International Journal on Science and Technology (IJSAT)

E-ISSN: 2229-7677 ● Website: www.ijsat.org ● Email: editor@ijsat.org

भारतीय शहरी क्षेत्रों में सूक्ष्म-प्रदूषकों का विश्लेषण: अपशिष्ट जल उपचार प्रणालियों की प्रभावशीलता और पर्यावरणीय जोखिम

Dr. Sarika Sharma

Department of Chemistry
Government Degree College, Budaun, Uttar Pradesh, India.

सारांश

भारत के तीव्र शहरीकरण, जनसंख्या-वृद्धि, औषधीय उपभोग में विस्तार, व्यक्तिगत देखभाल उत्पादों के बढ़ते उपयोग, और औद्योगिक-घरेलू अपशिष्ट के जटिल मिश्रण ने शहरी जल-प्रदूषण की प्रकृति को अत्यंत बहुआयामी बना दिया है। परंपरागत जल-गुणवत्ता मानकों—जैसे जैव-रासायनिक ऑक्सीजन मांग (BOD), रासायनिक ऑक्सीजन मांग (COD), कुल निलंबित ठोस (TSS), pH, नाइट्रेट, फॉस्फेट आदि—के अतिरिक्त अब ऐसे सूक्ष्म-प्रदूषक (micro-pollutants) और उभरते प्रदूषक (emerging pollutants) गंभीर चिंता का विषय बन चुके हैं, जो अत्यल्प सांद्रता (ng/L से µg/L) पर भी जलीय पारिस्थितिक तंत्र तथा मानव स्वास्थ्य पर प्रभाव डाल सकते हैं। इन सूक्ष्म-प्रदूषकों में फार्मास्युटिकल्स, व्यक्तिगत देखभाल उत्पाद (PCPs), अंतःस्रावी व्यवधानकारी यौगिक (endocrine disrupting compounds), एंटीबायोटिक्स, हार्मोन, कृत्रिम सुगंध यौगिक, कीटनाशी अवशेष तथा कुछ संदर्भों में सूक्ष्म-प्लास्टिक/नैनो-प्लास्टिक संबंधी कण शामिल हैं। भारत के अधिकांश सीवेज उपचार संयंत्र (Sewage Treatment Plants, STPs) मूलतः कार्बनिक भार, निलंबित ठोस और रोगजनकों को कम करने के लिए डिज़ाइन किए गए हैं; वे इन जटिल रसायनों के पूर्ण निष्कासन के लिए अभिकल्पित नहीं हैं। प्रस्तुत शोध-पत्र का उद्देश्य भारतीय शहरी नदी-तटीय क्षेत्रों—विशेषतः गंगा और यमुना तंत्र से जुड़े नगरों—में सूक्ष्म-प्रदूषकों की उपस्थिति, उनकी सांद्रता, STPs द्वारा उनके निष्कासन की वास्तविक क्षमता, तथा उनसे उत्पन्न पारिस्थितिक और स्वास्थ्यगत जोखिमों का विश्लेषण करना है। यह अध्ययन एक बहु-पैरामीट्रिक ढाँचा प्रस्तावित करता है, जिसमें STPs के इनलेट और आउटलेट से नमूना-संग्रह, GC-MS और HPLC आधारित रासायनिक विश्लेषण, साथ ही पारंपरिक जल-गुणवत्ता सूचकांकों (COD, BOD, pH, आयनिक प्रोफ़ाइल) का तुलनात्मक परीक्षण सम्मिलित है। लेख यह दिखाता है कि यद्यपि पारंपरिक उपचार प्रक्रियाएँ BOD और COD में उल्लेखनीय कमी ला सकती हैं, तथापि अनेक सूक्ष्म-प्रदूषकों—विशेषकर फार्मास्युटिकल अवशेष, हार्मोनल यौगिक और कुछ स्थायी कार्बनिक रसायन—का निष्कासन आंशिक, अनियमित अथवा अपर्याप्त रहता है। मौसमीय परिवर्तन, हाइड्रोलिक लोड, जैविक सक्रियता, sludge retention time, तथा उपचार प्रौद्योगिकी की प्रकृति इन निष्कासन-दरों को प्रभावित करती है। लेख में यह भी विवेचित किया गया है कि इन रसायनों का जलीय जीवों पर विषैला प्रभाव, अंतःस्रावी व्यवधान, प्रतिजैविक प्रतिरोध (antibiotic resistance) की वृद्धि, तथा पेयजल स्रोतों के माध्यम से मानव स्वास्थ्य पर संभावित दुष्प्रभाव एक गंभीर नीति-चिंता का विषय हैं। उन्नत ऑक्सीकरण प्रक्रियाएँ (AOPs), मेम्ब्रेन बायोरिएक्टर (MBRs), ओजोनन, सक्रिय कार्बन, और फोटो-कैटेलिसिस जैसी तकनीकों को पारंपरिक STPs के साथ एकीकृत करने की आवश्यकता रेखांकित की गई है। लेख निष्कर्षतः यह प्रतिपादित करता है कि भारत में जल-शोधन की नियामकीय और प्रौद्योगिकीय रूपरेखा को सूक्ष्म-प्रदूषकों के युग के अनुरूप पुनर्गठित किए बिना शहरी जल-सुरक्षा और पारिस्थितिकीय संरक्षण के लक्ष्य अधूरे रहेंगे।

कुंजीशब्द: सूक्ष्म-प्रदूषक, उभरते प्रदूषक, अपशिष्ट जल उपचार, फार्मास्युटिकल अवशेष, व्यक्तिगत देखभाल उत्पाद, जलीय पारिस्थितिकी, GC-MS, HPLC, भारत, पर्यावरणीय जोखिम

1. परिचय

वर्तमान शताब्दी में जल-प्रदूषण का प्रश्न मात्र पारंपरिक गंदे पानी, कार्बनिक भार या दृश्यमान औद्योगिक अपशिष्ट तक सीमित नहीं रह गया है। आधुनिक शहरी समाज में दवाओं का बढ़ता उपयोग, एंटीबायोटिक्स की व्यापक उपलब्धता, व्यक्तिगत देखभाल उत्पादों की उपभोक्तावादी संस्कृति, कृत्रिम सुगंध, हार्मोनल दवाओं, डिटर्जेंट यौगिकों और रासायनिक जीवन-शैली ने जल-पर्यावरण में ऐसे जटिल रसायनों की उपस्थिति को बढ़ा दिया है जो अत्यल्प मात्रा में भी पर्यावरणीय रूप से सक्रिय हैं। इन्हें सामान्यतः “उभरते प्रदूषक” या “सूक्ष्म-प्रदूषक” कहा जाता है। इनका महत्व इसलिए बढ़ जाता है क्योंकि वे पारंपरिक जल-

गुणवत्ता निगरानी कार्यक्रमों में नियमित रूप से शामिल नहीं होते, परंतु दीर्घकालिक विषाक्तता, जैव-संचयन (bioaccumulation), अंतःस्रावी व्यवधान, जीन-विषाक्तता, प्रतिरक्षा प्रभाव और जलीय जैवविविधता पर इनके परिणाम गंभीर हो सकते हैं। भारत जैसे देश में यह विषय और अधिक प्रासंगिक है, जहाँ तीव्र शहरीकरण, अपर्याप्त सीवेज अवसंरचना, अनियमित अपशिष्ट जल उपचार, मिश्रित नालों की व्यवस्था, नदी-तटीय शहरों की निर्भरता, तथा सतही जल स्रोतों पर बढ़ता दबाव जल गुणवत्ता को बहुआयामी संकट में डाल देता है। दिल्ली, कानपुर, वाराणसी, प्रयागराज, पटना, हरिद्वार और अन्य नदी-आधारित शहरों में घरेलू सीवेज, अस्पताल अपशिष्ट, छोटे उद्योगों का निकास, धार्मिक-नगरीय क्रियाएँ तथा उपचारित/अर्ध-उपचारित अपशिष्ट का पुनर्प्रवाह एक ऐसी जटिल रासायनिक प्रोफ़ाइल का निर्माण करते हैं जिसे केवल BOD, COD या कोलिफ़ॉर्म जैसी पारंपरिक कसौटियों से नहीं समझा जा सकता। समस्या का केंद्रीय बिंदु यह है कि भारत सहित विश्व के अधिकांश पारंपरिक सीवेज उपचार संयंत्र मुख्यतः कार्बनिक पदार्थ, पोषक-तत्वों की आंशिक कमी, और रोगजनक नियंत्रण के लिए विकसित किए गए थे। वे फार्मास्युटिकल अवशेष, व्यक्तिगत देखभाल उत्पादों के घटक, सिंथेटिक हार्मोन, एंटीबायोटिक्स, एक्स-रे कॉन्ट्रास्ट मीडिया, और अन्य ट्रेस-ऑर्गेनिक्स को हटाने के लिए विशेष रूप से अभिकल्पित नहीं हैं। परिणामस्वरूप, उपचारित जल में भी इन सूक्ष्म-प्रदूषकों का एक अंश बना रह सकता है, जो नदी, झील, भूजल पुनर्भरण, सिंचाई जल और अंततः पेयजल स्रोतों तक पहुँच सकता है।

इस शोध-पत्र का उद्देश्य भारतीय शहरी क्षेत्रों, विशेषतः गंगा और यमुना बेसिन से जुड़े नगरों के संदर्भ में, सूक्ष्म-प्रदूषकों की उपस्थिति, STPs की प्रभावशीलता, और पर्यावरणीय जोखिम की बहुआयामी समीक्षा करना है। लेख निम्न प्रमुख प्रश्नों पर केंद्रित है:

- पहला, कौन-कौन से सूक्ष्म-प्रदूषक भारतीय शहरी अपशिष्ट जल में प्रमुख रूप से पाए जाते हैं?
- दूसरा, पारंपरिक STPs इन रसायनों को किस सीमा तक हटाने में सक्षम हैं?
- तीसरा, उपचार के बाद शेष बची सांद्रता का जलीय जीवन और मानव स्वास्थ्य पर क्या संभावित प्रभाव हो सकता है?
- चौथा, उन्नत रासायनिक और झिल्ली-आधारित प्रौद्योगिकियाँ इस समस्या के समाधान में कितनी सहायक हो सकती हैं?
- पाँचवाँ, भारत के नियामकीय ढाँचे में सूक्ष्म-प्रदूषकों को लेकर कौन-से संरचनात्मक अंतराल मौजूद हैं?

इन प्रश्नों की पड़ताल केवल पर्यावरण विज्ञान का अकादमिक अभ्यास नहीं है; यह शहरी जल-प्रशासन, सार्वजनिक स्वास्थ्य, नदी-बहाली, और सतत विकास के लिए अत्यंत महत्वपूर्ण है। जैसे-जैसे भारतीय शहरों की जल-आवश्यकताएँ बढ़ रही हैं और treated wastewater reuse का महत्व बढ़ रहा है, वैसे-वैसे सूक्ष्म-प्रदूषकों की निगरानी और नियंत्रण अपरिहार्य हो जाता है।

2. साहित्य समीक्षा

2.1 उभरते प्रदूषकों की अवधारणा: वैश्विक परिप्रेक्ष्य

2000 से 2014 के बीच पर्यावरण रसायन विज्ञान में “emerging contaminants” या “contaminants of emerging concern” की अवधारणा तेजी से विकसित हुई। Daughton and Ternes (1999) ने प्रारंभिक रूप से फार्मास्युटिकल्स और व्यक्तिगत देखभाल उत्पादों (PPCPs) को पर्यावरणीय चिंता के नए क्षेत्र के रूप में स्थापित किया, और 2000 के बाद यह विमर्श वैश्विक जल-विज्ञान और अपशिष्ट जल प्रबंधन साहित्य के केंद्र में आ गया। Ternes (1998) तथा Ternes et al. (2004) ने यूरोपीय अपशिष्ट जल में विभिन्न औषधीय यौगिकों की उपस्थिति और उपचार संयंत्रों की सीमित निष्कासन क्षमता को रेखांकित किया। इन अध्ययनों ने यह सिद्ध किया कि कई दवाएँ और उनके चयापचयी अवशेष अपशिष्ट जल उपचार के बाद भी पर्यावरण में प्रवेश करते हैं।

Jones, Voulvoulis and Lester (2001) तथा Halling-Sørensen et al. (1998; यद्यपि पूर्वकालीन परंतु अत्यंत मानक) ने दवाओं, विशेषकर एंटीबायोटिक्स, की पर्यावरणीय उपस्थिति और जलीय जीवों पर उनके प्रभाव की वैज्ञानिक नींव रखी। 2000 के दशक में यह स्पष्ट हुआ कि “ट्रेस” स्तर पर मौजूद रसायनों को केवल सांद्रता के आधार पर कम महत्वपूर्ण नहीं माना जा सकता, क्योंकि हार्मोनल व्यवधान, दीर्घकालिक संपर्क और मिश्रित रसायन-प्रभाव उनके जोखिम को जटिल बना देते हैं।

2.2 फार्मास्युटिकल्स और व्यक्तिगत देखभाल उत्पाद

Fent, Weston and Caminada (2006) ने aquatic toxicology के परिप्रेक्ष्य से pharmaceutical residues के प्रभावों का व्यापक विश्लेषण प्रस्तुत किया। उनका तर्क था कि अनेक दवाएँ जैविक रूप से सक्रिय अणु हैं, जिन्हें मानव या पशु शरीर में विशिष्ट जैव-रासायनिक क्रियाओं को प्रभावित करने के लिए विकसित किया गया है; इसलिए पर्यावरण में उनका प्रवेश भी गैर-लक्षित जीवों पर प्रभाव डाल सकता है। उदाहरणस्वरूप, दर्द-निवारक दवाएँ, एंटी-इन्फ्लेमेटरी यौगिक, बीटा-ब्लॉकर्स, एंटीबायोटिक्स, एंटी-एपिलेप्टिक्स और हार्मोनल यौगिक जलीय जीवों की वृद्धि, प्रजनन, प्रतिरक्षा और व्यवहार को प्रभावित कर सकते हैं। Kümmerer (2009) ने pharmaceutical environment के प्रश्न को केवल अवशिष्ट रसायन-उपस्थिति तक सीमित न रखकर “from cradle to grave” दृष्टिकोण से देखा। उन्होंने दवाओं के निर्माण, उपभोग, उत्सर्जन, उपचार और अंतिम पर्यावरणीय भाग्य

के बीच एक पूर्ण जीवन-चक्र संबंध स्थापित किया। व्यक्तिगत देखभाल उत्पाद—जैसे triclosan, parabens, synthetic musks, UV filters—भी इसी श्रेणी में आते हैं और अपशिष्ट जल में नियमित रूप से पाए गए हैं। ये यौगिक अनेक बार lipophilic होते हैं, जिससे उनका sludge adsorption और कभी-कभी जैव-संचयन बढ़ सकता है।

2.3 अंतःस्रावी व्यवधानकारी यौगिक और हार्मोनल जोखिम

Endocrine disrupting compounds (EDCs) पर 2000–2014 के बीच महत्वपूर्ण शोध हुआ। Snyder, Westerhoff, Yoon and Sedlak (2003) ने पानी में EDCs और pharmaceuticals की उपस्थिति तथा उपचार चुनौतियों की समीक्षा की। Jobling et al. के पूर्ववर्ती कार्यों और बाद के अनेक अध्ययनों ने जलीय जीवों, विशेषकर मछलियों, में हार्मोनल व्यवधान, feminization, reproductive impairment और vitellogenin induction जैसी घटनाओं को दर्ज किया। यह साहित्य बताता है कि सूक्ष्म-प्रदूषकों का जोखिम हमेशा तीव्र विषाक्तता में नहीं, बल्कि उप-घातक, दीर्घकालिक और अंतःस्रावी व्यवधान में निहित होता है।

Ying, Kookana and Ru (2002) ने estrogens और xenoestrogens की पर्यावरणीय fate और removal पर चर्चा करते हुए यह रेखांकित किया कि सीवेज उपचार प्रणालियाँ इन यौगिकों को आंशिक रूप से हटा सकती हैं, परंतु उनका पूर्ण निष्कासन अक्सर संभव नहीं होता। यह भारतीय संदर्भ में विशेष चिंता का विषय है क्योंकि untreated या partially treated sewage का नदी तंत्रों में प्रवेश अधिक सामान्य है।

2.4 अपशिष्ट जल उपचार प्रणालियों की सीमाएँ

Suárez et al. (2008) तथा Verlicchi, Al Aukidy and Zambello (2012) ने यह दिखाया कि conventional activated sludge, trickling filters और stabilization ponds जैसी प्रणालियाँ कई pharmaceuticals और PCPs के लिए variable removal efficiency प्रदर्शित करती हैं। कुछ यौगिक जैव-विघटनशील होते हैं और उच्च removal दिखाते हैं, जबकि carbamazepine, diclofenac, sulfamethoxazole जैसे रसायन अधिक persistent हो सकते हैं। Kasprzyk-Hordern, Dinsdale and Guwy (2009) ने wastewater treatment works में pharmaceuticals, personal care products और illicit drugs की occurrence तथा fate का तुलनात्मक विश्लेषण किया और निष्कर्ष निकाला कि treatment process design, hydraulic retention time, sludge age, redox conditions और compound-specific properties removal को प्रभावित करते हैं।
इन अध्ययनों से यह स्पष्ट हुआ कि पारंपरिक STPs का प्रदर्शन compound-specific होता है; अतः केवल BOD/COD reduction के आधार पर यह मान लेना कि जल पर्यावरणीय रूप से सुरक्षित है, वैज्ञानिक रूप से पर्याप्त नहीं है।

2.5 उन्नत उपचार तकनीकें

AOPs, ozonation, activated carbon, membrane filtration और membrane bioreactors पर 2000–2014 के बीच समृद्ध साहित्य उपलब्ध है। Rosal et al. (2010) ने emerging pollutants के removal के लिए विभिन्न advanced treatments की तुलना की। Rivera-Utrilla et al. (2013) ने water treatment में pharmaceuticals removal के लिए activated carbon, oxidation और membrane technologies की उपयोगिता पर चर्चा की। Ikehata, Jodeiri Naghashkar and El-Din (2006) ने ozonation और AOPs की क्षमता का मूल्यांकन किया। ये अध्ययन संकेत देते हैं कि सूक्ष्म-प्रदूषकों के लिए tertiary और quaternary treatment अवयवों की आवश्यकता हो सकती है।

2.6 भारतीय संदर्भ

भारतीय संदर्भ में 2000–2014 के बीच emerging pollutants पर शोध अपेक्षाकृत सीमित रहा, परंतु कुछ महत्वपूर्ण संकेत उपलब्ध हुए। Fick et al. (2009) ने भारतीय नदियों, विशेषतः हैदराबाद के निकट औषधीय प्रदूषण के गंभीर स्तरों को उजागर किया। उनकी रिपोर्ट ने यह दर्शाया कि कुछ फार्मास्युटिकल निर्माण क्षेत्रों के निकट जल में औषधीय अवशेष अत्यंत उच्च स्तर तक पहुँच सकते हैं। Kumar et al. तथा कुछ भारतीय पर्यावरणीय अध्ययन समूहों ने शहरी जलाशयों, STP effluent और सतही जल में एंटीबायोटिक तथा फार्मास्युटिकल अवशेषों की उपस्थिति का संकेत दिया। यद्यपि इस कालखंड में व्यवस्थित राष्ट्रीय डाटाबेस का अभाव था, पर उपलब्ध साक्ष्य यह बताते हैं कि भारत में समस्या गंभीर है और निगरानी ढाँचा अपर्याप्त है।

2.7 बायो-एक्युमुलेशन और पारिस्थितिक जोखिम

Bioaccumulation का प्रश्न उन यौगिकों के संदर्भ में विशेष रूप से महत्त्वपूर्ण है जो lipophilic, persistent या trophic transfer के प्रति प्रवृत्त हों। हालांकि सभी pharmaceuticals उच्च bioaccumulation नहीं दिखाते, अनेक PCP ingredients, musk compounds, surfactants और कुछ industrial organics जैव-संचयन की संभावना रखते हैं। Environmental risk assessment

के साहित्य में PEC/PNEC (Predicted Environmental Concentration / Predicted No Effect Concentration) तथा risk quotient approaches का उपयोग बढ़ा। Hernando et al. तथा Fent et al. (2006) के अध्ययनों ने compound-specific toxicities को समझने की आवश्यकता पर बल दिया। भारतीय पारिस्थितिकीय स्थितियों—जैसे उच्च तापमान, बहाव में मौसमी परिवर्तन, eutrophication, low flow conditions—में इन यौगिकों के व्यवहार का पृथक अध्ययन आवश्यक है।

3. कार्यप्रणाली

यह शोध भारतीय शहरी नदी-तटीय क्षेत्रों के लिए एक बहु-स्तरीय विश्लेषणात्मक कार्यप्रणाली प्रस्तावित करता है। अध्ययन का उद्देश्य सूक्ष्म-प्रदूषकों की उपस्थिति, सांद्रता, उपचार-पूर्व एवं उपचार-पश्चात परिवर्तन, तथा पारंपरिक और उन्नत जल-गुणवत्ता संकेतकों के बीच अंतर्संबंध को समझना है।

3.1 अध्ययन क्षेत्र का चयन

अध्ययन के लिए गंगा और यमुना बेसिन से जुड़े प्रमुख शहरी क्षेत्रों का चयन किया जा सकता है, जैसे:
- दिल्ली (यमुना तंत्र)
- कानपुर
- वाराणसी
- प्रयागराज
- हरिद्वार
- पटना

इन क्षेत्रों का चयन निम्न आधारों पर उचित है:
(क) उच्च जनसंख्या घनत्व,
(ख) उल्लेखनीय सीवेज उत्पादन,
(ग) नदी-निर्भरता,
(घ) STP अवसंरचना की विविधता,
(ङ) अस्पताल, घरेलू अपशिष्ट और शहरी रसायन भार की उपस्थिति।

3.2 नमूना चयन और नमूना-संग्रह

प्रत्येक चयनित STP से निम्न बिंदुओं पर नमूने एकत्र किए जाएँ:
1. कच्चा अपशिष्ट जल (inlet)
2. प्राथमिक उपचार के बाद
3. द्वितीयक उपचार के बाद
4. अंतिम आउटलेट/effluent
5. effluent प्राप्त करने वाले नदी-जल का अपस्ट्रीम और डाउनस्ट्रीम नमूना

नमूने दो प्रमुख मौसमों में एकत्र किए जाएँ:
- ग्रीष्म ऋतु
- मानसून ऋतु

यदि संभव हो, तो शीत ऋतु के नमूनों को भी शामिल किया जा सकता है ताकि मौसमी परिवर्तन की बेहतर व्याख्या संभव हो। प्रत्येक नमूना-स्थल से triplicate samples लेकर सांख्यिकीय विश्वसनीयता बढ़ाई जानी चाहिए।

3.3 विश्लेषण हेतु लक्षित रसायन

अध्ययन में निम्न श्रेणियों के representative compounds शामिल किए जा सकते हैं:
- Analgesics/anti-inflammatory drugs: diclofenac, ibuprofen, paracetamol
- Antibiotics: ciprofloxacin, sulfamethoxazole, tetracycline
- Antiepileptics: carbamazepine
- Hormones: estrone, ethinylestradiol
- Personal care compounds: triclosan, parabens
- Synthetic musks
- Surfactant degradation products

- चुने हुए plastic-associated micro-fragments या polymer-associated residues (जहाँ विश्लेषणात्मक अवसंरचना उपलब्ध हो)

3.4 भौतिक-रासायनिक पैरामीटर
सूक्ष्म-प्रदूषक विश्लेषण के साथ-साथ निम्न पारंपरिक पैरामीटर्स का परीक्षण किया जाए:
- pH
- तापमान
- Conductivity
- Dissolved oxygen
- BOD
- COD
- Total suspended solids
- Nitrate
- Phosphate
- Ammoniacal nitrogen
- Chloride and sulfate

इन पैरामीटर्स से STP के सामान्य प्रदर्शन और compound removal variability के बीच संबंध स्थापित किया जा सकता है।

3.5 विश्लेषणात्मक तकनीकें

3.5.1 GC-MS
Gas Chromatography-Mass Spectrometry का उपयोग विशेष रूप से volatile और semi-volatile organic pollutants, synthetic musks, कुछ PCP residues और selected organics की पहचान तथा परिमाणन हेतु किया जाएगा। Sample preparation में solid phase extraction (SPE) का उपयोग आवश्यक होगा, जिससे trace-level compounds को pre-concentrate किया जा सके। Internal standards और surrogate recoveries के माध्यम से गुणवत्ता नियंत्रण सुनिश्चित किया जाएगा।

3.5.2 HPLC
High-Performance Liquid Chromatography का उपयोग विशेष रूप से polar pharmaceuticals, antibiotics, hormones और कुछ thermally labile compounds के लिए किया जाएगा। आवश्यकता अनुसार HPLC-UV, HPLC-DAD या HPLC-MS interface का उपयोग किया जा सकता है, पर संसाधन-आधारित अध्ययन के लिए HPLC-UV भी प्राथमिक स्क्रीनिंग हेतु उपयोगी हो सकता है। Retention time matching, calibration curves और recovery correction के आधार पर quantification की जाएगी।

3.5.3 गुणवत्ता नियंत्रण और गुणवत्ता आश्वासन
- Field blanks
- Procedural blanks
- Matrix spikes
- Duplicate samples
- Calibration verification standards

इनके माध्यम से analytical uncertainty कम की जाएगी। Detection limit (LOD) और quantification limit (LOQ) को प्रत्येक analyte के लिए पृथक रूप से रिपोर्ट किया जाना चाहिए।

3.6 निष्कासन दक्षता का आकलन
प्रत्येक रसायन के लिए removal efficiency निम्न सूत्र से ज्ञात की जा सकती है:

$$Removal\ Efficiency(\%) = [(Cin - Cout)/Cin] \times 100$$

जहाँ $Cin\ =\ inlet\ concentration, Cout\ =\ outlet\ concentration$

यह ध्यान रखना आवश्यक है कि कुछ स्थितियों में apparent negative removal भी देखा जा सकता है, जो conjugated metabolites के deconjugation, sorbed fraction release, sampling variability या transformation processes के कारण हो सकता है।

3.7 सांख्यिकीय विश्लेषण

- Descriptive statistics
- Seasonal comparison through t-test/ANOVA
- Correlation analysis between conventional parameters and micropollutant removal
- Principal component analysis (PCA) for source clustering
- Risk quotient estimation using available ecotoxicological data

4. परिणाम और विश्लेषण

4.1 उपचार-पूर्व और उपचार-पश्चात सांद्रता का तुलनात्मक अवलोकन

भारतीय शहरी STPs से अपेक्षित परिणामों के आधार पर यह माना जा सकता है कि inlet samples में analgesics, antibiotics, personal care compounds और hormonal residues की उपस्थिति व्यापक होगी। Paracetamol और ibuprofen जैसे कुछ अधिक उपभोगित compounds उच्च आवृत्ति पर पाए जा सकते हैं, जबकि carbamazepine जैसा persistent compound कम सांद्रता पर भी treatment-resistant प्रोफ़ाइल प्रदर्शित कर सकता है। Triclosan और parabens जैसे PCP-related compounds घरेलू अपशिष्ट से संबद्ध रूप से मिल सकते हैं। उपचार-पश्चात effluent में BOD और COD में पर्याप्त गिरावट देखी जा सकती है, उदाहरणार्थ BOD removal 75–90% तथा COD removal 60–85% के दायरे में। किंतु micropollutants के लिए स्थिति अधिक जटिल होगी। कुछ biodegradable compounds 50–90% तक हट सकते हैं, जबकि कई persistent compounds 20–50% से अधिक नहीं हटते। Carbamazepine, diclofenac, sulfamethoxazole और estrogenic traces जैसे compounds में आंशिक removal की संभावना रहती है।

4.2 मौसमी परिवर्तन

मानसून के दौरान hydraulic dilution के कारण कुछ compounds की measured concentration कम प्रतीत हो सकती है, परंतु high flow conditions STP performance को प्रभावित कर residence time कम कर सकते हैं। इसके विपरीत ग्रीष्म ऋतु में नदी-जल का प्रवाह कम होने, dilution capacity घटने और तापमान बढ़ने के कारण downstream risk अधिक हो सकता है। कुछ compounds के biodegradation में तापमान-प्रभाव सकारात्मक हो सकता है, लेकिन overall concentration burden low flow conditions में अधिक स्पष्ट रह सकता है।

4.3 सांकेतिक परिणाम-सारणी

नीचे एक उदाहरणात्मक सारणी प्रस्तुत की जा सकती है:

यौगिक (Compound)	Inlet (µg/L)	Outlet (µg/L)	Removal (%)
Paracetamol	25.0	5.0	80.0
Ibuprofen	18.0	4.5	75.0
Carbamazepine	3.2	2.7	15.6
Diclofenac	5.5	3.9	29.1
Sulfamethoxazole	6.8	4.1	39.7
Triclosan	2.4	1.0	58.3
Estrone	0.42	0.21	50.0

यह सारणी संकेतात्मक है, पर साहित्य-आधारित रुझानों के अनुरूप है, जहाँ compound-specific removal variability स्पष्ट होती है।

4.4 ग्राफिकल प्रस्तुति की व्याख्या

यदि ग्रीष्म और मानसून के comparative charts बनाए जाएँ, तो निम्न प्रवृत्तियाँ उभर सकती हैं:

- कुल माइक्रो-प्रदूषक भार मानसून में dilute प्रतीत होता है
- effluent removal consistency ग्रीष्म में बेहतर, पर downstream concentration risk अधिक
- कुछ hormonal compounds low-flow conditions में अधिक जैव-उपलब्ध हो सकते हैं
- antibiotics की उपस्थिति अस्पताल-सम्बद्ध सीवेज मिश्रण पर निर्भर कर मौसमी रूप से भिन्न हो सकती है

4.5 पारंपरिक पैरामीटर बनाम सूक्ष्म-प्रदूषक

अध्ययन का एक महत्त्वपूर्ण निष्कर्ष यह हो सकता है कि BOD/COD reduction उच्च होने पर भी micropollutant removal उच्च हो, यह आवश्यक नहीं है। यह नियामकीय दृष्टि से अत्यंत महत्वपूर्ण है, क्योंकि वर्तमान STP अनुपालन ढाँचा मुख्यतः conventional pollution indicators पर केंद्रित है। यदि effluent BOD मानक के भीतर है, तो भी उसमें ecologically relevant levels of pharmaceuticals या EDCs हो सकते हैं।

5. चर्चा

5.1 जलीय पारिस्थितिकी पर प्रभाव

सूक्ष्म-प्रदूषकों की प्रमुख पर्यावरणीय चिंता उनके chronic, sub-lethal और mixture effects में निहित है। Fent et al. (2006) ने यह स्पष्ट किया कि aquatic organisms पर pharmaceuticals का प्रभाव पारंपरिक toxicity models से अलग हो सकता है। हार्मोनल compounds मछलियों की प्रजनन क्षमता, endocrine signaling, gonadal development और sex differentiation को प्रभावित कर सकते हैं। एंटीबायोटिक residues microbial communities की संरचना बदल सकते हैं और resistance genes के चयन को बढ़ावा दे सकते हैं। Personal care chemicals, विशेषतः triclosan और synthetic musks, bioactive होने के कारण benthic organisms तथा planktonic communities को प्रभावित कर सकते हैं।

भारतीय नदियों में कम प्रवाह, ऊँचा कार्बनिक भार, eutrophic प्रवृत्तियाँ, और अपशिष्ट जल का अनुपातिक प्रभुत्व इन प्रभावों को और गंभीर बना सकता है। यदि किसी नदी के प्रवाह का बड़ा भाग treated या partially treated wastewater से बनता हो, तो effluent-derived micropollutants का ecological footprint बहुत अधिक हो सकता है।

5.2 प्रतिजैविक प्रतिरोध

एंटीबायोटिक अवशेषों की उपस्थिति केवल प्रत्यक्ष विषाक्तता का प्रश्न नहीं है; यह antimicrobial resistance (AMR) से भी जुड़ी है। 2000–2014 के दौरान इस पर बढ़ती चिंता व्यक्त की गई कि STPs resistance hotspots बन सकते हैं, जहाँ antibiotics, resistant bacteria और resistance genes सह-अस्तित्व में रहते हैं। भारतीय संदर्भ में, जहाँ एंटीबायोटिक उपभोग और बिना पर्चे की उपलब्धता एक सार्वजनिक स्वास्थ्य चुनौती रही है, wastewater pathway AMR burden को बढ़ा सकता है। इसलिए सूक्ष्म-प्रदूषकों का अध्ययन जल-रसायन तक सीमित न रहकर सूक्ष्मजीवविज्ञान से भी जुड़ता है।

5.3 मानव स्वास्थ्य पर संभावित प्रभाव

मानव स्वास्थ्य जोखिम प्रायः दो मार्गों से उत्पन्न हो सकते हैं:

- पहला, पेयजल स्रोतों में trace contaminants का प्रवेश;
- दूसरा, सिंचाई, खाद्य-श्रृंखला या मछली-उपभोग के माध्यम से अप्रत्यक्ष संपर्क।

यद्यपि treated drinking water में इन यौगिकों की वास्तविक सांद्रता सामान्यतः बहुत कम हो सकती है, chronic low-dose exposure और mixture toxicity को लेकर अनिश्चितताएँ बनी हुई हैं। Hormonal compounds अंतःस्रावी असंतुलन, developmental toxicity और reproductive disturbances से जुड़े माने गए हैं। एंटीबायोटिक traces resistance burden में योगदान कर सकते हैं। इस क्षेत्र में precautionary principle का प्रयोग उपयुक्त प्रतीत होता है।

5.4 रसायन विज्ञान का योगदान: उन्नत ऑक्सीकरण प्रक्रियाएँ

पर्यावरण रसायन विज्ञान इस समस्या का निदान ही नहीं, समाधान भी प्रदान करता है। Advanced Oxidation Processes (AOPs) जैसे ozonation, UV/H2O2, Fenton oxidation, photocatalysis (विशेषकर TiO2 आधारित), और sonochemical processes persistent organics को degrade करने की क्षमता रखते हैं। Rosal et al. (2010) तथा Ikehata et al. (2006) के अध्ययन बताते हैं कि AOPs कई pharmaceuticals और EDCs के लिए प्रभावी हो सकते हैं, यद्यपि transformation products का अध्ययन आवश्यक है।

फोटो-कैटेलिसिस विशेष रूप से भारत जैसे धूप-समृद्ध देश के लिए महत्वपूर्ण संभावना रखती है। यदि कम-लागत उत्प्रेरक, सौर ऊर्जा आधारित मॉड्यूल और decentralized polishing units विकसित किए जाएँ, तो tertiary treatment के रूप में इसका उपयोग व्यावहारिक हो सकता है। तथापि, scalability, energy cost, catalyst recovery और by-product toxicity पर अधिक शोध अपेक्षित है।

5.5 मेम्ब्रेन और हाइब्रिड प्रौद्योगिकियाँ

Membrane bioreactors (MBRs) conventional activated sludge की तुलना में बेहतर effluent quality देते हैं और कई micropollutants के लिए उच्च removal दिखा सकते हैं, विशेष रूप से तब जब sludge age अधिक हो और membrane retention fine particulates तथा sorbed fractions को रोक सके। Activated carbon adsorption और membrane filtration का संयोजन भी promising है। यद्यपि इन तकनीकों की लागत अधिक है, पर high-risk urban zones और water-reuse applications में इनका औचित्य मजबूत है।

6. नीतिगत सिफारिशें

6.1 STPs के डिज़ाइन मानकों का पुनरीक्षण

भारत में STPs का डिज़ाइन अभी भी मुख्यतः BOD, COD, TSS और coliform-based compliance पर आधारित है। सूक्ष्म-प्रदूषकों के युग में यह पर्याप्त नहीं है। विशेषकर बड़े महानगरों, औषधीय-उपभोग-घनत्व वाले नगरों, अस्पताल-समृद्ध क्षेत्रों और नदी-तटीय शहरों में tertiary/quaternary treatment को डिज़ाइन मानक का हिस्सा बनाया जाना चाहिए।

6.2 सूक्ष्म-प्रदूषकों के लिए नियामकीय मानक

राष्ट्रीय और राज्य प्रदूषण नियंत्रण निकायों को selected priority micropollutants के लिए monitoring framework विकसित करना चाहिए। प्रारंभिक चरण में pharmaceuticals, antibiotics, selected hormones, triclosan, और persistent PCP ingredients की "watch list" बनाई जा सकती है। यह यूरोपीय मॉडल की तरह चरणबद्ध निगरानी का आधार बन सकता है।

6.3 अस्पताल और औषधीय अपशिष्ट का पृथक प्रबंधन

अस्पतालों और औषधीय निर्माण इकाइयों के अपशिष्ट को सामान्य घरेलू सीवेज के साथ मिश्रित करना समस्या को बढ़ा सकता है। Source segregation, pretreatment और high-strength waste management की नीति विकसित की जानी चाहिए।

6.4 उन्नत उपचार तकनीकों का एकीकरण

जहाँ feasible हो, वहाँ निम्न तकनीकों का चरणबद्ध समावेशन आवश्यक है:

- मेम्ब्रेन बायोरिएक्टर
- ओजोनन
- सक्रिय कार्बन adsorption
- AOPs
- फोटो-कैटेलिटिक polishing
- constructed wetlands as post-treatment support

6.5 नियमित निगरानी और डेटा-साझाकरण

अभी भारत में सूक्ष्म-प्रदूषकों पर व्यवस्थित सार्वजनिक डाटाबेस का अभाव है। STPs, नगर निकायों, शोध संस्थानों और प्रदूषण नियंत्रण बोर्डों के बीच एक साझा monitoring platform विकसित किया जाना चाहिए। Research-grade monitoring को policy-grade surveillance में रूपांतरित करना समय की आवश्यकता है।

6.6 पुन: उपयोग (Reuse) नीति में सावधानी

Treated wastewater reuse, विशेषकर urban landscaping, industrial cooling और agriculture में, बढ़ते जल-संकट के कारण आवश्यक है। परंतु reuse standards में micropollutants को शामिल किए बिना यह नीति अपूर्ण रहेगी। यदि reclaimed water का उपयोग खाद्य फसलों, पार्कों या recharge systems में हो, तो trace contaminants की निगरानी अनिवार्य होनी चाहिए।

6.7 अनुसंधान और क्षमता-विकास

भारतीय विश्वविद्यालयों, पर्यावरण प्रयोगशालाओं और नगर निकायों को analytical capacity बढ़ाने की आवश्यकता है। GC-MS, LC-MS/MS, SPE, ecotoxicity bioassays और resistance gene monitoring जैसी सुविधाओं का विस्तार किया जाना चाहिए। 2000–2014 के वैश्विक साहित्य ने जिस ज्ञान-आधार की स्थापना की, भारत को अब उसे स्थानीय संदर्भों में अनुभवजन्य रूप से विकसित करना होगा।

7. निष्कर्ष

भारतीय शहरी जल-प्रदूषण की समस्या अब केवल पारंपरिक कार्बनिक भार या दृश्यमान गंदे पानी की समस्या नहीं रह गई है; यह उभरते रासायनिक यौगिकों, जैव-सक्रिय अवशेषों और अत्यल्प सांद्रता पर भी प्रभाव उत्पन्न करने वाले सूक्ष्म-प्रदूषकों की समस्या बन चुकी है। फार्मास्युटिकल्स, व्यक्तिगत देखभाल उत्पाद, हार्मोनल यौगिक, एंटीबायोटिक्स और अन्य ट्रेस-ऑर्गेनिक्स भारतीय शहरी अपशिष्ट जल में मौजूद हैं, और पारंपरिक STPs इन्हें पूर्णतः हटाने के लिए पर्याप्त रूप से अभिकल्पित नहीं हैं। यही इस अध्ययन का केंद्रीय निष्कर्ष है।

पारंपरिक STP प्रदर्शन संकेतक, जैसे BOD और COD removal, आवश्यक तो हैं पर पर्याप्त नहीं। किसी effluent का conventional compliance यह सुनिश्चित नहीं करता कि वह सूक्ष्म-प्रदूषकों से सुरक्षित है। compound-specific removal variability, seasonal fluctuations, low-flow river conditions और chronic ecological exposure इस समस्या को और जटिल बनाते हैं। जलीय जीवन पर endocrine disruption, microbial shifts और toxic stress; तथा मानव स्वास्थ्य पर chronic low-dose exposure और AMR-related चिंताएँ—इन सभी को अब जल-प्रबंधन नीति में शामिल करना आवश्यक है। रसायन विज्ञान और पर्यावरण अभियांत्रिकी इस समस्या का समाधान प्रस्तुत करने में सक्षम हैं। AOPs, फोटो-कैटेलिसिस, मेम्ब्रेन बायोरिएक्टर, सक्रिय कार्बन और हाइब्रिड tertiary treatment प्रणालियाँ सूक्ष्म-प्रदूषकों के नियंत्रण में महत्त्वपूर्ण भूमिका निभा सकती हैं। किन्तु तकनीकी विकल्प तभी प्रभावी होंगे जब नियामकीय मानक, निगरानी तंत्र, वित्तीय निवेश और संस्थागत समन्वय साथ-साथ विकसित हों। भविष्य के लिए “zero liquid discharge” या न्यूनतम-जोखिम discharge framework की दिशा में सोचने की आवश्यकता है, विशेषकर उच्च-जोखिम शहरी और औद्योगिक क्षेत्रों में। यद्यपि सभी नगरों के लिए ZLD तात्कालिक रूप से व्यावहारिक नहीं हो सकता, पर treated wastewater reuse, advanced polishing और source control के संयोजन से एक अधिक सुरक्षित जल-परिपथ विकसित किया जा सकता है। भारत के जल-भविष्य की सुरक्षा के लिए यह आवश्यक है कि शहरी अपशिष्ट जल प्रबंधन को सूक्ष्म-प्रदूषकों के युग के अनुरूप पुनर्परिभाषित किया जाए।

संदर्भ सूची

1. Daughton, C. G., & Ternes, T. A. (1999). Pharmaceuticals and personal care products in the environment: Agents of subtle change? *Environmental Health Perspectives*, *107*(Suppl. 6), 907–938. https://doi.org/10.1289/ehp.99107s6907
2. Fent, K., Weston, A. A., & Caminada, D. (2006). Ecotoxicology of human pharmaceuticals. *Aquatic Toxicology*, *76*(2), 122–159. https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2005.09.009
3. Fick, J., Söderström, H., Lindberg, R. H., Phan, C., Tysklind, M., & Larsson, D. G. J. (2009). Contamination of surface, ground, and drinking water from pharmaceutical production. *Journal of Hazardous Materials*, *172*(2–3), 1221–1226. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.07.030
4. Halling-Sørensen, B., Nors Nielsen, S., Lanzky, P. F., Ingerslev, F., Holten Lützhoft, H. C., & Jørgensen, S. E. (1998). Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment—A review. *Chemosphere*, *36*(2), 357–393. https://doi.org/10.1016/S0045-6535(97)00354-8
5. Ikehata, K., Jodeiri Naghashkar, N., & El-Din, M. G. (2006). Degradation of aqueous pharmaceuticals by ozonation and advanced oxidation processes: A review. *Ozone: Science & Engineering*, *28*(6), 353–414. https://doi.org/10.1080/01919510600985937
6. Jones, O. A. H., Voulvoulis, N., & Lester, J. N. (2001). Human pharmaceuticals in wastewater treatment processes. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *35*(4), 401–427. https://doi.org/10.1080/10643380590956961
7. Kasprzyk-Hordern, B., Dinsdale, R. M., & Guwy, A. J. (2009). The occurrence of pharmaceuticals, personal care products, endocrine disruptors and illicit drugs in wastewater, surface water and drinking water. *Water Research*, *43*(2), 363–380. https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.10.047
8. Kümmerer, K. (2009). *Pharmaceuticals in the environment: Sources, fate, effects and risks* (3rd ed.). Springer.
9. Pal, A., Gin, K. Y.-H., Lin, A. Y.-C., & Reinhard, M. (2010). Impacts of emerging organic contaminants on freshwater resources: Review of recent occurrences, sources, fate and effects. *Science of the Total Environment*, *408*(24), 6062–6069. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.09.026
10. Rivera-Utrilla, J., Sánchez-Polo, M., Ferro-García, M. Á., Prados-Joya, G., & Ocampo-Pérez, R. (2013). Pharmaceuticals as emerging contaminants and their removal from water. *Chemosphere*, *93*(7), 1268–1287. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.08.007

11. Rosal, R., Rodríguez, A., Perdigón-Melón, J. A., Petre, A., García-Calvo, E., Gómez, M. J., Agüera, A., & Fernández-Alba, A. R. (2010). Occurrence of emerging pollutants in urban wastewater and their removal through biological treatment followed by ozonation. *Water Research*, *44*(2), 578–588. https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.07.004
12. Snyder, S. A., Westerhoff, P., Yoon, Y., & Sedlak, D. L. (2003). Pharmaceuticals, personal care products, and endocrine disruptors in water: Implications for the water industry. *Environmental Engineering Science*, *20*(5), 449–469. https://doi.org/10.1089/109287503768335934
13. Suárez, S., Carballa, M., Omil, F., & Lema, J. M. (2008). How are pharmaceutical and personal care products (PPCPs) removed from urban wastewaters? *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, *7*, 125–138. https://doi.org/10.1007/s11157-008-9130-2
14. Ternes, T. A. (1998). Occurrence of drugs in German sewage treatment plants and rivers. *Water Research*, *32*(11), 3245–3260. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00099-2
15. Ternes, T. A., Joss, A., & Siegrist, H. (2004). Scrutinizing pharmaceuticals and personal care products in wastewater treatment. *Environmental Science & Technology*, *38*(20), 392A–399A. https://doi.org/10.1021/es040639t
16. Verlicchi, P., Al Aukidy, M., & Zambello, E. (2012). Occurrence of pharmaceutical compounds in urban wastewater and their removal in conventional and advanced wastewater treatment plants: A review. *Science of the Total Environment*, *429*, 123–155. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.04.006
17. Ying, G.-G., Kookana, R. S., & Ru, Y.-J. (2002). Occurrence and fate of hormone steroids in the environment. *Environment International*, *28*(6), 545–551. https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00075-2