

## Radioisotope Technique of Groundwater Dating using Tritium Enrichment

I. Karimirad<sup>1\*</sup>, M. Hesam<sup>2</sup>, A. Bahrami samani<sup>3</sup>, A. Ezadpanah<sup>4</sup>, N. Moghadasi<sup>5</sup>

1- Ph.D. Candidate, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Iran. 2- Associated Professor of Water Engineering Department of Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran. 3- Assistant Professor of Nuclear Fuel cycle of Atomic Energy Organization of Iran. 4- Assistant Professor of Physics Department of Golestan University, Iran. 5- M. Sc., Dept. of Watershed Management, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Iran.

\*(Corresponding Author Email: Ikarimirad@ut.ac.ir)

Received: 18-4-2016

Accepted: 10-9-2016

## روش رادیوایزوتوپی اندازه‌گیری سن آب زیرزمینی با استفاده از غنی‌سازی تریتیوم

ایمان کریمی‌راد<sup>۱\*</sup>، موسی حسام<sup>۲</sup>، علی بهرامی سامانی<sup>۳</sup>، عبدالمجید ایزدپناه<sup>۴</sup>، نفیسه مقدسی<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، دانشگاه تهران. ۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان. ۳- استادیار پژوهشکده چرخه سوخت سازمان انرژی اتمی ایران. ۴- استادیار گروه فیزیک، دانشگاه گلستان. ۵- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

\* (E-Mail: Ikarimirad@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۱/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۵/۰۶/۲۰

### Abstract

Aquifer overexploitation can cause problems such as salt water intrusion and land subsidence. This condition drives the necessity for the optimal management of aquifers which requires an understanding of aquifer hydrodynamics. In this regard radioisotope dating is one of the useful methods. This paper presents a practical method to determine the age of groundwater using tritium radioisotope. The tritium dating of groundwater includes sampling, initial distillation, enrichment, secondary distillation, measurement of tritium radioactivity, calculation of device parameters, and age of the samples. The electrolytic enrichment method and radioactivity measurement using LSC, which is introduced in this paper, make it possible to measure tritium below 1 TU that means dating water up to 50 years and can overcome the problem of tritium concentration decline in the atmosphere to some extent. The results of a study performed using this method during spring 2012, with interior facilities of the country, showed that the age of the samples were divided into two groups of 5 to 10 years and the mixture of modern recharge and recharged before 1952. Therefore the young parts of aquifer are influenced more readily by qualitative and quantitative climatic and factors. On the contrary, territories with older water reserves are less affected by these changes and have a higher degree of reliability. In the allocation of such resources only the renewable volume should be considered. To achieve this objective imposition of restrictive policies of exploitation seem to be necessary in aquifer management plans.

**Keywords:** Golestan province, Confined aquifer, Electrolytic enrichment, Aquifer management, LSC.

### چکیده

برداشت بی‌رویه از سفره‌های آب زیرزمینی می‌تواند سبب مشکلاتی از قبیل پیشروی آب شور و نشست زمین شود. این شرایط لزوم مدیریت بهینه برداشت از سفره‌ها را ایجاب می‌کند که نیازمند شناخت هیدرودینامیک آبخوان بوده و در این زمینه سن‌سنجی رادیوایزوتوپی یکی از روش‌های مفید است. این مقاله روشی کاربردی جهت تعیین سن آب زیرزمینی با استفاده از رادیوایزوتوپ تریتیوم ارائه می‌دهد. سن‌سنجی تریتیوم در آب زیرزمینی شامل نمونه‌برداری، تقطیر اولیه، غنی‌سازی، تقطیر ثانویه، سنجش پرتوزایی ناشی از تریتیوم، محاسبه پارامترهای دستگاهی و سن نمونه‌ها است. روش غنی‌سازی الکترولیتی و سنجش پرتوزایی توسط LSC که در این مقاله معرفی شده، اندازه‌گیری مقادیر تریتیوم زیر ۱ TU را ممکن می‌سازد که به معنای سنجش سن آب تا ۵۰ سال است و می‌تواند مشکل افت غلظت تریتیوم در اتمسفر را تا حدودی رفع نماید. نتایج مطالعه‌ای که با این روش در بهار سال ۱۳۹۰ و با امکانات داخل کشور انجام گرفت، نشان داد که سن نمونه‌ها در دو گروه بین ۵ تا ۱۰ سال و نیز مخلوطی از تغذیه جدید و تغذیه قبل از سال ۱۹۵۲ قرار می‌گیرد. بر این اساس بخش‌های جوان آبخوان سریع‌تر تحت تأثیر تغییرات کمی و کیفی اقلیمی و انسانی قرار می‌گیرد. در مقابل محدوده‌هایی که ذخائر آب قدیمی دارد، کمتر از این تغییرات اثر پذیرفته و از درجه اطمینان بالاتری برخوردار است و در بهره‌برداری از آن باید حجم تجدیدشونده در نظر گرفته شود که برای دستیابی به این هدف اعمال سیاست‌های محدودکننده برداشت در برنامه‌های مدیریت آبخوان ضروری به نظر می‌رسد.

**واژه‌های کلیدی:** استان گلستان، سفره تحت فشار، غنی‌سازی الکترولیتی، مدیریت آبخوان، LSC.

بخش وسیعی از فلات ایران در مناطق خشک و نیمه خشک قرار گرفته است. متوسط بارندگی سالیانه ایران تقریباً رقمی معادل ۲۴۰ میلی متر است که کمتر از یک سوم مقدار بارندگی متوسط خشکی های زمین می باشد (علیزاده، ۱۳۸۰). در سال های گذشته افزایش جمعیت در کشور، محدودیت منابع آب های سطحی و بهره برداری بیش از اندازه از آبخوان ها باعث وارد آمدن خسارات جبران ناپذیری به منابع آب زیرزمینی کشور شده است. علاوه بر افت شدید سطح آب آبخوان ها، فعالیت های کشاورزی، صنعتی و شهری، آلاینده های مختلفی را به آبخوان ها تحمیل می کنند. برای جلوگیری از ادامه افت کمی و کیفی، مدیریت بهره برداری و حفاظت از آب های زیرزمینی باید به عنوان یک اصل و پایه در برنامه ریزی های کشور قرار گیرد.

چرخه هیدرولوژیکی با وجود مشخص بودن مراحل، پیچیدگی هایی در فرآیندها دارد که همواره موضوع بحث متخصصان بوده است. در سال های پس از جنگ جهانی، هیدروژئوشیمی بطور گسترده ای تحت تأثیر پیشرفت ها در علوم دیگر همچون شیمی- فیزیک، مهندسی مواد و اقیانوس شناسی قرار گرفت و در همین زمان بود که کاربردهای هیدرولوژیکی ایزوتوپ ها نیز به سرعت توسعه یافت (Edmunds, ۲۰۰۹). کاربرد رادیوایزوتوپ ها در شناسایی و درمان بسیاری از بیماری ها، بالا بردن کیفیت محصولات کشاورزی تنها بخشی از کاربردهای علوم و فنون هسته ای است. با توجه به دستاوردهای بزرگ کشور مادر زمینه استفاده صلح آمیز از انرژی هسته ای و پیشرفت های پر شتاب علوم و فنون هسته ای در جهان و نیز توسعه این روش ها در عرصه های مختلف، ضرورت پرداختن به آن امری بدیهی به نظر می رسد. امید است این تحقیق به گسترش کاربردهای دانش هسته ای در مدیریت منابع آب کشور و شناخت بهتر خصوصیات آب های زیرزمینی یاری رساند.

در هیدرولوژی آب های سطحی و زیرزمینی استفاده از ردیاب های ایزوتوپی روش با ارزشی برای مطالعات آب شناسی و مدیریت منابع آب محسوب می شود. در این روش علاوه بر منشاء یابی رسوبات که به منظور تعیین مناطق فرسایش پذیر صورت می گیرد، نسبت های ایزوتوپی پایدار همچون  $^2\text{H}$  (D) و  $^{18}\text{O}$  و رادیوایزوتوپ های طبیعی  $^3\text{H}$  (T) و رادیوکربن  $^{14}\text{C}$  و نیز ردیاب های ایزوتوپی مصنوعی، جهت تعیین پارامترهای فرآیندی آب های زیرزمینی مانند درصد اختلاط، زمان اقامت و سرعت جریان استفاده شده اند (Sood و همکاران، ۱۹۹۴). ویژگی های شیمیایی آب تنها در موارد معدودی می توانند به عنوان ردیاب محیطی موثر مورد استفاده قرار گیرند، زیرا در بیشتر موارد بین محیط و آب واکنش رخ می دهد. این امر سبب می شود که ماهیت شیمیایی آب تنها به عنوان ابزاری برای شناخت منشاء و مسیر جریان به کار آید (خلج امیرحسینی و نبی پور، ۱۳۸۵). عناصری با عدد اتمی یکسان و عدد جرمی متفاوت را ایزوتوپ های

یک عنصر گویند. عدد جرمی هیدروژن معمولی یک (یک پروتون)، هیدروژن دو یا دوتریوم (D)، دو (یک پروتون و یک نوترون) و تریتیوم (T)، سه (یک پروتون و دو نوترون) است. در ترکیب اتمی مولکول های آب به طور متوسط ۹۹/۹۸۴ درصد هیدروژن معمولی و ۰/۰۱۶ درصد دوتریوم و ۰/۰۰۰۰۶ درصد تریتیوم وجود دارد. تریتیوم پرتوزا است، یعنی به مرور زمان اتم های آن واپاشیده شده و به  $^3\text{He}$  تبدیل می شود و پرتو بتا گسیل می کند. این ذرات b توسط لایه ای از هوا با ضخامت mm ۷ یا کاغذی با ضخامت mm ۰/۱ کاملاً متوقف می شوند (WHO, ۱۹۸۹). سرعت واپاشی به صورت قراردادی با نیمه عمر، یعنی مدت زمان کاهش تعداد مشخصی از اتم های یک عنصر رادیواکتیو به نصف میزان اولیه خود بیان می شود (Mazor, ۲۰۰۴). تریتیوم دارای نیمه عمر ۱۲/۳ سال می باشد. ناپایداری تریتیوم این امکان را می دهد که با اندازه گیری غلظت آن در آب مورد نظر سن آن، یعنی مدت زمانی که از بارش آن می گذرد را طبق رابطه زیر محاسبه نمود:

$$\ln[A_t] = -\lambda t + \ln[A_0] \quad (1)$$

که در آن t زمان بر حسب سال،  $[A_t]$  غلظت تریتیوم در زمان t،  $[A_0]$  غلظت اولیه تریتیوم و  $\lambda$  ثابت واپاشی تریتیوم و برابر با ۰/۰۵۶ بر سال می باشد (Edmunds, ۲۰۰۹). غلظت تریتیوم در آب با نسبت اتم های آن به اتم های هیدروژن معمولی بیان می شود و هر  $10^{-18}$  از آن یک واحد تریتیوم (TU) است. تریتیوم دارای دو منشاء طبیعی و انسانی است. در فرآیند طبیعی، نوترون های اشعه کیهانی در لایه های بالایی اتمسفر با نیتروژن واکنش داده و  $^{15}\text{N}$  تولید می کنند که بسیار ناپایدار بوده و طبق رابطه (۲) به کربن معمولی ( $^{12}\text{C}$ ) و تریتیوم شکسته می شود. اتم های تریتیوم اکسید شده و به آب تبدیل می گردند و به صورت باران وارد آب زیرزمینی می شود. میزان تولید طبیعی تریتیوم حدود ۵ TU است.



منشاء انسانی تریتیوم به آزمایش بمب های هسته ای مربوط می شود. این آزمایشات در سال ۱۹۵۲ در نیمکره شمالی زمین آغاز شد و مقادیر زیادی تریتیوم را به اتمسفر اضافه نمود. این میزان در زمان اوج خود در سال ۱۹۶۳ در آمریکا به ۱۰۰۰۰ TU در یک ماه بارندگی رسید. معاهده بین المللی آزمایش سطحی بمب های هسته ای را در سال ۱۹۶۳ متوقف کرد و از آن پس غلظت تریتیوم در بارندگی روندی نزولی را طی نمود (Mazor, ۲۰۰۴). این موضوع از نقطه نظر زیست محیطی خوشایند ولی از نظر هیدرولوژیکی نامطلوب است، زیرا غلظت تریتیوم در طبیعت دوباره به میزان طبیعی خود بازگشت و اندازه گیری میزان آن را مشکل ساخت. امروزه با تولید تجهیزات مدرن و دقیق، شمارش مقادیر ایزوتوپ ها در مقیاس بسیار کم و ناچیز امکان پذیر شده و دانشمندان را به استفاده از این ابزار قدرتمند در شناسایی فرآیندهای هیدرولوژیکی امیدوار ساخته است.

CF<sub>۶</sub> و CF<sub>۴</sub> از جمله ردیاب های غیر ایزوتوپی هستند که برای سنجش سن آب های زیرزمینی جوان مورد استفاده قرار می گیرند. این

مواد در مقایسه با T که هم برای آب‌های سطحی و هم زیرزمینی کاربرد دارد، به علت گازی بودن نمی‌توانند در مجاورت هوا قرار بگیرند و فقط برای آب زیرزمینی استفاده شوند. در زمان بکارگیری این گازها، عواملی از قبیل دما و ارتفاع تغذیه باید قید شود و در مورد  $CF_6$  پدیده هوای اضافه<sup>۵</sup> نیز می‌بایست در نظر گرفته شود. همچنین هنگام استفاده از CFCs، منابع آلودگی مانند مخازن سپتیک، شبکه فاضلاب، مکان‌های دفن زباله و رواناب شهری که می‌توانند حاوی مقادیری از آن باشند، باید لحاظ شوند (Darling و همکاران، ۲۰۱۲). در هر حال به دلیل افت انتشار CFC در ۲۰ سال گذشته (پس از امضای پروتکل مونترال<sup>۶</sup> در سال ۱۹۹۶ که به موجب آن تولید گازهای مخرب لایه اوزون از جمله CFCs ممنوع شد)، به نظر می‌رسد استفاده از  $CF_6$  کارایی بیشتری دارد.

T تنها ردیابی است که به عنوان نوعی اتم هیدروژن، جزئی از مولکول آب به حساب می‌آید و به این دلیل غلظت آن تحت تأثیر عوامل محیطی قرار نمی‌گیرد و در حرکت نسبت به آب دچار تاخیر نمی‌شود، ولی بین CFCs و  $CF_6$  که گازهای محلول در آب هستند، با عناصر موجود در محیط متخلخل همواره واکنش‌هایی رخ می‌دهد که موجب بروز خطا در محاسبات می‌شود (Morgenstern و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین سن محاسبه شده توسط T، زمان حرکت آب در منطقه غیر اشباع را هم شامل می‌شود که در مورد ردیاب‌های گازی اشاره شده این طور نیست و این در مناطقی که سطح ایستابی در عمق زیادی قرار گرفته باعث اشتباه در محاسبات می‌گردد.

استفاده از T به علت محدودیت‌هایی که دارد، به عنوان روشی تکمیلی توصیه شده است (Kazemi و همکاران، ۲۰۰۶؛ Liu و همکاران، ۲۰۱۴). از نظر هزینه هر چند هزینه‌های سن‌سنجی T حدود ۱/۵ برابر استفاده از CFC است، اما نسبت به روش‌های دیگر اندک است (Kazemi و همکاران، ۲۰۰۶). از جمله مزایای استفاده از CFCs و  $CF_6$ ، اندازه‌گیری سریع‌تر و نتایج کمی‌تر نسبت به T و نیز مخلوط شدن یکسان آن‌ها در اتمسفر زمین است، در حالی که میزان غلظت T در مناطق مختلف متفاوت است (Darling و همکاران، ۲۰۱۲). یکی دیگر از محدودیت‌های استفاده از T افت غلظت آن در آب باران و رسیدن آن به غلظت طبیعی آن (۵ TU) است که با افزایش دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری و روش‌های غنی‌سازی<sup>۷</sup> که به تغلیظ آن در نمونه‌های مورد آزمایش می‌پردازد تا حدودی رفع شده است. البته راه حل مطمئن‌تر استفاده از روش مبتنی بر ترکیب مقادیر T و  $^3He$  که حاصل واپاشی آن است، می‌باشد که در این صورت نیز نیاز به اندازه‌گیری میزان T وجود دارد.

مطالعات گسترده‌ای در زمینه سن‌سنجی آب زیرزمینی با استفاده از تریتیوم به تنهایی و یا به همراه ردیاب‌های دیگر، از سال‌های ابتدای دهه ۱۹۹۰ میلادی در سراسر جهان انجام شده است. در ادامه به تعدادی از این مطالعات که در سال‌های اخیر صورت گرفته، پرداخته می‌شود. Cartwright و Morgenstern (۲۰۱۲) در اعماق مختلف

آبخوان حوضه آبریز اُونز<sup>۸</sup> واقع در جنوب شرق حوضه آبریز اصلی موری<sup>۹</sup> کشور استرالیا، به سن‌سنجی با استفاده از T پرداختند و به این نتیجه دست یافتند، سرعت قائم آب زیرزمینی حدود ۰/۶ متر بر سال است که با توجه به میزان تخلخل آبخوان میزان نرخ تغذیه آن، ۱۸۰-۱۲۰ میلی‌متر بر سال محاسبه می‌شود. Han و همکاران (۲۰۱۲) نیز بر اساس نتایج مطالعه همزمان T و CFCs سه نوع رژیم آب زیرزمینی را در دشت ساحلی جنوبی خلیج لایژو<sup>۱۰</sup> واقع در شمال چین که با پیشروی آب شور مواجه است، تشخیص دادند. نوع اول که در جنوب دشت واقع شده دارای آب زیرزمینی جوان با سن کمتر از ۳۴ سال است، نوع دوم در مناطق میانی دشت، مخلوطی از آب جوان تغذیه کننده و آب قدیمی نشت کرده است و نوع سوم که مناطق شمالی دشت را شامل می‌شود و آب شور با سنی بیش از ۵۰ سال بوده که سرعت حرکت آب در آن اندک است.

Tait و همکاران (۲۰۱۴) سن آب زیرزمینی حاوی مواد مغذی را که در زیر سطح آب یک تالاب، به آن تخلیه می‌شود، مورد بررسی قرار دادند. تالاب مورد مطالعه در جزایر کوک<sup>۱۱</sup> و در میان اقیانوس آرام واقع شده که سن آب زیرزمینی وارد شده به آن، با استفاده از تریتیوم، بین ۱۰ تا ۹۳ سال محاسبه شد. بر این اساس بین نفوذ مواد مغذی خاک سطحی به سفره آب زیرزمینی و تخلیه آن به تالاب، تاخیر زمانی وجود دارد و از این رو اقداماتی که به منظور کاهش ورود مواد مغذی انجام می‌شود، ممکن است تا دهه‌ها باعث کاهش جریان مواد مغذی ورودی به تالاب نشود. Liu و همکاران (۲۰۱۴) در حوضه آبریز هوهوت<sup>۱۲</sup> واقع در شمال شرق دشت هتائو<sup>۱۳</sup> کشور مغولستان، با استفاده از T و CFCs نشان دادند که سن آب زیرزمینی به دست آمده از هر یک از دو روش در سطح یک درصد همبسته است و مقادیر آن را بین ۲۱ تا بیش از ۵۰ سال تعیین کردند. همچنین آن‌ها سرعت جریان در سفره کم عمق را در دو مسیر مختلف حدود ۰/۷۳ کیلومتر بر سال محاسبه نمودند.

مهم‌ترین و منحصر به فردترین کاربرد مقوله سن آب زیرزمینی قابلیت تعیین میزان تجدیدشوندگی یا بازپرسازی منابع آب زیرزمینی است. این مفهوم به نوبه خود بیانگر اعتبار مخازن آب زیرزمینی و میزان حساسیت و آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر چالش‌هایی نظیر آلودگی، خشکسالی و برداشت بی‌رویه می‌باشد. همچنین سن آب زیرزمینی تنها مفهوم علمی است که نشان می‌دهد، منابع آب زیرزمینی جدیداً با بارندگی تغذیه شده‌اند یا این که آب استخراج شده در سفره با فرآیندهای آهسته نفوذ که در زمان‌های دور اتفاق افتاده جمع شده است (Kazemi و همکاران، ۲۰۰۶). بر اساس مطالعات پیشین که به برخی از آن اشاره شد، اندازه‌گیری تریتیوم به تنهایی و یا به همراه ردیاب‌های دیگر، می‌تواند با مشخص نمودن سن آب زیرزمینی به محاسبه خصوصیات هیدرودینامیک آبخوان کمک نموده و نتایجی کاربردی در مدیریت سفره‌های آب زیرزمینی ارائه دهد. از این رو هدف مقاله حاضر ارائه روش رادیوایزوتوپی اندازه‌گیری سن آب زیرزمینی با استفاده از غنی‌سازی تریتیوم می‌باشد.

ساعت به کار انداخته شود تا آب موجود در چاه که احتمال اختلاط آن با آب باران و یا تبخیر از آن وجود دارد، تخلیه شود. در این نمونه‌برداری، جریان باید کم و یکنواخت و در حدود ۵۰۰ میلی لیتر در دقیقه باشد تا بطری نمونه‌برداری بدون صدا پر شود. به این منظور بطری پلی‌اتیلن نشکن HDPE با غلظت بالا مناسب‌تر است. از هر محل دو نمونه آب یک لیتری جمع‌آوری و دقت شود که قسمت کوچکی از بطری برای انبساط نمونه خالی باشد. در انتها درب بطری به طور کامل بسته و برای جلوگیری از تبخیر و باز شدن در حین نقل و انتقال، با نوار چسب پیچیده شود. این نمونه‌ها نباید نزدیک منابع تریتیوم مانند ساعت‌های تابنده (فلورسنس<sup>۱۴</sup>) و علامات یا هر وسیله‌ای از جنس نور افشا (لومینسنس<sup>۱۵</sup>) قرار گیرند (IAEA, ۲۰۰۰). یکی از مراکزی که در داخل کشور می‌توان آزمایشات اندازه‌گیری تریتیوم را در آن به انجام رساند، پژوهشکده علوم و فنون هسته‌ای وابسته به سازمان انرژی اتمی ایران است که هزینه آن در سال ۱۳۹۰ برای هر نمونه حدود سه میلیون ریال بوده است. لازم به ذکر است نمونه‌های مورد نیاز در روش‌های CFCs و CF<sub>6</sub> در ظروف شیشه‌ای نگهداری شده و عملیات جمع‌آوری آن، به علت اهمیت عدم وجود هوا در نمونه، اندکی دشوارتر از تریتیوم است (IAEA, ۲۰۰۰).

#### • غنی‌سازی نمونه‌ها

بطور کلی ایزوتوپ‌های سنگین‌تر در واکنش‌ها کمتر شرکت می‌کنند و فرآیندها و فشارهای بیرونی نیز روی آن‌ها کمتر موثر است. از نظر شیمیایی، تریتیوم مشابه هیدروژن عمل می‌کند، اما از آنجا که تریتیوم جرم بیشتری دارد، در بسیاری از واکنش‌ها خیلی کندتر از هیدروژن شرکت می‌کند. این اساس یکی از روش‌های افزایش غلظت تریتیوم در آب به منظور اندازه‌گیری مقادیر بسیار کم، به نام غنی‌سازی الکترولیتی می‌باشد. به این معنی که هنگام الکترولیز شدن مولکول‌های آب، عمدتاً مولکول‌هایی که هیدروژن معمولی دارند در واکنش شرکت کرده و مولکول‌های حاوی تریتیوم در آب باقی مانده و در نتیجه غلظت آن افزایش می‌یابد.

یک واحد دستگاه غنی‌سازی که به آن سلول<sup>۱۶</sup> می‌گویند، شامل دو بخش اصلی کاتد و آند می‌باشد. جهت راه‌اندازی دستگاه غنی‌سازی الکترولیتی کاتد داخل آند قرار می‌گیرد و با عایق‌هایی که در بالا و پایین قرار دارد دو الکتروود کاملاً از هم جدا می‌گردند. الکتروودها با پیچ به هم محکم بسته می‌شوند تا نمونه با رطوبت هوا در ارتباط نباشد. نمونه آب از لوله کوچکی که بالای کاتد قرار دارد، وارد دستگاه غنی‌سازی شده و با اتصال الکتروودها به یک منبع تغذیه، عمل الکترولیز آغاز می‌شود. به منظور جلوگیری از تبخیر و ایجاد بیشترین امکان جداسازی ایزوتوپی، دما با یک سامانه سردکننده نزدیک صفر نگه داشته می‌شود.

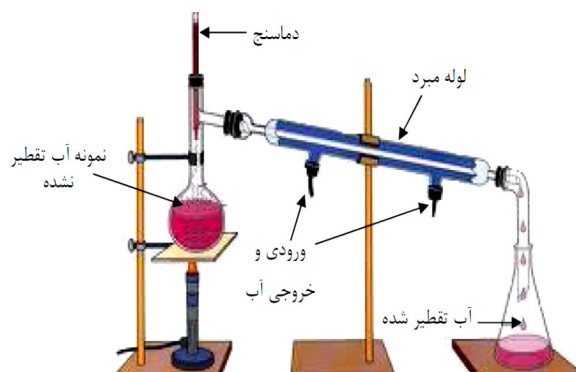
عملیات اندازه‌گیری غلظت تریتیوم در آب زیرزمینی شامل نمونه‌برداری، تقطیر اولیه نمونه‌ها، غنی‌سازی، تقطیر ثانویه نمونه‌ها، سنجش پرتوزایی بر حسب واحد تریتیوم (TU)، محاسبه پارامترهای دستگاهی اندازه‌گیری تریتیوم و سن نمونه‌ها است که در ادامه هر یک از این مراحل تشریح می‌شوند.

#### • روش نمونه‌برداری تریتیوم

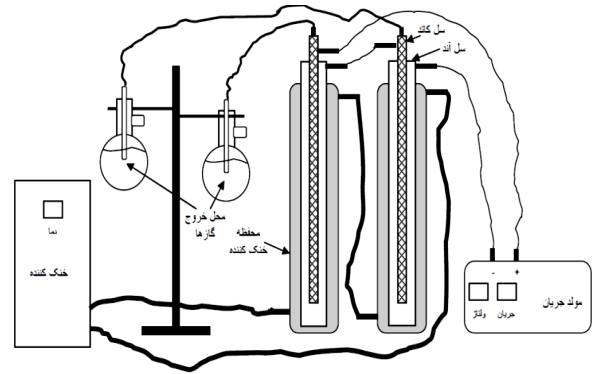
در ابتدا بطری‌های نمونه‌برداری برچسب زده شده و تاریخ، ساعت، شماره نمونه و مختصات محل نمونه‌برداری با ماژیک‌های ضد آب بر روی آن درج می‌گردد. برای اطمینان بیشتر، شماره نمونه در چند محل روی بطری یا برچسب آن نوشته می‌شود. برای شست‌وشو بطری‌ها باید بطری نمونه‌برداری با آبی که نمونه‌برداری از آن انجام می‌شود، پر شده و پس از بستن درب آن، بطری به شدت تکان داده می‌شود تا تمام سطح داخلی آن شسته شود. در ادامه آب شست‌وشو به حالت چرخشی از بطری خارج می‌شود. سپس با تکان دادن، کلیه قطرات چسبیده به بطری بیرون انداخته می‌شود. قبل از نمونه‌برداری لازم است پمپ‌ها برای مدت حداقل یک

#### • تقطیر اولیه نمونه‌ها

عملیات تقطیر جهت زدودن ناخالصی‌ها و مواد آلی در نمونه‌ها انجام می‌شود. در این فرآیند ۳۰۰ ml از نمونه مورد نظر را با ۲۵۰ mg سدیم تیوسولفات جهت تبدیل یون I<sup>-</sup> به I<sub>2</sub> داخل بالن ریخته می‌شود. به منظور قلیایی کردن نمونه، ۵۰۰ mg پودر سدیم کربنات به آن اضافه می‌شود. نمونه آماده شده در دستگاه تقطیر قرار می‌گیرد (شکل ۱). ۷۵-۵۰ ml از آب تقطیر شده اولیه دور ریخته شده و ۱۰۰ ml بعدی جمع‌آوری می‌گردد که با توجه به اینکه میزان نمونه اولیه مورد نیاز جهت عملیات غنی‌سازی الکترولیتی ۲۰۰ ml است، مراحل تقطیر اولیه برای هر نمونه باید دو بار انجام شود.



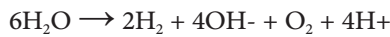
شکل ۱- طرح شماتیک دستگاه تقطیر



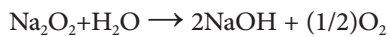
شکل ۲- طرح شماتیک دستگاه غنی‌سازی الکترولیتی

مقطر و خشک کردن به همراه کاتد، روی سیستم نصب می‌شود. برای الکترولیز آن می‌بایست الکترولیتی به آن اضافه کرد که آنیون و کاتیون آن قادر به ترکیب شدن با الکترودها نباشد. به این منظور پراکسید سدیم ( $\text{Na}_2\text{O}_2$ ) استفاده می‌شود.

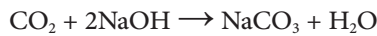
الکترولیز با اعمال اختلاف پتانسیل ۶ ولتی به مجموعه سلول‌ها انجام می‌گیرد. برای الکترولیز نمونه به حدود ۴۵۰ آمپرساعت جریان نیاز است (۲/۹۷۸ آمپرساعت برای الکترولیز هر گرم آب). واکنش رخ داده در سلول عبارت است از:



در نمونه حین تغلیظ واکنش دیگری نیز به صورت زیر انجام می‌شود که محلول را قلیایی می‌کند:



در این واکنش اکسیژن به دست آمده از سلول خارج شده و در آخر نمونه الکترولیز شده حاوی مقداری سود خواهد بود که به دلیل این که خود یک عامل کوئنچ محسوب می‌شود باید خنثی شود. عمل خنثی کردن توسط گاز  $\text{CO}_2$  انجام می‌شود. با ورود و خروج حدود ۲۵ لیتر گاز،  $\text{NaOH}$  موجود در نمونه با واکنش زیر به کربنات تبدیل شده و ته‌نشین می‌شود:



این مقدار با قرار دادن یک نمونه فاقد تریتیوم که به آن آب مرده<sup>۳۱</sup> می‌گویند، در کنار سایر نمونه‌ها قابل اندازه‌گیری است. پس از شمارش همزمان آب مرده و سایر نمونه‌ها هر مقداری که به عنوان پرتوزایی نمونه آب مرده تعیین گردد، زمینه<sup>۳۲</sup> نامیده می‌شود.

جهت انجام شمارش توسط دستگاه شمارش سوسوزن مایع نمونه‌های زیر را در سینی مخصوص دستگاه LSC قرار می‌دهیم:

۱- نمونه اصلی: ۸ ml از نمونه آب تقطیر شده را به همراه ۱۰ ml محلول سنتیلاتور High Safe به داخل ویال ریخته و درب آن را بسته و آن را مخلوط می‌کنیم تا نمونه هموزن به دست آید.

۲- نمونه زمینه: ۸ ml آب مرده را به همراه ۱۰ ml محلول سنتیلاتور High Safe در ویال ریخته و بعد از آن درب آن را محکم بسته و ظرف را تکان می‌دهیم تا همگن گردد.

۳- نمونه استاندارد: ۸ ml محلول استاندارد را که با توجه به اکتیویته (پرتوزایی) مورد نیاز آماده شده را به همراه ۱۰ ml محلول سنتیلاتور High Safe درون ویال ریخته، درب آن را بسته و تا زمانی که هموزن شود تکان می‌دهیم. مدت شمارش برای نمونه‌های تریتیوم ۵۰۰ دقیقه است.

اولیه اندازه‌گیری و ضریب تغلیظ دستگاه غنی‌سازی نشان‌دهنده میزان افزایش غلظت تریتیوم در نمونه‌ها می‌باشد. با در اختیار داشتن نتایج شمارش نمونه‌ها بازده دستگاه شمارش از این رابطه به دست می‌آید:

در اولین آزمایش سلول کاتد (از جنس آهن) را با اتانول ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ) شسته و خشک می‌شود. سپس به مدت نیم ساعت در ظرف حاوی اسید کلریدریک ( $\text{HCl}$ )  $80^\circ\text{C}$  قرار گرفته و پس از شست‌وشو با آب جوش، خشک می‌نمایند. سپس برای نیم ساعت داخل استوانه شیشه‌ای محتوی اسید فسفریک ( $\text{H}_2\text{PO}_4$ )  $80^\circ\text{C}$  قرار داده می‌شود، تا فسفات‌ها شود و رنگ آن به خاکستری تبدیل گردد. بالاخره کاتد بارها با آب جوش شست‌وشو داده شده و برای ۲۴ ساعت در حرارت  $150^\circ\text{C}$  قرار می‌گیرد. آند نیز پس از شست‌وشو با آب

#### • تقطیر ثانویه و سنجش پرتوزایی ناشی از تریتیوم

در مرحله بعد باید یکبار دیگر نمونه‌ها تقطیر شوند. یکی از روش‌های دقیق برای اندازه‌گیری مقدار تریتیوم در غلظت‌های بسیار پایین، شمارش سوسوزن مایع (LSC)<sup>۳۳</sup> است. غلظت تریتیوم ۱۰-۱۵ TU به طور مستقیم با LSC قابل اندازه‌گیری است. برای غلظت‌های پایین‌تر، تریتیوم آب تغلیظ یا غنی‌سازی می‌شود. اساساً فرآیند سنتیلاسیون (سوسوزن) تبدیل انرژی پدیده واپاشی رادیواکتیو به فوتون‌های نور است. هر عاملی که در این فرآیند باعث کاهش بازده انتقال انرژی و یا موجب تضعیف فوتون‌ها گردد، عامل تاریکی یا کوئنچ<sup>۳۴</sup> نامیده می‌شود. اثر کوئنچ، کاهش در تعداد فوتون‌های اندازه‌گیری شده است که موجب کاهش میزان شمارش در واحد زمان (cpm)<sup>۳۵</sup> می‌شود و بازده شمارش در نمونه تحت تأثیر قرار می‌گیرد. برای تعیین پرتوزایی مطلق نمونه (dpm)<sup>۳۶</sup> ضروری است که سطح کوئنچ اولیه نمونه اندازه‌گیری شود و سپس تصحیحات لازم برای تعیین بازده شمارش اعمال گردد (فنادی مراغه، ۱۳۸۴).

همچنین یک مقدار ثابت از شمارش انجام شده در هر اندازه‌گیری مربوط به محیط بوده و ارتباطی با میزان پرتوزایی نمونه ندارد.

#### • محاسبه پارامترهای دستگاهی اندازه‌گیری تریتیوم

پارامترهای دستگاهی مورد نیاز جهت اندازه‌گیری تریتیوم نمونه‌ها شامل بازده دستگاه شمارش و ضریب تغلیظ دستگاه غنی‌سازی می‌باشد. بازده دستگاه شمارش بیانگر سطح کوئنچ

$$\varepsilon = (N_s/T_s - N_b/T_b)/(A.V) \quad (3)$$

که در آن  $\varepsilon =$  بازده شمارش دستگاه برای اندازه‌گیری  $^3\text{H}$ ،  $N_s =$  تعداد شمارش برای نمونه استاندارد،  $T_s =$  زمان شمارش نمونه استاندارد (ثانیه)،  $N_b =$  تعداد شمارش برای نمونه زمینه،  $T_b =$  زمان شمارش نمونه زمینه (ثانیه)،  $A =$  پرتوزایی  $^3\text{H}$  در نمونه استاندارد (Bq)،  $V =$  حجم نمونه آب مورد آزمایش (لیتر)

سپس با استفاده از رابطه زیر ضریب تغلیظ دستگاه غنی‌سازی محاسبه گردید:

$$EF = (N_{es}/T_{es} - N_b/T_b)/(N_s/T_s - N_b/T_b) \quad (4)$$

که در آن  $EF =$  ضریب تغلیظ،  $N_{es} =$  تعداد شمارش برای نمونه

استاندارد بعد از تغلیظ،  $T_{es} =$  زمان شمارش استاندارد بعد از تغلیظ (ثانیه) است.

#### • محاسبه سن نمونه‌ها

سن نمونه‌ها بر اساس پرتوزایی نهایی (رابطه ۵) و با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود، که زمان (t) در آن همان سن نمونه آب زیرزمینی است.

$$A^{3(H)} = (N_s/T_s - N_b/T_b)/(\varepsilon.V.EF) \quad (5)$$

که در آن:  $A^{3(H)} =$  پرتوزایی  $^3\text{H}$  (dpm/gr)،  $N_s =$  تعداد شمارش نمونه  $T_s$ ،  $T_s =$  زمان شمارش نمونه (ثانیه) است.

### نتایج و بحث

برای مقادیر مختلف تریتیوم موجود در آب زیرزمینی می‌توان طول عمرهای مشخصی را متصور شد (وزارت نیرو، ۱۳۹۰). البته ارقام این دستورالعمل بر اساس سنجش‌های سال ۱۳۷۵ می‌باشد که غلظت‌های مذکور باید اصلاح شوند. به عنوان مثال ارقام جدول (۱) برای سال ۱۳۹۰ تصحیح شده و برای مناطق درون قاره‌ای و ساحلی، آورده شده است. لازم به ذکر است که خطای سن‌سنجی با استفاده از CFC که با استفاده از کروماتوگرافی گازی  $^{13}\text{C}$  و با دقت  $\pm 3\%$  و حد اندازه‌گیری ۵۰ پیکوگرم بر کیلوگرم انجام شود، کمتر از یک سال است (Dunkle و همکاران، ۱۹۹۳).

در مطالعه سن‌سنجی رادیوایزوتوپی با استفاده از تریتیوم نیاز به وجود سری زمانی مقادیر موجودی تریتیوم آب باران در منطقه مورد مطالعه است که در صورت عدم وجود آن، سن‌یابی کیفی و بدون بیان عدد دقیق سن، بر اساس سال انفجارات هسته‌ای (۱۹۶۳-۱۹۵۲) انجام می‌گیرد. بر طبق دستورالعمل کاربرد روش‌های ردیابی در مطالعات آبخوان‌های آبرفتی تهیه شده توسط دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، در حالت کلی

جدول ۱- مقادیر تریتیوم مربوط به سنین مختلف آب در روش سن‌یابی کیفی

بازه مقادیر تریتیوم (TU)		سن آب
نواحی ساحلی	نواحی قاره‌ای	
کمتر از ۰/۳۳	کمتر از ۰/۳۳	تغذیه آبخوان قبل از سال ۱۹۵۲
۰/۳۳ - ۰/۸۲	۰/۳۳ - ۲	مخلوطی از تغذیه جدید و تغذیه قبل از سال ۱۹۵۲
۰/۸۲ - ۳/۳	۲ - ۶/۱	تغذیه جدید (بین ۵ تا ۱۰ سال)
۳/۳ - ۸/۲	۶/۱ - ۱۲/۲۵	تغذیه از سال ۱۹۶۳
بیشتر از ۸/۲	۱۲/۲۵ - ۲۰/۴	سهم عمده تغذیه مربوط به اواخر دهه ۶۰ و اوایل دهه ۷۰
-	بیشتر از ۲۰/۴	عمده تغذیه از سال ۱۹۶۳ تا ۱۹۶۹

بر گرم معادل  $15988599/8$  dpm/gr محاسبه و با رقیق‌سازی به اکتیویته نهایی  $2/837$  dpm/gr رسانده شد (کریمی‌راد و همکاران، ۱۳۹۲).

همان‌طور که مشاهده می‌شود در این مطالعه سن‌سنجی نمونه‌ها با روش ذکر شده در جدول (۱) انجام گرفته و در نتیجه سن نمونه‌ها در دو گروه بین ۵ تا ۱۰ سال (تغذیه جدید) و نیز مخلوطی از تغذیه جدید و تغذیه قبل از سال ۱۹۵۲ (سن بیش از ۶۵ سال) تعیین گردیده است. لازم به ذکر است به طور کلی در مطالعات ایزوتوپی توصیه می‌شود نمونه‌برداری در دو فصل تر و خشک انجام شود، ولی در مثال ذکر شده با توجه به امکانات موجود تنها یک مرحله نمونه‌برداری صورت گرفت.

به عنوان مثال جدول (۲) مقادیر تریتیوم اندازه‌گیری شده در نمونه‌های برداشت شده از سفره تحت فشار استان گلستان که فاقد سری زمانی مقادیر موجودی تریتیوم باران است، را نشان می‌دهد (کریمی‌راد و همکاران، ۱۳۹۲). این مطالعه در بهار سال ۱۳۹۰ با جمع‌آوری ۱۶ نمونه آب زیرزمینی و انجام کلیه مراحل آزمایشات در پژوهشکده علوم و فنون هسته‌ای به اجرا درآمد. همچنین به منظور تعیین ضریب تغلیظ در این مطالعه از استاندارد ی تاریخ تولید  $2004/4/24$  استفاده شد. با توجه به این که اکتیویته این نمونه استاندارد در زمان تولید برابر  $401230/5$  کیلو بکرل بر گرم بوده است، با استفاده از رابطه واپاشی تریتیوم (رابطه ۱) اکتیویته استاندارد در زمان نمونه‌سازی  $262399/8$  کیلو بکرل

جدول ۲- میزان اکتیویته واقعی تریتیوم و سن آب زیرزمینی نمونه‌ها

شماره نمونه	اکتیویته واقعی تریتیوم (dpm/gr)	اکتیویته واقعی تریتیوم (TU)	سن نمونه
۲۶	۱/۳۰۸۳۱۴	۱/۲۰۰۱۲۴	مخلوطی از تغذیه جدید و تغذیه قبل از سال ۱۹۵۲
۳۴	۰/۹۸۱۱۹۹	۰/۹۰۰۰۵۹	مخلوطی از تغذیه جدید و تغذیه قبل از سال ۱۹۵۲
۳۷	۲/۷۴۹۵۱۶	۲/۵۲۲۱۴۶	تغذیه جدید (بین ۵ تا ۱۰ سال)
۱۲۷	۱/۲۴۳۶۴۹	۱/۱۴۰۸۰۷	مخلوطی از تغذیه جدید و تغذیه قبل از سال ۱۹۵۲
۱۴۴	۱/۴۱۶۹۹۳	۱/۲۹۹۸۱۵	مخلوطی از تغذیه جدید و تغذیه قبل از سال ۱۹۵۲
۱۴۶	۲/۸۹۹۷	۲/۶۵۹۹۱۱	تغذیه جدید (بین ۵ تا ۱۰ سال)
۱۴۷	۲/۷۰۹۲۹۳	۲/۴۸۵۲۵	تغذیه جدید (بین ۵ تا ۱۰ سال)

### جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات

مطالعه حاضر می‌تواند به عنوان دستورالعملی کاربردی جهت استفاده محققین کشور به منظور اندازه‌گیری غلظت بسیار پایین تریتیوم در نمونه‌های آب‌زیرزمینی با توجه به امکانات داخلی ارائه گردد و عرصه‌ای جدید را در مطالعات هیدرولوژیک، ایمنی هسته‌ای و بسیاری زمینه‌های دیگر پیش روی محققین قرار دهد.

با توجه به مطالب گفته شده، روش غنی‌سازی الکترولیتی راهکاری عملی جهت افزایش غلظت در نمونه‌های طبیعی که مقادیر بسیار کمی تریتیوم دارند، می‌باشد. با این روش می‌توان غلظت تریتیوم را به حدی رساند که با روش LSC قابل اندازه‌گیری باشد. با توجه به ضریب تغلیظ به دست آمده، این روش قادر خواهد بود، مقادیر تریتیوم زیر ۱ TU را قابل اندازه‌گیری نماید و می‌تواند مشکل اصلی موجود بر سر راه استفاده از تریتیوم را که افت غلظت آن در اتمسفر است تا حدودی رفع نموده و اندازه‌گیری سن تا ۵۰ سال را ممکن سازد.

از نتایج ارائه شده مربوط به مطالعه موردی که به عنوان مثال آورده شده، می‌توان این گونه نتیجه‌گیری نمود که در مجموع بخش‌هایی از آبخوان مورد مطالعه بسیار جوان بوده و در مدت کمتر از ۱۰ سال تجدید و بازپرسازی می‌شود. این نتیجه می‌تواند در ارزیابی ریسک این پیکره آبی مورد استفاده قرار گیرد؛ به این صورت که در چنین شرایطی این بخش از آبخوان به سرعت تحت تأثیر تغییرات کمی و کیفی قرار می‌گیرد. این تغییرات می‌توانند شامل خشکسالی، برداشت بی‌رویه و یا نشر آلودگی در آبخوان باشد. البته این حساسیت باعث می‌شود که آبخوان پس از رفع عامل تغییر کمی یا کیفی نیز به همان سرعت احیا شود، به شرط آن که ظرفیت نگهداشت آن به دلیلی مانند نشست زمین کاهش پیدا نکرده باشد. بنابراین می‌توان گفت در این بخش از آبخوان فاصله زمانی بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی هیدروژئولوژیکی نسبتاً کم است. همچنین عدم وجود آب‌های ذخیره شده قدیمی در این قسمت آبخوان امکان برنامه‌ریزی برای تمام آب موجود در آن را فراهم می‌آورد. زیرا اگر شرایط آب و هوایی تغییر

خاصی نداشته باشد، می‌توان از تجدیدپذیری کل حجم آبخوان در کوتاه‌مدت مطمئن بود.

در محدوده‌هایی که ذخائر آب قدیمی وجود دارد، از تأثیر تغییرات کمی و کیفی به وجود آمده بر آبخوان کاسته می‌شود و در نتیجه درجه اطمینان آن بالا می‌رود. ولی از سوی دیگر باید در بهره‌برداری از این بخش سفره، برنامه‌ریزی‌ها را تا حد امکان به حجم تجدید شونده آبخوان (آب‌های جوان) معطوف نمود. چرا که با برداشت ذخائر آب قدیمی، ضمن از بین رفتن اطمینان کنونی به آبخوان، آب تجدید شونده باقیمانده پاسخگوی نیازهای تعریف شده نخواهد بود. بنابراین در این بخش از آبخوان، اعمال سیاست‌های محدودکننده برداشت ضروری به نظر می‌رسد.

انتخاب یک مقدار غلظت اولیه تریتیوم همواره یکی از اصلی‌ترین چالش‌ها در سن‌سنجی دقیق رادیوایزوتوپی محسوب می‌شود. از طرف دیگر اطلاع از روند تغییرات مقدار تریتیوم آب باران امکان سن‌یابی کمی و دقیق‌تر را فراهم آورده و به توسعه روش‌های رادیوایزوتوپیکی خواهد انجامید. لذا توصیه می‌شود برنامه‌ای توسط دستگاه‌های ذی‌ربط، جهت نمونه‌برداری و اندازه‌گیری غلظت تریتیوم در محل‌های تغذیه و نیز سطح آبخوان‌ها تنظیم گردد.

### پی‌نوشت

- 1- Deuterium
- 2- Tritium
- 3- Radiocarbon
- 4- Chlorofluorocarbons
- 5- excess air
- 6- Montreal Protocol
- 7- Enrichment
- 8- Ovens
- 9- Murray

- 17- Liquid Scintillation Counting
- 18- Quench
- 19- Count Per Minute
- 20- Disintegration Per Minute
- 21- Dead Water
- 22- Background
- 23- Gas chromatography

- 10- Laizhou
- 11- Cook islands
- 12- Hohhot
- 13- Hetao
- 14- Fluorescence
- 15- Luminescence
- 16- Cell

## منابع

- Han D. M., Song X. F., Currell M. J. and Tsujimura M. 2012. Using chlorofluorocarbons (CFCs) and tritium to improve conceptual model of groundwater flow in the South Coast Aquifers of Laizhou Bay, China. *Hydrological Processes*, 26(23): 3614-3629.
- IAEA. 2000. *Generic Procedures for Monitoring in a Nuclear or Radiological Emergency*, IAEA-TEC DOC-1092, Vienna, p. 48.
- Kazemi G.A., Lehr J.H. and Perrochet P. 2006. *Groundwater Age*. John Wiley & Sons, 90:1-164.
- Liu J., Chen Z., Wei W., Zhang Y., Li Z., Liu F. and Guo H. 2014. Using chlorofluorocarbons (CFCs) and tritium (<sup>3</sup>H) to estimate groundwater age and flow velocity in Hohhot Basin, China. *Hydrological Processes*, 28(3): 1372-1382.
- Mazor E. 2004. *Chemical and Isotopic Groundwater Hydrology Third Edition*. Marcel Dekker, Inc, 97-113, 181-270.
- Morgenstern U., Daughney C. J., Leonard G., Gordon D., Donath F. M. and Reeves R. 2014. Using groundwater age to understand sources and dynamics of nutrient contamination through the catchment into Lake Rotorua, New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(8): 9907-9960.
- Sood D.D., Manohar S.B. and Reddy A.V.R. 1994. *Experimentals in Radiochemistry*. Eds, IANCAS Publication, Mumbai.
- Tait D.R., Erler D.V., Santos I.R., Cyronak T. J., Morgenstern U. and Eyre B.D. 2014. The influence of groundwater inputs and age on nutrient dynamics in a coral reef lagoon. *Marine Chemistry*, 166: 36-47.
- WHO. 1989. *Guidelines for Iodine Prophylaxis Following Nuclear Accidents*, WHO Regional Officer for Europe, Environmental Health Series, 35 (1989): 37.
- خلج امیرحسینی، ی. و نبی‌پور، م. ۱۳۸۵. کاربرد ردیاب‌ها در مطالعات منابع آب. موسسه تحقیقات آب. علیزاده، ا. ۱۳۸۰. اصول هیدرولوژی کاربردی. دانشگاه امام رضا (ع)، مشهد.
- قنادی مراغه، م. ۱۳۸۴. مبانی رادیوشیمی. موسسه فرهنگی انتشاراتی آیه. ص ۳۳۵، ۳۳۶، ۳۴۸، ۳۸۵ و ۳۸۶.
- کریمی‌راد، ا.، حسام، م.، بهرامی سامانی، ع. و ایزدپناه، ع. ۱۳۹۲. تعیین سن آب زیرزمینی در سفره تحت فشار استان گلستان از طریق اندازه‌گیری تریتیوم. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰(۶): ۱۸۳-۱۹۹.
- وزارت نیرو، ۱۳۹۰. دستورالعمل کاربرد روش‌های ردیابی در مطالعات آبخوان‌های آبرفتی. دفتر مهندسی و معیارهای فنی آب و آبفا، شماره ۵۵۲: ۷۸.
- Cartwright I. and Morgenstern U. 2012. Constraining groundwater recharge and the rate of geochemical processes using tritium and major ion geochemistry: Ovens catchment, southeast Australia. *Journal of Hydrology*, 475: 137-149.
- Darling W. G., Goody D. C., MacDonald A. M. and Morris B. L. 2012. The practicalities of using CFCs and SF 6 for groundwater dating and tracing. *Applied Geochemistry*, 27(9): 1688-1697.
- Dunkle S. A., Plummer L. N., Busenberg E., Phillips P. J., Denver J. M., Hamilton P. A., Michel R. L. and Coplen T. B. 1993. Chlorofluorocarbons (CCl<sub>3</sub>F and CCl<sub>2</sub>F<sub>2</sub>) as dating tools and hydrologic tracers in shallow groundwater of the Delmarva Peninsula, Atlantic Coastal Plain, United States. *Water Resources Research*, 29(12): 3837-3860.
- Edmunds W.M. 2009. Geochemistry's vital contribution to solving water resource problems. *Journal of Applied Geochemistry*, 1058-1073.