



# تئوری ، اصول و بررسی وضعیت موجود کاربرد ردیابی در کشور

تئوری، اصول و بررسی وضعیت موجود

کاربرد ردیابی در کشور

به نام خدا

## پیشگفتار

امروزه نقش و اهمیت ضوابط، معیارها و استانداردها و آثار اقتصادی ناشی از به کارگیری مناسب و مستمر آنها در پیشرفت جوامع، تهیه و کاربرد آنها را ضروری و اجتناب ناپذیر ساخته است. نظر به وسعت دامنه علوم و فنون در جهان امروز، تهیه ضوابط، معیارها و استانداردها در هر زمینه، به مجامع فنی - تخصصی واگذار شده است.

با در نظر گرفتن مراتب فوق و با توجه به شرایط اقلیمی و محدودیت منابع آب در ایران تهیه استاندارد در بخش آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد و از این رو طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور وزارت نیرو در جهت نیل به این هدف با مشخص نمودن رشته‌های اصلی مهندسی آب اقدام به تشکیل مجامع علمی - تخصصی با عنوان کمیته‌ها و زیر کمیته‌های فنی کرده که وظیفه تهیه این استانداردها را به عهده دارند.

استانداردهای مهندسی آب با در نظر داشتن موارد زیر تهیه و تدوین می‌شود:

- استفاده از تخصص‌ها و تجارب کارشناسان و صاحب نظران شاغل در بخش عمومی و خصوصی
- استفاده از منابع و مآخذ معتبر و استانداردهای بین‌المللی
- بهره‌گیری از تجارب دستگاه‌های اجرایی، سازمانها، نهادها، واحدهای صنعتی، واحدهای مطالعه، طراحی و ساخت
- ایجاد هماهنگی در مراحل تهیه، اجرا، بهره‌برداری و ارزشیابی طرحها
- پرهیز از دوباره کاریها و اتلاف منابع مالی و غیرمالی کشور
- توجه به اصول و موازین مورد عمل مؤسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران و سایر مؤسسات معتبر تهیه کننده استاندارد

آگاهی از نظرات کارشناسان و صاحب نظرانی که فعالیت آنها با این رشته از مهندسی آب مرتبط می‌باشد موجب امتنان کمیته تخصصی مطالعات ایزوتوپی و ردیابی مصنوعی در منابع آب زیرزمینی خواهد بود.

## ترکیب اعضای گروه

نام اعضای گروه تخصصی «مطالعات ایزوتوپی و ردیابی مصنوعی در منابع آب زیرزمینی» طرح تهیه استانداردهای

مهندسی آب کشور که در تهیه این نشریه مشارکت داشته‌اند به ترتیب حروف الفبا به شرح زیر است :

دکترای آب و خاک	سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کشور	آقای رحیم اتحاد
فوق لیسانس زمین شناسی	طرح تهیه استانداردهای مهندسی آب کشور	خانم فیروزه امامی
دکترای مکانیک خاک	سازمان مدیریت منابع آب ایران (تماب)	آقای مرتضی پاکزاد
فوق لیسانس زمین شناسی	کارشناس آزاد	آقای محمدحسین رشیدی
دکترای زمین شناسی آب	مرکز تحقیقات آب وزارت نیرو	آقای منوچهر سپاسی
دکترای شیمی	سازمان انرژی اتمی ایران	خانم مهرافرز مدنژاد
فوق لیسانس فیزیک و فوق لیسانس آبخشناسی	کارشناس آزاد	آقای عباس هنرمند

## فهرست مطالب

<u>صفحه</u>	<u>عنوان</u>
۱	مقدمه
۴	۱- کلیات
۶	۲- ایزوتوپهای محیطی پایدار
۷	۱-۲ پیدایش و سیر پیشرفت کاربرد ایزوتوپهای پایدار در بررسی منابع آب
۹	۲-۲ تئوری و اصول ایزوتوپهای محیطی پایدار
۱۳	۳-۲ بررسی اهداف ردیابی و برنامه‌ریزی
۱۵	۴-۲ روشها و سیستمهای اندازه‌گیری ایزوتوپهای پایدار در نمونه‌های آب
۱۸	۳- رادیوایزوتوپهای محیطی
۱۸	۱-۳ تئوری و اصول کاربرد رادیوایزوتوپهای محیطی
۲۶	۴- ردیابهای مصنوعی
۲۷	۱-۴ تاریخچه و سیر پیشرفت ردیابی مصنوعی
۲۸	۲-۴ ورود ردیابهای مصنوعی به چرخه آب
۲۸	۳-۴ تئوری و اصول ردیابی مصنوعی
۳۵	۴-۴ نمونه‌برداری
۳۶	۵-۴ روشهای اندازه‌گیری ردیابهای مصنوعی
۳۹	۵- وضعیت موجود مطالعات ردیابی کشور
۴۶	۶- پیشنهادها
۴۶	۱-۶ برنامه کوتاه‌مدت
۴۷	۲-۶ برنامه درازمدت
۴۹	۷- منابع و مآخذ

## مقدمه

افزایش جمعیت، توسعه اقتصادی و ارتقاء کیفیت زندگی از عوامل اصلی مؤثر در رشد مصارف آب است. ثابت بودن حجم منابع آب قابل تجدید سالانه و روند دائمی افزایش مصارف آب، موجب کاهش میزان سرانه آب قابل تجدید می‌شود. براساس آمار مراجع بین‌المللی (FAO)، کل مصارف آب در جهان طی بیست و یک سال، دو برابر شده است.

در کشور ما ایران، افزایش جمعیت طی چند دهه گذشته میزان متوسط سرانه آب قابل تجدید را تقلیل داده است، به طوری که اگر این رقم در سال ۱۳۴۰ حدود ۵۵۰۰ متر مکعب بوده، این رقم در سال ۱۳۴۵ به حدود ۳۴۰۰ و در سال ۱۳۷۵ به ۲۷۰۰ متر مکعب رسیده است. صرفنظر از تفاوت‌های فاحش میزان سرانه آب قابل تجدید سالانه بین مناطق مختلف کشور این میزان در سال ۱۳۷۷ تا حدود ۲۰۰۰ متر مکعب رسیده است (شکل ۱).

انجام مطالعات پایه و کاربردی در شناخت منابع آب در کل چرخه طبیعی آب از اهمیت زیادی برخوردار است. امروزه علاوه بر روش‌های متداول، استفاده از فنون ایزوتوپی یا ردیابی ایزوتوپی همراه با سایر روش‌های غیرهسته‌ای به عنوان روش‌های مطالعاتی تکمیلی برای رفع زمینه‌های مبهم و ناشناخته مورد توجه قرار گرفته و توسعه یافته است.

استفاده از ایزوتوپ‌های محیطی و ردیاب‌های مصنوعی در آشناسی اطلاعات با ارزشی در مورد حرکت و مقدار آب در محیط‌های گوناگون به دست می‌دهد. این تکنیکها بخصوص در تحقیقات و بررسی‌های منابع آب زیرزمینی کاربرد ویژه‌ای داشته و تصویری از سیستم هیدروژئولوژیکی و ارتباط هیدرولوژیکی ارائه می‌دهد.

در روش‌های ردیابی از عناصر و مواد موجود در آب (به صورت طبیعی و مصنوعی) به عنوان ردیاب در بررسی خصوصیات و چگونگی حرکت آبها استفاده می‌شود. در گذشته از مواد جامد افزودنی (مثل کاه) برای ردیابی استفاده می‌شد. پس از آن استفاده از مواد شیمیایی یا مواد رنگی به روش افزودنی متداول شد. در نیمه دوم قرن بیستم پس از توسعه علوم و فنون هسته‌ای شاخه جدیدی به عنوان ردیاب‌های ایزوتوپی در مطالعات هیدرولوژی گسترش یافت. در این روش از ایزوتوپ‌های طبیعی عناصر موجود در آب برای شناخت مسیر و چگونگی حرکت و تغذیه و تخلیه آب استفاده می‌شود. با توجه به سیر تکاملی فوق، امروزه روش‌های ردیابی مورد استفاده در هیدرولوژی را می‌توان به صورت زیر تقسیم بندی کرد:

### الف - ردیاب‌های محیطی

این ردیابها به طور طبیعی در آب موجود بوده و رفتاری هماهنگ با آب دارند، لذا پی‌گیری حرکت آنها معرف خصوصیات منابع آب تحت بررسی است.

ردیابهای محیطی شامل دو گروه زیر است :

- ردیابهای ایزوتوپی یا ایزوتوپهای محیطی (اکسیژن ۱۸، دیوتریوم، کربن ۱۴، تریتیوم و ...)
- ردیابهای غیر ایزوتوپی محیطی یا طبیعی (عناصر و مواد محلول در آب و...)

#### ب- ردیابهای مصنوعی

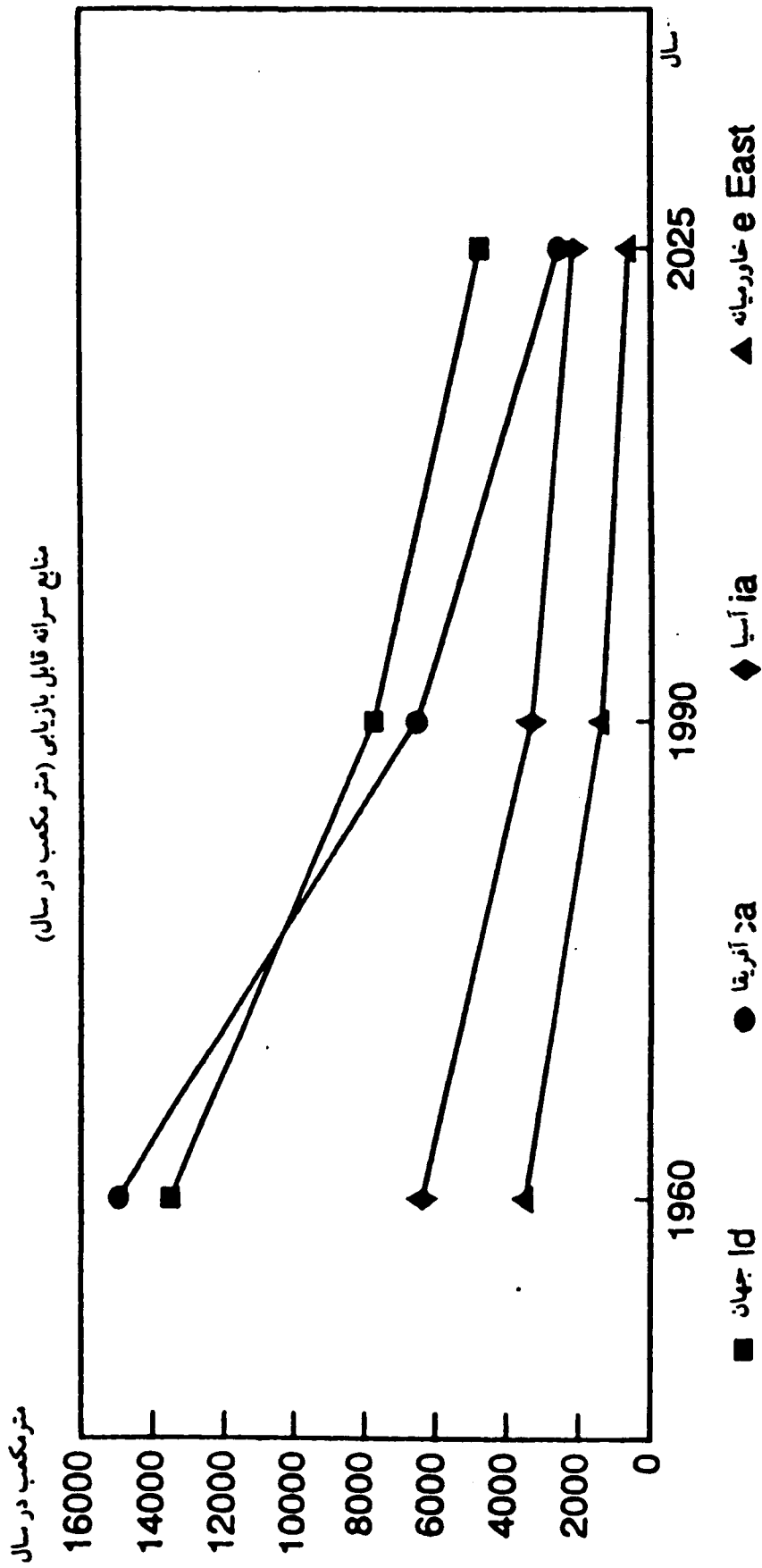
در این روش از موادی که به طور مصنوعی (تعمداً و تحت کنترل) به آب اضافه شده و وارد چرخه آب شده‌اند، برای شناخت خصوصیات و پارامترهای فیزیکی آبخوان (سرعت، جهت و ...) استفاده می‌شود که عمدتاً عبارتند از :

- مواد رادیواکتیو یا قابل اکتیو شدن

- مواد شیمیایی و رنگی

- سایر مواد مثل باکتریها، مواد جامد و ...

اصول و کاربرد هر کدام از این ردیابها جداگانه توضیح داده می‌شود.



شکل ۱- منابع آب قابل دسترس در مناطق مختلف جهان

منابع سرانه قابل بازیابی به متر مکعب در سال (طبق برآورد انستیتو منابع جهانی و بانک جهانی)



در چرخه طبیعی آب غلظت ایزوتوپهای پایدار اکسیژن و هیدروژن که عناصر سازنده ملکول آب هستند در اثر عوامل جوی چون تبخیر و میعان تغییرات کوچکی نشان می‌دهد. این تغییرات هر چند اندک بوسیله دستگاههای مدرن دقیقاً اندازه‌گیری شده، سپس با بررسی و تفسیر نتایج حاصله می‌توان در مورد چگونگی حرکت آب در قسمتهای مختلف چرخه هیدرولوژی اطلاعات جامعی بدست آورد.

ایزوتوپهای ناپایدار یا رادیواکتیو موجود در جو نیز به مرور زمان تخریب می‌شوند و غلظت آنها تغییر پیدا می‌کند. مثل تریتیوم ( $^3\text{H}$ ) و رادیوکربن ( $^{14}\text{C}$ ) که بطور طبیعی با مقادیر خیلی کم در اتمسفر تولید شده و در چرخه هیدرولوژی وارد می‌شوند. البته مقادیر زیاد این عناصر نیز در اثر بمبهای هسته‌ای در سالهای ۱۹۶۰ به اتمسفر اضافه شده است که در محاسبات منظور می‌شود. این ایزوتوپها توسط باران به داخل آبهای زیرزمینی نفوذ کرده و همراه آن حرکت می‌کنند. مقدار کمی این ایزوتوپها بوسیله متخصصین و با استفاده از خاصیت رادیواکتیویته آنها توسط دستگاههای حساس اندازه‌گیری می‌شوند. با مشخصه نیمه‌عمر این رادیو ایزوتوپها، (جدول شماره ۱) و اکتیویته اندازه‌گیری شده می‌توان سن آب یا زمان توقف آن را در آبخوان تعیین کرد.

مطالعه و بررسی ایزوتوپهای رادیواکتیو و پایدار همراه با سایر مطالعات و داده‌های شیمیایی، شمایی کلی از سیستم آب زیرزمینی را مشخص می‌کند به طوری که هیدروژئولوژیست بتواند مدلی برای مدیریت آن تهیه و راهبردهای توسعه آن را تعیین کند.

حرکت آب سطحی و زیرزمینی را می‌توان بوسیله ردیابهای مصنوعی نیز پی‌گیری و بررسی کرد. در این عملیات مواد مختلفی از نمک طعام گرفته تا رنگها و مواد فلورسانس به‌عنوان ماده ردیاب افزودنی یا مصنوعی در محلی به سیستم آب سطحی یا آب زیرزمینی تزریق شده و حرکت آن در نقاط دیگر سیستم (به وسیله نمونه‌گیری و اندازه‌گیری) ردیابی می‌شود. چون در بیشتر موارد دقت زیاد در تشخیص و اندازه‌گیری مطرح است لذا رادیو ایزوتوپهایی مثل تریتیوم وید -۱۳۱ ( $^3\text{H}$  و  $^{131}\text{I}$ ) به‌عنوان ردیاب مصنوعی در سیستم آب تزریق می‌شوند.

تغذیه منابع آب زیرزمینی از اهمیت شایانی برخوردار است و تکنیکهای ایزوتوپی هم ناحیه و هم سرعت تغذیه آبخوان را تعیین می‌کنند. ناحیه تغذیه با اندازه‌گیری تغییرات  $^2\text{H}$  و  $^{18}\text{O}$  و رابطه آن با ارتفاع محل نفوذ و بارندگی بدست می‌آید. سرعت تغذیه نیز باردیابی مقادیر  $^3\text{H}$  در اعماق مختلف خاک حاصل می‌شود. در خیلی موارد پیک تریتیوم (مربوط به بمبهای دهه ۱۹۶۰) در اعماقی بدست می‌آید که نشانگر مسافت حرکت رطوبت (نفوذ) از زمان انتشار پیک ۱۹۶۳ است.

به طور خلاصه روشهای ایزوتوپی در موارد زیر کاربرد دارند:

- تعیین منشاء و سن آب در آبخوانهای مختلف
- تخمین درجه و مقدار اختلاط آبها
- تعیین محل و مقدار تغذیه آب
- تعیین سرعت جریان آب زیرزمینی و تعیین شدت کارستی شدن

البته باید در نظر داشت که روشهای ایزوتوپی به تنهایی نمی‌تواند در اکتشاف منابع آب زیرزمینی بکار رود. بلکه مطالعات اولیه باید بوسیله هیدروژئولوژیست انجام شود. پس از آن با استفاده از نقاط آبی منطقه و بکارگیری روشهای ایزوتوپی می‌توان مشخصات اولیه جریان و منشاء آب را تعیین کرد.

یکی دیگر از موارد کاربرد روشهای ایزوتوپی تعیین گرادیان هیدرولیکی و سرعت تغذیه منابع آبهای زیرزمینی است که در مطالعات آبشناسی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از طریق این روش می‌توان علاوه بر ناحیه تغذیه، سرعت تغذیه منابع آب را نیز مشخص کرد.

جدول ۱- وفور طبیعی و نیمه عمر هریک از ایزوتوپهای محیطی مورداستفاده در هیدرولوژی

عناصر	وفور طبیعی %	نیمه عمر
$^1\text{H}$	۹۹/۹۸۵	پایدار
$^2\text{H}$ (دیوتریوم)	۰/۰۱۵	پایدار
$^3\text{H}$ (تریتریوم)	۱۰-۱۵	۱۲/۴۳ سال
$^3\text{He}$ (*)	۰/۰۰۰۱۳	پایدار
$^4\text{He}$ (*)	۹۹/۹۹۹۸۷	پایدار
$^{12}\text{C}$	۹۸/۸۹	پایدار
$^{13}\text{C}$	۱/۱۱	پایدار
$^{14}\text{C}$	$10^{-10}$ - ۱/۲	۵۷۳۰ سال
$^{14}\text{N}$	۹۹/۶۳	پایدار
$^{15}\text{N}$	۰/۳۷	پایدار
$^{16}\text{O}$	۹۹/۷۶	پایدار
$^{18}\text{O}$	۰/۲۰	پایدار
$^{32}\text{S}$	۹۵/۰	پایدار
$^{33}\text{S}$	۴/۲۲	پایدار
$^{35}\text{Cl}$	۷۵/۵۳	پایدار
$^{36}\text{Cl}$		۳۰۰۰۰۰ سال
$^{37}\text{Cl}$	۲۴/۴۷	پایدار

## ۲- ایزوتوپهای محیطی پایدار

در اوایل قرن اخیر پی برده شد که بعضی از عناصر شامل اتمهایی با جرمهای متفاوت هستند که ایزوتوپ خوانده می‌شوند. یک ایزوتوپ می‌تواند پایدار یا ناپایدار باشد. هسته یک ایزوتوپ پایدار در طول زمان تغییر نخواهد کرد، بلکه عوامل فیزیکی دیگری بر آن اثر می‌کند. در حالیکه هسته یک ایزوتوپ ناپایدار همواره در اثر فعل و انفعال هسته‌ای پیوسته یا منفرد ضمن انتشار اشعه‌ای به نام رادیواکتیویته به ایزوتوپ‌های پایدار یا ناپایدار جدید تبدیل می‌شود.

ایزوتوپ اکسیژن ۱۷، نخست توسط Blackett در حال بررسی واکنشهای هسته‌ای  $^{17}\text{O}(\alpha, \rho)^{14}\text{N}$  تشخیص داده شد. ولی او نمی‌دانست این ایزوتوپ پایدار است یا نه. در سال ۱۹۲۹ ایزوتوپهای ۱۸ و ۱۷ اکسیژن در مواد طبیعی توسط جانسون و همکاران تشخیص داده شدند، هرچند ایشان نتوانستند نسبت طبیعی قابل قبولی برای این ایزوتوپها تعیین کنند و تخمین آنها حدود  $\frac{1}{1250}$  برای  $^{18}\text{O}$  و  $\frac{1}{10000}$  برای اکسیژن ۱۷ بود. تا آن زمان جرم اتمی عناصر برمبنای اکسیژن طبیعی به عنوان ۱۶ واحد جرم اتمی و اشل فیزیکی جرم اتمی براساس  $^{16}\text{O}$  برابر ۱۶ واحد جرم اتمی محاسبه شده بود. کشف اینکه اکسیژن طبیعی مخلوطی از ایزوتوپها است به این معنا است که مقیاس اوزان اتمی یکنواخت نیستند و تلاش زیادی شد تا نسبت ایزوتوپی آنها تعیین شود. اعداد به دست آمده توسط افراد، متفاوت بود و با افزایش دقت روشهای اندازه‌گیری مشخص شد که نسبت این ایزوتوپها در منابع و مواد مختلف با دامنه ۱۰٪ متغیر است. بعد از جنگ جهانی دوم، دیگر صحبت از نسبت ایزوتوپی اکسیژن بدون ذکر منبع آن بی‌معنی بود مگر اینکه منبع اندازه‌گیری دقیقاً مشخص شود. سرانجام در سال ۱۹۶۱ انجمن بین‌المللی شیمی محض و کاربردی، اکسیژن طبیعی را به عنوان استاندارد وزن اتمی رد کرد و جدول اوزان اتمی جدیدی برمبنای ایزوتوپ دوازده کربن تهیه کرد و مقرر شد که اتم هر عنصر به وسیله تعداد پروتونهای موجود در هسته و عدد جرمی آن که برابر مجموع پروتون و نوترون عنصر است، مشخص شود مانند:

$$\begin{matrix} m & \\ \text{(عدد جرمی)} & \\ & E \text{ (عنصر)} \\ n & \\ \text{(عدد اتمی)} & \end{matrix}$$

ایزوتوپهای پایدار یا ناپایدار موجود در محیط که تغییرات غلظت آنها بدون کنترل مستقیم بشر و در اثر عوامل متفاوت طبیعی ایجاد می‌شوند، در تعریف ایزوتوپهای محیطی خوانده می‌شوند.

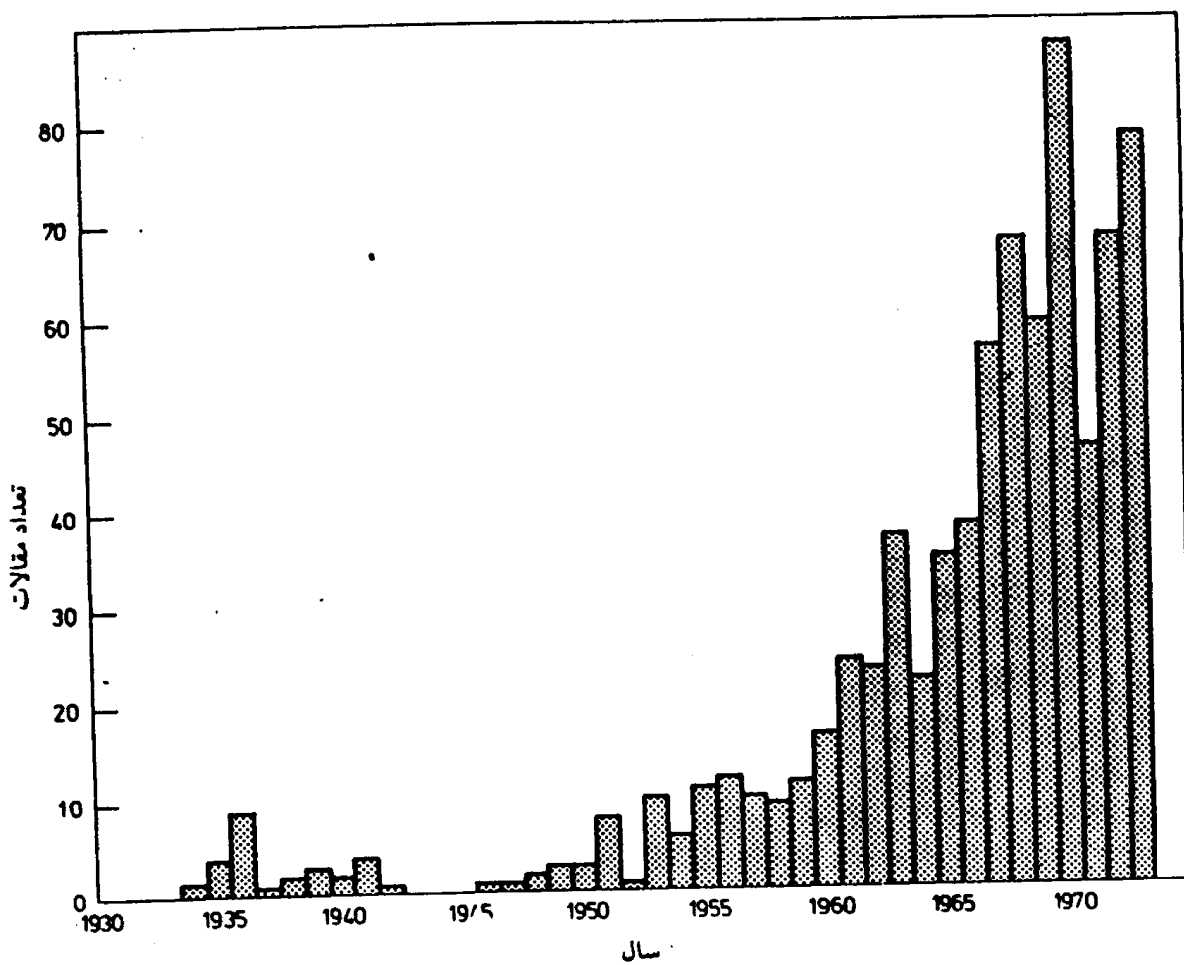
ایزوتوپهای محیطی مورد استفاده معمول در هیدرولوژی عبارتند از ایزوتوپهای پایدار دیوتریوم یا  $^2\text{H}$ ، اکسیژن  $^{18}$  و کربن - ۱۳ و رادیوایزوتوپهای تریتوم  $^3\text{H}$  و کربن - ۱۴.

در مواردی بعضی دیگر از ایزوتوپها نیز در این زمینه به کار رفته اند، مثل: سیلیکون ۳۲ با نیمه عمر صد سال بین نیمه عمر تریتیوم و کربن چهارده، هلیوم ۳- حاصله از تریتیوم و همچنین آرگن ۳۹ و یا کریپتون ۸۵ که با توجه به مسائل هریک (مثل حجم خیلی زیاد نمونه مورد نیاز اندازه گیری) کاربرد چندانی تا به حال نداشته و در دست بررسی هستند.

## ۱-۲ پیدایش و سیر پیشرفت کاربرد ایزوتوپهای پایدار در بررسی منابع آب

بعد از کشف مولکولهای ایزوتوپی آب، آزمایشگاههای سراسر دنیا به ویژه امریکا، شوروی، ژاپن، اروپای شرقی به بررسی وسیعی از آبهای طبیعی و مواد متشکله زمین پرداختند. با وجود محدودیتهای و عدم قطعیت روشهای تجزیه متداول، صورت کلی الگوی توزیع ایزوتوپی در پایان دهه ۱۹۳۰ شناخته شد. از جمله تغییرات در غلظت ایزوتوپها در اثر عوامل جوی و کاهش ایزوتوپهای سنگین در چرخه جوی آب در مقایسه با آب اقیانوسها و تغلیظ انواع ایزوتوپهای سنگین در آبهای سطحی تحت تبخیر با وضوح مشاهده شد. اختلاف موجود بین خواص فیزیکی مثل فشار بخار، چگالی ثابتهای تعادل و سرعت واکنش مولکولهای آب معمولی و آب سنگین  $D_2O$  مطالعه شد. نتایج این مطالعات با عنوان "آثار ایزوتوپی" زیربنای مطالعات بعدی و باعث درک بیشتر از تغییرات ایجاد شده در نسبت ایزوتوپی و یا وفور نسبی ایزوتوپها در طبیعت شد. در سال ۱۹۴۷ Nier وفور نسبی ایزوتوپها را در طبیعت به وسیله طیف‌نگار جرمی اندازه‌گیری کرد. این دستگاه مخصوص اندازه‌گیری تفاوت‌های اندک در نسبت ایزوتوپی بود که با استفاده از یک ورودی دو گانه برای مقایسه دقیق میان یک نمونه و یک استاندارد طرح شده بود. با استفاده از این سیستم (Urey و همکارانش در شیکاگو) تحقیقات گسترده و دقیقی در زمینه وفور طبیعی ایزوتوپهای کلیه عناصر سبک انجام شد و کاربرد این تحقیقات در مطالعات هیدرولوژی تحول و تکاملی ایجاد کرد.

آژانس انرژی اتمی از سال ۱۹۵۹ با تأسیس بخش هیدرولوژی ایزوتوپی، فعالیت خود را در این زمینه متمرکز کرد. نمودار شماره ۱ تعداد مقالات منتشر شده در زمینه هیدرولوژی ایزوتوپهای پایدار در سالهای ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۴ را نشان می‌دهد. پیشرفت چشمگیر بعد از سالهای ۱۹۶۰ مربوط به تأسیس بخش هیدرولوژی آژانس انرژی اتمی و افزایش بیشتر در سالهای ۱۹۶۳ تا ۱۹۷۰ و ۱۹۷۴ مربوط به سالهای برگزاری سمپوزیوم آژانس در این زمینه است که در سالهای بعد کم و بیش با همین روند ادامه داشته است.



نمودار ۱ - تعداد مقالات منتشر شده در زمینه هیدرولوژی ایزوتوپیهای پایدار در سالهای ۱۹۳۰ تا ۱۹۷۴

## ۲-۲ تئوری و اصول ایزوتوپهای محیطی پایدار

ایزوتوپهای پایدار دیوتریوم و اکسیژن-۱۸ به عنوان جزئی از عناصر هیدروژن و اکسیژن ملکول آب در طبیعت، ردیاب محیطی حقیقی هستند که در اکثر بررسیها به عنوان ردیاب ایده‌آل جوابگوی مسائل هیدرولوژی است. نسبت غلظت ایزوتوپهای این عناصر در ساخت ملکول آب در اثر فرآیند تبخیر یا میعان تغییرات اندکی پیدا می‌کند. این تغییرات مشخصه و هویت ایزوتوپی آب در محیط‌های متفاوت بوده و قابلیت شناسایی، پی‌گیری و ردیابی داشته و می‌تواند تاریخچه و مسیر آب در چرخه هیدرولوژی را ردیابی کند (شکل شماره ۲).

این تغییر نسبت ایزوتوپی که " اثر ایزوتوپی " نامیده می‌شود در غلظت ایزوتوپهای متشکله آب نوسانی ایجاد می‌کند. بیشترین تغییرات در زمان تشکیل بارندگی ایجاد می‌شود که ناشی از عوامل جوی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای تفسیر می‌شود. اثر ایزوتوپی جوابگوی مسائلی در مورد زمان توقف، منشاء آب زیرزمینی، محل تغذیه، شرایط جوی زمان تغذیه، ارتباط بین آبهای سطحی و زیرزمینی و همچنین بارندگی‌های منطقه‌ای و آب زیرزمینی است.

تفسیر و تعبیر ترکیب ایزوتوپی آبها نیازمند آگاهی کامل در مورد آبهای جوی (باران و برف) یعنی منشاء تغذیه منابع آب است. در پی این نیاز آژانس بین‌المللی انرژی اتمی IAEA<sup>۱</sup> برای دسترسی به این اطلاعات از سال ۱۹۶۰ در سراسر جهان اقدام به تأسیس یک شبکه جهانی با بیش از صد ایستگاه نمونه‌گیری GNIP<sup>۲</sup> برای نمونه‌گیری از نزولات جوی کرد. کلیه نمونه‌های جمع‌آوری شده این شبکه در آزمایشگاههای مجهز آژانس، آنالیز ایزوتوپی شده، نتایج آنالیز و بررسی و تفسیر انجام شده مرتباً به صورت سری گزارشهای فنی از طرف آژانس منتشر شده و در اختیار متخصصین این رشته قرار می‌گیرد.

(این اطلاعات به صورت دیسکت و از طریق اینترنت نیز قابل دسترسی است).

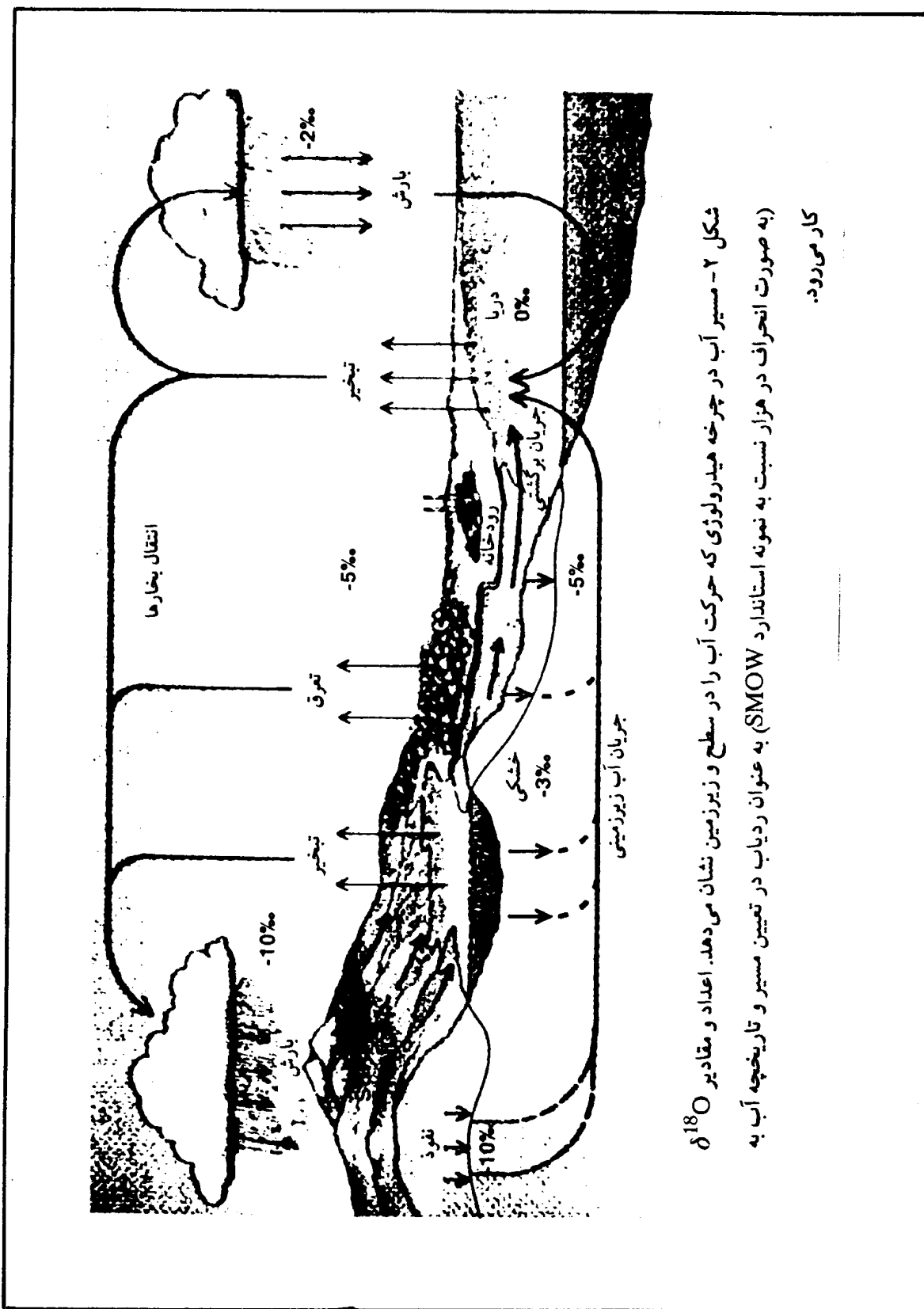
تغییرات کوچک در نسبت ایزوتوپی به وسیله دستگاههای مدرن با حساسیت بالا قابل اندازه‌گیری است.

انواع ایزوتوپی ملکول آب عبارتند از:

$HD^{18}O - H_2^{18}O - D_2^{17}O - HD^{17}O - H_2^{17}O - D_2^{16}O - HD^{16}O - H_2^{16}O - D_2^{18}O$   
در آبهای طبیعی موجود است ولی با توجه به وفور طبیعی ایزوتوپها، تنها ملکولهای  $H_2^{18}O - HD^{16}O$  مهم و قابل اندازه‌گیری هستند. به همین دلیل این مباحث شامل وفور نسبی در جفت ایزوتوپهای  $^{18}O/^{16}O$  از یک طرف و D/H از طرف دیگر است. به دلیل غلظت اندک ایزوتوپها در آبها و سایر ترکیبات طبیعی معمولاً نسبت ایزوتوپی آنها مستقیماً اندازه‌گیری نمی‌شود.

1 - International Atomic Energy Agency

2 - Global Network for Isotopes in Precipitation



شکل ۲- مسیر آب در چرخه هیدرولوژی که حرکت آب را در سطح و زیرزمین نشان می دهد. اعداد و مقادیر  $\delta^{18}O$  (به صورت انحراف در هزار نسبت به نمونه استاندارد SMOW) به عنوان ردیاب در تعیین مسیر و تاریخچه آب به کار می رود.

بلکه تفاوت نسبی در نسبت ایزوتوپ سنگین به سبک (وافرتر) نمونه در مقایسه با یک نمونه مرجع یا استاندارد تعیین می‌شود. این تغییرات با حرف  $\delta$  نمایش داده می‌شود و به وسیله دستگاه اسپکترومتر جرمی مخصوص نسبت ایزوتویی (IRMS) با دقت و حساسیت زیاد در برخی از آزمایشگاههای تخصصی جهان قابل اندازه‌گیری است.

$$\delta = \frac{\text{مرجع R نمونه R}}{\text{مرجع R}}$$

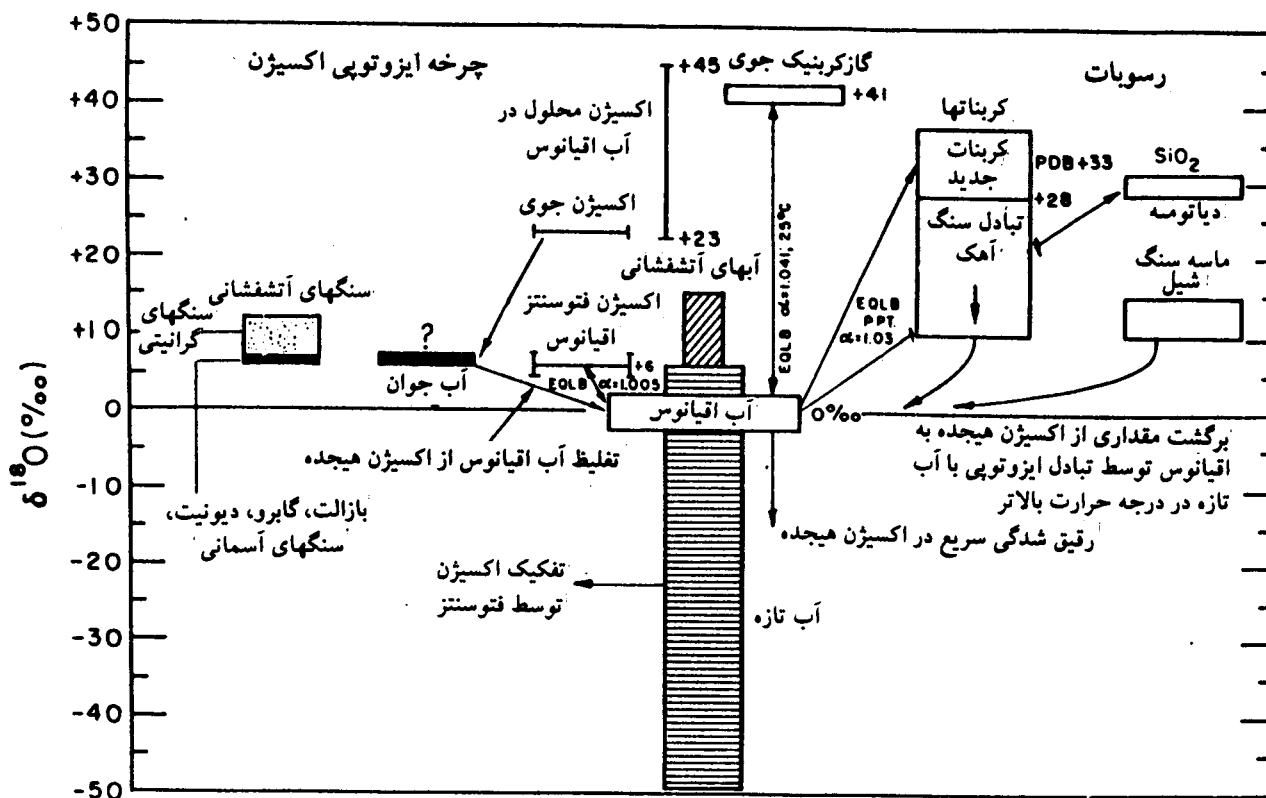
Rها در حالت آب نسبت غلظت ایزوتوپهای اکسیژن  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  یا هیدروژن D/H هستند. در این اندازه‌گیری مقادیر مثبت نشان‌دهنده سنگین‌تر بودن نمونه از لحاظ ایزوتویی در مقایسه با مرجع بوده و مقادیر منفی در مورد نمونه‌هایی است که از نظر ایزوتویی کاهش یافته و در نتیجه ایزوتوپ سبک بیشتری دارد.

چون تفاوت بین نمونه و مرجع خیلی کوچک است،  $\delta$  به صورت انحراف در هزار (‰) نسبت به مرجع یا استاندارد سبک بیان می‌شود. دقت اندازه‌گیری دیوتریوم و اکسیژن ۱۸ به ترتیب ۱٪ و ۰/۱٪ است.

نظر به اینکه بیشترین مقدار آب موجود بر روی زمین (۹۸٪) در اقیانوسهاست مناسبترین استاندارد مورد استفاده برای اندازه‌گیری D و  $^{18}\text{O}$  با عنوان SMOW تهیه شده (استاندارد میانگین آب اقیانوسها) که نسبت ایزوتویی D و  $^{18}\text{O}$  در آن مشابه آب اقیانوسها است و مرجع مشترک بین‌المللی است و به کار گرفتن آن باعث شده تا نتایج تمام آزمایشگاههای جهان قابل مقایسه باشد. غلظت D و اکسیژن-۱۸ موجود در آب اقیانوس حدوداً ثابت و برابر ۳۱۰ ppm و ۱۹۹۰ ppm به ترتیب برای HDO و  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  است و مقایسه نمونه‌ها با آن چگونگی فرآیندهای چرخه آب را قابل تفسیر می‌کند (شکل شماره ۳).

وقتی که آب در اثر میعان یا تبخیر تغییر حالت می‌دهد نسبت ایزوتویی در آن به دلیل اختلاف فشار بخار و سرعت پخش تغییر پیدا می‌کند. بخار آب در حال تعادل با فاز مایع کاهش ایزوتوپ سنگین نسبت به فاز مایع پیدا می‌کند. مقدار این تغییر نسبت ایزوتویی نسبت عکس با درجه حرارت محیط دارد. در نتیجه تغییرات فصلی در ترکیب ایزوتویی نزولات جوی نیز دیده می‌شود یعنی بارش ماههای سردتر هر ناحیه از نظر ایزوتوپهای پایدار سبکتر است. چنین تغییری در ارتفاعات نیز دیده می‌شود به این معنا که بارش نقاط مرتفع‌تر سبکتر از بارش مناطق کم ارتفاع است.





شکل ۳- توزیع اکسیژن ۱۸ در مواد طبیعی

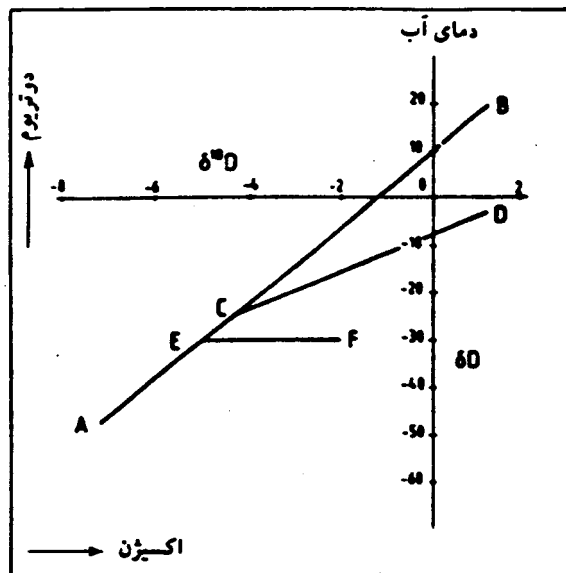
همچنین بارش قاره‌ها نسبت به بارش سواحل کاهش ایزوتوپی نشان می‌دهد. از این مسئله در تحقیقات هیدرولوژی خیلی استفاده می‌شود. برعکس موارد ذکر شده برای حالت میعان، در فرآیند تبخیر نیز ابتدا ایزوتوپهای سبکتر تبخیر می‌شوند. در نتیجه آب باقیمانده به تدریج از نظر ایزوتوپی تغلیظ می‌شود. یعنی نسبت ایزوتوپهای سنگین افزایش می‌یابد و مقدار این تغلیظ بستگی به درجه حرارت، رطوبت نسبی اتمسفر و بیلان هیدرولیکی آبهای سطحی دارد. این ترکیب ایزوتوپ پایدار آنها وابسته به زمان نبوده یعنی در اثر مرور زمان کم نمی‌شود (در مقایسه با رادیو ایزوتوپها) و می‌توان در مواردی که تغییرات فصلی تحت شرایط مساعدی بر آن اثر گذاشته باشد با بررسی این تغییرات به زمان تغذیه آب پی برده یا مدت زمان توقف آب زیرزمینی درون آبخوان را به دست آورد. تغلیظ اکسیژن ۱۸ حدود  $\frac{1}{10}$  تغلیظ در دیوتریوم است. تبادل ملکولی بین آبهای سطحی و بخار آب موجود در اتمسفر نقش مهمی در فرآیند تغلیظ ایزوتوپی دارد. مقادیر دیوتریوم و اکسیژن هیجده در آبهای طبیعی از رابطه عمومی زیر پیروی می‌کنند:

$$\delta D = a\delta^{18}O + d \quad (1)$$

نمایش این معادله به صورت خط مستقیم خواهد بود،  $a$  شیب این خط و  $d$  عرض از مبدأ خط که اصطلاحاً دیوتریوم

مازاد<sup>۱</sup> گفته می‌شود. برای آبهای جوی و بارندگی و آبهایی که تحت تأثیر تبخیر محسوس قرار نگرفته‌اند مقدار a برابر عدد هشت و مقدار d بین اعداد ۱۰ تا ۲۲ بدست آمده است.

در نمودار شماره ۲ خط AB نمایش تغییرات  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta\text{D}$  در آبهای جوی و بارندگی است و آبهایی که تبخیر چندانی نداشته‌اند نیز روی این خط قرار خواهند گرفت.



نمودار ۲- میانگین  $^{18}\text{O}$  و D نزولات جوی جهانی

آبهای تحت تأثیر تبخیر خارج از خط AB و روی خط CD واقع خواهند شد که شیبی بین ۴ تا ۶ دارد. محل تقاطع این دو خط یعنی C ترکیب ایزوتوپی آب سطحی را قبل از تبخیر نشان می‌دهد. آبهای گرم سیستم ژئوترمال روی خط EF قرار خواهند گرفت که نمایانگر تغییر نامحسوس D و تغییر بیشتر در  $^{18}\text{O}$  هستند و با افزایش حرارت به طرف راست این خط می‌رسند.

### ۳-۲ بررسی اهداف ردیابی و برنامه‌ریزی

در مرحله برنامه‌ریزی برای انجام موفق عملیات ردیابی در مسیر اهداف منظور شده یک طرح، ابتدا لازم است کلیه مطالعات انجام گرفته توسط یک تیم متشکل از متخصصین مختلف از جمله هیدرولوژیست، هیدروژئولوژیست، هیدروشیمیست و متخصصین ایزوتوپی و در خیلی موارد مهندسین فیزیک خاک، مینرالوژیست و متخصص ریاضی مورد بررسی قرار گیرد. در صورتی که نیاز به عملیات ردیابی تایید شد، باید حدود منطقه مورد بررسی، منابع آب قابل دسترسی منطقه، روش ردیابی مناسب، عناصر و مواد ردیاب قابل استفاده نیز تعیین شود.

امروزه تعداد زیادی از ردیابهای محیطی در بررسیهای هیدرولوژیکی آبهای زیرزمینی به کار می‌روند مثل: یونهای مختلف محلول در آب، ایزوتوپهای پایدار هیدروژن -۲ و اکسیژن -۱۸، تریتیوم و کربن چهارده طبیعی (یا محصول فعالیتهای بشری)، رادیوم، هلیوم و آرگون و گازهای بی‌اثر حل شده در آتمسفر که هر کدام از این ردیابها اطلاعات ویژه‌ای در اختیار می‌گذارند. مجموعه آنها می‌تواند جوابگوی سئوالاتی در مورد کمیت آب، چگونگی اختلاط آبها در یک سیستم، قابلیت تغذیه، ناحیه تغذیه، سن آب، منشاء املاح حل شده، تاریخچه حرارتی، حدود، وسعت آبخوان و حجم آبخوان باشد.

چون یک سیستم در شکل سه بعدی آن در طی زمان خیلی متغیر است در نتیجه با نمونه‌برداری از کلیه منابع آب موجود در منطقه مورد بررسی، همچنین تکرار نمونه‌برداری از هر منبع در فصول مختلف، و نمونه‌برداری در ضمن آزمایشهای پمپاژ و نمونه‌برداری از عمقهای مختلف در حفاری می‌توان اطلاعات فراوان و جامعی به دست آورد. با وجود تحقیقات گسترده در چند دهه اخیر، استفاده از ردیابهای مصنوعی به دلیل وسعت سیستمهای طبیعی تحت بررسی و زمان طولانی برای طی مسیر آبها جوابگوی مسائل نبوده و محدودیت دارد، در حالی که این نکات محدودیتی برای ردیابهای محیطی مثل یونهای محلول، گازها و غلظت D و O، T، O، -۱۴، C، هلیوم، آرگون، رادیوم، گازهای بی‌اثر و پارامترهای فیزیکی مثل دبی و درجه حرارت ایجاد نمی‌کند. البته تعداد آنالیزها و تکرار نمونه‌برداریها بستگی به زمان، هدف و بودجه هر پروژه خواهد داشت.

### ۲-۳-۱ نمونه‌برداری فصلی

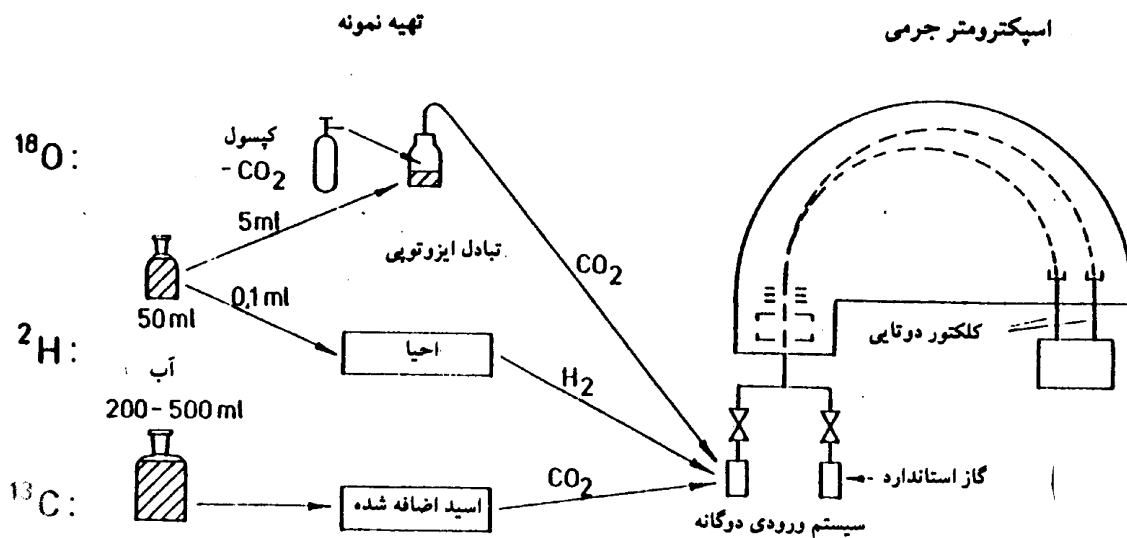
- تکرار نمونه‌برداری یک چشمه یا چاه اطلاعات باارزشی در مورد رفتار و ساختار یک منبع به ما می‌دهد از جمله تغذیه مجدد، وجود یک یا ترکیب چند آب چنانچه تکرار نمونه‌برداری تغییر غلظت در طول زمان را نشان دهد، می‌تواند به دلیل تغذیه سریع در فصل بارندگی باشد.
- تکرار نمونه‌برداری ضمن آزمایش پمپاژ و آنالیز آن توصیه می‌شود تا از اختلاط آبهای نامطلوب (آب دریای مجاور یا رودخانه) ممانعت شود.
- نمونه‌گیری در زمان پمپاژ می‌تواند نشان‌دهنده هموزن بودن کمی آب، درجه اختلاط آبهای جدید یا قدیمی باشد (مثلاً پمپ کردن زیاد در آبخوانهای ساحلی) منجر به شور شدن آب شود در حالی که با پمپ کمتر، زمانی طولانی قابل بهره‌برداری باشد). نمونه‌گیری از عمقهای مختلف مقاطع عمودی از آبخوانهای منطقه را به دست می‌دهد که می‌تواند عمق مطلوب حفاری را تعیین کند. در مواردی وجود سفره‌های کم‌عمق و مناسب برای چاههای کم‌عمق را مشخص کرده و تصویر کامل سه‌بعدی از ساختار رژیم آبی زمان حفاری یک چاه، امکان نمونه‌برداری لایه به لایه آب را برای آنالیز ایزوتوپی و شیمیایی ایجاد می‌کند.
- در نمونه‌گیری از منابع آب برای آنالیز ایزوتوپی کلیه نکات متداول در نمونه‌گیری مناسب آنالیز شیمیایی باید اعمال شود و علاوه بر آن موارد زیر را باید در نظر داشت:
- نمونه تهیه شده برای آنالیز ایزوتوپی نباید با هوا در ارتباط باشد یعنی ظروف کاملاً پر شده و در آن محکم بسته شود.

- به علت احتمال تبادل ایزوتوپی از طریق پلی اتیلن ظروف شیشه‌ای ترجیح داده می‌شود و استفاده از ظروف پلی اتیلن فقط برای حداقل زمان کوتاه توصیه می‌شود.
- نمونه بدون شناسنامه ارزش ندارد و لازم است تمام مشخصات از جمله تاریخ، محل، عمق نمونه برداری، آبخوان، درجه حرارت و pH آن روی ظرف یادداشت شود.
- نمونه برداری از چشمه باید در نزدیک‌ترین فاصله ممکن از مبدا چشمه باشد و دقت شود که از آبگیر و یا محل تجمع آب در نزدیک چشمه استفاده نشود. چون به دلیل احتمال تبخیر و تبادل ایزوتوپی در نتایج خطا ایجاد خواهد شد.
- در نمونه برداری از چاه باز و کم عمق چون احتمال تبخیر زیاد است نمونه برداری ترجیحاً باید از چاه مورد بهره برداری مداوم انجام گیرد و چنانکه امکان داشته باشد آب داخل چاه تخلیه شود تا از آب تازه آن نمونه‌گیری شود.
- در چاههای باز نمونه سطحی فقط معرف لایه سطحی آب است. بخصوص در منابع قطور و عمق دار یا مواردی مثل مجاورت رودخانه، ترکیب ایزوتوپی لایه به لایه آب کاملاً متفاوت خواهد بود و در نظر داشتن این مسئله حائز اهمیت است.
- لایه بندی سن<sup>۱</sup> با عمق در یک آبخوان نیز می‌تواند در مرحله تفسیر مسئله آفرین باشد.
- نمونه برداری از چاههای پمپ دار باید همراه کلیه مشخصات چاه باشد مثل: محل شبکه چاه<sup>۲</sup> و آبخوانها و همچنین در صورت دسترسی اطلاعاتی در مورد درجه حرارت، شوری، برای تعیین لایه نمونه برداری شده مفید خواهد بود.

## ۴-۲ روشها و سیستمهای اندازه گیری ایزوتوپهای پایدار در نمونه‌های آب

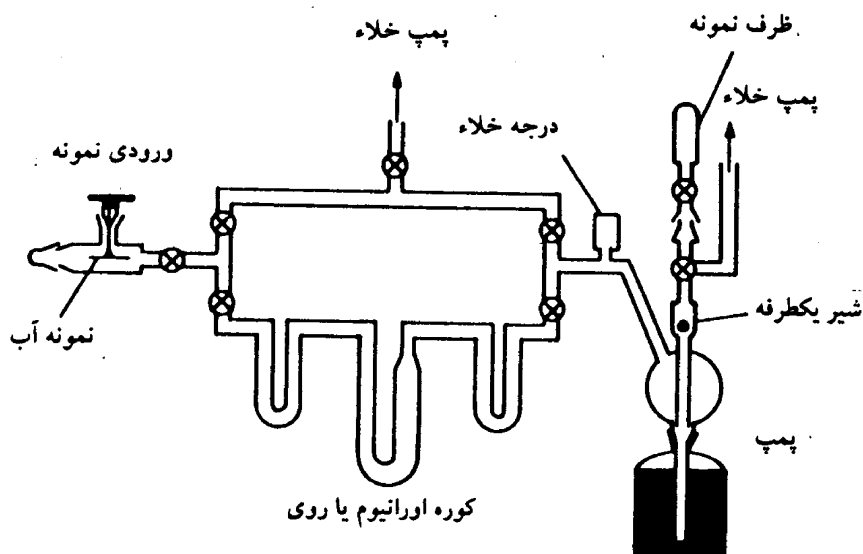
در آب طبیعی تقریباً ۲۰۰۰ مولکول  $H_2O^{18}$  و ۳۲۰ مولکول  $H_2O^{16}$  در بین  $10^6$  (یک میلیون) مولکول آب  $H_2O^{16}$  وجود دارند. این اعداد و ارقام متأثر از پدیده « اثر ایزوتوپی » ناشی از تغییر حالت و تغییر فاز مولکولهای آب ذکر شده (با فرمول ایزوتوپی متفاوت و هر کدام با فشار بخار و نقطه ذوب مشخصه خود) و تبادل ایزوتوپی ضمن برخورد با سنگها است.

دقت اندازه گیری لازم برای تشخیص این تغییر نسبت ایزوتوپی ( $^2H/^1H$ ،  $^{18}O/^16O$ ،  $^{13}C/^12C$ ) فقط با « دستگاه اسپکترومتر جرمی مخصوص «فونرنسبی ایزوتوپها» دارای سیستم ورودی دوگانه و سیستم کلکتور دوگانه یا سه گانه قابل دسترسی است (شکل شماره ۴).

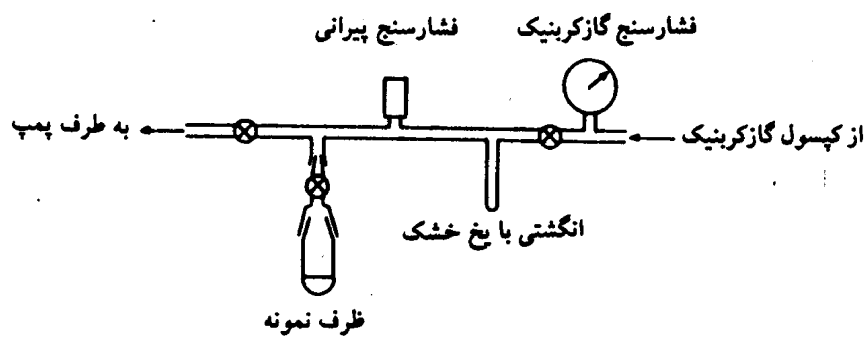


شکل ۴- روش اندازه‌گیری ایزوتوپیهای محیطی پایدار  $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  و  $^{13}\text{C}$

- نمونه موردنظر باید به صورت گاز هیدروژن یا  $\text{CO}_2$  وارد دستگاه شود.
- در تهیه هیدروژن حدود ۰/۱ میلی لیتر از نمونه آب در حرارت  $700^\circ\text{C}$  توسط فلز روی یا اورانیوم احیا شده و گاز هیدروژن تولید می‌شود که بعد از تخلیص وارد دستگاه می‌شود.
- برای سنجش  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  نمونه آب موردنظر در مجاورت گاز  $\text{CO}_2$  به حالت تعادل ایزوتوپی رسیده و سپس گاز  $\text{CO}_2$  به تعادل رسیده بعد از مراحل تخلیص و رطوبت‌گیری برای اندازه‌گیری نسبت ایزوتوپی (در مقایسه با استاندارد SMOW)  $\delta^{18}\text{O}$  وارد دستگاه اسپکترومتر جرمی می‌شود (شکل شماره ۵).



شکل ۵- نمودار تهیه نمونه برای ایزوتوپ هیدروژن در آب



شکل ۶- نمودار خط تهیه برای ایزوتوپ اکسیژن در آب همراه با روش تعادل با  $\text{CO}_2$

$$\delta = \frac{R_s - R_{st}}{R_{st}} \quad (2)$$

$R_s$  = نسبت ایزوتوپی ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}, \text{D}/\text{H}$  یا  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) در نمونه

$R_{st}$  = نسبت ایزوتوپی در استاندارد

مقدار  $\delta$  به صورت انحراف در هزار (‰) نسبت به استاندارد است.

خطای متوسط<sup>۱</sup> در اندازه‌گیری  $\delta\text{D}$  کمتر از  $\pm 0.15\%$  و برای  $\delta^{18}\text{O}$  کمتر از  $\pm 0.15\%$  است.

در هر آزمایشگاه لازم است که استاندارد کاری داخلی برای کار روزانه ساخته و آن را با  $^2\text{SMOW}$  کالیبره کرد.

### ۳- رادیوایزوتوپهای محیطی

#### ۳-۱ تئوری و اصول کاربرد رادیوایزوتوپهای محیطی

ایزوتوپهای محیطی به صورت جزئی از مولکول آب بوده و یا به صورت مواد محلول در آنها حمل می‌شوند. رادیوایزوتوپها بر طبق قانون تجزیه ( فروپاشی )<sup>۱</sup> مواد رادیواکتیو کاهش می‌یابند.

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (۳)$$

$N$  = تعداد اتمهای عنصر رادیواکتیو در زمان  $t$

$N_0$  = تعداد اتمهای عنصر رادیواکتیو در زمان  $t = 0$

$\lambda$  = " ثابت فروپاشی " که برای هر رادیوایزوتوپ ثابت و مشخص است.

سرعت فروپاشی یک رادیوایزوتوپ به وسیله نیمه عمر آن مشخص می‌شود ( $T_{1/2}$ )، که

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (۴)$$

و آن زمان لازم برای اینکه تعداد هسته‌ها به نصف کاهش یابد است.

( نیمه عمر عناصر رادیواکتیو مختلف از دهم ثانیه تا چند میلیون سال متغیر است).

واحد رادیواکتیو (Bq) بکرل<sup>۲</sup> است که معادل مقداری از هر ماده که با سرعت یک فروپاشی در ثانیه<sup>۳</sup> dps تجزیه شود.

قانون تجزیه رادیوایزوتوپها در طی زمان و به طور طبیعی اساس و مبنای ردیابی و سن‌یابی با رادیوایزوتوپها در هیدرولوژی است. چون برآورد بیلان آنها برای توسعه منابع آب و در نهایت بهره‌برداری کافی از آنها با سن آب و زمان تغذیه آبخوان بستگی نزدیک دارد. بنابراین تعیین سن آنها همراه با دیگر دانسته‌های هیدروژئولوژی بررسی کاملتر و دقیقتری از منابع آب یک منطقه را عملی می‌سازد.

مبنای سن آب زیرزمینی از زمانی است که آبهای جوی مانند باران و برف وارد آب زیرزمینی می‌شوند. تعیین سن منحصرأ با استفاده از رادیوایزوتوپهای محیطی انجام می‌گیرد.

1 - Decay

2 - Becquerel

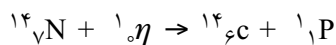
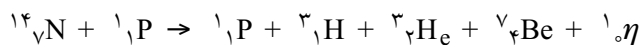
3 - Disintegration Per Second

مهمترین رادیوایزوتوپهای محیطی مورد استفاده در هیدرولوژی عبارتند از :  
 هیدروژن با جرم اتمی ۳ یا تریتیوم در رطوبت جو و کربن چهارده یا رادیوایزوتوپ کربن به طور طبیعی در جو وجود داشته و در چرخه هیدرولوژی وارد می‌شوند.

این رادیوایزوتوپها به دو شکل طبیعی (تولید به صورت طبیعی) یا مصنوعی (تولید توسط بشر از طریق آزمایشهای هسته‌ای و ترمونوکلتر) در جو ایجاد می‌شوند.

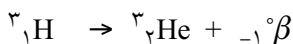
### ۳-۱-۱ تریتیوم (T, $^3\text{H}$ ) و پیدایش آن در چرخه آب

تریتیوم ایزوتوپ رادیواکتیو هیدروژن با جرم اتمی ۳ و نیمه عمر ۱۲/۴۳ سال است، که در اثر برخورد پروتونهای پرنرژی یا نوترونهای ثانویه اشعه کیهانی با اتمهای ازت جو زمین طبق واکنشهای هسته‌ای زیر ایجاد می‌شود. بعد از تولید، اکسیده شده و به صورت آب و بخار در جو زمین وجود دارد. سرعت تولید آن در آتمسفر  $0.25 \text{ atom/cm}^2/\text{s}$  بر سانتی متر مربع بر ثانیه است.



قسمت اعظم تریتیوم ایجاد شده در فضا به سرعت اکسیده شده و به صورت HTO وارد سیکل هیدرولوژی می‌شود. واحد اندازه گیری تریتیوم با علامت T.U. و با عنوان « واحد تریتیوم » نامیده می‌شود.

یک T.U. دارای نسبت ایزوتوپی  $^3\text{H}/^1\text{H} = 10^{-18}$  است و یک لیتر آب با غلظت ۱ T.U. معادل  $7/2 \text{ dpm}$  (تجزیه در دقیقه) و  $0.12 \text{ bq}$  اکتیویته است. تریتیوم با پرتوهای بتا (با انرژی ماکزیمم  $E_{\text{max}}=18 \text{ kev}$ ) تجزیه شده به هلیوم ۳ ایزوتوپ پایدار هلیوم تبدیل می‌شود.



منشاء دیگر تولید تریتیوم محیط، در اثر فعالیتهای بشر و نتیجه آزمایشهای هسته‌ای از سال ۱۹۵۲ تا سال ۱۹۶۳ (زمان منع آزمایشات هسته‌ای در جو) است. این انفجارات سطح طبیعی و تعادل ایزوتوپی اتمسفر را مخدوش ساخته ولی این میزان افزایش رادیواکتیویته در اثر انفجارات اگرچه ساخته بشر است چون بعد از توزیع آن،



مقدار ریزش و ترکیب آنها با محیط در کنترل بشر نیست لذا این میزان افزوده نیز جزء رادیوایزوتوپهای محیطی محسوب می شود.

مقدار تریتیوم موجود در منابع آب متناسب با مقدار آن در بارندگی است. تریتیوم در محاسبه میانگین سن آبهای زیرزمینی در نواحی مختلف به کار می رود به طوری که مقدار آن در آب زیرزمینی با مقدار آن در نزولات جوی منطقه با یک روش ساده قابل مقایسه و تفسیر است.

افزایش تریتیوم در یک منبع آب زیرزمینی بیش از  $50 \text{ T.U.}$  نمایانگر تغذیه جدید است. در منابعی که مقدار  $T$  ناچیز باشد کمتر از حد سنجش (مثل بعضی از مخازن کارستی)، قدمت آب بیش از  $50$  سال برآورد می شود.

### ۳-۱-۱-۱ بررسی و تفسیر مقادیر تریتیوم در آبهای زیرزمینی

میانگین غلظت طبیعی تریتیوم در باران قبل از آزمایشهای هسته‌ای (بسته به شرایط جغرافیایی) بین  $10 \text{ T.U.}$  تا  $5$  بود. در حالی که بعد از آزمایشات هسته‌ای از سال  $1952$  این مقدار افزایش پیدا کرد و در سال  $1963$  به حدود  $800 \text{ T.U.}$  در نیمکره شمالی و  $60 \text{ T.U.}$  در نیمکره جنوبی رسید. این ارقام پس از توقف آزمایشها کاهش یافته و به حد کنونی رسیده است.

وجود تریتیوم حاصل از فعالیتهای هسته‌ای و تریتیوم طبیعی در باران، امکان تشخیص سن آب زیرزمینی را به ما داده و می توانیم بگوییم تغذیه آن قبل یا بعد از سال  $1963$  بوده، یعنی بیش از چهار دهه یا جوانتر از  $40$  سال است. این روش دقت چندانی ندارد ولی راهنمای خوبی برای آگاهی از سن آب زیرزمینی و دسته بندی آنهاست.

عنوان «سن تریتیوم منفی» برای آبهای زیرزمینی با مقدار خیلی کم و غیر قابل سنجش تریتیوم یعنی قبل از بمبهای هسته‌ای و عنوان «سن تریتیوم مثبت» برای آبهای زیرزمینی با تریتیوم بالا و بعد از بمبهای هسته‌ای پیشنهاد شده است.

تعیین تریتیوم در سن یابی با کربن چهارده و در تایید آن حائز اهمیت است. نتایج منتشره آژانس انرژی اتمی از یکصد ایستگاه نمونه برداری نمایانگر اثر تغییرات فصلی با حداکثر در اواخر بهار و حداقل آن در زمستان است. غلظت تریتیوم بیشتر در عرض جغرافیایی بالاتر، مناطق مرتفع و همچنین نواحی قاره‌ای نسبت به سواحل است.

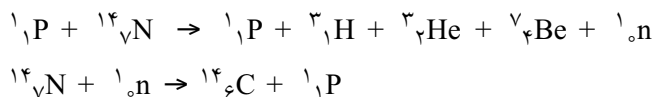
غیر از کاربرد در تعیین سن، از تریتیوم همچنین می‌توان به عنوان ردیاب مداوم<sup>۱</sup> یا ردیاب مصنوعی استفاده کرد. مثلاً در حالت اول تأثیر مخزن یک سد یا دریاچه در منابع مجاور را می‌توان به وسیله وجود مقدار بالای تریتیوم در آب منابع نزدیک و مقدار کم آن در منابع دورتر نشان داد. در حالت دوم تزریق تریتیوم به صورت HTO در یک سیستم و پی‌گیری حرکت آن همراه آب است که در بحث ردیابهای مصنوعی توضیح داده می‌شود.

### ۳-۱-۱-۲ روشهای اندازه‌گیری تریتیوم (T)

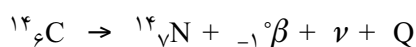
اندازه‌گیری رادیواکتیویته تریتیوم در نمونه آب طبیعی به دلیل غلظت خیلی کم آن مستقیماً مقدور نیست و لازمست که ابتدا نمونه آب تا بیش از یکصد برابر تغلیظ شود. این تغلیظ معمولاً با الکترولیز نمونه انجام می‌گیرد. در یک سیستم الکترولیز در تجزیه آب ابتدا ایزوتوپهای سبکتر به صورت گاز هیدروژن خارج می‌شود و کلیه تریتیوم موجود در نمونه در حجم کاهش یافته نهایی باقی خواهد ماند. سپس نمونه تغلیظ شده با دستگاه شمارش مایع اندازه‌گیری می‌شود در این روش حد قابل سنجش ۱ T.U. و دقت اندازه‌گیری  $\pm 1\%$  است. در روش دیگر از نمونه آب در سیستم ویژه‌ای بنزن  $C_2H_6$  تهیه شده و سپس بنزن تهیه شده در دستگاه شمارش مایع<sup>۲</sup> اندازه‌گیری می‌شود. مقدار قابل سنجش تریتیوم در روش شمارش مستقیم با دستگاه سنتیلاسیون مایع برابر  $\pm 10$  T.U. در دستگاه سنتیلاسیون بعد از تغلیظ  $\pm 1$  T.U. و در سیستم شمارنده گازی (به صورت هیدروژن یا متان) بعد از تغلیظ  $\pm 0.2$  T.U. است. البته افزایش حساسیت در هر مرحله معادل افزایش شدید در هزینه آنالیز خواهد بود.

### ۳-۱-۲ کربن چهارده و پیدایش آن در چرخه آب

کربن چهارده ایزوتوپ کربن با نیمه عمر ۵۷۳۴ سال با پرتو دهی  $\beta$  ( $E_{max} = 156 \text{ keV}$ ) است که در فعل و انفعالات شیمیایی همانند کربن ۱۲ (کربن معمولی) عمل می‌کند. این عنصر در آتمسفر فوقانی در اثر برخورد نوترونهای ثانویه اشعه کیهانی با اتمهای ازت جو زمین طبق واکنش زیر ایجاد می‌شود.

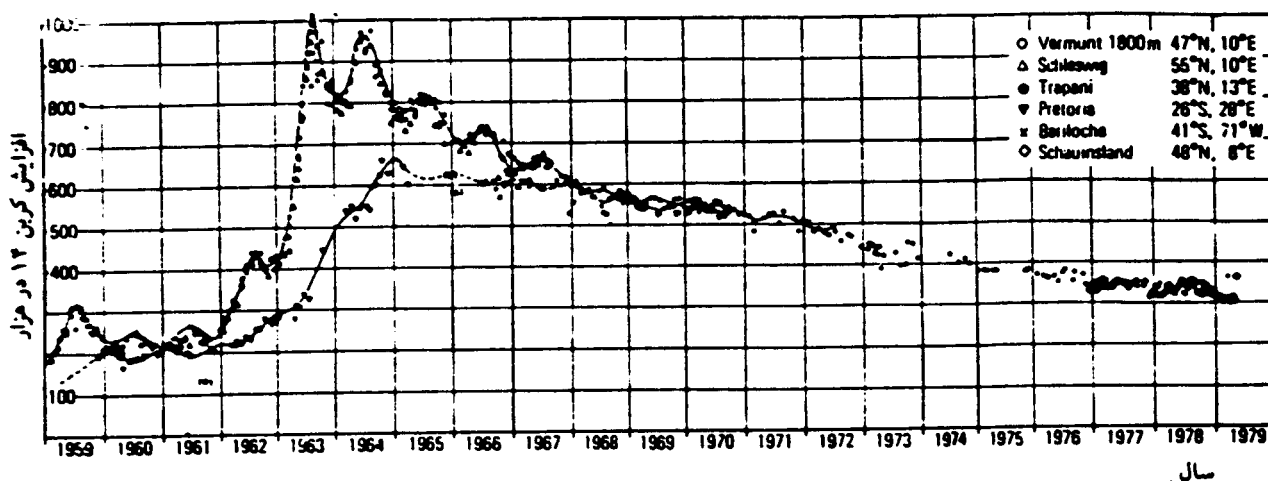


بعد از تولید با اکسیژن ترکیب و به صورت بی‌اکسید کربن در جو وجود دارد. این عنصر با تشعشع بتا تجزیه شده و به ازت تبدیل می‌شود.



تولید و تجزیه (فروپاشی) این رادیوایزوتوپ در جو به حالت تعادل رسیده و تا زمانی که موجودات زنده و منابع آب با گازکربنیک جو در ارتباط بوده و بین آنها تبادل صورت گیرد نسبت ثابتی بین اتمهای کربن-۱۴ و کربن-۱۲ موجود است. به طوری که در آبها و املاح محلول آنها این نسبت ثابت و مستقل از زمان و مکان است. مقدار این نسبت  $\frac{C-14}{C-12}$  حدود  $10^{-12}$  بوده و به نام کربن-۱۴ جدید خوانده می‌شود. این مقدار در آبها و اجسام محلول در آنها تا زمانی که با گازکربنیک جو در تبادل هستند ثابت می‌ماند. به محض جدا شدن آنها و عدم امکان تبادل با جو، کربن چهارده موجود آنها شروع به تجزیه کرده و مقدار آن به مرور زمان کاهش می‌یابد. از این خاصیت می‌توان در آبشناسی برای تعیین سن آبهای زیرزمینی، رسوبگذاریهای جدید و زمان اقامت آب در آبخوان و پاره‌ای از مسائل دیگر استفاده کرد.

منشاء دیگر تولید کربن چهارده در اتمسفر آزمایشهای هسته‌ای است که در سال ۱۹۶۳ حداکثر آن دیده شده (شکل شماره ۷) مقدار کربن چهارده جوی نهایتاً از سال ۱۹۶۸ در جهان به حالت تعادلی رسیده است.



شکل ۷- نمودار توزیع کربن چهارده در گازکربنیک اتمسفر که حداکثر آن در سال ۱۹۶۳ مربوط به آزمایشهای هسته‌ای است.

### ۳-۱-۲-۱ بررسی و تفسیر مقادیر C-۱۴ در آبهای زیرزمینی

تعیین سن دقیق آبهای زیرزمینی توسط سنجش کربن چهارده آن به علت انحلال و تبادل کربن خیلی قدیمی خاک و سازندهای آبخوان و تغییرات ناشی از آن در کربن طبیعی باران بسیار پیچیده است. مشکل دیگر در تغییر حالت تعادل طبیعی به دلیل کاهش  $CO_2$  اتمسفر به وسیله بشر در اثر مصرف سوختهای فسیلی و همچنین مقدار کربن چهارده اضافه شده در اثر تخریب نباتی و آزمایشهای هسته‌ای است. در بیشتر تحقیقات کنونی تفسیر کربن چهارده پس از تصحیح آن توسط مقدار  $^{13}C$  ترکیبات مربوطه انجام می‌شود. تاکنون مدل رضایت بخشی برای سن‌بایی کربن چهارده آبهای زیرزمینی توسعه پیدا نکرده است.

به هر حال دو دوره سنی قابل تشخیص است. سن کربن مثبت " برای کلیه منابعی که C-14 قابل تشخیص داشته باشند در واقع حداقل ۲pmc<sup>۱</sup> با توجه به تجزیه و فروپاشی اکتیویته و نیمه عمر کربن چهارده (۵۷۳۰ سال) هر منبع آبی با کربن چهارده بیش از ۲pmc جوانتر از ۳۰۰۰۰ سال است. «سن کربن منفی» آبهای است که کربن آن کمتر از حد قابل اندازه گیری و در نتیجه سن آن بیش از ۳۰۰۰۰ سال است. این طبقه بندی برای تشخیص آبهای غیرفعال از نظر هیدرولوژیکی سودمند است. استفاده همزمان از نتایج آنالیز تریتیوم و C-14، آبها را از نظر زمانی به سه گروه تقسیم می کند:

الف - بعد از سال ۱۹۵۴ یعنی سن بین ۰-۴۵ سال با سن T و C<sup>۱۴</sup> مثبت که تفسیر آن تغذیه محلی یا حرکت کارستی است.

ب- قبل از سال ۱۹۵۴ و جوانتر از ۳۰۰۰۰ سال که مشخصه آن سن T منفی و C مثبت است و شامل تمام آبهای اکتیو فعال است.

ج- آبهای با سن بیش از ۳۰۰۰۰ سال با سن C-14 منفی که مشخصه آبهای راکد و غیرفعال است. غیر از استفاده در تعیین سن، C-14 را می توان به عنوان ردیاب معمولی به کار برد. مثلاً " تغذیه از منابع آب باز مجاور با C-14 بالا تا حدود ۱۲۰ pmc کاملاً" قابل تشخیص است.

### ۳-۲-۱- روشهای اندازه گیری کربن چهارده

غلظت بسیار کم رادیوایزوتوپها در چرخه آب لزوم استفاده از دستگاههای اندازه گیری بسیار دقیق را ایجاب می کند. کلیه تشعشعات حاصل از رادیوایزوتوپهای مورد استفاده در هیدرولوژی سبب یونیزاسیون درگازها می شوند. این ویژگی برای اندازه گیری و سنجش آنها به کار می رود چون تعداد یونهای مثبت و الکترونها تشکیل شده در اثر یونیزاسیون در یک حجم ثابت از گاز بستگی مستقیم به مقدار اشعه عبور کرده از آن دارد. یونیزاسیون گاز یک جریان ضعیف بین الکترونهاست که قابل اندازه گیری به وسیله دستگاه حساس اندازه گیری جریان است. ساده ترین دستگاه کنتور شمارنده GM<sup>۲</sup> است. کنتورهای نسبی<sup>۳</sup> از نظر ساختمان مشابه کنتورهای گایگر - مولر است با این مزیت که قابلیت تشخیص و حساسیت بالایی دارند.

در بیشتر آزمایشگاههای ایزوتوپی از کنتور گازی بتالوژیک<sup>۴</sup> برای اندازه گیری کربن چهارده و تریتیوم استفاده می کنند که قابلیت تشخیص و حساسیت خیلی زیادی دارد. در این سیستم تریتیوم به شکل C<sub>۲</sub>H<sub>۲</sub> و کربن چهارده به صورت CO<sub>۲</sub> اندازه گیری می شود.

1 - Percent modern carbon

2 - Geiger - Müller

3 - Proportional Counter

4 -  $\beta$  - Logic

سیستم دیگر، شمارنده مایع<sup>۱</sup> است که در آن کربن چهارده به صورت  $C_6H_6$  و نتایج با درصد نسبت به کربن چهارده مدرن به دست می‌آید. کربن -۱۴ مدرن که نشان دهنده اکتیویته ویژه آتمسفر قبل از تغییرات بشری ( رقت در اثر سوختهای فسیلی) است. این مقدار معادل اکتیویته چوب رشد کرده در اواخر قرن نوزدهم است و به همین دلیل مدرن گفته می‌شود. استاندارد مورد استفاده در این مورد اسیداکزالیک ساخته شده که اکتیویته آن  $13/56 \pm 0/07 \text{ dpm g}^{-1}$  کربن آلی است.

حداکثر دقت به دست آمده با روش شمارنده مایع  $0/01 \pm$  تا  $0/2 \pm$  درصد کربن -۱۴ مدرن است در حالی که با کنتورگازی می‌توان به دقت  $0/05 \text{ pmc} \pm$  رسید.

### ۳-۱-۳ رادیوم ۲۲۶ و سایر رادیوایزوتوپهای موجود در آب

#### ۱-۳-۱-۳ پیدایش، مقدار موجود، روشهای اندازه‌گیری و کاربرد آنها

رادیوم ۲۲۶ محصول تخریب اورانیوم ۲۳۸ است و در اثر تخریب مجدد آن رادون ۲۲۲ تولید می‌شود که غیر پایدار است. رادیوم نیمه عمر ۱۶۲۰ سال دارد ولی رادون دارای نیمه عمر خیلی کوتاهی (روز ۳/۸) است. رادیوم مشابه Ba و Ca دو ظرفیتی بوده و خصوصیات شیمیایی مشابهی دارند. در حالی که رادون گاز بی‌اثر است. هر دو آنها به وسیله اشعه  $\alpha$  منتشره آنها یا توسط اشعه گامای حاصل از دخترانشان<sup>۲</sup> با نیمه عمر کوتاه اندازه‌گیری می‌شوند. مقدار آن در آبها با پیکوکوری بر لیتر<sup>۳</sup> نشان داده می‌شود. آبهای معمولی شیرین<sup>۴</sup> حدوداً حاوی کمتر از ۵ PCi/Lit رادیوم و کمتر از ۵۰ PCi/Lit رادون هستند.

حضور اورانیوم ۲۳۸، رادیوم ۲۲۶ و رادون ۲۲۲ در مسیر ژئوشیمی آب به صورت زیر است:

سنگهای آذرین و رسوبی معمولی حاوی چند PPM اورانیوم هستند که به طور جزئی در آبهای زیرزمینی حل می‌شود. اتمهای رادیوم حاصل از تخریب رادیواکتیویته بخصوص در آبهای کلردار آسانتر حل می‌شود. رادون ایجاد شده از رادیوم حل نشده، حتی با سهولت بیشتر حل می‌شود. در نتیجه غلظت آنها در آبهای زیرزمینی از نظر رادیواکتیویته به ترتیب زیر خواهد بود.

- سن آب: زمان تماس آب با سنگهای آبخوان

- درجه حرارت: بیشتر آبهای حرارتی از نظر رادیوم غلیظ تر هستند.

1 - Liquid Scintillation

۲- عناصر حاصل از فروپاشی هسته یک رادیو عنصر، دختران آن رادیو عنصر گفته می‌شوند.

3- PCi/Lit

4 - Fresh

- وجود کلر: آبهای دارای کلر رادیوم بیشتر حل می‌کنند چون رادیوم کلراید<sup>۱</sup> شدیداً قابل حل است. رادیوم ۲۲۶ به دو طریق به عنوان ردیاب هیدرولوژیکی به کار می‌رود:
  - حضور آن در غلظت معمول  $50-100$  PCi/l نشانگر سن زیاد آب و غلظت بالای آن دلیل آب عمیق ساکن یا با حرکت خیلی کند است.
  - غالباً رادیوم به عنوان ردیاب معمولی و در تشخیص اختلاط آب ساکن و آبهای کم عمق<sup>۲</sup> مورد استفاده قرار می‌گیرد. در چنین حالتی مقدار تریتیوم مثبت و غلظت رادیوم بیشتر از معمول به دست می‌آید.
- رادون غالباً در غلظت هزار تا دهها هزار پیکوکوری بر لیتر دیده می‌شود که مربوط به آبهای گرم و معدنی است. گاهی هم در آبهای سرد تریتیوم‌دار یا متغیر فصلی دیده می‌شود. این حالت عدم ارتباط یا ارتباط ضعیف با سایر ایزوتوپهای رادیوژنیک  ${}^4\text{He}$ ,  ${}^{40}\text{Ar}$ ,  ${}^{226}\text{Ra}$  را نشان می‌دهد.
- رادون در موارد خیلی در تفسیر هیدرولوژیکی به کار رفته است.
- هلیوم-۴ از تخریب اورانیوم -۲۳۸، اورانیوم -۲۳۵ و توریوم -۲۳۲ تولید شده و به سهولت به وسیله اسپکترومتری جرمی اندازه‌گیری می‌شود. آرگون -۴۰ نیز از پتاسیم -۴۰ حاصل می‌شود و اندازه‌گیری آن به علت تداخل با آرگون -۴۰ آتمسفر مشکل است.

#### ۴- ردیابهای مصنوعی

ردیاب مصنوعی به موادی گفته می‌شود که به طور مصنوعی و به منظور شناخت سیستم هیدرولوژیکی به چرخه آب تزریق یا وارد می‌شوند.

موادی که به عنوان ردیاب مصنوعی به کار می‌روند باید دارای ویژگیهای خاصی باشند از جمله:

- ثابت بودن رفتار فیزیکی و شیمیایی آن در آب زیرزمینی
  - حلالیت خوب در آب
  - عدم جذب توسط محیط
  - عدم ایجاد هرگونه واکنش با محیط جامد اطراف یا تغییر شرایط هیدرولیکی و سایر پارامترهای محیط
  - سهولت دسترسی و هزینه مناسب
  - قابلیت تشخیص و سهولت اندازه‌گیری با حساسیت زیاد و ترجیحاً در محل
  - عدم ایجاد آلودگی بیش از حد مجاز در آب و محیط
- ردیاب یا تریسر تزریق شده در چرخه آب توسط جریان آب حمل شده و با پیگیری حضور آن اطلاعاتی در مورد محل تغذیه، جهت، سرعت و نوع جریان آب به دست می‌آید.

عمده‌ترین ردیابهای مصنوعی مورداستفاده در هیدرولوژی عبارتند از:

- مواد رادیواکتیو نظیر: کرم ۵۱ (Cr - ۵۱)، ید ۱۳۱، کبالت ۶۰ (Co-۶۰) و هیدروژن ۳ (H-۳)
- مواد قابل اکتیو شدن از قبیل ایندیوم (In)، برم (Br)، منگنز (Mn) و لانتان (La)
- مواد رنگی فلورسانس نظیر رودامین بی، اورانین، سولفورودامین
- نمکها و ترکیبات یونی مانند: نمک طعام، کلرید و برمیدهای پتاسیم، منیزیم و لیتیوم
- سایر مواد مثل هاگها، باکتریها، شناورها، مواد کف کننده و یا امواج صوتی

در شرایط متفاوت از ردیابهای مختلف می‌توان استفاده کرد. نظر به احتمال پرتودهی و مسائل ایمنی در مناطقی که از نظر امکانات حفاظت در برابر مواد پرتوزا محدودیت وجود داشته باشد، معمولاً از ردیابهای رادیواکتیو استفاده نمی‌شود مگر در حالت‌های خیلی خاص. ردیابهای رنگی و فلورسانس به علت سهولت کاربرد، حساسیت اندازه‌گیری، غلظت خیلی کم موردنیاز و عدم ایجاد آلودگی محیط و آب کاربرد روزافزونی پیدا کرده است. روشهای مختلف اندازه‌گیری در طی سالیان، توسعه زیادی پیدا کرده است.

اولین آزمایش ردیابی آب زیرزمینی تقریباً دو هزار سال قبل توسط فیلیپ<sup>۱</sup> گزارش شده است. وی با ریختن مقداری گاه به داخل یک دریاچه و دریافت آن در چشمه پایین دست واقع در سراب رودخانه‌ای آزمایش خود را موفقیت آمیز کرد. لیکن مازور<sup>۲</sup> در سال ۱۹۷۶ با استفاده از اندازه‌گیری شیمیایی و ایزوتوپی ارتباط آب زیرزمینی بیان شده توسط فیلیپ را تا حد زیادی غیرممکن دانست. در همان زمان اشترابو<sup>۳</sup> آزمایشهای ردیابی در نواحی کارستی را تشریح کرد. فورد<sup>۴</sup> و براون<sup>۵</sup> در سال ۱۹۷۱ به راههای ارتباطی غارهای مختلف نواحی کارستی در اروپا اشاره کرده‌اند که در گذشته از طریق اردکهای وحشی و سگها تعیین شده‌اند. از سال ۱۸۶۹ میلادی به بعد مواد رنگی و انواع نمکها برای تعیین ارتباط هیدرولیکی در نواحی شمالی اروپا به کار رفته است<sup>۶</sup>. اولین آزمایش ردیابی از طریق کاربرد مواد رنگی در سال ۱۸۸۲ توسط یک دکتر طب به نام کارپرز<sup>۷</sup> به منظور تعیین منشأ آب آلوده به ویروس حصبه در منطقه‌ای نزدیک شهر پاریس انجام شد که این آزمایشها بعدها توسط پل<sup>۸</sup> در سال ۱۹۶۰ پی‌گیری شد.

در سال ۱۹۰۱ دستگاه فلئورسکوپ<sup>۹</sup> جهت اندازه‌گیری فلئورسانس مواد رنگی توسط تری‌یات<sup>۱۰</sup> فرانسوی اختراع و سپس توسط ماربوتن<sup>۱۱</sup> تکمیل گردید. با کاربرد این وسیله دقت اندازه‌گیریهای فلئورسانس مواد رنگی شدیداً افزایش یافت. به طوری که دل<sup>۱۲</sup> کاربرد فلئورسئین را برای ردیابی حرکت آب در کارست و خاک توصیه نمود. در همین زمان تیم<sup>۱۳</sup> در تحقیقات خود برای تعیین سرعت جریان آب در منطقه لایپزیک آلمان از نمک کلراید سدیم استفاده کرد (اسلیشر ۱۹۰۲)<sup>۱۴</sup>. وی مقدار یون کلر موجود نمونه‌های برداشت شده را در آزمایشگاه آنالیز کرد و روش تیم را با ثبت تغییرات هدایت الکتریکی آب در محل تصحیح نمود. او در آزمایش خود از نمک کلراید آمونیوم نیز استفاده کرد. (اسلیشر زمان پیمایش و جهت جریان آب را برای محیط متخلخل<sup>۱۵</sup> در اولین آزمایش ردیابی خود در صحرا تعیین کرد. در سال ۱۹۵۰ کاربرد ردیابهای رادیواکتیو توسعه یافت (فوکس ۱۹۵۲)<sup>۱۶</sup>. اگرچه کاربرد این مواد در خیلی از کشورها به دلیل مسایل آلودگی زیست محیطی ممنوع شده بود ولی این مواد به طور کامل شناخته شده بودند. در سال ۱۹۶۰ ایزوتوپهای رادیواکتیو طبیعی و نیز ایزوتوپهای پایدار در مطالعات ردیابی مورد استفاده قرار گرفتند. در طی دو دهه اخیر پژوهشگران کاربرد ردیابهای فوق‌العاده حساس مثل هالوکربنها و اسیدهای آلی فلئور<sup>۱۷</sup> را توسعه دادند (دیویس و همکاران<sup>۱۸</sup>).

- |                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| 1 - Philip                     | 2- Mazor         |
| 3- Strabo                      | 4 - Ford         |
| 5 - Brown                      | 6 - Kass(1964)   |
| 7- Carrieres                   | 8- Pole          |
| 9 - Fluoroscope                | 10- M.Trillate   |
| 11- M.Marboutin                | 12- Dole         |
| 13- Thiem                      | 14- Slichter     |
| 15- Porous media               | 16- Fox          |
| 17- Fluorinated - organic acid | 18- Davis et al. |



## ۲-۴ ورود ردیابهای مصنوعی به چرخه آب

ورود ردیابهای مصنوعی به چرخه آب به طور مصنوعی از طریق چاه، گمانه و غیره انجام می‌شود. در مناطق کارستی همچنین از شکافها و فروچاله‌ها نیز استفاده می‌شود. نوع تزریق ردیاب بستگی به نوع آزمایش و نوع ماده ردیاب دارد. روشهای ردیابی با مواد رادیواکتیو به وسیله ظروف محافظ انجام می‌شود که از راه دور قابل کنترل بوده و به وسیله کابل به داخل چاه هدایت می‌شود. همچنین می‌توان ماده ردیاب را به وسیله پمپ در آب زیرزمینی تزریق کرد.

## ۳-۴ تئوری و اصول ردیابی مصنوعی

ردیاب<sup>۱</sup> ماده یا امواجی (انرژی) است که توسط آب حمل شده و اطلاعاتی راجع به محل تغذیه، جهت و سرعت و نوع جریان آب و همچنین منشاء آلاینده‌های آب به ما می‌دهد. اگر اطلاعات کافی جمع‌آوری شود، مطالعات ردیابی می‌تواند برای تعیین خصوصیات هیدرودینامیکی لایه آبدار، حجم ذخیره دینامیکی آبخوان، زمان تأخیر، نواحی تغذیه و مرزهای حوضه آبرگیر چشمه‌ها در دو فصل تر و خشک به کار رود.

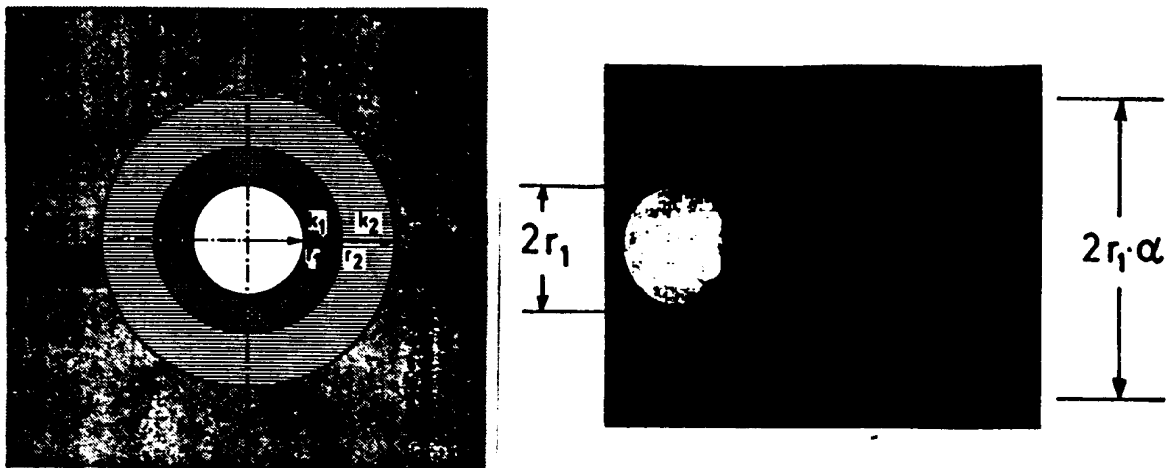
ردیابی مصنوعی با مواد رادیواکتیو و غیر رادیواکتیو در چارچوب مطالعات آبهای زیرزمینی به روشهای تک چاهی و چندچاهی انجام می‌شود. در روش تک چاهی، معمولاً جهت و سرعت حرکت آب در آبخوانهای آبرفتی تعیین می‌شود. در روش چندچاهی مدت زمان حرکت آب زیرزمینی در فاصله مشخص از آبخوانهای سازند سخت و آبرفتی و همچنین سرعت ظاهری (خطی) آب زیرزمینی در آبخوانهای ذکر شده مشخص می‌شود.

### ۱-۳-۴ روش تک‌چاهی

در روش تک چاهی سطح مقطع چاه مورد مطالعه باید دایره‌ای شکل بوده و تا سنگ کف آبخوان ادامه یابد. حرکت آب زیرزمینی در قسمت فیلتر چاه باید ورقه‌ای<sup>۲</sup> بوده و در اثر برداشت و تزریق به هم نخورده باشد. در سطح مقطع افقی فیلتر چاه خطوط اطراف فیلتر، خطوط هم‌پتانسیل است که باعث جمع‌شدگی خطوط جریان آب زیرزمینی می‌شود. همانگونه که گفته شد این خطوط قبلاً "مستقیم و موازی یکدیگر بوده‌اند. جریان آب زیرزمینی در فیلتر چاه (شکل شماره ۸) دارای دو مرز خطوط جریان است که فاصله آن دو ( $ar_1$ ) در فاصله‌ای کافی از چاه تابع تخلخل فیلتر شنی و آبخوان و همچنین فرم هندسی حفاری چاه است. در این ارتباط می‌توان مقدار پارامتر  $a$  را از طریق فرمول زیر به دست آورد:

1 - Tracer

2- Laminar



شکل ۸- مدل جریان آب زیرزمینی در شبکه لوله چاه در سطح مقطع افقی

$$a = \frac{4}{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_f}{k_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]} \quad (5)$$

$K_1$  = هدایت هیدرولیکی فیلتر چاه

$K_f$  = هدایت هیدرولیکی آبخوان

$r_1$  = شعاع داخلی فیلتر چاه

$r_2$  = شعاع خارجی فیلتر چاه

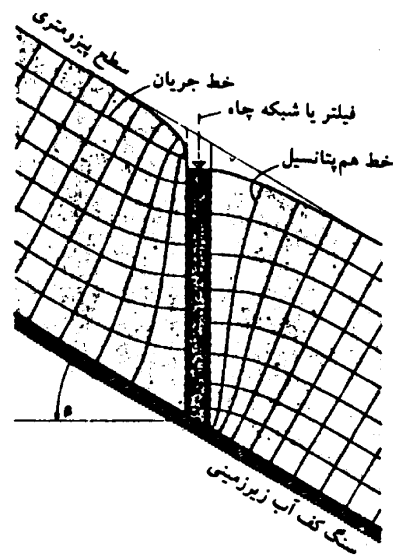
در چاههایی که از فیلتر شنی<sup>۱</sup> هم استفاده می‌شود برای محاسبه ضریب  $a$  از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$a = \frac{8}{\left(1 + \frac{k_f}{k_2}\right) \left\{1 + \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]\right\} + \left(1 - \frac{k_f}{k_2}\right) \left\{\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 + \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2 + \frac{k_2}{k_1} \left[\left(\frac{r_1}{r_3}\right)^2 - \left(\frac{r_2}{r_3}\right)^2\right]\right\}}$$

$K_2$  = هدایت هیدرولیکی فیلتر شنی

$r_3$  = شعاع حفاری

برعکس در سطح مقطع عمودی فیلتر چاه مثلاً در مواردی چون شکل شماره ۹ که در قسمت بالایی آبخوان، ورودی به شبکه چاه از خروجی بزرگتر است و در قسمت پایین، خروجی بزرگتر از ورودی است، این پدیده موجب جمع‌شدگی خطوط جریان و خطوط پتانسیل آب زیرزمینی می‌شود. به این ترتیب در داخل فیلتر چاه، جریانهای عمودی موجود است.



شکل ۹- سطح مقطع عمودی شبکه لوله چاه در جهت حرکت آب زیرزمینی

بین حداکثر جریان عمودی آب در داخل شبکه چاه و سرعت حقیقی آب در آبخوان رابطه زیر برقرار است:

$$V_f = \frac{V_{vmax} \times \delta^2}{f(\delta) \sin \beta} \quad (V)$$

$$\delta = \frac{r_1}{H} \quad \text{که در آن:}$$

$$V_f = \text{سرعت حقیقی آب در آبخوان}$$

$$V_{vmax} = \text{حداکثر سرعت جریان عمودی آب در داخل شبکه چاه}$$

$$\beta = \text{زاویه بین شبکه چاه و میدان خطوط موازی جریان آب زیرزمینی}$$

$$\delta = 0.11 = \text{مقدار } f(\delta) \text{ معادل } 0.5 \text{ خواهد بود.}$$

$$H = \text{طول شبکه چاه که به وسیله جریان عمودی پیموده می شود.}$$

در طبیعت میدان جریان در اکثر موارد از خطوط موازی منحنی تشکیل شده و متناسب با شیب خطوط جریان نسبت به شبکه چاه، جریانهای عمودی ظاهر می شوند که جهت آنها هم به طرف بالا و هم به طرف پایین است.

هنگامی که آب زیرزمینی از طریق برداشت و یا تزریق آب تحت تأثیر قرار می گیرد، شبکه چاه یک مخروط افت و یا عکس آن در داخل میدان جریان آب زیرزمینی ایجاد می کند. حالت مشابهی همچنین زمانی ایجاد می شود که آب تحت فشار از طریق حفر چاه از یک لایه به لایه دیگری وارد می شود. عمق این مخروط افت و یا برآمدگی آن تابعی از تراکم خطوط جریان در آبخوان و در نتیجه متناسب با سرعت حقیقی آب زیرزمینی ( $V_f$ ) است.

$$V_f = \frac{\Delta Q_v}{\Delta H} \cdot \frac{1}{b} \quad (8)$$

که در آن :

$\frac{\Delta Q_v}{\Delta H}$  = تغییرات جریان عمودی  $Q_v$  در داخل شبکه چاه در اثر ورود یا خروج جریان در ارتفاع (فاصله)  $\Delta H$  از شبکه چاه

$b$  = عرض مخروط افت یا عکس آن در میدان جریان آبخوان

در حالی که در سطح مقطع عرضی، جمع شدگی خطوط جریان آب زیرزمینی براساس روابط ۷ و ۸ به وسیله  $K_f$  و نفوذپذیری و شعاعهای شبکه چاه و فیلتر شنی مشخص می شود، در سطح مقطع طولی، زاویه  $\beta$  در فرمول ۷ و عرض  $b$  در فرمول ۸ به طور کلی نامشخص (ناشناخته) است. لذا اکثراً سعی می شود در فیلتر شنی آبخوان یک جهت شبکه چاه برضد جریان عمودی انتخاب شود که در این قسمت از شبکه چاه امتداد خطوط جریان آب زیرزمینی با متوسط روابط ۷ و ۸ بیان می شود. برای کاربرد روش تک چاهی بهتر است که محل (چاه) اندازه گیری آب زیرزمینی تا حد امکان به شبکه چاه و فیلتر شنی مجهز باشد. بسیار مهم است که آب داخل چاه فاقد ماسه و ذرات معلق باشد. لذا باید دانه بندی فیلتر شنی طوری انتخاب شود که با توجه به دانه بندی لایه های آبدار، ذرات معلق وارد چاه نشود.

شبکه لوله جدار باید طوری انتخاب شود که قطر شکافهای آن از قطر ریزترین دانه های فیلتر شنی کوچکتر باشد. نفوذپذیری شبکه چاه و فیلتر شنی باید بزرگتر از عدد  $K_f$  آبخوان باشد. خصوصیات هیدرولیکی فیلتر چاه که توسط Klotz آزمایش شد، مشخص کرد که برای آزمایش تک چاهی فیلترهای جای شده در کنار فیلترهای دیگر بسیار مناسب است.

در اصل عملیات ردیابی از طریق روش تک چاهی بر مبنای قانون اصلی داریسی که جریان حرکت آب زیرزمینی در آبخوانهای آبرفتی را تعریف می کند و از طریق آغشته کردن آب زیرزمینی در جهت مشخصی از چاه با ماده ردیاب است. پارامتری که در این آزمایش اندازه گیری می شود، میزان غلظت ماده ردیاب است که در اثر جریان آب زیرزمینی در طول زمان اندازه گیری، رقیق تر می شود. در این آزمایش باید برای تحلیل نتایج، جهت جریان آب زیرزمینی در چاه مشخص شود. محاسبات براساس قانون کلی داریسی و طبق فرمول زیر انجام می شود:

$$V_f = K_f \cdot J \quad (9)$$

که در آن:

$V_f$  = سرعت خطی آب زیرزمینی در آبخوانهای آبرفتی

$$K_f = \text{ضریب نفوذپذیری آبخوان}$$

$$J = \text{شیب آب زیرزمینی (گرادیان هیدرولیک)}$$

سرعت حقیقی آب زیرزمینی براساس رابطه پیوستگی جریان در هیدرولوژی

$$Q = V_f \cdot F \quad (10)$$

برابر است با:

$$F = \text{سطح مقطع جریان}$$

$$Q = \text{دبی جریان}$$

$$F = \text{سطح مقطع جریان}$$

$$V_f = \text{سرعت حقیقی جریان آب زیرزمینی}$$

$$V_f = \frac{Q}{F} \quad (11)$$

سرعت حقیقی آب زیرزمینی که متناسب با سرعت ظاهری جریان است:

$$V_f = P_n \cdot V \quad (12)$$

که در آن:

$$P_n = \text{تخلخل موثر آبخوان}$$

$$V = \text{سرعت ظاهری آب زیرزمینی}$$

شدت رقیق شدن ردیاب در حجم مشخصی از چاه متناسب با دبی جریان در چاه است و می توان آن را به صورت زیر نوشت:

$$Q = \frac{V}{t} \cdot \ln C_0/C \quad (13)$$

که در آن:

$$Q = \text{مقدار آبی است که در واحد زمان از مقطع مشخصی از چاه عبور می کند.}$$

$$t = \text{واحد زمان}$$

$$C_0 = \text{اکتیویته ردیاب در شروع آزمایش}$$

$$C = \text{اکتیویته ردیاب در زمانهای مختلف}$$

با توجه به فرمول اصلی هیدرولوژی  $Q = V_f \cdot F$  برای دبی  $Q$  که از سطح مقطع  $F$  (سطح مقطع طولی ستون آب آغشته شده به ردیاب) عبور می‌کند می‌توان سرعت رقیق شدن ردیاب را در داخل چاه براساس رابطه‌های فوق به صورت زیر نوشت:

$$V_g = \frac{Q}{F} \quad (14)$$

$$V_g = \frac{V}{t \cdot F} \cdot \ln Co/C \quad (15)$$

و یا

$$V_g = \frac{r \cdot \pi \cdot h}{\psi r h \cdot t} \cdot \ln Co/C \quad (16)$$

$$V_g = \frac{r \pi}{Z t} \cdot \ln Co/C \quad (17)$$

به این ترتیب می‌توان از طریق سرعت رقیق شدن ردیاب، سرعت حقیقی جریان آب زیرزمینی را با توجه به فرمول  $V_f = \frac{Q}{F}$  به صورت زیر حساب کرد:

سرعت جریان آب در داخل چاه

$$V_f = \frac{Q}{F} \quad (18)$$

$$Q = F \cdot V_f = h \cdot \psi r \cdot V_g \quad (19)$$

که در آن:

$r$  = پهنای جبهه جریان در چاه

سرعت جریان آب در خارج از چاه

$$V_f = \frac{Q}{F} \quad (20)$$

از آنجا که  $Q$  هم در چاه و هم در خارج از چاه، ثابت است بنابراین می‌توان هر دو رابطه را مساوی قرار داد:

$$F \cdot V_g = F \cdot V_f = h \cdot \psi r \cdot V_g = h \cdot b \cdot V_f \quad (21)$$

$$V_f = \psi r / b \cdot V_g$$

که در آن:

$b$  = پهنای جبهه جریان خارج از چاه

در صورتی که در رابطه فوق  $2r/b$  را برابر  $\alpha^{-1}$  قرار دهیم در آن صورت خواهیم داشت:

$$V_f = \alpha^{-1} \cdot V_g = \frac{V_g}{\alpha} \quad (22)$$

رابطه فوق را می توان با توجه به فرمول  $V_g = \frac{r\pi}{2t} \cdot \ln Co/C$  به صورت زیر نوشت:

$$V_f = r \cdot \pi / 2 \alpha t \cdot \ln Co/C \quad (23)$$

در این رابطه  $\alpha$  ضریب است و مقدار آن بیانگر آن است که میدان جریان مستقیم تا چه اندازه توسط حفاری بهم خورده است.

#### ۲-۳-۴ روش چندچاهی

حرکت آب زیرزمینی در سازندهای سخت به طور کلی ناهمگن<sup>۱</sup> و غیریکنواخت بوده و از این رو حرکت آن براساس قانون کلی داری صورت نگرفته و بر مبنای تئوری کانالهای باز انجام می شود.

این روش براساس وارد کردن ماده ردیاب در محلی به نام محل تزریق (دهنده یا چاه دهنده) به آب زیرزمینی و شناسایی آن در آب زیرزمینی در محلی به نام برداشت کننده و یا چاه برداشت در جهت حرکت آب زیرزمینی است. پارامتری که در این آزمایش اندازه گیری می شود مدت زمانی است که توده (حجم) آغشته شده به ماده ردیاب نیاز دارد تا از محل تزریق به محل برداشت برسد (t). به این ترتیب می توان با کمک زمان اندازه گیری شده و فاصله بین دو نقطه تزریق و برداشت، سرعت خطی (سرعت ظاهری) را براساس رابطه زیر محاسبه کرد:

$$V = \frac{a}{t} \quad (24)$$

که در آن:

$$V = \text{سرعت ظاهری}$$

$$a = \text{فاصله دو نقطه تزریق و برداشت}$$

$$t = \text{زمان لازم}$$

در اصل کاربرد این روش برای اندازه‌گیری سرعت ظاهری آب زیرزمینی بسیار ساده بوده و می‌تواند از طریق کاربرد رنگها، نمکها و غیره برای مطالعه آبهای زیرزمینی در آبخوانهای آبرفتی و سازندهای سخت و کارستی مورد استفاده قرار گیرد. با وجود سهولت کاربرد این روش، مسائل و مشکلات خاص، به هنگام انجام آزمایشها دیده می‌شود، به طوری که در برخی از موارد نمی‌توان از این روش برای تعیین سرعت ظاهری آب زیرزمینی استفاده کرد. به هنگام تعیین نوع ماده ردیاب در این روش باید توجه داشت که ردیاب مزبور نباید شرایط هیدرولیکی طبیعی آب زیرزمینی را به هم بزند. ماده انتخاب شده باید با همان سرعت حرکت کند که آب زیرزمینی حرکت می‌کند و جذب آبخوان نیز نشود. ردیابهایی که دارای چنین خصوصیتی باشند محدود بوده، بهترین آنها تریتیوم است که به صورت آب تریتیوم‌دار مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ماده می‌تواند به میزان کمتر از یک میلی لیتر در چاه دهنده، تزریق شده و در طول مسیر حرکت به طرف چاه برداشت، مشکل خاصی ایجاد نمی‌کند. این ردیاب را می‌توان به هنگام انجام آزمایشهای ردیابی با آنها مورد استفاده قرار داده و در آب چاه برداشت، در کنار ردیابهای دیگر موردشناسایی و سنجش قرار بگیرد. تحقیقاتی که تاکنون بر روی پراکندگی هیدرودینامیکی انجام شده بیانگر آن است که باید مقدار ردیاب تزریق شده در آب زیرزمینی بسیار کم باشد. محاسباتی که اسکیتسکی براساس تئوری انجام داده نشان می‌دهد که پراکندگی توده ردیاب در آب زیرزمینی نهایتاً از چند برابر قطر چاه دهنده، تجاوز نمی‌کند. این موضوع توسط تیم دائل و دیگران نیز در عمل ثابت شده است.

در آزمایشهایی که تیس در سال ۱۹۶۲ انجام داد، مشاهده شد که زاویه پخش توده ردیاب تزریق شده در یک آبخوان همگن، سی درجه است. از اینرو اغلب مشکل است چاه یا چاههای برداشتی را طوری انتخاب کرد که بتوانند مسیر حرکت ردیاب را با اطمینان دربرگیرند. حتی اگر این انتخاب براساس نتایج حاصل از تعیین جهت حرکت آب زیرزمینی از طریق اندازه‌گیری باشد. همچنین در صورتی که فاصله بین چاههای دهنده و برداشت، کم باشد، سرعت حرکت آب زیرزمینی می‌تواند در مقایسه با مواردی که فاصله بین دو نقطه زیاد باشد، افزایش پیدا کند. این افزایش سرعت در اثر تجمع خطوط جریان در محدوده شبکه چاه ایجاد می‌شود.

در مواردی که تزریق در چاه دهنده به صورت متناوب در طول زمان آزمایش انجام می‌شود، پخش توده ردیاب در آبخوان براساس رابطه زیر انجام می‌شود:

$$W = \frac{Q}{hk_fJ} \quad (25)$$

$W$  = حداکثر پخش توده ردیاب عمود بر جهت حرکت

$Q$  = مقدار شدت جریان محلول ردیاب تزریق شده

$h$  = ضخامت آب زیرزمینی در چاه دهنده

$k_f$  = ضریب نفوذپذیری

$J$  = شیب آب زیرزمینی



## ۴-۴ نمونه برداری

### ۱-۴-۴ تک چاهی

نظر به اینکه در روش ردیابی آبهای زیرزمینی از طریق روش تک چاهی از ماده رادیواکتیو استفاده می‌شود، لذا اندازه‌گیریها در صحرا و در درون چاه تزریق انجام شده و لزومی به نمونه برداری از منابع آبی نیست.

### ۲-۴-۴ چندچاهی

عملیات نمونه برداری در آزمایشهای ردیابی منابع آبهای زیرزمینی از طریق چندچاهی، در ساعات اولیه بعد از تزریق شروع می‌شود. زمان برداشت اولین نمونه به فاصله بین نقطه تزریق و محل نمونه برداری بستگی داشته و براساس نتایج حاصل از مطالعات متداول تنظیم می‌شود. فواصل زمانی بین نمونه‌های بعدی نیز براساس زمان اولین نمونه، تنظیم شده و شامل مراحل زیر است:

مرحله ۱- هر دو ساعت یکبار در سه روز اول

مرحله ۲- هر چهار ساعت یکبار در سه روز دوم

مرحله ۳- هر شش ساعت یا هشت ساعت یکبار در هفته دوم

مرحله ۴- هر دوازده ساعت یکبار در هفته سوم و چهارم

مرحله ۵- روزی یکبار در ماه دوم

مرحله ۶- هر دو روز و یا سه روز یکبار در ماه سوم

مرحله ۷- هر هفته یکبار در ماههای بعدی (تا زمانی که هنوز رنگ در آب محل نمونه برداری وجود داشته باشد).

در موارد خاص برای حصول اطمینان از تشخیص ضعیف ماده ردیاب (رنگی) باید از جذب آن توسط ذغال اکتیو استفاده کرد.

عملیات نمونه برداری براساس دستورالعملهای موجود انجام می‌شود. ظروف نمونه برداری پس از گدگذاری و بسته‌بندی برای آزمایش به آزمایشگاه ارسال خواهند شد. در صورتی که از دستگاه نمونه بردار استفاده می‌شود باید از به کارگیری یک نمونه بردار برای منابع متفاوت خودداری شود و برای هر منبع یک دستگاه نمونه بردار جداگانه در نظر گرفته شود.

#### ۵-۴ روشهای اندازه‌گیری ردیابهای مصنوعی

##### ۱-۵-۴ اندازه‌گیری در روش تک‌چاهی

نظر به اینکه در آزمایشهای ردیابی منابع آبهای زیرزمینی از طریق تک‌چاهی از ردیاب رادیواکتیو با نیمه عمر کم استفاده می‌شود، باید برای جلوگیری از خطای آزمایش، اندازه‌گیریها در صحرا و در محل تزریق صورت پذیرد. روش اندازه‌گیری در آزمایشهای تک‌چاهی به امکانات موجود بستگی داشته و به دو طریق انجام می‌شود:

الف- در مواردی که امکان پمپاژ آب چاه و یا گمانه تزریق به خارج از چاه میسر باشد. آب را در ظرفی پمپ کرده و میزان اکتیویته آن را از طریق سنتیلومتر تعیین می‌کنند و مجدداً آب را به داخل چاه برمی‌گردانند.

ب- در مواردی که امکان پمپاژ آب به خارج از چاه و یا گمانه میسر نباشد، میزان اکتیویته آن را به وسیله یک دکتور که در داخل چاه و یا گمانه نصب می‌شود، اندازه‌گیری می‌کنند.

##### ۲-۵-۴ اندازه‌گیری در روش چندچاهی

در آزمایشهای ردیابی منابع آب از طریق چندچاهی، روش اندازه‌گیری ماده ردیاب به نوع ردیاب بستگی داشته و به صورت زیر انجام می‌شود:

الف - اندازه‌گیری مواد رنگی فلوروسانس

ب - اندازه‌گیری نمکها

پ - اندازه‌گیری هاگها

ت - اندازه‌گیری باکتریها

روشهای نمونه‌برداری و سنجش ردیابهای مصنوعی در آزمایشهای چندچاهی بستگی به نوع ماده ردیاب داشته و به دو طریق آزمایشگاهی و صحرائی به صورت زیر انجام می‌شود:

##### الف - ردیابهای رنگی

رنگهای فلوروسانس همچون اورانین، سولفورودامین G، اکسترا و رودامین WT به علت دارا بودن خاصیت فلوروسانس در غلظتهای بسیار کم با چشم غیرمسلح در صحرا قابل تشخیص هستند. برای اندازه‌گیری دقیق‌تر رنگهای فلوروسانس در صحرا و در آزمایشگاه از سیستمهای مدرن فیزیکی همچون اسپکتروفتومتر و اسپکتروفلوریمتر استفاده می‌شود. در مواردی خاص نیز برای افزایش مقدار ردیاب در نمونه‌های آب از زغال اکتیو استفاده می‌شود.

## ب - ردیابهای رادیواکتیو

برای اندازه‌گیری ردیابهای رادیواکتیو همچون کروم - ۵۱ و کبالت - ۶۰ که دارای تشعشعات  $\gamma$  هستند از سیستم سنتیلومتر استفاده می‌شود. اندازه‌گیری مواد رادیواکتیو با تشعشعات  $\beta$  همچون تریتیوم آزمایشگاهی بوده و از طریق گازی یا سنتیلاسیون مایع صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری برخی از ردیابهای رادیواکتیو همچون ید - ۱۳۱ به روش شیمیایی و سنتیلومتری انجام می‌شود.

## پ - ردیابهای قابل اکتیوشدن

برای تشخیص ردیابهای قابل اکتیوشدن ابتدا نمونه‌ها در راکتور اتمی مورد تشعشع قرار گرفته و سپس از طریق گاما اسپکتروسکوپی اندازه‌گیری می‌شوند.

## ت - نمکها

اندازه‌گیری نمکهای سدیم و پتاسیم معمولاً به روش فلیم فتومتری انجام می‌شود. در مواردی نیز می‌توان Cl نمک (NaCl) را از طریق تیتراسیون شناسایی و مقدار آن را معین کرد. همچنین اندازه‌گیری ردیابهای نمکی در خروجی آبهای زیرزمینی از طریق تغییرات هدایت الکتریکی آنها با دقت کمتری صورت می‌گیرد.

## ث - هاگها

اندازه‌گیری این ردیابها به دو صورت کیفی در صحرا و کمی در آزمایشگاه انجام می‌گیرد. تشخیص کیفی هاگها به وسیله جذب آنها توسط توریهای مخصوصی که آب از آن عبور می‌کند، صورت می‌گیرد. اندازه‌گیری کمی هاگها از طریق شمارش آنها در حجم مشخص با کمک میکروسکوپ امکان‌پذیر است.

## ج - باکتریها

به منظور شناسایی باکتریهای ردیاب، ابتدا باکتریهای موجود در نمونه‌های برداشت شده در آزمایشگاه تکثیر می‌شوند و سپس به روش بیولوژیکی مشخص می‌شوند.

### چ - ردیابهای معطر

شناسایی ردیابهای معطر به وسیله حس بویایی انجام می شود. شدت بوی این ردیابها در حدی است که می توان آنها را تا فاصله های ۵۰ متری استشمام کرد.

### ح - ردیابهای کف کننده

این ردیابها به هنگام ظهور در خروجیهای آب زیرزمینی ایجاد کف کرده و به وسیله چشم غیر مسلح شناسایی می شوند. برای تعیین میزان آنها در نمونه های آب، حجم مشخصی از آب درون ظروف شیشه ای ریخته می شود. سپس مدت زمان مشخصی تکان داده می شوند. میزان کف ایجاد شده بیانگر مقدار ماده ردیاب در نمونه آب است.

## ۵- وضعیت موجود مطالعات ردیابی کشور

در سالهای اخیر اهمیت و مزیت کاربرد روشهای ردیابی در جهت رفع خلاءها و کمبودهای مطالعاتی منابع آب زیرزمینی و استفاده از نتایج آن برای دستیابی به مدل بهینه مدیریت منابع آب زیرزمینی مورد توجه قرار گرفته و مراکزی با امکانات و تجهیزات متفاوت در این زمینه فعالیت دارند.

به منظور شناخت سوابق، امکانات و تجهیزات این مراکز و نیز فعالیت موضوعی آنها در مطالعات منابع آب زیرزمینی ( پروژه‌های مطالعاتی انجام یافته و یا در دست انجام ) اطلاعات لازم از مراکز و مؤسسات فعال در دوره ۲۰ سال گذشته جمع‌آوری و در جدول شماره ۲ ارائه شده است.

بررسی اطلاعات جمع‌آوری و ارائه شده در جدول شماره ۲ نشان می‌دهد که از مراکز ذیربط تنها تعداد اندکی در مطالعات ردیابی فعال بوده‌اند و از میان آنها فقط مرکز تحقیقات آب دارای تجهیزات برای اجرای پروژه‌های ایزوتوپی بوده است. سایر مراکز به منظور انجام بررسیهای ایزوتوپی از امکانات مراکز ذیصلاح خارج از کشور استفاده کرده‌اند.

مرکز تحقیقات آب به عنوان تنها مرجع فعال کشور در زمینه مطالعات ردیابی ایزوتوپی با توجه به اهمیت موضوع از سال ۱۳۴۷ با همکاری آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) و دانشگاه هایدلبرگ آلمان و در چارچوب پروژه همکاریهای مشترک (IRA. ۸.۰۰۳) تأسیس شده است. مرکز تحقیقات آب از زمان تأسیس تا حدود سال ۱۳۵۷ ضمن بهره‌گیری از همکاری کارشناسان آژانس بین‌المللی انرژی اتمی تجهیزات و لوازم ویژه مورد نیاز را در چارچوب پروژه‌های همکاری از طریق آژانس فوق تهیه می‌کرد که پس از آن به دلیل قطع این همکاری و فرسودگی تجهیزات و لوازم، امکان ترمیم و تهیه آنها عملاً مقدور نشد و بهره‌برداری از تجهیزات و ادامه فعالیت مرکز در مطالعات ردیابی با مشکلات مواجه شد.

تجهیزات این مرکز با توجه به هدف اولیه آن در زمینه ردیابی و سن‌یابی توسط تریتیوم و کربن ۱۴ شامل سیستم الکترولیز برای تغلیظ تریتیوم، دستگاه شمارنده مایع<sup>۱</sup> برای شمارش نمونه‌های تریتیوم، تخلیص گاز کربنیک و یک دستگاه کنتور گازی<sup>۲</sup> برای شمارش کربن ۱۴ بود. بعداً ( سال ۱۳۵۶ ) نیز یک دستگاه اسپکترومتر جرمی<sup>۳</sup> برای تعیین ایزوتوپهای پایدار کربن ۱۳، اکسیژن ۱۸ و دیوتریوم خریداری شد که نصب و راه‌اندازی آن عملاً در سال ۱۳۶۳ انجام گرفت. در سال ۱۳۶۰ نیز یک سیستم سنتر بنزن از سازمان انرژی اتمی ایران به این مرکز، منتقل شد.

1- Liquid Scintillation Counter

2-  $\beta$  -Logic

3- MAT ۲۵۰ Isotope Ratio Mass Spectrometer

از ابتدای دههٔ سال ۱۳۶۰ با توجه به اهمیت روزافزون مطالعات منابع آب به خصوص در ارتباط با مطالعات پی و مخزن سدها، فرار آب و شناخت ارتباط این پدیده با منابع آب زیرزمینی، توسعه و تجهیز این مرکز و گسترش فعالیتهای آن و ایجاد ارتباط با مراکز مشابه جهانی مورد توجه قرار گرفت. در راستای این تفکر و درخواست همکاری و اخذ کمکهای فنی مجدد از آژانس بین‌المللی انرژی اتمی جهت بازسازی و توسعه آزمایشگاههای هیدرولوژی یک دستگاه شمارنده مایع (L.S.C.) جدید، سیستمهای تقطیر تریتیوم و قطعات یدکی و لوازم تکمیلی تجهیزات قدیمی تأمین و همکاریهای کارشناسی برای تجهیز و راه‌اندازی و آموزش نیروی انسانی ذیربط انجام گرفت. در دهه گذشته این تجهیزات در انجام پروژه‌های مطالعاتی متعدد مورد استفاده قرار گرفته است.

از سایر موسسات فعال در زمینه مطالعات ردیابی می‌توان به امکانات مرکز تحقیقات کارست (وابسته به سازمان مدیریت منابع آب)، برخی از مهندسیین مشاور، مراکز دانشگاهی و سازمان انرژی اتمی ایران اشاره کرد. این مراکز دارای تجهیزات و امکانات محدود و موردی بوده و فقط امکان انجام ردیابی‌های مصنوعی (رنگی) را دارند و در مورد آزمایشات ایزوتوپی از امکانات مرکز تحقیقات آب و یا موسسات خارجی استفاده می‌کنند.

جدول ۲- فهرست وضعیت مطالعات ردیابی انجام شده و یا در دست انجام در بررسی منابع آب کشور

شماره ردیف	مرکز مطالعه کننده	محل مرکز	تجهیزات موجود	نیروی انسانی متخصص	عنوان مطالعه	هدف از انجام مطالعه	مدت مطالعه به ماه	کارفرما	انجام شده	در دست اقدام	تاریخ مطالعه	ملاحظات
۱	مرکز تحقیقات آب	تهران	اندازه گیری تری تیوم: ستیلاسیون مایع	کارشناس ارشد کارشناس	مطالعه ایزوتوپی	بررسی ارتباط چاههای آهکی منطقه کارده با منابع آب دشت مشهد	۱۲	سازمان آب منطقه ای خراسان	+		۱۳۶۱	
۲	مرکز تحقیقات آب	تهران	مدل ۱۵۵۰ پاکارد کربن ۱۴: شمارشگر برتولت	کارشناس ارشد کارشناس	مطالعه ایزوتوپی	بررسی ارتباط منابع آب زیرزمینی دشتهای ازغند و فیض آباد منطقه تربت حیدریه	۱۲	سازمان آب منطقه ای خراسان	+		۱۳۶۱	
۳	مرکز تحقیقات آب	تهران	شمارشگر بتالوژیک ایزوتوپیهای پایدار: $^{13}\text{C}-^{2}\text{H}-^{16}\text{O}$ اسپکترومتر جرمی	کارشناس ارشد کارشناس	مطالعه ایزوتوپی	بررسی ارتباط دریاچه تار با چشمه های مجاور	۸	سازمان آب منطقه ای تهران	+		۱۳۶۲	
۴	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	بررسی ارتباط چشمه های منطقه باختران	۸	سازمان آب منطقه ای غرب	+		۱۳۶۲	
۵	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	بررسی ارتباط بین دریاچه سد رسوبگیر مس سرچشمه و منابع آب رفسنجان	۶	شرکت مس سرچشمه	+		۱۳۶۳	

شماره ردیف	مرکز مطالعه کننده	محل مرکز	تجهیزات موجود	نیروی انسانی متخصص	عنوان مطالعه	هدف از انجام مطالعه	مدت مطالعه به ماه	کارفرما شده	انجام شده	در دست اقدام	تاریخ مطالعه	ملاحظات
۶	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	بررسی منشاء، مراکز تغذیه و جهت جریان آبهای زیرزمینی در دشتهای یزد و اردکان	۱۲	سازمان آب منطقه ای یزد	+		۱۳۶۴	
۷	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس	مطالعات - ایزوتوپی - رنگی	تعیین منشاء آب چشمه های پایین دست دره دارزیبا و جوانرود و ارتباط آن با آب داخل غار	۸	سازمان آب منطقه ای غرب	+		۱۳۶۵	
۸	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا	مطالعه ایزوتوپی	تشخیص منشاء، سن، مراکز تغذیه، جهت جریان و تعیین ارتباط منابع آب در منطقه کازرون	۶	سازمان آب منطقه ای فارس	+		۱۳۶۶	
۹	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	تعیین منشاء جریان و سن آنها در منطقه و شناخت سیستم اکيفر دشت جیرفت و پتانسیل آبدهی آن	۱۲	سازمان آب منطقه ای کرمان	+		۱۳۶۶	
۱۰	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد	مطالعات - ایزوتوپی - رنگی	بررسی ارتباط چاه آهکی شماره ۴ سمنان با چشمه گل رودبار واقع در شمال سمنان	۸	سازمان آب سمنان	+		۱۳۶۶	
۱۱	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا	مطالعات - ایزوتوپی - رنگی	تشخیص ارتباط بین چاههای موجود در مخزن سد پانزده خرداد با آبهای زیرزمینی و تشخیص جهت حرکت آبهای زیرزمینی در محل ساختگاه سد	۱۲	سازمان آب منطقه ای تهران	+		۱۳۶۸	
۱۲	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا	مطالعه ایزوتوپی	بررسی منابع آب مجتمع مس سرچشمه کرمان	۱۲	سازمان آب منطقه ای کرمان	+		۱۳۶۹	
۱۳	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس	مطالعه ایزوتوپی	بررسی منابع آبهای زیرزمینی حوضه آبریز دریاچه مهارلو	۱۲	سازمان آب منطقه ای فارس	+		۱۳۷۱	
۱۴	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد کارشناس	مطالعه ایزوتوپی	بررسی منشاء و ارتباط آبهای شور و شیرین حوضه رودخانه شاپور	۱۲	سازمان آب منطقه ای فارس	+		۱۳۷۱	



شماره ردیف	مرکز مطالعه کننده	محل مرکز	تجهیزات موجود	نیروی انسانی متخصص	عنوان مطالعه	هدف از انجام مطالعه	مدت مطالعه به ماه	کارفرما	انجام شده	در دست اقدام	تاریخ مطالعه	ملاحظات
۱۵	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	بررسی آبهای زیرزمینی ساختگاه سد میرزای شیرازی	۱۲	سازمان آب منطقه‌ای فارس	+		۱۳۷۲	
۱۶	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد	مطالعات - ایزوتوپی - رنگی	بررسی ارتباط بین تکیه‌گاههای سد میرزای شیرازی و چشمه‌های پایین دست محل سد و همچنین تشخیص ارتباط ساحل چپ رودخانه قره‌آغاج و جنوب شرقی کوه سبزپوشان	۱۲	سازمان آب منطقه‌ای فارس	+		۱۳۷۴	
۱۷	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	بررسی آبهای زیرزمینی منطقه بجنورد، تشخیص ارتباط چاههای آهکی و چشمه در محل ساختگاه پتروشیمی	۱۲	سازمان آب منطقه‌ای خراسان	+		۱۳۷۵	
۱۸	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	تعیین مکانیسم تغذیه و الگوهای جریان آبهای زیرزمینی و تشخیص انواع گروه‌های آب و چگونگی ارتباط میان منابع آب موجود در سازندهای آهکی با آبخوانهای آبرفتی دشت گرگان	۱۲	سازمان آب منطقه‌ای مازندران	+		۱۳۷۵	
۱۹	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	تشخیص تاثیر بهره‌برداری از تونل احدائی بر چشمه امامزاده عبدالله روستای عین و رزان دماوند	۱۵	فرمانداری دماوند	+		۱۳۷۶	
۲۰	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکترا کارشناس ارشد	مطالعات - ایزوتوپی - رنگی	بررسی ارتباط هیدرولیکی در سازندهای آهکی و تراوایی در تکیه‌گاههای سد کوثر (تنگ دوک)	۱۲	شرکت سهامی سابیر	+		۱۳۷۶	
۲۱	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	کارشناس ارشد	ردیابی رنگی	ردیابی مسیر فرار آب در تکیه‌گاه چپ سد مارون	۶	سازمان آب منطقه‌ای خوزستان	+		۱۳۷۶	

شماره ردیف	مرکز مطالعه کننده	محل مرکز	تجهیزات موجود	نیروی انسانی متخصص	عنوان مطالعه	هدف از انجام مطالعه	مدت مطالعه به ماه	کارفرما شده	انجام شده	در دست اقدام	تاریخ مطالعه	ملاحظات
۲۲	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	کارشناس ارشد	ردیابی رنگی	مطالعه تشخیص فرار آب در تکیه گاههای محل سد سلمان فارسی	۶	سازمان آب منطقه ای فارس	+		۱۳۷۶	
۲۳	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکتر کارشناس ارشد کارشناس	مطالعات - ایزوتوپی - رنگی	تشخیص ارتباط آبهای کارستیک با آبخوانهای آبرفتی، تعیین جهت جریان و ارتباط آبهای کارستی در محل ساختگاه سد هینی مینی ایلام	۱۱	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	+		۱۳۷۶	
۲۴	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکتر کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	تشخیص شیب واقعی هیدرولیکی و احتمال وجود ارتباط میان آب رودخانه و دو تکیه گاه سد پاعلم	۸	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	+		۱۳۷۶	
۲۵	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکتر کارشناس ارشد	ردیابی رنگی	بررسی امکان فرار آب از تکیه گاههای سد رودبار لرستان	۶	شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران	+		۱۳۷۷	
۲۶	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکتر کارشناس ارشد	مطالعات - ایزوتوپی - رنگی	مطالعه منابع آب و بررسی امکان فرار آب در محل ساختگاه سد تنگ سمیران	۸	سازمان آب منطقه ای غرب	+		۱۳۷۷	
۲۷	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکتر کارشناس ارشد	مطالعات - ایزوتوپی - رنگی	مطالعه منابع آب و امکان فرار آب در محل ساختگاه سد هواسان	۸	سازمان آب منطقه ای غرب	+		۱۳۷۷	
۲۸	مرکز تحقیقات آب	تهران	"	دکتر	مطالعه ایزوتوپی	مطالعه منابع آب و ارتباط آب رودخانه ها و سازندهای آهکی در محدوده ساختگاه سد رودبار لرستان	۸	شرکت توسعه آب و نیروی ایران	+		۱۳۷۷	
۲۹	دانشگاه شیراز	شیراز	اسپکتروفلوریمتر شیمادزو	کارشناس علوم زمین دانشگاه شیراز	ردیابی رنگی	تعیین حوضه آگیر چشمه شش پیر و مسیر حرکت آبهای کارستی		سازمان آب منطقه ای فارس	+			

شماره ردیف	مرکز مطالعه کننده	محل مرکز	تجهیزات موجود	نیروی انسانی متخصص	عنوان مطالعه	هدف از انجام مطالعه	مدت مطالعه به ماه	کارفرما شده	انجام شده	در دست اقدام	تاریخ مطالعه	ملاحظات
۳۰	دانشگاه شیراز	شیراز	اسپکتروفلوریمتر شیمادزو	دکتر	مطالعات ایزوتوپی - رنگی	بررسی مسئله فرار آب و تعیین مسیر حرکت آب در محل سد تنگاب فیروزآباد		سازمان آب منطقه‌ای فارس				
۳۱	سازمان انرژی اتمی	تهران		دکتر کارشناس ارشد	مطالعه ایزوتوپی	- مطالعه ایزوتوپی آب دریای خزر - امکان استفاده از آبهای شور در کشاورزی		سازمان انرژی اتمی				
۳۲	انستیتو رادیو هیدرومتری Neuherbevg	آلمان	تجهیزات کامل	کارشناس مربوط	مطالعه ایزوتوپی	تعیین مسیر آبهای کارستی در دشت ارژن و منطقه کازرون واقع در کوههای زاگرس		تحقیقات خصوصی	+		۱۹۷۵	
۳۳	آژانس انرژی اتمی	وین	تجهیزات کامل	کارشناس مربوط	مطالعه ایزوتوپی	بررسی ارتباط هیدرولیکی میان مخزن سد لار و سیستم آبهای زیرزمینی پایین دست سد لار		وزارت نیرو	+		۱۹۸۳	
۳۴	انستیتو ژئواکسپرت یوگسلاوی	زاگرب	تجهیزات کامل	کارشناس مربوط	ردیابی رنگی	مطالعه جریان آبهای زیرزمینی در آهکهای تکیه‌گاه راست سد لار		وزارت نیرو مشاورین لار	+		۱۹۸۶	
۳۵	انستیتو ژئوترمیک هیدروژئولوژی	اتریش	تجهیزات کامل	کارشناس مربوط	ردیابی رنگی	ارزیابی‌های فنی هر نشت موجود در مخزن سد و تعیین مسیر جریان و آبهای زیرزمینی و تعیین مقدار نشت به چشمه‌های پایین دست		U.N.D.P مشاورین لار	+		۱۹۸۸	
۳۶	مهندسین مشاور آب موجان	شیراز	اسپکتروفلوریمتر و آزمایشگاه شیمی	کارشناس دکتر	ردیابی رنگی	تشخیص فرار آب از سد مخزنی داراب	۱۲	سازمان آب فارس	+		۱۳۷۷	
۳۷	مرکز تحقیقات کارست کشور	تهران	اسپکتروفلوریمتر و آزمایشگاه شیمی آب	کارشناس کارشناس ارشد دکتر	مطالعات ایزوتوپی	مطالعات نیمه تفصیلی حوضه‌یابی کارستی	۳۶	مرکز تحقیقات منابع آب	+		۱۳۷۷	
۳۸	شورای تحقیقات آب	تهران		دکتر	مطالعات ردیابی و ایزوتوپی	ردیابی دشت ارژن و ردیابی کرج	۲۴	وزارت نیرو	+	در دست انجام	۱۳۷۷	

بررسی امکانات نیروی انسانی و تجهیزات مراکز فعال در زمینه مطالعات ردیابی نشان می‌دهد که به رغم نیاز مبرم به انجام مطالعات ایزوتوپی و ردیابی در کشور متأسفانه توسعه و تجهیز این مراکز متناسب با نیازها و تحولات تکنولوژیک مورد توجه و اقدام لازم قرار نگرفته است.

از آنجا که براساس بررسیها و برآورد کارشناسان آژانس بین‌المللی انرژی اتمی در سال ۱۹۷۸ (مرجع ۱) تجهیز یک مرکز کاربرد ایزوتوپها در هیدرولوژی با حداقل امکانات لازم برای اندازه‌گیری ایزوتوپهای پایدار و رادیوایزوتوپهای (O-۱۸، H-۲، C-۱۴، و T) بدون احتساب هزینه‌های مربوط به ایجاد تأسیسات، ساختمان آزمایشگاههای مخصوص و آموزش پرسنل متخصص حدود ۳۴۰ هزار دلار هزینه دارد. به همین دلیل و نیز بنا به ضرورت هماهنگی در اطلاعات و آگاهی از کاربرد فن‌آوری و دانش روز و ارتباط با مراکز بین‌المللی، در اغلب کشورها تعداد این مراکز محدود بوده و غالباً وابسته به دانشگاهها و مؤسسات تحقیقات هسته‌ای دولتی هستند.

معمولاً آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) به لحاظ مسئولیتها و امکانات به عنوان هسته مرکزی برای سازمانها و مؤسسات کشورهای مختلف عمل نموده و در زمینه جمع‌آوری اطلاعات جهانی در مورد منابع آب، وضعیت هیدرولوژی و چگونگی نزولات جوی در سطح جهانی اقدام به تأسیس و کنترل ایستگاههای هواشناسی و نمونه‌برداری در شبکه جهانی کرده (GNIP)<sup>۱</sup> همچنین در کنترل سیستمهای اندازه‌گیری و روشهای کاری مورد عمل و تهیه و ارائه استانداردهای بین‌المللی کمکهای مؤثری می‌نماید.

همچنین آژانس بین‌المللی انرژی اتمی (IAEA) در چارچوب پروژه‌های همکاری علمی و فنی کمکهای کارشناسی و در مواردی کمکهای مالی در اختیار کشورهای عضو قرار می‌دهد.

با عنایت به وضعیت موجود مراکز مطالعات ردیابی در کشور برای تقویت توان این مراکز دو مورد زیر پیشنهاد می‌شود:

#### ۱-۶ برنامه کوتاه‌مدت

نظر به فعالیت مرکز تحقیقات آب که از سال ۱۳۴۷ با وجود کمبودهای فراوان و برخی دستگاههای قدیمی به عنوان تنها مرکز کاربرد ایزوتوپها در هیدرولوژی و ردیابی به کار خود ادامه داده است و با توجه به مسائل اقتصادی فعلی

1- Global Network for Isotope in Precipitation

کشور می‌توان مرکز تحقیقات آب را به عنوان مرکز اصلی در مطالعات ردیابی ایزوتوپی کشور تقویت کرد برای این کار باید موارد زیر مورد توجه قرار گیرد:

- الف - تقویت روابط و همکاریهای فنی و علمی با آژانس بین‌المللی انرژی اتمی
- ب - بازسازی و تکمیل تجهیزات و سیستمهای قدیمی آن با همکاری کلیه سازمانهای ذیربط
- پ - جایگزینی روشهای قدیمی موجود در مرکز تحقیقات آب با روشهای نوین و استفاده از تجهیزات مدرن از جمله:
  - سیستم ستنز بنزن و شمارش مایع کربن چهارده
  - روش احیاء گاز CO<sub>2</sub>، تهیه گرافیت و اندازه‌گیری آن توسط دستگاه Accelerator Mass Spectrometer
  - ایجاد آزمایشگاه مخصوص اندازه‌گیری اکتیویته پایین با دیواره بتونی و پوشش سربی در زیرزمین به منظور حذف اثرات اشعه کیهانی بر روی سیستمها و بهبود شرایط کاری
- ت - همکاری متقابل و برقراری روابط علمی و تبادل اطلاعات با مراکز تحقیقاتی مشابه در کشورهای همجوار و منطقه که در سالهای اخیر پیشرفت قابل توجهی در این زمینه داشته‌اند.
- ث - بررسی امکان استفاده از خدمات آزمایشگاهها و تجهیزات کشورهای منطقه حسب مورد، مدنظر قرار گیرند.

## ۲-۶ برنامه درازمدت

در برنامه درازمدت با توجه به حجم کاری پروژه‌های موجود و افزایش روزافزون نیاز به تحقیقات در زمینه ردیابی پیشنهاد می‌شود که برنامه‌ریزی برای ایجاد مرکز مجهز جدیدی با وسعت کافی، امکانات، تجهیزات و کادر متخصص لازم در سالهای آینده انجام گیرد. ایجاد چنین مرکزی باید با هماهنگی و همکاری نزدیک سازمانهای ذیربط از جمله وزارت نیرو، سازمان انرژی اتمی ایران، مراکز دانشگاهی و ... و با همکاری مستقیم آژانس بین‌المللی انرژی اتمی برنامه‌ریزی شود. این مرکز باید توان و ظرفیت انجام کلیه مطالعات و تحقیقات مورد نیاز کشور در زمینه کاربرد ایزوتوپها در هیدرولوژی و ردیابی را در سالهای آتی داشته باشد و به تدریج قابلیت ارائه این خدمات در سطح منطقه را نیز کسب کند.

حداقل امکانات مورد نیاز چنین مرکزی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

## ۱-۲-۶ سازمان و تجهیزات لازم

تجهیزات اساسی مورد نیاز عبارتند از:

- الف - آزمایشگاه تهیه و آماده سازی نمونه و دستگاههای اندازه‌گیری ایزوتوپهای پایدار دیوتریوم، اکسیژن هیجده و کربن سیزده.

- ب - تجهیزات و آزمایشگاه تهیه و آماده‌سازی ایزوتوپهای رادیواکتیو تریتیوم و کربن چهارده و دستگاههای اندازه‌گیری آنها.
- پ - آزمایشگاه شیمی دارای سیستمها و دستگاههای متداول آنالیز شیمیایی و آنالیز نمونه‌های حاوی مواد فلورسانس.

#### ۲-۲-۶ پرسنل موردنیاز این مرکز

برای مدیریت و بهره‌برداری از چنین مرکزی یک مسئول با درجه دکترای شیمی یا فیزیک و آموزش کامل در اندازه‌گیری ایزوتوپهای محیطی لازم است. کادر متخصص موردنیاز برای مسئولیت سایر آزمایشگاههای آماده‌سازی و اندازه‌گیری حداقل ۲ نفر برای ایزوتوپهای پایدار، یک نفر تریتیوم، ۲ نفر رادیوکربن و یک نفر در آزمایشگاه شیمی است. کلیه این مسئولین باید غیر از تخصص و تجربه کافی، آموزش کامل در آماده‌سازی و اندازه‌گیری ایزوتوپهای محیطی دیده باشند. سایر کادر موردنیاز هر آزمایشگاه بستگی به حجم کار و نیاز مقطعی مرکز خواهد داشت.

#### ۳-۲-۶ فضای لازم

فضای لازم برای آزمایشگاههای این مرکز غیر از قسمتهای اداری هفت آزمایشگاه با جمع زیربنای تقریبی ۳۰۰ مترمربع برآورد می‌شود.

- 7-1 Guide book on Nuclear Techniques in Hydrology, IAEA, Tech.Rep. Ser. No 91 IAEA, Vienna, 1983.
- 7-2 Stable Isotope Hydrology, Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle. IAEA, Tech. Rep. Ser. No.210 1981.
- 7-3 Statistical Treatment of Environmental Isotope Data in Precipitation, IAEA, 1986.
- 7-4 Environmental Isotope DATA, No.1-9 World survey of Isotope Concentration in Precipitation 1958-1990.
- 7-5 Isotope Techniques in Water Resource Development, Proceedings of symposium organized in Co-Operation with UNESCO in Vienna, IAEA, 1987.
- 7-6 Isotopes in Water Resources Management, IAEA, Proceeding of Symposium, Vienna, 1995.