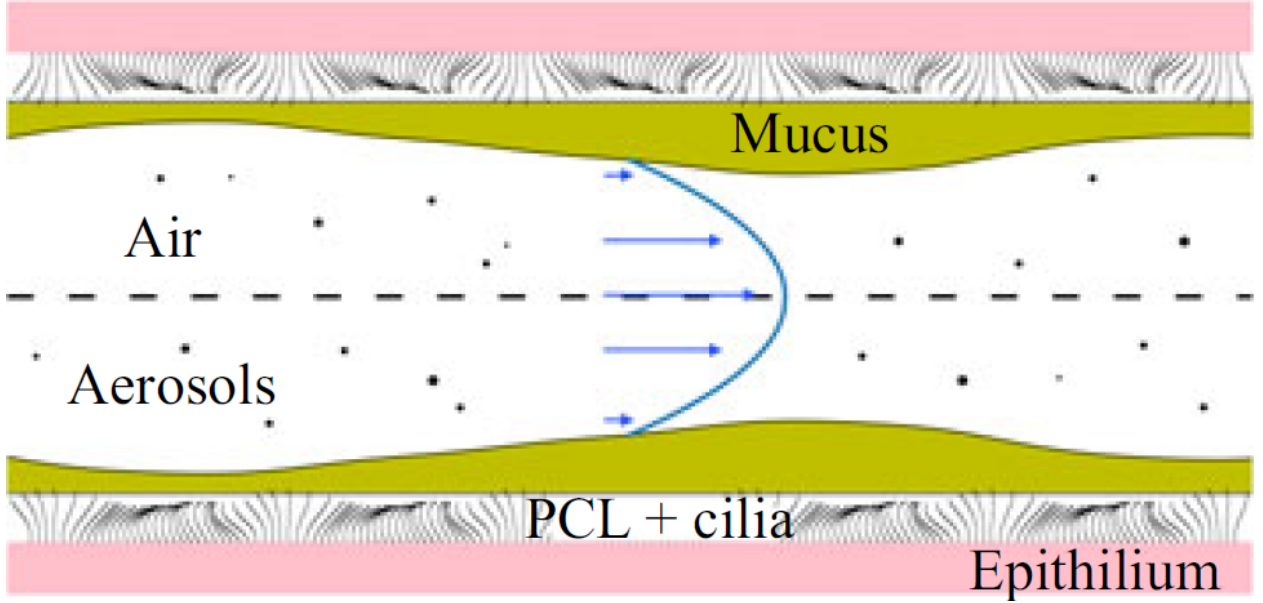


आयआयटी मुंबईच्या नव्या संशोधनाने टाकला मानवी फुफ्फुसातील 'म्युकस पॅराडॉक्स' वर प्रकाश

फुफ्फुसांमध्ये अतिरिक्त श्लेष्म साठल्याने त्यांच्या प्रतिकार प्रणालीमध्ये समस्या निर्माण होते व वेगवेगळ्या अॅलर्जी होण्याची शक्यता वाढते असे आयआयटी मुंबईच्या संशोधकांनी सिद्ध केले.



श्वसनाद्वारे आत घेतलेले सूक्ष्मकण श्वसनातील हवेच्या प्रवाहासोबत वाहून नेले जाण्याची प्रक्रिया स्पष्ट करणारे आरेखन.

स्रोत : शोधनिबंधाचे लेखक.

आपल्या फुफ्फुसांतील श्वसनमार्गामध्ये नैसर्गिकरित्या विकसित झालेली एक संरक्षण यंत्रणा असते. शरीराबाहेरील कोणत्याही पदार्थाचा, अगदी सूक्ष्म कणाचा सुद्धा या श्वसनमार्गात प्रवेश होताच ही यंत्रणा सक्रिय होते आणि म्युकस (श्लेष्म किंवा सोप्या भाषेत, कफ) नावाचा द्रव स्रवून त्या कणांना त्यात पकडले जाते. परंतु, दिल्ली, मुंबई, बेंगळुरू सारख्या महानगरांमध्ये राहणाऱ्या कोट्यवधी लोकांसाठी, ही नैसर्गिक संरक्षण यंत्रणा असूनही वाढते वायुप्रदूषण आरोग्याला सततचा धोका ठरत आहे. दाट धुरक्याने (स्मॉग) भरलेल्या हवेमुळे लहान मुलांपासून प्रौढांपर्यंत सर्वांमध्ये श्वसनाच्या गंभीर समस्या निर्माण होत आहेत.

भारतीय तंत्रज्ञान संस्था मुंबई (आयआयटी मुंबई) येथील संशोधकांच्या [अलीकडील अभ्यासाद्वारे](#) असे दिसून आले आहे की प्रदूषणाला प्रतिकार म्हणून (किंवा बाह्य कणांना रोखण्यासाठी) श्वसनमार्गामध्ये श्लेष्माचे प्रमाण वाढले म्हणून त्यांची प्रतिकारशक्ती सुधारत नाही. उलट, वाढलेल्या श्लेष्मामुळे काही ठिकाणी अरुंद 'उंचवटे' तयार होतात आणि काही ठिकाणी श्वसनमार्गाच्या भिंतीचे मोठे भाग पूर्णपणे उघडेच राहतात. अशा प्रकारे तुकड्या-तुकड्यांचे आवरण तयार झाल्याने श्वसनमार्गात गेलेले काजळीचे किंवा जळलेल्या कार्बनचे सूक्ष्म कण शरीराच्या अंतर्गत प्रणालीमध्ये शिरून दम्याचा झटका येण्याची शक्यता वाढते. अतिरिक्त श्लेष्म घातक असण्यामागचे कारण यावरून स्पष्ट होते.

स्वर्णादित्य हाजरा आणि प्रा. जेसन आर. पिकार्डो यांनी केलेल्या या अभ्यासावरील त्यांचा शोधनिबंध *जर्नल ऑफ फ्लूइड मेकॅनिक्स* या विज्ञानपत्रिकेत प्रकाशित झाला. या अभ्यासामध्ये प्रामुख्याने मध्य श्वसनमार्गाचा

अभ्यास केला गेलेला आहे. मध्य श्वसनमार्ग हे फुफ्फुसातील फांद्यासारखे पसरलेले नलिकासदृश मार्ग असून ते श्वासनलिका (विंडपाइप) आणि शेवटचे वायूकोश यांच्या दरम्यान स्थित असतात. श्वासनलिकेत फिरता व अव्यवस्थित असलेला हवेचा प्रवाह लहान आकाराच्या मध्य श्वसनमार्गांमध्ये प्रवेश करताच अधिक शांत व स्थिर होतो.

श्वसनमार्गाच्या या विशिष्ट भागामध्ये, श्लेष्माचे आवरण भौतिकशास्त्रीयदृष्ट्या एक सिद्धांताप्रमाणे नियंत्रित होत असते. त्या सिद्धांताला 'रेली-प्लॅटो इनस्टॅबिलिटी' (रेली-प्लॅटो अस्थैर्य) असे नाव आहे. ही द्रवयांत्रिकीतील एक मूलभूत संकल्पना आहे. द्रवाचा सलग प्रवाह (उदा. नळातून पडणारा पाण्याचा ओघ) कालांतराने तुटून थेंबांमध्ये विभागला जातो — ही प्रक्रिया म्हणजेच रेली-प्लॅटो अस्थैर्य. पृष्ठताणामुळे (सरफेस टेन्शन) काही ठिकाणी श्लेष्म एकत्र ओढला जाऊन तो नलिकांच्या भिंतीवर काही ठिकाणी वलयाकार पद्धतीने किंवा उंचवट्याच्या स्वरूपात गोळा होतो.

सदर अभ्यासातील काही आश्चर्यजनक शोधांपैकी एक म्हणजे फुफ्फुसांच्या प्रणालीमध्ये श्लेष्म अधिक वाढला तर त्या प्रणालीला मिळणारे संरक्षण मजबूत होण्याऐवजी उलट कमकुवत होते.

ही संकल्पना स्पष्ट करताना प्रा. पिकार्डो सांगतात, “प्रदूषणातील काजळीचे किंवा जळलेल्या कार्बनचे बहुतांशी कण हे सबमायक्रॉन (एका मायक्रोमीटर पेक्षा लहान) आकाराचे असतात. श्वसनमार्गाच्या भिंती जर उघड्या असतील, त्यावर काही संरक्षक आवरण नसेल तर असे सूक्ष्म कण विसरण प्रक्रियेद्वारे या भिंतींवर जमतील. आमच्या अभ्यासातून असे दिसून आले की श्वसनमार्गाला आतून आवरण देणाऱ्या श्लेष्माचे प्रमाण जर वाढले तर तो ठिगळे लावल्यासारखा काही जागी तुकड्या-तुकड्यांमध्ये एकत्र साठतो.”

श्लेष्म द्रवाचे प्रमाण अधिक असल्यास अधिक व्यापक आवरण मिळेल असे सर्वसाधारण तर्कानुसार वाटले तरीही प्रत्यक्षात त्याउलट घडते हे संशोधकांनी सिद्ध केले.

“स्पष्ट सांगायचे तर, आम्हाला असा शोध लागला की श्लेष्माचे प्रमाण जितके जास्त होते तितकेच त्याच्या आवरणामध्ये जाड पण अरुंद असे गोळे तयार होतात. परिणामतः आवरण कमी झालेले भाग वाढतात. हा खरा विरोधाभास आहे,” प्रा. पिकार्डो पुढे म्हणतात.

प्रा. पिकार्डो यांनी स्पष्ट केले की संशोधक गटाला सैद्धांतिकदृष्ट्या हा निष्कर्ष आधीपासूनच अपेक्षित होता; अगदी संगणकीय सिमुलेशन करण्याआधीपासून. स्थैर्य आणि समतोलाच्या सिद्धांतांचे एक विशिष्ट संयोजन वापरून त्यांनी असा अंदाज लावला की पृष्ठताणामुळे या आवरणात गुठळ्या तयार होतील. “आमचा अंदाज खरा ठरलेला प्रत्यक्षात पाहणे समाधानकारक होते,” ते म्हणाले.

जास्त प्रदूषण असलेल्या परिसरांतील रहिवाशांसाठी हा शोध म्हणजे केवळ गणितीय जिज्ञासा नाही, त्यांचा श्वास निरोगीपणे सुरू राहावा यासाठी केलेला एक प्रयत्न आहे. शहरी भागात मुबलक प्रमाणात आढळणारे काजळीचे काळे कण बहुतांशी सबमायक्रॉन आकाराचे म्हणजेच अतिसूक्ष्म असतात. म्हणजेच हे मानवी केसाच्या जाडीपेक्षाही हजार पटीने लहान असतात. या कणांची हालचाल विसरण प्रक्रियेद्वारे होत असते आणि श्वसनमार्गातील एखाद्या अनावृत्त भागावर ते कण येऊन बसण्याची मोठी शक्यता असते. जेव्हा श्लेष्माचे प्रमाण वाढल्यामुळे श्वसनमार्गात त्याच्या आवरणामध्ये काही उघडे भाग तयार होतात तेव्हा फुफ्फुसांच्या भिंतींना नुकसान पोहोचण्याची शक्यता खूपच वाढते.

“केवळ संरक्षक आवरण कमी होणे ही समस्या नाही तर अतिरिक्त श्लेष्मामुळे श्वसनमार्ग बंद होऊन आपल्याला जिवंत राहण्यासाठी आवश्यक असलेल्या श्वासातच अडथळा निर्माण होऊ शकतो,” आपल्या [इतर कामाचा](#) संदर्भ देत, स्वर्णादित्य यांनी नमूद केले.

रॅपिड-ऑनसेट अस्थमा म्हणजे जलद-आरंभी दम्याच्या ‘दुष्टचक्रा’वरही या संशोधनाने प्रकाश टाकला आहे. दमा असलेली व्यक्ती जेव्हा श्वासावाटे एखादा अॅलर्जी निर्माण करणारा पदार्थ (अॅलर्जेन) आत घेते तेव्हा प्रतिसाद म्हणून त्यांचे शरीर अधिक श्लेष्म निर्माण करते. आयआयटी मुंबईच्या अभ्यासानुसार, श्लेष्माच्या या अतीस्रावामुळे त्याच्या आवरणात अरुंद उंचवट्यांसारख्या रचना (गुठळ्या) तयार होतात. परिणामी, श्वसनमार्गाच्या भिंतींचे अधिक भाग उघडे पडतात आणि ज्या अॅलर्जेनला रोखण्यासाठी हा प्रतिसाद दिला गेला त्याच अॅलर्जेनच्या कणांशी संपर्क वाढतो.

यामुळे अॅलर्जीला दिली जाणारी प्रतिक्रिया अधिक तीव्र होऊ शकते असे प्रा. पिकार्डो सूचित करतात : “श्वसनमार्गामध्ये अॅलर्जेन साठल्याने श्लेष्माचा अतिस्त्राव व श्वासनालिकांचे आकुंचन घडू शकते... याचा परिणाम म्हणून श्वासनालिकांच्या भिंती आणखी उघड्या पडून आणखी अॅलर्जेन जमल्याने अॅलर्जीला दिली जाणारी प्रतिक्रिया अधिक तीव्र होऊ शकते.”

द्रवयांत्रिकीचा (फ्लुइड मेकॅनिक्स) पेशीय प्रतिसादाशी सुसंबंध जोडण्यासाठी आणखी अभ्यासाची गरज आहे. तरीही, दम्याचे काही त्रास किंवा झटके जलद गतीने वाढण्याचा भौतिकशास्त्रीय आधार सदर अभ्यासामुळे स्पष्ट झाला आहे.

या अभ्यासात वेगवेगळ्या आकारांचे कण श्वसनमार्गातील या उंचसखल अंतर्गत रचनेतून कसे मार्गक्रमण करतात, हेही तपासले गेले. मोठ्या आकाराच्या कणांमध्ये जडत्व अधिक असल्यामुळे श्लेष्माच्या उंचवट्याभोवती वळण घेत जाणाऱ्या हवेबरोबर ते पुढे जाऊ शकत नाहीत. परिणामी, ते उंचवट्याच्या पुढील भागावर आदळतात व तेथेच अडकतात — या प्रक्रियेला जडत्वीय आघात (इनर्शियल इम्पॅक्शन) असे म्हणतात. याउलट, लहान कण हवेच्या रेणूंमुळे इकडे-तिकडे ढकलले जात उघड्या पडलेल्या (श्लेष्माच्या गुठळीजवळच्या) सखल भागांवर जाऊन बसतात. मात्र, मध्यम आकाराचे कण श्लेष्माच्या गुठळीवर थेट आदळावेत इतके जडही नसतात व हवेबरोबर वाहत जावेत इतके हलके ही नसतात. असे कण, उंचवटे ओलांडून पुढे जाऊ शकतात आणि फुफ्फुसांच्या संरक्षण यंत्रणेला पूर्णपणे चकवून आत जाऊ शकतात.

हा शोध औषध निर्मिती उद्योगावर प्रचंड मोठा प्रभाव टाकू शकतो. सध्या श्वसनाद्वारे दिल्या जाणाऱ्या औषधांवरील बहुतांश संशोधन श्वसनमार्गाच्या अगदी सुरुवातीच्या भागावर (नाक) किंवा शेवटच्या टोकावर (वायुकोश) केंद्रित असते. मात्र ‘मध्य श्वसनमार्ग’ हे दीर्घकाळापासून एक कोडेच राहिले आहे. श्लेष्माचे उंचवटे कसे तयार होतात आणि ते आत येणाऱ्या कणांना नेमके कुठे अडवतात, हे समजल्यास संशोधकांना गरजेनुसार नेमक्या ठिकाणी पोहोचणारे ‘डिझायनर औषधकण’ विकसित करण्यासाठी दिशा मिळू शकते. प्रा. पिकार्डो यांच्या मते, फुफ्फुसांच्या संपूर्ण प्रणालीचे सर्वकष मॉडेल उभारणे हे या संशोधनाचे अंतिम व व्यापक उद्दिष्ट आहे.

“श्लेष्माचे आवरण असलेल्या मध्य श्वसनमार्गामध्ये एअरोसोल्स, म्हणजे सूक्ष्मतुषार कसे मार्गक्रमण करतात व कुठे कसे बसतात याविषयीची अधिक सखोल माहिती आमच्या अभ्यासाने दिली आहे. हा विषय यापूर्वी अभ्यासला गेला नव्हता,” प्रा. पिकार्डो म्हणाले.

संशोधकांनी 'सिलियरी एलेव्हेटर'चाही अभ्यास केला. सिलियरी एलेव्हेटर म्हणजे फुफ्फुसांमधून श्लेष्मा बाहेर ढकलण्यासाठी वरखाली हालचाल करणाऱ्या सूक्ष्म, केसांसारख्या रचना. त्यांना असे आढळले की हे केस काही मिनिटांच्या कालावधीत फुफ्फुसांची स्वच्छता करण्यासाठी अत्यंत महत्वाचे असले, तरी एका श्वासाइतक्या कमी वेळात एखादा कण नेमका कुठे जाऊन बसेल यावर परिणाम करण्याइतक्या वेगाने ते कार्य करत नाहीत. श्लेष्माच्या हालचालीपेक्षा हवा शेकडो पट वेगाने प्रवास करते. त्यामुळे श्लेष्माची श्वसनमार्गातील ही उंचसखल रचना आपण घेत असलेल्या प्रत्येक श्वासासाठी जणू एक स्थिर अडथळ्यांची शर्यतच ठरते.

शरीरातील भौतिकशास्त्राचे विलक्षण रूप आणि गुंतागुंत या संशोधनातून अधोरेखित होते. प्रा. पिकार्डो यांच्या शब्दांत सांगायचे तर, “कल्पनाशक्ती आणि तर्कशुद्ध विचार” यांचा वापर करून गणितीय मॉडेल्सच्या मदतीने या संशोधक गटाने, आपल्या भोवतालच्या वातावरणाशी असलेल्या आपल्या परस्परसंवादाचे एक रहस्यमय विश्व उलगडून दाखवले आहे. या प्रणाली कशा कार्य करतात याबद्दल आपल्याला ज्ञात असलेल्या गोष्टीपेक्षा आणखी बरेच अज्ञात आहे हे स्पष्टच आहे. एखादे जीवनरक्षक औषध असो किंवा काळ्या धुराचा एखादा सूक्ष्म कण — श्वासातून आत घेतल्या जाणाऱ्या प्रत्येक कणाचा प्रवास आपल्या श्वसनमार्गातील उंचवटे आणि उघडे सखल भाग यांच्याद्वारे ठरवला जातो हे खरोखरच रंजक आहे.

VETTED / UNVETTED	Vetted
Title of Research Paper	Aerosol deposition in mucus-lined ciliated airways
DOI of the Research Paper as a link	https://doi.org/10.1017/jfm.2025.10606
List of all researchers with affiliations	Swarnaditya Hazra and Jason R. Picardo, Department of Chemical Engineering, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai 400076, India
Email of researcher/s	Jason R. Picardo picardo@iitb.ac.in ; Swarnaditya Hazra 204026005@iitb.ac.in
Writer name	Sudhira HS
Transcreator name	Shweta Bhide
Credits to Graphic:	Authors of the study
Subject [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED (Multiple allowed)	Science/Technology/Engineering/Ecology/Health/Society

Article to be Sectioned Under [FOR EDITOR] - Please Highlight in RED	Deep Dive /Friday Features/Fiction Friday/Joy of Science/News+Views/News/Scitoons/Catching up/OpEd/Featured/Sci-Qs/Infographics/Events
Social Media TAGS separated by Comma	
Social Media Posts Suggestions/ Links to interesting relevant content [optional] [writer]	
Social Media Handles to be added	@IndiaDST, @iitbombay
Social Media handles of writer	
Social Media handles of researchers	linkedin.com/in/jason-r-picardo linkedin.com/in/swarnaditya-hazra-b78a811a7
Funding information (Source: Research paper)	This work was supported by DST-SERB (J.R.P., grant no. SRG/2021/001185), the Indo–French Centre for the Promotion of Advanced Scientific Research (IFCPAR / CEFIPRA) (J.R.P. project no. 6704-A), and IRCC, IIT Bombay (S.H., Ph.D. fellowship; J.R.P., grant no. RD/0519-IRCCSH0-021).
Conflict of Interest/Competing Interest information (Source: Research paper)	The authors report no conflict of interest.
Co-PI information (Source: Research paper)	NA
Location:	Mumbai