

پیشنهاد تغییرات جزئی در نمودار تکامل شورابه، ارائه شده توسط اگوستر

و هاردی با بررسی شورابه دریاچه مهارلو

نوشته: فرج اله فیاضی*، محمد نخعی* و راضیه لک**

*دانشگاه تربیت معلم، گروه زمین شناسی، تهران، ایران؛ ** سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، گروه زمین شناسی دریایی، تهران، ایران

Modify of Eugster & Hardie Brine Evolution Flow Diagram in the Base of Brine of Maharlou Lake

By: F. Fayazi*, M. Nahkaei*, R. Lak**

* Teacher Training University, Department of Geology, Tehran, Iran ;** Geological Survey of Iran, Marine geology group, Tehran, Iran

تاریخ پذیرش: ۸۵/۰۵/۲۸ تاریخ دریافت: ۸۵/۰۲/۱۷

چکیده

دریاچه مهارلو یک حوضه رسوبی درون قاره‌ای بسته در جنوب باختر ایران است. وسعت دریاچه حداکثر ۲۸۰ کیلومتر مربع و ژرفای میانگین آن در زمان پربابی ۱/۵ متر است. سطح آب دریاچه متأثر از حجم آبهای سطحی و زیرزمینی وارده به آن، بارندگی در سطح دریاچه و میزان تبخیر است. تیپ آبهای وارده به دریاچه به طور عمده سولفاتی و بیکربناتی و متأثر از سازندهای زمین شناسی حوضه آبریز است. بررسی روند تکاملی دریاچه مهارلو با کمک داده‌های منتشر شده از سال ۱۳۵۴ تا ۱۳۸۱ و نتایج حاصل از تجزیه تعداد ۲۳۰ نمونه برداشت شده مربوط به سه وضعیت خشک، کم آبی و پر آبی (تابستان ۱۳۸۰، تابستان ۱۳۸۱ و بهار ۱۳۸۴) انجام گرفته است. تیپ شورابه در دوره‌های زمانی کوتاه مدت بسیار متغیر است. در مسیر تکاملی شورابه ابتدا مقادیر Na و Cl افزایش می‌یابد و تیپ شورابه از نوع Na-Mg-Cl می‌شود. در ادامه تبخیر و کاهش تراز آب، هالیت ته‌نشست می‌کند و مقدار سدیم و کلر کاهش می‌یابد و تیپ شورابه از نوع Mg-Cl-SO₄ می‌شود. اما مسیر تکاملی شورابه هنوز ادامه داشته و با ادامه تبخیر، شورابه از نوع Mg-SO₄-Cl می‌شود. مسیر تکاملی شورابه دریاچه مهارلو در مسیر III نمودار تکامل شورابه‌ها است در نتیجه آبهای غالب وارده به حوضه، می‌بایست از نوع $HCO_3 \geq Ca+Mg$ باشد. در حالی که در شرایط کنونی آبهای وارده و قابل مشاهده به دریاچه اغلب از نوع $HCO_3 \ll Ca+Mg$ است علت آن آبهای بی‌کربناتی غیر قابل رؤیتی است که به صورت چشمه‌های کارستی از بستر دریاچه وارد آن می‌شود. به نظر می‌رسد، از محل گسل در کف دریاچه آبهای بی‌کربناتی خارج می‌شود.

کلید واژه‌ها: نمودار تکامل شورابه، شورابه، دریاچه مهارلو، ژئوشیمی شورابه

Abstract

Maharlou lake located in southwest of Iran is an intra-continental sedimentary basin. Its area is about 280 km² extended with an average water depth of 1.5 m during wet seasons. The water level in the lake is controlled by several factors such as runoff volume from Maharlou catchment, underground water seepage, and direct rainfall over the lake and also evaporation. Generally, hydrochemical analysis of water resources showed that the water types are mainly bicarbonates and sulfates due to geology of the surrounding areas. Hydrochemical investigation has been carried out for a time period between 1975 and 2002 using previously published analyses together with new collected water samples. 230 samples were collected during summer 2001, summer 2002 and spring 2005. Results show a change in the brine type through time; with an Mg-SO₄-Cl type in 1970 to an Mg-Cl-SO₄ type in 2001 and currently Na-Mg-Cl brine type, in recent time, which is comparable with Great Salt Lake in USA. Due to changes in diluted water compositions from $HCO_3 \geq (Ca + Mg)$ to $HCO_3 \ll (Ca + Mg)$, the path of brine on the Eugster and Hardie flow diagram changes from row III to the path II, indicating that the bicarbonate water comes into the lake from a fault occurring in the lake floor.

Key words: Brine evolution flow diagram, Brine, Maharlou Lake, Geochemistry of brine

۱-مقدمه

دریاچه کم آب و گاه خشک می‌شود. این دریاچه، براساس تقسیم‌بندی Sonnenfeld (1991) یک حوضه رسوبی درون قاره‌ای بسته

دریاچه مهارلو یک دریاچه شورموقتی (ephemeral saline lake) است. در فصل زمستان و بهار، دریاچه پر آب و در فصل تابستان و پاییز،

۳- زمین شناسی

حوضه مهارلو در زون زاگرس چین خورده قرار گرفته و از تاقدیسه‌های به هم فشرده‌ای با امتداد محوری شمال باختر - جنوب خاور تشکیل شده است. رخنمونهای سنگی در حوضه آبریز دریاچه، شامل سنگهای رسوبی است. سازندهای تشکیل دهنده ارتفاعات این حوضه، از قدیم به جدید شامل سری هرمز، سازندهای گروه بنگستان، پابده و گورپی، آسماری- جهرم، رازک، میشان، آغاچاری و بختیاری است (آقنابتی، ۱۳۸۳؛ نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰؛ شیراز و کوار). بستر دریاچه تا ژرفای ۴۶۰ متر از سازند رازک تشکیل شده است (سازمان آب منطقه‌ای فارس، ۱۳۷۴). حفاریهای انجام شده توسط شرکت توسعه علوم زمین تا ژرفای ۲۳ متری، بیانگر آن است که تا این ژرفا رسوبات منفصل و سخت نشده دریاچه کنونی وجود دارد (شریعی بیدار، ۱۳۸۰). در نقشه لرزه‌زمین ساخت ایران (بربریان، ۱۳۶۲) از محل دریاچه، گسل چپگرد سروسدان می‌گذرد که روند شمال باختر - جنوب خاور داشته و با توجه به اینکه این گسل در کواترنر فعال بوده، به نظر می‌رسد در شکل‌گیری دریاچه بی‌تأثیر نباشد و شکل کنونی دریاچه نیز متأثر از آن است. هم‌اکنون اثری از فعال بودن گسل در منطقه دیده نمی‌شود. از دیدگاه ریخت‌زمین‌ساختی این فرونشست به گونه‌ای بین دو رشته کوه با روند شمال باختری و جنوب خاوری قرار گرفته که می‌توان تشکیل آن را به حرکات گسل سروسدان و شاخه‌های فرعی آن نسبت داد (شهرابی، ۱۳۷۳). لذا دریاچه مهارلو یک دریاچه زمین‌ساختی است.

۴- روش مطالعه و مراحل انجام کار

۴-۱- تهیه بانک اطلاعاتی

علاوه بر گردآوری اطلاعات موجود از قبیل نقشه‌های توپوگرافی، زمین‌شناسی، اطلاعات آبهای سطحی و زیرزمینی، هواشناسی، رسوب‌شناسی و ژئوفیزیک، داده‌های آبهای سطحی و زیر زمینی مربوط به دوره ۲۶ ساله ۱۳۵۴ - ۱۳۸۰ از مرکز تحقیقات منابع آب وزارت نیرو جمع‌آوری شد و همگی آنها برای پردازشهای بعدی به یک بانک داده تبدیل شد.

۴-۲- تهیه شبکه نمونه برداری

شبکه نمونه برداری دریاچه، یک شبکه منظم ۴×۴ کیلومتر در نظر گرفته شده است. برای تهیه این شبکه، به پیشنهاد Bryant et al. (1990)، از فرمول معرفی شده توسط Hakanson & Jansson (1983)، استفاده شد. ابتدا تعداد نمونه‌های مورد نیاز از فرمول زیر محاسبه و سپس شبکه مورد نظر بر اساس آن تنظیم شده است.

$$N = 2.5 + 0.5\sqrt{a.f}$$

(Intracontinental close basin) به شمار می‌آید. تا کنون مطالعات دقیق و علمی در ژئوشیمی و تعیین روند تکاملی شورابه دریاچه مهارلو انجام نشده است. وجود دوره خشک در سال ۱۳۸۰، کم‌آبی در سال ۱۳۸۱ و پس از آن دوره پرآبی سال ۱۳۸۴ سه وضعیت به طور کامل استثنایی را در سالهای اخیر ایجاد نمود که بهترین فرصت را برای نمونه برداری و انجام مطالعه فراهم کرده است.

دریاچه مهارلو در مقایسه با دریاچه‌های بختگان و طشک که در مجاورت آن قرار گرفته‌اند، از ویژگیهای خاصی برخوردار است. در مغزه‌های گرفته شده از این دریاچه، تغییر کانی‌شناسی ریزلا به‌ها بسیار شدید است و نشان می‌دهد تیپ شورابه دریاچه در مدت زمان کوتاه تغییر می‌کند. تفسیر این تغییرات سریع، مطالعات هیدروژئوشیمی دقیقی را می‌طلبید که انگیزه‌ای برای این بررسیها شد.

۲- موقعیت جغرافیایی

دریاچه مهارلو دارای طول جغرافیایی ۵۲° ۴۱' تا ۵۲° ۴۹' خاوری و عرض جغرافیایی ۲۹° ۱۷' تا ۲۹° ۲۳' ۳۰" شمالی است. این دریاچه در ۴ کیلومتری جنوب خاوری شیراز واقع شده است. راه دسترسی به دریاچه، جاده شیراز - فسا است. در زمان پرآبی، طول آن در حدود ۲۸ و پهنای آن در حدود ۱۵ کیلومتر است. وسعت دریاچه حداکثر ۲۸۰ کیلومتر مربع است. ژرفای آب دریاچه در دوره پرآبی حداکثر ۲ متر است. به دلیل ژرفای کم دریاچه و وضعیت نسبتاً مسطح بستر دریاچه تغییرات جزئی در سطح آب، سبب جابه‌جایی زیاد در خط ساحلی می‌شود (Warren, 2006).

حوضه مهارلو در یک فرونشست به نسبت بلند (۱۴۵۵ متر از سطح دریا) با روند شمال باختری - جنوب خاوری بین دو رشته کوه که از همین روند پیروی می‌کنند، قرار دارد. دریاچه، پست‌ترین نقطه حوضه آبریز مهارلو است. کوه قلات در قسمت باختری دشت شیراز با ارتفاع ۲۹۹۰ متر از سطح دریا مرتفع‌ترین نقطه حوضه آبریز مهارلو است. در حوضه آبریز مهارلو رودخانه دائمی وجود ندارد. مسیلهای نهر اعظم (رودخانه خشک) و باباجاجی شبکه اصلی آبنگاری منطقه را تشکیل می‌دهند (شکل ۱). حدود

۱۰ چشمه اصلی در حوضه آبریز مهارلو وجود دارد. تعدادی چشمه کوچک نیز در حاشیه دریاچه وجود دارد. این چشمه‌ها اغلب در بخش باختری دریاچه دیده می‌شوند. جهت جریان آب زیر زمینی در دشت آبرفتی شیراز به سمت دریاچه مهارلو است.

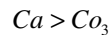
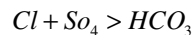
با استناد به داده‌های موجود در پایگاه اینترنتی سازمان هواشناسی کشور و آمارهای دوره‌ای آن، میانگین بیشینه دمای سالانه منطقه ۲۳ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارندگی سالانه ۳۴۱ میلی‌متر و بیشترین آن مربوط به ماههای بهمن و اسفند است. میانگین تبخیر ۲۳۹۱ میلی‌متر در سال است.

Stiff نمودارهای استیف رسم شد. شکل ۳، نمودار استیف دریاچه را در سه وضعیت پرآبی، کم آبی و خشک نشان می‌دهد.

برای تعیین تیپ شورابه، ابتدا مقادیر کاتیونها و آنیونها بر حسب درصد مولی محاسبه شد. یونهایی که کمتر از ۵ درصد از کل مقادیر باشند، در نامگذاری به حساب نمی‌آیند. یونهای بین ۵ درصد تا ۲۵ درصد در پراکنش نوشته می‌شود و مقادیر بالای ۲۵ درصد منظور می‌شوند. ابتدا کاتیونهای غالب و سپس آنیونهای غالب به ترتیب نوشته می‌شوند (Hardie & Eugster, 1970).

۶- تفسیر داده‌ها

ترکیب شیمیایی شورابه‌ها، به املاح موجود در آبهای وارده، آبهای جوی و اکشهای هوازدگی شیمیایی وابسته است (Eugster, 1980). هوازدگی شیمیایی سنگهای مختلف با آبهای طبیعی کاتیونها و آنیونهای متفاوتی را تولید می‌کند. شکل ۴ نشان دهنده تیپ آبهایی است که در اثر هوازدگی سنگهای مختلف ایجاد می‌شود. در واقع دانستن نسبت $\frac{Ca+Mg}{Co_3}$ برای تعیین مسیر تکاملی شورابه بسیار مهم است (Jones & Deocampo, 2004). سنگهای حوضه آبریز دریاچه مهارلو شامل تبخیرها، کربناتها، کلسیت و سولفیدها و به میزان خیلی کم سیلیکاتها می‌باشند (Fayazi et al., 2007). لذا با توجه به شکل ۴ به نظر می‌رسد که آبهای وارده به حوضه یکی از ویژگیهای زیر را داشته باشند.



با توجه به اینکه کربناتها عمده‌ترین سنگهای حوضه آبریز را شامل می‌گردند، لذا انتظار می‌رود مورد دوم یعنی مقدار کربنات تقریباً برابر کلسیم و بیش از منیزیم در تجزیه شیمیایی آبهای وارده به دریاچه به فراوانی دیده شود در حالی که چنین وضعیتی فقط در رودخانه خشک و آبهایی که از بستر دریاچه وارد آن می‌گردد، دیده می‌شود. برخی از آبهای حوضه آبریز مانند رودخانه باباحاجی و چاههای سروستان و قره باغ به دلیل عبور از سازندهای دریایی قدیمی واجد کانیهای تبخیری و یا نزدیکی به گنبد نمکی سروستان، کانیهای تبخیری را حل نموده‌اند در نتیجه بیشتر ترکیب $Cl+SO_4 > HCO_3$ دارند.

در آبهای طبیعی ترکیب شیمیایی دریاچه‌های شور با کمتر از ۱۰ حلال اصلی غالب است که شامل Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} و به ندرت SiO_2 می‌باشند (Hardie, 1991). تکامل ژئوشیمیایی دریاچه‌های شور، با ترکیب شیمیایی آبهای وارده، جدایش انتخابی املاح و تغلیظ در اثر تبخیر صورت می‌گیرد (Sinha & Raymahashoy, 2004).

N: تعداد نمونه، a: مساحت دریاچه برحسب کیلومتر مربع، f: ضریب کشیدگی ساحل (سواحل خطی ضریب ۱ و سواحل دایره‌ای و بسته ضریب ۱۰).

۴-۳- بررسیهای صحرایی و نمونه برداری

از هر سلول شبکه نمونه برداری، برداشت آب در دو وضعیت کم آبی و پرآبی و نیز در نیمرخ قائم یکی از سطح و دیگری در ژرفا و در فاصله سه سانتی متری سطح رسوبات انجام گرفته است. همچنین در وضعیت نسبتاً خشک از هر سلول واجد آب، یک نمونه برداشت شد. نمونه آبهای وارده به دریاچه اعم از رودخانه‌ها، چشمه‌ها، قناتها و چاهها برداشت شده است. از هر نمونه، دو بطری ۲۵۰ میلی لیتری تهیه، در دمای صفر تا ۴ درجه سانتی گراد نگهداری (eg. Bryant et al., 1984) و همزمان به دو آزمایشگاه ارسال شد. در زمان برداشت نمونه آب، ژرفای نمونه برداری و پارامترهای فیزیکی و شیمیایی آب از قبیل مقدار اکسیژن حل شده (DO)، رسانایی الکتریکی (EC)، کل جامد محلول (TDS)، pH و شوری با استفاده از دستگاه مولتی پارامتر (Hach SensIons 156) اندازه گیری شده است (eg. Suangkiattikum, 2005; Ermilio, 2005; Hunt et al., 2006).

۴-۴- آزمایشها

تجزیه کاتیونها و آنیونهای اصلی شامل سدیم، منیزیم، کلسیم، پتاسیم، بیکربنات، کربنات، سولفات و کلرید نمونه آب چاهها، چشمه‌ها و رودخانه‌ها با دستگاه IC (Automated Knauer Ion chromatograph) با ستونهای Hamilton x100 برای آنیونها و Hamilton x200 برای کاتیونها موجود در سازمان زمین شناسی کشور صورت گرفت. در غلظت بالای املاح امکان تجزیه آب دریاچه به دلیل درصد بسیار بالای کلرید سدیم، با IC ممکن نبود در نتیجه از روش تیتراسیون استفاده شد.

۵- پردازش داده‌ها

پس از اخذ نتایج آزمایشهای مختلف، داده‌های صحرایی و همچنین اطلاعات مرکز تحقیقات منابع آب، بانک اطلاعاتی کاملی ایجاد و با استفاده از نرم افزار Rockwork گزینه هیدروژئوشیمی، نمودارهای پایپر مختلف (Piper, 1994) رسم شد. یک نمونه از آن در شکل ۲ دیده می‌شود که بر روی آن مقادیر مختلف آبهای سطحی، زیر زمینی و شورابه دریاچه پس از محاسبه میانگین مشخص شده است. به همین طریق تیپ آب انواع ورودیهای دریاچه نیز مشخص شد. با استفاده از همین نرم افزار، گزینه

کلروره دارد. احتمال دیگر آن است که در گذشته آبدهی رودخانه خشک، بیشتر و آبدهی رودخانه باباجاجی کمتر از امروزه بوده است کما اینکه در تصویر ماهواره‌ای سال ۱۹۷۶ رودخانه خشک بسیار پرآب‌تر و رودخانه باباجاجی کم‌آب‌تر از سال ۲۰۰۱ است.

در شکل ۲، مشاهده می‌شود که ترکیب آب دریاچه در فصل پرآبی و کم‌آبی در تمامی گستره آن، به رغم ورودیهایی با ترکیب مختلف، در اطراف یک رأس مثلث تمرکز دارد. به طوری که در نمودار سه وجهی مربوط به آنیونها، در نزدیکی وجه Cl و در نمودار سه وجهی کاتیونها، در نزدیکی وجه $Na+K$ قرار می‌گیرد. نمودار استیف شورابه نیز به خوبی نشان‌دهنده مقدار بالای یونهای کلر و سدیم در شورابه است. تغلیظ تبخیری و ته‌نشست کانیها سبب تفکیک املاح و تفریق ژئوشیمیایی عناصر موجود در شورابه و لذا تکامل آن می‌شود. یکی از مهم‌ترین این فرایندها، چرخه‌های خشک و تر و به عبارت دیگر ته‌نشست و انحلال پوسته‌های شورزه‌زده است (Jones & Vandenburg, 1966; rever & Smith, 1978). این پوسته‌ها حاوی کربناتهای آلکان، ژپس و کانیهای قابل حلی از قبیل کلریدهای سدیم، سولفاتها و کربناتها باشند. این پوسته‌های سطحی ممکن است توسط بارشهای بعدی دوباره حل شوند و به شورابه اضافه شوند اما این انحلال انتخابی است و کانیهایی که کمتر قابل حل هستند از قبیل ژپس و کربناتها به صورت خرد شده و شکسته در ابعاد پیل، گرانول، ماسه و رس در داخل دریاچه باقی بمانند و کلریدها حل می‌شوند (Krinlsly, 1970). پوسته‌های شوره زده گاه در اثر حرکت یک فیلم شورابه از زیر سطح به سمت سطح، در زون وادوز در اثر پدیده پمپ تبخیر و خشک‌شدگی کامل آن ایجاد می‌شود (Hsu & Seigenthaler, 1969).

مسئله مهم دیگر در وضعیت شورابه، افزایش مقدار یون منیزیم نسبت به سدیم با تبخیر بیشتر و خشک‌شدگی دریاچه است. میزان یونهای گزارش شده از دریاچه توسط (Krinlsly, 1970) به شرح زیر است: $Mg=339040 \text{ ppm}$ $Na=5200 \text{ ppm}$ $Cl=5320 \text{ ppm}$. تبدیل این مقادیر بر حسب میلی اکوی والان بر لیتر و مقادیر اندازه‌گیری شده اخیر در جدول ۱ نشان داده شده است.

از مقایسه مقادیر فوق نتیجه می‌گیریم که در سال ۱۹۷۰ مقدار منیزیم به مراتب بالاتر از سدیم بوده است. این وضعیت وقتی ایجاد می‌شود که میزان تبخیر بسیار بالا و شورابه سطحی در حال خشک شدن بوده است. در غلظتهای بیشتر و تبخیر بالاتر هالیت ته‌نشست کرده و مقدار سدیم و کلر به رغم بالا رفتن غلظت شورابه، کاهش می‌یابد اما مقدار منیزیم افزایش می‌یابد. نمودار تغییرات میزان یونهای اصلی موجود در شورابه در حین تبخیر نیز گویای این موضوع است. همانطور که در نمودار دیده می‌شود، در ابتدای مراحل تبخیر شورابه از نوع $Na-Cl$ است. با افزایش میزان تبخیر،

بر اساس شکل ۳، تیپ شورابه دریاچه در شرایط کنونی (سال ۱۳۸۱ و ۱۳۸۴) از نوع (SO_4) , Na , Mg , Cl است که قابل مقایسه با داده‌های گزارش شده از دریاچه بزرگ نمک آمریکا است (Domagalski et al., 1989; Hardie & Eugster, 1987). اما سال ۱۳۸۰ تیپ شورابه از نوع Mg , Cl , SO_4 بوده است. مسیر تکاملی شورابه دریاچه مهارلو از آبهای وارده به آن، مسیر III در نمودار تکامل شورابه (Eugster & Hardie, 1978) است (شکل ۵)، در نتیجه ترکیب شیمیایی آبهای غالب وارده به حوضه، بایستی دارای $HCO_3 > Ca+Mg$ باشد. درحالی که در شرایط کنونی آبهای وارده به حوضه به رغم آنکه درصد یونهای متفاوت می‌باشند، اغلب دارای ترکیب شیمیایی $HCO_3 \leq Ca+Mg$ هستند.

در فرایند II آبهای ورودی اولیه فقیر از یون بیکربنات است و در آنها $HCO_3^- \ll Ca + Mg$ است و شورابه‌های حاصل از نوع کلروره و یا سولفات می‌باشند. در واقع مسیر II، شورابه‌ای با ترکیب $Ca- Na-Cl$ یا $Na- SO_4- Cl$ را ایجاد می‌کند. ترکیب آبهای وارده قابل رؤیت و امروزی غالباً دارای مقدار بیکربنات بسیار پایین است. در واقع آبهای وارده از نوع II می‌باشند.

فرایند I حاکی از لزوم آبهای ورودی با میزان پایین یون کلسیم و منیزیم برای شوراب آلکان کلیایی است و ترکیب آبهای ورودی به حوضه‌ها به صورت $HCO_3^- >> Ca^{+2} + Mg^{+2}$ که به طور عمده آبهای رقیق متئوریک را شامل می‌شوند.

در فرایند III، در آبهای ورودی اولیه هیچ یک از یونهای HCO_3^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} غالب نیستند و شورابه‌های حاصل یکی از انواع $Mg- SO_4-Cl$ یا $Na-Mg-Cl$ و یا $Mg-Ca-Na-Cl$ می‌گردد. تیپ شورابه دریاچه مهارلو در سالهای اخیر از شورابه‌های نوع II است. به عبارت بهتر تیپ آن $Mg-Cl-SO_4$ (تابستان ۱۳۸۰) و یا $Na- Mg-Cl$ (بهار ۱۳۸۴) است. وجود تناقض بین ترکیب آبهای وارده به دریاچه مهارلو (فرایند II) و تیپ شورابه آن (فرایند III)، به مفهوم آن است که آبهای دیگری با مقدار بیکربنات بیشتری وارد دریاچه مهارلو می‌شود که مسیر تکاملی III را طی نموده‌اند اما این آبها قابل رؤیت نمی‌باشند و در مباحث بعدی با شواهد رسوب‌شناسی قوی مشخص می‌شود که وجود چشمه‌های بیکربناتی در بستر دریاچه در ترکیب شیمیایی شورابه نقش مهمی داشته است. علت دیگر تناقض در ترکیب آبهای وارده با تیپ شورابه، رشد و توسعه شهری، کشاورزی و صنعتی و استفاده از آب رودخانه‌ها است. همانطور که در آمار آبدهی آبهای سطحی در فصل یک ملاحظه می‌شود، آبدهی رودخانه نظرآباد در سالهای اخیر صفر شده است در حالی که این رودخانه در گذشته یکی از رودخانه‌های مهم حوضه آبریز مهارلو محسوب می‌شده است. رودخانه خشک ترکیب بیکربناتی دارد و رودخانه باباجاجی ترکیب

• تیپ شورابه دریاچه مهارلو در شرایط کنونی (پر آبی بهار ۱۳۸۴ و کم آبی تابستان ۱۳۸۱) از نوع (Na, Mg, Cl, SO_4) است این در حالیست که در دوره خشک (تابستان ۱۳۸۰)، تیپ شورابه از نوع Mg, Cl, SO_4 و در سال ۱۹۷۰ (۱۳۴۹) از نوع Mg, SO_4, Cl بوده است. مسیر تکاملی شورابه دریاچه مهارلو در نمودار تکامل شورابه قرار نمی گیرد لذا لازم است نمودار هاردی و آگوستر اندکی تغییر یافته و به صورت شکل ۵ درآید. همان طور که در شکل دیده می شود با افزایش تبخیر و کاهش آبهای وارده به حوضه، غلظت املاح در شورابه افزایش می یابد و علاوه بر کربناتها و سولفاتها، کلروها و بویژه هالیت ته نشست می کند. با شروع ته نشست هالیت، یونهای سدیم و کلر از سامانه خارج می شود و غلظت املاح منیزیم و سولفات بالا می رود لذا تیپ شورابه تغییر می کند.

• ترکیب آبهای وارده به دریاچه مهارلو از نوع II یعنی $HCO_3 < Ca + Mg$ است در حالی که تیپ شورابه دریاچه، در انتهای مسیر III نمودار تکامل شورابه است. در مسیر III نمودار آبهای وارده دارای مشخصات $HCO_3 \geq Ca + Mg$ می باشند. وجود تناقض بین ترکیب شیمیایی آبهای وارده به حوضه و تیپ شورابه بیانگر آن است که شورابه فعلی متأثر از آبهایی با ترکیب متفاوت از آبهای قابل رؤیت در حوضه رسوبی خود است. بررسیها نشان می دهد دریاچه در بستر خود از

- آبهای بیکربناتی که از سازندهای کارستی منشأ می گیرند، تغذیه می شود که هیدرژنوشیمی و روند تکاملی دریاچه را متأثر نموده است.
- وجود چشمه های بیکربناتی از کف دریاچه مهارلو در بخش مرکزی شمال باختری در دوره پر آبی سبب انحلال نمکهای بستر دریاچه شده و موجب افزایش ژرفا و غلظت املاح شورابه در آن بخش شده است این چشمه ها به احتمال از محل یک گسل در کف دریاچه خارج می شود.

۹- تشکر و قدردانی

بی شک بدون کمک و مساعدتهای سایر عزیزان انجام این پروژه ممکن نبود. از تمامی همکاران مدیریت زمین شناسی دریایی بویژه جناب آقای دکتر حامدی مدیر پیشین، جناب آقای مهندس سعدالدین، مدیر فعلی و مسئولان محترم آزمایشگاههای سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور کمال تشکر و قدردانی را می نمایم. همچنین از آقای محسن کلانی به سبب همکاریهای صمیمانه سپاسگزاریم.

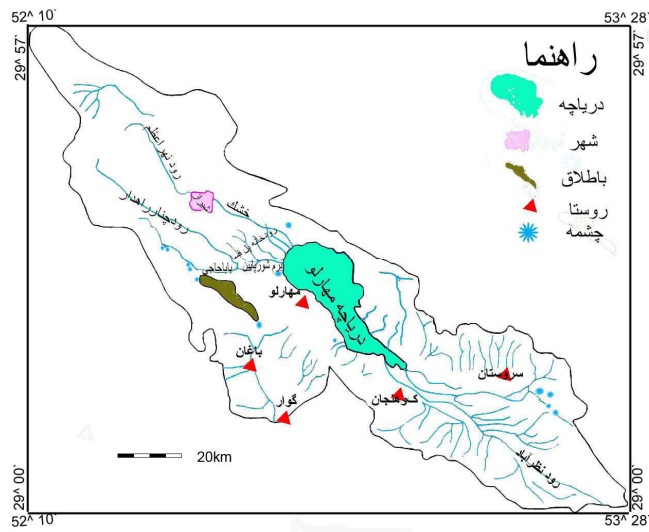
مقدار سدیم، کاهش و مقدار منیزیم افزایش می یابد و شورابه از نوع $Mg-Cl-SO_4$ خواهد شد. در ترکیب شیمیایی دریاچه مهارلو سال ۱۳۸۰، درصد منیزیم بالاتر از سدیم است. همچنین داده های گزارش شده توسط Krinsley (1970)، بیانگر آن است که مقدار منیزیم بسیار بالاتر از سدیم است. هر چه تبخیر بالاتر رود، نسبت منیزیم به سدیم افزایش می یابد و با توجه به داده های اقلیمی موجود، سال ۱۹۷۰ و چند سال قبل از آن، سال خشک و کم بارشی بوده است لذا دریاچه بسیار کم آب و در حال خشک شدن بوده است. تغییر تیپ شورابه در پلایاها و دریاچه های شور دیگری نیز گزارش شده است برای مثال در پلایای Caringa در مرکز استرالیا، تیپ شورابه از $Na, (Mg), Cl, (SO_4)$ به $Na, (Mg), Cl$ و $Na, Cl, (SO_4)$ تغییر کرده است (Arakel & Hongyun, 1994).

در تجزیه شیمیایی نمک کف دریاچه در فصل کاملاً خشک مقدار درصد کلر بین ۵۴ تا ۵۷، سدیم بین ۳۱ تا ۳۷ و درصد منیزیم بسیار پایین و کمتر از ۱/۵ است (لک، ۱۳۸۵). این نتایج و تلفیق آن با نتایج آب نشان می دهد که در شرایط خشک، با ته نشست کلرور سدیم محلول در آب و وارد شدن آن در فاز جامد (هالیت)، درصد منیزیم در آب نسبت به سدیم افزایش می یابد (warren, 1999; Eugster & Jones, 1979). در این حالت منیزیت ته نشست می کند. وجود لامینه های منیزیت در چرخه های رسوبی حاکی از دوره های نسبتاً خشک دریاچه است (Lak et al., 2007).

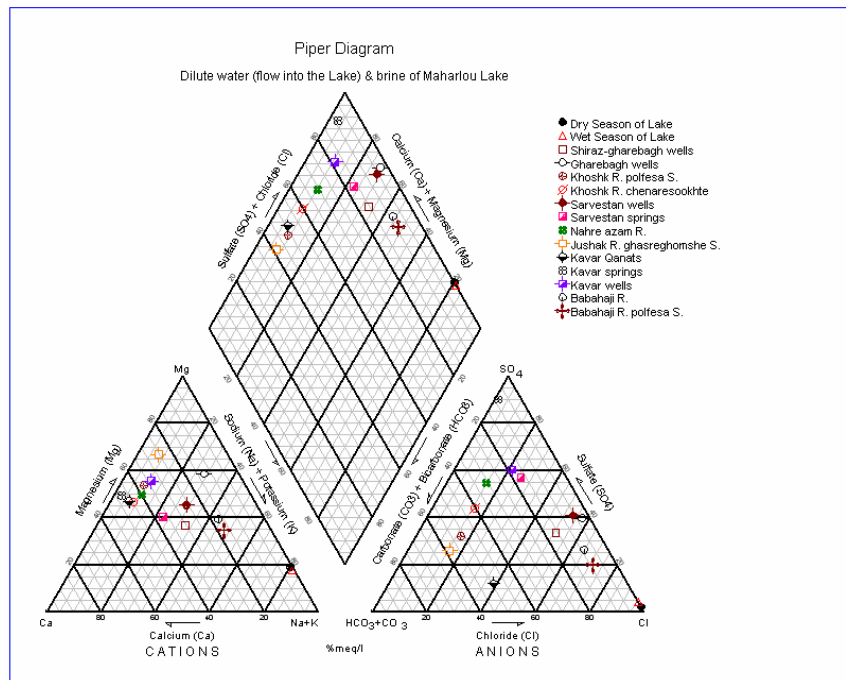
با دلایل و مستندات فوق به جرأت می توان گفت شورابه تیپ $Na-Mg-Cl$ در اثر تکامل و تبخیر بالاتر، مسیر تکاملی دیگری را طی می کند و با ته نشست هالیت به شورابه تیپ $Mg-Cl-SO_4$ تبدیل می شود. اما مسیر تکاملی هنوز هم ادامه دارد و با افزایش تبخیر و ته نشست بیشتر هالیت، شورابه تیپ $Mg-SO_4-Cl$ حاصل می شود. لذا نمودار ارائه شده توسط Eugster & Hardie (1978) نیاز به بازنگری و اندکی تغییرات دارد (شکل ۵). در نمودار تکامل شورابه، هیچ ارتباط تکاملی بین تیپ شورابه $Mg-SO_4-Cl$ و $Na-Mg-Cl$ وجود ندارد لذا این دو به یکدیگر تبدیل نمی شوند و به هیچ عنوان پاسخگوی شرایط حاکم بر دریاچه مهارلو نیست.

۷- نتیجه گیری

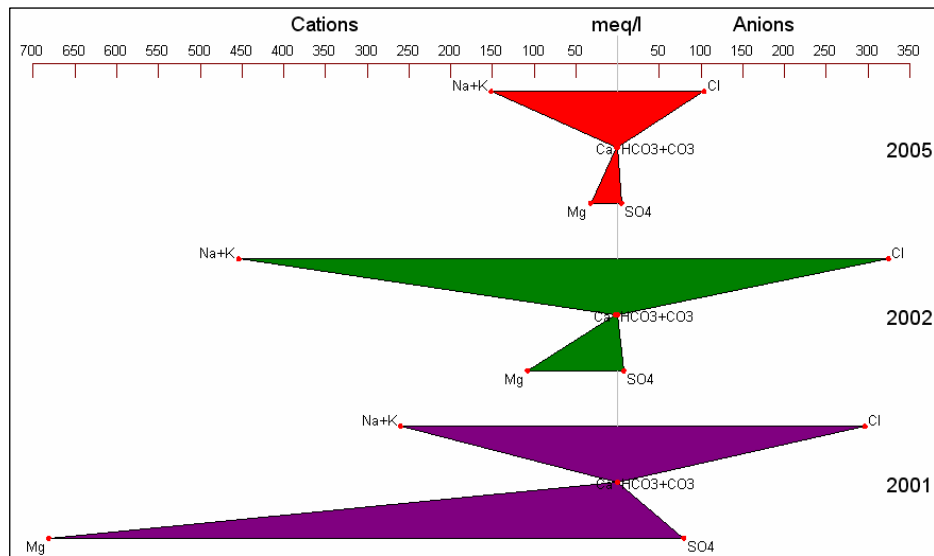
این مطالعات نتایج بسیار ارزنده ای در برداشت که برای اولین بار مطرح می شود و به اختصار شامل موارد زیر است:



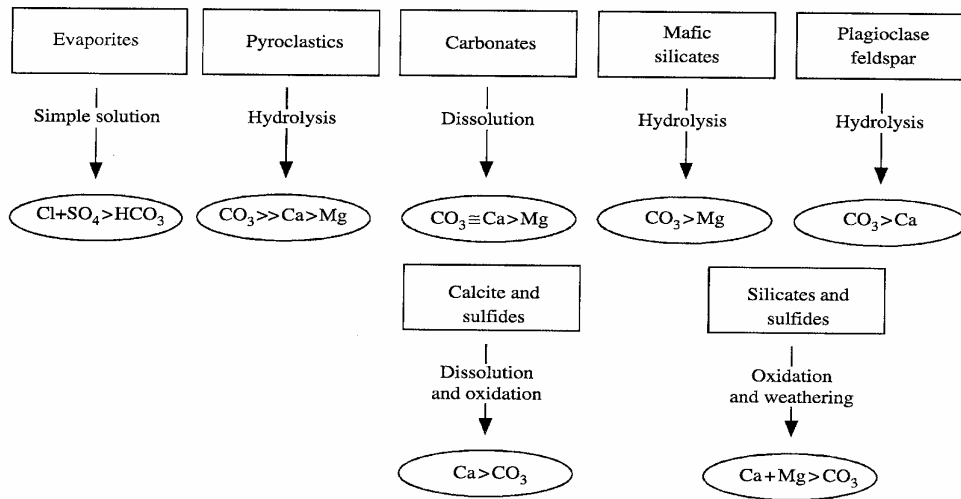
شکل ۱- نقشه آبنگاری حوضه آبریز دریاچه مهارلو (وزارت آب و برق، ۱۳۵۰ با اندکی تغییرات)



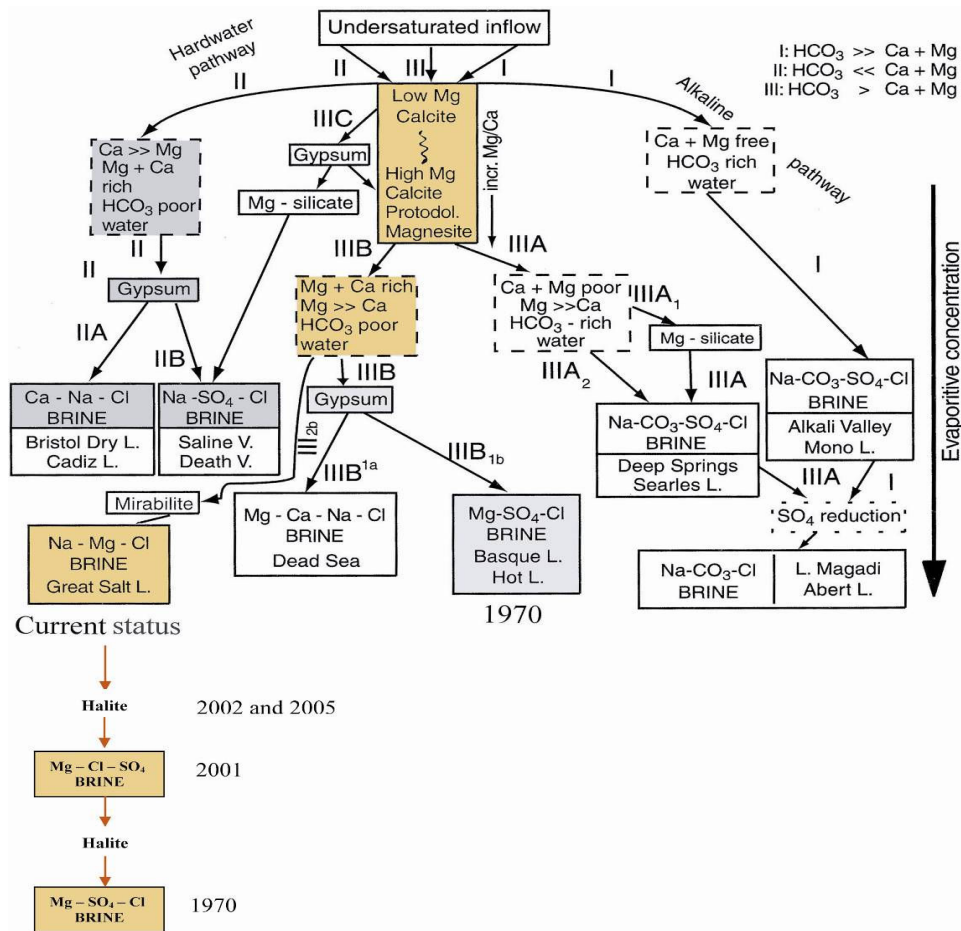
شکل ۲- نمودار پایپر کاتیونها و آنیونهای اصلی موجود در شورابه و کلیه آبهای وارده به دریاچه مهارلو



شکل ۳ - نمودار استیف کاتیونها و آنیونهای اصلی شورابه در دو وضعیت پرآبی و کم آبی



شکل ۴ - تیپهای مختلف آبهای که در اثر هوازدگی شیمیایی سنگهای مختلف با آبهای طبیعی ایجاد می گردند (Jones & Deocampo, 2004).



شکل ۵- نمودار جریان‌ی پیشنهادی تکامل شورابه (برگرفته از نمودار جریان‌ی Eugster & Hardie, 1978 با اندکی تغییرات)

جدول ۱- مقایسه غلظت یونهای مختلف شورابه دریاچه مهارلو در چهار زمان مختلف.

SO ₄	Na	Cl	Mg	Ions
				Year
	473	313	56506	1970
3801	5801	9983	8283	2001 (Dry)
354	10409	11502	1313	2002 (Semi dry)
215	3474	3671	396	2005 (Wet)

کتابنگاری

- آقا نباتی، ع.، ۱۳۸۳- زمین شناسی ایران، طرح تدوین کتاب، سازمان زمین شناسی کشور.
- بربریان، م.، ۱۳۶۲- گزارش دگرریختی قاره‌ای در فلات ایران زمین منضم به نقشه سائزموکتونیک ایران، سازمان زمین شناسی کشور، ۶۲۵ صفحه.
- سازمان آب منطقه‌ای فارس، ۱۳۷۴- گزارش مطالعات ژئوفیزیک در محل سد علاالدوله، ۶۱ صفحه
- شریعتی بیدار، م.، ۱۳۸۰- بررسی و اکتشاف املاح دریاچه‌های مهارلو، بختگان و طشک، جلد اول (دریاچه مهارلو)، ۲۲۳ صفحه.
- شهرابی، م.، ۱۳۷۳- دریاها و دریاچه‌های ایران، طرح تدوین کتاب، سازمان زمین شناسی کشور، ۲۳۰ صفحه.
- لک، ر.، فیاضی، ف.، ۱۳۸۵- شناسایی و تعیین منشأ منیزیت در رسوبات بستر دریاچه مهارلو، بیست و پنجمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- مرکز تحقیقات منابع آب وزارت نیرو- کلیه گزارشات مربوط به سالهای ۱۳۵۴ تا ۱۳۸۰ در محدوده حوضه آبریز مهارلو.
- وزارت آب و برق، واحد آب، ۱۳۵۰- بررسی منابع آبهای سطحی و زیرزمینی حوضه آبریز مهارلو.
- نقشه‌های زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شیراز و کوار، سازمان زمین شناسی کشور.

References

- Arakel, A.V. & Hongyun, T., 1994- Seasonal evaporate sedimentation in desert playa Lakes of the Karinga Creek drainage system central Australia, In: Renault R. W. and Last W.M. (eds.), *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lake*. Society for Sedimentary Geology (SEPM), Tulsa, PP91-101.
- Bryant, R.G., Drake, N.A., Millington, A.C. & Sellwood, B.W., 1990- The chemical evolution of the brines of Chott El Djerid. In: Renault R. W. and Last W.M. (eds.), *Sedimentology and Geochemistry of Modern and Ancient Saline Lake*. Society for Sedimentary Geology (SEPM), Tulsa, PP3-20.
- Domagalski, J.L., Orem, W.H. & Eugster, P., 1989- Organic geochemistry and brine composition in Great Salt, Mono, and Walker Lakes, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 53, PP2857-2872.
- Drever J. I. & Smith C. L., 1978- Cyclic wetting and drying of the soil zone as an influence on the chemistry of ground water in arid terrains. *American Journal of Science*, v.278, PP1448-1454.
- Ermilio, J.R., 2005- Characterization Study of a Bio-infiltration Storm Water BMP. M.Sc. thesis, Villanova University, 130 p.
- Eugster, H.P. & Hardie, L.A., 1978- Saline lakes, In: Lerman A. (ed), *Lakes, Chemistry, Geology and Physics*. Springer – Verlag, PP237-293.
- Eugster, H.P. & Jones, B.F., 1979- Behavior of major solutes during closed-basin brine evolution. *American journal of science*, v.279, PP609-631.
- Eugster, H.P., 1980- Geochemistry of evaporitic lacustrine deposits: *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, v.8, PP35-63.
- Fayazi, F., Lak, R., Nakhaei, M., 2007- Hydrogeochemistry and brine evolution of Maharlou saline Lake, *Carbonates and Evaporites*, v.22, no.1, PP33-42.
- Hakanson, L. & Jansson, M., 1983- *Principles of Lake Sedimentology*, Springer -Verlag, 350p.
- Hardie, L.A. & Eugster, H.P., 1970- The evolution of closed -basin brines, *Mineral. Society American Special Publish*, v. 3, PP: 273-290.
- Hardie, L.A., 1991- On the significance of evaporates. *Annual Review Earth Planetary Science*. v.19, PP131-168.
- Hsu, K.J. & Seigenthaler, C., 1969- Preliminary experiments on hydrodynamic movement induced by evaporation and their bearing on the dolomite problem, *Sedimentology*, no.12, PP11-26.
- Krinsley, D.B., 1970- *Geomorphological and paleoclimatological Studies of the Playa of Iran*, US Government Printing Office Washington D.C., 20,402p.
- Lak, R., Fayazi, F., Nakhaei, M., 2007- Sedimentological evidences of a major drought in the Mid - Late Holocene of the Lake Maharlou, SW Iran, 4th International Limnogeology Congress, Abstract book.
- Hunt, J.W., Anderson, B.S., Phillips, B.M., Tjeerdema, R.S., Richard, N., Valconnor, V., Worcester, K., Angelo, M., Bern, A., Fulfrost, B. & Mulvaney, D., 2006- Spatial relationship between water quality and pesticide application rates in agricultural watersheds, *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 121, PP245-262.
- Jones, B.F. & Deocampo, D.M., 2004- Geochemistry of saline lakes, In *Treatise on Geochemistry*. US Geological Survey, PP393-424.
- Jones, B. F. & Vandenburg, A. S., 1966- Geochemical influences on the chemical character of closed basins. *IAHS Symp. Garda, Hydrol. Lakes Reservoirs*, v. 70, PP435-446.
- Piper, A.M., 1994- A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis, *Transactions of the American Geophysical Union*, v.25, PP914.



- Sonnenfeld, P., 1991- Evaporite Basin Analysis. In: Force E.R. (ed), Sedimentary and Diagenetic Mineral Deposits: A basin analysis approach to exploration, PP159-169.
- Sinha, R. & Raymahashay, B.C., 2004- Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Rajestan, India, Sedimentary Geology., no.166, p:59-71.
- Suangkiattikum, C., 2005- Solute Balance Modeling of Lake Naivasha (Kenya): Application of DMS, M.Sc. thesis, The International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, 114 p.
- Warren, J., 1999- Evaporites: Their Evolution and Economics, Blackwell Science, 438p.
- Warren, J., 2006- Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons, Springer, 1035p.