



पर्यावरणको वैज्ञानिक विश्लेषणका विधिहरू र नेपालको अनुभव

डा. हिमलाल श्रेष्ठ

hlshrestha@gmail.com

लेखसार

यस लेखमा पर्यावरणीय समस्याहरूमाथि गरिएको वैज्ञानिक विश्लेषण प्रस्तुत गरिएको छ। यसमा विश्वलगायत नेपालजस्ता मुलुकहरूले भोग्दै आएको पर्यावरणीय समस्या, जलवायु परिवर्तनसम्बन्धी समस्याहरूको लेखाजोखा र निचोड प्रस्तुत गरिएको छ। मानव समुदाय अर्भ भनौं सीमान्तीकृत समुदाय र सीमान्त विकासको सूचकाङ्कमा परेका राष्ट्रहरूले भोग्दै आएका विभिन्न वातावरणीय क्षेत्र र त्यसले मानवीय, सामाजिक, आर्थिक, सांस्कृतिक तथा भौतिक अवस्थामा पारेका प्रभावहरू र त्यसको वैज्ञानिक आधारहरूको मिहिन विश्लेषण गर्ने प्रयास गरिएको छ। अर्भ सूक्ष्मतम् रूपमा भन्नुपर्दा पर्यावरणीय समस्यामा नेपालको सन्दर्भ, विद्यमान चुनौतीहरू र भविष्यको दिशाबारे विस्तृत चर्चा गरिएको छ। वैज्ञानिक विश्लेषणले वातावरणीय समस्याहरूको पहिचान, कारणहरूको खोजी, प्रभावहरूको मूल्याङ्कन र समाधानका उपायहरू विकास गर्न वस्तुनिष्ठ र प्रमाणमा आधारित धारणाहरू विकास गर्ने मार्ग प्रशस्त गर्छ। अवलोकन, प्रयोगात्मक अध्ययन, नमुना सङ्कलन र प्रयोगशाला विश्लेषण, गणितीय मोडेलिङ, भौगोलिक सूचना प्रणाली (GIS) र दूर संवेदन (Remote Sensing) जस्ता विधिहरू प्रयोग गरेर वायुमण्डल, जलभण्डार, भूमि र जैविक मण्डलको विस्तृत अध्ययन गर्ने गरिन्छ। मानवीय गतिविधिहरूले उत्पन्न गराएको जलवायु परिवर्तन, प्रदूषण, जैविक विविधताको ह्रासजस्ता समस्याहरूको गहिराइमा पुग्न र तिनको न्यूनीकरणका लागि वैज्ञानिक विश्लेषण

अपरिहार्य छ। नेपालजस्तो भौगोलिक र जैविक विविधताले भरिपूर्ण भए पनि वातावरणीय रूपमा संवेदनशील मुलुकका लागि यसको अर्भ धेरै महत्त्व रहेको छ। यद्यपि तथ्याङ्कको अर्भाव, स्रोतसाधनको कमी, भौगोलिक, आर्थिक अनि राजनीतिक जटिलता र अन्तर्विषयक समन्वयको अर्भावजस्ता चुनौतीहरू विद्यमान छन्। यी चुनौतीहरूलाई सम्बोधन गर्दै उन्नत प्रविधि र एकीकृत दृष्टिकोण अपनाएर दिगो भविष्य सुनिश्चित गर्न पर्यावरणीय पक्षको वैज्ञानिक विश्लेषण अपरिहार्य छ।

शब्दकुञ्जी

जलवायु परिवर्तन, प्रदूषण, पर्या-साहित्य, जैविक विविधता, भौगोलिक सूचना प्रणाली

विषय प्रवेश

पर्यावरण भन्नाले हाम्रो वरपर रहेका वनस्पति, जीवजन्तु तथा सूक्ष्मजीवलगायत सम्पूर्ण जैविक पक्ष र हावा, पानी, चट्टान, सूर्यको प्रकाशजस्ता अजैविक तत्त्वहरू र तिनीहरूको एकापसको जटिलतम अन्तर्सम्बन्धको समग्र प्रणाली भन्ने बुझिन्छ। यिनै जटिल तर गतिशील र अपरिहार्य अन्तर्सम्बन्धहरूले पृथ्वीमा जीवनलाई सम्भव तुल्याएको छ। यी सम्बन्धहरूमा विभिन्नता भेटिन्छ। ती सम्बन्धहरूको विविधताले गर्दा पृथ्वीमा सृजना हुने पर्यावरणीय अवस्थामा पनि विभिन्नता पाइन्छ। कुनै सम्बन्धले अनुकूल पर्यावरणीय प्रणालीको त कुनै सम्बन्धले प्रतिकूल

प्रणालीको अवस्था सृजना गर्छ। मानव समाजको अस्तित्व र विकास पूर्णतया स्वस्थ पर्यावरणमा निर्भर रहन्छ। तर बढ्दो जनसङ्ख्या, औद्योगिकीकरण, सहरीकरण तथा उपभोगवादी जीवनशैलीका कारण प्राकृतिक स्रोतहरूको अत्यधिक दोहन र वातावरणीय प्रदूषणले गर्दा हाम्रो पर्यावरण गम्भीर सङ्कटमा पर्दै गएको छ। जलवायु परिवर्तन, जैविक विविधताको ह्रास, वायु, जल र भूमिप्रदूषण, मरुभूमीकरण जस्ता समस्याहरू विश्वव्यापी रूपमा देखा परेका छन्, जसले मानव विकासमा नकारात्मक प्रभाव पारेको छ।

यस्ता जटिल वातावरणीय समस्याहरू यथार्थमा बुझ्न, तिनका कारणहरूको निक्कै गर्नु, प्रभावहरूको मूल्याङ्कन गर्न तथा प्रभावकारी समाधानका उपायहरू खोज्न अर्थात् यसको विकास गर्नका लागि भावनात्मक र सतही दृष्टिकोण पर्याप्त हुँदैन र साधारण तौरतरिका उपयुक्त हुँदैन। यसका लागि गहन र सूक्ष्म विश्लेषण आवश्यक हुन्छ। तसर्थ यसका लागि वस्तुपरक, तथ्यमा आधारित र सुव्यवस्थित अध्ययन आवश्यक छ। यसैलाई 'पर्यावरणको वैज्ञानिक विश्लेषण' को औचित्य देखिन्छ। वैज्ञानिक विश्लेषणले परिकल्पना निर्माण, तथ्याङ्क सङ्कलन, परीक्षण, व्याख्या र निष्कर्ष निकाल्ने व्यवस्थित प्रक्रिया अपनाउँछ। यसले पर्यावरणका विभिन्न घटकहरूले कसरी अन्तर्क्रिया गर्छन्, मानवीय गतिविधिले तिनीहरूलाई कसरी असर गर्छ र ती असरहरूलाई कसरी न्यूनीकरण वा व्यवस्थापन गर्न सकिन्छ भन्नेबारे गहिरो ज्ञान प्रदान गर्दछ अर्थात् पर्यावरणका विविध पक्षहरूलाई तथ्य, कारण र प्रभावको कसीमा हेर्दछ; त्यसैले यो वैज्ञानिक विश्लेषण हो। यो लेख यिनै पर्यावरणका पक्षहरूको वैज्ञानिक विश्लेषणका विभिन्न पक्षहरूमा केन्द्रित छ। यसमा विश्लेषणका प्रमुख विधिहरू, वायुमण्डल, मौसमजन्य भौगोलिक र जैविक-मण्डलजस्ता प्रमुख वातावरणीय क्षेत्रहरूको विश्लेषण कसरी गरिन्छ; मानवीय गतिविधिहरूको प्रभाव, नेपालको विशिष्ट सन्दर्भ, यस क्षेत्रका चुनौतीहरू र भविष्यका सम्भावनाहरूबारे विस्तृत रूपमा चर्चा गरिएको छ। यो लेखको उद्देश्य पाठकहरूलाई पर्यावरणको वैज्ञानिक विश्लेषणको महत्त्व र प्रक्रियाबारे जानकारी गराउनु र

वातावरणीय दिगोपनाका लागि यसको अपरिहार्यतालाई उजागर गर्नु हो। यसका साथै लेखमा वैज्ञानिक अध्ययनमा नेपालको अनुभवसमेतमा प्रकाश पारिएको छ।

अध्ययनविधि

यो अध्ययनका लागि पर्यावरणले भेल्लै आएको ह्रासोन्मुख अवस्था, जलवायु परिवर्तन र त्यसले मानव जीवनमा पारेको प्रभावहरूमा आधारित रहेर विभिन्न कालखण्डमा प्रकाशित भएका विज्ञसमीक्षित (peer-reviewed) जर्नल, पुस्तक, प्रतिवेदन र अन्य विद्वानहरूका लेख/आलेखहरूको गहन र तुलनात्मक विश्लेषण गरिएको छ। यसअन्तर्गत पर्यावरणसँग सम्बन्धित सैद्धान्तिक र अवधारणागत स्पष्टताका लागि सामग्रीहरूको समीक्षा गरी लेख तयार गरिएको छ।

मानव विकास र पर्यावरणीय सोचको दार्शनिक पक्ष

मानव विकासमा पर्यावरणीय सोचले मानव र प्रकृतिबिचको सम्बन्धको पुनर्मूल्याङ्कन गर्न महत्त्वपूर्ण आधार प्रदान गर्दछ। परम्परागत विकासका मोडेलहरू प्रायः मानवकेन्द्रित (Anthropocentric) हुन्छन्, जसले प्रकृतिलाई मानवीय आवश्यकता पूर्ति गर्ने साधनका रूपमा मात्र हेर्छन्। यसका विपरीत पर्यावरणीय दर्शनले प्रकृतिको अन्तरनिहित मूल्य (Intrinsic value) स्वीकार गर्दै जीवकेन्द्रित (Biocentric) वा पारिस्थितिक केन्द्रित (Ecocentric) दृष्टिकोण अधि सार्दछ। यसले मानवलाई प्रकृतिको एक अभिन्न अङ्गका रूपमा स्वीकार्दै भावी पुस्ताको अधिकार (Intergenerational equity), सम्पूर्ण जीवजन्तु र पारिस्थितिक प्रणालीको नैतिक महत्त्वलाई जोड दिन्छ। यसर्थ पर्यावरणीय सोचले विकासलाई आर्थिक वृद्धिमा मात्र सीमित नराखी वातावरणीय दिगोपना, सामाजिक न्याय र प्राणीहरूको कल्याणलाई समेट्ने बृहत्तर र नैतिक दृष्टिकोण प्रस्तुत गर्छ; जसबाट मानव विकास प्रकृतिसँगको सामञ्जस्यता र सहअस्तित्वमा आधारित हुन सकोस् (Upreti, 2023 p. 310)।

पर्यावरण विज्ञान र यसको दायरा

वातावरण विज्ञान (Environmental Science) एक बहुआयामिक र अन्तर्विषयक (Interdisciplinary) क्षेत्र हो, जसले पर्यावरणका भौतिक, रासायनिक तथा जैविक प्रक्रियासँगै वातावरणीय समस्याहरूमा मानवीय प्रभावको अध्ययन गर्छ। यसले विभिन्न परम्परागत विज्ञानका जीव विज्ञानको पारिस्थितिक प्रणाली (Ecology), रसायनशास्त्र, भौतिकशास्त्र, भूगर्भशास्त्र, मौसम विज्ञान, वायुमण्डल विज्ञान, समुद्र विज्ञान, माटो विज्ञान, गणित र तथ्याङ्कशास्त्र आदि शाखाहरूको ज्ञान र विधिहरूलाई एकीकृत गर्दछ। यसका साथै सामाजिक विज्ञानका विषयहरूमा भूगोल, अर्थशास्त्र, समाजशास्त्र, राजनीतिशास्त्र र नीति विज्ञानसँग पनि यसको गहिरो सम्बन्ध रहेको हुन्छ तथा वातावरणीय समस्याहरूका सामाजिक, आर्थिक र राजनीतिक आयामहरू हुन्छन् र तिनीहरूको समाधानका लागि यावत पक्षहरूमा पनि विचार गर्नुपर्ने हुन्छ। पर्यावरण विज्ञानको दायरा धेरै फराकिलो छ। पारिस्थितिकीय प्रणालीको अध्ययन, जसमा जीवहरू र तिनीहरूको वातावरणबिचको अन्तर्सम्बन्ध, ऊर्जा प्रवाह (Energy Flow), पोषक तत्वहरूको चक्र (Nutrient cycle), जैविक विविधता (Biodiversity), जनसङ्ख्याको गतिशीलता (Population dynamics) आदिको अध्ययन संलग्न हुन्छ।

यस अवधारणाअन्तर्गत वातावरणमा रासायनिक पदार्थहरूको स्रोत, वितरण, प्रतिक्रिया, परिवहन, प्रभावहरू, वायु, जल, स्थल, ध्वनि, विकिरण, प्लास्टिक प्रदूषणका स्रोत, प्रभाव र नियन्त्रणका उपायहरूको अध्ययन पर्दछ। यसमा मौसम र जलवायु प्रणाली, हरितगृह ग्यासहरू, ओजोन तह आदिको अध्ययन, पानीको चक्र, सतह र भूमिगत पानीको गुणस्तर र मात्रा, जल प्रदूषण, जलस्रोतको दिगो उपयोगजस्ता विषय पर्दछ। पृथ्वीको सतह, चट्टान, खनिज, माटोको निर्माण, गुण, क्षयीकरण, भूमिमा हुने खतराहरूमा पहिरो, भूकम्प, बाढी, हिमताल फुट्ने आदि भौगर्भिक र माटो विज्ञानको अध्ययन यसैमा पर्छ। जैविक विविधता र संरक्षणअन्तर्गत प्रजातिहरूको विविधता, आनुवंशिक विविधता, पारिस्थितिकीय विविधताको महत्त्व, लोप हुने खतरा र संरक्षणका रणनीतिहरूका साथै

प्राकृतिक स्रोत व्यवस्थापन, जसले वन, जल, खनिज, ऊर्जाजस्ता स्रोतहरूको दिगो उपयोग र व्यवस्थापन गर्छ। आर्थिक विकास, सामाजिक समानता र वातावरणीय संरक्षणबिच सन्तुलन कायम गर्ने दिगो विकासको अवधारणा र वातावरणीय संरक्षणका लागि तय गरिएका नियम, कानूनहरूको निर्माण, कार्यन्वयन तथा त्यसको मूल्याङ्कन यस विषयअन्तर्गत पर्दछ।

यस क्षेत्रमा हाल जल्दोबल्दो र चर्चामा रहेको पक्ष पर्यावरणीय साहित्य हो। यसमा वातावरणीय विषयलाई लिएर तयार गरिने सृजनात्मक, सन्देशमुलक र आम जन-समुदायमा जागरुकता ल्याउने खालका लेख रचनालगायत साहित्यका विविध विधाहरू पर्दछन्। जलवायु परिवर्तन, त्यसले पर्यावरणमा पारेको असर तथा चुनौती, मानवीय क्रियाकलापले वातावरणमा पारेको असर, प्रकृतिको वर्णन, वातावरण र विकासबिचको सन्तुलन, प्राकृतिक स्रोतहरूको अत्यधिक दोहनलाई विषयवस्तु बनाएर आमजनमानसले बुझ्ने भाषामा पर्यावरणको वैज्ञानिक पक्ष र त्यसको पक्षधरता उजागर गर्ने विषय पर्यावरणीय साहित्य (Eco-Literature) को सत्प्रयासभिन्न पर्दछ (भट्टराई र हितान, २०८० पृ. १३-४६)।

वैज्ञानिक विश्लेषणका विधिहरू

पर्यावरणको वैज्ञानिक विश्लेषणका लागि विभिन्न विधि र उपकरणहरू प्रयोग गरिन्छ। अध्ययनको प्रकृति, उद्देश्य र उपलब्ध स्रोतसाधनका आधारमा उपयुक्त विधि छनोट गरिन्छ। तिनीहरूमध्ये प्रमुख विधिहरू यसप्रकार छन्-

अवलोकन र अनुगमन

यो आधारभूत विधि हो। यसमा वातावरणीय सूचकाङ्कहरूमध्ये मौसमका तत्वहरू, नदीको बहाव, वनस्पति, वन्यजन्तु, भूउपयोग र प्रक्रियाहरूलाई प्रत्यक्ष वा अप्रत्यक्ष रूपमा व्यवस्थित तरिकाले निरन्तर हेर्ने, नाप्ने र रेकर्ड गर्ने कार्य पर्दछन्। भौगोलिक अध्ययन (Field studies) अन्तर्गत अध्ययन क्षेत्रमा गएर नमुना सङ्कलन गर्ने, जीवजन्तु र वनस्पतिको गणना गर्ने, माटो वा पानीको

परीक्षण गर्ने जस्ता कार्य गर्छन्। यस अन्तर्गत विविध पक्षको प्राथमिक तथ्याङ्क प्रत्यक्ष सङ्कलन गरिन्छ। यसै अन्तर्गत कुनै निश्चित स्थान वा क्षेत्रमा वातावरणीय मापदण्डहरू (जस्तै- वायुको गुणस्तर, पानीको गुणस्तर, जैविक विविधता) को नियमित रूपमा लामो समयसम्म मापन र विश्लेषण गर्न अनुगमन (Monitoring) गरिन्छ। यसका लागि स्वचालित सेन्सर नेटवर्कहरू र डेटा लगरहरूको प्रयोग बढ्दो छ। यसले समयसँगै हुने परिवर्तन र प्रवृत्ति बुझ्न मद्दत गर्दछ।

प्रयोगात्मक अध्ययन

यो विधिमा अध्ययन कर्ताले नियन्त्रित अवस्थामा प्रणालीभित्रका केही पक्षहरू परिवर्तन गरेर त्यसको प्रभावकारिताको अनुसन्धान गर्छ। यसले कारण र प्रभावका बिचको सम्बन्ध स्थापित गर्न मद्दत गर्छ। यसका विभिन्न रूपहरू हुन्छन्। जस्तै- प्रयोगशाला प्रयोग (Laboratory Experiments) जसमा प्रयोगशालाभित्र सानो स्तरमा नियन्त्रित वातावरण सृजना गरी अध्ययन गरिन्छ। फिल्डको प्रयोग (Field Experiments) प्राकृतिक वा अर्धप्राकृतिक वातावरणमा प्रयोग गरिन्छ। जस्तै- फरकफरक मल प्रयोग गर्दा माटोको उर्वराशक्ति र पानीको गुणस्तरमा पर्ने असरको अध्ययन। वातावरणका विभिन्न माध्यमहरू (हावा, पानी, माटो, जैविक नमुना) बाट प्रतिनिधिमूलक नमुनाहरू (Samples) व्यवस्थित तरिकाले सङ्कलन गरिन्छ। ती सङ्कलित नमुनाहरू प्रयोगशालामा लगेर विभिन्न भौतिक, रासायनिक र जैविक मापदण्डको विश्लेषण गरिन्छ। जस्तै- पानीको अम्लियपन, घुलित अक्सिजन, पोषक तत्व (नाइट्रोजन, फस्फोरस), भारी धातु, कीटनाशक विषादी, जीवाणु आदिको विश्लेषण, माटोको बनावट, माटोको अम्लियपन (pH), जैविक पदार्थ, पोषक तत्वको विश्लेषण, हावामा धुलोका कण ($PM_{2.5}$, PM_{10}), SO_2 , NOX, CO, O_3 जस्ता प्रदूषकहरूको विश्लेषण। यसका लागि स्पेक्ट्रोफोटोमिटर, क्रोमाटोग्राफी, मास स्पेक्ट्रोमिटर, माइक्रोस्कोपी जस्ता विभिन्न उपकरण र प्रविधि प्रयोग हुन्छन्।

गणितीय मोडेलिङ र सिमुलेशन

पर्यावरणीय प्रणालीहरू अत्यन्तै जटिल हुन्छन्।

गणितीय मोडेलहरूले यी प्रणालीहरूको सरलीकृत प्रतिनिधित्व गर्छन्, जसले वातावरणीय प्रक्रियाहरू बुझ्न र भविष्यको भविष्यवाणी गर्न समेत मद्दत गर्दछ। कम्प्युटर सिमुलेशनको प्रयोग गरेर विभिन्न परिदृश्य (Scenarios) को विश्लेषण गर्न सकिन्छ (जस्तै- हरितगृह ग्यास उत्सर्जनको विभिन्न दरले भविष्यको जलवायुमा कस्तो असर पार्ला भनेर मोडेलिङ गर्ने)। जलवायु मोडेल, जलप्रदूषण मोडेल, जनसङ्ख्या वृद्धि मोडेल, पारिस्थितिकीय मोडेल आदि यसका उदाहरण हुन्। वास्तविक तथ्याङ्कसँग तुलना गरेर मोडेलहरू परिमार्जन गरिन्छ।

भौगोलिक सूचना प्रणाली र दूर संवेदन

दूर संवेदन (Remote Sensing)- यो स्याटेलाइट अथवा हवाईजहाजमा राखिएका सेन्सरहरू प्रयोग गरेर पृथ्वीको सतहको जानकारी टाढैबाट प्राप्त गर्ने प्रविधि हो। यसले वन विनाश, सहरी फैलावट, कृषिभूमिको अवस्था, हिमनदीहरूको पग्लने प्रवृत्ति, पानीको सतह, खडेरी आदि बृहत् क्षेत्रमा अनुगमन गर्न सम्भव तुल्याउँछ।

भौगोलिक सूचना प्रणाली (GIS)- यो कम्प्युटरमा आधारित प्रणाली हो, जसले भौगोलिक (स्थानसम्बन्धी) तथ्याङ्कहरू सङ्कलन, भण्डारण, विश्लेषण, व्यवस्थापन र प्रदर्शन गर्छ। Remote Sensing बाट प्राप्त तथ्याङ्क र अरू स्रोतहरू (जस्तै- फिल्ड सर्भे, प्राप्त नक्सा) मा उपलब्ध तथ्याङ्कलाई GIS मा एकीकृत गरेर स्थानिक विश्लेषण (Spatial analysis) गरिन्छ। यसले वातावरणीय समस्याहरूको भौगोलिक वितरण, ढाँचा र सम्बन्ध बुझ्न मद्दत गर्छ (जस्तै- प्रदूषणको हटस्पट पहिचान, पहिरो जोखिम क्षेत्र नक्साङ्कन, वन्यजन्तु करिडोर विश्लेषण) (Lillesand, Kiefer and Chipman, 2015 p15-25)।

तथ्याङ्कशास्त्रीय विश्लेषण

सङ्कलित वातावरणीय तथ्याङ्कहरूलाई अर्थपूर्ण बनाउन तथ्याङ्कशास्त्रीय विधिको प्रयोग अनिवार्य हुन्छ।

यसले तथ्याङ्कको संश्लेषण, प्रवृत्तिको विश्लेषण (Trend analysis), सम्बन्धहरूको पहिचान (Correlation), परिकल्पनाको परीक्षण (Hypothesis testing) र निष्कर्ष निकाल्न मद्दत गर्छ। यसमा विभिन्न तथ्याङ्कशास्त्रसम्बन्धी विश्लेषणका तौरतरिकाहरू अवलम्बन र प्रयोग गरिन्छ। यी विधिहरू प्रायः एकलै प्रयोग नगरेर एकअर्काको परिपूरकका रूपमा प्रयोग गरिन्छन्, जसले गर्दा विश्लेषण थप विश्वसनीय र बृहत् हुन्छ।

पर्यावरणीय विश्लेषणका क्षेत्रहरू

वर्यावरणीय विश्लेषणका क्षेत्रहरू तल उल्लेख गरिएअनुसार रहेका छन्-

वायुमण्डल

जलवायु परिवर्तन- हरितगृह ग्यासहरू (CO_2 , CH_4 , N_2O) को उत्सर्जनको अनुगमन, वायुमण्डलमा तिनको सघनता मापन, तापक्रम वृद्धि, वर्षाको ढाँचामा परिवर्तन, समुद्री सतह वृद्धिजस्ता प्रभावहरूको विश्लेषण गरिन्छ। विगतको जलवायु बुझ्न आइस कोर (Ice core) र रुखका रिङ (Tree ring) को विश्लेषण गरिन्छ। भविष्यको जलवायु प्रक्षेपण गर्न जटिल जलवायु मोडेलहरू प्रयोग गरिन्छ।

वायु प्रदूषण

प्रमुख प्रदूषकहरू ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_x , CO , O_3 , VOCs) को स्रोत पहिचान, वायुमा तिनीहरूको मात्रा मापन (एयर क्वालिटी मोनिटरिङ स्टेशन, स्याटेलाइट), तिनीहरूको फैलावटको मोडेलिङ, मानव स्वास्थ्य तथा इकोसिस्टममा पर्ने प्रभावको अध्ययन गरिन्छ (IPCC, 2021 p820; WHO, 2021 p 75)।

ओजोन तह

स्ट्र्याटोस्फेरिक ओजोन तहको मोटाई अनुगमन (स्याटेलाइट, ग्राउन्ड स्टेशन), ओजोन क्षयकारी पदार्थ (CFCs) को विश्लेषण र ओजोन प्वालको अध्ययन गरिन्छ।

जलमण्डल

पानीको गुणस्तर- नदी, ताल, भूमिगत पानीको नमुना

सङ्कलन गरी भौतिक -तापक्रम, धमिलोपन), रासायनिक (pH, DO, BOD, COD, पोषक तत्त्व, भारी धातु, विषादी) र जैविक (कोलिफर्म ब्याक्टेरिया, जलियकिरा, प्लान्क्टन) मापदण्डहरूको प्रयोगशाला विश्लेषण गरिन्छ। प्रदूषणको स्रोत (घरेलु, औद्योगिक, कृषि) पहिचान गरिन्छ।

जलस्रोत- नदीको बहाव मापन, भूमिगत पानीको सतह अनुगमन, वर्षाको तथ्याङ्क विश्लेषण, जलचक्रको मोडेलिङ गरिन्छ। पानीको उपलब्धता, माग र दिगो व्यवस्थापनका लागि विश्लेषण गरिन्छ। हिमनदीहरूको पलने दर र त्यसले जलस्रोतमा पार्ने प्रभावको अध्ययन पनि यसैअन्तर्गत पर्छ।

समुद्र विज्ञान- समुद्री तापक्रम, लवणता, अम्लीयपन (Ocean Acidification), समुद्री करेन्ट, समुद्री जैविक विविधता, कोरल रिफको स्वास्थ्य आदिको अध्ययन गरिन्छ।

स्थलमण्डल/भूमण्डल

माटोको नमुना सङ्कलन गरेर यसको बनावट (Texture), संरचना (Structure), pH, जैविक पदार्थको मात्रा, पोषक तत्त्व (N, P, K), भारी धातु, प्रदूषण आदिको विश्लेषण गरिन्छ। माटोको उर्वराशक्ति, क्षयीकरण (Soil erosion), मरुभूमीकरण र भूमिप्रदूषणको अध्ययन गरिन्छ। भूमि उपयोग र भूआवरण परिवर्तन (Land Use and Land Cover Change- LULCC) गर्नका लागि स्याटेलाइट तस्बिर र GIS को प्रयोग गरेर समयसँगै भूमिउपयोग (कृषि, वन, सहरी क्षेत्र) मा आएको परिवर्तनको नक्साङ्कन र विश्लेषण गरिन्छ। वन विनाश, सहरीकरण, कृषि विस्तारलगायतका परिवर्तनहरूको कारण र वातावरणीय प्रभावको अध्ययन गरिन्छ। पहिरो, बाढी, भूकम्प, खडेरीजस्ता प्राकृतिक प्रकोपहरूको जोखिम विश्लेषण र नक्साङ्कन गर्न भौगर्भिक अध्ययन, GIS र मोडेलिङ प्रयोग गरिन्छ।

जैविकमण्डल

कुनै क्षेत्रमा रहेका प्रजातिहरूको सङ्ख्या (Species

richness), तिनीहरूको जनसङ्ख्या (Abundance), वितरण र आनुवंशिक विविधताको अध्ययन गरिन्छ। फिल्ड सर्भे, ट्रान्जेक्ट विधि, क्यामेरा ट्र्यापिङ, DNA बारकोडिङजस्ता विधि प्रयोग हुन्छन्।

पारिस्थितिकीय प्रणाली

इकोसिस्टमको संरचना (जीवको प्रकार र सङ्ख्या), कार्य (ऊर्जा प्रवाह, पोषक तत्त्व चक्र), र सेवाहरू (पानी शुद्धीकरण, परागसेचन, कार्बन सञ्चिति) को अध्ययन गरिन्छ। मानवीय गतिविधिले इकोसिस्टममा पारेको प्रभाव (बासस्थान खण्डीकरण तथा अतिक्रमण) को मूल्याङ्कन गरिन्छ।

लोपोन्मुख प्रजातिहरूको स्थिति अध्ययन, खतराका कारकहरू पहिचान, संरक्षणका लागि आवश्यक बासस्थान (Habitat) र व्यवस्थापन रणनीतिहरूको विकास गरिन्छ। वाह्य मिचाहा प्रजाति (Invasive species) को फैलावट र नियन्त्रणको अध्ययन पनि गरिन्छ।

मानवीय प्रभाव र वातावरणीय समस्याहरू

वैज्ञानिक विश्लेषणले मानवीय गतिविधिहरू कसरी वातावरणीय समस्याहरूका प्रमुख कारक बनेका छन् भन्ने कुरा स्पष्ट पारेको छ। बढ्दो जनसङ्ख्या, औद्योगिक क्रान्ति, जीवाश्म इन्धनको धेरै प्रयोग, वन विनाश, अव्यवस्थित सहरीकरण, कृषिमा रासायनिक मल र विषादीको प्रयोग र बढ्दो उपभोगले पृथ्वीको प्राकृतिक प्रणालीमा अभूतपूर्व दबाव सृजना गरेको छ। जीवाश्म इन्धन बाल्दा उत्सर्जन हुने हरितगृह ग्यासहरू (मुख्यतः CO_2) वायुमण्डलमा जम्मा भएर पृथ्वीको औसत तापक्रम बढाएको छ। वैज्ञानिक विश्लेषण (तापक्रम रेकर्ड, आइस कोर, जलवायु मोडेल) ले यो मानवीय गतिविधिका कारण भएको पुष्टि गरेको छ। उद्योग, यातायात, कृषि र घरायसी फोहोरबाट निस्कने प्रदूषकहरूले हावा, पानी र माटो दूषित बनाएका छन्। वैज्ञानिक विश्लेषणले प्रदूषकहरूको प्रकार, मात्रा, स्रोत र तिनले मानव स्वास्थ्य तथा इकोसिस्टममा पार्ने गम्भीर असरहरू (श्वासप्रश्वाससम्बन्धीरोग, जलजन्यरोग, क्यान्सर, इकोसिस्टमको विनाश) लाई उजागर गरेको छ। प्लास्टिक

प्रदूषण अर्को विकराल समस्याका रूपमा देखा परेको छ। वन जङ्गल, पानी तथा जलस्रोत, माटो र जमिन, खनिज तथा भूगर्भजस्ता नवीकरणीय र अनवीकरणीय स्रोतहरूको अत्यधिक र अविवेकी प्रयोगले गर्दा यिनीहरूको भण्डार रित्तै गएर गुणस्तर खस्किएको छ। वैज्ञानिक विश्लेषणले स्रोतहरूको अवस्था, प्रयोगको ढाँचा र दिगो व्यवस्थापनका लागि आवश्यक जानकारी प्रदान गर्दछ।

यी समस्याहरूको पहिचान, गम्भीरताको मापन, कारणहरूको विश्लेषण र सम्भावित समाधानको मूल्याङ्कन गर्ने वैज्ञानिक विश्लेषण अपरिहार्य छ। उदाहरणका लागि वातावरणीय प्रभाव मूल्याङ्कन (Environmental Impact Assessment-EIA) कुनै परियोजना सुरु गर्नुअघि त्यसले वातावरणमा पार्न सक्ने सम्भावित नकारात्मक असरहरूको वैज्ञानिक विश्लेषण गर्ने प्रक्रिया हो। बोर्दिन र केलरले आफ्नो पुस्तकमा पृथ्वीलाई एक जिउँदो जगद्को ग्रहका रूपमा व्याख्या गर्दै यसमा आश्रित विविध प्रणालीहरूको वैज्ञानिक अध्ययन र विश्लेषणको महत्त्व बुझाउँदै दिगो विकास, जनसङ्ख्या र सहरी वातावरणप्रतिको विश्वदृष्टिकोण राख्न अत्यन्त जरुरी भएको उजागर गरेका छन् (Botkin and Keller, 2011 p. 17-18)।

पर्यावरणको वैज्ञानिक विश्लेषण र नेपाली अनुभव

नेपाल आफ्नो विशिष्ट भौगोलिक अवस्थिति, उच्च हिमाली शृङ्खला, समृद्ध जलस्रोत र अनुपम जैविक विविधताका लागि परिचित छ। तर यो देश वातावरणीय रूपमा धेरै संवेदनशील पनि छ। यहाँको वातावरणीय विश्लेषणको महत्त्व अझ बढी छ। नेपाल जलवायु परिवर्तनको उच्च जोखिममा छ। तापक्रम वृद्धि औसतभन्दा बढी छ; जसले हिमनदीहरू तीव्र गतिमा पग्लिरहेका छन्। यसले हिमताल विस्फोटन (GLOF) को जोखिम बढाएको छ र भविष्यमा पानीको स्रोतमा असर पार्ने देखिन्छ। वर्षाको ढाँचामा आएको अनियमितताले बाढी, पहिरो र खडेरीजस्ता प्रकोप बढाएको छ। स्याटेलाइट इमेजरी, मौसम तथ्याङ्क र फिल्ड अनुगमनमार्फत यी परिवर्तनहरूको वैज्ञानिक विश्लेषण भइरहेको छ।

जलस्रोतमा धनी भए पनि पानीको गुणस्तर खस्कंदो छ । काठमाडौँ उपत्यकालगायत प्रमुख सहरका नदीहरू ढल र औद्योगिक फोहोरले अत्यन्तै प्रदूषित छन् । पानीको नियमित गुणस्तर अनुगमन र प्रदूषण स्रोतहरूको वैज्ञानिक पहिचान आवश्यक छ । विशेष गरेर काठमाडौँ उपत्यका र अन्य सहरी क्षेत्रहरूमा वायु प्रदूषण (मुख्यतः $PM_{2.5}$) गम्भीर समस्या बनेको छ । सवारी साधन, ईटाभट्टा, निर्माणकार्य र फोहोर जलाउने कार्य प्रमुख स्रोत हुन् । वायु गुणस्तर मापन केन्द्रहरूबाट प्राप्त तथ्याङ्कको विश्लेषणले यसको गम्भीरता र स्वास्थ्य प्रभावबारे जानकारी दिन्छ । नेपाल जैविक विविधतामा धनी भए पनि बासस्थान विनाश, चोरी सिकारी, मानव-वन्यजन्तु द्वन्द्व जस्ता चुनौतीहरू छन् । राष्ट्रिय निकुञ्ज र संरक्षित क्षेत्रहरूमा वन्यजन्तु (बाघ, गैंडा, हात्ती) को अनुगमन, बासस्थान विश्लेषण तथा संरक्षणका योजनाहरू वैज्ञानिक तथ्याङ्कमा आधारित छन् । भिरालो भूबनोट र मनसुनी वर्षाका कारण नेपाल पहिरो र भूक्षयको उच्च जोखिममा छ । भूमिउपयोग परिवर्तन, अव्यवस्थित सडक निर्माणले यो समस्या बढाएको छ । GIS र रिमोट सेन्सिङ प्रयोग गरेर जोखिम क्षेत्र नक्साङ्कन र रोकथामका उपायहरूमा वैज्ञानिक विश्लेषण प्रयोग हुन्छ ।

नेपालमा वातावरण संरक्षण र अध्ययनका लागि विभिन्न सरकारी निकायहरू (जस्तै- वातावरण विभाग, जल र मौसम विज्ञान विभाग, वन तथा भूसंरक्षण विभाग, राष्ट्रिय निकुञ्ज र वन्यजन्तु संरक्षण विभाग), विश्वविद्यालयहरू (जस्तै- त्रिभुवन विश्वविद्यालय अन्तर्गत केन्द्रीय वातावरण विज्ञान विभाग, वन विज्ञान अध्ययन संस्थान) र गैरसरकारी सङ्घसंस्थाहरू (ICIMOD, WWF Nepal) आदिले वैज्ञानिक विश्लेषण र अनुसन्धान कार्य गरिरहेका छन् । पर्यावरणको वैज्ञानिक अध्ययनका रूपमा इसिमोडको अगुवाइमा सन् २००६ मा गरिएको अध्ययनले नेपालको तात्कालीन वन र जैविक विविधता, उर्जा, जलस्रोत, जनसङ्ख्या, भूमि तथा यसको क्षयीकरण, वातावरणीय वित्त, जलवायु परिवर्तन, सहरी वातावरण, सहरी प्रदूषण र वायु प्रदूषण, वातावरणीय द्वन्द्व, त्यसको सुशासन, व्यापार तथा वातावरणीय सूचना प्रणालीको महत्त्व माथि विस्तृत रूपमा खोतलखातल

गरेको छ (ADB/ICIMOD, २००६, पृ. ५-१०) । पछिल्ला अध्ययनहरूमा सरकारी निकायहरूले विशेष चासो दिएर जलवायु परिवर्तन र त्यसले निम्त्याउन सक्ने विविध पक्ष समेटेर वैज्ञानिक पद्धतिअनुसार विश्लेषण गरेर निचोड निकालिएको छ; जसमा नेपालका माथि उल्लेखित विभिन्न क्षेत्रमा आइपर्ने जोखिम, असर तथा त्यसको निराकरणका लागि अवलम्बन गर्न सकिने उपायहरूको विस्तृत व्याख्या गरिएको छ (FAO, 2020 p. 33; GON, 2021 p. 117) । वातावरणका प्रणालीहरू जलवायु परिवर्तन, भूउपयोगमा परिवर्तन, जलवायुजन्य विपत्ति र अनुकूलनका उच्चतम उपायहरूबिच एक प्रकारको सकारात्मक या नकारात्मक अन्तरसम्बन्ध (Nexus) :yflkt x'G5 (Bhandari, 2023, p. 54-55) । यिनै सम्बन्धहरूलाई सहज रूपमा बुझ्नका निम्ति विज्ञानमा आधारित विश्लेषणको आवश्यक पर्दछ । विकासोन्मुख राष्ट्र हुँदाहुँदै पनि नेपालले सोका लागि आफ्नो पाइला अघि बढाएको छ ।

चुनौतीहरू र भविष्यको दिशा

पर्यावरणको वैज्ञानिक विश्लेषण महत्त्वपूर्ण भए पनि यसका आफ्नै चुनौतीहरू छन् । विशेष गरी विकासशील देशहरूमा विश्वासिलो र समग्र वातावरणीय डाटाको कमी एउटा महत्त्वपूर्ण चुनौती हो । स्रोतको कमी, अपर्याप्त वित्तीय लगानी र प्राविधिक जनशक्ति, वातावरणीय अनुगमनका साथै विश्लेषणका लागि उन्नत प्रविधिहरूको प्रयोगमा बाधा पुर्‍याउन सक्छ । वातावरणीय प्रणालीहरू जटिल र गतिशील छन्, जसले कारण र प्रभावको सही रूपमा भविष्यवाणी गर्न कठिन बनाउँछ । यसैले प्रभावकारी विश्लेषणका लागि अन्तर्विभागीय समन्वय महत्त्वपूर्ण भए पनि व्यावहारिक रूपमा चुनौतीपूर्ण हुन सक्छ । नीति र कार्यान्वयनबिचको खाडल अर्को चुनौती हो । यी समस्याहरू समाधान गर्न, कृत्रिम बुद्धिमत्ता, बिग डाटा विश्लेषण, IoT मा आधारित सेन्सर नेटवर्क, ड्रोन प्रविधि र उच्च-रिजोल्युसन भूउपग्रहबाट प्राप्त हुने छवि चित्रहरू जस्ता उन्नत प्रविधिहरूको प्रयोगमा ध्यान केन्द्रित गर्न आवश्यक छ । एउटा एकीकृत दृष्टिकोण अपनाउनुपर्छ; जसले वातावरणीय समस्याहरूका सामाजिक, आर्थिक र सांस्कृतिक पक्षहरू समाहित गर्दछ । अन्ततः

नागरिक विज्ञानलाई डाटाको दायरा विस्तार गर्न र सार्वजनिक जागरूकता बढाउन प्रयोग गर्न सकिन्छ ।

निष्कर्ष

पर्यावरण हाम्रो अस्तित्वको आधार भएकाले यसको संरक्षण गर्नु हामी सबैको साझा दायित्व हो । पर्यावरणले सामना गरिरहेका जटिल र बहुआयामिक चुनौतीहरू बुझ्न तथा सम्बोधन गर्न वैज्ञानिक विश्लेषण एक अपरिहार्य औजार हो । यसले हामीलाई वस्तुनिष्ठ तथ्य, प्रमाण र गहिरो समझ प्रदान गर्दछ; जसका आधारमा वातावरणीय समस्याहरू पहिचान गर्न, कारणहरू पत्ता लगाउन, प्रभावहरूको मूल्याङ्कन गर्न र प्रभावकारी तथा दिगो समाधान विकास गर्न सकिन्छ । वैज्ञानिक विश्लेषण वातावरणीय चुनौतीहरू बुझ्न र समाधान गर्न महत्त्वपूर्ण छ । समस्याहरू पहिचान गर्न, प्रभावहरूको मूल्याङ्कन गर्न, र दिगो समाधान विकास गर्न उद्देश्यपूर्ण तथ्य र प्रमाण प्रदान

गर्दछ । अवलोकन, प्रयोग, नमुना विश्लेषण, मोडेलिङ, जीआइएस र रिमोट सेन्सिङजस्ता विभिन्न वैज्ञानिक विधिहरूले वातावरणीय घटकहरूको अध्ययन गर्न मद्दत गर्छन् । यसले जलवायु परिवर्तन, प्रदूषण र जैविक विविधतामा ह्रासजस्ता मानवजन्य गतिविधिहरूका नकारात्मक प्रभावहरू उजागर गर्न मद्दत गर्छ र न्यूनीकरणका रणनीतिहरू निर्माण गर्छ । तर डाटाको कमी, प्रणालीको जटिलता तथा नीति कार्यान्वयनमा फितलोपनाजस्ता चुनौतीहरू विद्यमान छन् । यी समस्याहरू समाधान गर्न उन्नत प्रविधि, अन्तर्विषय सहयोग, नागरिक सहभागिता, खुला डाटा नीतिहरू तथा समाधानकेन्द्रित अनुसन्धान आवश्यक छ । यसैगरी स्वस्थ वातावरण र दिगो भविष्यका लागि वैज्ञानिक ज्ञानलाई नीति निर्माण र सामाजिक व्यवहारमा रूपान्तरण गर्न आवश्यक छ । वर्तमानमा निरन्तर वैज्ञानिक अनुगमन, विश्लेषण र वातावरणीय अनुसन्धानमा लगानी गर्न अतिआवश्यक छ; जसले भविष्यका लागि सुरक्षा प्रदान गर्दछ

सन्दर्भ सामग्रीसूची

- भट्टराई, गोविन्द र हितान, विजय (२०८०). *पर्या साहित्य: सिद्धान्त र सृजना*. काठमाडौँ : सम्पूर्ण किताब ।
- ADB/ICIMOD. (2006). *Environment assessment of Nepal: emerging issues and challenges*, Kathmandu, p239, Asian Development Bank/International Centre for Integrated Mountain Development.
- Bhandari, M. (2023). *The Nexus of Climate Change and Land-use – Global Scenario with Reference to Nepal*. Denmark : River Publishers,
- Botkin, D. B., & Keller, E. A. (2011). *Environmental Science: Earth as a Living Planet* (8th ed.). Wiley.
- FAO. (2020). *Global Forest Resources Assessment 2020*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- GON. (2021). *National Adaptation Plan of Nepal*. Singhdurbar, Kathmandu Nepal, p173, Government of Nepal
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021: 'The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change'*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons.
- Upreti, G. (2023). Ecosociocentrism: The Earth First Paradigm for Sustainable Living. In *Ecosociocentrism: The Earth First Paradigm for Sustainable Living* (pp. 307-367). Cham: Springer Nature Switzerland.
- WHO. (2021). *WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*, World Health Organization <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>