

## ارزیابی و مقایسه توزیع آنومالی فلوراید سنگ، خاک و بدنه‌های آبی محور شمالی رودخانه زنگمار، شمال آذربایجان غربی، شمال غرب ایران

حسن عباس‌نژاد<sup>۱</sup>، صمد علی‌پور<sup>۲\*</sup>، دیوید کوهنن<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم دانشگاه ارومیه

۲. استاد، دانشکده علوم دانشگاه ارومیه

۳. استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه نیوسوت ولز استرالیا

(تاریخ دریافت ۱۳۹۸/۰۳/۲۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۸/۰۶/۳۱)

### چکیده

هدف اصلی از تحقیق حاضر، تعیین توزیع غلظت فلوراید در محدوده نیمه شمالی آنومالی دار رودخانه زنگمار است، که بررسی بدنه‌های آبی، خاک و سنگ‌های ناحیه، مناطق آنومالی دار، تعیین منبع و منشأ آنومالی فلوراید در منطقه مطالعه شده را در پی داشته است. به این منظور، در اردیبهشت ۱۳۹۷ از آب‌های چاه، چشمه، قنات و آب‌های سطحی محدوده ۵۱ نمونه آبی و ۱۰۱ نمونه خاک و سنگ، اخذ و مطالعه شد. نتایج تحقیق حاضر نشان می‌دهد براساس آنالیز نمونه‌ها، در بیشتر موارد بیشینه میزان فلوراید در آب‌های سطحی، چاه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها به ترتیب ۵/۲۲، ۳/۳، ۲/۴۵ و ۱/۶ میلی‌گرم بر لیتر است. بر این اساس، به ترتیب از آب‌های سطحی به سمت چاه، چشمه و قنات از مقدار متوسط فلوراید کاسته می‌شود. این مطلب می‌تواند بیان‌کننده تأثیر فرایندهای سطحی یعنی هوازدگی سنگ‌های سطحی بر مقادیر فلوراید منابع آبی باشد. مقادیر فلوراید در سنگ و خاک‌های منطقه از کمتر از ۱ میلی‌گرم بر لیتر برای کمپلکس‌های دگرگونی، رسوبات شیلی، نهشته‌های کربناته تا واحدهایی با مقادیر بیشتر از ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر شامل کمپلکس‌های بازالتی و رسوبات سخت‌نشده عهد حاضر متغیر است. به‌رغم تأثیر زیاد سازندهای زمین‌شناسی و خاک‌های مرتبط در تغذیه فلوراید به آب‌های ناحیه، انتقال فلوراید از شرق ترکیه (حوالی آتشفشان آرات) توسط رودخانه‌های ساری‌سو و زنگمار نیز به عنوان یک منبع مهم تغذیه به شمار می‌آید.

**کلیدواژگان:** آنومالی فلوراید، بدنه‌های آبی، فلوراید سنگ و خاک، رودخانه زنگمار، شمال غرب ایران.

## مقدمه

بررسی غلظت بیش از حد استاندارد عناصر به عنوان اثری از منابع اقتصادی زیرزمینی و یا آلودگی‌هایی با منشأ طبیعی و مصنوعی مانند نیترات، فلوراید، آرسنیک و غیره اهمیت زیادی دارند. طی سال‌های اخیر، در میان این آنومالی‌ها اثر فلئوئور، مطالعات فراوانی در سراسر جهان را به خود اختصاص داده است. برای مثال، می‌توان به حوضه سان لوییس پوتاسی مکزیک [۱]، در نقاط مختلفی از هند [۲]، در برخی مناطق استونی [۳]، در حوضه تایوان در شمال کشور چین [۴] و شمال غرب ایران [۵-۸] اشاره کرد. یکی از مناطقی که در ایران مقادیر زیاد فلئوئوراید در آن گزارش شده، محدوده بازرگان پلدشت است [۷]. نتایج تحقیق یادشده تأثیر عوامل فراوانی مانند سازندهای زمین‌شناسی، وضعیت تکتونیکی منطقه، آلکالینیتی و هدایت الکتریکی آب بر افزایش غلظت فلئوئوراید در منابع آب آن منطقه را بیان می‌کند که این نتایج توسط علی‌پور [۶] نیز تأیید شده است. براساس مطالعات انجام شده غلظت زیاد فلئوئوراید عموماً همبستگی زیادی به غلظت یون‌های سدیم، پتاسیم و بی‌کربنات و همبستگی معکوس با غلظت یون کلسیم دارد که شواهد موجود بر اثر سازندهای زمین‌شناسی در افزایش مقادیر فلئوئوراید در منابع آب را تقویت می‌کند [۹]. در منطقه مطالعاتی عموماً آب‌های زیرزمینی منابع آبی لازم برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعتی را تأمین می‌کند. مطالعات قبلی انجام شده در منطقه روی هیدروژئولوژی و هیدروژئوشیمی آبخوان‌های بازالتی دشت‌های بازرگان و پلدشت (فیجانی، ۱۳۸۶)، نشان دهنده غلظت بیش از حد استاندارد سازمان بهداشت جهانی برای مقادیر یون فلئوئوراید (بیشتر از ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر) در منابع آبی منطقه است. مقادیر زیاد یون فلئوئوراید به دلیل ایجاد انواع بیماری‌های فلئوئورسیس (دندانی، ماهیچه‌ای و اسکلتی)، جایگاه خاصی در مطالعات هیدروژئوشیمیایی دارد. در منطقه مطالعاتی نیز تأثیر این یون بر سلامت اهالی منطقه مشهود است [۷]. بنابراین، مطالعات اخیر آنومالی بیشتر بر یافت توزیع آنومالی و پراکندگی آن برای تسهیل مدیریت این آنومالی متمرکز بوده است [۸]. با این وجود، بررسی منشأ دقیق این آنومالی صورت نگرفته است. با توجه به تأثیر انکارناپذیر سازندهای زمین‌شناسی بر افزایش مقادیر فلئوئوراید در منابع آبی منطقه بازرگان پلدشت، شناسایی توزیع و میزان فلئوئور در خاک و سنگ‌های ناحیه برای کنترل و تهیه

نقشه‌های گسترش آن ضروری است. تعیین توزیع غلظت فلوراید در محدوده نیمه شمالی آنومالی‌دار محور بازرگان - پلدشت هدف اصلی تحقیق حاضر است. شناخت سازندهای زمین‌شناسی، لیتولوژی و ساختارهای زمین‌شناسی در ارتباط و شکل‌گیری فیزیوگرافی سازندهای آبدار از موارد ضروری مطالعات پایه ای هیدروژئولوژیکی در توزیع عناصر محسوب می‌شود. با توجه به اینکه فلئوئور از خاک و سنگ به آب منتقل می‌شود، شناسایی توزیع و میزان فلئوئور در خاک و سنگ‌های ناحیه برای کنترل و تهیه نقشه‌های گسترش آن ضروری است. مطالعات قبلی انجام شده در این منطقه بیشتر در زمینه توزیع این عنصر در آب و بدنه‌های آبی منطقه بوده و مطالعه‌ای در زمینه توزیع فلوراید در خاک و سنگ‌های این منطقه و ارتباط آن با بدنه‌های آبی انجام نشده است. هدف از تحقیق حاضر، مطالعه پتروگرافی سنگ‌های محور بازرگان- پلدشت برای تعیین ارتباط محتمل آنومالی توزیع فلئوئور زیاد در منابع آبی با سازندهای زمین‌شناسی منطقه است.

## مواد و روش‌ها

برای بررسی توزیع فلوراید در خاک، سنگ و بدنه‌های آبی منطقه با توجه به تأثیر لیتولوژی، ۵۱ نمونه از بدنه‌های آبی (۸ نمونه آب سطحی، ۳۸ دهنه چشمه، ۳ حلقه چاه و ۲ رشته قنات) و ۱۰۱ نمونه سنگ (شامل نمونه‌های آهکی، رسوبی- آواری و سنگ آذرین) استفاده شده است (شکل ۱). برای حذف اثر رقت ناشی از گذشت زمان، نمونه‌های روزانه پس از جمع‌آوری در ظروف نمونه یک‌بارمصرف یک‌لیتری پلاستیکی در همان روز به آزمایشگاه منتقل شدند. نمونه‌ها در آزمایشگاه زرآما<sup>۱</sup> توسط مقدار فلئوئور و عناصر مختلف سنگ و خاک و بدنه‌های آبی با روش NaoH fusion، analysis by specific ion electrode و اکسیدهای اصلی با روش Li2B4O7/LiBO2 fusion، analysis by XRF یا ICP-MS آنالیز شد. دقت دستگاه در حد ۰/۱ بود. تفسیر اطلاعات با استفاده از نرم‌افزار سیستم اطلاعات جغرافیایی<sup>۲</sup> پردازش شد. مرزهای سنگ‌شناختی قبلی منطقه مطالعه شده با استفاده از نقشه‌های ۱:۲۵۰,۰۰۰ آذربایجان غربی به منظور تعیین ارتباط زمین‌شناسی سطحی با مقدار فلوراید موجود در آب‌های زیرزمینی و سطحی بررسی شده و با تغییراتی ترسیم

### بررسی منشأ احتمالی فلوراید

نتایج آنالیز نمونه برداری در منابع آبی مختلف منطقه (چاه، چشمه، قنات و آب سطحی) نشان‌دهنده پراکنش بسیار متفاوت فلوراید در بدنه‌های آبی است. در شکل ۱ و جدول ۱ موقعیت نمونه‌های آبی و نوع آنها (چشمه، قنات و چاه) و وضعیت آنومالی نمونه‌های برداشت‌شده از منابع آبی منطقه مطالعه‌شده نشان داده شده است.

### الف) فلوراید در آب‌های سطحی

نقشه ترسیم‌شده در شکل ۲، مقدار فلوراید در آب‌های سطحی و موقعیت‌های نمونه برداری را نشان می‌دهد. طبق نقشه ترسیم‌شده در شکل ۲، در نزدیکی سد بارون و در طول رودخانه زنگمار در بخش غربی منطقه مطالعه‌شده، میزان فلوراید آب‌های سطحی زیاد است. براساس مطالعاتی که توسط معصومی [۲۰] در منطقه ماکو - بازرگان صورت گرفته، میزان فلوراید در بخش شرقی رودخانه ساری‌سو (روستاهای یاریم قیه، تخته‌دوزی، کرکش، رند)، در طول رودخانه زنگمار (روستاهای خلیج عجم، بلجک، بابور، عظیم کندی و ماکو) و به‌ویژه در بخش مرکزی رودخانه زنگمار (خلیج کرد و گدای) و در شهرستان پلدشت و روستای قلیچ لامیش زیاد است. همچنین، طبق مطالعات علی‌پور [۵ و ۶]، میزان فلوراید در آب‌های سطحی منطقه زیاد بوده و توزیع آن به شکل یک کمان در امتداد رودخانه‌های زنگمار و ساری‌سو از غرب به شرق (از بازرگان تا پلدشت) است [۲۱ و ۲۲]. از آنجا که رودخانه‌های زنگمار و ساری‌سو از کوه‌های مرزی ایران و ترکیه سرچشمه می‌گیرند و طبق نظر اروچ [۲۳] بیماری فلئوروسیس از بخش شرقی ترکیه (آتشفشان تندراک) گزارش شده است، این منطقه آب‌های نوع سدیم بی‌کربنات، فلوراید بیشتری داشته و آب‌های نوع کلسیم - منیزیم - بی‌کربنات فلوراید کمتری داشته‌اند. بنابراین، احتمال دارد بخشی از منشأ فلوراید زیاد در رودخانه ساری‌سو و بخش شرقی رودخانه زنگمار از خاک ترکیه آغاز شده باشد. این موضوع نشان می‌دهد توزیع فلوراید در شمال غرب ایران یک توزیع محلی و کوچک نیست، بلکه مناطق وسیعی از طرفین مرز دو کشور ایران و ترکیه را در بر می‌گیرد که به بررسی بیشتری نیاز دارد [۲۲]. بنابراین، با توجه به تلفیق این اطلاعات، بیشترین آلودگی در مسیر رودخانه زنگمار و رودخانه ساری‌سو در مسیر پلدشت به

شد [۶]. در تهیه این نقشه‌ها، توزیع آنومالی مقدار فلوراید ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر، حد ماکزیمم مقدار استاندارد در آب آشامیدنی [۱۱] برای محافظت در برابر فلئوروسیس دندان در نظر گرفته شد. در مطالعه حاضر حدود ۱۰۰ عدد مقطع نازک تهیه‌شده از نمونه‌های برداشت‌شده از پیمایش‌های صحرائی در منطقه بررسی شده که مربوط به سازندها و سنگ‌شناسی‌های مختلفی است که در این منطقه برون‌زد دارند، توسط میکروسکوپ پلاریزان برای مطالعات پتروگرافی مطالعه شد. با توجه به تنوع سنگ‌شناسی در منطقه مطالعه‌شده، در پژوهش حاضر برای بررسی، توصیف، طبقه‌بندی و نام‌گذاری سنگ‌ها از روش‌های مختلفی که توسط محققان مختلف برای سنگ‌های آذرین [۱۲ و ۱۳] و رسوبی [۱۴-۱۶] ارائه شده‌اند، استفاده شد.

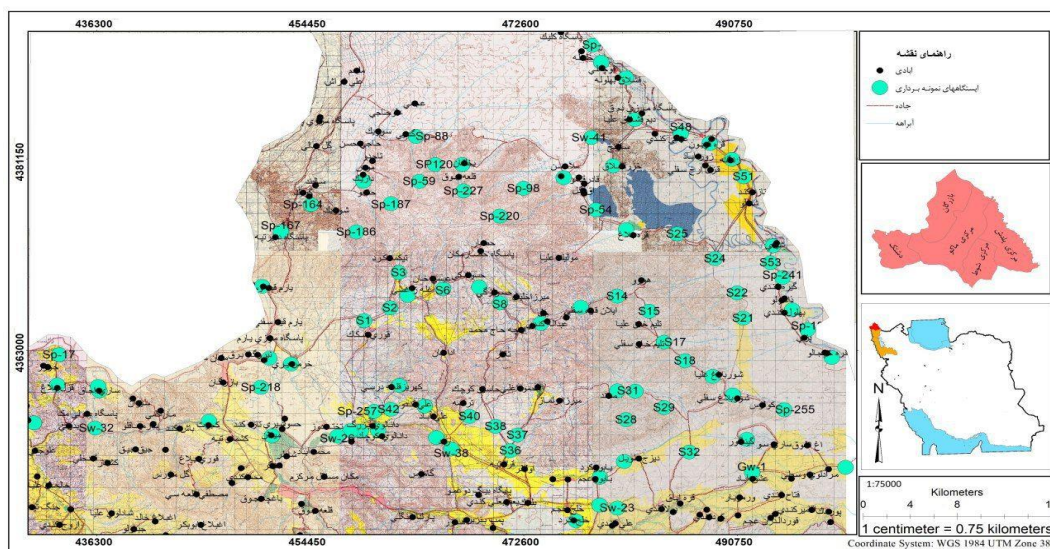
### نتایج و بحث

#### زمین‌شناسی و لیتولوژی عمومی منطقه مطالعه‌شده

ناحیه بررسی‌شده در شمال باختری ایران قرار دارد و با توجه به تقسیمات واحدهای ساختمانی - رسوبی ایران [۱۷ و ۱۸]، این ناحیه بخشی از کمربند دگرگونی و افیولیتی زون سنندج - سیرجان دانسته شده است. سازندهای زمین‌شناسی منطقه مطالعاتی شامل تشکیلات آهکی - شیلی متعلق به دونین - کربونيفر و تریاس، آهک‌های متعلق به پرمین، تشکیلات قم و بازالت‌های کواترنری است و به طور کلی می‌توان گفت دو تیپ از سازندهای زمین‌شناسی بازالتی و غیربازالتی در منطقه قابل شناسایی است که با هم در ارتباط اند [۷]. گدازه‌های بازالتی بیشتر زمین‌های پست و مسیر رودخانه‌های قدیمی را می‌پوشانند. این گدازه‌ها مربوط به فوران آتشفشانی کوه‌های آرات هستند [۱۹]. دیگری آهک‌های سازند قم و آهک‌های توده ای و دولومیت‌های سازند روتنه هستند که در بعضی مناطق بازالت‌ها را احاطه کرده‌اند. شایان یادآوری است که سازندهای آبدار منطقه را بیشتر بازالت‌های کواترنری، آهک پرمین و سازند قم تشکیل می‌دهند. براساس مطالعات ژئوفیزیکی انجام‌شده در دشت بازرگان، بیشترین عمق سنگ کف ۱۵۰ متر برآورده شده است. در دو حلقه چاه آب شرب حفر شده در این دشت، ضخامت بازالت بیش از ۵۴ متر گزارش شده است. در دشت پلدشت بیشترین ضخامت بازالت‌ها حدود ۴۰ متر و ضخامت آبرفت قرار گرفته در زیر بازالت‌ها نیز در بعضی نقاط بیش از ۱۰۰ متر گزارش شده است [۷].

کمان در امتداد رودخانه های زنگمار و ساری سو از غرب به شرق (از بازرگان تا پلدشت) گسترش یافته است [۲۱].

بازرگان مشاهده شد. روند گسترش فلوراید در آب های سطحی منطقه دارای فلوراید زیاد و توزیع آن به شکل یک



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده به همراه موقعیت ایستگاه های نمونه برداری

جدول ۱. نتایج آنالیز نمونه های آب منطقه مطالعاتی (اردیبهشت ۱۳۹۷)

نوع منبع	UTM (X)	UTM (Y)	F (mg/l)	نوع منبع	UTM (X)	UTM (Y)	F (mg/l)
قنات	۴۶۲۰۱۴	۴۳۵۹۶۸۷	۱/۳۰۹	چشمه	۴۵۸۳۵۱	۴۳۷۴۲۶۳	۰/۷۸
قنات	۴۹۰۳۸۲	۴۳۵۸۷۶۸	۱/۶۲۲	چشمه	۴۶۱۲۹۳	۴۳۷۶۹۵۲	۰/۷۶۵
چاه	۴۹۹۹۶۲	۴۳۵۱۸۹۳	۲/۸۷۲	چشمه	۴۵۸۹۴۳	۴۳۷۹۰۷۹	۰/۷۶۴
چاه	۴۹۲۰۳۰	۴۳۵۱۴۲۵	۳/۲۹۵	چشمه	۴۶۳۴۲۹	۴۳۸۳۳۲۷	۰/۷۳۹
چاه	۴۷۵۹۹۵	۴۳۷۹۴۰۷	۰/۹۶۶	چشمه	۴۶۳۶۹۵	۴۳۷۹۰۵۹	۰/۷۳۵
آب سطحی	۴۷۹۰۴۷	۴۳۴۸۳۰۴	۵/۲۲۴	چشمه	۴۸۰۲۰۳	۴۳۸۰۵۳۹	۰/۷۰۲
آب سطحی	۴۸۰۵۴۶	۴۳۴۸۰۴۰	۳/۹۱۲	چشمه	۴۶۷۳۶۵	۴۳۸۰۶۵۱	۰/۶۳۹
آب سطحی	۴۵۶۷۵۱	۴۳۵۴۸۵۲	۲/۳۵۲	چشمه	۴۶۷۴۷۴	۴۳۷۸۱۶۴	۰/۶۳۳
آب سطحی	۴۳۶۱۴۵	۴۳۵۵۶۲۶	۰/۵۰۷	چشمه	۴۷۸۷۲۵	۴۳۷۶۳۴۶	۰/۵۷۹
آب سطحی	۵۰۲۰۰۱	۴۳۵۳۶۱۸	۵/۰۹۲	چشمه	۴۳۲۹۰۰	۴۳۵۹۷۱۱	۰/۵۵۵
آب سطحی	۴۶۶۴۵۰	۴۳۵۳۶۵۰	۲/۳۲	چشمه	۴۳۶۴۹۱	۴۳۵۹۱۴۷	۰/۵۲۲
آب سطحی	۴۵۰۹۴۵	۴۳۶۲۲۵۲	۲/۳۴۲	چشمه	۴۳۶۳۷۲	۴۳۵۹۵۷۳	۰/۵۱
آب سطحی	۴۷۸۳۶۰	۴۳۸۳۲۱۸	۱/۵۷۴	چشمه	۴۳۳۰۶۷	۴۳۶۲۶۰۲	۰/۴۹۴
چشمه	۴۹۱۵۶۹	۴۳۵۴۵۵۹	۲/۴۴۸	چشمه	۴۳۰۹۱۴	۴۳۵۶۱۱۹	۰/۴۷۲
چشمه	۴۹۶۷۲۷	۴۳۶۴۹۷۴	۲/۳۰۲	چشمه	۴۷۷۰۴۸	۴۳۴۶۸۱۴	۰/۲۹۲
چشمه	۴۹۴۵۹۶	۴۳۶۹۹۱۴	۲/۲۷	چشمه	۴۵۱۱۷۲	۴۳۵۴۷۹۹	۰/۱۱۸
چشمه	۴۹۵۴۲۱	۴۳۶۶۸۶۱	۲/۳۵۴	چشمه	۴۵۸۷۲۶	۴۳۵۵۳۳۱	۰/۱۰۹
چشمه	۴۷۸۴۳۸	۴۳۹۱۹۹۸	۲/۱۸۶	چشمه	۴۵۷۸۴۵	۴۳۵۵۳۷۴	۰/۱۰۹
چشمه	۴۵۰۲۲۰	۴۳۵۹۵۰۷	۱/۸۳۲	چشمه	۴۶۰۱۹۳	۴۳۵۵۴۲۹	۰/۱۰۱
چشمه	۴۴۵۷۹۳	۴۳۵۶۲۹۲	۱/۸۰۶	چشمه	۴۹۴۷۳۶	۴۳۵۷۳۷۷	۰/۱
چشمه	۴۲۶۵۳۹	۴۳۵۵۴۰۳	۱/۵۳۳	چشمه	۴۹۸۷۸۷	۴۳۶۲۳۳۹	۰/۴۲
چشمه	۴۶۵۱۵۸	۴۳۵۴۷۲۹	۰/۹۶۱	چشمه	۴۷۲۵۸۲	۴۳۷۸۳۹۳	۰/۷۰
چشمه	۴۵۲۷۹۳	۴۳۶۱۷۱۵	۰/۹۵۶	چشمه	۴۷۰۵۵۷	۴۷۵۷۴۷	۰/۵۷۲
چشمه	۵۰۴۸۱۸	۴۳۵۷۳۳۸	۰/۹۴۲	چشمه	۴۵۰۳۲۶	۴۳۶۹۰۹۴	۰/۱
چشمه	۴۵۱۹۳۳	۴۳۷۴۲۸۴	۰/۹۱۵	چشمه	۴۵۹۸۵۴	۴۳۵۷۲۱۲	۰/۱
چشمه	۴۵۴۵۰۱	۴۳۷۶۸۴۵	۰/۸۹۹				

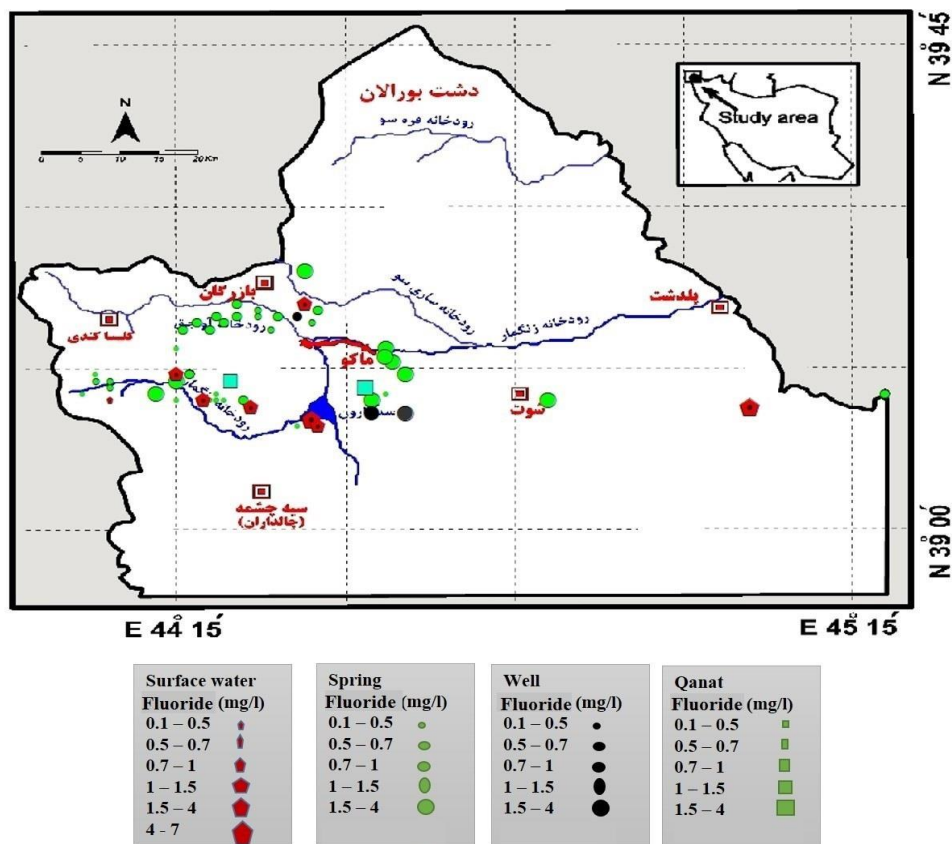
مشابه کمانی امتداد رودخانه های زنگمار و ساری سو در توزیع فلوراید زیاد در آب های سطحی، گسترش وسیعی را نیز در جنوب و جنوب شرق و شمال منطقه در برمی گیرد.

### ج) فلوراید در چاه و قنات

۳ نمونه آب چاه و ۲ نمونه آب قنات از منطقه مطالعه شده برداشت شد (جدول ۱). نقشه ترسیم شده در شکل ۲، مقدار فلوراید در آب چاه ها و قنات ها و موقعیت های نمونه برداری را نشان می دهد. میزان فلوراید در قنات ها بیش از ۱ میلی گرم بر لیتر مشاهده شد. در محدوده کشمش تپه حدود ۱/۶ میلی گرم بر لیتر برداشت شد. براساس مطالعاتی که توسط معصومی [۲۰] در منطقه ماکو - بازرگان صورت گرفته، مقادیر فلوراید در نمونه های قنات به ندرت تا حدود ۲ میلی گرم بر لیتر می رسد. با توجه به زمان تماس زیاد آب با سازندها و شست و شوی مسیر و آرایش کمتر با خاک ها و آب های سطحی، نتایج ترکیب شیمیایی آب قنات بهتر از سایر منابع تأثیر لیتولوژی و سازندهای زمین شناسی مسیر را نشان می دهد [۲۲].

### ب) فلوراید در چشمه ها

۳۸ نمونه آب چشمه از منطقه مطالعه شده برداشت شد. نقشه ترسیم شده در شکل ۲، مقدار فلوراید در چشمه ها و موقعیت های نمونه برداری را نشان می دهد. میزان فلوراید در آب چشمه ها متغیر است. به طوری که کمترین مقدار فلوراید در چشمه ها ۰/۱ میلی گرم بر لیتر و بیشترین مقدار آن ۲/۴۵ میلی گرم بر لیتر است که در منطقه ماکو (قزل داغ، کرد و هندور) مشاهده شد (جدول ۱). براساس مطالعاتی که توسط معصومی [۲۰] در منطقه ماکو - بازرگان صورت گرفته و مطالعات علی پور و همتی [۲۲]، در بخش های میانی محدوده (روستاهای یاریم قیه، خرمن پری، تازه کند، کشمش تپه، میلان، سنقر، دانالوی بزرگ، خلج عجم، خلج کرد، علوچینی، شهرستان پلدشت و بازرگان) و بخش های جنوبی محدوده (شوط، آغ داش، قولار، مشهدکندی، پیرشه، قوچ کندی و ترشاب)، شمال شرق (محدوده کلیساکندی) و شمال (سوریک) میزان فلوراید زیاد و بیش از ۱/۵ میلی گرم بر لیتر توزیع و مشاهده شده است. همچنین، طبق مطالعات علی پور و همتی [۲۲]، توزیع فلوراید زیاد در چشمه ها علاوه بر روند



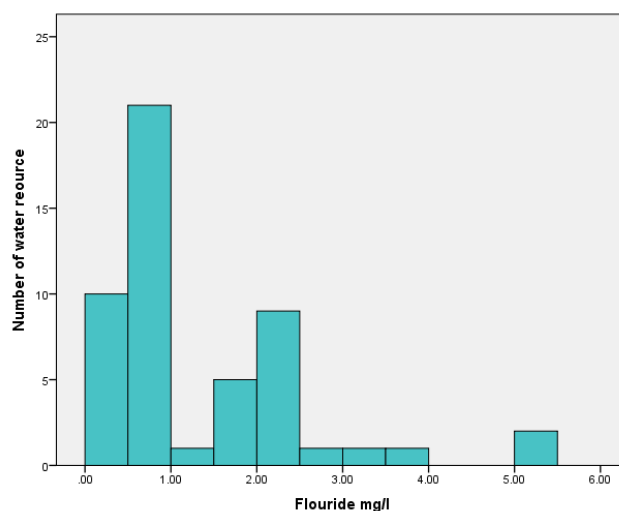
شکل ۲. توزیع کلی فلوراید در منابع آبی مختلف (آب های سطحی، چشمه، چاه و قنات) در منطقه مطالعه شده

مشاهده می‌شود. در مقایسه با مطالعات صورت گرفته توسط علی‌پور و همتی [۲۲] می‌توان چنین نتیجه گرفت که مناطق مرکزی محدوده مطالعه شده یعنی روستاهای یاریم‌قیه، خرمن‌یری، تازه‌کند، کشمش‌تپه، میلان، سنگر، دانالوی بزرگ، خلج‌عجم، خلج‌کرد، علوجینی، شهرستان پلدشت و بازرگان، مرادلوی پایین، جمال‌کندی و نظرخان در مسیر رودخانه زنگمار و ساری‌سو آلودگی با فلوراید بیش از ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر را نشان می‌دهند. این آلودگی در منطقه مطالعه شده در امتداد رودخانه زنگمار ادامه می‌یابد، به طوری که بیشترین آلودگی با فلوراید در امتداد این رودخانه مشاهده می‌شود. در ادامه مقایسه میانگین توزیع فلوراید در منابع آبی مختلف (آب‌های سطحی، چشمه، چاه و قنات) در شکل ۳ نشان می‌دهد که میانگین منابع آبی با فلوراید کمتر از ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر غالب است و تعداد منابع آبی با مقادیر فلوراید بیش از ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر و یا کمتر از ۴ میلی‌گرم بر لیتر افزایش می‌یابد. این مقدار حد آستانه آثار بومی فلوراید است، به طوری که با مصرف منابع آبی با این مقدار فلوراید برای یک دوره طولانی مدت و از زمان کودکی می‌تواند موجب اپیدمی شدن بیماری فلوئوروسیس دندان و اسکلتی شود. فقط دو نمونه از منابع آبی مربوط به آب‌های سطحی مقدار فلورایدشان بین ۴-۷ میلی‌گرم بر لیتر است (شکل ۲). در صورت مصرف طولانی مدت این مقدار فلوراید در آب آشامیدنی، می‌تواند موجب آسیب‌دیدگی شدید دندان و فلوئوروسیس اسکلتی پیشرفته شود [۲۴].

براساس مطالعاتی که توسط معصومی [۲۰] و علی‌پور و همتی [۲۲]، در منطقه ماکو - بازرگان صورت گرفته، میزان فلوراید بیش از ۱/۵ میلی‌گرم بر لیتر در چاه‌های محدوده پلدشت (روستاهای مرادلوی پایین، جمال‌کندی و نظرخان)، روستای سنگر و جنوب غرب روستاهای اسماعیل‌کندی و کامل‌آباد مشاهده شد. مطالعات علی‌پور و همتی [۲۲] بیان می‌کند که روند گسترش فلوراید در آب‌چاه‌های منطقه تا حدودی شبیه روند کلی فلوراید در آب‌های سطحی است که نشان دهنده ارتباط آنومالی فلوراید آب‌چاه‌ها با آب‌های سطحی است. بر اساس نمونه‌برداری‌ها، میزان فلوراید در نمونه‌های چاه تقریباً زیاد و بین ۰/۹۷ تا ۳/۳ میلی‌گرم بر لیتر متغیر است که با مطالعات معصومی [۲۰] و علی‌پور و همتی [۲۲] همخوانی دارد.

#### مقایسه میانگین توزیع فلوراید در منابع آبی مختلف

در نقشه ترسیم شده در شکل ۲، توزیع نموداری کلی فلوراید در منطقه مطالعه شده به منظور مقایسه و مشاهده تغییرات هر چهار منبع آبی مورد بحث، نمایش داده شده است. این مقایسه کاهش کلی مقدار فلوراید را به ترتیب از آب سطحی به چشمه، چاه و قنات نشان می‌دهد. این موضوع می‌تواند بیان‌کننده تأثیر فرایندهای سطحی مانند شست‌وشوی فلوراید از خاک و یا هوازگی سنگ‌های سطحی فلورایددار و یا افزایش مقدار فلوراید منابع زیرزمینی از طریق آب‌های سطحی آلوده باشد. بیشترین آلودگی فلوراید در مسیر رودخانه زنگمار، در مسیر دشت پلدشت به دشت بازرگان، نزدیک دشت ماکو و در امتداد غربی رودخانه زنگمار



شکل ۳. توزیع کلی یون فلوراید در منابع آبی (آب‌های سطحی، چشمه، چاه و قنات) در منطقه مطالعه شده

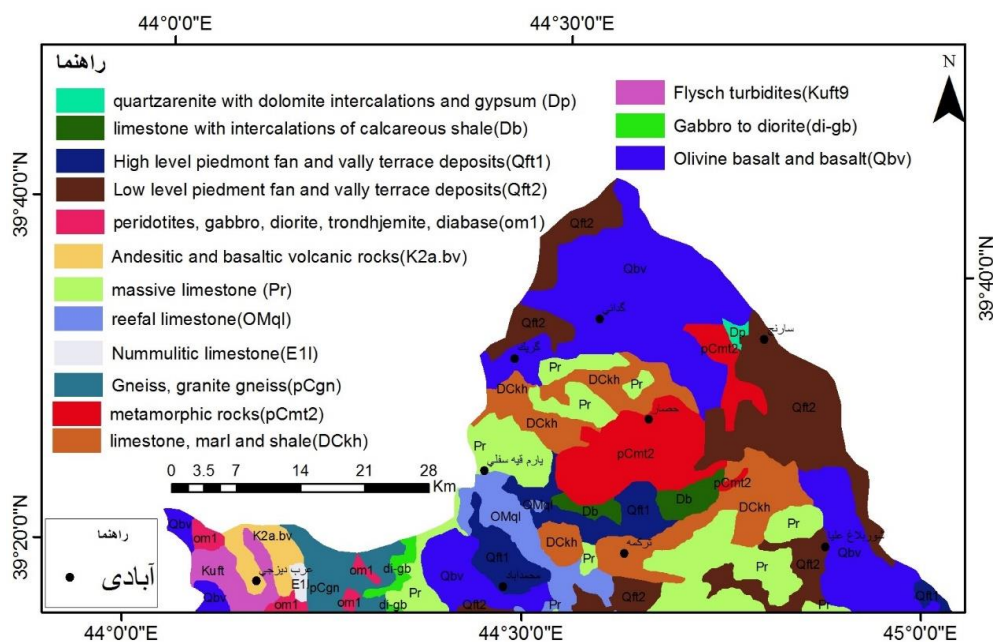
سنگ‌نگاری که در زمان برداشت در عملیات صحرایی صورت گرفته است، در شکل ۴ مشاهده می‌شود.

#### سنگ‌نگاری کربنات‌های منطقه مطالعه شده

نمونه‌های کربنات‌ه برداشت‌شده از منطقه مطالعه شده شامل آهک بایوکلاستی، آهک دولومیتی رکرستالیزه، آهک دولومیتی شده، اینترا بایو میکرواسپارایت (آهک رکرستالیزه)، بایواسپارایت (آهک ریز بلور)، میکرواسپارایت (آهک رکرستالیزه)، آهک میکرایتی، بایومیکرایت و آهک مرجانی می‌شود که به توصیف آنها خواهیم پرداخت.

#### پetroگرافی و لیتولوژی سازنده‌های مطالعه شده

تنوع سنگ‌شناسی در منطقه مطالعه شده در پژوهش حاضر بیشتر شامل آهک، آهک دولومیتی، دولومیت، ماسه سنگ کوارتزآرنایتی، الیوین بازالت، بازالت و متاریولیت می‌شود. به منظور مطالعه سنگ‌نگاری تعداد ۳۱ نمونه (از بین ۱۰۱ نمونه برداشت‌شده) شامل ۱۷ نمونه آهکی، ۴ نمونه رسوبی- آواری و ۱۰ نمونه سنگ آذرین برداشت شده است (جدول ۲). موقعیت مکانی نمونه‌های برداشت‌شده برای مطالعات سنگ‌نگاری در منطقه مطالعه شده در شکل ۱ نشان داده شده است. توصیف ماکروسکوپی نمونه‌های



شکل ۴. نقشه زمین‌شناسی منطقه مطالعه شده

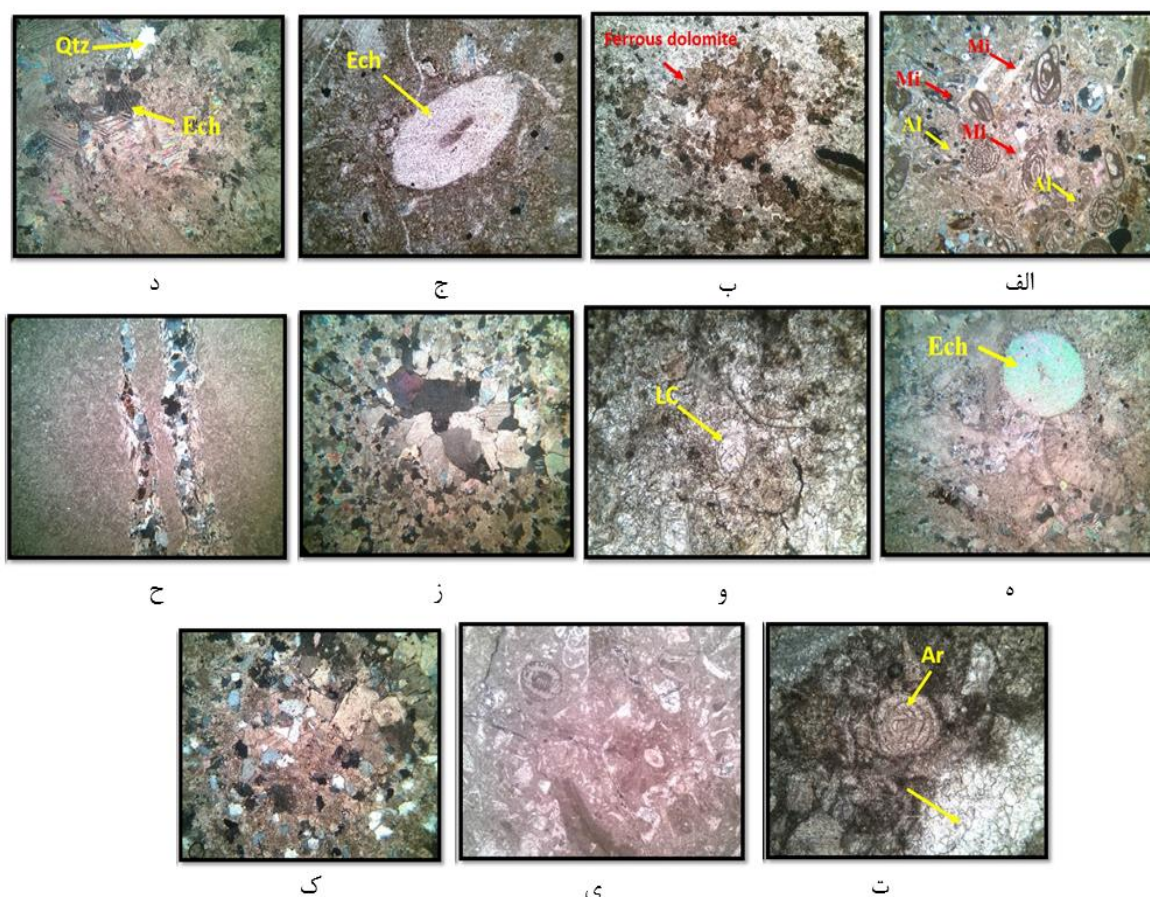
**آهک دولومیتی با تبلور مجدد:** نمونه دستی معرف این لیتولوژی یک سنگ سخت به رنگ خاکستری مایل به تیره است. این نمونه نوعی سنگ رسوبی شیمیایی کربناته، از جنس آهک میکرایتی است که دچار پدیده دولومیتی شدن و نیز پدیده تبلور مجدد شده است (شکل ۵ ب). در این نمونه با توجه به لیتولوژی دولومیتی و مقاومت زیاد آن در برابر انحلال مقابل آب‌های جوی مقدار عناصری که از طریق این لیتولوژی در منطقه وارد آب شرب می‌شود، بسیار کم خواهد بود.

**آهک دولومیتی:** نمونه دستی معرف این لیتولوژی رنگ خاکستری تیره و رگه‌های پرشده با سیمان دارد (شکل ۵ ج). در این نمونه نیز اجزای آهکی نظیر بقایای

**آهک بایوکلاستی:** با توجه به مطالعات رسوب‌شناسی و آنالیزهای ژئوشیمیایی صورت‌گرفته در این منطقه، مشخص شد که ترکیب کانی‌شناسی اولیه گل آهکی و فسیل‌ها آراگونیت است و آراگونیت قابلیت انحلال زیادی دارد و به راحتی در معرض آب‌های متاوریکی حل می‌شود [۲۵]. آهک میکرایتی حاوی اینتراکلاست‌هایی از جنس کوارتز و فسیل‌های فرامینیفر با سن الیگو- میوسن است (شکل ۵ الف). در این نمونه نیز با توجه به اینکه هم گل آهکی و هم فسیل‌ها از جنس آراگونیت هستند، با قرار گرفتن در معرض آب‌های متاوریکی به میزان بیشتری حل شده و عناصر موجود در شبکه آن وارد این آب‌ها و آب شرب منطقه می‌شود.

برابر انحلال وارد آب شرب خواهد شد [۲۶]. در مناطق خشک و نیمه خشک به دلیل هوازدگی سنگ‌ها، یون فلئوئوراید از کربنات خارج می‌شود. عواملی مانند pH محلول زهکشی شده، قلیائیت و مقدار CO<sub>2</sub> موجود درون خاک و حل شده در آب قابلیت شسته شدن فلئوئوراید از کربنات و افق بالایی خاک را کنترل می‌کنند [۲۶].

اکینوئید (Ech) که در برابر دولومیتی شدن مقاومت کرده اند، از جنس کلسیت پرمینریم هستند که نسبت به آراگونیت قابلیت انحلال کمتری دارند. بر اساس مطالعات اصغری مقدم و جمیری، با عبور آب‌های جوی از داخل و نیز از روی این لیتولوژی در منطقه مطالعه شده، مقدار فلئوئور نه چندان زیادی با توجه به مقاومت این نمونه در



شکل ۵. الف) تصویر میکروسکوپی (نمونه S1)؛ آهک بیوکلاستیکی سازند قم با آثاری از فسیل میلیولید (Mi) و فسیل نئوآلئولینا ملوکوردیکا (Al)، ب) تصویر میکروسکوپی با میزان فلئوئور ۰/۵ ppm (نمونه S3)؛ بلورهای دولومیت آهن‌دار (Ferrous dolomite) درون آهک رکرستالیزه، ج) تصویر میکروسکوپی با میزان فلئوئور ۱/۷ ppm (نمونه S10)؛ پلاک‌های کرینوئید پراکنده در متن میکرایت دولومیتی شده (Ech)، د) تصویر میکروسکوپی (نمونه S11)؛ ذرات آواری کوارتز (Qtz) درون اینتراپایومیکرواسپارایت که در آن خرده‌های اکینوئید (Ech) نیز وجود دارند، ه) تصویر میکروسکوپی (نمونه S12)؛ قطعات ساقه و پلاک خارپوستان درون آهک اسپاری (Ech) نمونه S12، و) تصویر میکروسکوپی با میزان فلئوئور ۰/۸ ppm (نمونه S18)؛ مقطع طولی لانزلا کونیکا (LC) در آهک، ز) تصویر میکروسکوپی با میزان فلئوئور ۰/۵ ppm (نمونه S20)؛ نئومورفیسم افزایشی در متن سنگ، ح) تصویر میکروسکوپی مربوط به آهک میکرایتی با میزان فلئوئور ۰/۶ ppm (نمونه S25)؛ قطع آهک میکرایتی توسط رگه‌های سیلیسی-کربناته، ت) تصویر میکروسکوپی با میزان فلئوئور ۰/۹ ppm (نمونه S30)؛ آرکادیسکوس (Ar) و نئومورفیسم افزایشی (Agr neo) در آهک میکرایتی، ی) تصویر میکروسکوپی با میزان فلئوئور ۱/۳ ppm (نمونه S37)؛ فضاها خالی کلنی مرجان که توسط آهک میکرایتی پر شده است، ک) تصویر میکروسکوپی (نمونه S14)؛ نئومورفیسم افزایشی در آهک میکرایتی ماسه‌ای، نمونه S14، نور پلاریزه، بزرگ‌نمایی 25x



حاصل رشد کلنی مرجانی است (شکل ۵ ی). در این نمونه نیز با توجه به لیتولوژی آهکی، در صورت وجود فلوتور در شبکه بلوری، می‌توان انتظار ورود مقادیر درخور توجهی فلوتور به داخل آب‌های شرب منطقه را داشت.

**آهک ماسه‌ای:** نمونه دستی معرف آهک ماسه‌ای به رنگ خاکستری دیده می‌شود که یک سنگ رسوبی شیمیایی - آواری است (شکل ۵ ک). آهک ماسه‌ای با توجه به حضور دانه‌های کوارتز در آن و با توجه به اینکه کوارتز می‌تواند میزبان فلوتور باشد، مقادیر بیشتری از این عنصر دارد و تماس آن با آب‌های جوی، می‌تواند مقادیر بیشتری از فلوتور را وارد آب‌های منطقه کند.

#### ب) پتروگرافی ماسه‌سنگ‌ها

سنگ‌های آواری شناسایی شده از طریق بررسی‌های پتروگرافی شامل ماسه‌سنگ کوارتزآرنایت، شیل و ماسه‌سنگ با سیمان کربناته است.

**ماسه‌سنگ کوارتز آرنایت:** ماسه‌سنگ کوارتز آرنایت در نمونه دستی به رنگ خاکستری روشن دیده می‌شود که یک سنگ رسوبی آواری متشکل از ذرات با گردشگری ضعیف تا متوسط و اغلب از جنس کوارتز است (شکل ۶ الف). با توجه به اینکه کوارتز می‌تواند میزبان فلوتور باشد، مقادیر درخور توجه فلوتور می‌تواند از طریق این سنگ‌ها وارد آب‌های منطقه شود.

**شیل کربناته:** شیل کربناته در نمونه دستی به رنگ خاکستری تیره که رگه‌های موجود در آن توسط کلسیت اسپارایتی روشن پر شده اند، دیده می‌شود (شکل ۶ ب). با توجه به اینکه کانی‌های رسی مقادیر درخور توجهی فلوتور حتی بیشتر از نمونه‌های آهکی و دولومیتی در شبکه خود دارند، فلوتور انتقال یافته از این لیتولوژی به داخل آب‌های منطقه می‌تواند زیاد باشد.

**ماسه‌سنگ با سیمان کربناته:** نمونه دستی مربوط به ماسه‌سنگ با سیمان کربناته دارای رنگ قرمز تیره و متشکل از ذرات با گردشگری ضعیف است (شکل ۶ ج). با توجه به اینکه ماسه‌سنگ‌ها یکی از میزبان‌های اصلی فلوتور هستند، مقدار درخور توجهی فلوتور از طریق این سنگ‌ها می‌تواند وارد آب‌های منطقه مورد بررسی شده باشد.

**اینترا بایومیکرواسپارایت:** نمونه دستی این سنگ رنگ خاکستری تیره با رگه‌های فراوان پر شده با سیمان اسپاری دارد. سنگ رسوبی شیمیایی کربناته، از جنس آهک میکرایتی حاوی اینتراکلسیت و فسیل اکینوئید است (شکل ۵ د). در این نمونه با توجه به اینکه بیشتر اجزا کریستالیزه هستند و در برابر انحلال مقاوم اند، مقادیر ناچیزی عناصر از طریق آن می‌تواند وارد آب‌های جوی شود.

**باوواسپارایت:** نمونه دستی باوواسپارایت رنگ قهوه‌ای مایل به زرد به همراه رگه‌هایی از سیمان اسپاری به رنگ زرد دارد (شکل ۵ ه). با توجه به اینکه اجزای بایوکلسیتی در این نمونه از جنس کلسیت با منیزیم زیاد هستند که در برابر انحلال تا حدودی مقاوم‌اند، مقادیر زیادی از عناصر نمی‌توانند از طریق آن وارد آب‌های جوی و شرب منطقه شوند.

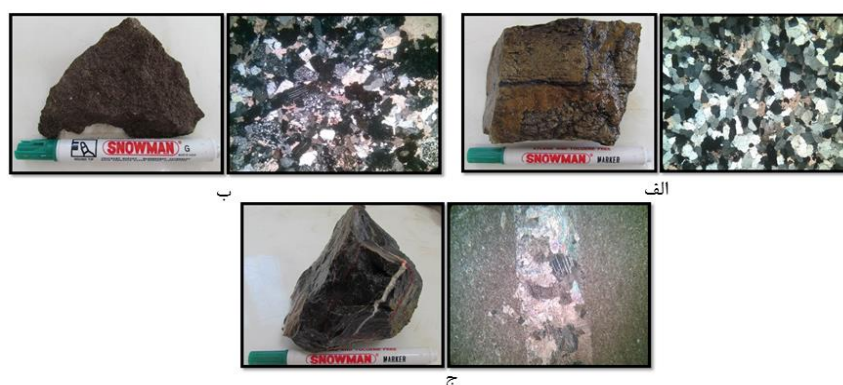
**آهک دولومیتی شده:** سنگ رسوبی شیمیایی کربناته، از جنس آهک میکرایتی است که دچار پدیده‌های تبلور مجدد و دولومیتی شدن شده است (شکل ۵ و).

**میکرواسپارایت:** نمونه دستی معرف میکرواسپارایت به رنگ خاکستری دیده می‌شود (شکل ۵ ز). تبلور مجدد در این نمونه موجب کاهش مقاومت آن در برابر انحلال و کاهش ورود عناصر از طریق آن به داخل آب‌های منطقه می‌شود.

**آهک میکرایتی:** سنگ رسوبی شیمیایی کربناته، از جنس آهک میکرایتی که توسط رگه‌های کربنات و سیلیس قطع شده است (شکل ۵ ح). با توجه به اینکه اغلب گل‌های کربناته از جنس آراگونیت هستند و به راحتی انحلال می‌یابند، در صورت وجود فلوتور در شبکه آن، مقادیر درخور توجهی از آن می‌تواند وارد آب‌های سطحی و زیرزمینی منطقه شود.

**بایومیکرایت:** این سنگ در نمونه دستی به رنگ خاکستری تیره به همراه رگه‌های شفاف از کلسیت اسپاری دیده می‌شود (شکل ۵ ت). با توجه به آهکی بودن این نمونه، در صورت وجود فلوتور در شبکه آن، می‌توان انتظار ورود مقادیر درخور توجهی از آن به داخل آب‌های منطقه مطالعه شده را داشت.

**آهک مرجانی:** نمونه دستی معرف آهک مرجانی رنگ کرم روشن دارد که یک سنگ رسوبی بیوشیمیایی و



شکل ۶. الف) تصویر میکروسکوپی و نمونه دستی مربوط به ماسه‌سنگ کوارتز آرنایتی با میزان فلئور  $0.5 \text{ ppm}$  (نمونه S2)؛ سمت راست: ماسه‌سنگ کوارتز آرنایتی با گردشگی ضعیف تا متوسط و جورشدگی خوب، سمت چپ: تصویر نمونه دستی ماسه‌سنگ کوارتز آرنایتی، (ب) تصویر میکروسکوپی و نمونه دستی مربوط به شیل کربناته (نمونه S13)؛ سمت راست: قطع شیل آهکی توسط رگه کربنات، سمت چپ: تصویر نمونه دستی شیل کربناته، (ج) تصویر میکروسکوپی و نمونه دستی مربوط به ماسه‌سنگ با سیمان کربناته با میزان فلئور  $1/7 \text{ ppm}$  (نمونه S42)؛ سمت راست: ماسه سنگ با سیمان کربناته، سمت چپ: تصویر نمونه دستی ماسه‌سنگ با سیمان کربناته. تصاویر میکروسکوپی در نور پلاریزه، بزرگنمایی  $25\times$  گرفته شده‌اند

(C) و شامل کانی‌های اصلی الیوین و پلاژیوکلاز کلسیک که در یک خمیره شیشه ای غنی از آهن قرار دارند (شکل D-7). در این نمونه نیز با توجه به مقادیر فراوان فلئور در سنگ‌های آذرین، درصد زیادی از عنصر فلئور می‌تواند به آب‌های منطقه راه یافته باشد.

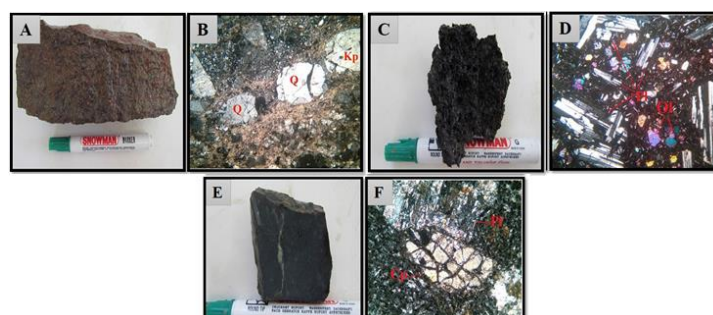
**آندزیت بازالتی:** تصویر نمونه دستی مربوط به آندزیت، یک سنگ آذرین خروجی است (شکل E-7) که کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن که در یک خمیره شیشه ای و میکروولیتیک قرار دارند (شکل F-7). این سنگ‌ها یکی از منابع اصلی فلئور برای ورود به آب‌های سطحی و زیرسطحی در منطقه بررسی شده هستند.

### ج) پتروگرافی سنگ‌های آذرین

در منطقه بررسی شده سه نوع سنگ آذرین شامل متاریولیت، الیوین بازالت و آندزیت بازالتی تشخیص داده شد.

**متاریولیت:** متاریولیت نوعی سنگ آذرین خروجی با ترکیب اسیدی (شکل A-7) و حاوی پتاسیم فلدسپار، کوارتز و مقادیری پلاژیوکلاز سدیک است (شکل B-22). درصد درخور توجهی از فلئور از طریق این سنگ‌ها در منطقه بررسی شده وارد آب‌های سطحی و زیرسطحی شده است، چرا که سنگ‌های آذرین یکی از میزبان‌های اصلی این عنصر در طبیعت هستند.

**الیوین بازالت:** سنگ آذرین خروجی بازیگ (شکل 7-)



شکل ۷. تصویر A: نمونه دستی متاریولیت با میزان فلئور  $3/6 \text{ ppm}$  در منطقه مطالعه شده (نمونه S7). تصویر B: بافت کاتاکلاستیک در متاریولیت و بلورهای خردشده کوارتز (Q) و پتاسیم فلدسپار (Kp)، نمونه S7، نور پلاریزه، بزرگنمایی  $25\times$ ؛ تصویر C: نمونه دستی الیوین بازالت با ظاهری خشن و تیره (نمونه S45). تصویر D: بافت هیالو میکروولیتی پورفیریک در الیوین بازالت با بلورهای پلاژیوکلاز (Pl) و الیوین (Ol)، نمونه S45، نور پلاریزه، بزرگنمایی  $25\times$ ؛ تصویر E: نمونه دستی آندزیت بازالت (نمونه S26). تصویر F: بافت هیالومیکروولیتی پورفیریک در آندزیت بازالتی با بلورهای پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن، نمونه S26، نور پلاریزه، بزرگنمایی  $25\times$

جدول ۲. نتایج آنالیز نمونه‌های خاک و سنگ منطقه مطالعاتی برای مقادیر فلوراید

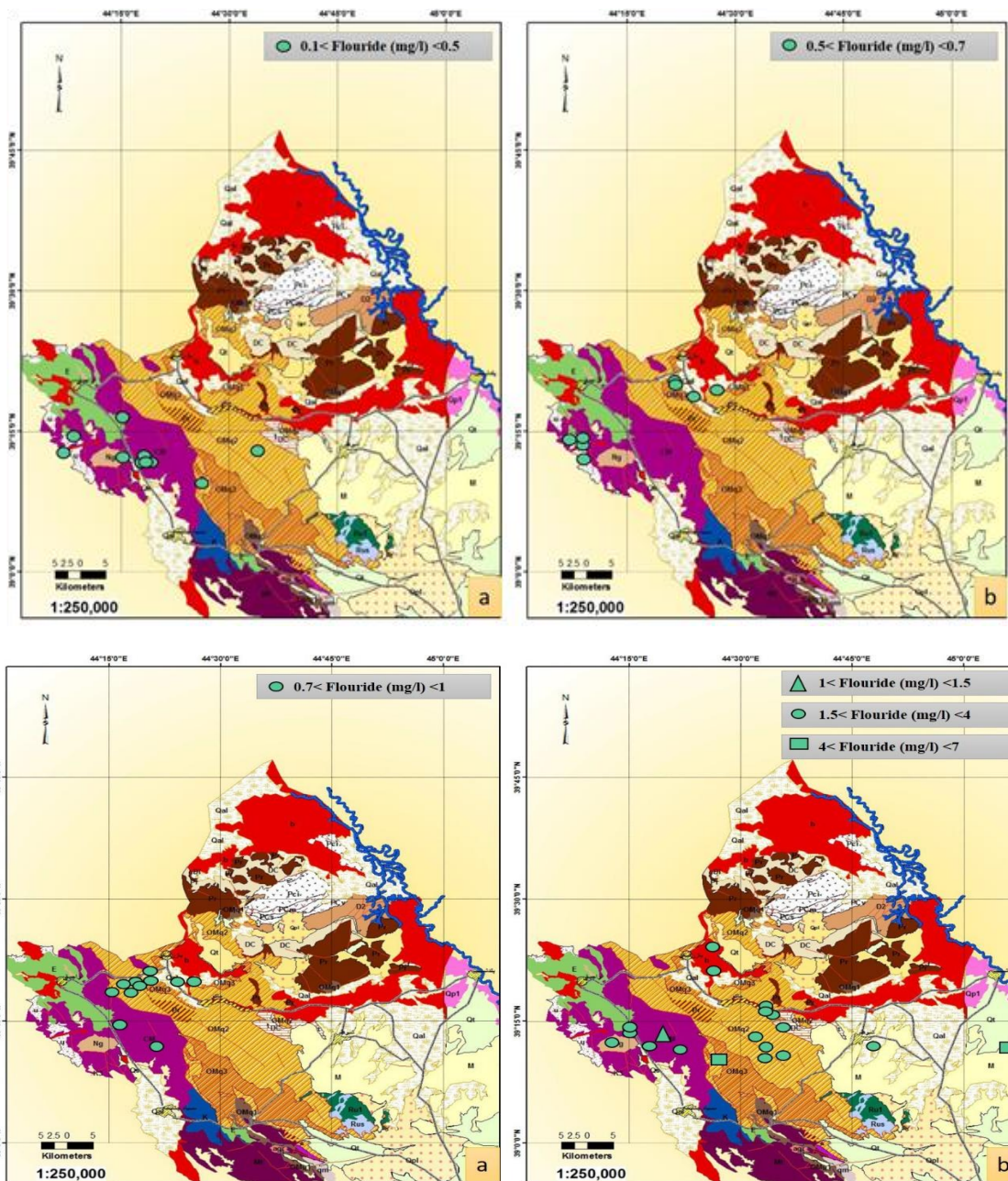
نام نمونه	UTM (X)	UTM (Y)	F (mg/l)	نام نمونه	UTM (X)	UTM (Y)	F (mg/l)
S1	۴۵۸۹۹۰	۴۳۶۵۸۳۴	۰/۱<	S20	۴۸۲۰۹۱	۴۳۵۹۱۲۴	۰/۹
S2	۴۶۱۲۳۰	۴۳۶۷۰۴۱	۰/۵	S21	۴۸۰۵۵۲	۴۳۵۹۱۷۵	۲/۱
S3	۴۶۱۹۶۱	۴۳۷۰۴۰۴	۰/۵	S22	۴۸۶۶۵۸	۴۳۵۳۳۴۳	۲/۶
S4	۴۶۲۷۱۸	۴۳۶۸۲۳۸	۰/۹	S23	۴۷۹۰۶۲	۴۳۵۰۹۶۷	۳/۶
S6	۴۶۵۷۲۱	۴۳۶۸۸۴۱	۱۹/۷	S24	۴۸۱۱۲۵	۴۳۵۲۴۶۵	۲/۴
S7	۴۶۸۸۰۲	۴۳۶۹۰۱۸	۳/۶	S26	۴۷۱۴۴۳	۴۳۵۳۴۸۲	۳/۹
S8	۴۷۰۵۶۱	۴۳۶۷۵۲۰	۲/۲	S27	۴۷۲۰۳۳	۴۳۵۴۹۶۹	۱/۳
S10	۴۷۴۰۴۵	۴۳۶۵۵۷۸	۱/۷	S28	۴۷۰۱۸۴	۴۳۵۵۷۹۶	۱/۵
S12	۴۷۷۴۴۵	۴۳۶۷۱۰۷	۰/۱<	S40	۴۶۷۹۶۸	۴۳۵۶۷۳۸	۴/۹
S14	۴۸۰۵۴۳	۴۳۶۸۱۵۵	۰/۱<	S41	۴۶۴۱۶۱	۴۳۵۷۷۱۳	۲/۸
S15	۴۸۳۲۴۵	۴۳۶۶۷۱۷	۱/۸	S42	۴۶۱۲۸۹	۴۳۵۷۴۱۸	۱/۷
S17	۴۸۴۵۳۰	۴۳۶۳۷۸۶	۱/۷	S43	۴۷۹۱۸۶	۴۳۹۰۳۶۸	۵/۶
S18	۴۸۶۲۸۴	۴۳۶۲۰۲۳	۰/۸	S44	۴۸۱۲۸۵	۴۳۸۸۹۰۱	۲/۲
S20	۴۸۸۶۵۵	۴۳۶۰۵۴۴	۰/۵	S46	۴۸۲۰۲۶	۴۳۸۴۹۲۶	۰/۱<
S21	۴۹۱۲۵۱	۴۳۶۶۰۷۳	۲/۷	S48	۴۸۵۹۵۶	۴۳۸۳۶۵۰	۳/۷
S22	۴۹۰۷۲۵	۴۳۶۸۴۷۰	۰/۵	S49	۴۸۸۴۰۹	۴۳۸۲۶۶۴	۳/۳
S24	۴۸۸۸۵۵	۴۳۷۱۷۲۲	۳/۱	S50	۴۹۰۳۰۳	۴۳۸۱۱۵۰	۱/۹
S25	۴۸۵۶۲۹	۴۳۷۴۰۷۰	۰/۶	S51	۴۹۱۲۹۳	۴۳۷۹۴۹۵	۳/۸
S26	۴۸۱۲۸۷	۴۳۷۴۴۷۳	۴/۴	S52	۴۹۳۷۹۱	۴۳۷۲۹۴۴	۲/۶
S28	۴۸۱۲۸۷	۴۳۵۶۴۱۹	۲/۹	S53	۴۹۳۵۸۲	۴۳۷۱۳۳۸	۰/۸
S29	۴۸۴۵۲۲	۴۳۵۷۵۸۳	۱/۳				

همخوانی دارد. بنابراین، مقداری از فلوراید می‌تواند طی تبادل آب و سنگ‌های بازالتی وارد منابع آب زیرزمینی (چاه و قنات) شود. همچنین، حضور کانی‌های آلومینوسیلیکاته مانند آلبیت در این سنگ‌ها ممکن است شرایط پایداری یون فلوراید در آب را فراهم کند [۲۶]. مسیر بازالت‌ها و رودخانه ساری‌سو و زنگمار بیشترین مقدار فلوراید رسوبات عهد حاضر و خاک اندازه‌گیری شده است [۶]. شست‌وشوی سطحی این رسوبات و خاک، می‌تواند سبب ورود فلوراید به منابع آب سطحی و زیرزمینی شود. مسیر رودخانه زنگمار از بازرگان تا پلدشت از سازندهای بازالتی می‌گذرد که در این قسمت‌ها میزان فلوراید به‌شدت افزایش یافته است، هرچند بازالت‌ها به عنوان یک سنگ ولکانیکی منبع فلوراید دور از ذهن نیستند [۶]. بررسی نقشه‌های زون‌بندی فلوراید مرتبط با سازندهای زمین‌شناسی منطقه مطالعه‌شده می‌توان چنین استنباط کرد که میزان فلوراید منابع آبی در واحدهای سنگی متنوع به صورت نامتقارن و متفاوت توزیع شده است. مقادیر فلوراید کمتر ۱ میلی‌گرم بر لیتر بیشتر در

رابطه مقدار فلوراید آب با سازندهای زمین‌شناسی منطقه برای تعیین ارتباط و مقایسه فلوراید منابع آبی مختلف با زمین‌شناسی منطقه، رابطه محیط‌های نمونه‌گیری با سازندها و رابطه مقادیر فلوراید با تشکیلات زمین‌شناسی، مقادیر فلوراید در دامنه‌های مختلف برحسب میلی‌گرم بر لیتر (۰/۱ - ۰/۵، ۰/۷ - ۱، ۱ - ۱/۵، ۱/۵ - ۴، ۴ - ۷) روی نقشه زمین‌شناسی منطقه منطبق شده است (شکل ۸ الف، ب، ج، د). به‌طور کلی، واحدهای زمین‌شناختی منطقه از ۸ گروه عمده تشکیل شده و ترتیب فراوانی متوسط مقدار نسبی فلوراید در واحدهای زمین‌شناختی منطقه به‌ترتیب از بازالت‌ها < رسوبات آبرفتی < رسوبات الیگومیوسن < فلیش‌های ائوسن < دگرگونی‌های پرکامبرین < آهک‌های دونین و پرمین است. با توجه به اینکه لایه آبرفت - بازالت، مهم‌ترین سیستم لایه آبدار مسیر پلدشت - بازرگان شناخته شده است. ماکزیمم مقدار فلوراید اندازه‌گیری شده در سنگ‌های بازالتی منطقه ppm ۸۶۷ است که با نتایج مطالعات علی‌پور و هم‌تیمی [۶]

عهد حاضر واحدهایی هستند که با منابع آبی با فلوراید کمتر و بیشتر از ۱/۵ میلی گرم بر لیتر همراه شده اند. کمپلکس های بازالتی و رسوبات سخت نشده عهد حاضر بیشترین میزان فلوراید را نشان می دهند.

نقشه زمین شناسی همراه با کمپلکس های دگرگونی، رسوبات شیلی، نهشته های کربناته تریاس فوقانی و کالروملازها است. کربنات های پرمین، رسوبات هم ارز سازند قرمز فوقانی و سازند قم، کمپلکس های بازالتی و رسوبات



شکل ۸. ترسیم مقادیر فلوراید روی نقشه زمین شناسی منطقه: الف) منابع آبی با دامنه فلوراید ۰/۱ - ۰/۵ میلی گرم بر لیتر، ب) منابع آبی با دامنه فلوراید ۰/۵ - ۰/۷ میلی گرم بر لیتر، راهنمای نقشه: سنگ های دگرگونی (Mt)، رسوبات کربناته هم ارز سازند روتنه (Pr)، کالروملازها (CM)، نهشته های کربناته و شیلی تریاس فوقانی (Ru)، سنگ های آتشفشانی مونزونیتی (Qm)، نهشته های کنگلومرا و ماسه سنگی ائوسن (E)، رسوبات هم ارز سازند قم و سازند قرمز فوقانی (M)، رسوبات شیلی ایلان قره (DC)، بازالت ها (b) و رسوبات عهد حاضر (Qt, Qpl, Qal)، ج) منابع آبی با دامنه فلوراید ۰/۷ - ۱ میلی گرم بر لیتر، د) منابع آبی با دامنه فلوراید ۱ - ۱/۵، ۱/۵ - ۴، ۴ - ۷ میلی گرم بر لیتر  
\* اقتباس با اندکی تغییرات از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰,۰۰۰ منطقه مطالعه شده

### بحث و نتیجه‌گیری

غلظت یون فلوراید در محدوده شمال غرب کشور به‌ویژه مناطق ماکو، بازرگان و پلدشت در استان آذربایجان غربی، منبع مهمی از غنی‌شدگی یون فلوراید در بدنه‌های آبی، خاک و سنگ است. نتایج نمونه‌گیری از نمونه‌های خاک و سنگ پیرامون نمونه‌گیری‌های منابع آبی، بیان‌کننده غلظت بسیار زیاد فلوراید در خاک و سنگ نسبت به منابع آبی است. به طوری که غلظت فلوراید در نمونه‌های آب از ۰/۱ تا ۵/۲۲ میلی‌گرم بر لیتر و در نمونه‌های خاک و سنگ بین ۰/۷ تا ۱۴۴/۱ ppm متغیر است که در محدوده عمومی بقیه بازالتهای جهان قرار می‌گیرد و به نظر می‌رسد که باقی پارامترها مانند وضعیت تکتونیکی منطقه، آکالینیته و هدایت الکتریکی آب بر افزایش غلظت فلوراید در منابع آب آن منطقه تأثیرگذار هستند که این موضوع با نتایج تحقیق قبلی در نقاط مختلف جهان برای آزادسازی مقادیر زیاد فلوراید در آب تا حدودی همخوانی دارد (کسیم و جانگ، ۲۰۰۵).

بیشترین آلودگی فلوراید در طول مسیر رودخانه زنگمار به‌ویژه در بخش مرکزی و امتداد غربی آن، در مسیر دشت پلدشت به دشت بازرگان، نزدیکی‌های پلدشت - ماکو و مرز غربی ایران با ترکیه در ناحیه ورودی رودخانه زنگمار مشاهده می‌شود. بیشترین میزان فلوراید در آب‌های سطحی نیز در طول رودخانه زنگمار در بخش غربی منطقه مطالعه شده حضور دارد. همچنین، بیشترین میزان فلوراید در چشمه‌ها ۲/۴۵ میلی‌گرم بر لیتر است و احتمال اینکه بخشی از منابع تأمین‌کننده آب رودخانه زنگمار از این چشمه‌ها تأمین شود، زیاد است. بنابراین، تأثیر مقدار فلوراید این چشمه‌ها بر مقدار فلوراید این بخش از رودخانه و افزایش آن تا حدود ۵/۲۲ میلی‌گرم بر لیتر درخور توجه است. بیشترین غلظت و آنومالی فلوراید در غالب منابع آبی شمال غرب کشور منطبق بر جریان رودخانه زنگمار به ساری‌سو است. از سوی دیگر، مطالعات میدانی انطباق گستره بیماری فلوروزیسیس دندانی در همین مسیر را تأیید می‌کند. با توجه به اینکه بخشی از منابع تأمین‌کننده آب رودخانه ساری‌سو و زنگمار و آب‌های زیرزمینی از بخش شرقی خاک ترکیه آغاز می‌شود و به دلیل گزارش بیماری فلوروزیسیس از بخش شرقی این کشور احتمال تأمین بخشی از فلوراید منابع آبی از خاک ترکیه وجود دارد. میزان افزایش فلوراید در ناحیه بازالتهای نشان می‌دهد احتمالاً طی واکنش بین سنگ‌های بازالتهای و آب،

هیدرولیز آلومینوسیلیکات‌هایی مانند آلبیت می‌تواند با تولید یون هیدروکسیل و سدیم در انحلال کانی‌های فلوریدار مانند فلوریت و آپاتیت مؤثر واقع می‌شود. یون هیدروکسیل در حضور دی‌اکسید کربن، یون بی‌کربنات را تولید کند، که در ترکیب با سدیم بی‌کربنات می‌تواند سبب انحلال کانی فلوریت و در نتیجه آزاد شدن فلوراید و رسوب هم‌زمان کلسیت شود. در عین حال، یون‌های هیدروکسیل در محلول قلیایی می‌تواند جانشین یون فلوراید در کانی‌های فلوریدار شود و به آزاد شدن فلوراید و افزایش غلظت فلوراید در محلول کمک کند.

### منابع

- [1]. Carrilla Rivera JJ, Cardona A, Edmunds WM. Use of abstraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosi Basin, Mexico. *J Hydro*. 2002; 261:2447.
- [2]. Jacks G, Bhattacharya P, Chaudhary V, Singh KP. Controls on the genesis of high-fluoride groundwaters in India. *J Appli geochemi*, 2005; 20:221228.
- [3]. Hammer K. Hydrochemistry and sources of fluoride in Silurian-Ordovician aquifer system, Estonia. Master science thesis, University of Tartu, Institute of Geology. 2006; 50. [Persian].
- [4]. Guo Q, Wang Y, Ma T, Ma R. Geochemical processes controlling the elevated fluoride concentration in ground waters of the Taiyuan Basin, Northern China. *J Geochemi Explor*. 2007; 93:112.
- [5]. Alipour S. Investigation of florid anomaly in water bodies of Maku vicinity and defining proper quality for drinking and other usage. Urmia University and West Azerbaijan water bureau research report. 2013; 205. [Persian].
- [6]. Alipour S, Hemmati A. Florid distribution in surface and underground water of NW Iran. In: National environmental modelling conference, Tehran University, Iran. 2012; 11. [Persian].
- [7]. Nadiri AA, Fijani E, Tsai FTC, Asghari Moghaddam A. Supervised committee machine with artificial intelligence for prediction of fluoride concentration. *J Hydro Infor*. 2013; 15 (4):1474-1490.
- [8]. Chitsazan N, Nadiri AA, Tsai FTC. Prediction and structural uncertainty analyses of artificial neural networks using hierarchical Bayesian model averaging. *J Hydro*. 2015; 528:52-62.

- [9]. Saxena VK, Ahmed S. Dissolution of fluoride in groundwater: a water-rock interaction study. *J Environ Geo*. 2001; 40:1084-1087.
- [10]. Asghari Moghaddam A. and Fijani E. Hydrogeologic framework of the Maku area basalts northwestern Iran. *J Hydrogeology*. 2009; 17(4): 949-959.
- [11]. World Health Organization, Fluoride in Drinking-water. First published, 22. , 2006.
- [12]. Bass ML, Maitre RL, Streckeisen A, Zanettin B. IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram. *J petro*. 1986; 27(3):745-750.
- [13]. James NP. Shallowing-upward sequences in carbonates, in Walker, R.G., ed., *Facies Models: Geological Association of Canada, Geoscience Canada, Reprint Series*. 1984; 1:213-228.
- [14]. Pettijohn FJ. *Sedimentary rocks* (No. 552.5 PET); 1949.
- [15]. Dunham, R. J., Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (ed.), *Classification of carbonate rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1962, p. 108-121.
- [16]. Folk RL. 1959. Practical petrographic classification of limestones. *J American Association of Petro Geo Bulletin*. 1959; 43:1-38.
- [17]. Aghanabati SA. *Geology of Iran*. Geological Survey of Iran; 2004. [Persian].
- [18]. Stocklin J. Structural history and tectonics of Iran, A review. *AAPG Bulletin*, 1968; 52(7):1229-1258.
- [19]. Yilmaz Y, Guner Y, Saroglu F. Geology of the quaternary volcanic centers of the east Anatolia. *J of Volcano and Geother Res*. 1998; 85(1-4):173-210.
- [20]. Masoumi R. Distribution and origin of fluorine anomaly in rock and soil samples and comparison with surface and ground waters of North West Azerbaijan, Iran. Master science thesis, University of Urmia, Institute of Geology. 2012; 141. [Persian].
- [21]. Alipour S. Investigation of florid anomaly in water bodies of North West Azerbaijan. 2012.
- [22]. Alipour S. Hemmati A. Distribution and origin of high fluorine anomaly in waters bodies of North West Azerbaijan, Iran. *J Natur Environ, Natur Recour*. 2016; 69. [Persian].
- [23]. Oruc N. Occurrence and problems of high fluoride waters in Turkey: an overview. *J Environ Geochemi and Heal* 2008; 30:315-323.
- [24]. Ncube EJ. The distribution of fluoride in South African groundwater and the impact there of on dental health. A dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for degree of Master of Science; 2002.
- [25]. Adabi, M.H., and Rao, C.P., Petrographic and geochemical evidence for original aragonitic mineralogy of Upper Jurassic carbonate (Mozduran Formation) Sarakhs area, Iran. *J Sedi Geo*, 1991. v. 72, p. 253-267.
- [26]. Asghari Moghaddam, A., Jomeiri, R., Mohamadi, A., Source of high fluoride in groundwater of basaltic lavas of Bazargan-Poldasht Plains and its ill effects on human health (in Persian). *J Environ Stud, Univ Tehran*. 2007; 33:25-32.