



## شبیه‌سازی تاثیر کیفیت و کمیت رودخانه‌های ورودی بر ترکیب دریاچه ارومیه



ندا امامی، دانشجوی کارشناس ارشد مهندسی عمران-مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی شریف، Neda1emami@yahoo.com

مسعود تجریشی، استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، Tajrishy@sharif.ir



### چکیده:

دریاچه ارومیه دریاچه‌ای بسته است که آب‌های ورودی به آن اغلب رودخانه‌های آب شیرین، و تنها خروجی آن تبخیر از سطح دریاچه می‌باشد. نوع املاح تبخیری به ترکیب شیمیایی آب‌های ورودی و مسیر تحول ژئوشیمیایی شوراب بستگی دارد. با کمک مدل‌سازی MIX می‌توان تاثیر اختلاط آب‌های ورودی به دریاچه را بر غلظت هر یک از یون‌های موجود نشان داد. با توجه به اینکه حجم و ترکیب آوردها به دریاچه ارومیه در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت است، در این مقاله مدل‌سازی به صورت ماهانه برای بازه زمانی ۱۳۸۶-۱۳۹۲ انجام شده است. به منظور شبیه‌سازی از نرم‌افزار PHREEQC و پایگاه اطلاعاتی Pitzer استفاده شده است. نتایج مدل‌سازی نشان داد که رودخانه‌ها جز در فصول با آورد بسیار بالا تاثیر قابل توجهی بر کیفیت آب دریاچه ندارند.

**کلید واژه‌ها:** دریاچه ارومیه، غلظت نمک، مدل‌سازی MIX، PHREEQC

## Simulation of the effect of the quality and quantity of incoming rivers on the composition of Urmia Lake

Neda Emami<sup>1</sup>, Masoud Tajrishy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Masters student, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Neda1emami@yahoo.com

<sup>2</sup>Professor, Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology, Tajrishy@sharif.ir

### Abstract:

Urmia lake is a closed lake with the often input of fresh water rivers and the only output from evaporating of the lake surface. The kind of evaporated salts is dependent on the chemical composition of entry water and the geochemical altering of pathway. MIX modeling can illustrate the integration effect of incoming waters on the concentration of each available ions. In this paper, due to different volume and composition of the lake inputs in different period of times, the monthly modeling was conducted for the period of 1386-1392. PHREEQC software and the Pitzer database were used for simulation. The results of modeling showed that the rivers have no significant effect on the quality of the lake water except in the seasons with high inputs.

**Keywords :** ( Urmia Lake, Salt concentration, MIX Modeling, PHREEQC )



### مقدمه:

دریاچه‌های شور، دریاچه‌هایی بسته با درجات متفاوت شوری با ویژگی‌های منحصر به فرد در مناطق خشک و نیمه خشک

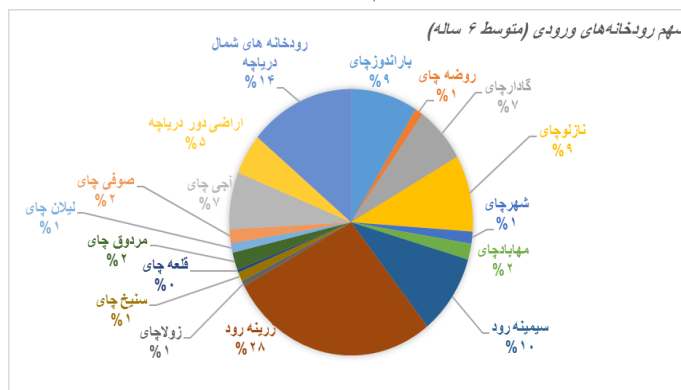
جهان واقع هستند. دلیل این شوری، بیشتر بودن تبخیر از جریان‌های ورودی، و یا ورودی آب شور و یا هر دو عامل است ( Eugster )

and Hardie, 1978). دریاچه ارومیه به عنوان بزرگترین دریاچه فوق اشباع نمکی ایران با شرایط فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاص نه تنها در میان دریاچه‌های داخلی بلکه در میان سایر دریاچه‌های شور جهان مانند بحرالمت و دریاچه بزرگ نمک یوتا در آمریکا، از موقعیت ویژه‌ای برخوردار است. تکامل ژئوشیمیایی دریاچه‌های شور، با ترکیب شیمیایی آب‌های وارده، جدایش انتخابی املاح و تغلیظ در اثر تبخیر صورت می‌گیرد (Sinha and Raymahashoy, 2004). شوری دریاچه با افزایش بارش و آورد رودخانه‌ها در فصل بهار کاهش و در اواخر تابستان و اوایل بهار با افزایش تبخیر و تغلیظ آب، مجدداً افزایش می‌یابد. آب دریاچه ارومیه حاوی مقادیر بالایی از یون‌های مختلف می‌باشد که شوری آب آن را به بیش از ۴۰۰ گرم در لیتر می‌رساند. شوری بالای دریاچه موجب شده که کلراید سدیم آستانه اشباع بودن را رد و در کف دریاچه ترسیب شود؛ در نتیجه با ورود آب‌های شیرین مجدداً نمک کف در آب حل شده و شوری آب دریاچه را بالا می‌برد.



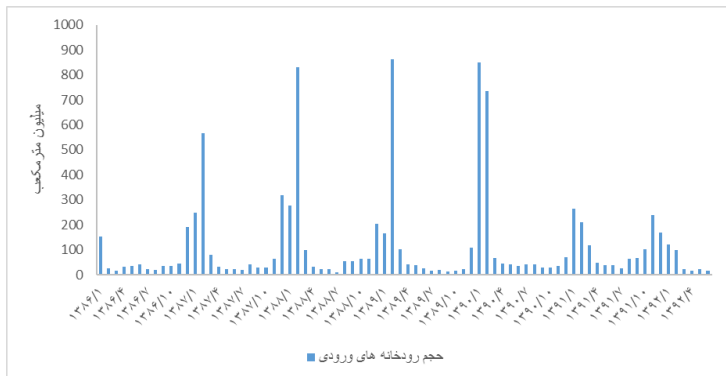
### بحث و روش تحقیق:

آبدهی سالانه رودخانه‌های حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مجموع از تغییرپذیری زیادی برخوردارند، به نحوی که نسبت مجموع جریان‌های سطحی حوضه در یک سال پر آب به یک سال خشک بیش از ۱۰ برابر می‌باشد (سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۳۹۵). همچنین احداث سدها در طی سال‌های اخیر و گسترش اراضی کشاورزی با کاهش حجم آب ورودی، خطر خشک شدن دریاچه ارومیه را افزایش داده است. سهم رودخانه‌های ورودی متوسط ۶ ساله از سال آبی ۸۶-۸۷ تا ۹۱-۹۲ در شکل ۱ نمایش داده شده است. زرينه‌رود و سيمينه‌رود با ۲۸٪ و ۱۰٪ سهم، بیشترین آب را وارد دریاچه می‌کنند. آجی‌چای و سنیخ‌چای که بیشترین حجم املاح را وارد دریاچه می‌کنند به ترتیب ۷٪ و ۱٪ سهم ورودی‌ها را شامل می‌شوند.



شکل ۱- سهم هر یک از رودخانه‌های ورودی متوسط ۶ ساله (سال آبی ۸۶-۸۷ تا ۹۱-۹۲)

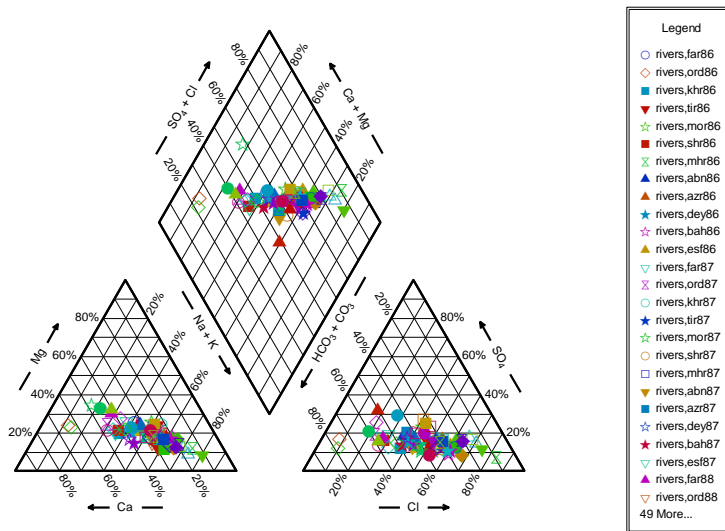
در این مقاله ۱۲ رودخانه اصلی منتهی به دریاچه ارومیه آجی‌چای، باراندوزچای، دریان‌چای، زرينه‌رود، زولاچای، سنیخ‌چای، سيمينه‌رود، شهرچای، قلعه‌چای، گادارچای، مهابادچای و نازلوچای بررسی شده‌اند. بیشترین آورد مجموع رودخانه‌ها برابر با ۸۷۰ میلیون متر مکعب در اردیبهشت ۱۳۸۹ و کمترین آورد حدود ۱۰ میلیون مترمکعب در مهر ۱۳۸۸ مشاهده شده است. بیشترین آورد رودخانه‌ها عموماً در ماه‌های فروردین و اردیبهشت و کمترین در ماه‌های مرداد، شهریور و مهر گزارش گردیده است (شکل ۲).



شکل ۲- حجم رودخانه‌های ورودی به دریاچه ارومیه ۱۳۸۶-۱۳۹۲

با استفاده از نرم افزار Aq.QA دیاگرام پایپر برای میانگین غلظت رودخانه‌های ورودی به دریاچه ارومیه از فروردین ۱۳۸۶ تا شهریور ۱۳۹۲ رسم شد (شکل ۳). در نمودار پایپر، آنیون‌های اصلی در سه رأس یک مثلث و کاتیون‌های اصلی نیز در سه رأس مثلث مجاور قرار می‌گیرند و ترکیب شیمیایی هر نوع آب بر اساس درصد کاتیون‌ها و آنیون‌ها بر روی آن، به صورت یک نقطه رسم می‌گردد. ترکیب غالب آنیون رودخانه‌ها، عمدتاً کلر و بیکربنات است و سولفات کمی دارند و ترکیب غالب کاتیون آنها عمدتاً سدیم و کلسیم است و منیزیم کمی دارند. غلظت رودخانه‌های ورودی در دوره زمانی مورد مطالعه دارای نوسان است.

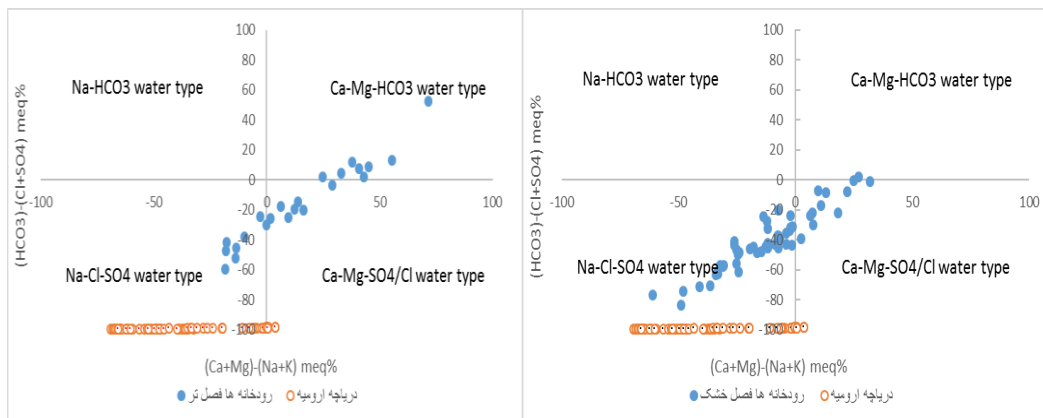
Piper Diagram



شکل ۳- دیاگرام پایپر ترکیب رودخانه‌های ورودی ۱۳۸۶-۱۳۹۲

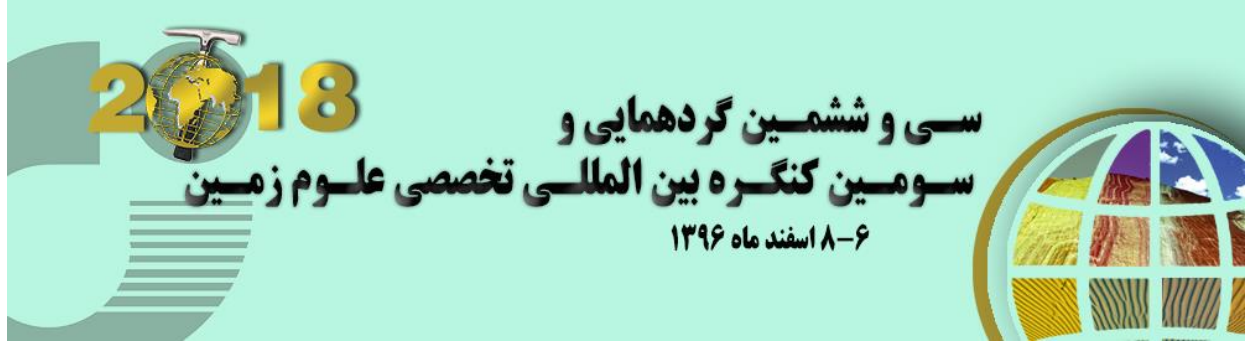
Chadha (1999) یک دیاگرام جدیدی را برای طبقه‌بندی ژئوشیمیایی آب‌های طبیعی و توصیف داده‌های شیمیایی توسعه داد. در این دیاگرام اختلاف درصد میلی‌اکی‌والان (Ca+Mg) و (Na+K) روی محور X و اختلاف درصد میلی‌اکی‌والان آنیون‌های اسیدی ضعیف (CO<sub>3</sub>+HCO<sub>3</sub>) و آنیون‌های اسیدی قوی (Cl+SO<sub>4</sub>) روی محور Y نمایش داده می‌شود. با کمک این دیاگرام تیپ نمونه آب مشخص می‌شود. برای مشاهده تغییرات غلظت ورودی در فصل تر و خشک، دیاگرام چاد رسم گردیده است (شکل ۴).

نمونه‌های با حجم ورودی ماهانه کمتر از ۱۰۰ میلیون مترمکعب در ماه به عنوان فصل خشک و بالای این عدد به عنوان فصل تر انتخاب شد. فصل‌های تر عمدتاً بهار و زمستان هستند که اغلب بارش‌ها در این دوره‌ها اتفاق می‌افتد. همانطور که در نمودار فصل خشک دیده می‌شود، تیپ اغلب آب‌های وارده در محدوده  $\text{Na-Cl-SO}_4$  است و تعدادی هم در محدوده  $\text{Ca-Mg-SO}_4/\text{Cl}$  است که این نشان از کمبود بی‌کربنات و ورودی در فصل خشک است. تیپ دریاچه ارومیه همیشه در محدوده  $\text{Na-Cl-SO}_4$  می‌باشد که با افزایش منیزیم و کاهش سدیم در سال‌های اخیر به سمت تیپ  $\text{Ca-Mg-SO}_4/\text{Cl}$  تمایل پیدا کرده است. تعدادی از داده‌های فصل تر رودخانه‌ها در محدوده تیپ  $\text{Ca-Mg-HCO}_3$  است که دلیل آن نقش پررنگ رودخانه‌های زرينه‌رود و سيمينه‌رود و آب‌های با TDS پایین در این فصول است. در فصول خشک حجم این رودخانه‌ها نیز کاهش می‌یابد و اثر ترکیبات رودخانه‌های با آجی‌چای و سنیخ‌چای دیده می‌شود. تیپ دریاچه ارومیه به تیپ رودخانه‌های فصل خشک نزدیک‌تر است. بنابراین مطابق با شکل‌های ۳ و ۴ در بیشتر مواقع تیپ غالب آب‌های ورودی به دریاچه در فصل تر، کلسیم-بی‌کربنات و در فصل خشک، سدیم-کلراید است.

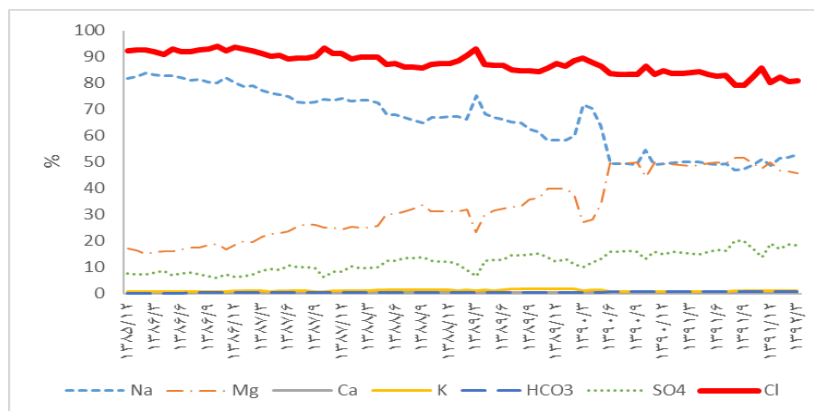


شکل ۴- دیاگرام چاد برای نمونه آب رودخانه‌ها (سمت راست: فصل خشک، سمت چپ: فصل تر) و دریاچه ارومیه در طول دوره زمانی مورد مطالعه

در این مقاله از داده‌های نمونه‌های آنالیز شده توسط سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان شرقی استفاده شده است که از نظر مکانی در اطراف بزرگراه کلانتری (شمال و جنوب) و از نظر زمانی به صورت ماهانه می‌باشند. طول بزرگراه ۱۵ کیلومتر است که یک بازشدگی به طول ۱۲۵۰ متر نزدیک به ساحل شرقی دو قسمت دریاچه را به هم ارتباط داده است. جریان تبدالی از شمال به جنوب و از جنوب به شمال در محل بازشدگی میانگذر در اکثر روزهای سال به جز فصل بهار یکسان می‌باشد. در فصل بهار به دلیل حجم آب زیادی که از طریق رودخانه‌ها به قسمت جنوبی دریاچه می‌ریزد، جریان جنوب به شمال بیشتر از شمال به جنوب است (Marjani and Jamali, 2013). با دور شدن از فصل بهار، در فصل‌هایی که دبی رودخانه‌ها کم می‌باشد، مقدار چگالی (شوری) بخش شمالی و جنوبی تقریباً به هم نزدیک‌تر می‌شوند؛ به طوری که در اواخر تابستان یا در مهر و آبان در دو بخش دریاچه برابر می‌باشند (مرجانی و جمالی، ۱۳۸۷). بنابراین ترکیبات دریاچه در قسمت شمالی و جنوبی جز در فصول با آورد بالا مشابه هم هستند. در این تحقیق به دلیل اینکه نقاط برداشت شده فقط در محل بزرگراه شهید کلانتری هستند، دریاچه یکپارچه در نظر گرفته شده است. از طرفی با توجه به اینکه محل نمونه‌برداری در وسط دریاچه است، می‌تواند نماینده مناسبی از کل دریاچه باشد.



تغییرات درصد میانگین غلظت کاتیون‌ها و آنیون‌های موجود در دریاچه در شکل ۵ ارائه شده است. مطابق با شکل، سدیم از محیط آبی خارج شده و منیزیم جایگزین شده است. منیزیم در طی دوره مورد مطالعه روند افزایشی دارد و در سال‌های ۱۳۹۱-۱۳۹۲ به بیش از سه برابر غلظت آن در دریاچه در سال‌های اولیه رسیده است. کلر در بین سایر عناصر بیشترین مقدار را دارد که از شاخص‌های آب‌های شور می‌باشد. سولفات و کلر به ترتیب دارای روند افزایشی و کاهشی هستند. تیپ آب دریاچه ارومیه تا شهریور ۱۳۸۷،  $Na-(Mg)-Cl-(SO_4)$  می‌باشد. از آنجایی که غلظت منیزیم در حال افزایش است، برای اولین بار در مهر ۱۳۸۷، غلظت منیزیم از ۲۵٪ کاتیون‌ها فراتر رفته و تیپ آب به  $Na-Mg-Cl-(SO_4)$  تغییر می‌یابد. همچنان با ترسیب نمک‌های سدیم‌دار و افزایش غلظت منیزیم، درصد منیزیم و سدیم موجود در کاتیون‌ها به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد تا اینکه در شهریور ۱۳۹۰ تیپ آب به  $Mg-Na-Cl-(SO_4)$  تبدیل می‌گردد. در فصول با آورد بالا مجدداً سدیم بیش از منیزیم می‌گردد، ولی تیپ غالب دریاچه در سال‌های نهایی به  $Mg-Na-Cl-(SO_4)$  تبدیل شده است. دریاچه ارومیه نسبت به یون‌های کلسیم، پتاسیم و بی‌کربنات فقیر است و این یون‌ها در تعیین تیپ شیمیایی تاثیری ندارند.

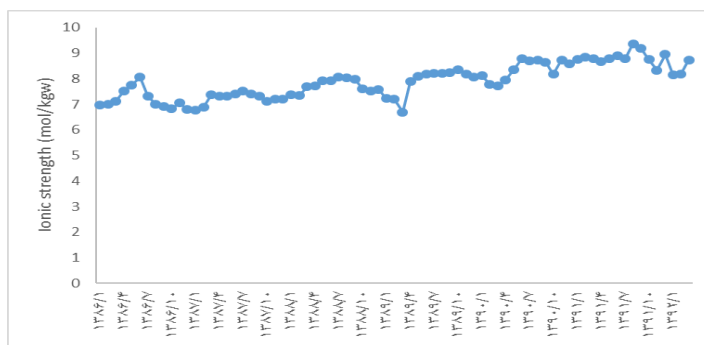


شکل ۵- نمودار تغییرات درصد کاتیون‌ها و آنیون‌ها با زمان

هدف از مدل‌سازی MIX این است که تاثیر کمیت و کیفیت رودخانه‌های ورودی بر ترسیب و یا انحلال نمک در دریاچه را نشان داده و یک الگوی دینامیکی ارائه دهد. در این تحقیق فرض می‌شود که مشخصات کیفی رودخانه‌های وارده و دریاچه، مانند دما، pH، چگالی و غلظت یون‌ها در طول یک ماه ثابت می‌مانند. در این مدل فرض شده که ترکیب دریاچه و رودخانه‌های ورودی به صورت اختلاط کامل است و دریاچه به صورت یک پیکره عمل می‌کند و از تغییرات عمقی صرف‌نظر شده است. داده‌های کیفی دریاچه و رودخانه‌ها شامل غلظت کاتیون‌های اصلی (منیزیم، سدیم، پتاسیم، کلسیم)، آنیون‌های اصلی (کلر، سولفات و بی‌کربنات)، pH، دما و چگالی می‌باشند. شبیه‌سازی به صورت ماهانه انجام شده است. اطلاعات دریاچه در هر ماه به عنوان solution1 و اطلاعات رودخانه‌ها به عنوان solution2 وارد نرم‌افزار PHREEQC می‌شود. نسبت حجمی اختلاط دریاچه و رودخانه‌ها در قسمت MIX وارد می‌شود که بایستی مجموع احجام اختلاط یافته برابر با ۱ شود. به عنوان مثال حجم دریاچه در اردیبهشت ۱۳۸۷ برابر با ۶,۵۸ میلیارد مترمکعب و حجم رودخانه‌های ورودی ۵۶۷ میلیون مترمکعب است. بنابراین دریاچه و رودخانه‌ها با نسبت حجمی ۰,۹۲ و ۰,۰۸ با همدیگر مخلوط می‌شوند.

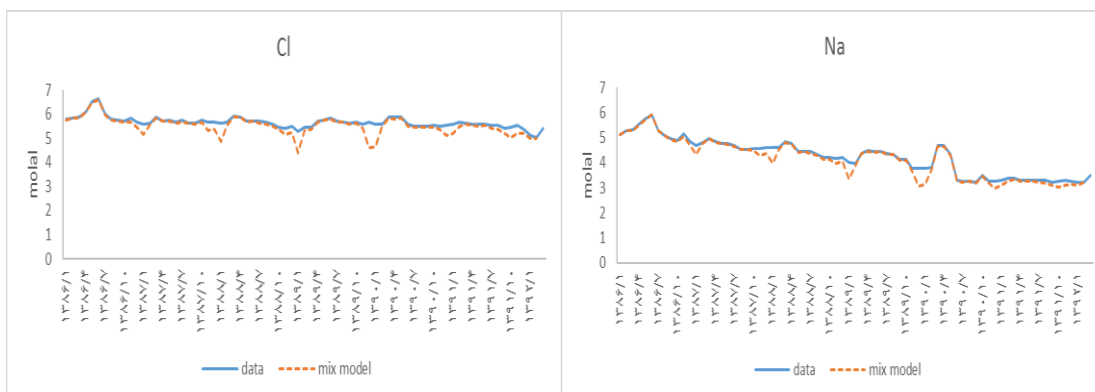


با افزایش غلظت یون‌ها، قدرت یونی آب دریاچه ارومیه افزایش می‌یابد. در دوره زمانی مورد مطالعه قدرت یونی محلول  $7-9.4 \text{ mol/kgw}$  می‌باشد که توسط نرم‌افزار PHREEQC محاسبه و در شکل ۶ ارائه شده است. برای محلول‌های با قدرت یونی کمتر از ۳ می‌توان از تئوری SIT<sup>1</sup> استفاده کرد؛ ولی مدل ارائه شده توسط پیتزر (Pitzer, 1991) برای شورابه‌های بسیار شور مانند دریاچه ارومیه کاربرد دارد. مدل پیتزر در برنامه کامپیوتری PHREEQC برای بررسی تعاملات پیچیده در غلظت‌های بالای نمک ارائه شده است (Parkhurst and Appelo, 1999). خروجی نرم‌افزار به عنوان ترکیب حاصل از اختلاط دریاچه با رودخانه‌ها، با غلظت دریاچه در آن ماه مقایسه می‌شود.



شکل ۶- نمودار تغییرات قدرت یونی آب دریاچه ارومیه در طی دوره مورد مطالعه

نمودارهای مقایسه نحوه تغییرات داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج مدل‌سازی MIX برای یون‌های اصلی دریاچه در طی دوره زمانی مورد مطالعه در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. مدل و داده‌ها در بعضی زمان‌ها کاملاً با هم تطبیق دارند و در بعضی زمان‌ها مدل، غلظت یون‌ها را کمتر از داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد. همچنین نتایج مدل‌سازی، فعالیت آب را بالاتر از داده‌های اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد (شکل ۹). این نتیجه به این مفهوم است که آب دریاچه در نقطه نمونه‌گیری (واقعیت) شورتر از پیش‌بینی مدل است.

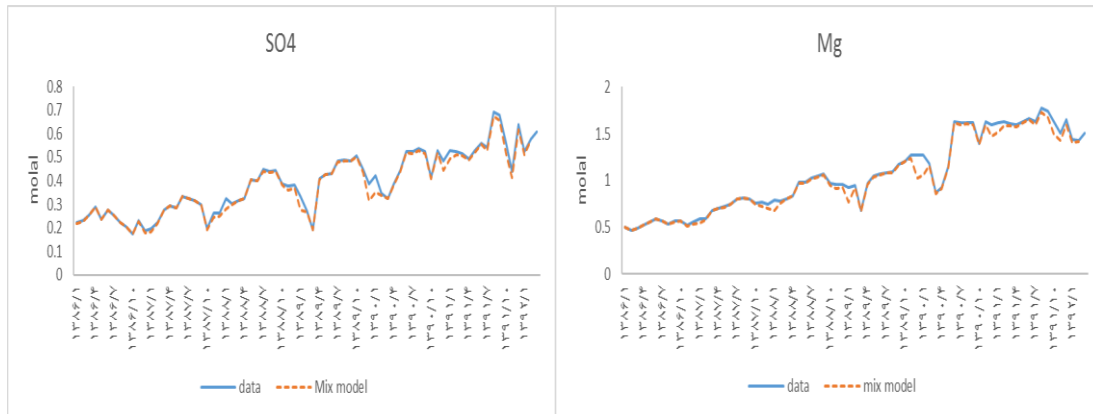


شکل ۷- تغییرات غلظت سدیم و کلر اندازه‌گیری شده و نتایج مدل‌سازی در طی دوره زمانی مورد مطالعه

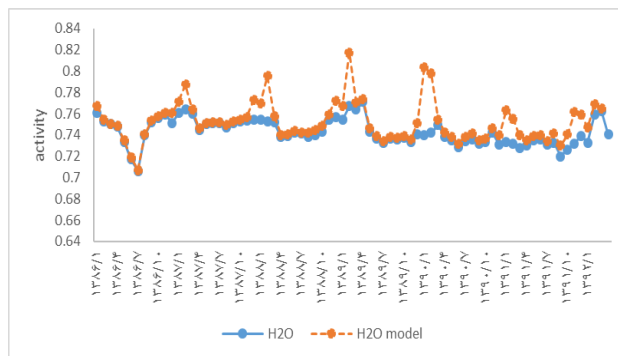
<sup>1</sup> Specific Ion Interaction Theory



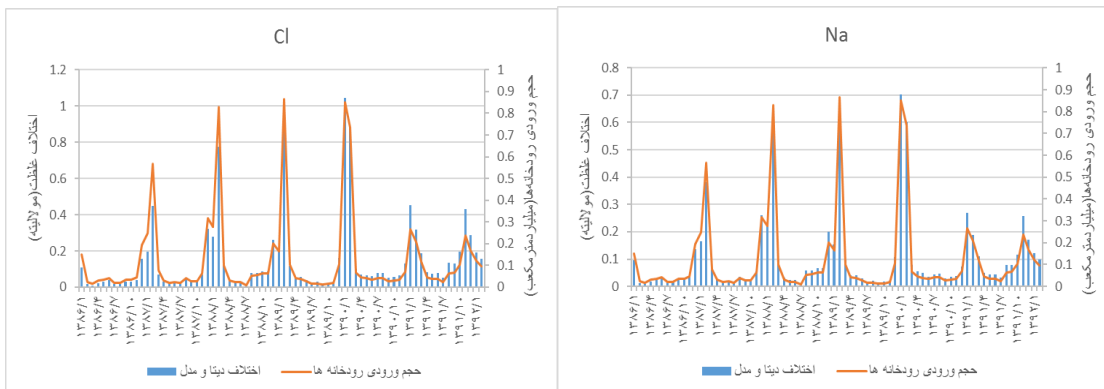
تغییرات اختلاف بین داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج مدل و میزان حجم رودخانه‌های ورودی در شکل ۱۰ ارائه شده است. بیشترین اختلاف غلظت بین داده‌ها و مدل MIX در ماه‌های با آورد بالای رودخانه‌ها اتفاق می‌افتد.



شکل ۸- تغییرات غلظت منیزیم و سولفات اندازه‌گیری شده و نتایج مدل‌سازی در طی دوره زمانی مورد مطالعه

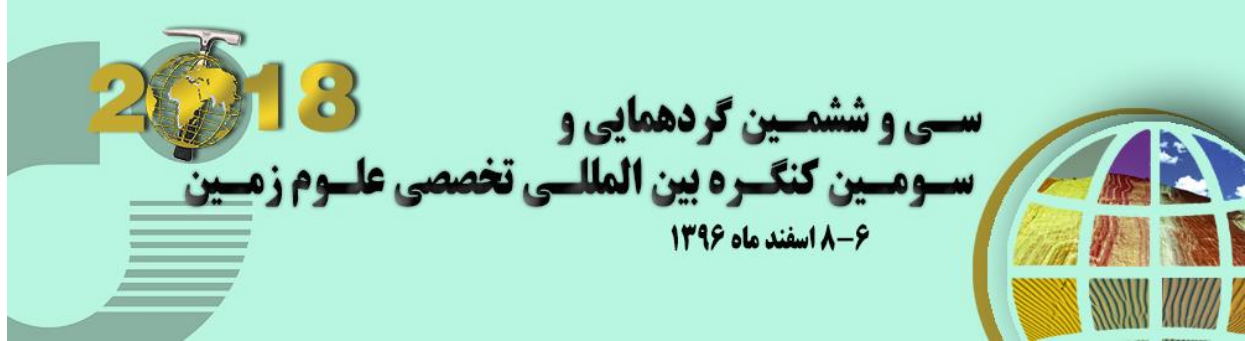


شکل ۹- تغییرات فعالیت آب مربوط به داده‌های اندازه‌گیری شده و نتایج مدل در طی دوره زمان مورد مطالعه



شکل ۱۰- مقایسه اختلاف غلظت سدیم و کلر بین نتایج مدل‌سازی و داده‌های اندازه‌گیری شده با آورد ماهانه رودخانه‌ها به دریاچه در طی دوره زمانی مورد مطالعه





## نتیجه گیری :

خروجی مدل MIX با داده‌های ماهانه دریاچه اختلافی کمی دارند و مدل، غلظت یون‌ها را در فصول تر کمتر از داده‌ها تخمین می‌زند. مدل MIX نشان داد که رودخانه‌ها جز در فصول با آورد بسیار بالا تاثیری بر ترکیب دریاچه نخواهند داشت. دلیل این اختلاف احتمالاً وابسته به ورود آب توسط رودخانه‌ها می‌باشد که نمک موجود در کف دریاچه انحلال می‌یابد و غلظت یون‌ها را در دریاچه بالا می‌برد؛ این در حالی است که مدل تأثیر نمک کف دریاچه را در نظر نمی‌گیرد.

وقتی که عمق دریاچه بالاست، نمک در حاشیه‌ها و مرکز دریاچه ته‌نشین می‌شود. با کاهش تراز دریاچه، رودخانه‌ها و رواناب‌های ورودی نمک موجود در حاشیه‌ها را در مسیر خود شسته و به دریاچه می‌ریزند و در نتیجه غلظت نمک در دریاچه بالا می‌رود. این نقاط در مدل‌سازی لحاظ نشده‌اند؛ بنابراین شاید به همین دلیل مدل غلظت‌ها را کمتر برآورد کرده است. همچنین این عامل عمق نمک ترسیب شده را می‌افزاید.

در این تحقیق تنها از داده‌های اندازه‌گیری شده در محل بزرگراه استفاده شد و فرض گردید که غلظت یون‌ها در بزرگراه برابر با کل دریاچه است. به عبارتی دیگر دریاچه یکپارچه در نظر گرفته شد که باعث اختلاف در نتایج مدل‌سازی با داده‌های اندازه‌گیری شده در فصول تر می‌شود. همانطور که پیش‌تر اشاره شد، اختلاف چگالی بین ایستگاه‌های مختلف دریاچه در فصول پربارش وجود دارد.



## منابع فارسی :

گزارش لیمنولوژی و پالنولیمنولوژی دریاچه ارومیه، اقلیم، زمین‌شناسی، هیدرولوژی و سنجش از راه دور، (۱۳۹۵)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.  
مرجانی، ع؛ جمالی، م، (۱۳۸۷)، "مدلسازی سه بعدی تعادل آب و انتقال آب شوری در دریاچه ارومیه"، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.



## References:

Chadha, D. K. (1999). "A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data". *Hydrogeology Journal*, 7(5), 431-439.  
Eugster, H.P. and Hardie, L.A., (1978). "Saline lakes". In *Lakes*(pp. 237-293). Springer New York.  
Marjani, A. and Jamali, M., (2014). "Role of exchange flow in salt water balance of Urmia Lake". *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 65, pp.1-16.  
Parkhurst, D.L. and Appelo, C.A.J., (1999). "User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations".  
Pitzer, K.S., (1991). "Ion Interaction Approach: Theory and Data Correlation. Chapter 3, Activity Coefficients in Electrolyte Solutions".  
Sinha, R. and Raymahashay, B.C., (2004). "Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Rajasthan, India". *Sedimentary Geology*, 166(1), pp.59-71.