पर्यावरण जांच में अनुरेखकों (ट्रेसर) का उपयोग

डॉ. गोपाल कृष्ण
राष्ट्रीय जलविज्ञान संस्थान, रुड़की

विश्व स्तर पर कई जलोढ़ जलभृत प्रणालियां सिंचाई और खाद्य उत्पादन के लिए भूजल के असंधारणीय दोहन की चुनौती का सामना कर रही हैं। उत्तर–पश्चिम भारत का अर्ध–शुष्क इलाका इसका प्रमुख उदाहरण है जो गेहूं, चावल और गन्ने की खेती के लिए एक प्रमुख क्षेत्र है। स्थानीय उथले भूजल स्रोतों के जल के उपयोग के साथ–साथ हिमालय से आने वाले जल के नहर नेटवर्क के माध्यम से पुनर्वितरण से सिंचाई द्वारा इस क्षेत्र में कृषि का निरंतर विकास संभव हो पाया है। हाल के उपग्रह आधारित अवलोकन और इनसिटू अवलोकन से पता चला है कि इस क्षेत्र में भूजल पुनर्भरण प्रक्रियाओं में उच्च स्तर की स्थानिक विविधता के कारण स्थलीय जल भंडारण (TWS) में एक महत्वपूर्ण शुद्ध हानि हुई है। इसलिए, प्रभावी जल प्रबंधन योजनाओं के विकास के लिए इस स्थानीय विविधता के कारणों को चिह्नित करना और समझना आवश्यक है। इसके लिए फ़ील्ड–आधारित उच्च रिज़ॉल्यूशन आंकड़ों की आवश्यकता होती है। पिछले कम से कम दो दशकों से इस क्षेत्र के कुछ हिस्सों में अत्यधिक तेज गति से भूमि से जल के निकाले जाने के कारण भूजल स्तर नीचे जा रहा है, लेकिन इसके विपरीत, नहर नेटवर्क के करीब कुछ क्षेत्रों में नहर प्रणाली से जल रिसाव के कारण भूजल पुनर्भरण के प्रमाण भी हैं। इंडो–गंगा बेसिन के कुछ अध्ययनों में यह पाया गया है कि गहन पंपिंग वास्तव में मानसून के बाद के पुनर्भरण को बढ़ा सकती है। जल पुनर्भरण और पुनर्वितरित सतही पुनर्भरण जल के ऋतु संबंधित स्रोतों में महत्वपूर्ण सापेक्ष स्थानिक भिन्नता, अर्थात हिमालय से पिघल कर आने वाले जल स्रोतों से प्राकृतिक जल निकासी और नहरों से जल हानि, जो कि इस क्षेत्र में भूजल संसाधनों के अति पृथक्करण के लचीलापन के आकलन करने की कुंजी है, को वर्तमान में ठीक से नहीं समझा गया है। भूजल अध्ययन और इसके उपयोगी प्रबंधन के लिए ट्रेसर का उपयोग बहुत उपयोगी हो सकता है।

परिचय

पर्यावरणीय अनुरेखकों को भूगर्भीय (पृथ्वी के लिए प्राकृतिक) या मानवजनित (मानव निर्मित) समस्थानिक, तत्वों या यौगिकों के रूप में परिभाषित किया जाता है जो पृथ्वी की निकटवर्ती सतह के वातावरण में व्यापक रूप से पाए जाते हैं, जिससे उनकी प्रचुरता में भिन्नता का उपयोग पर्यावरण प्रक्रियाओं के अनुमान लगाने में किया जा सकता है। समस्थानिक पर्यावरण अनुरेखकों की एक विशेष श्रेणी है और उन रासायनिक तत्वों के भिन्न–भिन्न रूप हैं जिनकी परमाणु संख्या समान होती है लेकिन उनके नाभिक में न्यूट्रॉन की विभिन्न संख्या के कारण उनकी द्रव्यमान संख्या में भिन्नता होती है। जल प्रवाह का एक आदर्श अनुरेखक वह है जो घुलनशील, गतिशील, अपेक्षाकृत अक्रियाशील और आसानी से मापा जाने वाला हो। हालांकि, पर्यावरण में परंपरागत ढंग से व्यवहार करने वाले ट्रेसर (अर्थात, जो उपसतह सामग्री से चिपकते नहीं हैं और न ही रासायनिक परिवर्तन से गुजरते हैं) जल स्रोतों परिवहन प्रक्रियाओं के बारे में जानकारी देते हैं, ऐसे ट्रेसर जो आसानी से रासायनिक प्रतिक्रियाओं से गुजरते हैं, उनका उपयोग जलभृतों में जल–रासायनिक स्थितियों तथा प्रतिक्रिया पथ को निर्धारित करने के लिए किया जा सकता है। कई पर्यावरणीय अनुरेखक उपसतह प्रक्रियाओं के समय के बारे में भी जानकारी प्रदान करते हैं। इनमें रेडियोधर्मी ट्रेसर शामिल हैं, जो एक ज्ञात दर से क्षय होते हैं; रेडियोजेनिक ट्रेसर, जो उपसतह में उत्पन्न और जमा होते हैं; और घटना चिह्नक, जो उपसतह में न तो उत्पादित होते हैं और न ही खपत होते हैं, लेकिन जब वे भूजल में प्रवेश करते हैं, तो उनका एक परिवर्तनशील और सुपरिचित इतिहास होता है।

इन ट्रैसरों का उपयोग भूजल की आयु का अनुमान लगाने के लिए किया जा सकता है, जिसका उपयोग भूजल वेगों को निर्धारित करने के लिए किया जा सकता है।

भूजल में पर्यावरणीय अनुरेखकों के अनुप्रयोगों में निम्नलिखित का अनुमान लगाना शामिल है:

- विभिन्न जल स्रोतों के बीच मिश्रण;
- भूजल पुनर्भरण की प्रक्रियाएं और दरें;
- भूजल प्रवाह दर;
- नदियों में भूजल का प्रवाह;
- फ्रैक्चर के माध्यम से भूजल प्रवाह;
- पुराजलवायु और पुराजलविज्ञान;
- लवणता और अन्य संदूषकों के स्रोत; और,
- भूजल मॉडल का अंशांकन।

पर्यावरणीय अनुरेखकों की व्याख्या के लिए प्रारंभिक बिंदु यह है कि परिवहन पर प्रसार और फैलाव के बजाय संवहन (भूजल की विस्तृत गति द्वारा पदार्थ का परिवहन) का प्रभुत्व है। इस धारणा का अर्थ है कि जैसे–जैसे अनुरेखक प्रवाह रेखा के साथ आगे बढ़ता है, पानी उत्तरोत्तर पुराना होता जाता है। इसका अर्थ यह भी है कि अपेक्षाकृत सजातीय जलभृत के भीतर, पानी गहराई के साथ पुराना होता जाता है। निश्चित रूप से, इस सामान्य सिद्धांत के लिए शर्तें और अपवाद हैं, लेकिन यह हमें ट्रेसर के व्यवहार के बारे में जानने के लिए एक अच्छा प्रारंभिक बिंदु प्रदान करता है

ट्रेसर के प्रकार

1. ट्रेसर जो भूजल की उम्र के बारे में जानकारी प्रदान करते हैं और जो मुख्य रूप से जल वेग और जलभृत पुनर्भरण दर निर्धारित करने के लिए उपयोग किए जाते हैं। इस समूह के ट्रैसरो में रेडियोधर्मी ट्रेसर, रेडियोजेनिक ट्रेसर और इवेंट मार्कर शामिल हैं।

2 अनुरेखक जो प्रतिक्रिया प्रक्रियाओं और परिवर्तन चरणों (जैसे, वाष्पीकरण और संघनन) के बारे में जानकारी प्रदान करते हैं। स्थिर समस्थानिक इस समूह के सबसे महत्वपूर्ण अनुरेखकों में से एक हैं।

3 ट्रेसर जिनका उपयोग जल स्रोतों और भूजल प्रवाह तथा मिश्रण की पहचान के लिए किया जाता है। ऊपर वर्णित ट्रेसरों के अलावा, ट्रेसर के इस समूह में उत्कृष्ट गैसें और आयन सांद्रता शामिल हैं।

कुछ पर्यावरणीय अनुरेखकों की चर्चा नीचे की गई है:

क्लोरो फ्लोरो कार्बन (CFCs) और सल्फर हेक्साफ्लोराइड (SF_6)

क्लोरो फ्लोरो कार्बन (सी.एफ़.सी) और सल्फर हेक्साफ्लोराइड (SF_6) भूजल निवास समय का पता लगाने के लिए महत्वपूर्ण ट्रेस गैस हैं। 1930 के दशक से वातावरण में इन गैसों के एरोसोल प्रोपेलेंट से लेकर रेफ्रिजरेंट तक के मानवजनित कार्बनिक यौगिकों के निर्माण ने लगभग 60 साल तक पुराने पानी के डेटिंग का एक उपयुक्त तरीका प्रदान किया है। हालांकि सीएफ़सी के उपयोग को सीमित करने वाले विभिन्न पर्यावरणीय नियमों के परिणामस्वरूप, वर्तमान उत्पादन अनुमान 1980 के दशक के उत्तरार्ध के चरम मानों के आधे से भी कम हैं।

सी.एफ़.सी–11($CFCl_3$), सी एफ़.सी–12(CF_2Cl_2) और सी.एफ़.सी–13 ($C_2F_3Cl_3$) का वातावरण में अपेक्षाकृत लंबा निवास समय (क्रमशः 44, 180 और 85 वर्ष) है, जहां वे तापमान के एक फलन के रूप में सतही जल के साथ संतुलन से गुजरते हैं।

सीएफ़सी और एसएफ–6 के नमूने ओस्टर (1994) की विस्थापन विधि द्वारा सीलबंद कंटेनरों में बिना फ़िल्टर किए और बिना वायुमंडलीय संपर्क के एकत्र किए जाने चाहियें। यह विधि सुनिश्चित करती है कि नमूना उसी पानी के एक सुरक्षात्मक जैकेट द्वारा संभावित वायुमंडलीय संदूषण से सुरक्षित है।

सीएफ़सी और एसएफ 6 को क्रायोजेनिक प्री–कंसंट्रेशन (IAEA, 2006) के बाद इलेक्ट्रॉन कैप्चर डिटेक्टर (GC–ECD) का उपयोग करके गैस क्रोमैटोग्राफी द्वारा मापा जाता है। पानी में सीएफ़सी सांद्रता का पता लगाने की सीमा 0.01 pmol/L है, जबकि SF6 के लिए यह 0.1 fmol/L है। सीएफ़सी और एसएफ 6 विश्लेषण दोनों को आदर्श रूप से एक वायुमंडलीय निगरानी स्टेशन पर एकत्र किए गए थोक वायु मानक में कैलिब्रेट किया जाना चाहिए, अधिमानतः AGAGE नेटवर्क (http://agage.eas.gatech.edu) में से एक।

गैसें वातावरण में अच्छी तरह मिश्रित होती हैं, इसलिए उनके इनपुट कार्य क्षेत्र–विशिष्ट नहीं होते हैं जैसा कि ट्रिटियम के मामले में होता है।हालां कि इन ट्रेस गैसों में से कोई भी एक सैद्धांतिक रूप से भूजल आयु बता सकता है, जब पानी के नमूनों पर दो या दो से अधिक मापन किये जाते हैं, तो उनमे प्रवाह के विभिन्न तरीकों, पिस्टन प्रवाह, घातीय प्रवाह और सरल अंत–सदस्य मिश्रण के बीच अंतर करने की क्षमता मौजूद होती है।

ट्रिटियम की तुलना में सीएफ़सी की कम सांद्रता का पता लगाया जा सकता है, इसलिए, आधुनिक पानी के, जहां आधुनिक और पुराने पानी का मिश्रण होता है, ये अधिक संवेदनशील संकेतक हैं। आधुनिक जल के अनुरेखक के रूप में कार्य करने के अलावा, जब मिश्रण और पर्यावरण संदूषण महत्वपूर्ण हों, तो सीएफ़सी वास्तविक पुनर्भरण आयु का पता लगा सकते हैं। सीएफ़सी डेटिंग पद्धति की संवेदनशीलता, समय के साथ वायुमंडलीय सीएफ़सी सांद्रता में परिवर्तन की दर पर निर्भर करती है, और इस प्रकार बहुत आधुनिक पानी को डेट करने की क्षमता समय के साथ–कम होती जाएगी।

सीएफ़सी और एसएफ 6 के गुणधर्म

- भूजल निवास के समय के आकलन के लिए प्रत्येक ट्रेसर की सीमाएँ हो सकती हैं, विशेष रूप से, सीएफ़सी प्रदूषण से प्रभावित हो सकते हैं, और/या अवायवीय परिस्थितियों में घटाव, और कुछ सेटिंग्स में टेरिजेनिक उत्पादन के कारण अतिरिक्त एसएफ–6 समस्या के कारण हो सकते हैं।

- ट्रेस गैस संकेतकों की व्याख्या औसत पुनर्भरण तापमान, ऊंचाई और अतिरिक्त हवा के समावेश पर विचार पर निर्भर करती है।

- रिचार्ज के दौरान शामिल 'अतिरिक्त हवा' की घटना का सीएफ़सी पर नगण्य प्रभाव पड़ता है, लेकिन एसएफ–6 पर अधिक।

- उपयोग किए जाने वाले विभिन्न मॉडल हैं: लम्प्ड पैरामीटर मॉडल (एलपीएम) आमतौर पर भूजल मिश्रण में देखी गई कुछ भिन्नताओं का वर्णन करने के लिए उपयोग किया जाता है जिसमें पिस्टन फ्लो मॉडल (पीएफएम), एक्सपोनेंशियल मिक्सिंग मॉडल (ईएमएम), आंशिक

एक्सपोनेंशियल मॉडल (पीईएम), फैलाव मॉडल (डीएम) और बाइनरी मिक्सिंग मॉडल (बीएमएम) शामिल हैं।

- कुछ उदाहरणों में यह आकलन करने के लिए अलग–अलग इनपुट फंक्शन के साथ दो ट्रेसर का उपयोग करना संभव है कि औसत निवास समय (MRT) का अनुमान लगाने के लिए किस मिश्रित मॉडल का उपयोग किया जाये उदाहरण के लिए एस.एफ.–6 एवं सी.एफ.सी.–12।

- यदि एसएफ–6 डेटा टेरिजेनिक स्रोतों से काफी दूषित पाया जाता है और भूजल डेटिंग के लिए उपयुक्त नहीं है। ऐसे में, दो उपयुक्त मिश्रिण मॉडल; पीईएम और डीएम (0.5 के फैलाव पैरामीटर के साथ) का उपयोग औसत निवास समय का अनुमान लगाने के लिए किया जा सकता है।

- उपयोग में लाये गए ये मॉडल यथार्थवादी वैचारिक मॉडल हैं जिसमें भूजल प्रवाह, अच्छी तरह से क्षेत्र विन्यास, लिथोलॉजिकल नियंत्रण तथा अच्छी तरह से स्क्रीनिंग के विचार शामिल हैं। ऐसे बोरहोलों से प्राप्त भूजल जो कि आंशिक रूप से छना हो (जहाँ स्क्रीन अनुभाग 20 मी तक हो सकते हैं) उनका विभिन्न प्रवाह पथों में भूजल युगों (आयु) के मिश्रित होने की संभावना है।

- आधुनिक ट्रेसर का उपयोग करने की एक सीमा यह है कि वे 60 वर्ष से अधिक पुराने भूजल के मिश्रण का पता लगाने में सक्षम नहीं हैं और इसलिए अनुमानित औसत आयु विभिन्न आयु के भूजल के गैर–रेखीय मिश्रण के लिए अतिसंवेदनशील होते हैं।

- मुख्य सीएफ़सी के पहले से ही वातावरण में घटने के कारण हैं, भविष्य में, नई मानवजनित ट्रेस गैसों के उनकी जगह लेने की संभावना है।

रेडॉन

रेडॉन, 3.82 दिनों की अर्ध जीवन अवधि वाली, गंधहीन, रंगहीन, स्वादहीन अक्रिय गैस है जो ^{222}Rn (रेडॉन), ^{220}Rn (थोरॉन) और ^{219}Rn (एक्टिनोन) के सर्वव्यापी रूप में मिट्टी, हवा और सतही जल तथा भूजल में प्राकृतिक रूप में अलग–अलग सांद्रता में पाई जाती है। रेडॉन, यूरेनियम (^{238}U), जो मानव जीवन के लिए आंतरिक विकिरण जोखिम में लगभग 55% योगदान देता है, की रेडियोधर्मी क्षय श्रृंखला के दौरान उत्पन्न होता है। रेडॉन के क्षय के दौरान यह साँस लेने के दौरान फेफड़ों में पहुँच जाता है, जहां यह ऊर्जा छोड़ता है और संवेदनशील फेफड़ों के ऊतकों में डीएनए को नुकसान पहुंचाकर कैंसर का कारण बनता है। भूजल अतिरिक्त रेडॉन को घरों और अन्य इमारतों में ले जाकर एक स्वास्थ्य जोखिम पैदा कर सकता है क्योंकि जब पानी का उपयोग स्नान, सफाई और अन्य रोजमर्रा के उद्देश्यों के लिए किया जाता है तो भंग रेडॉन आसानी से हवा में मिल जाता है।

अपरिवर्तनवादी प्रकृति, छोटा अर्ध जीवन, सतही जल की तुलना में भूजल में उच्च बहुतायतता और माप में सुगम होने के कारण प्राकृतिक रेडॉन भूजल निर्वहन के महत्वपूर्ण क्षेत्रों की पहचान करने के लिए एक उत्कृष्ट अनुरेखक है। भूजल में ^{222}Rn गतिविधियां अक्सर समुद्री जल की तुलना में 2 से 4 गुणा अधिक होती हैं; इसलिए, तटीय जल में बड़े तनुकरण के बाद भी, उन्हें बहुत कम सांद्रता में पाया जा सकता है। ^{222}Rn समुद्र के तल में मीठे पानी के झरनों का पता लगाने में विशेष रूप से उपयोगी है क्योंकि रेडियम ऐसी परिस्थितियों में समृद्ध नहीं होता। ^{222}Rn की सीमाओं में से एक यह है कि, एक अक्रिय गैस होने के कारण, यह वायुमंडल में निकल जाती

है। ^{222}Rn की निरंतर निगरानी से, उप–समुद्री भूजल निर्वहन (एसजीडी) की मात्रा निर्धारित करना संभव है।

पानी में ईसी और रेडॉन के बीच संबंध के आधार पर चार अलग–अलग स्थितियों के आधार पर एसजीडी का पता लगाया जा सकता है।

तालिका 1: विभिन्न स्थितियों में ई.सी और रेडॉन के स्तर की तुलना।

क्रम संख्या	स्थिति	प्रक्रिया
1	रेडॉन की वृद्धि और ईसी की कमी	ताजे पानी की एस.जी.डी
2	रेडॉन की वृद्धि और ईसी की वृद्धि	लवणीय एस.जी.डी
3	रेडॉन की कमी और ईसी की कमी	ताजा सतही पानी
4	रेडॉन की कमी और ईसी की वृद्धि	समुद्री जल

सामान्य तौर पर, उप–समुद्री भूजल निर्वहन अध्ययन तटीय क्षेत्रों के भीतर समुद्री जल इंटरफेस को अच्छी तरह से रखते हुए तटीय जलभृतों के इष्टतम भूजल दोहन की योजना बनाने में मदद करते हैं। इसके अलावा, भूजल के निर्वहन को रोकने के लिए उपसतह बाधाओं के निर्माण के लिए आदर्श स्थलों का पता लगाया जा सकता है।

पर्यावरण ट्रिशियम

थर्मोन्यूक्लियर विस्फोटों से वातावरण में मुक्त होने वाले हाइड्रोजन के रेडियोधर्मी समस्थानिक ने भूजल और पुनर्भरण की आयु अनुमानों के लिए एक तरीका संभव बनाया। ब्रह्मांडीय रूप से उत्पादित ट्रिशियम पूरी तरह से वायुमंडलीय वाष्प में पाया जाता है और इसे वर्षण द्वारा पृथ्वी की सतह पर लाया जाता है। वर्ष 1952 से पहले, वर्षा में ट्रिटियम की सांद्रता कम थी। 1952 में जब वातावरण में थर्मोन्यूक्लियर परीक्षण शुरू हुए, तो वर्षा में ट्रिटियम सांद्रता अचानक बढ़ गई और 1963–64 में उत्तरी गोलार्ध में रिकॉर्ड–उच्च सांद्रता तक पहुंच गई।

वायुमंडलीय नाइट्रोजन और थर्मल न्यूट्रॉन के बीच एक परमाणु प्रतिक्रिया से हाइड्रोजन का रेडियोधर्मी समस्थानिक, ^{3}H (ट्रिशियम या टी), ^{14}C की तरह उत्पन्न होता है:

$$^{14}N \rightarrow {}^{12}C + {}^{3}H$$

$^{1}H^{3}HO$ के ऑक्सीकरण के बाद ^{3}H जलविज्ञानीय चक्र में प्रवेश करता है और अंत में तदनुसार इसका क्षय होता है:

$$^{3}H \rightarrow {}^{3}H^{e} + ß–$$

जहाँ पर $E_{ßmax}$ = 18 keV और आधा जीवन 12.430 वर्ष का

विभिन्न जलभृतों में भूजल के निवास समय को स्पष्ट रूप से समझने के लिए पर्यावरणीय ट्रिटियम भी एक अच्छा विकल्प है। इसके लिए वर्षा, नदी और भूजल के नमूनों का विश्लेषण किया जाता है।

इलेक्ट्रोलाइटिक संवर्धन के बाद ट्रिटियम गतिविधि को अल्ट्रा लो लेवल लिक्विड स्किंटिलेशन काउंटर (क्वांटुलस, पर्किन एल्मर) में मापा जाता है। 1 टीयू को हाइड्रोजन (H) के 1018 परमाणुओं या 0.12 बीक्यू/ली पानी में एक ट्रिटियम की उपस्थिति के रूप में परिभाषित किया जाता है।

नोबल गैसें

नोबल गैसें समान गुणों वाले रासायनिक तत्वों का एक समूह बनाती हैं। मानक परिस्थितियों में, वे सभी गंधहीन, रंगहीन, एक परमाणु वाली गैसें हैं जिनमें बहुत कम रासायनिक प्रतिक्रिया होती है। प्राकृतिक रूप में पाई जाने वाली छह नोबल गैसें, हीलियम (He), नियॉन (Ne), आर्गन (Ar), क्रिप्टन (Kr), क्सीनन (Xe), और रेडियोधर्मी रेडॉन (Rn) हैं। पर्यावरण विज्ञान में विभिन्न महत्वपूर्ण समस्याओं जैसे वायु–समुद्र गैस विनिमय, समुद्री जैविक उत्पादन, भूजल तापमान, फर्न तापमान और मोटाई, सतह अनावरण कालका पता लगाने के लिए समुद्री जल, भूजल, बर्फ कोर और चट्टानों में नोबल गैसों का मापन किया जाता है।

जलोढ़ जलभृत प्रणाली के जल–भूविज्ञान की जांच के लिए नोबल गैसों का इस्तेमाल किया जा सकता है। भूजल पुनर्भरण तापमान का अनुमान लगाने के लिए Ne, Ar, Kr और Xe नोबल गैसों का उपयोग किया जा सकता है। पानी के साथ उनकी घुलनशीलता संतुलन के संबंध में मान्यताओं के आधार पर उनकी घुलनशील सांद्रता को पुनर्भरण के दौरान जल स्तर के औसत तापमान द्वारा नियंत्रित माना जाता है। वे 'अतिरिक्त हवा' यानी जल स्तर की गति के परिणामस्वरूप हवा युक्त घोल की मात्रा का निर्धारण करने में सक्षम हैं। एक न्यूनतम वर्ग प्रतिलोम मॉडलिंग कार्यक्रम, नोबल 90 में व्याख्यात्मक भौतिक मॉडल की एक श्रृंखला में Ne, Ar और Kr इनपुट डेटा का उपयोग करते हुए, पुनर्भरण तापमान और अतिरिक्त हवा का अनुमान लगाया गया। बंद संतुलन (सी.ई) और आंशिक पुनः संतुलन मॉडल (पी.आर) का उपयोग नोबल गैस तापमान आंकड़ो की व्याख्या करने के लिए किया जा सकता है।

पहला सामान्य मॉडल स्टुट इत्यादि द्वारा प्रस्तावित किया गया था। यह अतिरिक्त हवा की प्रारंभिक मात्रा का प्रसार नियंत्रित आंशिक पुन संतुलन (पीआर मॉडल) द्वारा अतिरिक्त हवा के विभाजन की व्याख्या करता है। इसे इस प्रकार लिखा जा सकता है:

$$Ci = Ci^*(T,S,P) + A.zi.e^{FDi/DNe} \qquad (i = He, Ne, Ar, Kr, Xe)$$

जहां Ci* (T,S,P) पानी के तापमान, लवणता और कुल वायुमंडलीय दबाव के फलन के रूप में cm^3STP/g में आर्द्र हवा में घुलनशीलता संतुलन सांद्रता है, A पानी के प्रति ग्राम शुष्क ''अतिरिक्त हवा'' का STP–वॉल्यूम है, zi शुष्क हवा में गैस का वॉल्यूम अंश है, F विसरित पुनः संतुलन की डिग्री का वर्णन करने वाला अंश पैरामीटर है तथा और Di आणविक प्रसार गुणांक है।

स्थिर समस्थानिक

किसी तत्व के परमाणु जो समय के साथ क्षय नहीं होते हैं या क्षय होने में अनंत समय लेते हैं, स्थिर समस्थानिक कहलाते हैं। जल स्थिर समस्थानिक ($\delta^{18}O$ और $\delta^{2}H$) भौतिक प्रक्रियाओं के अनुरेखक हैं, पानी के अणु समुद्र से वाष्पीकरण और वर्षा द्वारा पुनर्भरण के माध्यम से जलभृत में पहुँचते हैं और इन्हें जलविज्ञानीय चक्र के दौरान जल की उत्पत्ति और संचलन को ट्रेस करने के

लिए एक शक्तिशाली उपकरण माना जाता है। चूंकि H_2O अणु जलविज्ञानीय चक्र के माध्यम से प्रसार करते हैं, विभिन्न समस्थानिक आणविक प्रजातियां, जिनमें ऑक्सीजन (^{18}O और ^{16}O) और हाइड्रोजन (^{1}H और ^{2}H या D) के विभिन्न समस्थानिक संयोजन होते हैं, वाष्प, तरल और ठोस के बीच अलग–अलग विभाजित होते हैं, तीनों चरणों में विशिष्ट समस्थानिक हस्ताक्षर प्रदान करते हैं। पुनर्भरण स्रोतों और प्रक्रियाओं को समझने के लिए भूजल समस्थानिक मूल्यों के साथ तुलना करने के लिए वर्षा के दीर्घकालिक औसत मात्रा भारित समस्थानिक मूल्यों का उपयोग किया जा सकता है।

पानी का एक अणु दो हाइड्रोजन परमाणुओं (दो स्थिर समस्थानिकों में से कोई दो; ^{1}H और D) और एक ऑक्सीजन परमाणु (तीन स्थिर समस्थानिकों में से कोई एक ^{16}O, ^{17}O, और ^{18}O) के संयोजन से बनता है। इस प्रकार, हाइड्रोजन के इन 2 समस्थानिकों और ऑक्सीजन के 3 समस्थानिकों के 9 संभावित संयोजन संभव हैं। पानी के चार सबसे प्रचुर समस्थानिक अणुओं को उनके सापेक्ष बहुतायत और आणविक द्रव्यमान के साथ नीचे तालिका में दिया गया है।
तालिका 2. पानी के चार सबसे प्रचुर समस्थानिक और उनके आणविक द्रव्यमान।

आइसोटोपोलॉग	$H_2{}^{16}O$	$H_2{}^{18}O$	$H_2{}^{17}O$	$HD^{16}O$	$D_2{}^{16}O$
सापेक्ष प्राकृतिक बहुतायत	99.78%	0.20%	0.03%	0.0149%	0–022पीपीएम
आणविक द्रव्यमान	18	20	19	19	20

आमतौर पर 4 अंतरराष्ट्रीय मानक संदर्भ सामग्री अर्थात्, SMOW (मानक माध्य महासागरीय जल), VSMOW (वियना मानक माध्य महासागरीय जल), SLAP (मानक प्रकाश अंटार्कटिक वर्षण) और GISP (ग्रीनलैंड आइस शीट वर्षण) का उपयोग किया जाता है। SMOW और VSMOW में (2H/1H और 18O/16O) बहुतायत मापन अनुपात के मानआगे तालिका में दिए गए हैं जबकि SLAP और GISP के मान भी आगे तालिका में दिए गए हैं।

स्थिर समस्थानिक ($\delta^{18}O$, δD) का विश्लेषण DI–IRMS और CF–IRMS पर न्यूनतम त्रुटि सीमा $\delta^{18}O$ लिए ±0.1‰ के अन्दर और δD के लिए 1‰ के अन्दर किया जाता है। एकत्रित जल नमूनों का समस्थानिक विश्लेषण ($\delta^{18}O$ और δD मानक संतुलन विधि द्वारा किया जाता है जिसमें पानी के नमूनों को CO_2 और H_2 के साथ संतुलित किया जाता है। ऑक्सीजन (^{18}O / ^{16}O) के नमूनों का विश्लेषण निरंतर प्रवाह समस्थानिक अनुपात मास स्पेक्ट्रोमीटर (सीएफ–आईआरएमएस) का उपयोग करके और D/H अनुपात का मापन डुअल इनलेट आइसोटोप मास स्पेक्ट्रोमीटर (डीआई–आईआरएमएस) द्वारा किया जाता है। $\delta^{18}O$ और δD मानों की गणना वियना मानक माध्य महासागरीय जल (V–SMOW), ग्रीनलैंड बर्फ शीट वर्षण (GISP) और मानक प्रकाश अंटार्कटिक वर्षा (SLAP) मानकों के साथ तीन बिंदु अंशशोधन समीकरण का उपयोग करके की जाती है। परम्परा के अनुसार परिणाम V–SMOW गणना से प्रति हजार विचलन के भागों के रूप में व्यक्त किए जाते हैं:

$$\delta_{sample}=[(R_{sample}-R_{V-SMOW})/R_{V-SMOW}]x1000$$

जहां, R, जल नमूनों (R_{sample}) अथवा VSMOW (R_{VSMOW}) में D/H अथवा $^{18}O/^{16}O$ अनुपात है।

तालिका 3. अंतरराष्ट्रीय मानक संदर्भ सामग्री में मापा गया बहुतायत अनुपात

आइसोटोप	मानक	बहुतायत अनुपात
$^{2}H/^{1}H$	एसएमओ डब्ल्यू	0.000158 [158(±2) × 10^{-6}]
$^{18}O/^{16}O$	एसएमओ डब्ल्यू	0.0019934 [1993.4(±2.5) × 10^{-6}]
$^{2}H/^{1}H$	वीएसएमओडब्ल्यू	0.00015575 [155.75(±0.45) × 10^{-6}]
$^{18}O/^{16}O$	वीएसएमओडब्ल्यू	0.0020052 or [2005.2(±0.05) × $^{10-6}$]

तालिका 4. एसएलएपी की ऑक्सीजन और हाइड्रोजन समस्थानिक रचनाएं और जी.आई.एस.पी

मानक प्रकाश अंटार्कटिक वर्षण (एसएलएपी)	ग्रीनलैंड आइस शीट वर्षण (जीआईएसपी)
δ^{18}OSLAP = –55.50‰ VSMOW	δ^{18}OGISP = –24.76‰ VSMOW
δDSLAP = –428.0‰ VSMOW	δDGISP = –189.5‰ VSMOW

विश्व के वर्षण में ^{18}O और D के बीच एक मजबूत रैखिक संबंध पाया जाता है, जिसे पहले D = $8^{18}O$ + 10 (क्रेग, 1961) के रूप में परिभाषित किया गया था और बाद में D = $8.17^{18}O$ + 10. 35 (रोज़ांस्की, इत्यादि, 1993) के रूप में संशोधित किया गया था, जिसे वैश्विक आकाशी जल रेखा (GMWL) के रूप में जाना जाता है।इसके अलावा, स्थानीय वर्षण के ^{18}O और D मानों से एक स्थानीय आकाशी जल रेखा (LMWL) का निर्माण किया जा सकता है, जो जलविज्ञानीय परिस्थितियों के स्थानीय नदी जल रेखा LMWL से कुछ भिन्न हो सकती है। जलविज्ञानीय प्रक्रियाओं (वाष्पीकरण और मिश्रण) के प्रभावों के कारण, स्थानीय नदी जल रेखा (LRWL) ढलान और अवरोधन दोनों में, LMWL से भिन्न हो सकती है। वाष्पीकरण के दौरान पानी की समस्थानिक रचनाएँ हमेशा गतिज भिन्न प्रक्रियाओं से प्रभावित होती हैं, जिससे अवशिष्ट जल में भारी समस्थानिक रचनाएँ होती हैं। D और ^{18}O (पानी के वाष्पीकरण के कारण) के बीच संबंध में 'd' द्वारा निरूपित एक अतिरिक्त मान देखा गया है, जिसे डांसगार्ड द्वारा ड्यूटेरियम अतिरिक्त (d या D–अतिरिक्त = D – ^{18}O) के रूप में वैश्विक औसत डी–अतिरिक्त मूल्य 10 परिभाषित किया गया था। क्योंकि वाष्पीकरण प्रक्रियाओं के दौरान डी–अतिरिक्त घट जाती है, इसका उपयोग वाष्पीकरण के प्रभाव की जांच के लिए किया जा सकता है। इसके अलावा, डी–अतिरिक्त वर्षा जल,एक ही डी अतिरिक्त मान वाले विभिन्न D और ^{18}O मान की समस्थानिक संरचना से संबंधित नहीं है।

हिंदी भारत की अमरवाणी है। यह स्वतंत्रता और सम्प्रभुता की गरिमा है।

(माखनलाल चतुर्वेदी)