

अगली पीढ़ी के स्वचालन कौशल के निर्माण में एमईएमएस की परिवर्तनकारी भूमिका The Transformative Role of MEMS in Building Next-Generation Automation Skills

संश बीर¹, राहुल भटनागर¹, मनीष कुमार¹, वर्षा यादव² एवं कुलवंत सिंह^{1*}

Sansh Bir¹, Rahul Bhatnagar¹, Manish Kumar¹, Varsha Yadav², and Kulwant Singh^{1*}

¹Skill Department of Industry 4.0, SFET, Shri Vishwakarma Skill University,
Palwal, Haryana-121102, India

²Central Institute of Educational Technology, NCERT, New Delhi-110016, India
sanshbir.dagar@svsu.ac.in, rahulbhatnagar@gmail.com, manishkumar.svsu@gmail.com,
varshayadav616@gmail.com, kulwant.singh@svsu.ac.in

<https://doi.org/10.5281/zenodo.21817576>

सारांश

माइक्रो-इलेक्ट्रो-मैकेनिकल-सिस्टम (MEMS) स्वचालन के निर्माण, नियंत्रण और शिक्षण के तरीके को बदल रहे हैं। एमईएमएस उपकरण, जो छोटे यांत्रिक घटकों को एक ही चिप पर इलेक्ट्रॉनिक्स के साथ जोड़ते हैं, ने संवेदन और संचालन को न केवल अधिक कॉम्पैक्ट बनाया है, बल्कि अधिक विश्वसनीय और लागत प्रभावी भी बनाया है। इस नए संयोजन ने एमईएमएस को रोबोटिक्स, आर्थिक निगरानी और स्मार्ट विनिर्माण में उपयोग की जाने वाली स्वचालन प्रणालियों के केंद्र में ला खड़ा किया है।

रोबोटिक्स के क्षेत्र में, एक्सेलेरोमीटर, जायरोस्कोप, बल और दबाव सेंसर जैसे एमईएमएस सेंसर सटीक नियंत्रण सुनिश्चित करने में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। ये रोबोटिक आर्म्स, स्मार्ट ग्रीपर्स और स्वचालित निर्देशित वाहनों (AGV) को अपने पर्यावरण के साथ सुरक्षित और कुशलतापूर्वक अंतःक्रिया करने में सक्षम बनाते हैं। हाल के अध्ययन यह भी दर्शाते हैं कि कैसे एमईएमएस पहनने योग्य उपकरणों के माध्यम से मानव-रोबोट अंतःक्रिया को सक्षम बनाता है। यहाँ, सेंसर प्राकृतिक मानवीय हाव-भावों को पकड़ते हैं और उन्हें उच्च सटीकता के साथ रोबोटिक क्रियाओं में परिवर्तित करते हैं, जिससे नेविगेशन और ग्रीपिंग कार्यों के लिए 90% से अधिक सफलता दर प्राप्त होती है। यह क्षमता न केवल औद्योगिक अनुप्रयोगों का समर्थन करती है, बल्कि व्यावहारिक स्वचालन कौशल विकसित करने का मार्ग भी प्रशस्त करती है।

रोबोटिक्स के अलावा, एमईएमएस सेंसर का व्यापक रूप से पूर्वानुमानित रखरखाव और पर्यावरण निगरानी में उपयोग किया जाता है। कंपन, दबाव और तापमान पर निरंतर प्रतिक्रिया प्रदान करने की उनकी क्षमता औद्योगिक प्रक्रियाओं को अधिक ऊर्जा-कुशल बनाती है, डाउनटाइम कम करती है और टिकाऊ संचालन को बढ़ावा देती है। महत्वपूर्ण बात यह है कि एमईएमएस-आधारित प्लेटफॉर्म शैक्षणिक और प्रशिक्षण वातावरण में भी पेश किए जा रहे हैं, जहाँ छात्र और इंजीनियर सेंसर एकीकरण, रोबोटिक्स और स्वचालन डिजाइन में व्यावहारिक अनुभव प्राप्त कर सकते हैं।

कुल मिलाकर, एमईएमएस तकनीक केवल एक तकनीकी प्रगति से कहीं अधिक है, यह एक कौशल-प्रवर्तक है। संवेदन सटीकता को बढ़ाकर, सिस्टम लचीलेपन में सुधार करके, और प्राकृतिक मानव-मशीन संपर्क को सुगम बनाकर, एमईएमएस कार्यबल को स्वचालन के भविष्य के लिए तैयार कर रहा है और उद्योगों को उद्योग 4.0 और उसके बाद सुचारु रूप से संक्रमण के लिए आवश्यक उपकरणों से लैस कर रहा है।

Abstract

Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) are changing how automation is built, controlled, and taught. MEMS devices, which combine small mechanical components with electronics on a single chip, have made sensing and manipulation not only more compact but also more dependable and cost-effective. This novel combination has put MEMS at the center of automation systems used in robotics, economic monitoring, and smart manufacturing.

In the field of robotics, MEMS sensors such as accelerometers, gyroscopes, force, and pressure sensors play a vital role in ensuring precise control. They allow robotic arms, smart grippers, and automated guided vehicles (AGVs) to interact with their environment safely and efficiently. Recent studies also show how MEMS enable human-robot interaction through wearable devices. Here, sensors capture natural human gestures and translate them into robotic actions with high accuracy, achieving success rates above 90% for navigation and gripping tasks. This capability not only supports industrial applications but also builds a pathway for developing practical automation skills.

Beyond robotics, MEMS sensors are widely used in predictive maintenance and environmental monitoring. Their ability to provide continuous feedback on vibration, pressure, and temperature makes industrial processes more energy-efficient, reduces downtime, and supports sustainable operations. Importantly, MEMS-based platforms are also being introduced in academic and training environments, where students and engineers can gain hands-on experience in sensor integration, robotics, and automation design.

Overall, MEMS technology is more than just a technical advancement, it is a skill enabler. By enhancing sensing accuracy, improving system resilience, and facilitating natural human-machine interaction, MEMS is preparing the workforce for the future of automation and equipping industries with the tools needed to transition smoothly into Industry 4.0 and beyond.

मुख्यशब्द: एमईएमएस, उद्योग 4.0, दबाव सेंसर, पूर्वानुमानित रखरखाव, स्वचालन, रोबोटिक आर्म्स, पहनने योग्य उपकरण, मानव हावभाव

Key words: MEMS, Industry 4.0, pressure sensors, predictive maintenance, automation, robotic arms, wearable devices, human gesture

परिचय

सेंसर डिजाइन में तेजी से हुई प्रगति, विश्वव्यापी स्तर पर विश्वसनीय, टिकाऊ और कुशल तकनीक की बढ़ती माँग से प्रेरित है। शोधकर्ताओं ने इन माँगों को पूरा करने के लिए कई रणनीतियों की जाँच की है, लेकिन कई पारंपरिक प्रणालियों को प्रदर्शन, स्थायित्व, लागत—प्रभावशीलता और सघनता के बीच संतुलन बनाना मुश्किल लगता है। विभिन्न समाधानों में से, एमईएमएस आधारित सेंसर इन समस्याओं से निपटने में विशेष रूप से सफल साबित हुए हैं। अपने छोटे आकार, किफायती उत्पादन लागत और विश्वसनीय प्रदर्शन के कारण, ये कई व्यावसायिक अनुप्रयोगों के लिए एक लोकप्रिय विकल्प हैं। आजकल, एमईएमएस

सेंसर का उपयोग परिष्कृत ऑटोमोटिव प्रणालियों से लेकर पहनने योग्य तकनीक और सामान्य उपभोक्ता गैजेट्स तक, कई तरह के अनुप्रयोगों में किया जाता है। इन प्रसिद्ध उपयोगों के अलावा, ये स्वास्थ्य सेवा उद्योग में भी, विशेष रूप से चिकित्सा निदान में, अधिक महत्वपूर्ण होते जा रहे हैं, जहाँ इनकी सटीकता और मापनीयता अगली पीढ़ी के समाधानों का मार्ग प्रशस्त कर सकती है। एमईएमएस तकनीक के निर्माण के लिए अर्धचालक पदार्थों का उपयोग मूलभूत मैटीरियल के रूप में किया जाता है, जिसमें यांत्रिक घटकों, सेंसरों, एक्जुएटर्स और इलेक्ट्रॉनिक तत्वों को एक मूल सिलिकॉन सबस्ट्रेट पर एकीकृत किया जाता है [1]। इन प्रणालियों का उपयोग करके निम्नलिखित कार्य

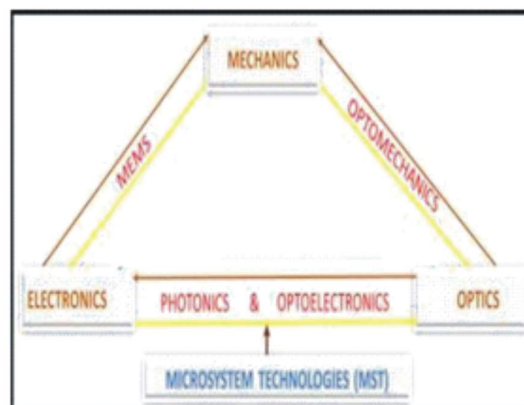
किए जा सकते हैं; सूक्ष्म स्तर पर संवेदन, नियंत्रण और क्रियान्वयन। माइक्रोइलेक्ट्रॉनिक्स और माइक्रोमशीनिंग तकनीक एक विशिष्ट सिलिकॉन (Si) वेफर पर मिलकर विशिष्ट धातु ऑक्साइड अर्धचालक उपकरण बनाते हैं और ऐसे प्रभाव उत्पन्न करते हैं जो वृहद स्तर को प्रभावित कर सकते हैं [2]।

सेंसर, एक्चुएटर और प्रोग्रामेबल लॉजिक कंट्रोलर (PLC) सहित स्वचालित प्रणालियों के एकीकरण के माध्यम से, समकालीन उद्योग मैनुअल तकनीकों की तुलना में बेहतर सटीकता और विश्वसनीयता प्राप्त कर सकते हैं, जिससे परिचालन खर्च और त्रुटियों में उल्लेखनीय कमी आती है [3]।

अगली पीढ़ी की तकनीकों की जरूरत ऑटोमोबाइल क्षेत्र में और बदलाव ला रही है। बाजार के विस्तार के साथ, शोध का ध्यान बेहतर सेंसर एकीकरण के जरिए वाहनों के प्रदर्शन और सुरक्षा को बेहतर बनाने पर केंद्रित हो रहा है। छोटे, सटीक और किफायती सेंसर बनाने की जरूरत एक लगातार समस्या रही है। माइक्रो-इलेक्ट्रो-मैकेनिकल सिस्टम (एमईएमएस) ने इन समस्याओं का समाधान कर दिया है, जिससे उत्कृष्ट सटीकता और न्यूनतम बिजली खपत वाले छोटे सेंसर बनाना संभव हो गया है। एमईएमएस खास तौर पर ऑटोमोटिव अनुप्रयोगों में उपयोगी होते हैं जहाँ उनकी कीमत और छोटे आकार के कारण विश्वसनीयता और दक्षता अनुकूलन महत्वपूर्ण होते हैं। टायर प्रेशर मॉनिटरिंग, इंजन प्रबंधन, वाहन स्थिरता नियंत्रण, यात्री सुरक्षा सुविधाएँ और उत्सर्जन विनियमन जैसी प्रणालियाँ अब एमईएमएस-आधारित उपकरणों पर काफी हद तक निर्भर हैं। उदाहरण के लिए, एमईएमएस जायरोस्कोप और एक्सेलेरोमीटर, एयरबैग की तैनाती और ब्रेकिंग की प्रतिक्रिया को बेहतर बनाते हैं।

एमईएमएस उपकरणों के निर्माण में शामिल प्रमुख चरण हैं; डिजाइन, मैटीरियल चयन, वेफर प्रसंस्करण और पैकेजिंग, जो माइक्रोसिस्टम तकनीकों (एमएसटी) के मुख्य कार्य हैं [4-6]। माडौ [9] के अनुसार, माइक्रोसिस्टम में डिजाइन, निर्माण और अनुप्रयोग भाग

शामिल हैं, जो एमएसटी का एक व्यापक क्षेत्र है। यांत्रिक, विद्युत और प्रकाशीय सूक्ष्म तत्वों को एकीकृत करके एक पूर्ण एमएसटी बनाया जाता है, जैसा कि चित्र 1 में दिखाया गया है [6-7]।



चित्र 1: माइक्रो-सिस्टम टेक्नोलॉजी (एमएसटी) के खंड [6]

मैटीरियल का चयन एमईएमएस उपकरणों के प्रदर्शन, विश्वसनीयता और जीवनकाल को तय करता है और मैटीरियल्स के गुण सीधे संवेदनशीलता, गति, लघुकरण, ऊर्जा दक्षता और स्थायित्व को प्रभावित करते हैं। एमईएमएस उपकरणों के लिए मैटीरियल के चयन के लिए यांत्रिक स्थिरता, विद्युत गुण, तापीय गुण, रासायनिक प्रतिरोध और जैव-संगतता पर विचार किया जाना चाहिए। मैटीरियल के चयन में शामिल प्रमुख कारक हैं: यांत्रिक कारक, तापीय कारक, प्रक्रिया संगतता, विद्युत कारक, रासायनिक कारक, लागत और मापनीयता [8]। इसलिए, एमईएमएस उपकरणों की सफलता मैटीरियल के चुनाव पर बहुत अधिक निर्भर करती है। इस अध्ययन में, कार्बन-आधारित मैटीरियल्स (ग्राफीन, कार्बन नैनो ट्यूब (CNTs), डायमंड, डायमंड लाइक कार्बन (DLC), ग्राफडायने का अवलोकन प्रस्तुत किया गया है जो बेहतर यांत्रिक, विद्युत और तापीय गुण, उत्कृष्ट लचीलापन और लघुकरण की पेशकश कर रहे हैं।

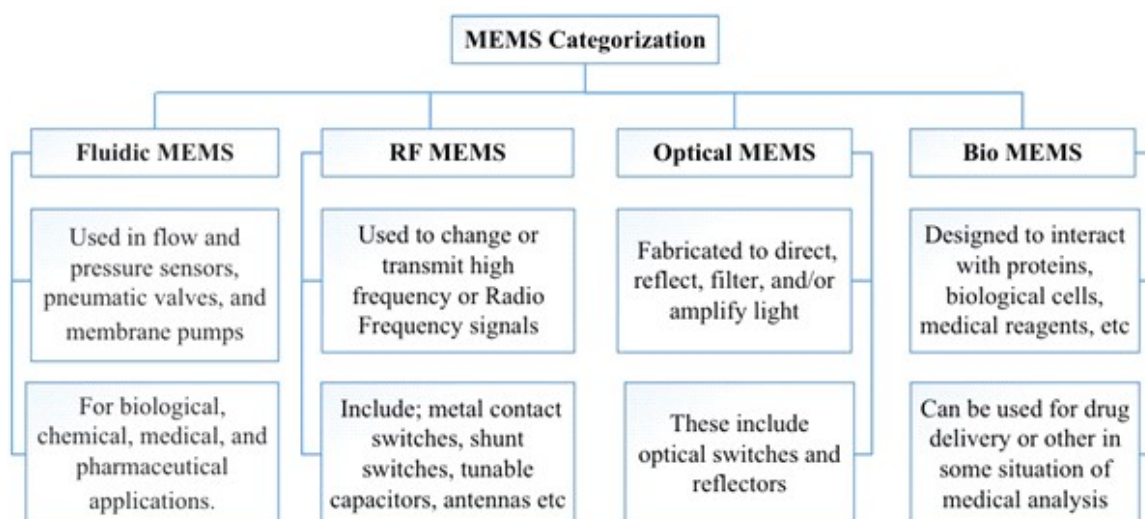
एमईएमएस तकनीक का विकास

एमईएमएस का इतिहास बहुत पुराना नहीं है, लेकिन यह तेजी से विकसित हो रही तकनीक है

जिसके अनगिनत अनुप्रयोग हैं। कई व्यक्तियों ने अलग-अलग समय और स्थानों पर एमईएमएस तकनीकों के विकास में महत्वपूर्ण योगदान दिया। इन योगदानों से बड़ी संख्या में अनुप्रयोगों के लिए कई एमईएमएस तकनीकों का विकास हुआ। एमईएमएस का विकास 1952 के दशक से शुरू हुआ, जब पहले एमईएमएस उपकरण, एक सतह ध्वनिक तरंग (SAW) फ़िल्टर, जेम्स ई द्वारा आविष्कार किया गया था। उसके बाद, विभिन्न एमईएमएस सेंसर जो व्यावसायिक रूप से उपलब्ध थे, अस्तित्व में आए, जैसे इंकजेट प्रिंटर, एमईएमएस जाइरोस्कोप, एमईएमएस/NEMS प्रेशर सेंसर, एमईएमएस माइक्रोफोन, एमईएमएस

एक्सेलेरोमीटर, एमईएमएस/NEMS स्विच और एमईएमएस/NEMS बायोसेंसर [9]। अपने मुख्य अनुप्रयोग क्षेत्रों (चित्र 2) के अनुसार एमईएमएस उपकरणों की चार अलग-अलग श्रेणियां हैं: द्रव, रेडियो आवृत्ति (RF), ऑप्टिकल और बायो एमईएमएस [10-15]।

वर्तमान प्रौद्योगिकियों में, एमईएमएस उपकरण उपभोक्ता इलेक्ट्रॉनिक्स, स्वास्थ्य देखभाल और जैव चिकित्सा, ऊर्जा और पर्यावरण, ऑटोमोटिव और परिवहन, एयरोस्पेस और रक्षा, पहनने योग्य उपकरणों जैसे भविष्य के अनुप्रयोगों से लेकर कई व्यावहारिक अनुप्रयोगों के लिए एक नया उभरता हुआ क्षेत्र है।



चित्र 2: एमईएमएस वर्गीकरण [15]

MEMS की परीवर्तनकारी भूमिका की पहचान

कार्बन-आधारित माइक्रोइलेक्ट्रोमैकेनिकल और नैनोइलेक्ट्रोमैकेनिकल प्रणालियाँ (C-MEMS/NEMS) ग्राफीन, कार्बन नैनोट्यूब (सीएनटी) और ग्लासी कार्बन जैसे कार्बन अपरूपों के असाधारण रासायनिक, विद्युत, तापीय और यांत्रिक गुणों के कारण लघुकृत उपकरण इंजीनियरिंग में एक आशाजनक क्षेत्र हैं। ये विशेषताएँ उन्हें बायोसेंसिंग, औषधि वितरण, ऊर्जा भंडारण और पर्यावरण निगरानी जैसे उच्च-प्रभाव वाले अनुप्रयोगों के लिए आदर्श बनाती हैं। हालाँकि, प्रयोगशाला-स्तरीय

प्रदर्शनों से विश्वसनीय, बड़े पैमाने पर परिनियोजन की ओर बदलाव, चल रहे विनिर्माण और एकीकरण संबंधी मुद्दों के कारण गंभीर रूप से बाधित है।

सबसे कठिन चुनौतियों में से एक है कार्बन पदार्थों को उनकी विशिष्ट विशेषताओं का त्याग किए बिना पारंपरिक सिलिकॉन-आधारित माइक्रोफैब्रिकेशन प्रक्रियाओं में संयोजित करना। उच्च-तापमान पायरोलिसिस, जो अक्सर बहुलक पूर्ववर्तियों को चालक कार्बन संरचनाओं में बदलने के लिए आवश्यक होता है, अनियंत्रित संकोचन, संरचनात्मक विरूपण और दोष

निर्माण जैसी गंभीर समस्याओं का कारण बनता है। इन कठिनाइयों का उत्पादित उपकरणों की पुनरुत्पादन क्षमता, आयामी सटीकता और दीर्घकालिक स्थिरता पर सीधा प्रभाव पड़ता है। इसके अलावा, प्रसंस्करण के दौरान विद्युत और यांत्रिक गुणों का सावधानीपूर्वक समायोजन एक चुनौती बना हुआ है, जो वाणिज्यिक अनुप्रयोगों के लिए आवश्यक प्रदर्शन पूर्वानुमान को सीमित करता है।

एक और महत्वपूर्ण चुनौती कार्बन संरचनाओं और धात्विक या लचीले इलेक्ट्रोडों के बीच मजबूत, कम-प्रतिरोध वाले विद्युत संपर्क स्थापित करने में निहित है। यह तनाव-संवेदनशील या लचीले उपकरणों के लिए विशेष रूप से महत्वपूर्ण है, जहाँ यांत्रिक तनाव समय के साथ विघटन, संपर्क विफलता या प्रदर्शन में गिरावट का कारण बन सकता है। साथ ही, पर्यावरणीय और जैव-चिकित्सा अनुप्रयोगों के लिए पुनरुत्पादनीय सतह रसायन और कार्यक्षमता सुनिश्चित करना आवश्यक है, जहाँ सतह की परस्पर क्रिया संवेदनशीलता, चयनात्मकता और जैव-संगतता को निर्धारित करती है। सतह की अवस्थाओं में परिवर्तन उपकरणों के प्रदर्शन में असंगति पैदा कर सकता है, जिससे वास्तविक दुनिया के परिदृश्यों में उनके उपयोग में बाधा आ सकती है।

अंततः, विविध कार्बन-आधारित सामग्रियों का कार्यात्मक MEMS और NEMS प्लेटफॉर्म में व्यापक एकीकरण एक बड़ी बाधा बना हुआ है। ग्राफीन, CNT और ग्लासी कार्बन जैसी सामग्रियों की विषम प्रकृति के लिए अनुकूलित प्रसंस्करण मार्गों और माइक्रोफैब्रिकेशन वर्कफ्लो के साथ अनुकूलता की आवश्यकता होती है। मापनीयता या लागत-प्रभावशीलता से समझौता किए बिना निर्बाध एकीकरण प्राप्त करना एक प्रमुख समस्या है जो औद्योगिक अपनाने को सीमित करती रहती है।

C-MEMS/NEMS प्रौद्योगिकियों की पूर्ण क्षमता को उजागर करने के लिए इन चुनौतियों का समाधान

आवश्यक है। निर्माण-जनित दोषों पर काबू पाना, विश्वसनीय विद्युत इंटरफेसिंग सुनिश्चित करना और पुनरुत्पादनीय सतह गुणों को सक्षम करना, मजबूत, मापनीय और आर्थिक रूप से व्यवहार्य कार्बन-आधारित उपकरणों का मार्ग प्रशस्त करेगा जो अगली पीढ़ी के स्वचालन, स्वास्थ्य सेवा और पर्यावरणीय स्थिरता की बढ़ती मांगों को पूरा करने में सक्षम होंगे।

एमईएमएस उपकरणों के लिए मैटीरियल और विधियाँ

एमईएमएस उपकरण की विशिष्ट कार्यक्षमता के अनुसार, उपयुक्त मैटीरियल्स का चयन किया जाता है। एमईएमएस में विभिन्न विशेषताओं और किसी विशेष क्षेत्र में अनुप्रयोगों के अनुसार विविध प्रकार की सामग्रियाँ उपलब्ध हैं। मैटीरियल का चयन अत्यंत महत्वपूर्ण है क्योंकि यह एमईएमएस उपकरणों के प्रदर्शन, विस्तार और विश्वसनीयता पर सीधा प्रभाव डालता है। एमईएमएस का संचालन मैटीरियल्स के चयन से प्रभावित होता है, जिसमें सिरैमिक, सिलिकॉन, सिलिकॉन-आधारित मैटीरियल, कार्बन-आधारित मैटीरियल और पॉलिमर शामिल हैं [16]।

एमईएमएस निर्माण में आमतौर पर निम्नलिखित मैटीरियल्स का उपयोग किया जाता है: सिलिकॉन नाइट्राइड (Si_3N_4), एल्युमिना (Al_2O_3), एल्युमिनियम नाइट्राइड (AlN), जिरकोनिया (ZrO_2) और निम्न-तापमान सह-ज्वलित सिरैमिक (LTCC) एमईएमएस अनुप्रयोगों के लिए उन्नत सिरैमिक हैं क्योंकि इनमें उत्कृष्ट यांत्रिक शक्ति, ऊष्मा प्रतिरोध और उच्च स्थायित्व होता है [16-17]। ग्राफीन में उच्च वाहक गतिशीलता होती है जिसके कारण इसका उपयोग एमईएमएस और NEMS में किया जा सकता है, क्योंकि इसमें महत्वपूर्ण प्रकाशीय, विद्युतीय और यांत्रिक गुण होते हैं [18-19]। CMOS तकनीक के साथ इसकी अनुकूलता के कारण सिलिकॉन मैटीरियल का उपयोग एमईएमएस तकनीक में बड़े पैमाने पर किया जाता है।

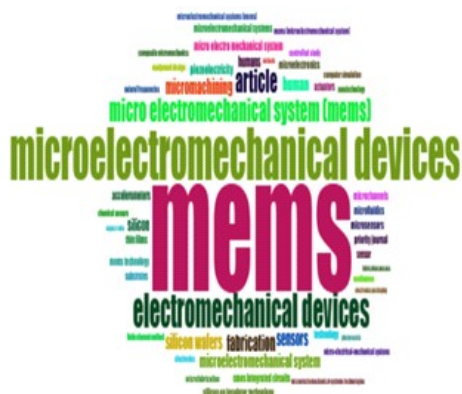
तालिका 1: पारंपरिक सिलिकॉन और कार्बन-आधारित मैटीरियल्स की तुलना

क्रमांक	गुण	सिलिकॉन (पारंपरिक)	कार्बन-आधारित मैटीरियल
1	यांत्रिक शक्ति	भंगुर, फ्रैक्चर-प्रवण	अत्यंत मजबूत और लचीला (ग्राफीन: ~200x स्टील)
2	यंग का मापांक	~130-180 जीपीए	~1 टीपीए (ग्राफीन, सीएनटी)
3	इलेक्ट्रिकल कंडक्टिविटी	अर्धचालक (डोपिंग की आवश्यकता होती है)	उच्च चालकता, ट्यूनेबल बैंडगैप
4	ऊष्मीय चालकता	~150 वाट/मी. के	ग्राफीन: ~5000 W/m. K, हीरा: ~2200 W/m. K
5	लघुरूपण	भंगुरता के कारण सीमित स्केलिंग	परमाणु मोटाई - अत्यधिक लघुकरण
6	लचीलापन	कठोर, भंगुर	लचीला, पहनने योग्य एमईएमएस के लिए उपयुक्त
7	रासायनिक स्थिरता	ऑक्सीकरण/संक्षारण के प्रति संवेदनशील	उत्कृष्ट रासायनिक प्रतिरोध (डायमंड, डीएलसी)
8	जैव अनुकूलता	सीमित	उच्च (डीएलसी, नैनोकार्बन) - चिकित्सा एमईएमएस
9	अनुप्रयोग क्षमता	पारंपरिक एमईएमएस (सेंसर, एक्टुएटर, माइक्रोचिप्स)	अगली पीढ़ी के एमईएमएस (पहनने योग्य उपकरण, बायो-एमईएमएस, IoT, ऊर्जा उपकरण)

कुछ और सामग्रियां जैसे सिलिकॉन जर्मेनियम, सिलिकॉन कार्बाइड और डायमंड-लाइक कार्बन (डीएलसी) बेहतर गुण प्रदान करती हैं [20-21] और पॉलिमर जैसे पीडीएमएस, एसयू-8 और पैरीलीन सी महत्वपूर्ण लचीलापन, लागत-प्रभावशीलता और प्रसंस्करण में आसानी प्रदान करते हैं, जिससे वे बायो-एमईएमएस और लचीले इलेक्ट्रॉनिक्स निर्माण के लिए उपयुक्त बन जाते हैं। इस अध्ययन में, मुख्य ध्यान कार्बन-आधारित मैटीरियल्स, जैसे हीरा, कार्बन नैनो-ट्यूब (सीएनटी), और ग्राफीन पर है, जो अपनी बेजोड़ तापीय, यांत्रिक और विद्युत विशेषताओं के कारण एमईएमएस अनुप्रयोगों के लिए उच्च मांग में हैं [22]। पारंपरिक सिलिकॉन और कार्बन आधारित मैटीरियल के साथ उनके विभिन्न गुणों के आधार पर तुलना तालिका 1 में दिखाई गई है।

एमईएमएस प्रौद्योगिकी विकास पर ग्रंथसूची (Bibliometric) विश्लेषण

आर स्टूडियो ग्रंथसूची उपकरण का उपयोग करके एमईएमएस प्रौद्योगिकी विकास पर विश्लेषण किया गया, जिसमें स्कोपस डेटाबेस में एमईएमएस प्रौद्योगिकी क्षेत्र से 1544 शोध लेखों का चयन किया गया। एक महत्वपूर्ण विश्लेषण: इस उपकरण का उपयोग करके शब्द बादल उत्पन्न किया गया, जिसमें यह स्पष्ट रूप से देखा गया कि शोध लेखों में प्रयुक्त कीवर्ड एमईएमएस की संख्या सबसे अधिक है, जिसका अर्थ है कि इस तकनीक की अत्यधिक मांग है और इसमें दुनिया को पूरी तरह से बदलने की क्षमता है। आर स्टूडियो ग्रंथसूची उपकरण का उपयोग करके उत्पन्न विभिन्न कीवर्ड वाले शब्द बादल को चित्र 3 में दिखाया गया है। इस प्रकार, शब्द अनुसंधान के रुझानों या चर्चित विषयों को शीघ्रता से दर्शाया जाता है।



चित्र 3: ग्रंथमितीय (Bibliometric) विश्लेषण का उपयोग करते हुए शब्द बादल

वर्ड क्लाउड विश्लेषण की तरह, ट्री मैप भी R स्टूडियो बिब्लियोमेट्रिक टूल का उपयोग करके तैयार किया जाता है, जिसमें सबसे ज्यादा इस्तेमाल किए जाने वाले कीवर्ड्स को सबसे बड़े आयतों का उपयोग करके दर्शाया जाता है, जैसा कि चित्र 4 में दिखाया गया है। एमईएमएस कीवर्ड में सबसे बड़ा आयत है, जिसका अर्थ है कि एमईएमएस तकनीक की माँग बहुत ज्यादा है। यह विश्लेषण चर्चित विषयों, ट्रेडिंग थीम्स या शोध के मुख्य क्षेत्रों की पहचान करने में मदद करता है।



चित्र 4: ग्रंथमितीय (Bibliometric) विश्लेषण का उपयोग करते हुए वृक्ष मानचित्र

स्वचालन में एमईएमएस उपकरणों की भूमिका
सूक्ष्म विद्युत-यांत्रिक प्रणालियों (एमईएमएस)
[23] का उपयोग करके स्वचालन में सूक्ष्म उपकरणों

और प्रणालियों के डिजाइन, उत्पादन और उपयोग, सभी में व्यापक परिवर्तन किया गया है। स्वचालन में एमईएमएस उपकरणों का उपयोग उच्च परिशुद्धता,

मापनीयता और दक्षता सुनिश्चित करता है। स्वचालन उपकरणों का उपयोग करके जटिल सूक्ष्म संरचनाओं को डिजाइन किया जा सकता है और डिजाइनों को न्यूनतम त्रुटियों और विकास समय के साथ एमईएमएस उपकरण के प्रदर्शन मापदंडों को डिजाइन और अनुकूलित करने में सक्षम बनाता है। चिकित्सा रोबोटिक्स, औद्योगिक स्वचालन और स्वायत्त वाहनों सहित कई उद्योगों में, एमईएमएस सेंसर और एक्ट्यूएटर्स ने रोबोट की दक्षता और परिशुद्धता में नाटकीय रूप से सुधार किया है [24]।

एमईएमएस सेंसर स्वचालन के लिए आवश्यक हैं क्योंकि वे सटीक परिचालन और पर्यावरणीय मापदंडों की निगरानी प्रदान करते हैं। आजकल, औद्योगिक रोबोट और स्मार्ट विनिर्माण प्रणालियों में अक्सर एक्सेलेरोमीटर, जायरोस्कोप, दबाव सेंसर और जड़त्वीय माप इकाइयाँ शामिल होती हैं। लियू एवं अन्य के अनुसार, एमईएमएस जड़त्वीय सेंसर रोबोटिक मैनिपुलेटर्स की वास्तविक समय नियंत्रण परिशुद्धता को बढ़ाते हैं, जिससे अधिक तरल गति नियोजन की सुविधा मिलती है और पोजिशनिंग त्रुटियों को कम किया जा सकता है [25]। इसी तरह, ली एवं अन्य ने घूर्णन मशीनरी में पूर्वानुमानित रखरखाव के लिए एमईएमएस एक्सेलेरोमीटर के अनुप्रयोग का वर्णन किया, जहां चल रही कंपनी निगरानी ने स्वचालन निर्भरता को बढ़ाया और सिस्टम डाउनटाइम को कम किया [26]।

सेंसिंग के अलावा एमईएमएस एक्ट्यूएटर्स माइक्रो-हैंडलिंग और सटीक गति नियंत्रण में मदद करते हैं, जो सटीक स्वचालन के लिए महत्वपूर्ण हैं। सेमीकंडक्टर पैकेजिंग में स्वचालित असेंबली के लिए, सन एवं अन्य ने एमईएमएस-आधारित माइक्रो-ग्रीपर बनाए जो माइक्रोन-आकार के घटकों को संभाल सकते हैं [27]। रोबोटिक्स में इलेक्ट्रोस्टैटिक और पीजोइलेक्ट्रिक एमईएमएस एक्ट्यूएटर्स के संयोजन से उच्च-आवृत्ति प्रतिक्रिया प्रणालियाँ भी संभव हुई हैं, जिससे अनुकूली प्रक्रिया स्वचालन में सुधार हुआ है (झांग एवं अन्य) [28]।

स्वचालन में एमईएमएस का एक और महत्वपूर्ण कार्य सिस्टम-स्तरीय एकीकरण है। एमईएमएस उपकरण सेंसिंग, एक्ट्यूएशन और सिग्नल कंडीशनिंग को छोटे मॉड्यूल में एकीकृत करके वितरित स्वचालन नेटवर्क बनाना आसान बनाते हैं। फिशर एवं अन्य के अनुसार, एमईएमएस-IC एकीकरण संचार दक्षता को बढ़ाता है और विलंबता को कम करता है, जो दोनों उद्योग 4.0 और औद्योगिक इंटरनेट ऑफ थिंग्स (IIoT) प्लेटफार्मों के लिए महत्वपूर्ण हैं [29]।

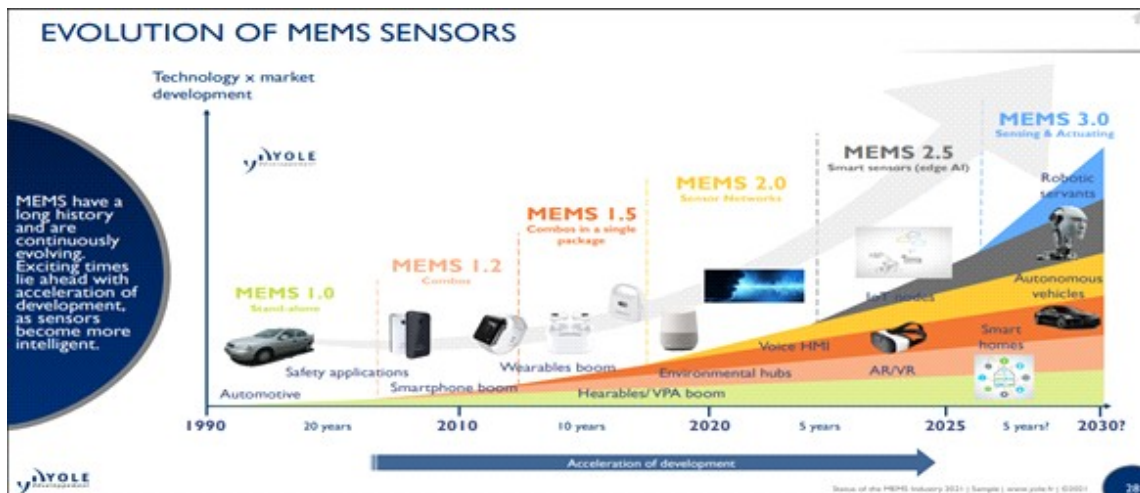
एमईएमएस उपकरण सहकारी स्वचालन सेटिंग्स में सुरक्षा में भी सुधार करते हैं। रोबोटिक भुजाओं के लिए किम एवं अन्य द्वारा एमईएमएस बल-टॉर्क सेंसर बनाए गए थे, जो सटीक अंतःक्रिया बल माप की अनुमति देते हैं। रोबोटों को नाजुक वस्तुओं को पकड़ने, उनकी पकड़ की शक्ति को संशोधित करने और एक साथ काम करते समय दुर्घटनाओं से बचने में सक्षम बनाकर, यह विकास मानव-रोबोट सहयोग को बढ़ावा देता है [30]। कुल मिलाकर, एमईएमएस उपकरणों ने स्वचालन को अनम्य, पूर्व-क्रमबद्ध प्रक्रियाओं से बुद्धिमान, लचीली और डेटा-संचालित प्रणालियों में बदल दिया है। संवेदन, क्रियान्वयन, एकीकरण और सुरक्षा में उनकी बहुउद्देशीय भूमिकाओं के कारण वे अगली पीढ़ी की स्वचालन प्रणालियों के लिए आवश्यक निर्माण मैटीरियल हैं। जैसे-जैसे एमईएमएस निर्माण और मैटीरियल इंजीनियरिंग आगे बढ़ रही है, साइबर-भौतिक उत्पादन प्रणालियों, स्मार्ट कारखानों और स्वायत्त रोबोटिक्स में इसके उपयोग में वृद्धि होने की उम्मीद है, जिससे एमईएमएस भविष्य में स्वचालन का एक प्रमुख घटक बन जाएगा।

एमईएमएस उपकरणों के अनुप्रयोग

आज के युग में, रोबोट कृत्रिम बुद्धिमत्ता (एआई), स्वचालन और माइक्रो-नैनो तकनीक के साथ अपने एकीकरण के कारण जटिल कार्य कर रहे हैं और एमईएमएस 3.0 भविष्य के ऐसे रोबोट बनाएगा जिनमें बेजोड़ बुद्धिमत्ता होगी जैसा कि चित्र 5 और 6 [31] में दिखाया गया है। कम बिजली की खपत और एमईएमएस तकनीक के लघुकरण की क्षमता को जोड़ते

हुए, रोबोट पर्यावरण संवेदन, सूक्ष्म हेरफेर और सटीक नियंत्रण के अनुप्रयोगों में व्यापक पहुँच दिखाते हैं और

विनिर्माण, कृषि, चिकित्सा और सेवा क्षेत्रों जैसे कुछ क्षेत्रों को इससे सीधे लाभ होगा।



चित्र 5: एमईएमएस सेंसर का विकास [24]

एमईएमएस आधारित उपकरणों का उपयोग सटीक दवा वितरण के लिए भी किया जाता है जहाँ द्रव प्रवाह और दबाव को गतिशील रूप से नियंत्रित किया जाता है [32-33]। अन्य एमईएमएस सेंसर: जैसे एक्सेलेरोमीटर, थर्मामीटर, दबाव सेंसर, जिनका उपयोग एक्ट्यूएटर्स के साथ ऑन-बॉडी और इन-बॉडी उपकरणों में स्वास्थ्य सेवा अनुप्रयोगों में किया जाता है [33-34]।

चित्र 6 दर्शाता है कि सूक्ष्म स्तर पर मानव इंद्रियों और विभिन्न सेंसरों व उपकरणों के अनुप्रयोगों के अनुसार प्रौद्योगिकी का विकास कैसे किया जाता है। चित्र 6 में प्रकाशित और दर्शाई गई रिपोर्ट के अनुसार, इसमें कोई आश्चर्य की बात नहीं होगी यदि उपभोक्ता इलेक्ट्रॉनिक्स के अगले आयाम जैसे मोबाइल या IoT उपकरणों को ध्यान में रखते हुए और अधिक इंद्रियाँ विकसित की जाएँ।



चित्र 6: संवेदन का विकास [24]

निष्कर्ष

अगली पीढ़ी के स्वचालन कौशल के निर्माण में एमईएमएस का क्रांतिकारी महत्व, मैटीरियल्स, निर्माण प्रक्रियाओं और सिस्टम एकीकरण की परस्पर क्रिया पर दृढ़ता से आधारित है। स्वचालन के क्षेत्र में, कार्बन-आधारित एमईएमएस मैटीरियल्स का चयन औद्योगिक और शैक्षणिक, दोनों क्षेत्रों में समस्याओं के समाधान में एक महत्वपूर्ण कारक है। प्रत्येक परिस्थिति में मौजूद विशिष्ट समस्याओं को देखते हुए, मैटीरियल के चयन में रासायनिक प्रतिरोध, चयनात्मकता और परिचालन स्थितियों के साथ अनुकूलता का सावधानीपूर्वक संतुलन आवश्यक है। इसके विपरीत, घरेलू परिस्थितियों में, जैव-संगतता, कम ऊर्जा उपयोग और रखरखाव में आसानी महत्वपूर्ण विचार बन जाते हैं। हाइब्रिड मैटीरियल्स का बढ़ता उपयोग एमईएमएस अनुसंधान की बदलती प्रकृति को दर्शाता है, जो अधिक जटिल मांगों के लिए अनुकूलनीय समाधान प्रदान करता है।

नैनोटेक्नोलॉजी और केमिकल इंजीनियरिंग के साथ एमईएमएस के संयोजन ने सहयोगी अनुसंधान के नए रास्ते खोले हैं, जिसके परिणामस्वरूप C-एमईएमएस प्रणालियों में उल्लेखनीय प्रगति हुई है। ये विकास पुराने तरीकों की अंतर्निहित सीमाओं के लिए एक आकर्षक समाधान प्रदान करते हैं, जिससे स्केलेबल और दीर्घकालिक स्वचालन संभव होता है। महत्वपूर्ण रूप से, लागत-प्रभावी विकल्पों और विश्वसनीयता-केंद्रित कार्यप्रणालियों की खोज भविष्य के अनुसंधान के लिए एक व्यवहार्य क्षेत्र के रूप में उभर रही है। एमईएमएस मैटीरियल नवाचार और बहु-विषयक तालमेल को अपनाकर अगली पीढ़ी के स्वचालन की आधारशिला के रूप में अपनी स्थिति को और मजबूत करता रहेगा, जहाँ कार्बन-आधारित प्रणालियाँ औद्योगिक दक्षता, शैक्षणिक अन्वेषण और दैनिक अनुप्रयोगों पर महत्वपूर्ण प्रभाव डालेंगी।

शोध पत्र में प्रयुक्त तकनीकी अंग्रेजी शब्दों की हिंदी समानार्थक शब्दावली

Alphabetically sorted terminology in English	वर्णमाला अनुक्रमित हिंदी शब्दावली
Automation	स्वचालन
Bibliometric	ग्रंथसूची
Compactness	सघनता
Flexibility	लचीलापन
Minutiarization	लघुकरण
Optimization	अनुकूलन
Performance	प्रदर्शन
Research	अनुसंधान
System	प्रणाली
Wearables	पहनने योग्य

संदर्भ

1. Maluf N, Williams K (2004) Introduction to microelectromechanical systems engineering. Artech House, Norwood
2. Ma L, Soin N, Daut MHM, Hatta SFWM (2019) Comprehensive study on RF-MEMS switches used for 5G scenario. IEEE Access 7:107506-107522

3. Sudhansu Shekhar Padhy, Yogesh Sharma (2024) Synergizing Skills and Industry: A Dual-System Approach to Robust Ecosystem Development. Vigyan Prakash, 22(3), 8-14
4. Senturia, S. D. (2002) Microsystem design. Springer Science & Business Media.
5. Maluf, N. I., & Williams, K. R. (2004) An introduction to microelectromechanical systems engineering. Artech House.
6. Lamidi, S. B., Bankole, Y. O., Olayiwola, I. O., Olalere, R. K., Animashaun, L. A., Kingsley, N. A., & Giwa, K. Q. (2025) Overview of Micro-Machining and Micro-Electromechanical Systems (MEMS). International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM), 295-307.
7. Fatikow, S., & Kötter, O. (2016) Microsystem Technology and Microrobotics. Springer.
8. Manuel, A., & Pramanick, B. (2025). Carbon-mems derived glassy carbon sensor for acetone sensing. Microsystem Technologies, 1-14.
9. Madou, M. J. (2011) Fundamentals of Microfabrication and Nanotechnology. CRC Press.
10. Mishra VDMK, Mishra PM, Khan I (2019) MEMS technology: a review. J Eng Res Rep 4(1):1-24
11. Chollet F, Liu H (2013) A (not so) short introduction to micro electro mechanical systems, version 5.1
12. Gad-el-Hak M (2005) MEMS: introduction and fundamentals. CRC Press, Cambridge
13. Karumuri SR, Srinivas Y, Sekhar J, Sravani K (2011) Review on break through MEMS technology. Archiv Phys Res 2(4):158-165
14. Kageyama T, Shinozaki K, Zhang L, Lu J, Takaki H, Lee S-S (2018) Fabrication of an Au-Au/carbon nanotube-composite contacts RF-MEMS switch. Micro Nano Syst Lett 6(1):6
15. Algamili, A. S., Khir, M. H. M., Dennis, J. O., Ahmed, A. Y., Alabsi, S. S., Ba Hashwan, S. S., & Junaid, M. M. (2021). A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices. Nanoscale research letters, 16(1), 16.
16. Reddy, B. N. (2025). MEMS Fabrication Materials and Techniques for Emerging Trends. i-Manager's Journal on Material Science, 13(1).
17. Fallahnia, Ehsan & Kouki, Ammar. (2024). Ceramics for Microelectromechanical Systems Applications: A Review. Micromachines. 15. 1244. 10.3390/mi15101244.
18. Torkashvand, Z., Shayeganfar, F., & Ramazani, A. (2024). Nanomaterials Based Micro/Nanoelectromechanical System (MEMS and NEMS) Devices. Micromachines, 15(2), 175. <https://doi.org/10.3390/mi15020175>
19. Saipriya L et al (2022) ECS Trans. 107 10997
20. Taeko Ando, Xiao-An Fu, Materials: Silicon and beyond, Sensors and Actuators A: Physical, Volume 296, (2019), Pages 340-351, ISSN 0924-4247, <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.07.009>.
21. Cimalla, V. & Baeumler, M. & Kirste, Lutz & Prescher, Mario & Christian, Björn & Passow, T. & Benkhelifa, Fouad & Bernhardt, F. & Eichapfel, G. & Himmerlich, Marcel & Krischok, Stefan & Pezoldt, Joerg. (2014). Densification of Thin Aluminum Oxide Films by Thermal Treatments. Materials Sciences and Applications. 05. 628-638. 10.4236/msa.2014.58065.

22. LiaoX, SongW, ZhangX, HuangH, WangYand ZhengY (2018) Directly printed wearable electronic sensing textiles towards human mechine interfaces J. Mater. Chem. C612841-8
23. K. Kahar et al., "Optimization of MEMS-based Energy Scavengers and output prediction with machine learning and synthetic data approach," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 358, p. 114429, May (2023), doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114429>.
24. Jin, Haoran. (2025). Research on Frontier Applications of MEMS Technology in Robotics. *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*. 1. 10.61173/0y79sq83.
25. Zhu, J., Liu, X., Shi, Q., He, T., Sun, Z., Guo, X., Liu, W., Sulaiman, O. B., Dong, B., & Lee, C. (2020). Development Trends and Perspectives of Future Sensors and MEMS/NEMS. *Micromachines*, 11(1), 7. <https://doi.org/10.3390/mi11010007>
26. Yi-Chia Lee, Cheng-Che Tsai, Cheng-Ying Li, Yu-Cheng Liou, Cheng-Shong Hong, Sheng-Yuan Chu, Fabrication and function examination of PZT-based MEMS accelerometers, *Ceramics International*, Volume 47, Issue 17, (2021), Pages 24458-24465, ISSN 0272-8842, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.05.161>.
27. Sun, Y., Liu, Y., Pancheri, F., & Lueth, T. C. (2022). Larg: A lightweight robotic gripper with 3-d topology optimized adaptive fingers. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 27(4), 2026-2034.
28. Zhao, Q., Liu, S., Chen, J., He, G., Di, J., Zhao, L., ... & Hou, Z. (2021). Fast-moving piezoelectric micro-robotic fish with double caudal fins. *Robotics and Autonomous Systems*, 140, 103733.
29. Fischer, A. C., Forsberg, F., Lapis, M., Bleiker, S. J., Stemme, G., Roxhed, N., & Niklaus, F. (2015). Integrating mems and ics. *Microsystems & Nanoengineering*, 1(1), 1-16.
30. U. Kim, "A novel intrinsic force sensing method for robot manipulators during Human-Robot interaction," *IEEE Trans. Robot.*, vol. 37, no. 6, pp. 2218-2225, Dec. (2021), doi: 10.1109/TRO.2021.3072736.
31. Damianos, D., Mouly, J., Delbos, P. (2021). Status of the MEMS Industry 2021. *Market and Technology Report*, 1-33.
32. Chang, Y., Xu, S., Dong, B., Wei, J., Le, X., Ma, Y., ... & Lee, C. (2021). Development of triboelectric enabled tunable Fabry-Pérot photonic-crystal-slab filter towards wearable mid-infrared computational spectrometer. *Nano Energy*, 89, 106446.
33. Chandrashekar, R., Kumar, B. S., Chahuan, N., Singh, N., Gupta, N., & Chauhan, S. (2025) Advanced integration of MEMS sensors and actuators for next-generation wearable and implantable devices. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 3263, No. 1, p. 160007). AIP Publishing LLC.
34. Chakraborty, D., Rathi, A., Singh, R., Pathak, V. K., Srivastava, A. K., Sharma, A., ... & Kumar, S. (2023). External six-bar mechanism rehabilitation device for index finger: Development and shape synthesis. *Robotics and Autonomous Systems*, 161, 104336.