

مقاله پژوهشی

بررسی ترکیب ایزوتوپ‌های دوتریم و اکسیژن ۱۸ بارش و تعیین خط آب جوی محلی در بخشی از محدوده زاگرس میانی (زردکوه بختیاری)

حسین عابدیان^{۱*} و عطیه مجیری^۲

چکیده

تهیه خط ایزوتوپی آب جوی محلی و معادله آن در یک منطقه در تعیین منشأ توده هوایی تأثیرگذار بر منطقه کاربرد دارد و به‌عنوان اساس و مبنایی برای مطالعه دقیق‌تر منابع آبی به کار گرفته می‌شود. براساس مطالعات صورت‌گرفته در این پژوهش، برای نخستین بار خط آب جوی در منطقه زاگرس میانی به‌صورت رابطه $\delta D = 7.27 \delta^{18}O + 12.80$ با ضریب تبیین ۹۲ درصد تعیین شد. این خط ایزوتوپی بارش برای همه مطالعات ایزوتوپی در این گستره در آینده کاربرد خواهد داشت. همچنین در این مطالعه رابطه بین تغییر در ترکیب مقادیر ایزوتوپی با تغییر ارتفاع، دما، مقدار بارش، دوتریوم مازاد و هدایت الکتریکی مشخص شد؛ به‌طوری‌که به‌ازای هر ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع، به‌ترتیب ۰/۴۹ و ۲/۱۶ پرمیل (permil) کاهش در مقدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم نمونه‌های بارش وجود داشت. با هر ۵ درجه سانتی‌گراد افزایش دما به‌ترتیب حدود ۰/۹ و ۴/۰ پرمیل افزایش در مقدار ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریوم ($\delta^{18}O$ و δ^2H) نشان داده شده است. علاوه‌براین به‌ازای هر ۲۰ میلی‌متر افزایش بارش حدود ۱/۳ پرمیل اکسیژن ۱۸ و حدود ۱۰/۱ پرمیل دوتریوم نمونه‌های بارش کاهش پیدا می‌کند. افزایش مقدار دوتریوم مازاد و کاهش مقادیر ایزوتوپی $\delta^{18}O$ و δD بارش در محدوده مطالعاتی نیز نشان‌دهنده منشأ مدیترانه‌ای توده‌های هوا است. همچنین مقدار هدایت الکتریکی نمونه‌های بارش با مقدار ایزوتوپ‌های $\delta^{18}O$ و δ^2H یابین نمونه‌ها رابطه مستقیم دارد؛ به‌طوری‌که با افزایش ۲۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر هدایت الکتریکی، به‌ترتیب حدود ۱/۴۵ و ۹/۴۰ پرمیل مقادیر ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریوم نمونه‌های بارش نیز افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: ایزوتوپ، خط آب جوی، دوتریوم مازاد، زردکوه بختیاری، طیف‌سنجی لیزری.

ارجاع: عابدیان ح. و مجیری ع. ۱۴۰۳. بررسی ترکیب ایزوتوپ‌های دوتریم و اکسیژن ۱۸ بارش و تعیین خط آب جوی محلی در بخشی از محدوده زاگرس میانی (زردکوه بختیاری). مجله پژوهش آب ایران. ۵۲: ۹۳-۱۰۲. <https://dx.doi.org/10.22034/IWRJ.2023.14533.2557>

۱- دکترای آب زیرزمینی، شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب.

۲- کارشناسی ارشد آب زیرزمینی، شرکت مهندسی مشاور زاینده‌آب.

* نویسنده مسئول: dr.abedian@zayandab.ir

مقدمه

امروزه استفاده از ایزوتوپ‌ها به‌ویژه ایزوتوپ‌های محیطی پایدار، در بررسی چرخه آب و مطالعات منابع آب بسیار حائز اهمیت است (کندل و کلدول، ۱۹۹۸). فرایندهای جوی باعث تغییر ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار آب می‌شوند، به‌همین دلیل آب‌های تغذیه‌کننده در هر محیط ترکیب ایزوتوپی خاص خود را نشان می‌دهد. این تغییر به‌عنوان ردیاب طبیعی در شناخت منشأ آب زیرزمینی شناخته شده است (کلارک و فریتز، ۱۹۹۷).

با توجه به تفکیک ایزوتوپی براساس فرایندهای تعادلی تبخیر و میعان، کرایگ (۱۹۶۱) رابطه خطی را با بررسی و تحلیل ترکیب ایزوتوپ‌های اکسیژن و هیدروژن در نمونه‌های بارش، چشمه‌ها و آب رودخانه به‌صورت یک قاعده تجربی ساده و مفید برای کل جهان به‌دست آورد. این قاعده با عنوان خط آب جوی جهانی (GMWL) تعریف شده است. پس از آن با تکمیل مطالعات، معادله نهایی خط آب جوی جهانی توسط رزانسکی (۱۹۹۳) ارائه شد که معادله آن به‌صورت زیر است:

$$\delta D = 8.3 \delta^{18}O + 10.8 \quad (1)$$

در این معادله δD نشان دهنده مقدار دوتریم (پرمیل) و $\delta^{18}O$ نشان دهنده مقدار اکسیژن ۱۸ (پرمیل) است. رابطه فوق نشان‌دهنده میانگینی از سراسر کره زمین است و اکثر بارندگی‌ها از آن پیروی می‌کنند. با این وجود، برخی از مناطق به‌دلیل تفاوت‌هایی که در شرایط دمایی و اقلیمی دارند، خط آب جوی خاص همان منطقه را به‌وجود می‌آورند که شیب و عرض از مبدأ متفاوتی از خط آب جوی جهانی نشان می‌دهند (دارلینگ و آرماتسون، ۱۹۸۹). به عرض از مبدأ دوتریم مازاد یا d-excess نیز گفته می‌شود که با استفاده از رابطه $d = \delta D - 8 \delta^{18}O$ برای تعیین میزان جدایش ایزوتوپی در بارش تعیین می‌شود (دنسگارد، ۱۹۶۴).

تاکنون مطالعات مفیدی درخصوص تعیین خط آب جوی در مناطق مختلف ایران و خارج از ایران انجام شده است که در ادامه به تعدادی از آن‌ها اشاره شده است:

کریمی (۱۳۹۲) خط آب جوی در غرب زاگرس و در حوضه آوند کرمانشاه را با معادله $\delta D = 6.355 \delta^{18}O + 9.565$ به‌دست آورد. محمدزاده و همکاران (۱۳۹۵) خط آب جوی در محدوده مطالعاتی پاره را با معادله $\delta D = 6.9 \delta^{18}O + 11.9$ ارائه کردند. محمدزاده و امیری (۱۳۹۷) با استفاده

از مطالعات انجام‌شده، معادله خط آب جوی $\delta D = 6.6 \delta^{18}O + 12.1$ برای محدوده پل ذهاب ارائه کردند. فرهادی و همکاران (۱۳۹۸)، معادله خط آب جوی $\delta D = 6.5996 \delta^{18}O + 7.561$ را برای بخش جنوب غربی ایران به‌دست آوردند. عابدیان و همکاران (۱۳۹۹) معادله خط آب جوی $\delta D = 6.3 \delta^{18}O + 14.9$ را برای محدوده سد بهشت‌آباد در استان چهارمحال و بختیاری ارائه کردند. عابدیان و مجیری (۱۴۰۲) با استفاده از مطالعات ایزوتوپی انجام‌شده، خط آب جوی را در محدوده تاق‌دیس سنگویل در استان چهارمحال و بختیاری با معادله $\delta D = 6.3 \delta^{18}O + 14.8$ ارائه کردند.

علی و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از مطالعات ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم، خط آب جوی عراق با معادله $\delta D = 7.573 \delta^{18}O + 13.82$ را به‌دست آوردند. ساتریو و همکاران (۲۰۱۷) با استفاده از مطالعه ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریم، معادله خط آب جوی $\delta D = 6.3 \delta^{18}O + 14.9$ را برای نهشته‌های آبرفتی منطقه سمارنگ جاوای مرکزی ارائه کردند. یه و لی (۲۰۱۸) خط آب جوی در جزایر پنکو (Penghu) تایوان را با معادله $\delta D = 8.02 \delta^{18}O + 10.84$ ارائه کردند. ادیکری و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از مطالعات خود، معادله خط آب جوی $\delta D = 7.52 \pm 0.11 \delta^{18}O + 4.92 \pm 0.76$ را برای کاتماندو (Kathmandu) نپال به‌دست آوردند.

تغییرات ایزوتوپ‌های پایدار توسط عواملی از قبیل دما، اثر قاره‌ای، اثر ارتفاعی، تبخیر و مقدار بارش کنترل می‌شود (کلارک، ۲۰۱۵). در این پژوهش با استفاده از نمونه‌برداری و آنالیز ایزوتوپ‌های پایدار در نمونه‌های آب باران محدوده زاگرس میانی، معادله خط آب جوی محدوده و همچنین نحوه تغییر ترکیب ایزوتوپی در اثر تغییرات پارامترهایی از قبیل ارتفاع، دما و مقدار بارش تعیین شده است.

محدوده مطالعاتی

محدوده مورد مطالعه در استان چهارمحال و بختیاری و در شهرستان‌های چلگرد، فارسان و اردل قرار دارد. این محدوده از شمال غرب به ارتفاعات کارکنان، از شمال به ارتفاعات دیمه، از شرق و شمال شرق به ارتفاعات چوبین، از جنوب شرق و جنوب به ارتفاعات سالداران و از جنوب غرب به زردکوه بختیاری و کوه میلی محدود می‌شود.

برای تعیین مقادیر ایزوتوپی نمونه‌های جمع‌آوری‌شده به آزمایشگاه انرژی اتمی مصباح انرژی ارسال و ترکیب ایزوتوپی اکسیژن و هیدروژن همه نمونه‌ها به‌وسیله دستگاه طیف‌سنجی لیزری (Spectroscopy-Laser LGR) تعیین شد (شکل ۳). دستگاه طیف‌سنجی لیزری ساخت شرکت تحقیقاتی لاس گاتوس آمریکا (Los Gatos Research) است. اساس کار این دستگاه بر جداسازی طیف‌های منعکس‌شده از آینه‌هایی با قدرت انعکاس بالا است که درون حفراتی تعبیه شده است. استفاده از آینه‌هایی با این قابلیت، به‌طور مؤثری طول خط سیر پرتو نور را تا حدود ۳۰۰۰ متر گسترش می‌دهد که از کارهای لازم برای طیف‌سنجی لیزری است. خط سیر نوری طولانی ایجادشده، سبب افزایش قدرت جذب می‌شود (لیس و همکاران، ۲۰۰۸). مطابق با مدل اتمی بور، اتم هنگامی فوتون را جذب می‌کند که انرژی فوتون درست برابر با اختلاف انرژی دو تراز انرژی اتم باشد. بر همین اساس، طول موج دستگاه باید نسبت به جذب طیفی نمونه مورد نظر و ایزوتوپ‌های آن (در اینجا H_2O است) تنظیم شود. در نتیجه این دستگاه به‌طور اختصاصی تنها برای نسبت‌های ایزوتوپی مولکول‌های آب عمل می‌کند (ابوکاظمی، ۱۳۸۱).

برای آنالیز $\delta^{18}O$ نمونه‌های برداشت‌شده در تعادل با گاز CO_2 قرار گرفته و گاز CO_2 حاصل شده از طریق دستگاه Dual-Inlet به اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی وارد و نسبت $^{18}O/^{16}O$ با اندازه‌گیری نسبت پرتوهای مولکولی ^{46}O به ^{44}O اندازه‌گیری شدند. همچنین برای آنالیز δ^2H نمونه‌های برداشت‌شده در حضور کاتالیست پلاتین با گاز H_2 به تعادل رسیده و گاز H_2 حاصل شده پس از رطوبت‌زدایی به دستگاه اسپکترومتر جرمی نسبت ایزوتوپی وارد شد و سپس نسبت D/H با اندازه‌گیری پرتوهای مولکولی H_2 و HD اندازه‌گیری شدند. نتایج آنالیز ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریوم بر حسب پرمیل و به‌صورت مقدار δ نسبت به استاندارد V-SMOW گزارش شد. دقت اندازه‌گیری برای اکسیژن ۱۸ حدود ± 0.2 پرمیل و برای دوتریوم حدود ± 0.7 پرمیل است.

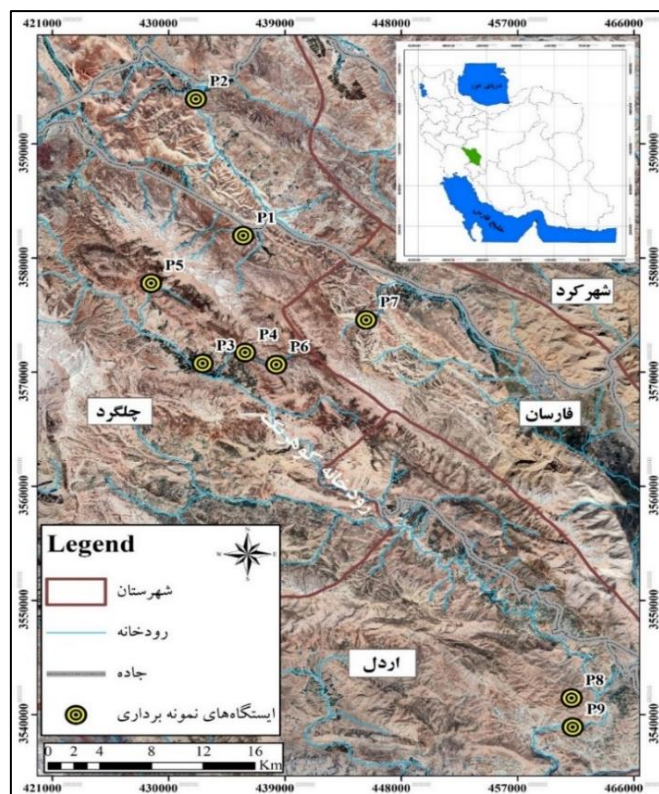
قسمت عمده محدودۀ مطالعاتی در حوضۀ کارون بزرگ و بخشی از آن در حوضۀ گلوخونی قرار دارد. از نظر ساختاری، گسترۀ مورد مطالعه بخشی از زاگرس مرتفع (خردشده یا رورانده) است. دسترسی به گسترۀ مورد مطالعه از طریق اصفهان، شهرکرد، فارس، اردل و چلگرد امکان‌پذیر است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش به‌منظور بررسی ترکیب ایزوتوپی بارش، از ۹ ایستگاه در ارتفاعات مختلف مجموعاً تعداد ۳۸ نمونه باران و ۷ نمونه برف با تواتر ماهانه در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ (جدول ۱) به‌صورت تجمعی و تک‌بارش (precipitation event) در فصل بارش جمع‌آوری شد (شکل ۱). نمونه‌برداری تجمعی از بارش با استفاده از نمونه‌گیر تجمعی ساخته شده مطابق با شکل ۲ انجام گرفت. طول این نمونه‌گیر حدود ۱ متر و قطر بدنه آن حدود ۱۰ سانتی‌متر و قطر کلاهک آن حدود ۲۰ سانتی‌متر است. در این روش، نمونه‌گیر در ارتفاعات مختلف با پراکنش سطحی مناسب، استتار شده و بارش برف و باران در طول یک ماه وارد آن می‌شود. برای جلوگیری از تبخیر، لوله داخل نمونه‌گیر به‌صورت U شکل طراحی شده و روی کلاهک نمونه‌گیر یک توپ پینگ‌پونگ قرار داده شد. همچنین در نمونه‌گیر حدود ۲ سانتی‌متر روغن اضافه شده تا بارش‌ها در هر مرحله زیر سطح روغن قرار گیرند و مانعی در برابر وقوع تبخیر باشد. پس از یک ماه نمونه از شیر تعبیه شده در انتهای نمونه‌گیر گرفته شده و حجم آب آن به‌طور کامل تخلیه و برای نمونه‌گیری بعدی آماده می‌شود. نمونه‌برداری از برف علاوه بر نمونه‌برداری تجمعی توسط نمونه‌گیر طراحی شده، به‌صورت ستون برف نیز انجام شد. نمونه‌های برداشت‌شده در ظروف ۵۰ میلی‌لیتری مطابق با استاندارد جمع‌آوری و همه نمونه‌ها به‌وسیله صافی ۰/۴۵ میکرومتر فیلتر شدند. ظروف نمونه‌برداری تا زمان آنالیز، پلمب و در دمای ۴ درجۀ سانتی‌گراد نگهداری شدند.

جدول ۱- موقعیت و مقادیر ایزوتوپ‌های برداشت‌شده از بارش

نام ایستگاه	مختصات	نوع ایستگاه	تاریخ اندازه‌گیری	علامت اختصاری	مقادیر ایزوتوبی $\delta^{18}\text{O}$ (permil)	دوتریم δD (permil)	مازاد
نصیرآباد	۲۴۰۵	۳۵۸۱۹۶۵	۴۳۵۷۵۲	باران	۰۸-۱۳۹۷	P1	۱۶/۷۵
خروجی	۲۲۰۳	۳۵۹۳۹۳۱	۴۳۲۰۹۰	باران	۰۸-۱۳۹۷	P2	۱۳/۶۰
ورودی	۲۲۵۰	۳۵۷۰۷۵۷	۴۳۲۶۱۱	باران	۰۸-۱۳۹۷	P3	۱۸/۷۵
چندار	۲۴۰۵	۳۵۷۷۷۹۶	۴۲۸۶۳۶	باران	۰۸-۱۳۹۷	P5	۲۴/۴۲
نصیرآباد	۲۴۰۵	۳۵۸۱۹۶۵	۴۳۵۷۵۲	باران	۰۹-۱۳۹۷	P1	۲۱/۰۹
خروجی	۲۲۰۳	۳۵۹۳۹۳۱	۴۳۲۰۹۰	باران	۰۹-۱۳۹۷	P2	۲۵/۸۵
ورودی	۲۲۵۰	۳۵۷۰۷۵۷	۴۳۲۶۱۱	باران	۰۹-۱۳۹۷	P3	۳۰/۰۸
مروارید	۲۴۸۹	۳۵۷۱۷۱۸	۴۳۵۸۹۶	باران	۰۹-۱۳۹۷	P4	۳۰/۰۸
نصیرآباد	۲۴۰۵	۳۵۸۱۹۶۵	۴۳۵۷۵۲	باران	۱۰-۱۳۹۷	P1	۱۵/۲۳
خروجی	۲۲۰۳	۳۵۹۳۹۳۱	۴۳۲۰۹۰	باران	۱۰-۱۳۹۷	P2	۱۲/۸۷
ورودی	۲۲۵۰	۳۵۷۰۷۵۷	۴۳۲۶۱۱	باران	۱۰-۱۳۹۷	P3	۹/۷۷
مروارید	۲۴۸۹	۳۵۷۱۷۱۸	۴۳۵۸۹۶	باران	۱۰-۱۳۹۷	P4	۱۰/۲۸
چندار	۲۴۰۵	۳۵۷۷۷۹۶	۴۲۸۶۳۶	باران	۱۰-۱۳۹۷	P5	۱۱/۷۱
نصیرآباد	۲۴۰۵	۳۵۸۱۹۶۵	۴۳۵۷۵۲	باران	۱۱-۱۳۹۷	P1	۲۰/۹۵
خروجی	۲۲۰۳	۳۵۹۳۹۳۱	۴۳۲۰۹۰	باران	۱۱-۱۳۹۷	P2	۲۰/۶۳
ورودی	۲۲۵۰	۳۵۷۰۷۵۷	۴۳۲۶۱۱	باران	۱۱-۱۳۹۷	P3	۱۷/۳۸
مروارید	۲۴۸۹	۳۵۷۱۷۱۸	۴۳۵۸۹۶	باران	۱۱-۱۳۹۷	P4	۱۷/۸۵
چندار	۲۴۰۵	۳۵۷۷۷۹۶	۴۲۸۶۳۶	باران	۱۱-۱۳۹۷	P5	۲۰/۳۶
نصیرآباد	۲۴۰۵	۳۵۸۱۹۶۵	۴۳۵۷۵۲	باران	۱۲-۱۳۹۷	P1	۱۹/۹۹
خروجی	۲۲۰۳	۳۵۹۳۹۳۱	۴۳۲۰۹۰	باران	۱۲-۱۳۹۷	P2	۱۶/۱۶
ورودی	۲۲۵۰	۳۵۷۰۷۵۷	۴۳۲۶۱۱	باران	۱۲-۱۳۹۷	P3	۲۳/۹۱
مروارید	۲۴۸۹	۳۵۷۱۷۱۸	۴۳۵۸۹۶	باران	۱۲-۱۳۹۷	P4	۱۷/۹۷
چندار	۲۴۰۵	۳۵۷۷۷۹۶	۴۲۸۶۳۶	باران	۱۲-۱۳۹۷	P5	۱۸/۸۷
نصیرآباد	۲۴۰۵	۳۵۸۱۹۶۵	۴۳۵۷۵۲	باران	۱۳۹۸-۰۱	P1	۱۶/۶۵
خروجی	۲۲۰۳	۳۵۹۳۹۳۱	۴۳۲۰۹۰	باران	۱۳۹۸-۰۱	P2	۱۱/۱۶
ورودی	۲۲۵۰	۳۵۷۰۷۵۷	۴۳۲۶۱۱	باران	۱۳۹۸-۰۱	P3	۱۸/۴۴
مروارید	۲۴۸۹	۳۵۷۱۷۱۸	۴۳۵۸۹۶	باران	۱۳۹۸-۰۱	P4	۱۵/۸۸
چندار	۲۴۰۵	۳۵۷۷۷۹۶	۴۲۸۶۳۶	باران	۱۳۹۸-۰۱	P5	۲۱/۶۱
نصیرآباد	۲۴۰۵	۳۵۸۱۹۶۵	۴۳۵۷۵۲	برف	۱۳۹۷-۱۰	P1	۱/۳۴
خروجی	۲۲۰۳	۳۵۹۳۹۳۱	۴۳۲۰۹۰	برف	۱۳۹۷-۱۰	P2	-۲/۹۶
ورودی	۲۲۵۰	۳۵۷۰۷۵۷	۴۳۲۶۱۱	برف	۱۳۹۷-۱۰	P3	۱۲/۶۴
مروارید	۲۴۸۹	۳۵۷۱۷۱۸	۴۳۵۸۹۶	برف	۱۳۹۷-۱۰	P4	۱۳/۹۲
چندار	۲۴۰۵	۳۵۷۷۷۹۶	۴۲۸۶۳۶	برف	۱۳۹۷-۱۰	P5	۱۵/۳
لاغرک	۲۸۹۵	۳۵۷۰۶۴۹	۴۳۸۳۱۵	برف	۱۳۹۷-۱۰	P6	۰/۷۱
غار سراب	۲۲۹۷	۳۵۷۴۵۶۵	۴۴۵۲۷۱	برف	۱۳۹۷-۱۰	P7	-۰/۱۵
P-OB3	۲۰۹۷	۳۵۴۱۴۳۹	۴۶۱۱۶۴	باران	۱۳۹۷-۱۰	P8	۱۶/۲۱
P-OB3	۲۰۹۷	۳۵۴۱۴۳۹	۴۶۱۱۶۴	باران	۱۳۹۷-۱۱	P8	۲۵/۷۵
P-OB3	۲۰۹۷	۳۵۴۱۴۳۹	۴۶۱۱۶۴	باران	۱۳۹۷-۱۲	P8	۲۸/۳۳
P-OB3	۲۰۹۷	۳۵۴۱۴۳۹	۴۶۱۱۶۴	باران	۱۳۹۸-۰۱	P8	۲۵/۲۹
P-OB3	۲۰۹۷	۳۵۴۱۴۳۹	۴۶۱۱۶۴	باران	۱۳۹۸-۰۲	P8	۱۸/۵۰
P-OB8	۱۸۰۷	۳۵۳۸۸۸۷	۴۶۱۲۵۹	باران	۱۳۹۷-۱۰	P9	۲۱/۹۶
P-OB8	۱۸۰۷	۳۵۳۸۸۸۷	۴۶۱۲۵۹	باران	۱۳۹۷-۱۱	P9	۲۷/۵۰
P-OB8	۱۸۰۷	۳۵۳۸۸۸۷	۴۶۱۲۵۹	باران	۱۳۹۷-۱۲	P9	۲۶/۱۵
P-OB8	۱۸۰۷	۳۵۳۸۸۸۷	۴۶۱۲۵۹	باران	۱۳۹۸-۰۱	P9	۲۲/۳۲
P-OB8	۱۸۰۷	۳۵۳۸۸۸۷	۴۶۱۲۵۹	باران	۱۳۹۸-۰۲	P9	۱۵/۰۹



شکل ۱- موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری ایزوتوپی در محدوده مطالعاتی



شکل ۲- نحوه برداشت نمونه‌های ایزوتوپی بارش



شکل ۳- نمونه‌برداری و آنالیز ایزوتوپی

نتایج و بحث

خط آب جوی محلی

ترسیم خط ایزوتوپی آب جوی محلی (Local meteoric water line) در یک محدوده و مقایسه آن با خط آب جوی جهانی (Global Meteoric Water Line) و خط آب جوی مدیترانه‌ای (Mediterranean Meteoric Water Line)، اولین قدم در انجام مطالعات ایزوتوپی یک منطقه است. ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ بارش، شاخص ترکیب ایزوتوپ‌های جریان ورودی به چرخه آب است و خط ایزوتوپی آب جوی، منشأ بخار آب تشکیل‌دهنده بارش را نشان می‌دهد.

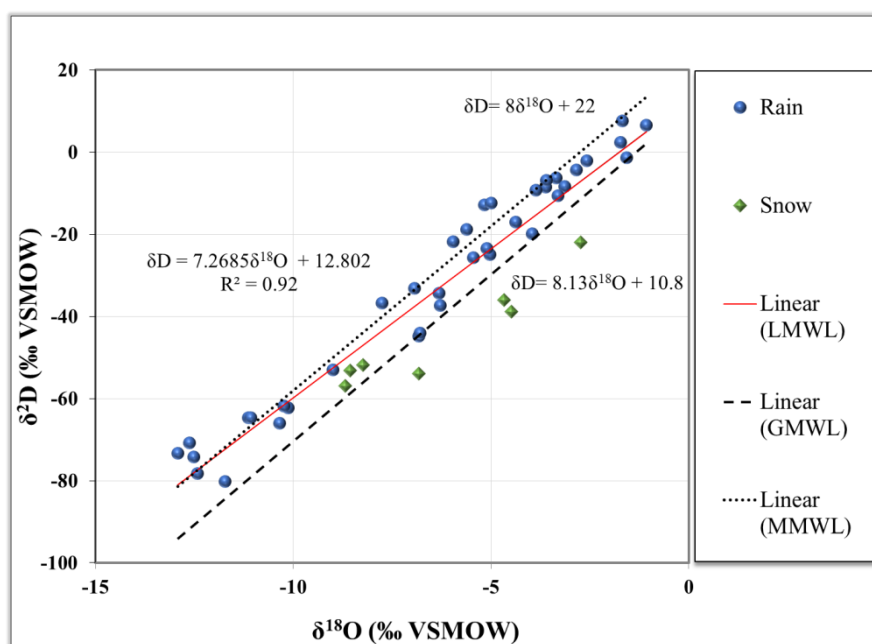
برای ترسیم خط آب جوی زاگرس میانی، از نمونه‌های باران که به‌صورت تجمعی و به‌صورت ماهانه و نمونه‌های برف که در ارتفاعات مختلف در فصل بارش در سال آبی ۱۳۹۷-۹۸ برداشت شده، استفاده شده است. سپس خط

آب جوی محلی (LMWL) رسم و معادله (۲) با ضریب تبیین $R^2=0.92$ حاصل شد (شکل ۴).

$$\delta D = 7.27 \delta^{18}\text{O} + 12.80 \quad (2)$$

تغییرات مقدار $\delta^{18}\text{O}$ در ریزش‌های جوی منطقه از $-12/92\%$ تا $-1/07\%$ (متوسط $-6/38\%$) و مقدار δD از $-80/16\%$ تا $7/51\%$ (متوسط $-33/58\%$) است.

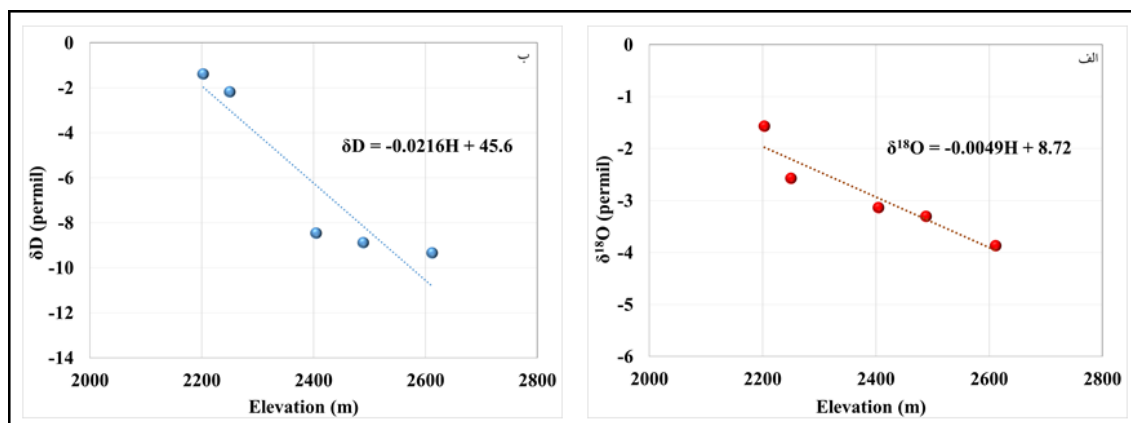
همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده شده است، خط آب جوی محلی محدوده نسبت به خط بارش جوی جهانی و مدیترانه‌ای دارای شیب کم‌تر است که احتمالاً به‌دلیل تأثیر شرایط محلی و پارامترهای اقلیمی منطقه بر ترکیب ایزوتوپی بارش است؛ به‌طوری‌که نمونه‌های برداشت‌شده از نقاط مرتفع به‌دلیل پایین‌تر بودن دما، تحت تأثیر تبخیر قرار نگرفته‌اند؛ اما از نمونه‌های نقاط کم‌ارتفاع، به‌دلیل مسیر بارش طولانی‌تر و بالاتر بودن دما، تبخیر صورت گرفته است.



شکل ۴- نمودار خط آب جوی محلی در محدوده مورد مطالعه

همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، بین مقادیر $\delta^{18}\text{O}$ و δD و ارتفاع رابطه معکوس وجود دارد، به‌طوری‌که با افزایش ارتفاع مقادیر ایزوتوپی تهی‌تر می‌شوند و با عنوان اثر ارتفاع شناخته می‌شود. به‌طوری‌که به‌ازای هر ۱۰۰ متر تغییر در ارتفاع در این ناحیه، حدود $0/49$ و $2/16$ پرمیل به‌ترتیب تغییر در مقادیر ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و δD اتفاق می‌افتد.

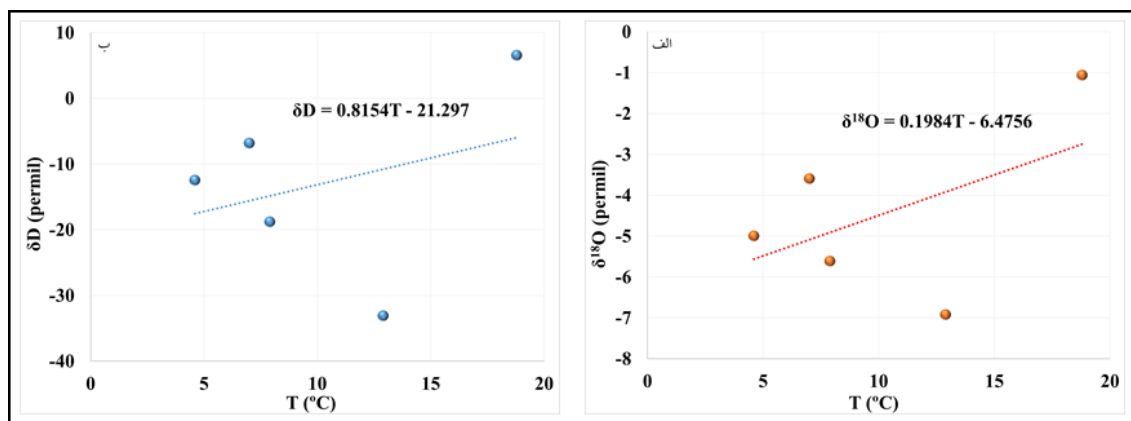
به‌منظور ارتباط بین ایزوتوپ‌های بارش و شرایط آب‌وهوایی منطقه، همبستگی پارامترهای ارتفاع، دما و مقدار بارش بر ایزوتوپ‌های پایدار $\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$ بین‌نمونه‌های تک بارش از ارتفاعات مختلف، بررسی شده است. معادله رگرسیون خطی بین ارتفاع و مقدار $\delta^{18}\text{O}$ در محدوده مطالعاتی برابر با $\delta^{18}\text{O} = -0.0049H + 8.72$ و مقدار δD برابر با $\delta D = -0.0216H + 45.6$ به‌دست آمده است.



شکل ۵- تغییرات مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار الف) اکسیژن ۱۸ و ب) دوتریوم بارش‌های منطقه با ارتفاع ایستگاه‌ها

دما به ترتیب حدود ۰/۹ و ۴ پرمیل در هر ۵ درجه سانتی‌گراد تغییر دما است (شکل ۶).

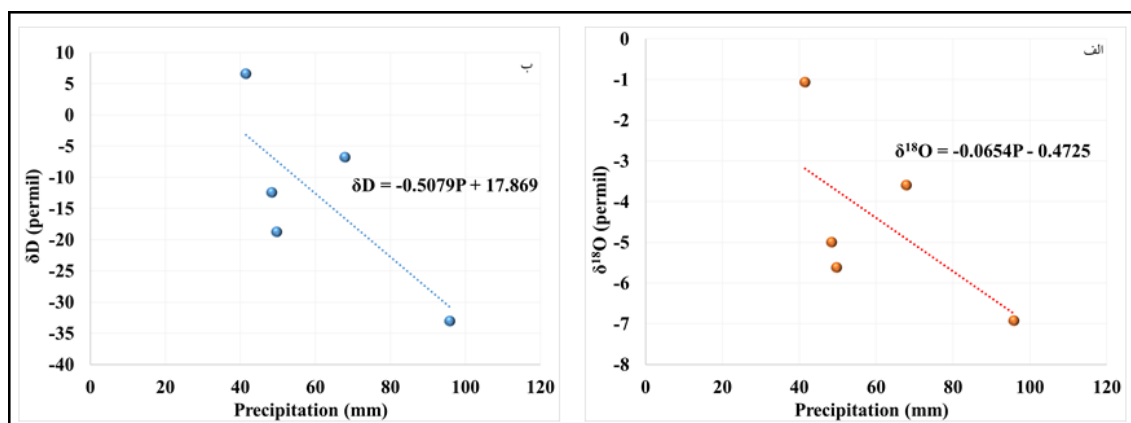
همچنین با افزایش دما مقدار ایزوتوپ‌های $\delta^{18}O$ و δD بارش غنی‌تر شده که با عنوان اثر دما شناخته شده است. تغییرات $\delta^{18}O$ و δD نمونه‌های بارندگی محدوده نسبت به



شکل ۶- تغییرات مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار الف) اکسیژن ۱۸ و ب) دوتریوم بارش‌های منطقه با دما

۱/۳ پرمیل اکسیژن ۱۸ و حدود ۱۰/۱ پرمیل دوتریوم نمونه‌های بارش کاهش پیدا می‌کند (شکل ۷).

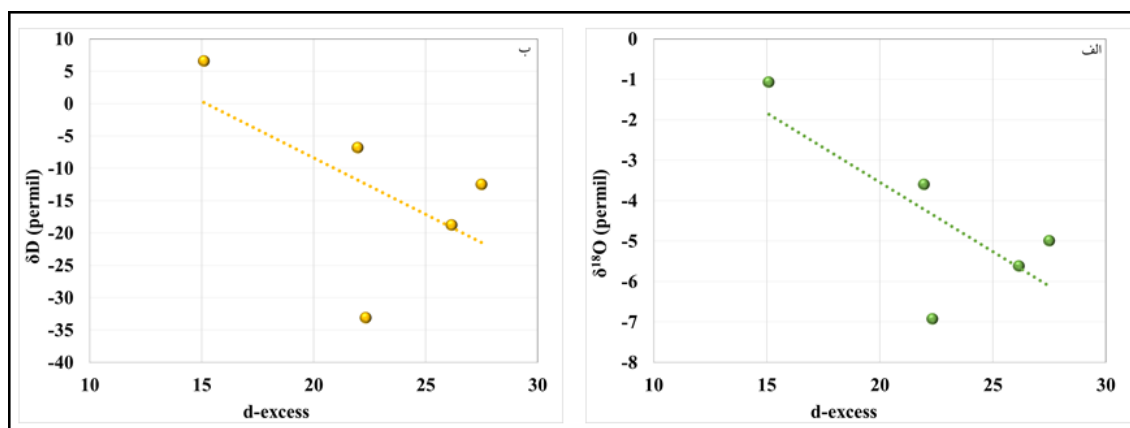
با توجه به بررسی‌های صورت‌گرفته، بین مقدار $\delta^{18}O$ و δD نمونه‌های بارش و مقدار بارش رابطه معکوس وجود دارد، به‌طوری‌که به ازای هر ۲۰ میلی‌متر افزایش بارش حدود



شکل ۷- تغییرات مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار الف) اکسیژن ۱۸ و ب) دوتریوم بارش‌های منطقه با مقدار بارش

بررسی‌های صورت گرفته و رابطه دوتریوم مازاد با مقادیر ایزوتوپی‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریوم نمونه‌های بارش، افزایش دوتریوم مازاد و کاهش مقادیر ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و δD بارش در محدوده مطالعاتی را می‌توان به رطوبت با منشأ مدیترانه‌ای نسبت داد (شکل ۸). همچنین کاهش دما موجب تهی‌شدگی ترکیب ایزوتوپی بارش و افزایش مقدار دوتریوم مازاد می‌شود.

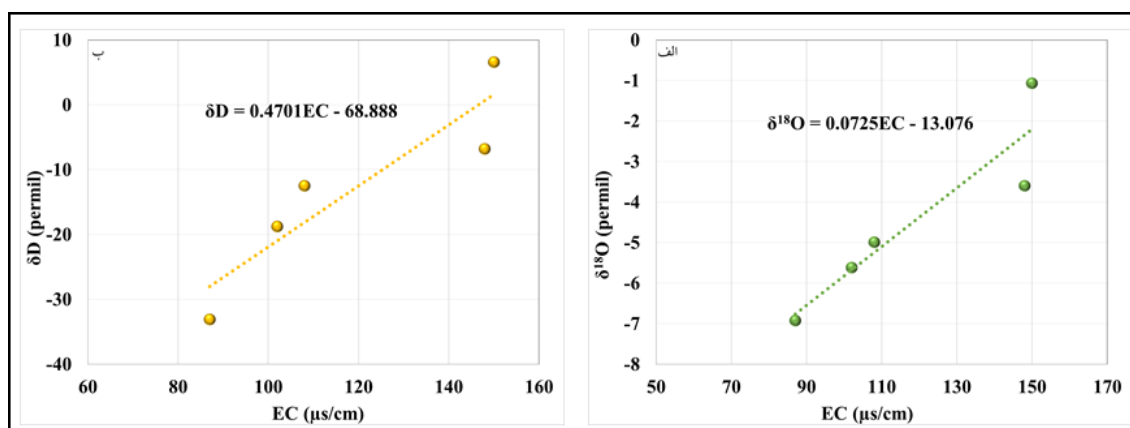
در مطالعات انجام شده، رابطه بین دوتریوم مازاد و مقادیر ایزوتوپی نمونه‌های بارش نیز بررسی شد. دوتریوم مازاد بارش به‌طور معمول تحت تأثیر رطوبت نسبی و دمای اتمسفر منشأ رطوبت است و به همین دلیل شاخص مهمی در تعیین منشأ رطوبت در نظر گرفته می‌شود (دنسگارد، ۱۹۶۴). اگر رطوبت ابر از ۱۰۰ درصد کمتر شود، دوتریوم مازاد رخ می‌دهد (کلارک و فریتز، ۱۹۹۷). با توجه به



شکل ۸- تغییرات مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار الف) اکسیژن ۱۸ و ب) دوتریوم بارش‌های منطقه نسبت به تغییرات دوتریوم مازاد

وجود دارد؛ به‌طوری‌که به‌ازای هر ۲۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر افزایش هدایت الکتریکی حدود ۱/۴۵ پرمیل اکسیژن ۱۸ و حدود ۹/۴۰ پرمیل دوتریوم بارش افزایش می‌یابد.

در پژوهش حاضر، تغییرات مقادیر ایزوتوپ‌های $\delta^{18}\text{O}$ و δD بارش و هدایت الکتریکی آن نیز بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۹ نمایش داده شده است، با افزایش مقدار هدایت الکتریکی نمونه‌های بارش غنی‌شدگی در مقادیر ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در این نمونه‌ها



شکل ۹- تغییرات مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار الف) اکسیژن ۱۸ و ب) دوتریوم بارش‌های منطقه نسبت به تغییرات هدایت الکتریکی

زاگرس میانی در محدوده زردکوه بختیاری با رابطه $\delta^{18}\text{O} + 12.80$ به‌دست آمد. خط ایزوتوپی آب جوی محدوده نسبت به خط آب جوی جهانی و مدیترانه‌ای

نتیجه‌گیری

با بررسی نتایج ایزوتوپی حاصل از نمونه‌های بارش برداشت شده، برای اولین بار، خط ایزوتوپی آب جوی منطقه

۳. کریمی ح. ۱۳۹۲. بررسی ترکیب ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ۱۸ و دوتریوم در بارش‌های زاگرس غربی. نخستین همایش ملی کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار. دانشگاه فردوسی مشهد.

۴. عابدیان ح. کرمی غ. ح. و کریمی ح. ۱۳۹۹. ارزیابی پتانسیل نشت از جناح راست سد بهشت‌آباد با استفاده از مطالعات هیدروژئولوژی. نشریه پژوهش آب ایران. ۱۴(۱): ۲۹-۴۰.

۵. عابدیان ح. و مجیری ع. ۱۴۰۲. بررسی تغذیه در چشمه کارستی با استفاده از مطالعات هیدروژئولوژی و ایزوتوپی (مطالعه موردی: تاق‌دیس سنگویل). نشریه زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته. دانشگاه شهید چمران اهواز.

۶. محمدزاده ح. اسکندری ع. و نجفی م. ۱۳۹۵. بررسی ترکیب ایزوتوپی نزولات جوی در محدوده مطالعاتی پاره. دومین همایش ملی کاربرد ایزوتوپ‌های پایدار. دانشگاه فردوسی مشهد.

۷. محمدزاده ح. و امیری ح. ۱۳۹۷. بررسی زمان ماندگاری آب‌های زیرزمینی (آبرفتی و کارستی) محدوده پل ذهاب با توجه به تغییرات زمانی و مکانی ترکیب ایزوتوپی ($\delta^{18}\text{O}$ و $\delta^2\text{H}$). نشریه تحقیقات منابع آب ایران. ۱۵(۱): ۳۲۷-۳۴۰.

8. Adhikari N. Gao J. Yao T. Yang Y and Dai D. 2020. The main controls of the precipitation stable isotopes at Kathmandu, Nepal. Tellus B: Chemical and Physical Meteorology 72(1): 1-17.
9. Ali K. K. Al-Kubaisi Q. Al-Paruany K. B. 2015. Isotopic study of water resources in a semi-arid region. western Iraq. Journal of Environmental Earth Science. 74: 1671-1686.
10. Clark I. 2015. Groundwater Geochemistry and Isotopes. CRC Press, Boca Raton. 456 pp.
11. Clark I. and Fritz P. 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis. New York.
12. Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science. 133: 1702-1703.
13. Dansgaard W. 1964. Stable isotopes in precipitation. Tellus. 16:436-468.
14. Darling W. G. and Armannsson H. 1989. Stable isotopic aspects of fluid flow in the Krafla, Namafjall and Theistareykir, geothermal systems of northeast Iceland. Chem Geol. 76: 197-213.

شیب کمتری را نشان می‌دهد که از دلایل آن وقوع بارش عمده با حجم‌های بالا در ماه‌های سرد سال بوده که باعث تأثیر کمتر تبخیر در غنی‌تر شدن ایزوتوپ‌های بارش شده است. مقدار بارش، ارتفاع و دمای هوا به‌ترتیب مهم‌ترین عوامل کنترل مقادیر ایزوتوپی بارش در محدوده مطالعاتی هستند؛ به‌طوری‌که به‌ازای هر ۲۰ میلی‌متر افزایش مقدار بارش، حدود ۱/۳ پرمیل کاهش مقدار ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و حدود ۱۰/۱ پرمیل کاهش دوتریوم و به‌ازای هر ۱۰۰ متر تغییر در ارتفاع در این ناحیه، حدود ۰/۴۹ و ۲/۱۶ پرمیل به‌ترتیب کاهش در مقادیر ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و δD اتفاق می‌افتد. علاوه‌براین افزایش دما منجر به غنی‌شدگی مقادیر ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و دوتریوم بارش محدوده مطالعاتی شده است. به‌طوری‌که تغییرات $\delta^{18}\text{O}$ و δD نمونه‌های بارندگی محدوده زاگرس میانی نسبت به دما به‌ترتیب حدود ۰/۹ و ۴ پرمیل در هر ۵ درجه سانتی‌گراد تغییر دما است. همچنین به‌ازای هر ۲۰ میکروزیمنس بر سانتی‌متر افزایش EC، حدود ۱/۴۵ پرمیل افزایش مقدار ایزوتوپی اکسیژن ۱۸ و حدود ۹/۴۰ پرمیل افزایش دوتریوم در گستره مطالعاتی وجود دارد؛ بنابراین ترکیب ایزوتوپی بارش محدوده، حاکی از آن است که بارش‌های غنی‌تر در مناطقی با ارتفاع پایین و مقدار بارش کمتر رخ داده است. همچنین افزایش d-excess و کاهش مقادیر ایزوتوپی $\delta^{18}\text{O}$ و δD بارش در محدوده مطالعاتی را می‌توان به دلیل رطوبت با منشأ مدیترانه‌ای دانست که منجر به افزایش دوتریوم مازاد می‌شود.

سپاسگزاری

بدین‌وسیله از همکاری شرکت مهندسين مشاور زاین‌آب و مساعدت‌های کارکنان آن در انجام این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

۱. ابوکاظمی م. ۱۳۸۱. دانشنامه فیزیک (جلد سوم). بنیاد دانشنامه بزرگ فارسی. چاپ اول. ۶۴۸ ص.
۲. فرهادی ص. علی‌جانی ف. و ناصری ح. ر. ۱۳۹۹. مقایسه مشخصات ایزوتوپ‌های پایدار بارش سیل‌آسا فروردین ۱۳۹۸ در جنوب غرب کشور با خط آب جوی دیگر مناطق ایران و کشورهای مجاور. نشریه هواشناسی کشاورزی. ۸(۲): ۴۴-۵۹.

15. Kendall C. and Caldwell E. 1998. Fundamentals of Isotope Geochemistry. Isotope Tracers Catchment Hydrology. Elsevier, New York. 839 pp.
16. Lis G. Wassenaar L. I and Hendry M. J. 2008. High-precision laser spectroscopy D/H and $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ measurements of microliter natural water samples. Analytical chemistry. 80(1): 287-293.
17. Rozanski K. Araguás-Araguás L. and Gonfiantini R. 1993. Isotopic Patterns in Modern Global Precipitation. Climate Change in Continental Isotopic Records Geophysical Monograph 78.
18. Satrio S. Prasetyo R. Hadian M. S. D. and Syafri I. 2017. Stable Isotopes and Hydrochemistry Approach for Determining the Salinization Pattern of Shallow Groundwater in Alluvium Deposit Semarang, Central Java. Indonsian Journal on Geoscience. 4(1): 1-10.
19. Yeh H. F. and Lee J. W. 2018. Stable Hydrogen and Oxygen Isotopes for Groundwater Sources of Penghu Islands, Taiwan. Geoscience. 8: 84.