

زمین‌شناسی، کانه‌زایی و ژنز کانسار سلسنتین مادآباد، جنوب زنجان

مهسا نوری^۱، حسین کوهستانی^{۲*}، قاسم نباتیان^۲، میرعلی اصغر مختاری^۲ و افشین زهدی^۳

۱. کارشناس ارشد زمین‌شناسی اقتصادی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳. استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۳۰

چکیده

واحدهای سنگی در کانسار سلسنتین مادآباد شامل سنگ‌های آهکی متوسط تا ضخیم لایه و توده‌ای با میان‌لایه‌های سنگ آهک مارنی و مارن سازند قم به سن میوسن پیشین می‌باشند. کانه‌زایی در کانسار مادآباد به صورت عدسی شکل درون واحدهای کربناته عضو f سازند قم رخ داده و لایه‌بندی آنها را قطع کرده است. کانه‌زایی در کانسار مادآباد شامل سه مرحله است. مرحله اول با تشکیل کلسیت طی فرایندهای هم‌زمان با رسوب‌گذاری تا هم‌زمان با دیاژنز مشخص می‌شود. مرحله دوم مربوط به فعالیت‌های گرمایی است که به ترتیب با تشکیل سلسنتین‌های توده‌ای ریزبلور و دانه‌شکری نسل اول، رگه و رگچه‌های سلسنتین درشت‌بلور نسل دوم همراه با اندکی استرانسیانیت و باریت، سلسنتین‌های درشت‌بلور شکل دار نسل سوم با بافت پُرکننده فضاهای خالی و در نهایت تشکیل رگه و رگچه‌های تأخیری کوارتز-کلسیتی همراه می‌باشد. مرحله سوم مربوط به فرایندهای برون‌زاد است. دگرسانی‌ها شامل دولومیتی، کلسیتی و سیلیسی می‌باشند. سلسنتین همراه با اندکی استرانسیانیت و باریت، کانه‌های معدنی و کلسیت، دولومیت، کوارتز و اکسیدها-هیدروکسیدهای آهن، کانی‌های باطله در مادآباد هستند. بافت ماده معدنی از نوع رگه-رگچه‌ای، پُرکننده فضاهای خالی، دروزی، پرشی و کاتاکلاستیک است. براساس نتایج مطالعات ریزدماسنجی، درجه شوری میانبارهای سیال دو فازی غنی از مایع در سلسنتین‌های نسل دوم بین شش تا ۱۶ (میانگین ۱۰/۶) درصد وزنی معادل نمک طعام و دمای همگن‌شدن آنها از ۲۴۸ تا ۳۶۵ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۷۸) متغیر است. این مطالعات بیانگر حداقل عمق تشکیل حدود ۵۱۰ متر برای کانسار مادآباد است. استرانسیم از واحدهای تبخیری موجود در بخش‌های مارنی سازند قم و واحدهای آتشفشانی سازند کرج منشأ گرفته است. ویژگی‌های کانسار مادآباد با کانسارهای سلسنتین جانشینی اپی‌ژنتیک شباهت دارد.

واژه‌های کلیدی: اپی‌ژنتیک، زنجان، سازند قم، کانه‌زایی سلسنتین، مادآباد.

مقدمه

(2009; Markhand et al., 2020). این کانه‌زایی‌ها اغلب

کوچک است و کانسارهای بزرگ با ذخیره میلیون تنی بیشتر همراه با توالی‌های کربناتی-تبخیری در محیط‌های ساحلی دریایی تشکیل می‌شوند (Hanor, 2004; Warren, 2006; Forjanes et al., 2020a, b).

کانه‌زایی‌های سلسنتین همگی با سنگ‌های رسوبی آهکی و مارنی و گاه در ارتباط با ژئیس و دیگر رسوبات تبخیری تشکیل می‌شوند (González-Sánchez et al., ۲۰۰۶).

* نویسنده مرتبط: kouhestani@znu.ac.ir

در آزمایشگاه میانبارهای سیال مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران در کرج مطالعه شد. مطالعات ریزدماسنجی با استفاده از دستگاه Linkam THMS600 متصل به میکروسکوپ ZEISS و مجهز به کنترل‌کننده حرارتی TM94 و سردکننده LNP با دامنه حرارتی ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد انجام شد. کالیبراسیون دستگاه در مرحله گرمایش با دقت ± 0.6 درجه با نیترات سزیم با نقطه ذوب ۴۱۴ درجه سانتی‌گراد و در مرحله سرمایش با دقت ± 0.2 درجه سانتی‌گراد با ماده استاندارد آن‌هگزان با نقطه ذوب ۹۴/۳- درجه سانتی‌گراد انجام شد. میزان شوری میانبارها به صورت معادل درصد وزنی نمک طعام و از طریق دمای ذوب آخرین قطعه یخ با استفاده از فرمول ارائه شده توسط بودنار (Bodnar 1993) محاسبه شده است.

زمین‌شناسی منطقه مادآباد

در تقسیمات پهنه‌های رسوبی-ساختاری ایران (Alavi, 1991)، کانسار مادآباد در پهنه ایران مرکزی واقع شده است (شکل ۱-الف). در مقیاس ناحیه‌ای و براساس نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰۰ خدابنده-سلطانیه (علوی نائینی، ۱۳۷۲) و حلب (شهیدی و بهارفیروزی، ۱۳۸۰)، واحدهای سنگی رخنمون‌یافته در منطقه مادآباد به ترتیب از قدیم به جدید شامل واحدهای شیلی و آهکی کرتاسه، واحدهای توفی و گدازه‌های ائوسن (معادل سازند کرج)، واحدهای آواری سازند قرمز زبرین، سنگ آهک‌های فسیل‌دار سازند قم و واحدهای ماسه‌سنگی و مارنی سازند قرمز بالایی است. در مقیاس محلی، واحدهای سنگی موجود در گستره کانسار مادآباد به بخش f سازند قم (Furrer and Soder, 1955) به سن میوسن پیشین تعلق داشته و از قدیم به جدید شامل واحدهای OM^m، OM^l و OM^m می‌باشد (شکل‌های ۱-ب و ۲-الف تا ث). روند عمومی لایه‌بندی در این واحدها، شمال تا شمال‌غرب-جنوب تا جنوب‌شرق با شیب به سمت غرب-جنوب‌غرب است و به صورت هم‌شیب یکدیگر را می‌پوشانند (شکل ۱-ب). واحد OM^m شامل مارن‌های ژپس‌دار به رنگ قرمز تا قهوه‌ای است که اغلب در بخش‌های مرکزی، جنوب و جنوب‌غربی

ایران همراه با توالی‌های تبخیری سازند کند با سن ائوسن در البرز مرکزی (بازرگانی گیلانی و ربانی، ۱۳۸۴)، سازند قم با سن الیگومیوسن در ایران مرکزی (کریمی و راستاد، ۱۳۷۸؛ Bazargani-Guilani and Nekouvaght Tak, 2008) و سازند آسماری به سن الیگومیوسن در زاگرس چین‌خورده (رستمی پایدار و همکاران، ۱۳۹۵؛ Ehya et al., 2017؛ Pourkaseb et al., 2013) تشکیل شده‌اند. سلسنتین در این کانسارها از مرحله هم‌زمان با رسوب‌گذاری تا دیاژنز تشکیل شده و تیپ آن از نوع رسوبی دیاژنتیک معرفی شده است.

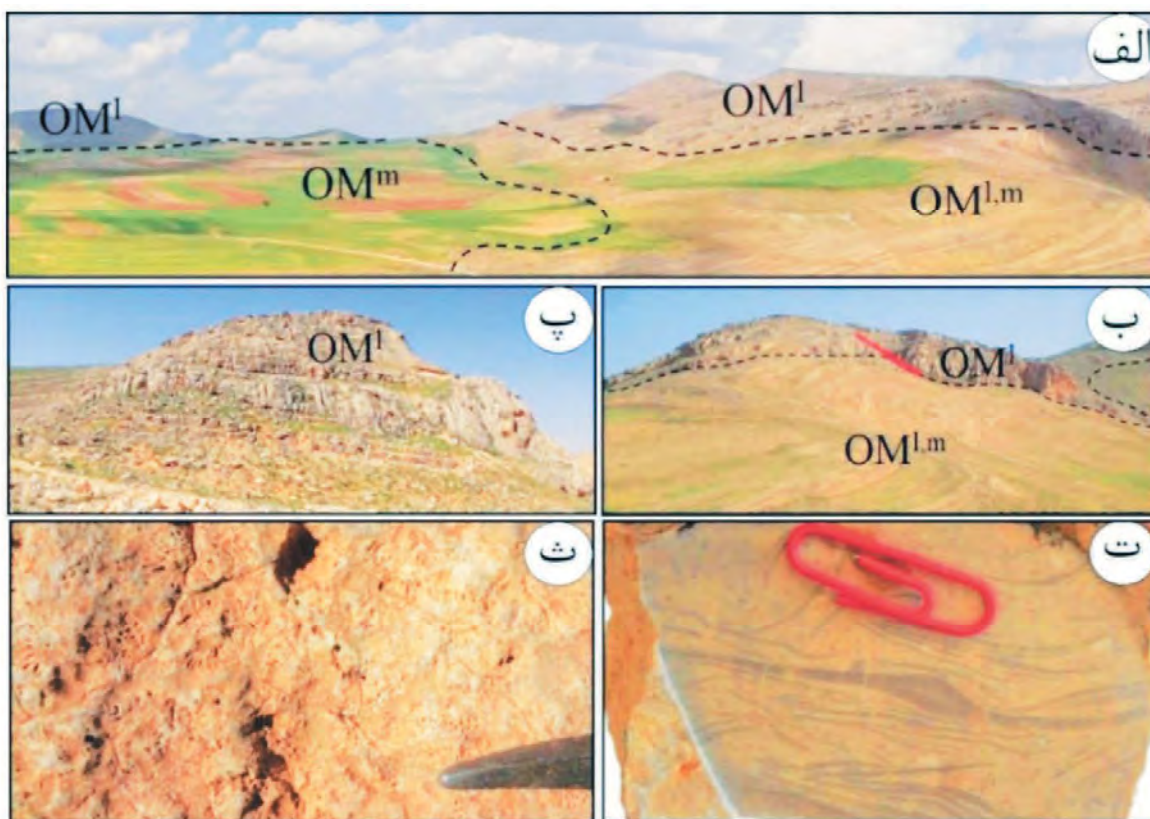
کانسار سلسنتین مادآباد اولین گزارش از وجود ذخایر سلسنتین در استان زنجان با سنگ میزبان کربناته (سازند قم) است که در فاصله حدود ۱۰۰ کیلومتری جنوب زنجان قرار دارد. علی‌رغم فعالیت‌های اکتشافی و استخراجی در این کانسار (شرکت فارس جم ستون، ۱۳۹۲)، تاکنون مطالعه علمی دقیقی بر روی آن انجام نشده است. در این پژوهش، ویژگی‌های زمین‌شناسی و کانه‌زایی در کانسار مادآباد بررسی شده و تیپ و خاستگاه آن با توجه به داده‌های فعلی تعیین شده است. با توجه به گسترش زیاد واحدهای آهکی سازند قم در کشور، نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند اطلاعات سودمندی برای درک منشاء و شناخت عوامل کنترل‌کننده این نوع از کانه‌زایی‌های سلسنتین ارائه داده و برای اکتشاف ذخایر جدید سودمند باشد.

روش مطالعه

ابتدا طی مطالعات صحرایی، نقشه زمین‌شناسی با مقیاس ۱:۵۰۰۰ از منطقه تهیه شد. طی این مطالعات، امتداد، شیب، ضخامت، رنگ، سنگ‌شناسی، مرز بین لایه‌ها و اندازه ذرات لایه‌های کربناته، اندازه‌گیری و وجود و یا نبود کانه‌زایی سلسنتین در آنها بررسی شد. سپس، تعداد ۳۰ مقطع نازک و ۲۰ مقطع نازک-صیقلی برای مطالعات سنگ‌شناسی و کانه‌نگاری تهیه شد. در ادامه، برای تعیین ویژگی‌های دما، فشار و شوری سیالات مسئول کانه‌زایی و دگرسانی، تعداد سه مقطع دوبرصیقل به ضخامت ۱۵۰ میکرون از سلسنتین‌های شفاف نسل‌های اول و دوم تهیه و

رنگ دارای قطعات فسیلی فراوان مرجان (شکل ۲-ث) با میان‌لایه‌های آهک مارنی تشکیل شده است (شکل ۲-الف تا پ). واحد OM^I بیشتر در بخش‌های شمال شرق و شمال غرب تا غرب منطقه گسترش دارد و میزبان کانه‌زایی سلسنتین منطقه است. به دلیل پوشش بخش زیاد منطقه مادآباد توسط زمین‌های کشاورزی، شناسایی ساختارهای گسلی در این گستره مشکل است. با این وجود، تعدادی گسل نرمال با راستای شمال شرق-جنوب غرب، توالی رسوبی سازند قم را قطع کرده‌اند (شکل ۱-ب). شاخص‌ترین گسل در این منطقه، گسل نرمال موجود در منطقه کانه‌زایی سلسنتین با روند $N40E$ و شیب حدود 35° درجه به سمت شمال غرب می‌باشد. کانه‌زایی سلسنتین مادآباد در امتداد این گسل متمرکز شده است. دگرسانی دولومیتی همراه با آغشتگی به هیدروکسیدهای آهن در سنگ‌های آهکی اطراف کانه‌زایی و مسیر این گسل قابل مشاهده است.

گستره گسترش دارند (شکل‌های ۱-ب و ۲-الف). مارن‌ها، نازک تا متوسط‌لایه است و در میان‌لایه‌های آن، ژیبس به صورت محلی مشاهده می‌شود. این واحد در منطقه مادآباد توسط مزارع و کشت‌زارها پوشیده شده است. واحد $OM^{I,m}$ به طور عمده در بخش‌های شرقی منطقه گسترش دارد. این واحد از آهک‌های نازک تا متوسط‌لایه کرم‌رنگ با میان‌لایه‌های مارنی تشکیل شده است (شکل ۲-الف و ب). سنگ آهک‌ها بیشتر متوسط‌لایه می‌باشند و لایه‌های مارنی از نظر طبقه‌بندی نازک‌لایه هستند. فرامینفرهای بنتیک درشت مانند لپیدوسیکیلینده‌های کشیده (یولپیدینا) در بخش‌های آهکی این واحد به وفور یافت می‌شود. اندازه این فسیل‌ها گاه تا هشت سانتی‌متر نیز رسیده و با چشم غیرمسلح نیز قابل رؤیت می‌باشند (شکل ۲-ت). واحد OM^I بالاترین بخش توالی سنگی موجود در کانسار مادآباد است. این واحد از آهک‌های ضخیم‌لایه تا توده‌ای خاکستری

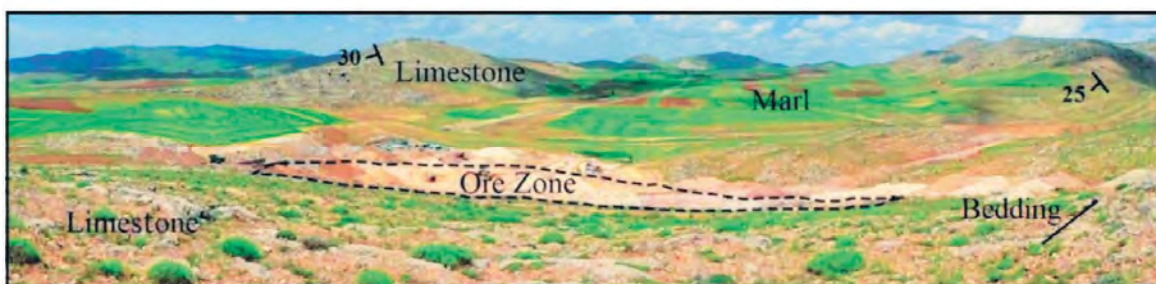


شکل ۲. الف) نمای کلی از تناوب لایه‌های سنگ آهک، آهک مارنی و مارن سازند قم در منطقه مادآباد (دید به سمت شمال غرب)، ب) نمای از سنگ آهک‌های نازک تا متوسط‌لایه کرم‌رنگ با میان‌لایه‌های مارنی واحد $OM^{I,m}$ که به صورت هم‌شیب توسط سنگ آهک‌های ضخیم‌لایه تا توده‌ای واحد OM^I پوشیده شده‌اند (دید به سمت شمال)، پ) نمای از سنگ آهک‌های ضخیم‌لایه تا توده‌ای واحد OM^I (دید به سمت شمال)، ت) نمای نزدیک از فسیل‌های لپیدوسیکیلینده‌های کشیده (یولپیدینا) در سنگ آهک‌های متوسط‌لایه واحد $OM^{I,m}$ ، ث) نمای نزدیک از قطعات فسیلی مرجان در آهک‌های ضخیم‌لایه تا توده‌ای واحد OM^I

کانه‌زایی و دگرسانی

کرده است (شکل ۳). با توجه به پیمایش‌های عرضی عمود بر روند توالی کربناته سازند قم، کان‌زایی سلسنتین در کانسار مادآباد از نوع چینه‌کران است و از نظر چینه‌شناسی به سنگ آهک‌های ضخیم‌لایه واحد OMI محدود می‌شود. ذخیره کانسار مادآباد حدود ۸۵۰۰۰ تن با عیار متوسط ۸۸ درصد SrO تعیین شده است (شرکت پارس جم ستون، ۱۳۹۲).

کانه‌زایی سلسنتین در کانسار مادآباد به صورت عدسی شکل درون واحدهای کربناته سازند قم رخ داده است (شکل ۳). عدسی سلسنتین حدود ۳۶۰ متر درازا و ۶۰ متر پهنا دارد و روند عمومی آن N۴۰E با شیب حدود ۲۵ درجه به سمت شمال غرب است. این عدسی، روند عمومی لایه‌بندی (شمال غرب-جنوب شرق) واحدهای کربناته میزبان را قطع



شکل ۳. نمایی از رخمون کان‌زایی سلسنتین به صورت عدسی شکل درون واحدهای سنگ آهکی سازند قم (دید به سمت شمال غرب)

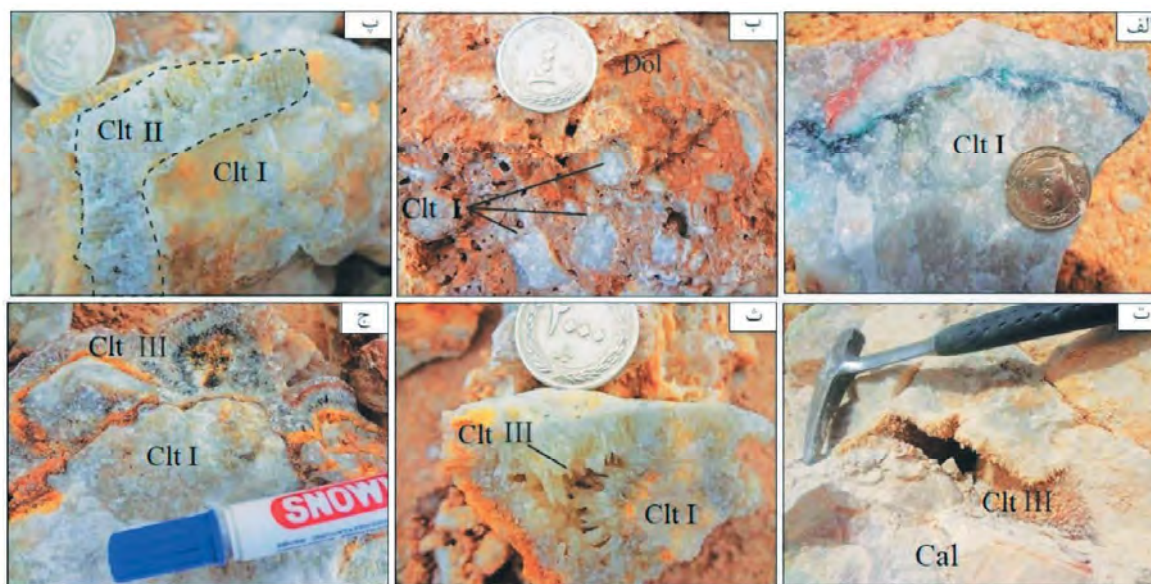
کانه‌زایی گرمابی با فراوانی سلسنتین‌های درشت‌بلور (تا چند میلی‌متر) نسل دوم همراه با مقادیر کمی استرانسیانیت و باریت با بافت‌های رگه-رگچه‌ای، کاتاکلاستیک و بادبزی مشخص می‌شود که فاز اول کان‌زایی گرمابی را قطع کرده است (شکل ۵-ب). ستبرای رگه-رگچه‌های سلسنتین این فاز از یک تا ۱۰ سانتی‌متر متغیر است. باریت همواره به صورت ادخال‌های ریز درون سلسنتین دیده می‌شود. فاز سوم کان‌زایی گرمابی با تشکیل سلسنتین‌های درشت و شکل‌دار نسل سوم با بافت‌های پُرکننده فضاهای خالی، شعاعی یا دروزی و کاکلی در حفرات ژئودمانند و درون شکستگی‌های فازهای قبلی کان‌زایی گرمابی مشخص می‌شود (شکل ۵-ت تا ج). ژئودها اندازه‌ای از چند میلی‌متر تا چندین سانتی‌متر داشته و همواره توسط بلورهای سلسنتین بی‌رنگ تا سفید شیری و گاهی آبی خاکستری پُر شده‌اند. رشد شعاعی بلورهای درشت سلسنتین در این ژئودها منجر به تشکیل ساختارهای دروزی (تجمعات بلوری ستاره‌ای یا گل‌برگی) شده است (شکل ۵-ث). در بخش‌های دارای بافت کاکلی و دروزی، برخی بلورهای درشت سلسنتین نسل سوم، دارای هسته‌ای از بلورهای سلسنتین نسل اول و یا دوم هستند که گاهی دارای بقایایی از سنگ کربناته میزبان نیز می‌باشند

براساس مطالعات صحرایی و میکروسکوپی انجام‌شده، سه مرحله کان‌زایی در کانسار مادآباد قابل تفکیک است (شکل ۴). مرحله اول با تشکیل کلسیت طی فرایندهای هم‌زمان با رسوب‌گذاری تا هم‌زمان با دیاژنز مشخص می‌شود. هیچ‌گونه شاهد صحرایی و میکروسکوپی دال بر تشکیل ماده معدنی در این مرحله وجود ندارد. مرحله دوم (مرحله گرمابی) اصلی‌ترین مرحله کان‌زایی در کانسار مادآباد است. با توجه به ترکیب کانی‌شناسی، ساخت و بافت و ارتباط قطع‌کنندگی، کان‌زایی گرمابی را می‌توان به چهار فاز تقسیم‌بندی کرد. فاز اول کان‌زایی گرمابی شامل بلورهای ریز (تا چند ده میکرون) و دانه شکری سلسنتین بی‌رنگ تا سفید نسل اول با بافت توده‌ای و پرشی است (شکل ۵-الف). تشکیل سلسنتین‌های دانه‌ریز این فاز می‌تواند نتیجه تبلور از سیالات فوق اشباع (دارای صدها میلی‌گرم در لیتر) استرانسیم باشد (Kushnir, 1986). در بخش‌های دارای بافت پرشی، قطعاتی از سنگ‌های کربناته میزبان درون سلسنتین‌های توده‌ای این فاز قابل مشاهده است. این قطعات پرشی همواره به موازات عدسی سلسنتین دیده شده و در آنها، قطعات پرشی شده آهک دولومیتی با بلورهای سلسنتین جانشین شده‌اند (شکل ۵-ب). فاز دوم

(شکل ۵-ث و ج). فاز چهارم کانه‌زایی گرمایی با تشکیل رگه و رگچه‌های تأخیری کوارتز و کلسیت همراه می‌باشد. مرحله سوم کانه‌زایی در کانسار مادآباد مربوط به فرایندهای برونزاد است که با تشکیل رگه و رگچه‌های اکسیدی و هیدروکسیدی آهن ثانویه مشخص می‌شود که منجر به تشکیل بافت شبه ریتمیک در ماده معدنی شده است.

		Syn-deposition— Syn-diagenesis Stage	Hydrothermal Stage				Supergene Stage
			Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	
Ore	Celestite		Clt I	Clt II	Clt III		
	Strontianite						
	Barite						
Gangue	Calcite						
	Dolomite						
	Quartz						
	Fe oxide-hydroxide						
Textures	Massive						
	Vein-veinlet						
	Open space filling						
	Brecciated						
	Cataclastic						
	Cockade						
	Semi-zebra						

شکل ۴. توالی پاراژنتیک کانی‌ها در کانسار مادآباد

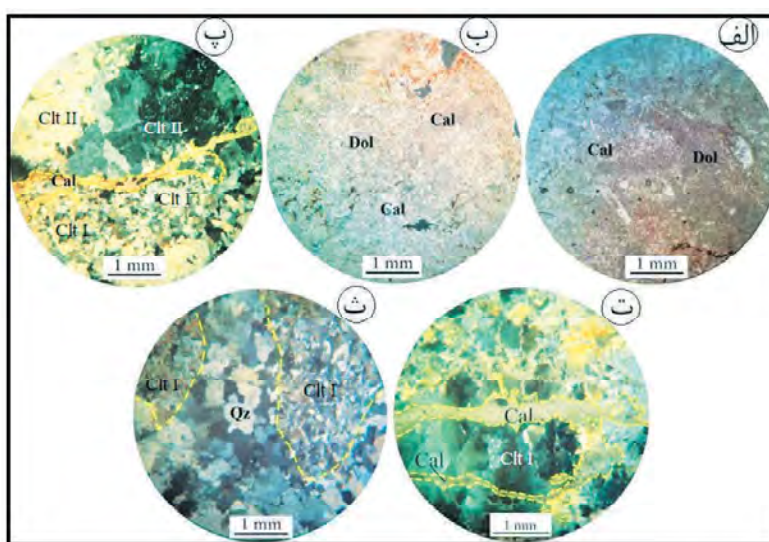


شکل ۵. شکل‌های صحرایی و نمونه دستی از انواع سلسنتین در کانسار مادآباد، الف) سلسنتین‌های ریزبلور و دانه شکر نسل اول با بافت توده‌ای، ب) سلسنتین نسل اول با بافت پرشی، پ) سلسنتین‌های درشت نسل دوم با بافت رگه‌ای که سلسنتین‌های توده‌ای نسل اول را قطع کرده‌اند، ت و ث) رشد سلسنتین‌های درشت با بافت شعاعی در حفرات سنگ میزبان و سلسنتین‌های نسل اول، ج) رشد سلسنتین‌های درشت نسل سوم با بافت کاکلی بر روی سلسنتین‌های ریزبلور نسل اول. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از (Whitney and Evans (2010 اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Clt: سلسنتین، Dol: دولومیت)

براساس مطالعات صحرایی و آزمایشگاهی، دگرسانی‌های گرمایی در کانسار مادآباد شامل دگرسانی‌های دولومیتی، کلسیتی و سیلیسی می‌باشند. دولومیتی‌شدن، اصلی‌ترین دگرسانی در کانسار مادآباد است که ارتباط مستقیمی با کانه‌زایی سلسنتین دارد. این دگرسانی سبب گسترش فضای خالی و افزایش تخلخل شده و در نتیجه بستر مناسبی را

رگچه‌های کلسیتی تأخیری با سترهای مختلف از میلی‌متر تا چندین سانتی‌متر دیده می‌شوند (شکل ۶-پ و ت). در مقاطع میکروسکوپی، بلورهای کلسیت به صورت خودشکل تا بی‌شکل و در ابعاد یک میلی‌متر تا حدود سه میلی‌متر دیده می‌شوند. دگرسانی سیلیسی به صورت محدود و با تشکیل رگه-رگچه‌های سیلیسی تأخیری و یا سیلیسی شدن بخش‌هایی از سنگ دیواره (میزبان کانه‌زایی) قابل مشاهده است (شکل ۶-ث). در مقاطع میکروسکوپی، کوارتزها به صورت بلورهای بی‌شکل و ریزبلور قابل مشاهده می‌باشند.

برای ورود و جانشینی سیال‌های گرمایی کانه‌دار بعدی فراهم می‌کند (Hitzman et al., 2002; Wilkinson et al., 2005). گسترش این دگرسانی در کانسار مادآباد محدود به بخش‌های کانه‌دار است و با دور شدن از عدسی سلسستین، از شدت دگرسانی دولومیتی کاسته می‌شود. دگرسانی دولومیتی به صورت تشکیل بلورهای ریز، نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار دولومیت مشخص شده و با رنگ هوازده قرمز تا قهوه‌ای و رنگ سطح تازه خاکستری روشن قابل شناسایی است (شکل ۶-الف و ب). دگرسانی کلسیتی به صورت



شکل ۶. شکل‌های میکروسکوپی (نور عبوری پلاریزه متقاطع، XPL) از انواع دگرسانی گرمایی در کانسار مادآباد، الف و ب) دگرسانی دولومیتی که در نتیجه آن بخشی از بافت اولیه سنگ از بین رفته است، پ و ت) دگرسانی کلسیتی به صورت رگچه‌های کلسیتی تأخیری قطع‌کننده کانه‌زایی سلسستین، ث) دگرسانی سیلیسی به صورت رگچه‌های کوارتزی تأخیری قطع‌کننده کانه‌زایی سلسستین. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از Whitney and Evans (2010) اقتباس شده است (Cal: کلسیت، Clt: سلسستین، Dol: دولومیت، Qtz: کوارتز)

بحث

کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانسنگ

براساس مطالعات ساختی و بافتی، سلسستین‌های موجود در بخش‌های کانه‌دار را می‌توان به سه نسل تفکیک کرد. سلسستین‌های نسل اول به صورت بلورهای ریز و دانه شکری بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار با اندازه یک تا چند میلی‌متر دیده می‌شوند. سلسستین‌های این نسل در زیر میکروسکوپ به صورت مجموعه‌هایی از بلورهای دانه‌ای و موزاییکی در هم قفل شده دیده می‌شوند (شکل ۷-الف). مرزهای بین بلوری سلسستین، بیشتر صاف تا کمی انحنا دار و بدون جهت‌یافتگی ترجیحی در متن کانسنگ است. این دانه‌ها اغلب به صورت مجموعه‌ای از بلورهای هم‌اندازه و متراکم در کنار یکدیگر می‌باشند. در برخی از مقاطع، حالت جریان ناشی از فشارهای

براساس مطالعات میکروسکوپی انجام شده، سلسستین کانی اصلی ماده معدنی در کانسار مادآباد است که با اندکی استرانسیانیت و باریت همراهی می‌شود. کلسیت، دولومیت، کوارتز و اکسیدها-هیدروکسیدهای آهن، کانی‌های باطله در این کانسار هستند. براساس این مطالعات، ساخت و بافت کانسنگ در کانسار مادآباد متنوع بوده و شامل توده‌ای، عدسی، رگه-رگچه‌ای، پُرکننده فضاهای خالی، دانه شکری، بادبزنی، کاکلی، شعاعی یا دروزی، شبه ریتمیک، برشی و کاتاکلاستیک می‌باشند.

موضوع احتمال جانشینی کلسیت توسط سلسنتین را تأیید می‌کند. دولومیت اغلب به صورت بلورهای ریز تا متوسط، نیمه‌شکل دار تا شکل دار دیده می‌شود و در اثر دگرسانی دولومیتی شدن جانشین کلسیت شده است (شکل ۶-الف و ب). این کانی‌ها با رنگ هوازده قرمز تا قهوه‌ای قابل مشاهده می‌باشند. کوارتز با گسترش محدود و به صورت رگچه‌ای در کانسار مادآباد حضور دارد (شکل ۶-ث). در مقاطع نازک، کوارتز به صورت بلورهای نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل با اندازه‌های مختلف دیده می‌شود. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن به صورت رگچه‌ای دیده شده و همواره ماده معدنی را قطع کرده‌اند. در بخش شمال غربی عدسی کانه‌زایی، حضور رگچه‌های فراوان اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن سبب تشکیل ساخت شبه ریتمیک در ماده معدنی شده است (شکل ۷-ذ و ر).

مطالعات میانبارهای سیال

پتروگرافی

براساس مطالعات میکروسکوپی، میانبارهای سیال در کانسار مادآباد از نوع اولیه، ثانویه و ثانویه کاذب هستند. میانبارهای سیال اولیه موازی با خطوط رشد بلوری و همچنین پراکنده در متن سلسنتین‌های نسل اول و دوم دیده می‌شوند. این میانبارها براساس تعداد فاز به انواع دو فاز غنی از مایع (LV)، تک فاز غنی از مایع (L) و تک فاز غنی از گاز (V) قابل تفکیک می‌باشند (شکل ۸). در این بین، میانبارهای نوع LV، فراوان‌ترین میانبارهای سیال می‌باشند. پدیده باریک‌شدگی در برخی از میانبارهای سیال دیده می‌شود. مطالعات ریزدماسنجی بر روی میانبارهایی انجام شد که شواهد باریک‌شدگی نداشته و دارای معیارهای لازم به‌عنوان میانبار اولیه (Roedder, 1984) بودند. این میانبارها اغلب اندازه‌ای بین شش تا ۱۸ میکرون داشته و به شکل‌های چندوجهی نامنظم، کشیده و گاهی کروی مشاهده می‌شوند.

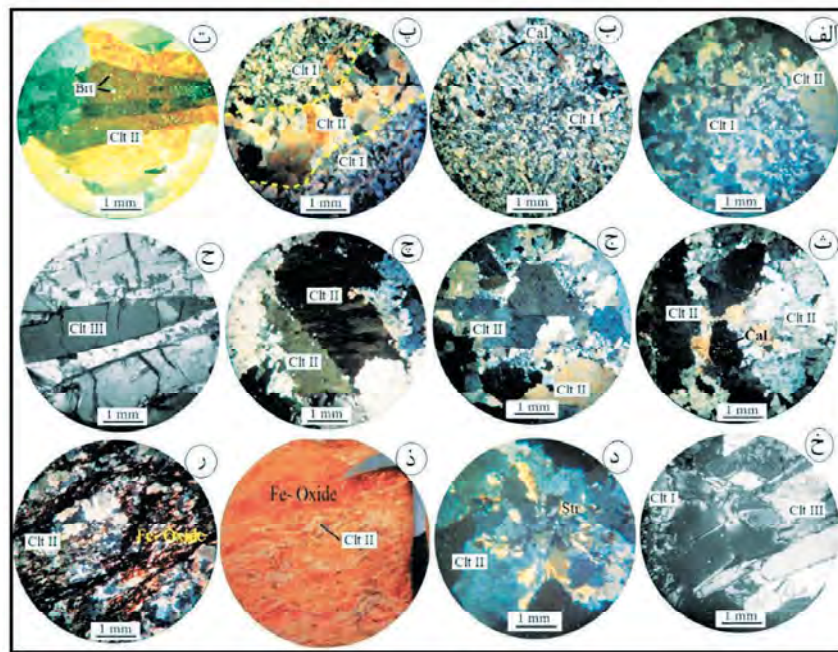
داده‌های ریزدماسنجی

در این پژوهش، تعداد ۲۲ میانبار سیال اولیه نوع LV مورد مطالعه ریزدماسنجی قرار گرفت (جدول ۱). با توجه

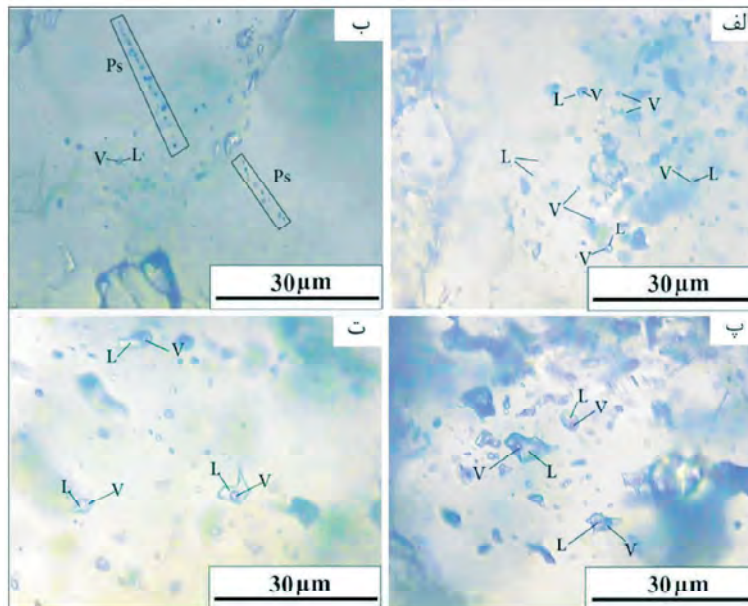
تکتونیکی در بلورهای سلسنتین نسل اول قابل مشاهده است (شکل ۷-ب). سلسنتین‌های نسل دوم به صورت بلورهای درشت بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار و گاه شکل دار با اندازه تا یک سانتی‌متر در رگه‌ها و رگچه‌های سلسنتین حضور دارند (شکل ۷-پ). بلورهای شکل دار سلسنتین به صورت سوزنی همراه با بلورهای کلسیت یا دولومیت، تجمعات شعاعی را به نمایش می‌گذارند. در زیر میکروسکوپ، تجمع بلورهای شعاعی منجر به تشکیل سلسنتین دسته جارویی شده است و دارای ادخال‌های فراوانی از باریت می‌باشند (شکل ۷-ت). برخی از بلورهای درشت سلسنتین نسل دوم دارای بقایایی از بلورهای کلسیت به صورت ادخال هستند (شکل ۷-ث). در برخی از نمونه‌ها، در اثر فشارهای تکتونیکی، بلورهای درشت سلسنتین نسل دوم از حاشیه‌ها خرد شده و بافت کاتا کلاستیک نشان می‌دهند (شکل ۷-ج). خاموشی موجی مشاهده شده در برخی از بلورهای سلسنتین این نسل نیز می‌تواند حاکی از این تنش تکتونیکی باشد (شکل ۷-چ). سلسنتین‌های نسل سوم به صورت بلورهای درشت شکل دار، تخت و منشوری هم‌بعد در ابعاد تا چند سانتی‌متر در حفرات ژئودمانند دیده می‌شوند (شکل ۷-ح و خ).

استرانسیانیت بیشتر به صورت بلورهای ریز شعاعی شکل در ارتباط با سلسنتین‌های درشت نسل دوم دیده می‌شود. این کانی به صورت پراکنده با رنگ و بی‌رفرنزانس متفاوت و برجستگی بالاتر نسبت به سلسنتین قابل تشخیص است (شکل ۷-د). استرانسیانیت بیشتر در حواشی عدسی کانی‌زایی و در تماس با سنگ‌های کربناتی حضور دارد. باریت بیشتر به صورت ادخال‌های ریز درون سلسنتین‌های درشت نسل دوم قابل مشاهده است (شکل ۷-ت). ادخال‌های باریت بیشتر توزیع پراکنده و نامنظم داشته و گاهی به صورت شعاعی یا جهت‌یافته دیده می‌شوند.

کلسیت باطله اصلی در کانسار مادآباد می‌باشد. براساس مطالعات میکروسکوپی، کلسیت به صورت ادخال درون سلسنتین و یا رگچه‌های کلسیتی تأخیری قطع‌کننده کانه‌زایی در کانسار مادآباد حضور دارد (شکل‌های ۶-ت و ۷-ب). همچنین، کلسیت به صورت باقیمانده‌هایی در اطراف برخی از بلورهای درشت سلسنتین دیده می‌شود و این



شکل ۷. کانی‌شناسی و ساخت و بافت کانه‌ها در کانسار مادآباد، الف) بلورهای ریز سلسنتین نسل اول، ب) بلورهای ریز سلسنتین نسل اول با حالت جریان‌ی، کلسیت‌های باقیمانده از سنگ اولیه در بین سلسنتین‌ها قابل مشاهده است، پ) بلورهای درشت سلسنتین نسل دوم با یافت رگچه‌ای که بلورهای ریز سلسنتین نسل اول را قطع کرده است، ت) بلورهای درشت سلسنتین نسل دوم با بافت شعاعی حاوی اذخال‌های فراوان باریت، ث) سلسنتین‌های درشت‌بلور و بی‌شکل نسل دوم با اذخال‌هایی از کلسیت، ج) بلورهای درشت سلسنتین نسل دوم با بافت کاتاکلاستیک، چ) بلورهای درشت سلسنتین نسل دوم دارای خاموشی موجی، ح و خ) بلورهای درشت و سوزنی سلسنتین نسل سوم، د) استرانسیانیت در کنار سلسنتین‌های درشت‌بلور نسل دوم، ذ و ر) به‌ترتیب تصویر نمونه دستی و میکروسکوپی از رگچه‌های اکسیدی-هیدروکسیدی آهن و تشکیل ساخت شبه ریتمیک ماده معدنی، تصاویر میکروسکوپی در نور عبوری پلاریزه متقاطع (XPL) تهیه شده‌اند. نشانه‌های اختصاری کانی‌ها از Whitney and Evans (2010) اقتباس شده است: Brt: باریت، Cal: کلسیت، Clt: سلسنتین، Dol: دولومیت، Qz: کوارتز، Str: استرانسیانیت)



شکل ۸. شکل‌های میکروسکوپی (در دمای اتاق و نور عبوری پلاریزه، PPL) از انواع میانبارهای سیال در کانسار مادآباد، الف) اجتماع میانبارهای سیال دو فاز از مایع (LV) و تک فازهای غنی از مایع (L) و غنی از گاز (V) در کنار یکدیگر در سلسنتین نسل دوم، ب) میانبارهای سیال ثانویه کاذب در سلسنتین نسل اول، پ و ت) میانبارهای سیال اولیه دو فاز از مایع در سلسنتین نسل دوم (L: مایع، V: گاز، PS: ثانویه کاذب)

تغییرات حرارتی دمای همگن شدن میانبارهای سیال از ۲۴۸ تا ۳۶۵ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۷۸ درجه سانتی‌گراد) به دست آمد (جدول ۱). بیشترین فراوانی همگن‌شدگی دمایی مربوط به گستره دمایی ۲۶۰ تا ۲۷۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۹-ب). چگالی محاسبه‌شده برای میانبارهای سیال در گستره بین ۰/۸ تا ۰/۹ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. به علت مشخص نبودن عمق تشکیل عدسی کانه‌دار، تصحیح دمایی بر روی مقادیر دمای همگن‌شدن میانبارهای سیال اعمال نشد. با توجه به میانگین دمای همگن‌شدن (۲۷۸ درجه سانتی‌گراد)، حداقل عمق تشکیل کانسار مادآباد حدود ۵۱۰ متر زیر سطح ایستایی آب‌های قدیمی و فشار کمتر از ۰/۵ کیلوبار تخمین زده می‌شود.

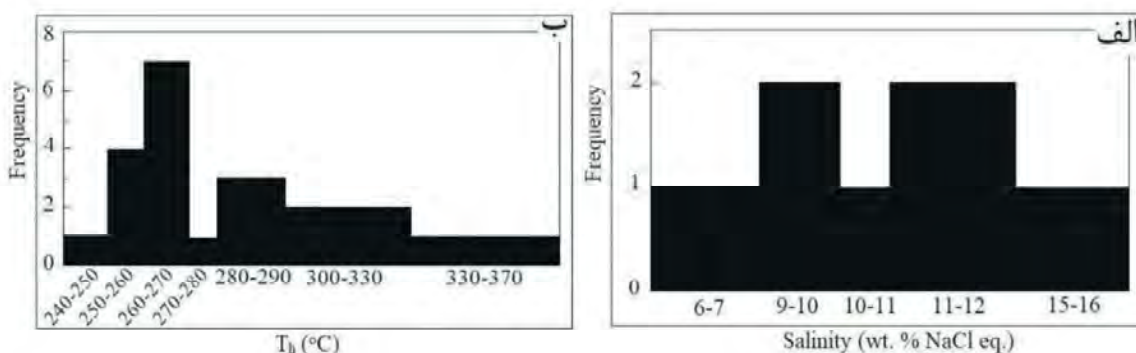
به ریزودن میانبارهای سیال موجود در سلسستین‌های نسل اول و عدم مشاهده تغییرات ریزدماسنجی در آنها، مطالعات ریزدماسنجی تنها بر روی میانبارهای سیال موجود در سلسستین‌های درشت‌بلور نسل دوم انجام شد. بر اساس مطالعات انجام‌شده، دمای یوتکتیک (Te) در هیچ یک از میانبارهای سیال قابل اندازه‌گیری نبود. دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{m-ice}) در میانبارهای سیال مطالعه‌شده بین ۱۲- تا ۳/۷- درجه سانتی‌گراد به دست آمد. بر مبنای رابطه Bodnar (1993)، درجه شوری این میانبارها بین شش تا ۱۶ (میانگین ۱۰/۶) درصد وزنی معادل نمک طعام می‌باشد (جدول ۱). از نظر آماری، درجات شوری نه تا ۱۲ درصد وزنی معادل نمک طعام دارای بیشترین فراوانی می‌باشند (شکل ۹-الف).

جدول ۱. خلاصه نتایج مطالعات ریزدماسنجی بر روی میانبارهای سیال اولیه موجود در کانی سلسستین نسل دوم در کانسار مادآباد

Size (μm)	Type	T_{m-ice} ($^{\circ}\text{C}$)	Salinity (wt. % NaCl eq.)	$T_{h(v-l)}$ ($^{\circ}\text{C}$)	Degree of fill	Density (g/cm ³)
6-18	LV	-3.7 to -12	6-16 (10.6)	248-365 (278)	0.6-0.8	0.8-0.9

The digit in the parenthesis is the mean value.

T_{m-ice} = final ice-melting temperature, $T_{h(v-l)}$ = total homogenization temperature.



شکل ۹. نمودارهای فراوانی، الف) درجه شوری، ب) دمای همگن‌شدن میانبارهای سیال اولیه در سلسستین‌های نسل دوم در کانسار مادآباد

تیپ کانه‌زایی

و عدسی‌شکل است و از نظر چینه‌شناسی به سنگ آهک‌های ضخیم‌لایه سازند قم محدود می‌شود. امتداد عدسی کانه‌دار (شمال شرقی-جنوب غربی) روند عمومی لایه‌بندی (شمال غربی-جنوب شرقی) واحدهای کربناته میزبان را قطع کرده است. ۲- ساخت و بافت ماده معدنی در کانسار مادآباد به صورت توده‌ای، دروزی و پُرکننده فضای خالی در پهنه‌های برشی و گسلی در سنگ آهک میزبان

با توجه به ویژگی انواع کانسارهای سلسستین و با عنایت به شواهد زمین‌شناسی و کانه‌زایی، می‌توان اظهار داشت ویژگی‌های کانسار مادآباد تشابه زیادی با کانسارهای سلسستین جانشین‌ای ژنتیک در سنگ آهک‌های ریفی (Dill, 2010) دارد. شواهد این مقایسه به شرح زیر است:

۱- کانی‌زایی سلسستین در کانسار مادآباد از نوع چینه‌کران

جدول ۲. مقایسه ویژگی‌های اصلی کانسار مادآباد با برخی از کانسارهای سلسنتین تپ جانشیننی ایپیزنتیک در ایران و ترکیه

مادآباد	ملک‌آباد، سیاه‌کوه و دوازده امام	حوضه سیواس ترکیه
سنگ میزبان	واحدهای کربناته سازند قم	واحدهای کربناته و تبخیری
کانی‌شناسی	سلسنتین، استرانسیانیت، باریت	سلسنتین، پیریت، مارکاسیت
ساخت و بافت	رگه-رگچه‌ای، پُرکننده فضاهای خالی، دروزی، پرشی، کاتا کلاستیک	ریمیک، عدسی، جانشیننی، رگه-رگچه‌ای، پُرکننده فضاهای خالی
ویژگی سیالات درگیر	دما: ۲۴۸-۳۶۵ درجه سانتی‌گراد، شوری: ۱۶-۶ درصد وزنی معادل نمک طعام	دما: ۲۱۰-۳۹۰ درجه سانتی‌گراد، شوری: ۱۱-۲۳ درصد وزنی معادل نمک طعام
دگرسانی	دولومیتی، کلسیتی، سیلیسی	دولومیتی، سیلیسی
منشاء استرانسیم	واحدهای تبخیری سازند قم و واحدهای آتشفشانی سازند کرج	واحدهای تبخیری
منبع	نتایج حاصل از این پژوهش	Tekin, 2001; Tekin et al., 2002

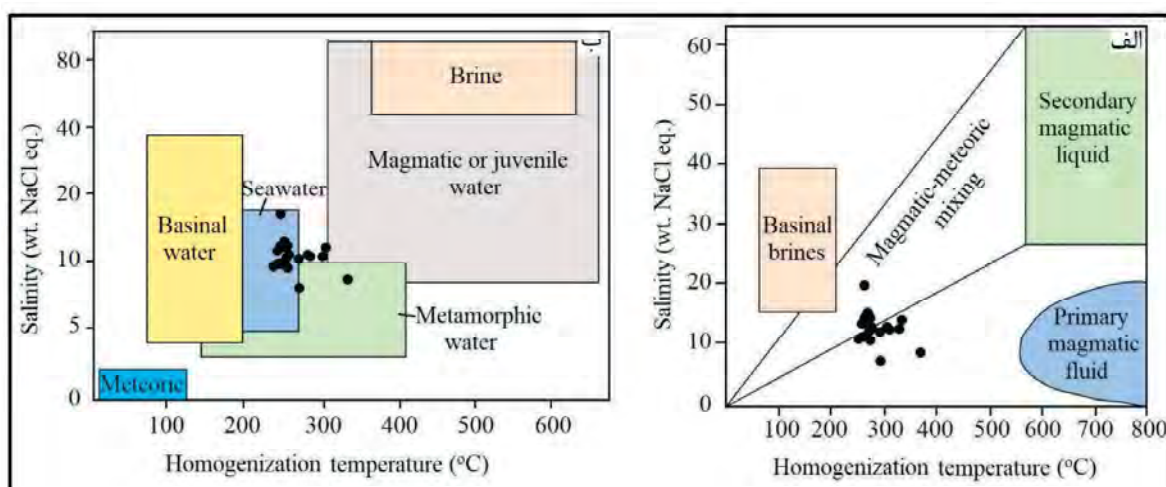
در کانسار مادآباد دارای ترکیب کانی‌شناسی اولیه کلسیتی هستند (نوری و همکاران، ۱۳۹۸). لذا منشاء استرانسیم در این کانسار مرتبط با فرایندهای دیاژنزی تبدیل آراگونیت به کلسیت نیست و می‌تواند مرتبط با واحدهای تبخیری موجود در بخش‌های مارنی سازند قم و واحدهای آتشفشانی سازند کرج در منطقه باشد. Bazargani-Guilani and Nekouvaght Tak (2008) و همکاران (۲۰۱۴) نیز بخشی از منشاء استرانسیم در کانسارهای سلسنتین ملک‌آباد، سیاه‌کوه، دوازده امام و سلسنتین مزرحه (ایران مرکزی) را واحدهای آتشفشانی سازند کرج در نظر دارند. این پژوهشگرها، بالا بودن نسبی غلظت استرانسیم در سازند کرج را دلیلی بر تأمین آن برای این کانسارها قلمداد کرده‌اند. در چنین مکانیسمی، محلول‌های غنی از استرانسیم با آب‌های سطحی مخلوط و سبب ته‌نشست سلسنتین در سنگ‌های میزبان مناسب می‌شوند (Dove and Czank, 1995; Ceyhan et al., 1996; Tekin, 2001; Tekin et al., 2002).

الگوی تشکیل کانسار مادآباد

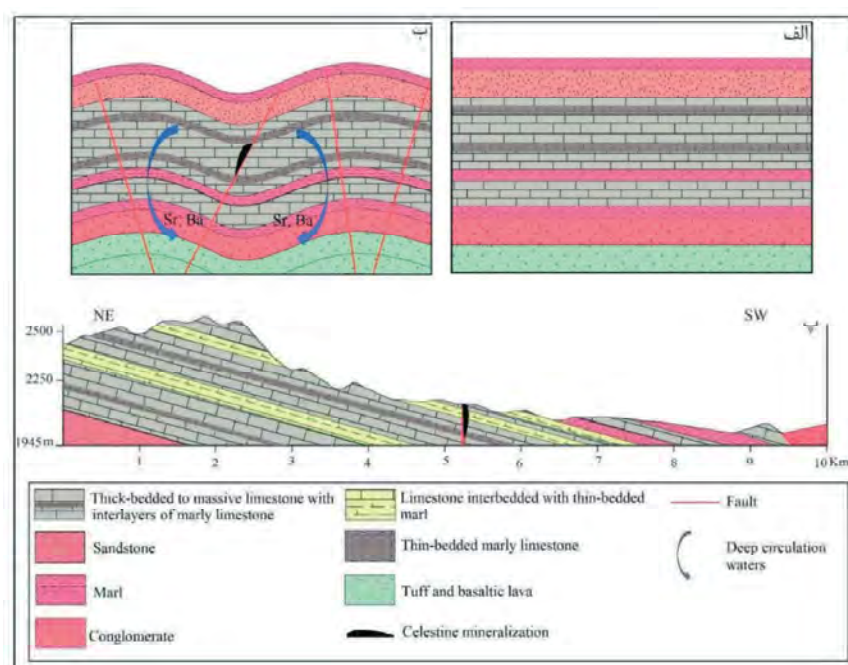
براساس نتایج به‌دست آمده از مشاهدات صحرایی، مطالعات سنگ‌شناسی، کانه‌نگاری، ساخت و بافت و روابط پاراژنتیک کانی‌ها در کانسار مادآباد، مراحل تکوین و تکامل این کانسار را می‌توان به‌صورت یک توالی سه

است. در کانسارهای سین‌ژنتیک، به‌طور واضح شواهدی از جانشیننی ایپیزنتیک کانی‌های کلسیت، دولومیت، ژپیس و انیدریت توسط سلسنتین وجود دارد (Scholle et al., 1990). برای کانسارهای سلسنتین با خاستگاه ایپیزنتیک، منابع استرانسیم لازم برای کانی‌سازی از: ۱- تبدیل آراگونیت به کلسیت، ۲- دولومیتی‌شدن سنگ آهک و ۳- انحلال ژپیس به‌عنوان سیمان سنگ‌های کربناته طی دیاژنز، فراهم شده است (Nickless et al., 1975; Wood and Shaw, 1976). اعتقاد بر این است که این استرانسیم مواضع کلسیم را اشغال کرده و با غنای تا ده برابر محتوا در دولومیت‌ها محصور شده است (Carlson, 1983). برای کانسارهای سلسنتین حوضه سیواس در آناتولی ترکیه، منشاء استرانسیم محلول‌های گرمابی بیان شده است (Karamanderesi et al., 1992; Tekin, 2001; Tekin et al., 2002). در این کانسارها، محلول‌های ماگمایی-گرمابی غنی از استرانسیم از طریق گسل‌ها و شکستگی‌ها به بخش‌های سطحی راه پیدا کرده و در اثر اختلاط با آب‌های سطحی سبب ته‌نشست سلسنتین شده‌اند (شکل ۱۰).

سلسنتین می‌تواند طی فرایندهای دیاژنزی از تبدیل آراگونیت دارای استرانسیم بالا یا کلسیت زیستی به کلسیت دارای استرانسیم پایین یا دولومیت تشکیل شود (Hanor, 2004; Warren, 2006). با توجه به مطالعات سنگ‌نگاری و زمین‌شیمیایی، کربنات‌های میزبان کانه‌زایی



شکل ۱۰. تعیین منشأ سیال کانه‌ساز در کانسار مادآباد با استفاده از نمودارهای شوری-دمای همگن شدن، الف) نمودار (Beane (1983)، ب) نمودار (Kesler (2005)



شکل ۱۱. نمایی شماتیک نشان‌دهنده تاریخچه تکامل زمین‌شناسی و تشکیل کانسار مادآباد، (برای توضیح به متن مراجعه شود)

در بُرش دهنمک در شمال شرق گرمسار نیز پیشنهاد شده است. در مرحله دوم، واحدهای سنگی منطقه طی فاز کوهزایی ساوین (میوسن میانی) چین خورده و گسل‌ها و شکستگی‌های فراوانی در آنها ایجاد شده است. ورود آب‌های جوی به بخش‌های عمیق حوضه رسوبی از طریق گسل‌ها و شکستگی‌ها، گرم شدن و چرخش آنها در افق‌های زیرین سنگ بستر سبب شسته شدن استرانسیم از واحدهای تبخیری و آتشفشانی منطقه و ته‌نشست آن در فضاهای خالی

مرحله‌ای خلاصه کرد (شکل ۱۱). مرحله نخست با ته‌نشست توالی‌های آتشفشانی-رسوبی سازند کرج و واحدهای رسوبی سازندهای قرمز زیرین، قم و قرمز بالایی مشخص می‌شود (شکل ۱۱-الف). رسوبات کربناته سازند قم در منطقه مورد مطالعه در محیط دریای باز متعلق به کربنات‌های مناطق معتدله طی زمان میوسن پیشین تشکیل شده‌اند (نوری و همکاران، ۱۳۹۷). مانند چین محیطی توسط دانشیان و همکاران (۱۳۹۶) برای نهشته‌های کربناته سازند قم

ایبژتیک است. کانه‌زایی و دگرسانی در این کانسار محدود به ساختارهای پرشی و گسلی در واحدهای آهکی سازند قم است. از این رو، بررسی این پهنه‌ها در واحدهای آهکی سازند قم به‌ویژه در مناطقی که دگرسانی دولومیتی به خوبی توسعه یافته است، می‌تواند به اکتشاف ذخایر دیگری از سلسنتین در این منطقه و دیگر نقاط ایران منجر شود.

سپاسگزاری

نویسندگان از حمایت‌های مالی دانشگاه زنجان برای انجام این پژوهش تشکر می‌نمایند. همچنین نویسندگان از سردبیر و داوران محترم فصلنامه زمین‌شناسی ایران به‌خاطر راهنمایی‌های علمی ارزنده که منجر به غنای بیشتر مقاله حاضر شده است، کمال تشکر را دارند.

منابع

- بازرگانی گیلانی، ک. و ربانی، م. ص.، ۱۳۸۴. نهشت سلسنتیت استراتیفورم منطقه افتر، باختر سمنان. فصلنامه علوم زمین، ۵۵، ۴۱-۳۰.
- جمی، م.، ۱۳۷۰. زمین‌شناسی، ژئوشیمی و منشاء افق سلسنتیت‌دار منطقه بهمنی (سازند آسماری)، استان کهگیلویه و بویراحمد. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، ۱۸۶.
- دانشیان، ج.، اسدی مهماندوستی، ا. و رضانی دانا، ل.، ۱۳۹۶. ریزرخساره، محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکانشی سازند قم در برش ده‌نمک، شمال شرق گرمسار. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۱، ۴۱، ۴۳-۲۳.
- رستمی پایدار، ق.، طاهرزاده، ا. و عادل‌پور، م.، ۱۳۹۵. زمین‌شناسی و ژنز کانسار سلسنتیت بامحمد در مرز گچساران و میشان، استان کهگیلویه بویراحمد. یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، ۲۰، ۷۵-۶۲.
- شرکت فارس جم ستون، ۱۳۹۲. گزارش پایان اکتشاف کانسار سلسنتین مادآباد. سازمان صنعت، معدن و تجارت استان زنجان، ۱۸۵.
- شهیدی، ع. و بهار فیروزی، خ.، ۱۳۸۰. نقشه زمین‌شناسی حلب، مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- علوی نائینی، م.، ۱۳۷۲. نقشه زمین‌شناسی

و زون‌های پرشی موجود در واحدهای کربناته سازند قم شده است (شکل ۱۱-ب). چنین مکانیسمی برای کانه‌زایی‌های سلسنتین در کانسارهای سلسنتین ملک‌آباد، سیاه‌کوه، دوازده امام و مزرعه نیز پیشنهاد شده است (Bazargani-Guilani and Nekouvaght Tak, 2008; Ranjbaran et al., 2014). مرحله سوم با بالآمدگی ناحیه‌ای و توسعه فرایندهای هوازدگی و فرسایش همراه بوده و ریخت‌شناسی امروزی منطقه حاصل شده است (شکل ۱۱-پ).

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان به‌صورت زیر خلاصه کرد:

۱. کانه‌زایی سلسنتین در کانسار مادآباد به‌صورت چینه‌کران و عدسی‌شکل درون واحدهای کربناته عضو f سازند قم به سن میوسن زیرین رخ داده و لایه‌بندی آنها را قطع کرده است. کانه‌زایی در این کانسار توسط پهنه‌های پرشی و گسلی کنترل شده و دارای دگرسانی‌های دولومیتی، کلسیتی و سیلیسی همراه با بافت‌های رگه-رگچه‌ای، پُرکننده فضا‌های خالی، دروزی، پرشی و کاتاکلاستیک است.
۲. نتایج مطالعات ریزدماسنجی، درجه شوری میانبارهای سیال را بین شش تا ۱۶ (میانگین ۱۰/۶) درصد وزنی معادل نمک طعام و دمای همگن‌شدن آنها را ۲۴۸ تا ۳۶۵ درجه سانتی‌گراد (میانگین ۲۷۸) نشان داده است. این گستره درجه شوری و دمای همگن‌شدن مشابه با محلول‌های ماگمایی-گرمایی می‌باشد. فشار به دام افتادن سیالات در کانسار مادآباد کمتر از ۰/۵ کیلوبار و حداقل عمق کانه‌زایی حدود ۵۱۰ متر زیر سطح ایستابی آب‌های قدیمی بوده است.
۳. استرانسیم در کانسار مادآباد از واحدهای تبخیری موجود در بخش‌های مارنی سازند قم و واحدهای آتشفشانی سازند کرج منشاء گرفته و در فضا‌های خالی و زون‌های پرشی موجود در واحدهای کربناته سازند قم ته‌نشست یافته است.
۴. کانسار مادآباد از نوع کانسارهای سلسنتین جانیشینی

- its. Proceeding, University of Missouri Rollamo, 242-435.
- Ceyhan, V., Cinemre, H.A. and Bozoglu, M., 1996. An analysis of supply and demand of hazelnut in Turkey. Proc. of the Nuts Symposium Samsun, Turkey, 12-46 (in Turkish).
 - Dill, H.G., 2010. The chessboard classification scheme of mineral deposits: mineralogy and geology from aluminum to zirconium. *Earth Science Reviews*, 100(1-4), 1-20.
 - Dove, P.M. and Czank, C.A., 1995. Crystal chemical controls on the dissolution kinetics of the isostructural sulfates-celestite, anglesite, and barite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(10), 1907-1915.
 - Ehya, F., Shakouri, B. and Rafi, M., 2013. Geology, mineralogy, and isotope (Sr, S) geochemistry of the Likak celestite deposit, SW Iran. *Carbonates and Evaporites*, 28(4), 419-431.
 - Forjanés, P., Astilleros, J.M. and Fernández-Díaz, L., 2020a. The formation of barite and celestite through the replacement of gypsum. *Minerals*, 10, 189.
 - Forjanés, P., Gómez-Barreiro, J., Morales, J., Astilleros, J.M. and Fernández-Díaz, L., 2020b. Epitactic growth of celestite on anhydrite: substrate induced twinning and morphological evolution of aggregates. *Crystal Engineering Communication*, 22(35), 5743-5759.
 - Furrer, M.A. and Soder, P.A., 1955. The Oligo-Miocene Formation in the Qom region (Iran). Processing of 4th World Petroleum Congress, 6-15 June, Roma, Italy, 267-277.
 - González-Sánchez, F., Camprubí, A., González-Partida, E., Puente-Solís, R., Canet, C., Centeno-García, E. and Atudorei, V., 2009. Regional stratigraphy and distribution of epigenetic stratabound celestine, fluorite, barite and Pb-Zn deposits in the MVT province of northeastern Mexico. *Mineralium Deposita*, 44, 343-361.
 - Hanor, J.S., 2004. A model for the origin خداينده-سلطانيه، مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
 - کریمی، ع. و راستاد، ا.، ۱۳۷۸. رخساره‌های کانه‌دار کانسار سلسیت نخجیرکوه ورامین؛ تحول دیاژنی و محیط رسوب‌گذاری. فصلنامه علوم زمین، ۳۳، ۲۰-۳۳.
 - نوری، م.، زهدی، ا.، کوهستانی، ح.، نباتیان، ق. و مختاری، م.ع.ا.، ۱۳۹۷. چینه‌شناسی سنگی، ریزرخساره‌ها و محیط رسوبی سازند قم در بُرش کانسار سلسیتین مادآباد، جنوب زنجان. مجله رخساره‌های رسوبی، ۱۱، ۲، ۲۸۸-۳۰۳.
 - نوری، م.، زهدی، ا.، کوهستانی، ح.، نباتیان، ق. و مختاری، م.ع.ا.، ۱۳۹۸. مطالعه کانی‌شناسی اولیه کربنات‌های سازند قم با استفاده از مطالعات پتروگرافی و ژئوشیمیایی در بُرش کانسار سلسیتین مادآباد (جنوب زنجان). فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۳، ۵۱، ۱-۱۵.
 - Alavi, M., 1991. Tectonic map of the Middle East, scale 1:5000000. Geological Survey of Iran.
 - Bazargani-Guilani, K. and Nekouvaht Tak, M.A., 2008. Celestite ore deposit and occurrences of the Qom Formation, Oligo-Miocene, Central Iran. 2nd IASME/WSEAS international conference on geology and seismology, Cambridge, UK, 48-54.
 - Beane R.E. 1983. The magmatic-meteorite transition. Geothermal Resources Council, Special Report, 13, 245-253.
 - Bodnar, R.J., 1993. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O-NaCl solution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57(3), 683-684.
 - Brodtkorb, M.K. de., Ramos, V., Barbieri, M. and Ametrano, S., 1982. The evaporitic celestine-barite deposits of Neuquen, Argentina. *Mineralium Deposita*, 17(3), 423-436.
 - Carlson, E.H., 1983. The occurrence of Mississippi Valley-type mineralization in northwestern Ohio. In: Kisvarsanyi G.S. Grant K. Pratt W.P. and Koeing J.W. (Eds.). International conference on Mississippi valey-type lead-zinc depos-

- of large carbonate and evaporite-hosted celestine deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 74(2), 168-175.
- Hitzman, M.W., Redmon, P.B. and Beaty, D.W., 2002. The carbonate-hosted Lisheen Zn-Pb-Ag deposit, County Tipperary, Ireland. *Economic Geology*, 97(8), 1627-1655.
 - Karamanderesi, I.H., Kiliçdağı, R. and Kiliç, N., 1992. Relationship between Sýcakçermik (Sivas) geothermal system and celestine formation. *Türkiye Jeo. Kurult. Bildi. Özleri*, 65 (in Turkish).
 - Kesler, S.E., 2005. Ore-forming fluids. *Elements*, 1, 13-18.
 - Kinsman, D.J.J., 1969. Modes of formation, sedimentary associations, and diagenetic features of shallow-water supratidal evaporites. *American Association Petroleum Geology Bulletin*, 53(4), 830-840.
 - Kushnir, S.V., 1986. The epigenetic celestine formation mechanism for rock containing CaSO₄. *Geochemistry*, 23, 1-9.
 - Markhand, A.H., Agheem, M.H., Shaikh, S.A., Khokhar, Q.D., Sahit, A.G. and Jamali, M.A., 2020. Mineralogical and Geochemical investigations of Celestine and Gypsum from Ganjo-Takkar area, Hyderabad, Sindh, Pakistan. *Sindh University Research Journal (Science Series)*, 52(3), 263-272.
 - Martin, J.M., Ortega-Huertas, M. and Torres-Ruiz, J., 1984. Genesis and evolution of strontium deposits of the Granada basin (Southern Spain): evidence of diagenetic replacement of a stromatolite belt. *Sedimentary Geology*, 39(3-4), 281-298.
 - Nickless, E.F.P., Booth, S.J. and Mosley, P.N., 1975. Celestine deposits of the Bristol area. *Transaction Institute of Mining and Metallurgy, Section B.*, 84, B62-B63.
 - Pourkaseb, H., Zarasvandi, A., Rezaei, M., Mahdavi, R. and Ghanavati, F., 2017. The occurrence and origin of celestite in the Abolfares region, Iran: Implications for Sr-mineralization in Zagros fold belt (ZFB). *Journal of African Earth Sciences*, 134, 352-364.
 - Ramos, V.A. and Brodtkorb, M.K. de., 1990. The barite and celestite metallogenesis of the Neuquén retroarc basin, central Argentina. In: *Stratabound ore deposits in the Andes*, Springer Verlag, Heidelberg. 47, 599-613.
 - Ranjbaran, M., Moghaddasi, S.J. and Sotolian, F., 2014. Texture study of the Mazraeh celestite deposit from North Central Iran. *Journal of Tethys*, 2(1), 20-28.
 - Roedder, E., 1984. Fluid inclusions. *Reviews in Mineralogy*. Mineralogical Society of America, Washington, 12, 644.
 - Ruiz, J., Kesler, S.E., Jones, L.M. and Sutter, J.F., 1980. Geology and geochemistry of the Las Cuevas fluorite deposit, San Luis Potosi, Mexico. *Economic Geology*, 75, 1200-1209.
 - Scholle, P.A., Stemmerik, L. and Harpoth, O., 1990. Origin of major karst-associated celestine mineralization in Karstrynggen, Central East Greenland. *Journal of Sedimentary Research*, 60(3), 397-410.
 - Tekin, E., 2001. Stratigraphy, geochemistry and depositional environment of the celestine-bearing gypsiferous Formations of the Tertiary Ulaş-Sivas Basin, East-Central Anatolia (Turkey). *Turkish Journal of Earth Sciences*, 10, 35-49.
 - Tekin, E., Varol, B., Ayan, Z. and Satir, M., 2002. Epigenetic origin of celestite deposits in the Tertiary Sivas Basin: New mineralogical and geochemical evidence. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, *Journal of Mineralogy and Geochemistry*, 7, 289-318.
 - Warren, J.K., 2006. *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons*. Springer Science and Business Media, Berlin, Germany.
 - Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming miner-

- als. *American Mineralogist*, 95(1), 185-187.
- Wilkinson, J.J., Eyre, S. and Boyce, A., 2005. Ore-forming processes in Irish-type carbonate-hosted Zn-Pb deposits: Evidence from mineralogy, chemistry, and isotopic composition of sulfides at the Lisheen mine. *Economic Geology*, 100(1), 63-86.
 - Wood, M.W. and Shaw, H.F., 1976. The geochemistry of celestites from the Yate area near Bristol (UK). *Chemical Geology*, 17, 179-193.