



بررسی خاستگاه رسوبی و تعادل در شبه‌پهنه‌های هاله مجاورتی اسلاملو اشنویه (آذربایجان غربی)

امیر محامد^۱، منیر مجرد^{۲*}

۱- دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه

(دریافت مقاله: ۹۲/۴/۱۲، نسخه نهایی: ۹۲/۸/۲۰)

چکیده: در این بررسی خاستگاه رسوبی متاپلیت‌های اسلاملو در شمال غرب ایران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آنالیز شیمی سنگ کل این متاپلیت‌ها حاکی از غنی بودن این سنگ‌ها از آهن و آلومینیوم بوده و کانی گارنت (آلماندن) فراوانی مدی بالایی دارد. در نمونه‌های پرسلیس آلومینیوم کم بوده و در نتیجه فراوانی مدی کانی‌هایی نظیر کلدیریت و آلومینوسیلیکات‌ها پائین است. موقعیت متاپلیت‌های اسلاملو در نمودارهای سازگاری AFM تقریباً مشابه است لذا با ترکیب شیمیایی یکسان، دما و فشار در تشکیل پارائزهای مختلف، متغیرهای اصلی بوده‌اند. سنگ رسوبی پروتولیت از نوع شیل آهنی و گریوک بوده است. با توجه به محتوای بالای آهن و آلومینیوم این نمونه‌ها از نوع لاتریت‌اند. شاخص‌های CIA، PIA و CIW حاکی از شدت بسیار بالای هوازدگی خاستگاه آذرین است. این مسئله باعث بالا بودن محتوای آلومینیوم در این سنگ‌ها شده است. بر اساس اکسیدهای عناصر اصلی محیط زمین ساختی تشکیل سنگ آذرین مولد متاپلیت‌های اسلاملو حاشیه فعال قاره بوده و این به معنی تشکیل رسوب‌های سازند روته که پروتولیت دگرگونی است در محیط حاشیه فعال نیست.

واژه‌های کلیدی: متاپلیت؛ اسلاملوی اشنویه؛ خاستگاه رسوبی؛ انتقال جرم؛ هوازدگی؛ پارائز.

مقدمه

۸. اغلب فرآیندهایی که ترکیب رسوب‌ها و سنگ‌های رسوبی را تحت تأثیر قرار می‌دهند در سنگ‌های رسوبی ثبت شده و ابزار مناسبی برای بررسی‌های خاستگاه رسوبی فراهم می‌آورند [۱۰، ۹]. در این بررسی‌ها، ضروری است از عناصری استفاده شود که طی هوازدگی، انتقال، دیاژنز و دگرگونی، کمترین تحرک را داشته باشند [۱۰]. استفاده از عناصر کمیاب و نادر خاکی در این راستا مطمئن‌تر است ولی این امر مانع از کاربرد وسیع اکسیدهای عناصر اصلی و نسبت بین آن‌ها برای ارزیابی خاستگاه رسوب‌ها نمی‌شود [۱۱-۱۵]. هدف از این تعیین پروتولیت شبه‌پهنه‌ای‌های اسلاملو، محیط زمین ساختی تشکیل آن‌ها و نیز بررسی تأثیر فرآیندهای مختلف بر ترکیب

به‌طور کلی ترکیب سنگ‌های تخریبی سیلیس‌دار تحت تأثیر پارامترهایی از قبیل ترکیب سنگ خاستگاه، هوازدگی و فرسایش در محل خاستگاه، سائیدگی و جورشدگی هیدرولیک طی انتقال و ته‌نشست، فرآیندهای سنگ‌شدگی حین دفن رسوب‌ها و دگرگونی قرار می‌گیرند [۲، ۱]. تمامی این فرآیندها در قالب چرخه‌های متعدد قابل تکرارند که این مسأله باعث پیچیده‌تر شدن بررسی‌های خاستگاه رسوبی می‌شود. بنابراین بایستی در اینگونه بررسی‌ها همواره احتیاط کرد [۳]. سنگ‌های تخریبی سیلیس‌دار ابزار خوبی برای بررسی خاستگاه رسوبی و محیط زمین ساختی حوضه‌های رسوبی هستند [۴-۶].

شیمیایی آن هاست. متاپلیت‌های اسلاملو در اثر نفوذ یک استوک گابرو-دیوریتی به داخل سنگ‌های رسوبی سازند روته (پرمین) دگرگون شده‌اند. کانی‌های غالب متاپلیت‌ها شامل بیوتیت، مسکویت، کلریتوئید، آندالوزیت، گارنت، کلدیریت و سیلیمانیت هستند [۱۶]. خلاصه‌ای از سنگ نگاری متاپلیت-های اسلاملو در جدول ۱ آورده شده است. همچنین در این مقاله شرایط ترمودینامیکی و واکنش‌های دخیل در تشکیل دوگانه سنگ‌ها به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بررسی زادگاه رسوبی سنگ‌های دگرگون در ایران کمتر انجام شده است (از جمله: [۳]) و شایسته توجه بیشتری است.

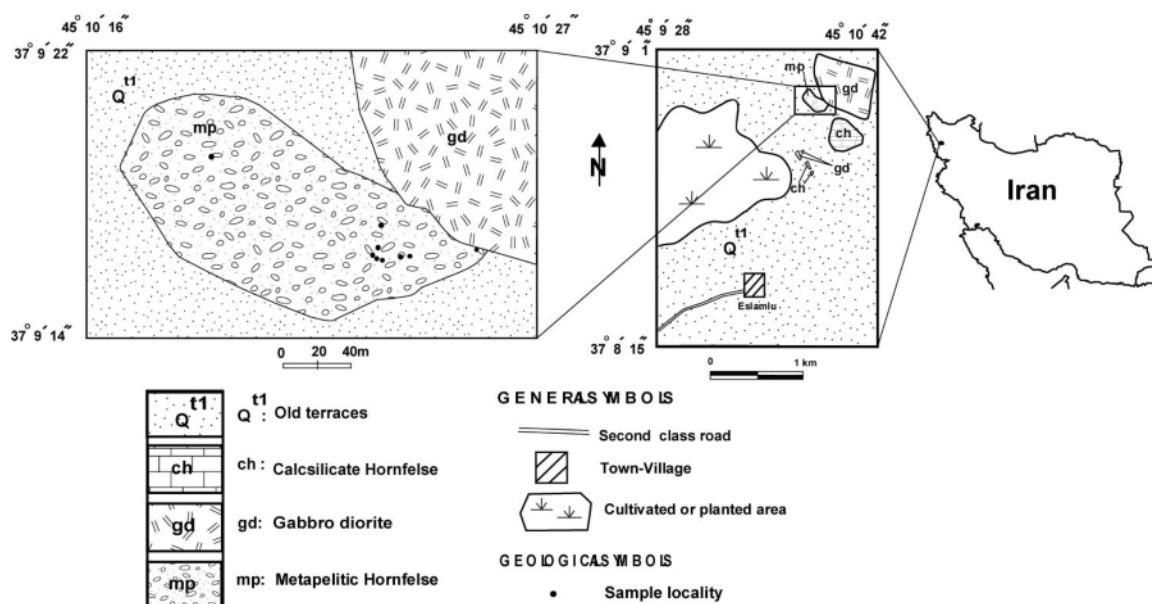
زمین‌شناسی منطقه

روستای اسلاملو در پانزده کیلومتری شهرستان اشنویه در استان آذربایجان غربی واقع شده است. این منطقه وابسته به منطقه‌ی زمین‌ساختاری خوی - مهاباد است [۱۷]. قدیمی‌ترین واحد سنگی منطقه، سنگ‌های رسوبی سازند روته (پرمین) است که بیشتر آهکی بوده و دارای میان لایه‌هایی از شیل و مارن است [۱۸]. بین سازند درود و روته یک واحد لاتریتی

وجود دارد و در برخی مناطق مانند جنوب ارومیه تا بوکان (جنوب آذربایجان غربی) در سطوح پایانی سنگ آهک‌های روته یک سطح فرسایشی وجود دارد که با عدسی‌های بوکسیت - لاتریتی مشخص می‌شود [۱۸]. لاسمی [۱۹] محیط رسوبی روته را همسان محیط‌های کربناتی عهد حاضر به ویژه سواحل جنوبی کنونی خلیج فارس می‌داند. از سنگ‌های آذرین موجود در منطقه می‌توان به استوک گابرو-دیوریتی مجموعه‌ی نفوذی ارومیه [۲۰] اشاره کرد که نفوذ این استوک به داخل سنگ‌های رسوبی سازند روته (پرمین) باعث دگرگونی مجاورتی شده است [۲۱]. سن بخش دیوریتی مجموعه‌ی نفوذی ارومیه سنومانین تعیین شده است [۲۰]. بزرگترین حجم سنگ‌های دگرگون مجاورتی منطقه‌ی اسلاملو مربوط به هورنفلس آهکی و مرم‌های دولومیتی-کلسیتی است. با توجه به خلوص نسبی سنگ‌های آهکی تشکیل دوگانه‌های متنوعی در این سنگ‌ها دیده نشده است. هورنفلس‌های رسی هاله‌ی اسلاملو حجم بسیار کوچکی از سنگ‌های دگرگون مجاورتی منطقه را تشکیل می‌دهند (شکل ۱).

جدول ۱ خلاصه‌ای از سنگ نگاری متاپلیت‌های اسلاملو. حرف X برای کانی‌های با فراوانی بیش از ۱۰٪ و حرف O برای کانی‌های با فراوانی بین ۵-۱۰٪ استفاده شده است. علائم اختصاری کانی‌ها از Kretz [۱۱].

شماره نمونه	نام سنگ	Qtz	Crd	Cld	Grt	And	Sil	Ms	Bt	Chl	Pl	Hc	Ore
E 11-1	هورنفلس رسی	O	X	O	X		X		O	X		O	X
E 11-2	هورنفلس رسی	O	X	O	X	X	X	O	O	X		O	O
E 11-3	هورنفلس رسی	O	X		X	O	X		O	O			O
E 11-3b	هورنفلس رسی	X	O	O	X		O	O	O	X		O	O
E 11-4	هورنفلس رسی	X			X				O		O		X
E 15 A	هورنفلس رسی	O	O		X		O	O	O	X	O	O	O
E 15 B	هورنفلس رسی	O		O	X	O	X			X		O	X
E 18	هورنفلس رسی	X	X		O		O		O	O			O
E 20	هورنفلس رسی	O	X		X	X	O	O	X			O	O
E 24 a	هورنفلس رسی	O	X	X		O	X	X	O	X			O
E 64	هورنفلس رسی	X	X		O		X	O	X	O			O
E 65 A	هورنفلس رسی	X							X	O	O		O
E 65 B	هورنفلس رسی	X							X	O	O		O
E 72 A	هورنفلس رسی	X	O				X	O					O
E 72 B	هورنفلس رسی	X	X	O	X		X	O	O	X			O
E 74	هورنفلس رسی	X	O	O	X		O	O	O	X		O	O
E 75	هورنفلس رسی	X	X				X	O	O	O			O
E 83	هورنفلس رسی	O	X		X		X	O	O	X		O	O
E 84	هورنفلس رسی	O	X	O	X		X	O	O	X		O	O
E 85	هورنفلس رسی	O	X	O	X	O	X	O	O	X		O	O
E 86-1	هورنفلس رسی	O	O		X			O	X		O		O
E 86-2	هورنفلس رسی	O	O	O	X	O	X		X	X		O	O



شکل ۱ نقشه‌ی زمین شناسی منطقه‌ی اسلاملو. روستای اسلاملو در جنوب نقشه قابل مشاهده است.

روش پژوهش

به منظور بررسی شیمی سنگ کل متاپلیت‌های اسلاملو تعداد ۵ نمونه حاوی کانی‌های معرف برای آنالیز XRF انتخاب شدند و در آزمایشگاه ALS-Chemex کانادا مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از نتایج این آنالیزها و نمودارهای مربوطه، خاستگاه رسوبی، نوع سنگ خاستگاه، محیط زمین‌ساختی و فرآیندهای مؤثر در ترکیب شیمیایی رسوب‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. همچنین با استفاده از نتایج آنالیز شیمی سنگ کل، تعادلی بودن یا نبودن پارائزهای مربوطه تحت بررسی قرار گرفته‌اند.

نتایج و بررسی

سنگ نگاری

هورنفلس‌های رسی هاله‌ی مجاورتی اسلاملو در نمونه‌ی دستی بسیار متراکم بوده و تیره رنگ‌اند. در این سنگ‌ها تنها کانی قابل مشاهده در نمونه‌ی دستی گارنت و در مواردی بیوتیت است. اکسیدهای آهن به رنگ قهوه‌ای سوخته در این سنگ‌ها مشاهده می‌شود. این سنگ‌ها دارای شکستگی صدفی بوده و سخت و ناصاف‌اند. بافت این سنگ‌ها بیشتر پورفیروبلاستیک و دانه‌ای بوده و در برخی از نمونه‌ها بافت ضربدری برخی از کانی‌ها را می‌توان مشاهده کرد. پورفیروبلاست‌های کلریتوئید، آندالوزیت، گارنت، و کلدیریت به همراه بلورهای کوچک سیلیمانیت و هرسی نایت مهم‌ترین کانی‌های مشاهده شده

علاوه بر میکاها در این سنگ‌هاست (شکل ۲). پارائزهای غالب مشاهده شده در متاپلیت‌های اسلاملو شامل موارد زیرند. علائم اختصاری کانی‌ها از Kretz [۲۲] گرفته شدند:

۱- $\text{Cld} + \text{Chl} + \text{Ms} + \text{Bt} + \text{Qtz}$ - ۲ $\text{And} + \text{Qtz}$

۳- $\text{Grt} + \text{Chl} + \text{Qtz} \pm \text{Cld}$ - ۴ $\text{And} + \text{Cld} + \text{Sil} + \text{Ms} + \text{Chl}$

۵- $\text{Crd} + \text{Cld} + \text{Sil} + \text{Chl} \pm \text{Ms}$ - ۶ $\text{Crd} + \text{Grt} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Qtz}$

۷- $\text{rt} + \text{Chl} + \text{Bt} + \text{Ms} + \text{Hc}$ - ۸ $\text{rt} + \text{Crd} + \text{And} + \text{Sil} + \text{Bt} + \text{Hc}$

۹- $\text{Crd} + \text{Sil} + \text{Hc} + \text{Bt} + \text{Chl} + \text{Ms}$

۱۰- $\text{Grt} + \text{Crd} + \text{Sil} + \text{Bt} + \text{Hc} + \text{Chl} + \text{And}$

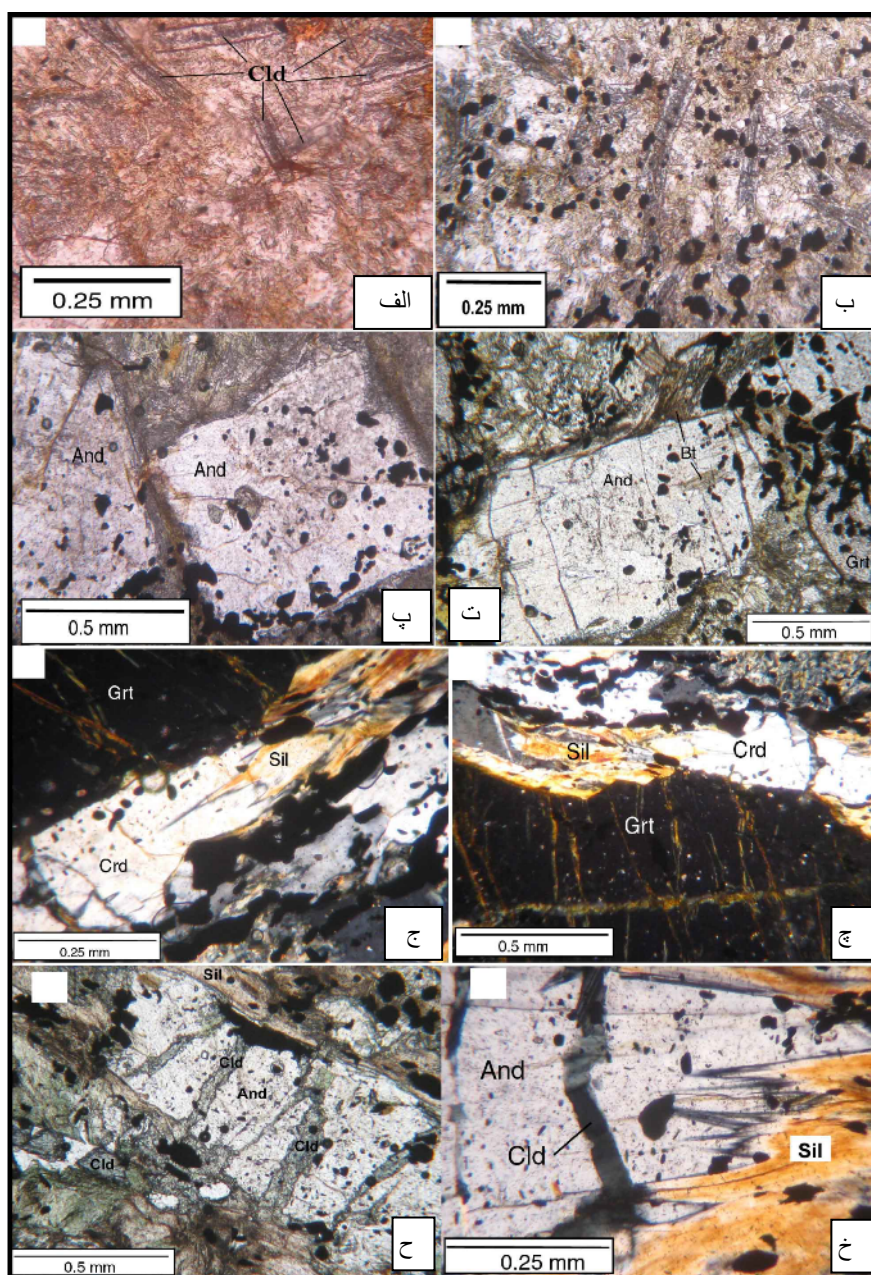
ژئوشیمی سنگ کل متاپلیت‌ها

نمونه‌های تجزیه شده حاوی کانی‌های شاخص مربوط به زون-های کانایی مشاهده شده بودند. ترکیب سنگ کل متاپلیت‌ها در جدول ۲ مشاهده می‌شود.

درصد وزنی اکسید سیلیسیم در هاله‌ی مجاورتی اسلاملو از ۳۰/۲۲ تا ۳۸/۳۰ در تغییر است. درصد وزنی اکسید آلومینیوم در این سنگ‌ها بالا بوده و از ۲۱/۰۲ تا ۳۵/۸۰ در تغییر است. اکسید آهن کل در نتایج آنالیز به صورت آهن سه ظرفیتی گزارش شده و بین ۲۰/۷۴-۴۰/۷۳ در تغییر بوده و بیشترین نوسان را در میان اکسیدها نشان می‌دهد. اکسید منیزیم فراوانی تقریباً یکنواختی داشته و بین ۰/۹۸ تا ۲/۰۳ در تغییر است. اکسید تیتانیم فراوانی بالایی داشته و بین ۱/۷۸ تا ۷/۵۷ درصد وزنی در تغییر است. فراوانی اکسید منگنز بسیار پائین

اکسیدهای آلومینیوم و تیتانیوم با سیلیس منفی است. با توجه به این نمودارها اکسیدهای آهن و منیزیم در نمونه‌های پر سیلیس بالا بوده و به همین دلیل متاپلیت‌های اسلاملو دارای فراوانی مدی بالایی از گارنت هستند. فراوانی آلومینوسیلیکات‌ها (آندالوزیت و سیلیمانیت) و کردیریت نسبتاً پائین است که این مسأله ناشی از مقدار پائین آلومینیوم در نمونه‌های پرسیلیس است (شکل ۳).

بوده و قابل چشم‌پوشی است. کسر مولی آهن در سنگ‌های رسی از ۰/۹۰ تا ۰/۹۴ در تغییر بوده و کسر مولی آلومینیوم نیز بین ۰/۲۰ تا ۰/۵۰ در تغییر می‌کند. فراوانی اکسیدهای آلومینیوم، آهن، تیتانیوم و منیزیم در برابر اکسید سیلیسیم در شکل ۲ ترسیم شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود یک همبستگی مثبت بین اکسیدهای آهن و منیزیم با اکسید سیلیسیم وجود دارد در صورتی که این همبستگی بین

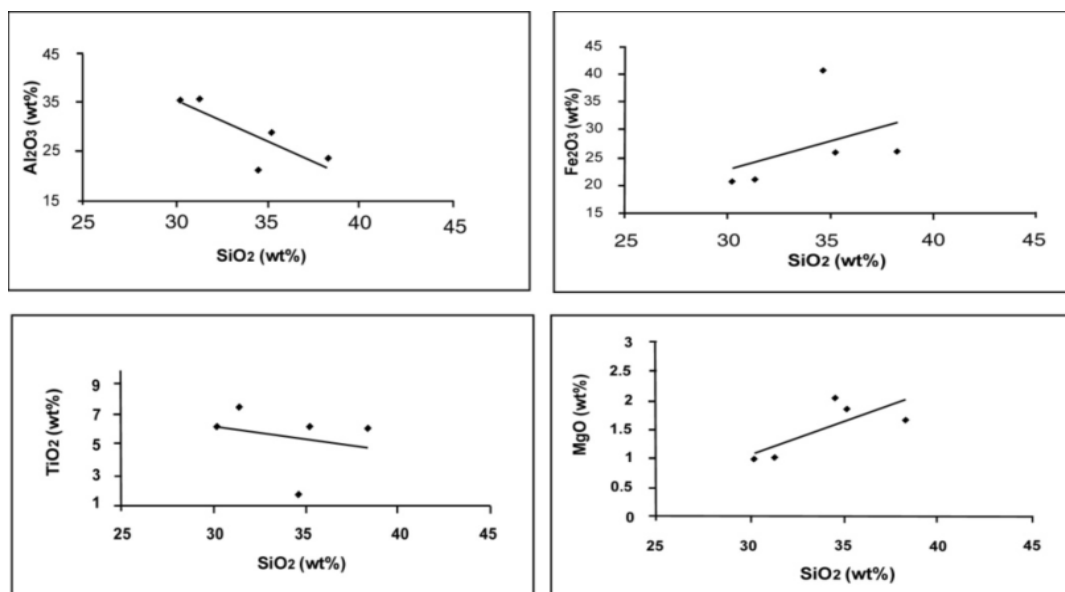


شکل ۲ تصاویر سنگ‌نگاری از متاپلیت‌های اسلاملو. به جز عکس‌های ج و چ و خ بقیه در حالت PPL گرفته شده‌اند. علائم اختصاری نام کانی‌ها روی آن‌ها درج شده‌اند. برای توضیح در مورد تشکیل دوگانه سنگ‌ها به متن رجوع شود.

جدول ۲ ترکیب سنگ کل متاپلیت‌های اسلاملو و کسر مولی آهن و آلومینیوم.

	E 83	E 86-1	E 24a	E 74	E 86-2
SiO ₂	۳۱/۳۱	۳۵/۱۸	۳۰/۲۲	۳۸/۳	۳۴/۵۷
TiO ₂	۷/۵۷	۶/۲۰	۶/۲۴	۶/۱۱	۱/۷۸
Al ₂ O ₃	۳۵/۸۰	۲۸/۶۹	۳۵/۴۴	۲۳/۶	۲۱/۰۲
Fe ₂ O ₃	۲۰/۸۴	۲۵/۸۰	۲۰/۷۲	۲۶/۲۱	۴۰/۷۳
MnO	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۸
MgO	۱/۰۵	۱/۸۵	۰/۹۸	۱/۶۷	۲/۰۳
CaO	۰/۴۵	۰/۲۱	۰/۲۲	۰/۵۳	۰/۳۲
Na ₂ O	۰/۶۹	۰/۲۳	۰/۵۲	۰/۲۵	۰/۰۵
K ₂ O	۱/۰۷	۰/۸۴	۲/۵۱	۱/۶۲	۱/۰۲
P ₂ O ₅	۰/۲۷	۰/۰۹	۰/۰۶	۰/۳۲	۰/۱۵
L.O.I.	۰/۹۵	۱/۵۶	۳/۰۹	۲/۴	-۰/۳۴
Total	۱۰۰/۰۴	۱۰۰/۷۰	۱۰۰/۰۴	۱۰۰/۷۴	۱۰۱/۴۱
XFe	۰/۹۲	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۰	۰/۹۲
XAl	۰/۵۰	۰/۳۸	۰/۴۴	۰/۳۳	۰/۲۰

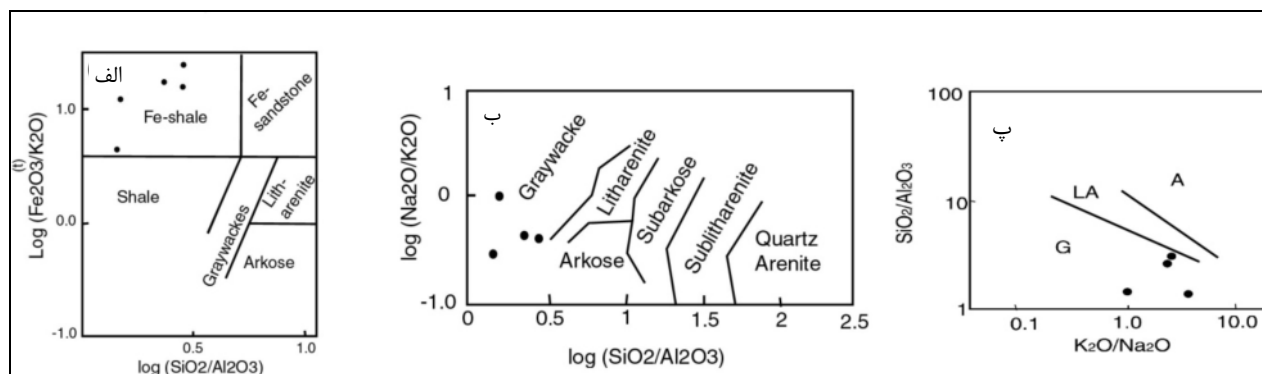
$$XAl = (Al_2O_3 - 3K_2O - Na_2O) / (Al_2O_3 - 3K_2O - Na_2O + FeO + MgO + MnO) \quad XFe = FeO / (FeO + MgO)$$

شکل ۳ نمودار تغییرات اکسیدهای آهن، آلومینیوم، منیزیم و تیتانیوم نسبت به SiO₂ در متاپلیت‌های اسلاملو.

پروتولیت متاپلیت‌ها و سنگ خاستگاه رسوب

برای تعیین نوع سنگ رسوبی قدیمی می‌توان از عناصر اصلی استفاده کرد. بدین منظور از نمودارهای هرون [۲۳] و پتی‌جان و همکاران [۲۴] استفاده شد بنابراین نمودارها، سنگ مادر رسوبی اولیه از نوع گریوک و شیل آهنی است (شکل ۴-الف و

ب). همچنین در نمودار ارائه شده توسط کری‌سر و همکاران [۲۵]، نمونه‌ها در گستره‌ی گریوک قرار گرفته‌اند (شکل ۴-پ). محورهاى این نمودارها بر مبنای تغییرات لگاریتمی اکسیدهای مربوطه انتخاب شده‌اند.



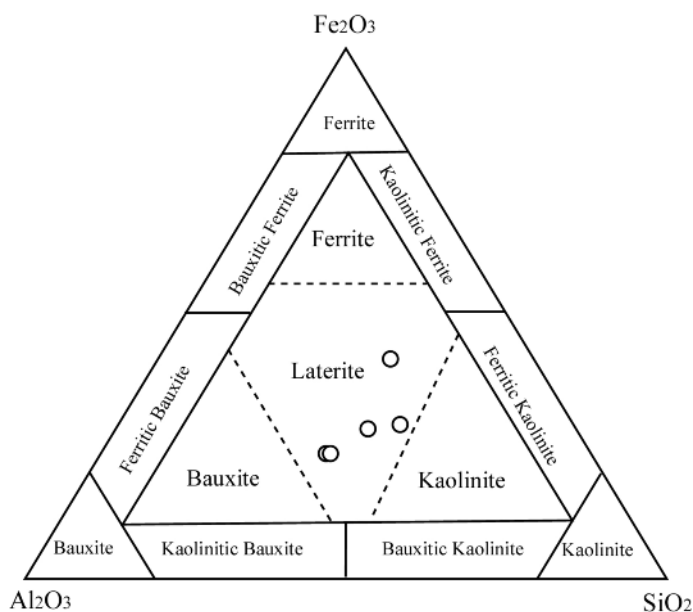
شکل ۴ الف) نمودار رده‌بندی سنگ‌های رسی ([۲۴])، مرزها اصلاح شده‌اند ([۲۳]). بنابر این نمودار، متاپلیت‌های اسلاملو از نوع گریوک هستند. ب) رده‌بندی هرون [۲۳] که بر اساس آن متاپلیت‌ها از نوع شیل آهنی هستند. پ) در نمودار ارائه شده توسط کریسر و همکاران [۲۵] نیز متاپلیت‌های اسلاملو در گستره‌ی گریوک واقع شده‌اند. علائم: G: greywacke, LA: litharenite, A: arkose.

در سازند پرمین استان آذربایجان غربی (به بخش زمین‌شناسی منطقه رجوع شود)، احتمال اینکه سنگ مادر متاپلیت‌های مورد بررسی لاتریتی بوده باشد وجود دارد. به عبارت بهتر متاپلیت‌های اسلاملو در واقع متالتریت هستند.

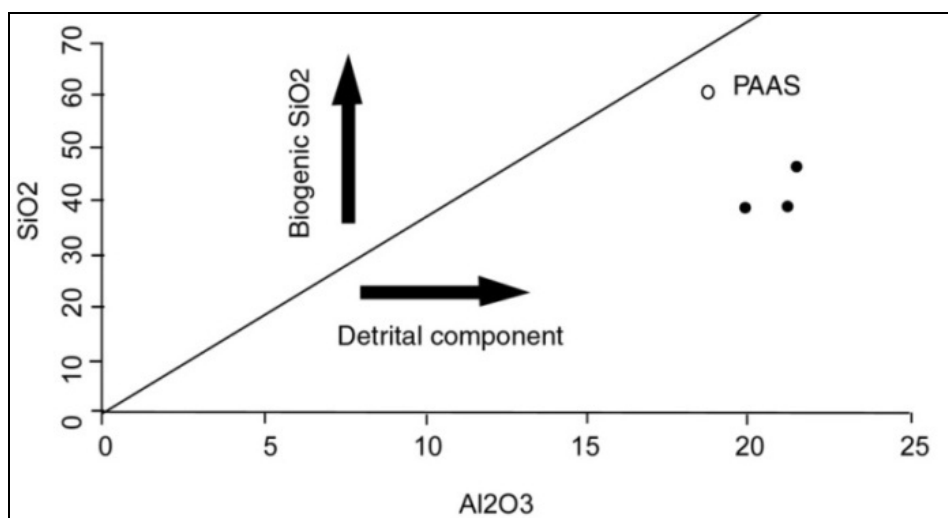
در نمودار ۶ تأثیر سیلیس زیست نهاد در رسوب‌ها مورد بررسی قرار گرفته است [۲۸]. چنانکه ملاحظه می‌شود متاپلیت‌های اسلاملو در میدان سیلیس تخریبی واقع شده‌اند که این حاکی از عدم تأثیر سیلیس زیست نهاد در این متاپلیت هاست. به طور کلی این نمودار و بالا بودن میزان آلومینیوم حاکی از خاستگاه تخریبی و قاره‌ای رسوب‌هاست.

نسبت Al_2O_3/TiO_2 برای نشان دادن ترکیب سنگ مادر رسوب‌ها نیز محاسبه شد [۲۶]. میزان این نسبت برای سنگ خاستگاه مافیک کمتر از ۱۴ و برای سنگ خاستگاه آذرین حد واسطه بین ۱۹ و ۲۸ است. میزان این نسبت در متاپلیت‌های اسلاملو بین ۳/۰۳ تا ۱۰/۵ است (با مقدار میانگین ۵/۰۵۸) که حاکی از سنگ خاستگاه مافیک برای رسوب‌ها است.

با عنایت به محتوای بالای اکسید آهن و آلومینیوم، از نمودار آلو [۲۷] برای بررسی احتمال بوکسیتی بودن نمونه‌ها استفاده شد (شکل ۵). در این نمودار همه‌ی نمونه‌ها به خوبی در گستره‌ی لاتریت واقع شده‌اند. با توجه به وجود افق لاتریتی



شکل ۵ نمودار سه اکسیدی برای تفکیک بوکسیت‌ها از سنگ‌های رسی و آهنی از آلو [۲۷]. همه‌ی نمونه‌های مورد بررسی در گستره‌ی لاتریت قرار گرفته‌اند.



شکل ۶ عدم تأثیر سیلیس بیوژن در تشکیل رسوب‌های اسلاملو، محل نمونه‌ها با دایره‌های توپر نشان داده شده است. PAAS (Post Archean Australian Shale) برای مقایسه آورده شده و با دایره توخالی نشان داده شده‌اند [۲۸].

۹۷ درصد است که نشانگر تجزیه زیاد پلاژیوکلازها به کانی‌های رسی است. به طور کلی میزان این سه پارامتر (CIA, PIA, CIW) در متاپلیت‌های اسلاملو بسیار بالاست که به دلیل بالا بودن شدت هوازدگی در محل خاستگاه است. مقدار کم CaO می‌تواند ناشی از تعدیل‌های کانی‌شناسی نظیر آلبیتی شدن پلاژیوکلاز [۳۴، ۳۳] یا اسمکتیتی شدن ایلیت [۳۴] باشد. علت سرشار بودن متاپلیت‌های اسلاملو از آلومینیوم و تیتانیم را می‌توان به شدت بالای هوازدگی نسبت داد [۲۹-۳۱]. تهی-شدگی متاپلیت‌های اسلاملو از سدیم، کلسیم و پتاسیم را نیز می‌توان به شدت بالای هوازدگی فلدسپارها نسبت داد.

تبادل جرم شیمیایی

به منظور مقایسه‌ی شیمی سنگ کل متاپلیت‌های اسلاملو با متاپلیت‌های استاندارد نمودار عنکبوتی شکل ۸ ترسیم شده است. در این نمودار درصد وزنی اکسیدهای متاپلیت‌های اسلاملو نسبت به متاپلیت‌های آگو [۳۵] بهنجار شده‌اند. این متاپلیت‌ها معرف ترکیب میانگین متاپلیت‌های بررسی شده توسط دانشمندان مختلف است که برای مقایسه مورد استفاده قرار می‌گیرند (مثال: [۳]). با توجه به نمودار مربوطه، متاپلیت‌های اسلاملو نسبت به متاپلیت‌های آگو از اکسیدهای آلومینیوم، تیتانیم و آهن سرشار بوده و از اکسیدهای کلسیم، سیلیسیم، منگنز، پتاسیم، منیزیم و سدیم فقیر است. این مطلب و تفاوت با متاپلیت‌های نوعی خود معرف متالائیتی بودن سنگ‌های مورد بررسی است.

درجه‌ی دگرسانی سنگ خاستگاه

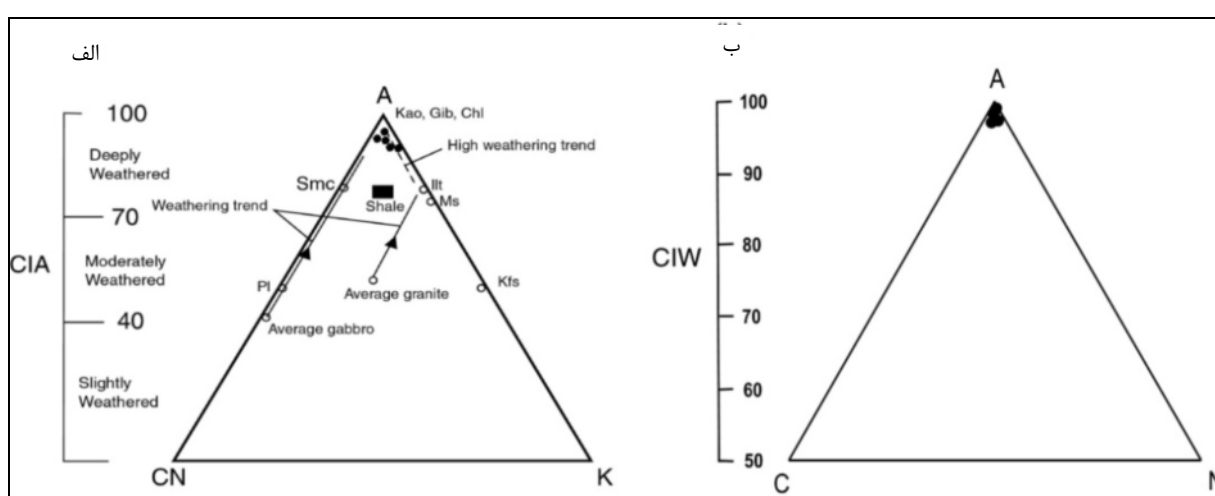
عناصر اصلی و فرعی گل‌های امروزی، درجه‌ی هوازدگی را در ناحیه‌ی خاستگاه مشخص می‌سازند [۲۹]. این امر در مورد متاپلیت‌ها نیز صادق است. هوازدگی ناحیه‌ی خاستگاه باعث تهی‌شدگی از عناصر قلیایی و قلیایی خاکی و غنی‌شدگی از آلومینیوم و تیتانیم در سنگ‌های رسوبی خشکی‌زاد می‌شود [۲۹-۳۱]. به‌منظور بررسی درجه‌ی هوازدگی و تأثیر آن در ترکیب شیمیایی رسوب‌های حاصل، شاخص‌های متفاوتی وجود دارند که CIA (Chemical Index of Alteration) [۹]، CIW (Chemical Index of Weathering) [۳۱] و PIA (Plagioclase Index of Alteration) [۳۲] از آن جمله‌اند. در جدول ۳ مقادیر و مرجع‌های این شاخص‌ها در نمونه‌های متاپلیتی اسلاملو نشان داده شده‌اند.

در نمودار مثلثی ACNK متاپلیت‌های اسلاملو در نزدیکی رأس A رسم شده‌اند که حاکی از شدت بالای هوازدگی است به طوری که مقادیر CIA بیش از ۸۰ درصدند (شکل ۷-الف). با توجه به اینکه شاخص CIA به دگرتهادی پتاسیم حساس است، می‌توان از شاخص‌های دیگری استفاده کرد که CIW از آن جمله است. این شاخص به غنی‌شدگی پتاسیم طی دگرتهادی حساس نبوده و فرض بر این است که به هنگام خروج عناصر سدیم و کلسیم طی هوازدگی، عنصر آلومینیوم در سیستم باقی می‌ماند. در نمودار ۷-ب متاپلیت‌های اسلاملو در نزدیکی رأس A واقع شده‌اند که حاکی از شدت بسیار بالای هوازدگی است. شاخص دیگر PIA بوده و دارای مقادیر ۹۴ تا

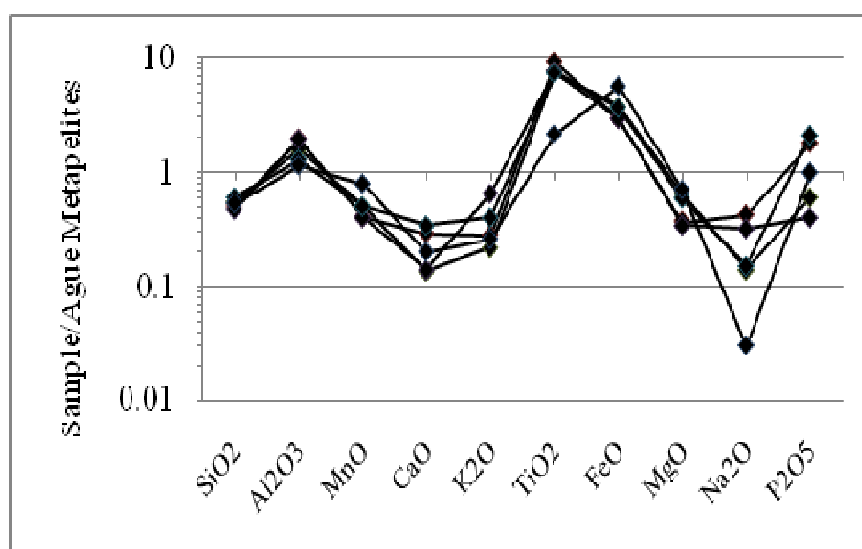
جدول ۳ مقدار شاخص‌های هوازدگی CIA, CIW, PIA در متاپلیت‌های اسلاملو و مراجع مورد استفاده.

اندیس	E 83	E 86-1	E 24 a	E 74	E 86-2	مراجع مورد استفاده
CIA	٪۹۲٫۵۹	٪۹۴	٪۸۹	٪۸۰	٪۹۳	[۹]
CIW	٪۹۵	٪۹۷	٪۹۷	٪۸۲	٪۹۷	[۳۱]
PIA	٪۹۵	٪۹۷	٪۹۶	٪۹۴	٪۹۷	[۳۲]

$CIA=100[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O+K_2O)]$
 $CIW=100[Al_2O_3/(Al_2O_3+CaO+Na_2O)]$
 $PIA=100[(Al_2O_3-(K_2O))/(Al_2O_3+CaO+Na_2O-K_2O)]$



شکل ۷ الف) نمودار مثلثی ACNK طراحی شده توسط یانگ و نسبیت [۹]، در این نمودار $A=Al_2O_3$ و $CN=CaO+Na_2O$ و $K=K_2O$ هستند. چنانکه در این نمودار دیده می‌شود شدت هوازدگی بیش از ۹۰ درصد است. ب) مثلث ACN. نمونه‌ها، نزدیک به رأس A بوده که حاکی از شدت بسیار بالای هوازدگی است.



شکل ۸ الگوی تغییرات عناصر اصلی متاپلیت‌های اسلاملو که نسبت به متاپلیت‌های آگو [۳۵] به‌هم‌جار شده‌اند.

به ظاهر افزایش نشان دهند [۳۷]. در نتایج تجزیه، چیزی وجود ندارد که با آن بتوان یکی از این دو گزینه را انتخاب کرد. اگر شواهدی مستقل درباره چگونگی تغییر جرم یا حجم سنگ در هوازدهی داشته باشیم، مسئله حل می‌شود. این گونه شواهد معمولاً دست یافتنی نیستند، بنابراین فقط می‌توان با یک فرض اختیاری پیش رفت. در طول فرآیندهای دگرسانی معمولاً عناصر تیتانیوم و آلومینیوم بی‌تحرك اند [۳۸]. در این بررسی عنصر آلومینیوم به عنوان عنصر ناظر بی‌تحرك انتخاب شده است. چنانکه در جدول ۴ نشان داده شده، محاسبه از طریق مراحل زیر صورت می‌گیرد:

نتایج تجزیه را با توزیع خطای تجزیه‌ای به ۱۰۰ درصد می‌رسانیم (ستون‌های PC* و E*). ۲- فرض می‌کنیم Al_2O_3 ثابت است. فرآیند هوازدهی باعث کاهش وزن ۱۰۰ گرم سنگ تازه شده و در نتیجه مقدار Al_2O_3 به ظاهر از ۱۶/۷۲ به ۳۵/۹۱ درصد افزایش یافته است. بنابراین وزن کل سنگ به نسبت (۳۵/۹۱)/(۱۶/۷۲) یا از ۱۰۰ گرم به ۴۶/۵۶ کاهش یافته است. مقدار هر یک از اجزا در ۴۶/۵۶ گرم را می‌توان با ضرب مقدار هر یک (ستون E*) در این نسبت (۰/۴۶۵۶) به دست آورد. از این راه ارقام ستون الف به دست می‌آیند. ۳- کاهش یا افزایش هر جزء با کسر کردن ارقام ستون الف از ارقام ستون PC* به دست می‌آید (ستون ب). ۴- درصد کاهش یا افزایش هر جزء با تقسیم کردن ارقام ستون ب بر ارقام ستون PC* محاسبه شده و ارقام ستون پ را می‌دهد.

چنانکه در جدول ۴ دیده می‌شود، برخلاف آنچه در نمودار ۷ دیده شد، آلومینیوم و آهن افزایش نیافته‌اند بلکه کاهش یافته‌اند، هرچند این کاهش بسیار کم بوده است (کمتر از یک درصد). بر اساس این محاسبات، SiO_2 به مقدار ۷۳/۷۴ درصد مقدار اولیه، کاهش یافته است. پس از اکسید سیلیسیم، بیشترین کاهش مربوط به اکسیدهای منیزیم، کلسیم، سدیم و پتاسیم است. تنها اکسید افزایش یافته براساس این محاسبات، تیتانیوم است که افزایشی در حدود ۳۴۴ درصد نشان می‌دهد. بنابراین همواره بایستی دقت کرد که با استفاده از نتایج آنالیز شیمی سنگ کل نمی‌توان به افزایش یا کاهش واقعی اکسیدها پی برد و به این منظور بایستی بررسی‌های انتقال جرم انجام شود.

درصد وزنی میانگین P_2O_5 در متاپلیت‌های اسلاملو تقریباً برابر با درصد وزنی این اکسید در متاپلیت‌های متوسط آگو است. یکی از رهیافت‌های شیمی هوازدهی، بررسی تغییرات کلی ترکیب، از سنگ سالم تا مراحل گوناگون تخریب آن است. به این منظور ترکیب متاپلیت‌های اسلاملو با ترکیب رس‌های پلاژیک کارمایکل [۳۶]، مقایسه شده است (جدول ۴). این مقایسه بر این اساس استوار است که شدت هوازدهی متاپلیت‌های اسلاملو نسبت به رس‌های پلاژی استاندارد کارمایکل بیشتر است، چون شاخص شیمیایی هوازدهی در متاپلیت‌های اسلاملو نسبت به رس‌های استاندارد بسیار بزرگتر است (جدول ۳). از جدول ۴ بلافاصله از دست رفتن برخی از اجزا دیده می‌شود که به ویژه برای Na, Si و به مقدار کمتر برای K و Ca چشمگیر است. این ترتیب از دست رفتن عناصر، در هوازدهی بسیاری از سنگ‌ها رایج است اما به هیچ وجه جامع نیست. اینکه دقیقاً در هر مورد خاص نخست کدام جزء ناپدید می‌شود، به عوامل گوناگون مانند ترکیب کانی، بافت سنگ، آب و هوا، زهکشی و میزان رخنمون بستگی دارد بنابراین ارائه کلیات مفید دشوار است [۳۷]. تعیین مقدار هر یک از اجزای از دست رفته، دشوارتر است. البته هر تجزیه فقط مقادیر نسبی عناصر گوناگون موجود در یک مرحله خاص از هوازدهی را نشان می‌دهد. برای مثال اگر یک سنگ هوازده قسمت اعظم سیلیسیم و پتاسیم و فقط مقدار کمی از آلومینیوم و آهن اولیه خود را از دست داده باشد، تجزیه آن چنانکه نتایج تجزیه E و PC در جدول ۴ نشان می‌دهد، افزایشی ظاهری در مقدار دو عنصر اخیر را نشان خواهد داد. روشن است که برای توضیح دو تجزیه که کاهشی در برخی اجزا و افزایشی در دیگر اجزا نشان می‌دهند، می‌توان گمان‌های مختلفی ارائه کرد. احتمالاً افزایش و کاهش، هر دو ممکن بوده است؛ به عبارت دیگر هوازدهی ممکن است در حالی که جرم کل سنگ ثابت باقی می‌ماند، با از دست رفتن برخی از عناصر و افزوده شدن برخی دیگر همراه باشد، یا اینکه یک جزء ممکن است با از دست رفتن اجزاء دیگر، تحت تأثیر هوازدهی قرار نگیرد. در اینجا اجزای ثابت و دیگر اجزایی که مقدار از دست رفتن آنها ناچیز است، افزایشی ظاهری نشان خواهند داد. بنابراین هوازدهی ممکن است باعث کاهش تمام عناصر شود و عناصری که کمترین کاهش را دارند،

جدول ۴ محاسبه‌ی ترکیب مواد اضافه شده و از دست رفته طی هوازدگی ستون E که ترکیب را برحسب درصد وزنی ارائه می‌کند. ستون‌های E و PC به ترتیب مقادیر اکسیدهای متاپلیت‌های اسلاملو و رس‌های پلاژی کارمایکل [۳۶] است. ستون‌های PC* و E* مقادیر اکسیدها با خطای تجزیه‌ای پخش شده است، لذا مجموع به ۱۰۰ رسیده است. ستون الف وزن محاسبه شده هر اکسید باقی مانده از هوازدگی ۱۰۰ گرم سنگ سالم را با فرض ثابت بودن Al_2O_3 ، بر حسب گرم نشان می‌دهد. ستون ب، از دست رفتن و افزوده شدن اکسیدهای مختلف بر حسب گرم و ستون پ همان از دست رفتن و افزوده شدن را بر حسب درصد مقادیر اولیه نشان می‌دهد.

	PC	E	PC*	E*	الف	ب	پ
SiO ₂	۵۹/۹۰	۳۱/۳۱	۵۵/۲۹	۳۱/۴۰	۱۴/۵۷	-۴۰/۷۲	-۷۳/۷۴
Al ₂ O ₃	۱۶/۶۰	۳۵/۸۰	۱۶/۷۲	۳۵/۹۱	۱۶/۶۶	-۰/۰۶	-۰/۳۶
Fe ₂ O ₃	۹/۷۰	۲۰/۸۴	۹/۷۷	۲۰/۹۰	۹/۷۰	-۰/۰۷	-۰/۷۲
TiO ₂	۰/۷۸	۷/۵۴	۰/۷۹	۷/۵۶	۳/۵۱	+۲/۷۲	+۳/۴۴
MgO	۳/۴۰	۱/۰۵	۳/۴۲	۱/۰۵	۰/۴۹	-۲/۹۳	-۸۵/۶۷
CaO	۰/۷۲	۰/۴۵	۰/۷۳	۰/۴۷	۰/۲۲	-۰/۵۱	-۶۹/۸۶
Na ₂ O	۱/۳۰	۰/۶۹	۱/۳۱	۰/۶۹	۰/۳۲	-۰/۹۹	-۷۵/۵۷
K ₂ O	۲/۷۰	۱/۰۷	۲/۷۲	۱/۰۷	۰/۵۰	-۲/۲۲	-۸۱/۶۲
H ₂ O	۹/۲۰	--	۹/۲۶	--	--	--	--
LOI	--	۰/۹۵	--	۰/۹۵	۰/۴۴	-۰/۵۱	--
Total	۹۹/۳۰	۹۹/۷۰	۱۰۰	۱۰۰	۴۶/۴۱	-۴۵/۲۹	

تعیین محیط زمین ساختی تشکیل رسوب

نمودارهای متمایز کننده، محیط زمین ساختی سنگ‌های رسوبی را مشخص می‌کنند. با توجه به اینکه برخی از عناصر طی هوازدگی به سرعت سیستم را ترک می‌کنند بایستی در اینگونه بررسی‌ها همواره احتیاط کرد [۲۹]. در نمودار FM-NAM، ارائه شده توسط یادوویچ و کتریس [۳۹] متاپلیت‌ها در میدان کلریت-هیدرومیکا واقع می‌شوند که حاکی از ته نشست رسوب‌ها در حوضه‌های برون کرانه‌ای یا برون ساحلی (offshore) است [۴۰] (شکل ۹-الف). همچنین در نمودار پیشنهادی مینارد و همکاران [۴۱] متاپلیت‌های اسلاملو در میدان حاشیه‌ی فعال قاره واقع شده‌اند (شکل ۹-ب). البته باید افزود که قرارگیری نمونه‌ها در موقعیت حاشیه‌ی فعال قاره به معنی تشکیل رسوب‌های لاتریتی در این موقعیت نیست. بلکه می‌تواند نشانگر تشکیل رسوب‌ها از سنگ‌های ماگمایی مربوط به قوس آتشفشانی مجاور (قوس ماگمایی ارومیه - دختر) باشد.

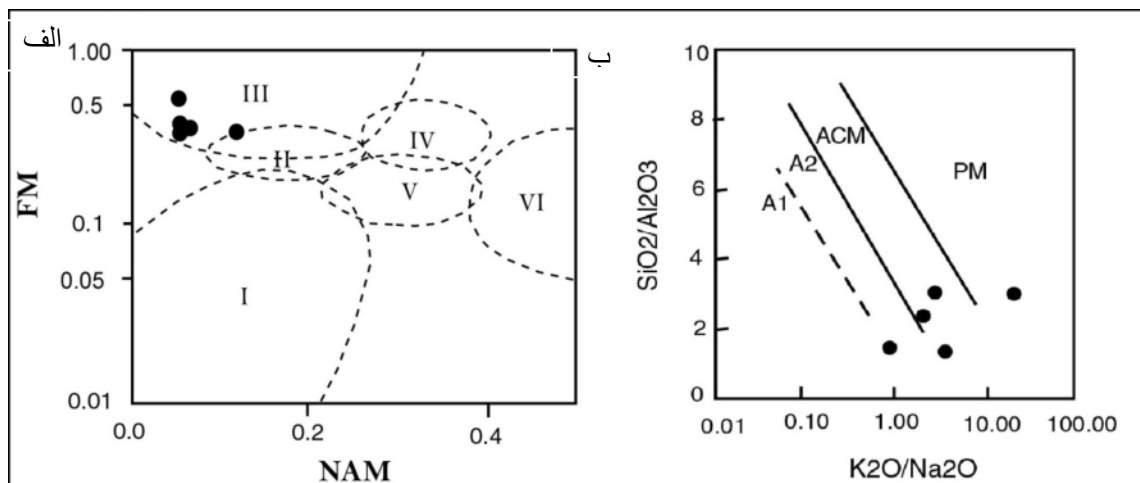
بررسی رسیدن تعادل دوگانه در متاپلیت‌های اسلاملو

دوگانه‌های مشاهده شده در هاله‌ی اسلاملو عبارتند از [۶]:

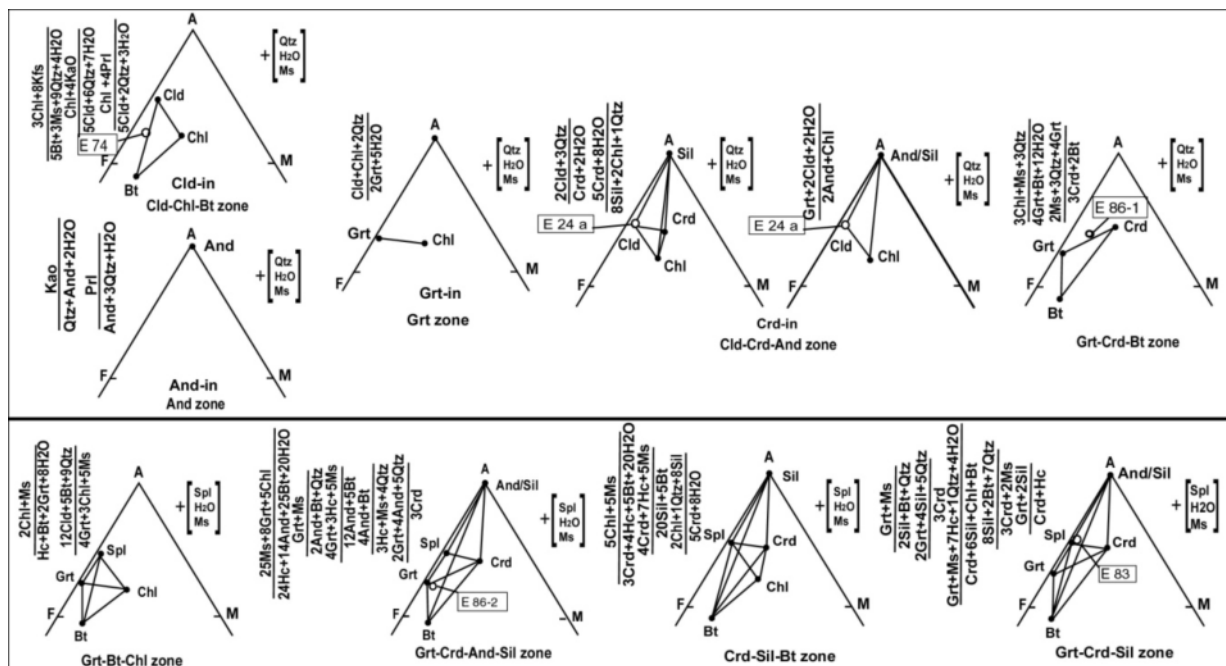
- And+Qtz-۲ Cld+Chl+Ms+Bt+Qtz-۱
 And+Cld+Sil+Ms+Chl-۴ Grt+Chl+Qtz±Cld-۳
 Crd+Grt+Bt+Ms+Qtz-۶ Crd+Cld+Sil+Chl±Ms-۵
 Grt+Crd+And+Sil+Bt+Hc-۸ Grt+Chl+Bt+Ms+Hc-۷
 Crd+Sil+Hc+Bt+Chl+Ms-۹
 Grt+Crd+Sil+Bt+Hc+Chl+And-۱۰ علائم از کتر [۱۱]

گرفته شده است.

با استفاده از نتایج تجزیه‌ی شیمی سنگ کل می‌توان تعادلی یا غیر تعادلی بودن دوگانه‌ها را مورد بررسی قرار داد. به این منظور نتایج آنالیز سنگ‌های رسی در نمودار سازگاری AFM تصویر شده‌اند (شکل ۱۰). در این نمودار کوارتز، آب و مسکویت به عنوان فازهای اضافی حضور دارند. چنانکه در شکل ۱۰ دیده می‌شود محل نمونه‌ها تقریباً مشابه است. بنابراین متاپلیت‌های اسلاملو تقریباً از نظر ترکیب شیمیایی همگن بوده و شرایط ترمودینامیکی (دما و فشار) باعث تشکیل دوگانه‌های کانایی شده‌اند.



شکل ۹ الف) نمودار مدول NAM-FM. محل نمونه‌ها در میدان III می‌باشد که حاکی از ته نشست رسوب‌ها در محیط برون کرانه‌ای است. (I) کائولینیت (II) مونت‌موریلونیت با مقادیر اندکی کائولینیت و هیدرومیکا (III) کلریت با مقادیر اندک هیدرومیکا آهن‌دار (IV) کلریت و هیدرومیکا (V) کلریت، اسمکتیت و هیدرومیکا (VI) هیدرومیکا با مقادیر قابل توجه پتاسیم فلدسپار. $M = (Fe_2O_3 + MnO + MgO) / SiO_2$ و $NAM = (Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$ [۴۰]. (ب) نمودار تعیین محیط زمین‌ساختی رسوب‌ها بر پایه اکسیدهای اصلی [۴۱] نمونه‌ها بیشتر در گستره حاشیه فعال قاره واقع شده‌اند. A1: arc setting, A2: evolved arc setting, ACM: active margin, PM: passive margin.



شکل ۱۰ روابط فازی و واکنش‌های دگرگونی در سنگ‌های رسی هاله اسلاملو بر اساس سیستم KFMASH. فازهای اضافی در سمت راست نمودارها آورده شده‌اند. الف) دوگانه‌های فاقد هرسی‌نایت، ب) دوگانه‌های دارای هرسی‌نایت. محل ترکیب شیمیایی نمونه‌ها با علامت O نشان داده شده‌اند.

دوگانه (E 86-1) در خارج از مثلث دوگانه‌ای مربوطه واقع شده است ولی چون نزدیک خط اتصال گارنت-کردیریت است شاید این یک دوگانه‌ی تعادلی باشد. بقیه ترکیبات سنگی در داخل و

احتمالاً تشکیل دوگانه‌ی مربوط به زون گارنت-کردیریت-بیوتیت (گارنت + کردیریت + بیوتیت + مسکویت + کوارتز) یک دوگانه‌ی تعادلی نیست، زیرا ترکیب شیمیایی سنگ حاوی این

- [5] Dickinson, W. R., Valloni R., "Plate settings and provenance of sands in modern ocean basins", *Geology*, 8 (1980) 82-86.
- [6] Bhatia M. R., "Plate tectonics and geochemical composition of sandstones", *Journal of Geology* 92 (1983) 181-193.
- [7] Roser B. P., Korsch R. J., "Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data", *Chemical Geology* 67 (1988) 119-139.
- [8] Floyd P. A., Leveridge B. E., "Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones", *Journal of Geological Society of London* 144 (1987) 531-542.
- [9] Nesbitt H. W., Young G. M., "Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites", *Nature* 299 (1982) 715-717.
- [10] Wronkiewicz D.J., Condie K.C. "Geochemistry and mineralogy of sediments from the Ventersdorp and Transvaal supergroups, South Africa: Cratonic evolution during the Early Proterozoic", *Geochimica et Cosmochimica Acta* 54 (1990) 343-354.
- [11] Long X., Sun M., Yuan C., Xiao W., Cai K., "Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Itai; Implications for its tectonic evolution", *Sedimentary Geology* 208 (2008) 88-100.
- [12] Hofmann A., "The geochemistry of sedimentary rocks from the Fig Tree Group, Barberton greenstone belt: Implications for tectonic", hydrothermal and surface processes during mid-Archaean times. *Precambrian Research* 143 (2005) 23-49.
- [13] Garzanti E., Doglioni C., Vezzoli G., Ando S., "Orogenic belts and orogenic sediment Provenance", *Journal of Geology* 115 (2007) 315-334.
- [14] Kasanzu C., Maboko M. A. H., Manya S., "Geochemistry of fine-grained clastic sedimentary rocks of the Neoproterozoic Ikorongo Group", NE Tanzania: Implications for provenance and source rock weathering. *Precambrian Research* 164 (2008) 201-213.

یا روی خط اتصال واقع شده‌اند که حاکی از تعادلی بودن دوگانه‌های مربوطه است (شکل ۱۰).

برداشت

متاپلیت‌های اسلاملو سرشار از آهن و آلومینیوم‌اند که به دلیل شدت بالای هوازدگی در ناحیه خاستگاه بوده و فراوانی مدی بالای کانی گارنت (آلماندن) ناشی از این امر است. در نمونه‌های پرسلیس میزان آلومینیوم پائین است در نتیجه فراوانی مدی کانی‌های آلومینوسیلیکاتی و کردیریت پائین است. بر اساس بررسی‌های زادگاه رسوبی متاپلیت‌های اسلاملو وابسته به حاشیه فعال قاره و سنگ خاستگاه آن‌ها مافیک بوده است. سنگ رسوبی اولیه از نوع گریوک و شیل آهنی ارزیابی شده است. سیلیس زیست‌زاد در تشکیل آن‌ها هیچ نقشی نداشته است. بر اساس بررسی‌های تبادل جرم، SiO_2 به مقدار ۷۳/۷۴ درصد کاهش یافته و آلومینیوم و آهن تغییر چندانی نشان نمی‌دهند. با توجه به اینکه متاپلیت‌های اسلاملو در نمودار سازگاری AFM موقعیت مشابهی دارند لذا این دما و فشار بوده است که باعث تشکیل دوگانه‌های مختلف شده است نه تغییرات شیمی سنگ کل. بنابراین می‌توانیم سیستم این سنگ‌ها را طی دگرگونی نسبتاً بسته فرض کرده و بررسی‌های دیگر را بر این مبنا استوار کنیم.

مراجع

- [1] Johnsson M. J., "The system controlling the composition of clastic sediments", *Special Paper-Geological Society of America* 284 (1993) 135-146.
- [2] Fedo C. M., Eriksson K. A., Krogstad E. J., "Geochemistry of shales from the Archean (~3.0 Ga) Buhwa Greenstone Belt, Zimbabwe: implications for provenance and source-area weathering", *Geochim. Cosmochim. Acta* 60 (1996) 1751-1763.
- [۳] مجرد م.، مؤذن م.، مؤید م.، "شیمی سنگ کل متاپلیت‌های شاهین دژ، زادگاه رسوبی و پارائزهای کانیایی"، *مجله پترولوژی*، سال اول، شماره چهارم، (۱۳۸۹) صفحه ۷۳-۸۸.
- [4] Dickinson W. R., "Interpreting detrital modes of graywacke and arkose", *J. Sediment. Petrol.*, 40 (1970) 695-707.

- argillite*", Sierra Nevada, California. Journal of Sedimentary Research 66 (1996) 107-118.
- [27] Aleva G.J.J., "Laterites: Concepts, geology, morphology and chemistry", ISIRC, Wageningen. p. (1994).
- [28] Barbera G., Mazzoleni P., Critelli S., Pappalardo A., Lo Guidice A., Cirrincione R., "Provenance of Shales and sedimentary history of the Monte Soro Unit", Sicily. Periodico di Mineralogia 75, 2-3 (2006) 313-330.
- [29] Nesbitt H. W., MacRae N. D., Kronberg B. I., "Amazon deepsea fan muds: light REE enriched products of extreme chemical weathering", Earth and Planetary Science Letter 100 (1990) 118-123.
- [30] Grandstaff D. E., Edelman M. J., Foster R. W., Zbinden E., Kimberley M. M., "Chemistry and mineralogy of Precambrian paleosols at the base of the Dominion and Pongola groups (Transvaal, South Africa)", Precambrian Research 32 (1986) 97-131.
- [31] Harnois L., "The CIW index: a new chemical index of weathering", Sedimentary Geology 55 (1988) 319-322.
- [32] Land L. S., "Frio sandstone diagenesis, Texas Gulf Coast; a regional isotopic study", American Association of Petroleum Geologists Manual, 37 (1984) 47-62.
- [33] Wintsch R. P., Kvale C. M., "Differential mobility of elements in burial diagenesis of siliciclastic rocks", J. Sedim. Res., A64 (1994) 349-361.
- [34] Velde B., "Origin and mineralogy of clays. Eds Velde", B. Springer, Berlin (1995).
- [35] Ague J. J., "Evidence for major mass transfer and volum strain during regional metamorphism of pelites", Geology 19 (1991) 855-858.
- [36] Carmichael R. S., "Practical handbook of physical properties of rocks and minerals", CRC Press, Boca Raton (1989).
- [37] Krauskopf K. P., Bird D. K., "Introduction to Geochemistry", 3rd edition, McGraw-Hill (1996).
- [38] Campbell D. J., "The vascular flora of the DSIR study area lower Orongorongo Valley", Wellington, New Zealand. New Zealand Journal of Botany 22 (1984) 223-270.
- [39] Yudovich Ya. E., Ketris M. P., "Fundamentals of Lithochemistry", St. Petersburg, Nauka, (2000) 479 (in Russian).
- [15] Kutterolf S., Diener R., Schacht U., Krawinkel H., "Provenance of the Carboniferous Hochwipfel Formation-Geochemistry versus petrography", Sedimentary Geology 203 (2008) 246-266.
- [۱۶] محامد ا، مجرد م، "زون‌بندی و واکنش‌های رخ داده در هاله مجاورتی/اسلاملو،/اشنویه"، پانزدهمین همایش زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت معلم، تهران (۱۳۹۰).
- [۱۷] نبوی م. ح، "دیپاچه‌ای بر زمین‌شناسی ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور (۱۳۵۵).
- [۱۸] آقانباتی س. ع، "زمین‌شناسی ایران"، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ دوم (۱۳۸۵).
- [۱۹] لاسمی ی، "رخساره‌ها، محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکانسی نهشته سنگ‌های پرکامبرین بالایی و پالئوزوئیک ایران".
- [20] Ghalamghash J., Bouchez J. L., Vosoughi-Abedini M., Nedelec A., "The Urumieh Plutonic Complex (NW Iran): Record of geodynamic evolution of Sanandaj-Sirjan zone during Cretaceous times- part II: Magnetic fabrics and plate tectonic reconstruction", Journal of Asian Earth Sciences 36 (2009) 303-317.
- [۲۱] محامد ا، "بررسی پدیده‌های دگرگونی مجاورتی/اسلاملو،/اشنویه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان، ایران (۱۳۹۰).
- [22] Kretz R., "Symbols For Rock Forming Minerals", American mineralogist, 68: 227-279.
- [23] Herron M.M., "Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core of log data", Journal of Sedimentary Petrology 58(5) (1983) 820-829.
- [24] Pettijohn F. J., Potter P. E., Siever R., Sand and Sandstones. New York, Springer-Verlag (1972).
- [25] Creaser R. A., Erdmer P., Sevens R. A., Grant S. L., "Tectonic affinity of Nisutlin and Avil assemblages strata from the Teslin tectonic zone", northern Canadian Cordillera: constraints from neodmium isotope and geochemical evidence. Tectonics 16 (1997) 107-121.
- [26] Girty G. H., Ridge D. L., Knaack C., Johnson D., Al-Riyami R. K., "Provenance and depositional setting of Paleozoic chert and

[41] Maynard J. B., Valloni R., Yu H. S., "*Composition of modern deep-sea sands from arc related basins*", In: LEGGET, J.K (ed), *Trench-Forearc Geology: Sedimentation and Tectonics on Modern and Ancient Active Plate Margins*. Geological Society, London, Special Publications 10 (1982) 551-561.

[40] Likhanov I. I., "*Mineral Reactions and Mass Transfer during Low- and Medium-pressure Metamorphism. Doctor of Sciences Thesis*", Novosibirsk: Geo Press, 38 (2003b) (in Russian).