खण्ड-13, अंक-1, वर्ष-2025, मु0प्र0 37-42
D.O.I.: https://doi.org/10.22445/avsp.v13i7
SJIF (2025) : 8.749

शोध पत्र

Cyanobacteria and their uses

Pratibha Gupta[1], Mohit Kumar Tiwari[2] and Sonalika Mishra[2]
[1]Central Botanical Laboratory, Botanical Survey of India, Ministry of Environment, Forest and Climate Change Government of India, A.J.C. Bose Botanic Garden, Howrah- 711 103, W.B. India
[2]1/626, Ruchi Khand-1, Sharda Nagar Yojna, Lucknow- 226 002, U.P., India
drpratibha2024@gmail.com, drmohit2008@gmail.com, sonalika132003@gmail.com

Received: 26-10-2025, Accepted: 10-11-2025

Abstract- Cyanobacteria or blue green algae are gram negative photosynthetic autotrophic prokaryotes. They are most primitive organisms which started to perform oxygen producing photosynthesis processes on this earth. Cyanobacteria are most successful, self-dependent organisms on this earth, survived for more than 3 billion years in almost all climatic conditions of earth. They may be unicellular, colonial or filamentous, fresh water or marine or terrestrial or even also epiphytic. Cyanobacterial colonies are generally surrounded with a gelatinous sheath. They added oxygen in earth's atmosphere during early period of evolution of life. Their reserve food material is cyanophycean starch and protein. Bluegreen algae or Cyanobacteria are capable of converting atmospheric nitrogen into ammonium compounds. These organisms play very important role in ecosystem of earth and are very useful for us. Cyanobacteria are good source of energy, food and diet supplement, source of vitamins, minerals, with wide range of medicinal properties like potential antioxidants, immunomodulators, and even antitubercular, anticancer agents, source of bio fuels, bio fertilizer and bio herbicide, algaecide and pesticide. So well-studied and proper use of Cyanobacteria may act as boon for all organisms on this earth

Key words– Prokaryotic, Blue green algae, Cyanobacteria, Ammonium compounds, Bio-fuel, Bio fertilizer, Diet supplement

सायनोबैक्टेरिया और उनके उपयोग

प्रतिभा गुप्ता,[1] मोहित कुमार तिवारी[2] एवं सोनालिका मिश्रा[2]
[1]केंद्रीय वनस्पति प्रयोगशाला, भारतीय वनस्पति सर्वेक्षण, पर्यावरण, वन एवं जलवायु परिवर्तन मंत्रालय, भारत सरकार, ए0 जे0 सी0 बोस वनस्पति उद्यान, हावड़ा– 711 103, पश्चिम बंगाल,
[2]1/626, रुचि खण्ड–1, शारदा नगर योजना, लखनऊ– 226 002, उ0प्र0
drpratibha2024@gmail.com, drmohit2008@gmail.com, sonalika132003@gmail.com

सार– नीलहरित शैवाल या सायनोबैक्टेरिया ग्राम रंजक ऋणात्मक, प्रकाश संश्लेशी, आत्मपोशी, पूर्वकेन्द्रकीय अति सूक्ष्म जीव हैं। ये वे जीवधारी हैं जिन्होंने प्रकाश संश्लेशण क्रिया द्वारा पृथ्वी पर आक्सीजन उत्पन्न करना प्रारम्भ किया। सायनोबैक्टेरिया पृथ्वी पर सबसे अधिक सफल व आत्मनिर्भर जीव हैं जो 3 खरब वर्षों से भी अधिक समय से इस पृथ्वी पर पाये जाने वाली सभी वातावरणीय परिस्थितियों में पाये जाते हैं। ये एक कोशकीय, औपनिवेशिक, तन्तुरूपी, स्वच्छजलीय, समुद्री, स्थलीय और उपरिपादपीय हो सकते हैं। नीलहरित शैवालों के औपनिवेश सामान्यतः एक चिपचिपी भलेष्मा झिल्ली से घिरे रहते हैं। जीवन की उत्पति के प्रारम्भ में इन्होंने ही पृथ्वी के वायुमण्डल में आक्सीजन का निर्माण किया। सायनोफाइसियन मंड एवं प्रोटीन इनके संग्रहित भोज्य पदार्थ होते हैं। नीलहरित शैवाल वातावरण की नाइट्रोजन को अमोनिया युक्त रसायनों में परिवर्तित करने की क्षमता रखते हैं। ये जीव पृथ्वी के परिस्थितिकी तंन्त्र में अत्यन्त महत्वपूर्ण स्थान रखते हैं और हमारे लिये अत्यन्त उपयोगी हैं। सायनोबैक्टेरिया उर्जा, आहार एवं पोषण अनुपूरक, विटामिन व खनिजों के उत्तम स्रोत होते हैं, इसके साथ ही इनके वृहत औषधीय गुण जैसे प्रभावशाली प्रति–आक्सीजनक, रोग प्रतिरोधक क्षमता उत्प्रेरक, क्षय एवं कर्क रोग प्रतिरोधी प्रभाव, जैविक ईधन, जैविक उर्वरक एवं जैविक खर–पतवार, शैवाल एवं कीटनाशक के रूप में उपयोग किया जा सकता है। अतएव नीलहरित शैवालों का विस्तृत अध्ययन व उनका सही उपयोग पृथ्वी के समस्त जीवधारियों के लिये वरदान सिद्ध हो सकता है।

बीज शब्द– पूर्वकेन्द्रकीय, नीलहरित शैवाल, सायनोबैक्टेरिया, अमोनिया युक्त रसायन, जैविक ईधन, जैविक उर्वरक, पोषण अनुपूरक

1. नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरिया का परिचय

1.1 प्राचीन प्रकाश संश्लेषक प्रोकैरियोट्स– सायनोबैक्टीरिया, जिन्हें नील–हरित शैवाल भी कहा जाता है, पृथ्वी के जैविक इतिहास में एक महत्वपूर्ण स्थान रखते हैं। ये प्राचीन पूर्वकेन्द्रकीय जीव/प्रोकैरियोट्स लगभग 3–5 अरब वर्ष पूर्व उत्पन्न हुए थे, जिन्होंने प्रकाश

संश्लेषण द्वारा ऑक्सीजन उत्पन्न की, जिसने पृथ्वी ग्रह के वायुमंडल को मौलिक रूप से बदल दिया[1,2]। परिणाम स्वरूप जीवों के विकास प्रक्रिया की सफलता ने अधिक जटिल जीवन रूपों के निर्माण का मार्ग प्रशस्त किया, जिसके कारण नीलहरित शैवाल जीवन की उत्पत्ति और पारिस्थितिकी विकास को समझने के लिए अपरिहार्य हो गए। वे एक ऐसे वंश का प्रतिनिधित्व करते हैं जो न केवल पूर्व के सभी भूवैज्ञानिक युगों में जीवित रहा वरन विकसित भी हुआ है। अत्यधिक अनुकूलन क्षमता के कारण, सायनोबैक्टीरिया विभिन्न प्रकार के वातावरणों में निवास करते हैं। मीठे पानी की झीलों और महासागरों की शांत प्रतीत होने वाली सतहों से लेकर भूतापीय झरनों, अतिलवणीय लैगून और यहाँ तक कि जमी हुई ध्रुवीय प्रणालियों की कठोरतम चरम सीमाओं तक पाये जाते हैं, इनकी अनुकूलन क्षमता अद्वितीय है[3,2]। नीलहरित शैवाल की सर्वव्यापी उपस्थिति उनकी सुदृढ़ उपापचयी प्रणाली और विविध ऊर्जा एवं पोषक स्रोतों का दोहन करने की क्षमता का प्रमाण है। इनकी प्रकाश संश्लेषक क्षमताएँ इन्हें सौर ऊर्जा का दोहन करने, कार्बन डाइऑक्साइड को कार्बनिक पदार्थों में परिवर्तित करने और ऑक्सीजन मुक्त करने में सक्षम बनाती हैं। प्राथमिक उत्पादकों के रूप में अपनी अद्वितीय भूमिका के अतिरिक्त, नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरिया वैश्विक पोषक चक्र, उर्जा चक्र, नाइट्रोजन चक्र एवं आक्सीजन चक्र में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। इनकी कई प्रजातियों में वायुमंडलीय नाइट्रोजन को ग्रहण करने और उसे अमोनिया जैसे जैवउपलब्ध रूपों में परिवर्तित करने की अनूठी क्षमता होती है, जो पौधों की वृद्धि और समग्र पारिस्थितिकी तंत्र में उत्पादकता एवं प्रकृतिक नाइट्रोजन चक्र के लिए अत्यन्त आवश्यक है[4]। यह नाइट्रोजनस्थिरीकरण क्षमता उन्हें बंजर या पोषक तत्वों की कमी वाले वातावरण में भी पनपने की सार्मथ्य देती है, जिससे वे अग्रणी प्रजातियों के रूप में कार्य करते हैं, जो पोषक मृदा के निर्माण का प्रारम्भ करती हैं एवं मृदा की उर्वरता बढ़ाती हैं। उनका ये बहुआयामी योगदान सूक्ष्म स्तर से लेकर वैश्विक जैव–भू–रासायनिक चक्रों तक, उनके पारिस्थितिक महत्व को रेखांकित करता हैं।

1.2 **आकृति विज्ञान, वर्गीकरण और शरीर क्रिया विज्ञान–** नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरिया की लगभग 2,700–4,700 वर्णित और संभावित अनुमानतः 8000 से अधिक प्रजातियां, आकारिकी के विभिन्न रूपों की एक प्रभावशाली श्रृंखला प्रदर्शित करती हैं, जो व्यापक पारिस्थितिक स्थितियों में उनका सफल योगदान दर्शाते हैं। वे सरल एककोशिकीय जीवों के रूप में, जटिल औपनिवेशिक समूहों के रूप में या कोशिकाओं की श्रृंखलाओं से युक्त तंतुमय संरचनाओं के रूप में विद्यमान हो सकते हैं[2]। यह रूपात्मक विविधता उन्हें विभिन्न गणों में वर्गीकृत करती है, जिनमें सम्मिलित हैं, **क्रोकोकेल्स–** जिनकी विशेषता उनके एककोशिकीय या सरल औपनिवेशिक रूप हैं, **नोस्टोकेल्स–** जो अपनी तंतुमय, प्रायः नाइट्रोजन–स्थिरीकरण करने वाली प्रजातियों के लिए जाने जाते हैं, जिनमें हेटेरोसिस्ट जैसी विशिष्ट कोशिकाएँ होती हैं और **सिनेकोकोकेल्स–** जिनमें एककोशिकीय और तंतुमय दोनों प्रकार शामिल हैं। लगभग 4,500 से अधिक प्रजातियों की पहचान के साथ, उनका वर्गीकरण विस्तार उनके प्राचीन और सफल विकासवादी इतिहास को दर्शाता है।

एककोशिकीय रूपः सरल, एकल कोशिकाएँ, जो अक्सर प्लवकीय समुदायों में पाई जाती हैं। उदाहरण–सिनेकोकोकस।
तंतुमय रूपः कोशिकाओं की श्रृंखलाएँ, जिनमें कभी–कभी नाइट्रोजन स्थिरीकरण के लिए हेटेरोसिस्ट जैसी विशिष्ट संरचनाएँ होती हैं। उदाहरण–नोस्टोक।
औपनिवेशिक समुच्चयःकोशिकाओं के समूह जो एक चिपचिपी श्लेष्मा के आवरण में बंद होते हैं और दृश्यमान उपनिवेश बनाते हैं, उदाहरण–माइक्रोसिस्टिस।

सु–अध्ययनित नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरियम का एक प्रमुख उदाहरण सिनेकोसिस्टिस प्रजाति (पीसीसी6803) है, जो प्रोकैरियोटिक प्रकाश संश्लेषण और कोशिकीय जीव विज्ञान को समझने के लिए एक आदर्श जीव के रूप में कार्य करता है। सिनेकोसिस्टिस पर किए गए शोध ने जैविक गतिशीलता के जटिल तंत्रों को स्पष्ट किया है, जिसमें विशेष रूप से टाइप IV पिली नामक अमीनो अम्ल की तन्तु रुपी रचना द्वारा वाह्य कोशकीय इलेक्ट्रान तन्त्र मध्यस्थता की गई। ये गतिशील उपांग जीवाणु को सतहों पर गति करने और प्रकाश–आवर्तन प्रदर्शित करने में सक्षम बनाते हैं, जो प्रकाश संश्लेषण के लिए अनुकूलतम प्रकाश स्थितियों की तलाश हेतु एक महत्वपूर्ण अनुकूलन है। ऐसी गतिशीलता जैव झिल्ली (बायोफिल्म) निर्माण में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाती है, एक सामूहिक व्यवहार जो कोशिकाओं को शुष्कन और पराबैंगनी विकिरण से सुरक्षित रख कर विभिन्न पर्यावरणीय आवासों में उत्तरजीविता और अनुकूलन को बढ़ाता है[2]। नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरिया के जीवन का मूल उनका अत्यधिक कुशल प्रकाश संश्लेषक तंत्र है, जो सकेन्द्रकीय/यूकेरियोटिक पौधों के तंत्र से अत्याधिक समानता दर्शाता है। इनमें सकेन्द्रकीय पौधों के समान प्रकाशतंत्र I (PSI-I) और प्रकाशतंत्र II (PSI-II) दोनों होते हैं, जो ऑक्सीजनमुक्त प्रकाश संश्लेषण को संभव बनाते हैं जहाँ जल के विभाजन से ऑक्सीजन मुक्त होती है और प्रकाश ऊर्जा, एटीपी (ATP) तथा एन.ए.डी.पी.एच. (NADPH) के रूप में, रासायनिक ऊर्जा में परिवर्तित हो जाती है[4]। यह जटिल जैवरासायनिक मार्ग उन्हें उल्लेखनीय दक्षता के साथ सौर ऊर्जा ग्रहण करने, कार्बन स्थिरीकरण और जैवभार उत्पादन को गति प्रदान करने में सक्षम बनाता है, जो कई जलीय खाद्य जालों का आधार बनता है। उनकी शारीरिक सुदृढ़ता, उनके विविध रूपों के साथ, उनकी पारिस्थितिकी जन्य बहुमुखी प्रतिभा और जैवविकास में उनके महत्व को दर्शाती है।

2. नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरिया के उपापचयज

2.1 **विविधता और कार्यात्मक भूमिकाएँ–** सायनोबैक्टीरिया प्राथमिक और द्वितीयक उपापचयजों की एक आश्चर्यजनक श्रृंखला के प्रचुर उत्पादक हैं, जिनमें से कई अत्यन्त महत्वपूर्ण पारिस्थितिक और जैवप्रौद्योगिकीय मूल्य रखते हैं। इनमें पाये जाने वाले रासायनिक यौगिक

कैरोटीनॉयड, फाइकोसायनिन, फाइकोएरिथ्रिन और फाइकोबिलिप्रोटीन जैसे आवश्यक वर्णक होते हैं, जो प्रकाश–संरक्षण और विविध जीवंत रंग प्रदान करते हैं, तथा प्रकाश संश्लेषण की क्रिया में प्रकाश संचयन के लिए आवश्यक सहायक वर्णक है[5]। वर्णकों के अतिरिक्त वे विभिन्न फेनोलिक यौगिकों, महत्वपूर्ण वसीय अम्लों और माइकोस्पोरिन–सदृश अमीनो अम्लों (MAAs)जैसे अद्वितीय जैवअणुओं का संश्लेषण भी करते हैं। माइकोस्पोरिन–सदृश अमीनो अम्ल (MAAs) अपने शक्तिशाली पराबैंगनी अवशोषक गुणों के लिए विशेष रूप से उल्लेखनीय हैं, जो प्राकृतिक सनस्क्रीन के रूप में कार्य करते हैं और उच्च–प्रकाश वातावरण में साइनोबैक्टीरियल कोशिकाओं को हानिकारक सौर विकिरण से बचाते हैं[5]। विशेष बात यह है कि कुछ नीलहरित शैवालों में बने कुछ उपापचयी रसायन (साइनोबैक्टीरियल मेटाबोलाइट्स) अन्योन्य रसायन/ऐलीलोकेमिकल गुण प्रदर्शित करते हैं, जिसका अर्थ है कि वे अन्य जीवों की वृद्धि और उत्तरजीविता को प्रभावित कर सकते हैं। इनमें साइनोटॉक्सिन भी शामिल हैं, जो हानिकारक शैवाल प्रस्फुटन में अपने हानिकारक प्रभावों के बावजूद, कृषि अनुप्रयोगों के लिए आशाजनक हैं। इन प्राकृतिक यौगिकों का उपयोग शक्तिशाली, पर्यावरण–अनुकूल कीटनाशकों, विशेष रूप से शैवालनाशकों और शाकनाशियों के रूप में किया जा सकता है[5,6]। विशिष्ट कीटों या अवांछित पौधों के विरुद्ध उनकी लक्षित क्रिया,संश्लेषित (सिंथेटिक) कृषि–रसायनों का एक स्थायी विकल्प प्रदान करती है, पर्यावरणीय दुष्प्रभावों को कम करके आधुनिक कृषि में जैविक नियंत्रण रणनीतियों को प्रोत्साहन देती हैं, इसके अतिरिक्त, सायनोबैक्टीरिया फाइटोहॉर्मोनों का संश्लेषण करते हैं जो उनकी तनाव प्रतिक्रियाओं और समग्र शारीरिक नियमन के लिए अभिन्न अंग हैं। सायनोबैक्टीरिया में एक प्रसिद्ध पादप हार्मोन, एब्सिसिक अम्ल (ABA), की पहचान की गई है और यह पर्यावरणीय तनावों के प्रति उनके अनुकूलन में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है, उदाहरण के लिए, एब्सिसिक अम्ल सायनोबैक्टीरिया को उच्च लवणता और सूखे जैसी परिस्थितियों का सामना करने में सहायता करता है, और कोशिकीय जल संतुलन और जीन अभिव्यक्ति पथों[5] को प्रभावित करता है। ऐसे जटिल हार्मोनल तंत्रों की उपस्थिति और कार्यात्मक महत्व, उन परिष्कृत जैव–रासायनिक पथों को रेखांकित करते हैं जो सायनोबैक्टीरिया को अत्यधिक गतिशील और बहुधा चुनौतीपूर्ण आवासों में पनपने में सक्षम बनाते हैं, जो उनकी उल्लेखनीय अनुकूलन क्षमता को प्रदर्शित करता है।

2.2 **पर्यावरणीय और पारिस्थितिक महत्व–** नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरिया जलीय और स्थलीय दोनों पारिस्थितिक तंत्रों के स्वास्थ्य और उत्पादकता को बनाए रखने में एक अपरिहार्य भूमिका निभाते हैं। प्राचीन प्राथमिक उत्पादकों के रूप में, वे कई खाद्य जालों का आधार बनाते हैं, प्रकाश संश्लेषण के माध्यम से सौर ऊर्जा को कार्बनिक पदार्थों में परिवर्तित करते हैं। इसके अलावा, वायुमंडलीय नाइट्रोजन को स्थिर करने की उनकी अद्वितीय क्षमता पोषक चक्रण का एक महतवपूर्ण आधार है। कई प्रजातियों में हेटेरोसिस्ट नामक विशिष्ट कोशिकाएँ होती हैं, जो निष्क्रिय नाइट्रोजन गैस को अमोनिया में परिवर्तित कर सकती हैं, जो पौधों की वृद्धि के लिए एक महत्वपूर्ण पोषक रसायन है। यह प्रक्रिया मिट्टी और जल की उरवरकता को समृद्ध बनाती है एवं समग्र जैव विविधता और पारिस्थितिकी तंत्र के नियंत्रण के कार्य को विशेष रूप से नाइट्रोजन–सीमित वातावरण में[4] सहयोग देती है। सायनोबैक्टीरिया मिट्टी की उर्वरता के लिए महत्वपूर्ण हैं, जो प्राकृतिक रूप से कृषि उत्पादकता को बढ़ाते हैं।उनकी अग्रणी सक्रियता, कठोर, बंजर वातावरण में उपनिवेश बनाने और उसे बदलने की उनकी क्षमता में स्पष्ट है। सायनोबैक्टीरिया अक्सर नवीन निर्मित चट्टानी सतहों या पोषक तत्वों की कमी वाली मिट्टी पर सबसे पहले स्वयं को स्थापित करने वाले प्रथम जीवन रूपों में से होते हैं। बाह्य कोशिकीय बहुलक पदार्थों (ईपीएस) के उत्सर्जन और जैव झिल्ली/बायोफिल्म निर्माण के माध्यम से, वे मिट्टी के कणों को बांधने, कटाव को रोकने और मृदा के विकास के प्रारंभिक चरणों में योगदान करने में सहायता करते हैं। यह प्रक्रिया नीलहरित भौवालों के सूक्ष्म आवासों के निर्माण से प्रारम्भ होती है और धीरे–धीरे कार्बनिक पदार्थों का निर्माण करती है, जिससे अधिक जटिल पौधों और सूक्ष्मजीव समुदायों की स्थापना का मार्ग प्रशस्त होता है, इस प्रकार पारिस्थितिक उत्तराधिकार की स्थापना होती है और एक नये पारिस्थितिकी तंत्र के निर्माण का प्रारम्भ होता है[4]।

नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरिया का पारिस्थितिक प्रभाव सदैव केवल लाभकारी नहीं है। विशिष्ट पर्यावरणीय परिस्थितियों में, जैसे गर्म तापमान और उच्च पोषक तत्व भार (जैसे, कृषि अपवाह से नाइट्रोजन और फास्फोरस) के कारण, कुछ सायनोबैक्टीरिया की प्रजातियाँ अत्याधिक तीव्रता से वृद्धि कर सकती हैं, जिससे व्यापक प्रस्फुटन/ब्लूम उत्पन्न हो सकते हैं। ये सायनोबैक्टीरियल प्रस्फुटन/ब्लूम जल की गुणवत्ता को गंभीर रूप से नष्ट कर सकते हैं, जलमग्न वनस्पतियों तक सूर्य का प्रकाश पहुँचने से रोक लेते हैं और उनके सड़ने पर जल में ऑक्सीजन अत्यधिक कमी हो सकती हैं। इससे भी अधिक चिंताजनक बात यह है कि प्रस्फुटन/ब्लूम बनाने वाली कई प्रजातियाँ शक्तिशाली सायनोटॉक्सिन नामक विश उत्पन्न करती हैं, जो जलीय जीवन, पशुधन और मनुष्यों के लिए हानिकारक या घातक भी हो सकते हैं[7]। परिणामस्वरूप, हानिकारक सायनोबैक्टीरियल प्रस्फुटन/ब्लूम से जुड़े संकटों को कम करने और जन स्वास्थ्य एवं पारिस्थितिक अखंडता की रक्षा के लिए प्रभावी निगरानी और आवश्यक प्रबंधन रणनीतियाँ अपनाना आवश्यक है।

3. **जैव–प्रौद्योगिकी अनुप्रयोगः** जैव ईंधन से जैव–उत्तेजक तक–

3.1 **स्थायी जैव ईंधन के लिये–** पर्यावरण के अनुकूल ऊर्जा के लिए तीव्र वृद्धि वाली उच्च लिपिड/वसा सामग्री के लिये उपयोग। सायनोबैक्टीरिया की कुछ प्रजातियां जैसे एनाबिना, नोस्टॉक, सिनेकोकोकस, सिनेकोसिस्टिस, स्पाइरूलिना, ओसिलोटोरिया इत्यादि की विभिन्नउपजातियां स्थायी जैव–प्रौद्योगिकी अनुप्रयोगों के लिए, विशेष रूप से गैर परम्परागत नवीकरणीय ऊर्जा के क्षेत्र में, अत्यधिक आशाजनक प्रावधान के रूप में उभर रहे हैं। कुशल प्रकाश संश्लेषण करने की उनकी क्षमता का अर्थ है कि वे सौर ऊर्जा और कार्बन डाई आक्साइड को उच्च लिपिड/वसा सामग्री वाले जैवभार/बायोमास में परिवर्तित कर सकते हैं, जो उन्हें जैव–ईंधन उत्पादन के लिए

आदर्श बनाता है[5]। कुछ प्रजातियाँ अपने शुष्क भार के 65% तक लिपिड/वसा संचित कर सकती हैं, जो कई अन्य जैव ईंधन के कच्चे माल (फीडस्टॉक्स) से अधिक उपयोगी है। स्थलीय फसलों के विपरीत, सायनोबैक्टीरिया को कृषि योग्य भूमि या मीठे पानी की आवश्यकता नहीं होती है, जिससे खाद्य उत्पादन के साथ प्रतिस्पर्धा कम होती है और बहुमूल्य कृषि संसाधन संरक्षित रहते हैं। उनकी तीव्र वृद्धि दर और गैर–पेयजल या यहाँ तक कि अपशिष्ट जल में भी पनपने की क्षमता, बायोडीजल और बायोएथेनॉल सहित अगली पीढ़ी के जैव ईंधनों के लिए एक स्थायी स्रोत के रूप में उनकी उपयोगिता को और बढ़ाती हैं।

3.2 **औषधीय क्षमता के उपयोग–** ऊर्जा के अतिरिक्त, नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरिया नवीन जैवसक्रिय यौगिकों का एक समृद्ध, अप्रयुक्त भंडार है, जिनमें महत्वपूर्ण औषधीय गुण हैं। अनुसंधानों ने एंटीबायोटिक, क्षय–रोधी, कैंसर–रोधी, विषाणु–रोधी और सूजन–रोधी गुणों वाले विविध प्रकार के उपापचयी रसायन (मेटाबोलाइट्स) की खोज की है[5,6,8,9]। ये प्राकृतिक उत्पाद औषधीय अनुसंधान और विकास के लिए एक मूल्यवान संसाधन हैं, जो विभिन्न रोगों के उपचार के नवीन मार्ग प्रदान करते हैं। वर्तमान समय में इन यौगिकों के पृथक्करण और उनकी विशेषताओं के निर्धारण के साथ–साथ व्यावसायिक स्तर पर उनके उत्पादन को अनुकूलित करने हेतु अनुसंधान किये जा रहे हैं। एंटीबायोटिक्स, कैंसर–रोधी और एंटीवायरल एजेंटों की खोज में पाया गया की कई साइनोबैक्टीरिया जैसे नोस्टॉक, आर्थोस्पाइरा, माइक्रोसिस्टिस, लेन्गब्या, सिम्पलोका, इत्यादि जैविक रूप से सक्रिय यौगिक उत्पन्न करते हैं, जिनमें कैरोटीनॉयड और अन्य जैव–अणु शामिल हैं जो प्रति–आक्सीजनक / एंन्टीऑक्सीडेंट, प्रति–प्रदाह/ एंन्टीइन्फलेमेटरी, प्रतिरक्षा–उत्प्रेरक/ इम्यूनोमॉड्यूलेटर और यहाँ तक कि इन्फलूएंजा, एडस्, व कैंसर–रोधी एजेंट के रूप में भी क्षमता प्रदर्शित करते हैं। जिसके परिणाम स्वरूप सायनोबैक्टीरिया भविष्य की चिकित्सा पद्धति और नए चिकित्सीय कारकों के विकास के लिए एक महत्वपूर्ण संसाधन के रूप में स्थापित हो रहा है।

3.3 **कृषि जैव उत्तेजक के रूप में–** नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरिया कृषि के क्षेत्र में जलवायु–अनुकूल खेती के लिए, फसल की उपज में वृद्धि और तनाव प्रतिरोधक क्षमता के विकास में वृद्धि, सिंथेटिक उर्वरकों और कीटनाशकों के पर्यावरण–अनुकूल विकल्प प्रदान करते हैं। इनकी कुछ प्रजातियां जैसे नोस्टॉक, एनाबिना, माइक्रोसिस्टिस, स्पाइरूलिना, ओसिलोटोरिया इत्यादि प्राकृतिक जैव उत्तेजक के रूप में, ये फसल की उपज बढ़ाते हैं, पोषक तत्वों के अवशोषण में सुधार करते हैं, और शुष्क तथा उच्च लवणता जैसे पर्यावरणीय तनावों के प्रति पौधों की प्रतिरोधक क्षमता में वृद्धि करते हैं[6,10,11]। नील हरित शैवाल की नाइट्रोजन स्थिरीकरण करने और वृद्धि को बढ़ावा देने वाले पदार्थों का उत्पादन करने की उनकी क्षमता सीधे तौर पर मिट्टी की उर्वरता और पौधों के स्वास्थ्य को लाभ पहुंचाती है, जिससे अधिक टिकाऊ और जलवायु–अनुकूल कृषि पद्धतियों में योगदान मिलता है। ट्राइकोडेसमियम, एक समुद्री नाइट्रोजन–स्थिरीकरण करने वाली प्रजाति है। सायनोबैक्टीरिया–आधारित उत्पादों को कृषि प्रणालियों में एकीकृत करके, हम रासायनिक आदानों पर निर्भरता कम करके पर्यावरण प्रदूषण को कम कर सकते हैं और वैश्विक खाद्य सुरक्षा चुनौतियों का समाधान करते हुए अधिक सुदृढ़ और उत्पादक खाद्य प्रणालियों को बढ़ावा दे सकते हैं।

3.4 **भोजन और पोषण पूरक आहार एवं विटामिनों के स्त्रोत के रूप में–** नीलहरित शैवाल की कुछ प्रजातियां जैसे एफानिजोमेनॉन फ्लोस–एक्वा, नोस्टॉक, एनाबिना आदि का प्रयोग भोजन तथा पूरक आहार रूप में किया जाता है। स्पाइरुलिना (आर्थोस्पाइरा सहित) एक प्रसिद्ध तंतुरूपी नीलहरित शैवाल/सायनोबैक्टीरियम है, यह प्रोटीन, विटामिन और खनिजों का एक समृद्ध स्रोत है और इसे भी टैबलेट और पाउडर के रूप में इसका उपयोग पोषण पूरक आहार के रूप में किया जाता है[12]।

3.5 **जैव उर्वरकों के रूप में–** नीलहरित शैवाल कई प्रजातियां शक्तिशाली जैव उरर्वरक के रूप में प्रयोग की जाती हैं। नोस्टॉक पौधों के साथ सहजीवी संबंध बनाता है और पौधों में नाइट्रोजन की कमी को नियंत्रित करने में सहायता करता है। एनाबीना की विभिन्न प्रजातियाँ वायुमंडलीय नाइट्रोजन का स्थिरीकरण करके मृदा उर्वरता में योगदान करती हैं। औलोसिरा फर्टिलिसिमा, कैलोथ्रिक्स प्रजाति, टॉलिपोथ्रिक्स प्रजाति, और साइटोनेमा प्रजाति, ये कुशल नाइट्रोजन–स्थिरीकरण साइनोबैक्टीरिया हैं जिनका उपयोग मृदा की गुणवत्ता में सुधार के लिए जैव उर्वरकों के रूप में किया जा सकता है[10]।

3.5 **पारिस्थितिकी तंत्र के संरक्षण और जैवभार के लिए–** प्रोक्लोरोकोकस और सिनेकोकोकस ये समुद्री साइनोबैक्टीरिया पृथ्वी पर सबसे अधिक मात्रा में पाए जाने वाले प्रकाश संश्लेषक जीव हैं, जो हमारे वातावरण के लिये ऑक्सीजन का एक महत्वपूर्ण भाग उत्पन्न करते हैं और प्राथमिक उत्पादक के रूप में महत्वपूर्ण योगदान देते हैं। ट्राइकोडेसमियम एक तंतुमय समुद्री साइनोबैक्टीरियम जो महासागरों में नाइट्रोजन स्थिरीकरण में महत्वपूर्ण भूमिका निभाता है।

3.6 **आनुवंशिक इंजीनियरिंग और औद्योगिक उत्पादन में प्रगति–** जैव प्रौद्योगिकी में सायनोबैक्टीरिया की अपार क्षमता ने आनुवंशिक अभियंत्रिकी के क्षेत्र में महत्वपूर्ण प्रगति को प्रेरित किया है, जिससे शोधकर्ताओं को उनकी चयापचय क्षमताओं का विश्लेषण और उपयोगिता अध्ययन में सहायता मिली है। लक्षित आनुवंशिक संशोधन (टारगेटेड जेनेटिक करेक्शन) के माध्यम से, सिनेकोसिस्टिस प्रजाति जैसे विशिष्ट उपभेदों को वांछित चयापचयों का अधिक उत्पादन करने या पूरी तरह से नए यौगिकों को संश्लेषित करने के लिए अभियंत्रित किया जा सकता है। इसमें चयापचय मार्गों से सम्बन्धित जीनों में परिर्वतनकियाजाता है, जिससे जैव ईंधन, फार्मास्यूटिकल्स या उच्च–मूल्य वाले रंगों (पिगमेंट) जैसे मूल्यवान उत्पादों की पैदावार बढ़ जाती है। अनुकूलित जैवसंश्लेषण मार्ग अनुकूलित

सायनोबैक्टीरियल कोशिकाये बनाने का मार्ग प्रशस्त करते हैं। साइनोबैक्टेरिया कोशिकाओं की प्रयोगशालाओं में कोशिका उत्पादन क्षमता को अनुकूलित करना और विभिन्न औद्योगिक अनुप्रयोगों के लिए आधार स्तर पर प्रसंस्करण से जुड़ी लागतों को कम करना मुख्य ध्येय है[5]।

प्रयोगशाला में प्राप्त सफलताओं को व्यावसायिक वास्तविकताओं में बदलने के लिए, जैव प्रसंस्करण कम्पनियाँ सक्रिय रूप से उन्नत खेती की तकनीकों का विकास कर रही हैं। प्रमुख चुनौतियों में लागत–प्रभावी मापदंड प्राप्त करना और चयापचयी घटकों (मेटाबोलाइट) के निष्कर्षण की दक्षता को अधिकतम करना आवश्यक है। जैव संयन्त्रक / बायोरिएक्टर डिजाइन में नवाचार, जैसे कि संलग्न प्रकाश जैव संयन्त्रक / फोटोबायोरिएक्टर, का उद्देश्य नियंत्रित वातावरण प्रदान करना है जो प्रकाश प्रवेश, कार्बन डाइ आक्साइड आपूर्ति और पोषक तत्व वितरण को अनुकूलित करता है, जिससे पारंपरिक खुले तालाब प्रणालियों की तुलना में उच्च जैवभार / बायोमास उत्पादकता प्राप्त होती है। ये तकनीकी प्रगति औद्योगिक पैमाने पर सायनोबैक्टीरियल उत्पादन में आने वाली आर्थिक बाधाओं को दूर करने और प्रतिस्पर्धी बाजारों में सायनोबैक्टीरिया–व्युत्पन्न उत्पादों की व्यवहार्यता सुनिश्चित करने के लिए महत्वपूर्ण हैं[5]।

एक उन्नत प्रकाश जैव संयन्त्रक / फोटोबायोरिएक्टर और सक्रिय द्रव प्रणालियों में सायनोबैक्टीरियाका एकीकरण उनकी वृद्धि स्थितियों को नियंत्रित और अनुकूलित करने में एक बड़ी उपलब्धि का प्रतिनिधित्व करता है। ये प्रणालियाँ पर्यावरणीय मापदंडों के सटीक नियमन, संदूषण के व्यवधानों को न्यूनतम करने और विकास दर एवं लक्षित उत्पाद संचयन को अधिकतम करने की प्रक्रियामें सहायता देती हैं[2,12]। ऐसे नियंत्रित वातावरण न केवल जैव ईंधन उत्पादकता में सुधार करते हैं, वरन संसाधन उपयोग को भी बढ़ाते हैं, जिससे समग्र उत्पादन प्रक्रिया कोकम खर्चीला व अधिक दीर्धकालिक बनाया जा सकता है। जैसे–जैसे सायनोबैक्टीरिया के जटिल जीव विज्ञान पर शोध जारी है और इंजीनियरिंग तकनीकें अधिक परिष्कृत होती जा रही हैं, उनका औद्योगिक दोहन एक उभरती हुई जैव–अर्थव्यवस्था की आधारशिला बनने के लिए तैयार है, जो विविध क्षेत्रों में स्थायी समाधान प्रदान करेगी।

4. **निष्कर्ष और भविष्य के दृष्टिकोण–** पृथ्वी पर प्रकाश संश्लेषण के प्राचीनतम अग्रदूत, नीलहरित शैवाल / सायनोबैक्टीरिया, अपनी विकासवादी नम्यता और अद्भुत अनुकूलन क्षमता के अतुलनीय प्रमाण के रूप में स्थापित हैं। यह व्यापक समीक्षा उनकी बहुमुखी उपयोगिता को रेखांकित करती है और उन्हें मानवता की कुछ सबसे गंभीर चुनौतियों का समाधान करने के लिए एक असाधारण बहुमुखी और स्थायी संसाधन के रूप में स्थापित करती है। हमारे ग्रह को ऑक्सीजन प्रदान करने और वैश्विक पोषक चक्रों से लेकर पर्यावरण प्रबंधन, सतत् कृषि, उन्नत औषधियों और नवीकरणीय ऊर्जा में उनके आधुनिक अनुप्रयोगों तक, सायनोबैक्टीरिया पारिस्थितिक महत्व और जैव–प्रौद्योगिकीय संभावनाओं का एक अनूठा मिश्रण प्रस्तुत करते हैं। नाइट्रोजन को स्थिर करने, विविध प्रकार के जैवसक्रिय उपापचयजों / मेटाबोलाइट्स का उत्पादन करने और सूर्य के प्रकाश को कुशलतापूर्वक जैवभार / बायोमास में परिवर्तित करने की उनकी अद्भुत क्षमता उन्हें बहुमूल्य बनाती है।

सायनोबैक्टीरिया का अध्ययन और उनका उपयोग करने की दिशा में हुई उल्लेखनीय प्रगति के बावजूद, वर्तमान सीमाओं को पार करने और उनकी विशाल क्षमता को पूरी तरह से साकार करने के लिए निरंतर अंतःविषय अनुसंधान और तकनीकी नवाचार आवश्यक हैं। वृहद स्तर पर कृषि प्रणालियों को अनुकूलित करने, उपापचयज / मेटाबोलाइट निष्कर्षण दक्षताओं को बढ़ाने और सशक्त आनुवंशिक अभियांत्रिकीय रणनीतियों को विकसित करने जैसी चुनौतियों के लिए निरंतर निवेश और सहयोगात्मक प्रयासों की आवश्यकता होती है। इसके अतिरिक्त हानिकारक शैवाल प्रस्फुटन से संबंधित पर्यावरणीय चिंताओं का समाधान करना एक महत्वपूर्ण क्षेत्र बना हुआ है, जिससे जल गुणवत्ता और जन स्वास्थ्य की सुरक्षा के लिए उन्नत निगरानी, पूर्वानुमान और शमन तकनीकों की आवश्यकता है। भविष्य में, एक स्थायी भविष्य के लिए नीलहरित शैवालों / सायनोबैक्टीरिया का पूर्ण लाभ उठाने में पर्यावरण के अनुकूल प्रथाओं और नैतिक आनुवंशिक प्रगति पर विशेष बल देना होगा। इन विशिष्ट सूक्ष्मजीवों को वृत्तीय अर्थव्यवस्था मॉडल में एकीकृत करने से, जहाँ अपशिष्ट उत्पादों का न्यूनतम और संसाधनों का अधिकतम उपयोग किया जाता है, उनके पर्यावरणीय लाभों में और वृद्धि होगी। अपनी जैविक क्षमता का रणनीतिक उपयोग करके, सायनोबैक्टीरिया खाद्य सुरक्षा, जैव ईंधन, जैविक खाद, पोषण, कार्बन शमन, जलवायु परिवर्तन शमन और नवीन स्वास्थ्य समाधानों की खोज से संबंधित वैश्विक चुनौतियों का समाधान करने में प्रमुख भूमिका निभाने के लिए तैयार हैं। प्राचीन जीवन रूपों से लेकर आधुनिक जैव–प्रौद्योगिकी महाशक्तियों तक की उनकी यात्रा निरंतर प्रेरणा देती है और एक स्वस्थ, अधिक टिकाऊ ग्रह की ओर ठोस मार्ग प्रदान करती है।

References

1. Mulkidjanian, A. Y., et al., (2006), "The cyanobacterial genome core and the origin of photosynthesis." Proc Natl Acad Sci U S A. 2006 Aug 29; 103(35):13126-31. doi: 10.1073/pnas.0605709103. Epub 2006 Aug 21.
2. Mehdizadeh Alaf M et al., (2022). "Cyanobacteria: Model Microorganisms and Beyond"., Microorganisms, Mar 24;10(4):696, doi:10.3390/ Microorganisms10040696, https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9025173
3. Castenholz, R. W., & Waterbury, J. B. (1989). "Group 1. Cyanobacteria". Preface. In: Bergey's Manual of Systematic Bacteriology. (Eds) Vol. 3, pp. 1710

4. Mur, L. R., Skulberg, O. M., & Utkilen, H. (1999). "Cyanobacteria in the environment." Water Boards California. https://www.waterboards.ca.gov/waterrights/water_issues/programs/bay_delta/california_waterfix/exhibits/docs/dwr/dwr-731.pdf
5. Guihéneuf, F., et al. (2016). "Cyanobacteria and algae as sources of metabolites for biotechnology." https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5403934
6. Rachana Singh, et al (2017), "Uncovering Potential Applications of Cyanobacteria and Algal Metabolites in Biology, Agriculture and Medicine: Current Status and Future Prospects", Microbiol, Sec. Food Microbiology, Volume 8 - 2017 | https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.00515
7. Chorus, I., & Bartram, J. (Eds.). (1999), "Toxic Cyanobacteria in Water: A Guide to Their Public Health Consequences, Monitoring and Management." World Health Organization.
8. Volka, K., & Furkert, D. P. (2006). "Antialgal, Antibacterial, Antifungal activity of two metabolites produced and excreted by cyanobacteria during growth", Microbiological Research, 161(2):180-6
9. Gupta, Pratibha. 2010. "Algae - A beam of light in drug resistant tuberculosis." *Vanaspati Vani* 19: 83 – 86.
10. Kumar, A., et al. (2019). "Environmental impacts of synthetic fertilizers and the role of cyanobacteria-based biostimulants." ScienceDirect.com
11. Angela Sanchez, et al. (2023), "Overview of microalgae and cyanobacteria - based bio stimulants produced from wastewater and CO_2 streams towards sustainable agriculture – A review". Microbiological Research, 277: 127505 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0944501323002070
12. Gupta, Pratibha2018. "Occurrence of *Nostoc* Vaucher ex Bornet & Flahault in Water Bodies of Maldah District, West Bengal." *Anusandhan* 6(1): 40 – 46.