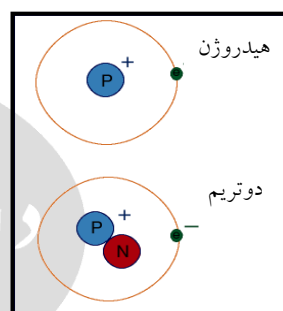


آب سنگین

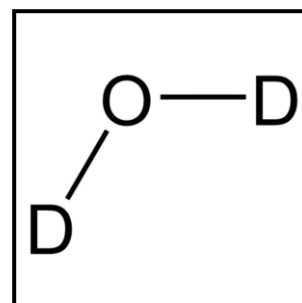
Heavy water

آبی که مولکول‌های هیدروژن آن از نوع هیدروژن سنگین یا دوتریم باشند، آب سنگین نامیده می‌شود.

هیدروژن سنگین یا دوتریوم (Deuterium) ایزوتوپی پایدار از هیدروژن است که با نسبت یک به ۶۴۰۰ اتم هیدروژن، در طبیعت یافت می‌شود. هسته اتم‌های هیدروژن در آب سنگین، علاوه بر یک پروتون، حاوی یک نوترون نیز هست که باعث می‌شود وزن اتمی هیدروژن در آن، دو برابر وزن اتمی هیدروژن معمولی در آب معمولی باشد.



شکل ۱. ایزوتوپ‌های هیدروژن



شکل ۲. فرمول گسترده آب سنگین

خواص فیزیکی و شیمیایی آب سنگین

آب سنگین ماده‌ای است بی‌رنگ، بی‌بو و بدون طعم. آب سنگین پرتوزا نیست و چگالی آن در حالت خالص، حدود ۱۱٪ بیشتر از چگالی آب معمولی است. با این حال، تفاوت در مقدار دوتریم (به‌خصوص تأثیر آن بر خواص زیستی) بیش از حد معمول در هر ترکیب ایزوتوپی جایگزین دیگر اتفاق می‌افتد، زیرا دوتریم در میان ایزوتوپ‌های پایدار، از موقعیت منحصربه‌فردی برخوردار است؛ زیرا وزن آن دو برابر وزن سبک‌ترین ایزوتوپ خودش است (E. K. R, 1934, P-504). این تفاوت قدرت پیوند هیدروژن-اکسیژن را در آب افزایش می‌دهد و این امر به‌نوبه خود منجر به ایجاد تفاوت در برخی واکنش‌های زیست‌شیمیایی مهم می‌شود (Kestin, 1984, Vol. 13).

جدول ۱. خواص آب سنگین

| خواص | آب سنگین (D ₂ O) |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| وزن مولکولی | ۲۰ |
| دمای ذوب (سلسیوس) | ۳٫۸۲ |
| دمای جوش (سلسیوس) | ۱۰۱٫۴۲ |
| چگالی (۲۰°C g/mL) | ۱٫۱۰۵۶ |
| گرانروی در ۲۵ درجه سلسیوس | ۱٫۲۵ |
| کشش سطحی (dyn.cm) در ۲۵ درجه سلسیوس | ۷۱٫۹۳ |
| گرمای ذوب (cal/mol) | ۱٫۵۱۵ |
| گرمای تبخیر (cal/mol) | ۱۰٫۸۶۴ |
| ضریب شکست | ۱٫۳۲۸ |

تاریخچه

نخستین قطرات آب سنگین را در سال ۱۹۳۲ گیلبرت نیوتون (Gilbert Newton Lewis)، تنها چند ماه پس از کشف ایزوتوپ دوتریم توسط هارولد یوری (Harold Urey) (۱۸۹۳-۱۹۸۱)، به روش الکترولیز تولید کرد. با کشف شکافت هسته‌ای در اواخر سال ۱۹۳۸، به یک کندکننده نوترونی آرمانی نیاز پیدا شد که حرکت نوترون‌ها را کند کند و درعین حال از کمترین میزان جذب نوترون برخوردار

اصطلاح محاوره‌ای آب سنگین به مخلوط آب بسیار غنی اشاره دارد که عمدتاً شامل دوتریم اکسید، مقادیر کمی HDO (آب شامل یک اتم هیدروژن معمولی و یک اتم دوتریم) و تعداد بسیار کمتری مولکول آب معمولی است. مثلاً، آب سنگین به‌کاررفته در راکتورهای CANDU که ۹۹٫۷۵٪ غنی شده است، به این معنی است که ۹۹٫۷۵٪ از اتم‌های هیدروژن آن از نوع سنگین است.

به جای اتم‌های هیدروژن در ساختار داروها، خواص فیزیکی، شیمیایی و زیستی آنها به‌طور چشمگیری تغییر می‌کند. (Rokop, 1969, P.707-715)

سمیت

مقادیر اندک آب سنگین برای بدن غیر سمی است، به طوری که بدن یک انسان بالغ به‌طور طبیعی حاوی مقادیری دوتریم، معادل با پنج گرم آب سنگین، است که این مقدار برای بدن زیانی ندارد؛ اما اگر این میزان افزایش یابد به طوری که اگر به جای بخش زیادی از آب بدن (بیش از ۵۰٪) آب سنگین نشانده شود، عملکرد سلول‌ها با اختلال مواجه می‌شود و در نهایت سلول می‌میرد (Kushner, 1999, P.79-88).

آب ۵۰٪ تا ۷۵٪ از وزن بدن را تشکیل می‌دهد، از این رو مقدار بسیار زیادی از آب سنگین برای جایگزینی آب بدن به میزان ۲۵٪ تا ۵۰٪ نیاز است؛ در نتیجه مسمومیت اتفاقی یا عمدی با آب سنگین تاکنون رخ نداده است زیرا مسمومیت مستلزم آن است که قربانی مقادیر زیادی از آب سنگین را بدون مصرف آب طبیعی برای چند روز مصرف کند تا آثار سمی چشمگیری بروز کند (Watson, 1980, P.27-39).

تأثیر بر سایر جانداران

با توجه به تحقیقات انجام شده، آب سنگین تنها ماده شیمیایی شناخته شده است که بر چرخه شبانه‌روزی بدن موجودات زنده تأثیر می‌گذارد و پیوسته آن را افزایش می‌دهد. این اثر در موجودات تک‌سلولی، گیاهان، حشرات و پرندگان مشاهده شده است. هرچند عملکرد دقیق این اثر مشخص نیست، اما با توجه به اینکه آنزیم‌ها برای انجام صحیح وظایف خود به شبکه پیوندهای هیدروژنی موجود عمیقاً وابسته‌اند، محققان تغییر توان پیوندهای هیدروژنی را که با جایگزین کردن هیدروژن با دوتریم روی می‌دهد، را عامل

باشد. اتم‌های دوتریم موجود در آب سنگین با توجه به داشتن وزن نزدیک به وزن نوترون توانایی بسیار بالایی در گندسازی سرعت نوترون دارند، از سوی دیگر، گرایش این اتم‌ها با برخورداری از یک نوترون در هسته برای جذب نوترون نسبت به هیدروژن بسیار کم است. با توجه به ویژگی‌های منحصربه‌فرد ذکر شده، آب سنگین به یکی از اجزای اولین پژوهش‌های انرژی هسته‌ای تبدیل شد و از آن زمان تاکنون، جزئی ضروری در بسیاری از انواع راکتورها به شمار می‌آید. مهم‌ترین ویژگی راکتورهای آب سنگین نسبت به راکتورهای آب سبک از این قرار است که در آن دیگر نیازی به سوخت غنی شده نیست و از اورانیوم با غنای طبیعی استفاده می‌شود (CHANDRA, 2013, P.83-89).

تأثیر بر سیستم‌های زیستی

رفتار شیمیایی ایزوتوپ‌های مختلف عناصر شیمیایی فرق اندکی با هم دارند چنان که در مورد بسیاری از عناصر این تفاوت چندان کم است که حتی قابل تشخیص نیست و هیچ کاربردی ندارد. اما در ایزوتوپ‌های هیدروژن، این موضوع صدق نمی‌کند و تفاوت زیادی در رفتار شیمیایی بین هیدروژن (^1H)، دوتریم (D) و تریتیم (T) مشاهده می‌شود. مثلاً، تفاوت انرژی‌های پیوندی هیدروژن و دوتریم با سایر اتم‌ها در مولکول‌های مختلف کاملاً مشهود است. در مکانیک کوانتومی انرژی پیوندی به کمک معادلات مقدار جرم کاهش یافته هسته و الکترون تعیین می‌شود و از آنجاکه تفاوت وزن بین ایزوتوپ‌های مختلف هیدروژن نسبت به هر عنصر شیمیایی دیگری در طبیعت بیشتر است. قدرت پیوند هریک از ایزوتوپ‌های هیدروژن با اتم‌های دیگر کاملاً متفاوت است. در نتیجه، این اثر ایزوتوپی هیدروژن سنگین در سامانه‌های زیستی به‌خوبی نمایان است، جایی که تغییرات کمی در خواص ایزوتوپی آب به‌عنوان حلال، نتایج بسیار متفاوتی را به بار می‌آورد. همچنین، با نشان دادن اتم دوتریم

امریکا، کانادا، روسیه، نروژ، آرژانتین، رومانی، پاکستان، هند و ایران قادر به تولید آب سنگین در مقیاس صنعتی اند.

کاربردها

کاربرد آب سنگین در راکتورهای هسته‌ای

آب سنگین به‌عنوان بازتابگر، خنک‌ساز و کُند ساز در راکتورهای هسته‌ای به‌کار می‌رود. هرچند که به‌علت یکسان بودن جرم H (پروتون) و نوترون، آب سبک کُند ساز نوترون بهتری نسبت به آب سنگین به حساب می‌آید، چون جذب نوترون در آب سنگین بسیار کمتر از آب سبک است، با بهره‌گیری از آب سنگین به‌عنوان کُند ساز در راکتورهای هسته‌ای، می‌توان سوخت با غنای طبیعی را مصرف کرد. مقدار U^{235} در اورانیم طبیعی ۰/۷٪ است. این امر با توجه به پیچیدگی‌های موجود برای غنی‌سازی اورانیم یک مزیت بسیار بزرگ محسوب می‌شود. البته با توجه به محدودیت‌های بین‌المللی برای جلوگیری از نشر تسلیحات هسته‌ای، طراحی، ساخت و استفاده از راکتورهای آب سنگین تجاری نیز با محدودیت‌هایی مواجه است. به‌طورکلی، در طراحی راکتورهای هسته‌ای دو راه‌حل کلی وجود دارد: یا سوخت اورانیم را از عنصر شکافت پذیر غنی می‌کنند و یا کُند ساز را با دوتریم غنی می‌کنند (Technical Reports, 2002).

آشکارساز نوترینو

آشکارساز نوترینو ابزاری فیزیکی برای مطالعه نوترینوهاست. اگرچه مطالعات در این زمینه در مراحل ابتدایی است، اما این مطالعات می‌توانند اطلاعات بسیار دقیقی از اجزای گوناگون جهان هستی در اختیار دانشمندان قرار دهد. از آنجاکه برهمکنش نوترون‌ها با دیگر ذرات بسیار نادر است، آشکارسازهای نوترینو باید بسیار بزرگ باشند. یکی از موادی که برای ساخت آشکارسازهای نوترینو

این پدیده می‌دانند (E. K. R, 1934, P-504).

آزمایش روی موش‌ها، خوکچه‌ها و سگ‌ها نشان داد که آب محتوی ۲۵٪ دوتریم گاهی موجب عقیم شدن این حیوانات می‌شود؛ یعنی گامت، تخمک و یا جنین نمی‌توانند به وجود آیند. آزمایش دیگری نشان داد که غلظت زیاد آب سنگین (۹۰٪) به‌سرعت ماهی‌ها، بچه قورباغه‌ها، کرم‌های پهن و مگس‌ها را می‌کشد. پستانداران، مانند موش، نیز با آب سنگین پس از یک هفته و در زمانی می‌میرند که آب سنگین بدن آنها به حدود ۵۰٪ غلظت می‌رسد. علاوه‌براین، برای گیاهان نیز غلظت‌های بالاتر از ۵۰٪ آب سنگین کشنده است (Kushner, 1999, P79-88).

با وجود مشکلات یادشده برای گیاهان و حیوانات در محیط‌های حاوی مقادیر زیادی دوتریم، برخی از موجودات پروکاریوتی (prokaryote)، مشکلات ناشی از دوتریم را ندارند و می‌توانند در شرایط کاملاً سرشار از آب سنگین رشد کنند، تکثیر شوند و در نهایت همه اتم‌های هیدروژن در پروتئین‌ها و DNA آنها با ایزوتوپ دوتریم جایگزین شود (Trotsenko, 1995, P23-36).

روش تولید

روش‌های مختلفی شامل تبادل شیمیایی (ایزوتوپی)، تقطیر، الکترولیز، استفاده از غشا، نفوذ، لیزر، نور شیمی و جذب سطحی برای تولید آب سنگین در دست است که هر یک از این روش‌ها از مزایا و معایب مربوط به خود برخوردار است و با توجه به ویژگی‌های روش‌های یادشده تاکنون تنها سه روش اول در مقیاس صنعتی اجرا شده‌اند (Alistair, 2001, P76).

کشورهای تولیدکننده

با توجه به پیچیدگی‌های روش‌های تولید آب سنگین و محدودیت‌های بین‌المللی برقرار شده، تاکنون تنها نه کشور

به بسامد ارتعاشی پیوند اتمی بستگی دارد، این اثر به‌خصوص برای ایزوتوپ‌هایی از عناصر که دارای اختلاف وزن بیشتری‌اند، بیشتر قابل مشاهده است. مثلاً، هرگاه به‌جای هیدروژن با وزن اتمی ۱، ایزوتوپ دوتریم با وزن اتمی ۲ را جایگزین کنیم، صد در صد اختلاف وزن ایجاد و بیشترین اثر سینتیکی مشاهده خواهد شد. این در حالی است که با جایگزین کردن $12C$ با $13C$ تنها ۸ درصد تغییر وزن ایجاد خواهد شد. از این رو، امروزه به‌طور وسیعی از جایگزین کردن ایزوتوپ دوتریم به‌جای هیدروژن به‌عنوان یک ابزار بسیار قدرتمند برای بررسی سازوکار و سینتیک واکنش‌های شیمیایی بهره می‌گیرند (Kenneth, 2006, P217) (Seoung-ryoung Choi, 2014, P3572).

اثر ایزوتوپی تونل زنی کوانتوم (Quantum tunneling isotope effect)

در مواردی یک پدیده دیگر به نام تونل زنی کوانتومی می‌تواند بر سرعت واکنش‌های شیمیایی تأثیر گذارد. در این پدیده، مولکول‌ها به سطحی از انرژی پتانسیل می‌رسند به‌نحوی که قوانین فیزیک کلاسیک در مورد آنها صدق نمی‌کند. تونل زنی به وزن ذرات درگیر در واکنش شیمیایی قویاً بستگی دارد و برای اتم‌های سبکی چون هیدروژن بیشتر قابل مشاهده است. در نتیجه، با جایگزین کردن دوتریم به‌جای هیدروژن موجود در ساختار مولکولی ذرات درگیر در واکنش، سرعت واکنش‌های شیمیایی به‌شدت کند خواهد شد و امکان مشاهده تغییرات بنیادی در واکنش و محصولات فراهم می‌آید. در سال‌های اخیر، استفاده از این پدیده برای مطالعه و فهم دقیق‌تر فرایندهای زیستی و زیست‌شناختی کاربرد گسترده‌ای یافته است، به‌طوری که اخیراً برای شناسایی سازوکارهای واکنش‌های زیستی درون موجودات زنده، از روش‌های ایزوتوپی، به‌خصوص جایگزین کردن دوتریم به‌جای هیدروژن بهره می‌گیرند. شاخه بسیار مهمی نیز در علوم زیستی در حال رشد است

کاربرد گسترده‌ای دارد آب سنگین است. مثلاً، در رصدخانه نوترینوی سادبری در آنتاریوی کانادا از هزار تن آب سنگین برای مطالعه نوترینوها بهره می‌گیرند. این آشکارساز در اعماق زمین و در دل یک معدن قدیمی کار گذاشته شده تا اثر پرتوهای کیهانی به آن نرسد. هدف اصلی این رصدخانه یافتن پاسخ این پرسش است که آیا نوترینوهای الکترون که از واکنش همجوشی در خورشید تولید می‌شوند، در مسیر رسیدن به زمین به انواع دیگر نوترینوها تبدیل می‌شوند یا خیر. وجود آب سنگین در این آزمایش‌ها ضروری است، زیرا دوتریم امکان آشکارسازی انواع نوترینوها را فراهم می‌آورد (https://en.wikipedia.org/wiki/Sudbury_Neutrino_Observatory).

طیف‌سنجی تشدید مغناطیسی هسته

امروزه سود جستن از تکنیک طیف‌سنجی تشدید مغناطیسی هسته (NMR)، برای شناسایی و مطالعه ساختار مولکولی مولکول‌ها و بررسی سینتیک واکنش‌های شیمیایی کاربرد گسترده‌ای یافته است. در این روش، چون سیگنال‌های اتم هیدروژن طیف (NMR) را به‌طور کامل می‌پوشانند، از آب سنگین یا حلال‌های دوترون‌دار برای مطالعه ساختار مولکول‌ها استفاده می‌شود. روزانه هزاران ترکیب جدید در دنیا سنتز می‌شود که نخستین گام در شناسایی این ترکیبات سود جستن از شیوه NMR و بهره‌گیری گسترده از حلال‌های دوترون‌دار است که منشأ دوتریم در این حلال‌های دوترون‌دار نیز آب سنگین است (https://en.wikipedia.org/wiki/proton_nuclear_magnetite_resonance).

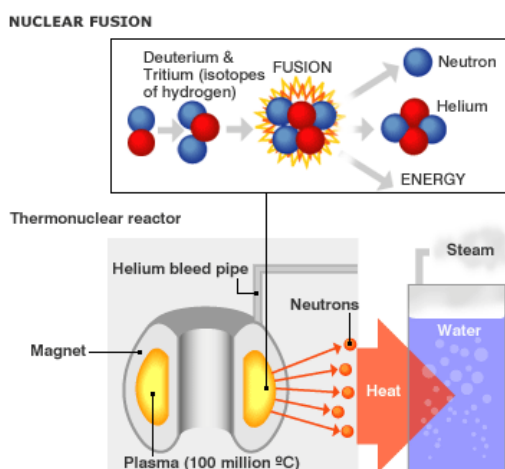
مطالعات سینتیکی ایزوتوپی

هرگاه یکی از اتم‌های درگیر در واکنش شیمیایی را با یکی از ایزوتوپ‌های آن اتم جایگزین کنیم تغییر می‌کند؛ به این پدیده اثر ایزوتوپی سینتیکی می‌گویند. از آنجاکه اثر ایزوتوپی

محدودیت است و فقط به یک دوره نمونه برداری از مایعات نیاز دارد. (Coward, 1996, P72)

همجوشی (گداخت) هسته‌ای

یکی از کاربردهای دیگر دوتریم در راکتورهای همجوشی هسته‌ای برای تولید انرژی است. در این گونه راکتورها، هسته‌های سبک به هم جوش می‌خورند و هسته سنگین‌تر را تشکیل می‌دهند که در این فرایند مقداری از جرم به انرژی تبدیل می‌شود. هرچند امکان بهره‌گیری از واکنشگرهای زیادی برای تولید انرژی در فرایند همجوشی هسته‌ای وجود دارد، اما انتخاب نوع واکنشی که قرار است در راکتور انجام شود بسیار مهم است. مثلاً، همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در یکی از واکنش‌های همجوشی (گداخت) مهم و پر کاربرد، ایزوتوپ دوتریم و تریتم به هم می‌پیوندند و یک اتم سنگین‌تر به نام هلیوم و مقدار بسیار زیادی انرژی تولید می‌شود. همجوشی تریتم و دوتریم امکان فراهم آمدن منابع بزرگتری از انرژی را در مقایسه با سایر واکنش‌های همجوشی هسته‌ای دیگر هیدروژن فراهم می‌آورد (<http://www.geo.cornell.edu>).



شکل ۳. فرایند همجوشی هسته‌ای

که آن را زیست‌شناسی کوانتومی (Quantum Biology) می‌گویند. مثلاً، فهم بهتر فرایند فوتوسنتز گیاهان یکی از مباحث مهم این رشته به شمار می‌آید (Campos, 2005, P127) (Gareth, 2012, P348)

بررسی میزان مصرف انرژی بدن موجودات زنده

ترکیب آب نشان‌دار شده با ایزوتوپ‌های دوتریم و اکسیژن-۱۸ را به اختصار DLW (Doubly labeled water) می‌نامند. مهم‌ترین کاربرد این ترکیب به پتانسیل استفاده از تغییرات طبیعی ایزوتوپ‌های آب، برای تشخیص سرعت سوخت‌وساز (میزان مصرف انرژی) بدن برمی‌گردد. اندازه‌گیری سرعت سوخت‌وساز موجودات زنده به روش آهنگ سوخت‌وسازی میدان یا (Field Metabolic Rate) انجام می‌شود که نخستین بار در سال ۱۹۵۰ مطرح شد. در این روش، ابتدا به فرد مورد مطالعه، مقدار مشخصی آب نشان‌دار شده با دوتریم و اکسیژن-۱۸ با غلظت ایزوتوپی مشخصی می‌نوشانند، به طوری که هر شخص حدود ۲/۵ گرم از $H_2^{18}O$ و ۰/۱۵ گرم از D_2O با خلوص ۹۹/۹٪ به‌ازای هر کیلوگرم از آب بدن خود دریافت می‌کند (وزن کل آب بدن ۵۵٪ از وزن بدن فرد در نظر گرفته می‌شود). سپس در دوره‌های زمانی مشخص، تجزیه و تحلیل نسبت ایزوتوپی $18O/16O$ و D/H در نمونه ادرار، پلاسما و یا بزاق فرد انجام می‌شود. اکسیژن-۱۸ در شکل آب و کربن دی‌اکسید، از بدن دفع و در مقابل، دوتریم فقط به شکل آب دفع می‌شود. بنابراین، تفاوت در مقادیر اکسیژن-۱۸ در خلال یک دوره زمانی، بازتابی از تولید کربن دی‌اکسید است. از سوی دیگر، تولید کربن دی‌اکسید نتیجه اکسایش چربی، کربوهیدرات و پروتئین هاست. بنابراین، اختلاف مقادیر اکسیژن-۱۸ بیانگر میزان مصرف انرژی یا سرعت سوخت‌وساز بدن است. این روش به دلیل عدم استفاده از ایزوتوپ‌های پرتوزا، کاملاً ایمن و بدون

۶. آثار متقابل و برهم کنش این آب‌ها با آب‌های سطحی؛

۷. مخازن سطح‌ها؛

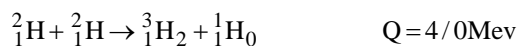
۸. تفکیک مؤلفه‌های جریان رودخانه.

سایر کاربردها

نظر به خواص و ویژگی‌های منحصر به فرد یادشده برای دوتریم، نمی‌توان تمام کاربردهای آن را برشمرد. مثلاً از حوزه‌هایی چون پراکندگی نوترونی (Neutron Scattering) به منظور شناسایی توزیع چگالی در نانوذرات سود می‌جویند تا روش‌های مدرن آنالیز نسبت ایزوتوپی که در مطالعات مخازن نفتی و تشخیص منشأ گاز طبیعی به کار گرفته می‌شوند، به دوتریم و یا به آنالیز نسبت ایزوتوپ آن در بافت مورد مطالعه نیاز است و با توجه به رشد پیوسته فناوری، کاربردهایی چون بالا بردن بازدهی تارهای نوری و یا استفاده از گاز دوتریم در لامپ‌های کم‌مصرف یا LED، تولید داروهای دارای دوتریم و صدها کاربرد دیگر برای این ماده قابل تصور است. مثلاً امروزه استفاده از گاز دوتریم برای تولید نیم‌رساناها و تارهای نوری به‌طور چشمگیری افزایش یافته، به طوری که شرکت‌های پیشرو در این زمینه اقدام به تولید نیم‌رساناها و تارهای نوری دوتریم کرده‌اند. استفاده از آب سنگین به‌عنوان حلال برای آنالیز برخی پروتئین‌ها و آمینواسیدها با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی فرسرخ از دیگر کاربردهای مهم آب سنگین به شمار می‌آید (<http://en.wikipedia.org/wiki/deuterium>).

کتاب‌شناسی

- "Heavy water (D2O)". Encyclopedia Britannica. 2015. Web. 06 Sep. 2015 <<http://www.britannica.com/science/heavy-water>>.
- E. K. R. "Physical and Chemical Properties of Heavy Water". Nature, vol. 134, no. 3387, 1934.
- Kestin, J. Segners, J. V. Kamgar- Parsi, B. "Thermo physical properties of fluid D2O". j. phys. chem. Ref. data, vol. 13, no. 2, 1984.



شکل ۴. واکنش‌های همجوشی هسته‌های مختلف هیدروژن و مقدار انرژی تولیدی از هر واکنش

کاربرد آب سنگین به‌عنوان ماده ردیاب در علم هیدرولوژی

در اهمیت روش‌های ایزوتوپی باید اشاره کرد که این روش قادر است علاوه بر تعیین منشأ و مسیر جریان‌ها، مکانیک شارها را نیز مورد بررسی قرار دهد (مانند بررسی سرعت و جهت شار).

بنابراین، استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار، از جمله دوتریم D_2O ، به‌عنوان یکی از روش‌های پایش و اندازه‌گیری در تشخیص منشأ آلودگی به‌منظور اعمال مدیریت به‌منظور حفظ و کنترل کیفیت منابع آبی ضروری است. این روش در سفره‌های آب زیرزمینی برای تعیین مسیر حرکت آب در محیط‌های متخلخل، ارزیابی سرعت جریان آب زیرزمینی، برآورد ضریب نفوذپذیری لایه‌های آبدار، منشأ و محل تغذیه آب‌های زیرزمینی، ارتباط لایه‌های آبدار با یکدیگر، میزان اختلاط توده‌های مختلف آب زیرزمینی، مطالعه حرکت مواد آلوده‌کننده از مواد ردیاب و یا ایزوتوپ‌های مولکول آب به‌کار گرفته می‌شود (http://en.wikipedia.org/wiki/Isotope_analysis).

- نمونه‌هایی از کاربردهای ایزوتوپ‌های محیطی در هیدرولوژی آب‌های سطحی و زیرزمینی از این قرارند:
۱. اندازه‌گیری جریان رودخانه؛
 ۲. بررسی نشت آب از کانال‌ها؛
 ۳. برآورد آهنگ تغذیه آب‌های زیرزمینی در سطح حوضه؛
 ۴. دینامیک دریاچه؛
 ۵. تغذیه آب‌های زیرزمینی؛

- determine the structure of the transition states of SN2 reactions". *Advances in Physical Organic Chemistry*, vol. 41, no.1, 2006.
- Seoung-ryoung, C. Breugst M. Houk, N.K, and Poulter, C. D. δ -Deuterium Isotope Effects as Probes for Transition-State Structures of Isoprenoid Substrates". *J. Org. Chem.* vol. 79 , no. 8, 2014.
- Campos, M. L. Warriar, V. M. Houk, K. N. and Garcia-Garibay, A. M. "Secondary Alpha Isotope Effects on Deuterium Tunneling in Triplet o-Methylantrones: Extraordinary Sensitivity to Barrier Width". *J. am. chem. soc.* vol. 127, no. 29, 2005.
- Roberts, M. G. Adam S. C. Jamie, D. Y, and Stavros, G.V, "Direct Observation of Hydrogen Tunneling Dynamics in Photoexcited Phenol". *J. Phys. Chem. Lett.* vol. 3, no. 3, 2012.
- Kwon, Y. H. Mai, B. K. Lee, Y. "Determination of Spin Inversion Probability, H-Tunneling Correction, and Regioselectivity in the Two-State Reactivity of Nonheme Iron(IV)-Oxo Complexes". *J. Phys. Chem. Lett.* vol. 6 , no. 8, 2015,
- Merali, Z. "Solving biology,s mysteries using quantum mechanics". 2014, discovermagazine.com.
- Vardi-Kilshtain, A. Nitoker, N. Major, D. T. 'Nuclear quantum effects and kinetic isotope effects in enzyme reactions". *Archives of Biochemistry and Biophysics*, vol. 582, no. 1, 2015.
- Black A. E. Coward, J. T. Cole, T. J. & Prentice, A. M. "Human energy expenditure in affluent societies: an analysis of 574 doubly-labelled water measurements". *Eur. J. Clin. Nutr.* vol. 50, no. 2, 1996.
- Schoeller, D. A. "Recent Advances from Application of Doubly Labeled Water to Measurement of Human Energy Expenditure". *J. Nutr.* vol. 129, no. 10, 1999.
- Gibson, J. J. "Progress in isotope tracer hydrology in Canada" *Hydrological Processes* vol. 19, no. 1, 2005.
- Chandra, R. I. Agareal, P. "Spectroscopy of heavy water & its effect on environment". *International Journal of Research in Science and Technology*, vol. 2, no.4, 2013.
- Kushner, D.J. Baker, A. Dunstall, T.G. "Pharmacological uses and perspectives of heavy water and deuterated compounds, *Can. J. Physiol. Pharmacol.*" Vol.77, no. 2, 1999
- Watson, P. E. et al. "Total body water volumes for adult males and females estimated from simple anthropometric measurements". *Am. J. Clin. Nutr.* vol. 33, no 1, 1980.
- Haggqvist G. Hevesy, G. "The combined effect of heavy water and roentgen irradiation on the animal organism". *Acta Radiologica.* Vol. 49, no.4, 1958.
- Rokop, S. Gajda, L. Parmeter, S. Crespi, H.L. Katz, J.J. Purification and characterization of fully deuterated enzymes". *Biochim Biophys Acta.* vol. 191, no. 3, 1969.
- Bloor, O.P. Brockwell, D. Gilbert, D.Barber, J.P. Improved methods of cultivation and production of deuteriated proteins from E. coli strains grown on fully deuterated minimal medium". *J. Appl. Microbiol.* vol. 94, no. 4, 2003.
- Miller, A. "Heavy Water: A Manufacturers' Guide for the Hydrogen Century". *Canadian Nuclear Society Bulletin.* vol. 22, no. 1, 2001.
- Canadian Nuclear Safety Commission. "Bruce Heavy Water Plant Decommissioning, Environmental Assessment Study Report", 2003.
- "Heavy Water Reactors: Status and Projected Development". INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA. Technical Reports Series No. 407, 2002.
- Boger, J. et al. "The Sudbury Neutrino Observatory". *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment.* vol. 449, no. 1-2, 2000.
- [https://en.wikipedia.org/wiki/proton_nuclear_magneti te_resonance.](https://en.wikipedia.org/wiki/proton_nuclear_magneti_te_resonance)
- Westaway, K. C. "Using kinetic isotope effects to

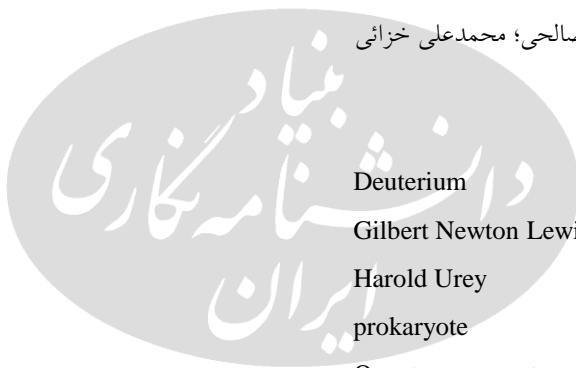
“Use of Deuterium and Oxygen-18 as natural environmental isotopes and as artificial tracer”.
http://www.hydroisotop.de/sites/default/files/dokumente/Deuterium_Oxygen_18_Water_en.pdf

Christopher D. laughrey et al. “Application of stable isotope geochemistry in the petroleum geoscience” PTTC workshop, 2014.

Ankner, J. F. Heller, W. T. Herwig, K. W. Meilleur, F. and Myles, D. A.”Neutron Scattering Techniques and Applications in Structural Biology”. Current Protocols in Protein Science, 72:17.16:17.16.1–17.16.34, 2013.

Gant, T.G. “Using Deuterium in Drug Discovery: Leaving the Label in the Drug”. J. Med. Chem. vol. 57 no. 9, 2014.

علی اکبر صالحی؛ محمد علی خزائی



Deuterium

Gilbert Newton Lewis

Harold Urey

prokaryote

Quantum tunneling
isotope effect

Quantum Biology

Neutron Scattering

دوتریم

گیلبرت نیوتن

هارولد یوری

پروکاریوتی

اثر ایزوتوپی کوانتوم تونل‌زنی

زیست‌شناسی کوانتومی

پراکندگی نوترونی

دانشگاه محققان