



دانشگاه ارومیه

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

جلد بیست و نهم، شماره دوم، ۱۳۹۸

۵۳-۷۳

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.14883.2995

ارزیابی هوادیدگی شیمیایی در رسوبات رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه

حامد ارفع‌نیا^۱ و *فرخ اسدزاده^۲

^۱دانش‌آموخته دکتری گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه، ^۲دانشیار گروه علوم خاک، دانشگاه ارومیه

تاریخ دریافت: ۹۷/۱/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۱/۱۴

چکیده

سابقه و هدف: رودخانه‌ها به‌عنوان راهروهای انتقال، مواد محلول و جامد فرسایش‌یافته از اراضی بالادست را به طرف دریاچه‌ها و تالاب‌ها منتقل می‌کنند. از این رو بررسی وضعیت رسوبات رودخانه‌ای از منظر شدت هوادیدگی، می‌تواند افق‌های نوینی در ارزیابی صحیح وضعیت اراضی بالادست، چرخه هوادیدگی و تأثیر فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست داشته باشد. شاخص‌های هوادیدگی مانند WIP و CIA به‌طور گسترده در مطالعات هوادیدگی خاک‌ها کاربرد دارند. با این حال دانسته‌ها در زمینه شدت فرآیند هوادیدگی رسوبات رودخانه‌ای در کشور محدوده بوده و پژوهش حاضر با هدف ارزیابی این دو شاخص در رسوبات رودخانه‌های مهم غرب حوضه دریاچه ارومیه و بررسی روابط احتمالی بین این شاخص‌ها و ویژگی‌های دانه‌بندی رسوبات صورت پذیرفته است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش ۳۴ نمونه مرکب رسوب از هفت رودخانه مهم غرب دریاچه ارومیه شامل نازلوچای، شهرچای، باراندوزچای، گدارچای، مهابادچای، سیمینه‌رود و زولاچای برداشته شد. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها به روش‌های معمول آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و جهت تعیین ترکیب عنصری اکسیدهای اصلی نمونه‌های رسوب از آنالیز اسپکتروسکوپی فلورسانس اشعه X استفاده شد. کمی‌سازی مقادیر اکسیدها با کاربرد نرم‌افزار SUPERQ و واسنجی از طریق نمونه‌های استاندارد بین‌المللی صورت گرفت. سپس شاخص‌های CIA و WIP محاسبه شد. آنالیز داده‌های با استفاده از روش همبستگی و همچنین روش‌های تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی صورت گرفت.

یافته‌ها: اکسیدهای سلیسیم، آلومینیوم و کلسیم سه ترکیب غالب در اغلب نمونه‌های رسوب بودند. نسبت مقدار SiO_2 در نمونه‌ها به مقدار استاندارد آن در پوسته سطح زمین (UCC) برای تمامی نمونه‌ها کم‌تر از ۱ و بین ۰/۵۷ و ۰/۸۴ بود که نشان‌دهنده عدم وقوع اثر رقت در فرآیند انتقال کانی‌ها است. بر اساس ترکیب اکسیدهای اصلی، نمونه‌های تمامی رودخانه‌ها دارای مشابهتی بیش از ۶۵ درصد بوده و تنها رودخانه‌های گدار و باراندوز به دلیل این که مقادیر بیش‌تری MgO نسبت به سایر رودخانه‌ها داشتند تشابه کم‌تری با سایر رودخانه‌ها نشان دادند. مقدار CaO با SiO_2

* مسئول مکاتبه: f.asadzadeh@urmia.ac.ir

Al_2O_3 و Fe_2O_3 همبستگی معکوس و معنی‌داری نشان داد. (ضریب همبستگی بین $0/62 - 0/67$ ، $P < 0/001$). دامنه شاخص‌های CIA و WIP در رسوبات به‌ترتیب بین $0/1 - 82/6$ و $69/2 - 42/4$ بود. هر دو شاخص دارای توزیع نرمال بوده ولی از بین این شاخص، شاخص WIP با معیارهای توزیع اندازه ذرات، به‌ویژه قطر میانه همبستگی قوی‌تری ($r = 0/84$ و $P < 0/001$) از خود نشان داد. همبستگی شاخص CIA و معیارهای توزیع اندازه ذرات به‌رغم معنی‌دار بودن با رس و قطر میانه در مقایسه با شاخص WIP ضعیف‌تر بود.

نتیجه‌گیری: مقادیر بالای SiO_2 و Al_2O_3 در نمونه‌های رسوب نشان می‌دهد که رسوبات منطقه هوادیدگی شدید سیلیکاته قرار نگرفته‌اند. وزن بالای CaO در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به احتمال قوی نشان‌دهنده ترکیبات کلسیت در مواد مادری منطقه است. بر مبنای مقایسه شاخص‌های هوادیدگی، نمونه‌های بالادست و پائین‌دست رودخانه‌ها تفاوت آشکاری از نظر شدت هوادیدگی داشتند. با این حال فعالیت‌های انسانی از جمله احداث سد برای نمونه در رودخانه مهاباد سبب شده تا الگوی هوادیدگی در بالادست و پائین‌دست رودخانه تا حدودی دست‌خوش تغییر شود. منحنی A-CN-K برای نمونه‌های رسوب بیانگر روند موازی نمونه‌ها با محور A-CN بوده و حاکی از حذف کانی‌های سیلیکاته کلسیم و سدیم از مواد مادری است. همبستگی قوی و معنی‌دار قطر میانه رسوبات با شاخص‌های هوادیدگی به‌ویژه شاخص WIP نشان می‌دهد که شاخص قطر میانه در مقایسه با فراوانی ذرات اولیه، معیار مناسب‌تری برای ارزیابی شدت هوادیدگی رسوبات است.

واژه‌های کلیدی: دریاچه ارومیه، رسوب رودخانه‌ای، شاخص هوادیدگی

مقدمه

هوادیدگی و فرسایش جزء فرآیندهای برگشت‌ناپذیر در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت محسوب می‌شوند چرا که در طی این فرآیندها ماده و انرژی در یک سیستم باز غیرتعادلی بین اجزاء مختلف زیست‌کره (خاک، آب، اتمسفر و زیتوده) در شرایط ثابت آنتروپی، انتقال می‌یابد (۱۷). رسوبات رودخانه‌ای ترکیبی از سنگ‌ها و خاک فرسایش‌یافته از اراضی بالادست در حوضه‌های آبخیز می‌باشند. ذرات خاک فرسایش‌یافته از بالادست حوضه‌ها، توسط رودخانه‌ها به پهنه‌های آبی منتقل می‌شوند و در این میان رودخانه‌ها به‌عنوان راهروهای انتقال مواد جامد و محلول محسوب می‌شوند. از این‌رو بررسی وضعیت رسوبات از منظر شدت هوادیدگی، می‌تواند افق‌های نوینی در ارزیابی

صحیح وضعیت اراضی بالادست، چرخه هوادیدگی و تأثیر فعالیت‌های انسانی بر محیط‌زیست داشته باشد (۳۹).

سرعت هوادیدگی شیمیایی در خاک‌ها و همچنین رسوبات توسط فاکتورهای مختلفی شامل منبع و نوع سنگ، اقلیم، ناهمواری‌های تکتونیکی و توپوگرافی، پوشش گیاهی، توسعه خاک و فعالیت انسانی کنترل می‌شود (۲۴). با وجود آگاهی از عوامل مؤثر بر فرآیند هوادیدگی شیمیایی، درک عمومی از مکانیسم‌ها و شاخص‌های کمی مرتبط با آن ناچیز است (۳ و ۳۱). در طی فرآیند هوادیدگی، تجزیه شیمیایی کانی‌های اولیه منجر به تلفات عناصر متحرک کلسیم، منیزیم، پتاسیم و سدیم شده و متعاقب آن کانی‌های مختلف رسی به‌عنوان کانی‌های ثانویه مانند گروه کائولین،

شاخص‌های یاد شده شاخص‌های دیگری که محاسبه آن‌ها بر مبنای تعداد بیش‌تری از متغیرها است، برای بررسی شدت هوازدگی پیشنهاد شده‌اند که از بین آن‌ها می‌توان به شاخص هوازدگی پارکر^۵ (۲۷)، شاخص تغییر شیمیایی^۶ (۲۲)، شاخص هوازدگی شیمیایی^۷ (۱۲)، شاخص تغییر پلاژیوکلاز^۸ (۸) و شاخص سیلیسیم-تیتانیوم^۹ (۱۴) اشاره نمود. جزئیات مربوط به محاسبه هر یک از شاخص‌های مذکور به صورت مبسوط توسط اوسط و همکاران (۲۰۱۶) جمع‌بندی و گزارش شده است. مرور منابع نشان می‌دهد که شاخص تغییر شیمیایی (CIA) و شاخص هوازدگی پارکر (WIP) در مقایسه با دیگر شاخص‌ها به‌طور گسترده‌تری در پژوهش‌های مربوط به ارزیابی شدت هوازدگی خاک‌ها و به‌ویژه رسوبات مورد استفاده قرار گرفته‌اند (۴، ۵، ۲۶، ۳۴ و ۳۵).

شاخص CIA به‌عنوان بازتابی از درجه تبدیل فلدسپار به رس‌ها تفسیر می‌شود (۴۲). این شاخص توسط مک‌لین (۱۹۹۳) در ۱۶ رودخانه از قاره‌های مختلف بررسی شده و نتایج بیانگر وجود رابطه منفی بین تاریخچه هوازدگی و بار رسوبی رودخانه‌ها در حوضه‌های مربوطه است. لی و یانگ (۲۰۱۰) نیز با بررسی این شاخص در ۴۴ رودخانه در کل دنیا بر توانایی این شاخص در انعکاس تاریخچه هوازدگی رسوبات تأکید نموده و گزارش کردند که مقادیر کمی آن حساسیت ویژه‌ای نسبت به تغییر عمق خاک، دمای سطح آن و عرض جغرافیایی دهانه رودخانه دارد. شاخص WIP نیز برای ارزیابی شدت هوازدگی سنگ‌های سیلیکاته بر مبنای نسبت‌های کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی در مواد هوازیده پایه‌گذاری

ورمی‌کولیت و میکا- اسمکتایت در رسوبات تجمع می‌یابد (۲۴). بنابراین توزیع عناصر اصلی می‌تواند بازتابی از تغییرات شیمیایی رخ داده در مسیر حرکت رسوبات از منشاء اصلی به پایین‌دست حوضه، از طریق رودخانه‌ها باشد. به‌عبارت دیگر تحرک عناصر قلیایی و قلیایی خاکی مهم‌ترین عامل در تعیین درجه هوازدگی بستر می‌باشد (۲۲).

در طول ۵۰ سال اخیر تلاش‌های فراوانی در راستای ارائه شاخص‌های کمی برای ارزیابی شدت هوازدگی در اراضی صورت گرفته است (۲۵). شاخص‌های هوازدگی به‌طور معمول براساس نسبت‌های ملکولی عناصر اکسیدی مهم و تغییرات قیاس‌سنجی^۱ آن‌ها در خلال هوازدگی توسعه داده می‌شوند (۲۸). این شاخص‌ها بر مبنای ارزیابی ژئوشیمیایی بستر استوار بوده و به‌طور گسترده برای محاسبه پیشرفت هوازدگی در خاک‌ها و رسوبات استفاده می‌شوند (۳۲ و ۴۱).

در ساختار اغلب شاخص‌های هوازدگی محتوای همه یا تعدادی از عناصر متحرک مانند کلسیم، سدیم، پتاسیم و منیزیم برای محاسبه شدت هوازدگی شیمیایی در نظر گرفته می‌شود (۲۷). بیش‌تر شاخص‌های هوازدگی بر این فرض استوار هستند که آلومینیوم عنصری غیرمتحرک می‌باشد، هر چند این فرضیه ممکن است در برخی از مواقع درست نباشد (۲۸). برخی از این شاخص‌ها دارای ساختار محاسباتی ساده‌ای هستند که از میان آن‌ها می‌توان به نسبت روکستون^۲، نسبت سزکوئی‌اکسیدها^۳، شاخص مجموع کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی و نسبت کلسیم به تیتانیوم^۴ اشاره کرد (۲، ۱۳ و ۳۰). علاوه بر

5- Weathering index of Parker (WIP)
6- Chemical index of alteration (CIA)
7- Chemical index weathering (CIW)
8- Plagioclase of alteration (PIA)
9- Silica-Titanium index (STI)

1- Stoichiometry
2- Ruxton ratio
3- Sesquioxide ratio
4- Calcium/Titanium ratio (CTR)

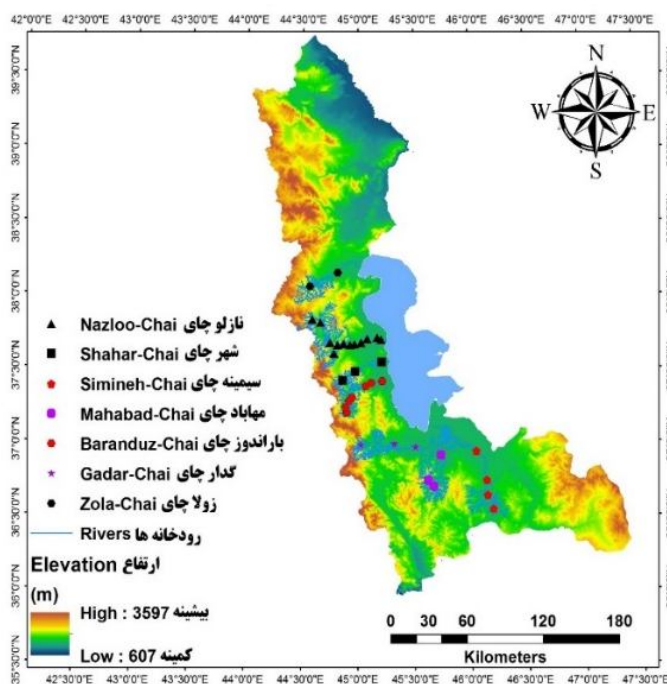
زولاچای به‌عنوان مهم‌ترین رودخانه‌های منتهی به بخش غربی دریاچه محسوب می‌شوند که در این پژوهش نمونه‌برداری از رسوبات این رودخانه‌ها صورت گرفته است. از نظر زمین‌شناسی بخش غربی حوضه دریاچه ارومیه که محدوده رودخانه‌های مورد مطالعه در این پژوهش را شامل می‌گردد؛ شامل مجموعه‌ای از آمیزه‌های رنگین و سنگ‌های دگرگونی و رسوبات پرمین است. این مجموعه توسط توده‌های نفوذی گرانیت و دیوریت به یکدیگر متصل شده و از فلش‌های پالیوسن و سنگ آهک و رسوبات تخریبی دوران میوسن - الیگوسن پوشیده شده است (۱۶).

در مجموع ۳۴ نمونه رسوب به تفکیک رودخانه‌ها به‌صورت؛ نازلوچای (۱۲ نمونه)، شهرچای (۳ نمونه)، باراندوزچای (۷ نمونه)، گذارچای (۳ نمونه)، مهابادچای (۳ نمونه)، سیمینه‌رود (۴ نمونه) و زولاچای (۲ نمونه) تهیه شد (شکل ۱). برای هر یک از نمونه‌های رسوب، از ۳ نقطه در فواصل تقریبی ۱۰ متری مقداری رسوب از بستر رودخانه برداشته شده و از اختلاط آن‌ها یک نمونه مرکب حاصل شد. نمونه‌های رسوب پس از انتقال به آزمایشگاه، هوا خشک شده و از الک ۲ میلی‌متری عبور داده شدند. ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی در نمونه‌های رسوب شامل؛ دانه‌بندی به روش هیدرومتری و تعیین منحنی توزیع اندازه ذرات، اسیدیته و قابلیت هدایت الکتریکی در عصاره ۱:۵ آب به رسوب، کربنات کلسیم معادل به روش تیتراسیون برگشتی با هیدرواکسید سدیم، ماده آلی به روش والکی - بلک و کربنات کلسیم فعال با استفاده از نمک اگزالات آمونیوم خنثی، تعیین شدند (۲۹).

شده است. با توجه به تحرک نسبی آلومینیوم در خلال فرآیند هوادیدگی شیمیایی، نتایج برخی از پژوهش‌ها بیانگر این واقعیت است که به‌رغم ارتباط معنی‌دار دو شاخص یاد شده، شاخص WIP برای ارزیابی شدت هوادیدگی مناسب‌تر است (۷ و ۲۸). با این حال مرور منابع بیانگر این واقعیت است که بر خلاف شاخص CIA، شاخص WIP در ارزیابی شدت هوادیدگی رسوبات آبی کم‌تر مورد استفاده بوده است. با توجه به محدودیت دانسته‌ها در زمینه شدت فرآیند هوادیدگی رسوبات رودخانه‌ای در کشور، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی شاخص‌های CIA و WIP در رسوبات رودخانه‌های مهم غرب حوضه دریاچه ارومیه و بررسی روابط احتمالی بین این شاخص‌ها و ویژگی‌های دانه‌بندی رسوبات صورت پذیرفته است.

مواد و روش‌ها

جایگاه جغرافیایی، نمونه‌برداری و تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی: دریاچه ارومیه دارای ۲۱ رودخانه فصلی و دائمی است که اغلب آن‌ها در بخش غربی و جنوبی آن قرار دارند. این رودخانه‌ها از ارتفاعات مرزی ایران با کشورهای ترکیه و عراق سرچشمه گرفته و در طول مسیر خود با عبور از مناطق شیب‌دار و کوهستانی، کشاورزی و بعضاً صنعتی به سمت دریاچه حرکت می‌کنند. شرایط توپوگرافی و اقلیمی منطقه از یک‌سو و عدم رعایت اصول کشاورزی حفاظتی از سوی دیگر سبب شده که حجم قابل‌توجهی از خاک‌های اراضی بالادست حوضه به‌صورت رسوب از طریق رودخانه‌های موجود به بخش‌های پایین‌دست انتقال یابد. نازلوچای، شهرچای، باراندوزچای، گذارچای، مهابادچای، سیمینه‌رود و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی نقاط نمونه برداری شده در رودخانه های مختلف.

Figure 1. Geographical location of sampling points in different rivers.

استاندارد بین المللی واسنجی شده دقت و صحت آن محاسبه شد (۳۴).

پس از تعیین ویژگی های فیزیکی و شیمیایی نمونه ها و آنالیز XRF، شاخص های هوادیدگی شامل شاخص های CIA و WIP با استفاده از رابطه های ۱ و ۲ و با توجه به نسبت مولی ترکیبات اکسیدی عنصری محاسبه می شوند. در رابطه ۱ برای شاخص CIA، Ca^*O نشان دهنده CaO موجود در کانی های سیلیکاته می باشد (۲۲). مقادیر بزرگ تر شاخص WIP نشان دهنده هوادیدگی کم تر رسوبات است که از این نظر مقادیر کمی این شاخص دارای ارتباط معکوس با شاخص CIA خواهد بود (۱۱ و ۱۵).

آنالیز عنصری فلورسانس اشعه ایکس: جهت بررسی ترکیب شیمیایی نمونه های رسوب و تعیین مقادیر عناصر اصلی موجود در آن، آنالیز اسپکترومتری فلورسانس اشعه ایکس استفاده شد. برای این منظور ۱۵ گرم از نمونه های رسوب در دمای ۶۰ درجه به مدت ۲۴ ساعت خشک و سپس با سه قطره تری اتانول آمین با استفاده از دستگاه آسیاب کن هرزگ^۱ مخلوط شد. ۸ گرم از مخلوط برداشته و با استفاده از دستگاه قرص زن هرزگ تحت فشار ۴۰۰ کیلو نیوتن برای ۴ دقیقه قرص های فشاری تهیه شد. آنالیز عنصری با استفاده از نرم افزار کمی سازی SUPERQ بر روی دستگاه PANalytical با استفاده از ۸ نمونه

$$CIA = ((Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Ca^*O + Na_2O + K_2O)) \times 100) \quad (1)$$

$$WIP = (100 \times (2Na_2O / 0.35 + MgO / 0.9 + 2K_2O / 0.25 + Ca^*O / 0.7)) \quad (2)$$

1- Herzog

با دامنه‌های ۰/۵۶-۵/۶ و ۲/۵-۲۴/۸ درصد به ترتیب دارای ضریب تغییرات ۶۲ و ۳۸ درصد هستند. در مجموع نمونه‌های رسوب بالادست اغلب رودخانه‌ها عموماً درشت بافت و در کلاس‌های بافتی شن لومی و لوم شنی قرار دارند. در حالی که نمونه‌های رسوب پایین‌دست در اغلب رودخانه‌ها دارای بافت با کلاس‌های رس سیلتی، لوم‌رسی و لوم‌رسی سیلتی قرار دارند. این گونه تفکیک بافتی در طول مسیر، تا حدودی ناشی از فرآیند ترسیب انتخابی ذرات بر مبنای قطر (جرم) آن‌ها در امتداد مسیر رودخانه‌ها است (۱۸). در مجموع فراوانی ذرات سیلت و شن خیلی‌ریز در تمامی نمونه‌های رسوب نسبتاً بالا بود. احتمال دارد که حساسیت بالای این ذرات نسبت به فرسایش سبب شده که در اثر انتقال انتخابی ذرات خاک از اراضی بالادست، این ذرات در نمونه‌های رسوب فراوانی بیش‌تری داشته باشند (۱). با توجه به مقایر pH و EC، تمامی نمونه‌ها دارای واکنش قلیایی ضعیف بوده و فاقد شوری بودند.

پس از محاسبه شاخص‌ها ارتباط آن‌ها با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌ها با استفاده از تحلیل هم‌بستگی پیرسون مورد بررسی قرار گرفت. از روش تجزیه به مؤلفه‌های اصلی به‌همراه نرمال‌سازی وزن‌ها به روش واریمکس و همچنین آنالیز خوشه‌ای به کمک نرم‌افزار Minitab17 به منظور تعیین ترکیبات کنترل‌کننده تغییرات شاخص‌های هواپدگی و دسته‌بندی رسوبات و رودخانه‌ها استفاده شد.

نتایج و بحث

آمار توصیفی برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های رسوب در جدول ۱ ارائه شده است. دامنه مقدار رس و سیلت در نمونه‌های رسوب نسبتاً وسیع بوده و به ترتیب از ۶/۵ تا ۴۷/۵ و ۱۳/۳ تا ۶۴/۲ درصد متغیر است. این امر نشان‌دهنده تنوع قابل‌توجه توزیع اندازه ذرات در نمونه‌های رسوب است به‌نحوی که ضریب تغییرات رس و شن در نمونه‌های رسوب به ترتیب ۵۱/۴ و ۵۷/۳ درصد است. به همین ترتیب تغییرات مقدار ماده آلی و کربنات کلسیم نیز در نمونه‌ها قابل‌توجه بوده و این ویژگی‌ها

جدول ۱- آمار توصیفی مربوط به ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی.

Table 1. Statistical description of sediments physico-chemical properties.

آماره Statistics	هدایت الکتریکی EC	اسیدیته pH	ماده آلی OM	کربنات کلسیم معادل CCE	کربنات کلسیم فعال ACCE	رس Clay	سیلت Silt	شن Sand	شن بسیار ریز Vfs	قطر میان D ₅₀
	dSm ⁻¹	-			%					µm
میانگین Mean	0.42	7.61	1.76	15.89	2.16	19.15	40.45	40.39	10.69	44.03
حداقل Min	0.18	7.26	0.56	2.50	0.54	6.52	13.33	2.58	0.23	2.20
حداکثر Max	1.22	8.02	5.57	24.75	3.86	47.50	64.21	80.15	22.30	199.0
انحراف معیار Standard deviation	0.25	0.18	1.09	6.04	0.87	9.85	15.48	23.16	5.50	49.58
ضریب تغییرات Coefficient of variation	0.59	2.4	0.62	0.38	40.5	51.4	38.3	57.3	51.4	112.6

سدیم مانند بیوتیت در مقایسه با کانی‌های حاوی پتاسیم باشد (۱۰ و ۳۸).
قابلیت انتقال عناصر پوسته در خلال فرآیند هواپدگی و انتقال می‌تواند از نرمال نمودن محتوای اکسیدهای اصلی موجود در نمونه‌ها با توجه به مقدار استاندارد آن‌ها در پوسته سطح زمین^۱ (UCC) مورد ارزیابی قرار گیرد (۲۶). نسبت مقدار SiO_2 در نمونه‌ها به مقدار استاندارد آن در UCC (۳۶) برای تمامی نمونه‌ها کم‌تر از ۱ بود. این نسبت از ۰/۵۷ تا ۰/۸۴ در نمونه‌های رسوبات رودخانه‌ای متغیر بود. این مقادیر کم‌تر از ۱ می‌تواند نشان‌دهنده عدم وقوع اثر رقت در طول فرآیند انتقال ذرات در کانی‌ها باشد. این شرایط به صورت کم و بیش مشابه برای Al_2O_3 نیز مشاهده می‌شود هر چند مقادیر نسبت یاد شده برای Al_2O_3 اندکی بیش‌تر و در دامنه ۰/۵۹ تا ۱/۰۵ قرار دارد.

ترکیب عنصری و شاخص‌های هواپدگی: نتایج شناسایی ترکیب عنصری اکسیدهای اصلی با فلورسانس اشعه ایکس در نمونه‌های رسوب به تفکیک رودخانه‌های مختلف و محل نمونه‌گیری در جدول ۲ ارائه شده است. اکسیدهای سیلیسیم، آلومینیوم و کلسیم سه ترکیب غالب در اکثر رسوبات بودند و SiO_2 در دامنه ۳۷/۵ تا ۵۵/۲ متغیر بود. حضور مقادیر بالای SiO_2 و مقادیر به نسبت کم‌تر Al_2O_3 می‌تواند بیانگر این واقعیت باشد که نمونه‌های رسوب منطقه تحت شرایط هواپدگی شدید سیلیکات‌ها قرار نگرفته‌اند. از سوی دیگر نسبت K_2O به Na_2O در نمونه‌های تمامی رودخانه‌های مورد بررسی به غیر از گذارچای بیش از ۱ است که به روشنی بیانگر غنی‌شدگی فلدسپار پتاسیم در رسوبات رودخانه‌ای است که به نظر می‌رسد دلیل این امر هواپدگی و شستشوی سریع‌تر کانی‌های حاوی

جدول ۲- درصد جرمی اکسیدهای اصلی رسوبات رودخانه‌های مورد مطالعه.

Table 2. Major elemental composition of river sediment in the studied area.

CIA	WIP	Na_2O	SO_3	K_2O	MgO	CaO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	جایگاه نمونه Sample place	رودخانه River
59.6	55.4	2.0	0.08	2.8	3.8	11.4	5.2	12.2	43.4		
59.8	49.5	1.3	0.18	2.9	2.7	9.3	6.5	13.9	45.0		
55.9	53.1	1.9	0.13	2.4	3.7	12.2	5.1	11.9	44.3	بالادست Upstream	
57.7	53.0	1.9	0.12	2.4	4.1	13.4	4.9	11.3	43.4		
66.9	45.5	1.4	0.10	2.3	4.1	14.3	5.1	11.6	40.7		
61.8	45.2	1.3	0.10	2.2	3.8	14.2	5.5	11.8	41.2		نازلو-چای Nazloo-chai
69.2	44.6	1.0	0.03	2.1	3.6	13.7	5.9	12.4	41.7		
66.9	44.3	1.5	0.03	2.3	3.6	12.7	5.4	12.1	44.4		
61.3	47.3	1.5	0.06	2.2	4.0	13.2	5.5	11.9	42.6	پایین دست downstream	
58.9	54.7	2.3	0.01	2.4	3.9	11.0	5.3	12.2	43.8		
69.1	49.0	1.4	0.001	2.9	3.7	11.4	6.1	13.6	43.8		
66.5	49.4	1.4	0.02	2.7	4.0	10.6	6.1	13.1	45.5		

1- Upper continental crust

ادامه جدول ۲-

Continue Table 2.

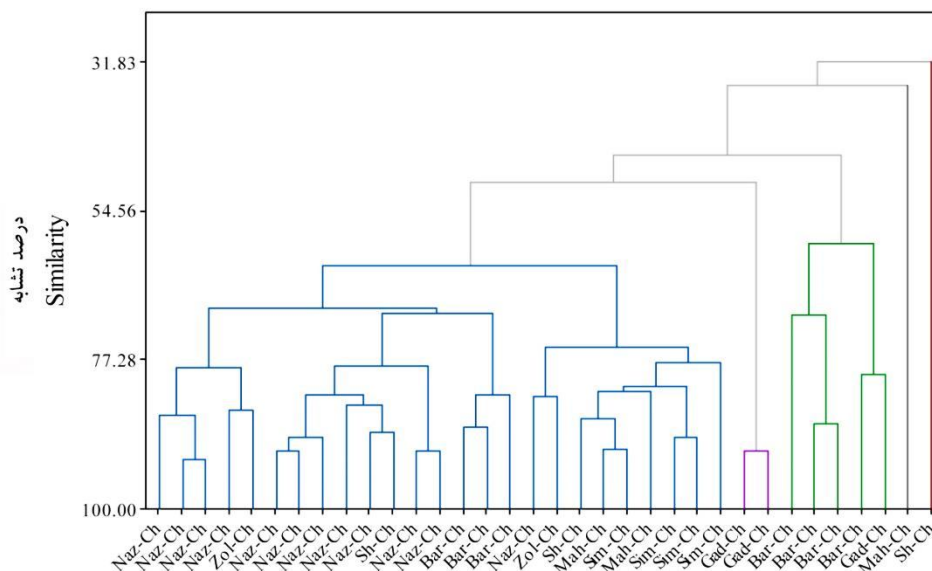
CIA	WIP	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	جایگاه نمونه Sample place	رودخانه River
52.4	69.8	2.7	0.01	3.1	3.3	5.0	6.9	15.9	55.2	بالادست Upstrea	شهرچای Shahar-Chai
66.2	44.7	1.1	0.05	2.4	3.0	12.2	5.7	13.4	44.1	پایین دست downstream	
64.7	47.0	0.97	0.06	2.8	3.1	8.7	7.1	15.3	46.0		
73.2	66.5	0.87	0.001	1.2	17.2	8.7	9.3	9.0	39.9		باراندوز چای Baranduz-Chai
73.7	49.8	1.3	0.001	1.6	8.7	12.1	7.6	10.7	40.6	بالادست Upstream	
60.1	66.1	1.4	0.03	1.5	13.4	10.6	7.8	9.5	39.7		
67.1	62.1	1.5	0.02	1.5	12.4	10.8	7.5	9.7	40.3		باراندوز چای Baranduz-Chai
61.4	55.9	1.3	0.09	2.1	8.2	12.5	5.6	10.5	42.5		
57.8	58.9	1.6	0.16	2.1	8.2	12.0	5.5	10.3	43.5	پایین دست downstream	
62.9	51.9	1.3	0.09	1.9	7.8	14.3	5.5	9.8	40.5		گدار چای Cadar-Chai
50.4	59.8	1.9	0.04	1.5	6.4	7.1	10	12.9	45.6	بالادست Upstream	
50.1	60.3	2.0	0.09	1.5	6.4	8.3	9.5	12.7	44.6	پایین دست downstream	
82.6	45.3	1.3	0.001	1.4	8.0	12.2	9.1	11.7	37.5		مهاباد چای Mahabad-Chai
63.9	42.4	0.95	0.06	2.3	2.7	9.0	7.5	15.2	47.6	بالادست Upstream	
60.7	47.5	1.6	0.05	2.2	2.7	7.8	7.3	15.1	49.1		
54.6	53.2	1.0	0.48	2.1	2.4	8.6	5.6	12.7	54.1	پایین دست downstream	سیمینه رود Simineh-rood
59.2	42.9	0.68	0.14	2.1	3.5	10.2	7.1	14.2	44.8	بالادست Upstream	
59.2	48.5	1.1	0.16	2.4	2.9	6.8	8.1	15.9	48.6		
61.4	45.6	1.01	0.17	2.3	3.3	8.0	7.5	15.3	47.2	پایین دست downstream	زولا چای Zola-chai
62.3	46.2	1.1	0.04	2.3	3.3	8.2	7.3	15.6	47.8		
54.8	55.6	2.1	0.03	2.7	2.6	10.5	4.8	12.8	50.8	بالادست Upstream	
56.6	52.7	1.7	0.10	2.5	3.2	10.0	6.3	13.7	46.49	پایین دست downstream	

از رودخانه شهرچای در خوشه‌های مجزا قرار گرفته و شباهت کمتری نسبت به بقیه نمونه‌های رسوب دارند. در رابطه با رودخانه باراندوزچای و گدارچای مقادیر MgO به‌طور قابل توجهی بیش از متوسط سایر رودخانه‌ها است، به‌طوری‌که میانگین MgO در رسوبات رودخانه باراندوز چای ۱۰/۸ درصد می‌باشد که تقریباً ۳/۲۷ برابر میانگین مقدار MgO در سایر رودخانه‌ها (۳۳ درصد) است. مقدار MgO برای

بررسی مشابهت ترکیب اکسیدهای اصلی در نمونه‌های رسوب رودخانه‌های مختلف با استفاده از خوشه‌بندی سلسله‌مراتبی (شکل ۲) نشان می‌دهد که نمونه‌های رسوب رودخانه‌های مختلف مشابهت قابل توجهی با هم داشته و در این بین نمونه‌های رسوب اغلب رودخانه‌ها دارای مشابهت بیش از ۶۵ درصد با یکدیگر می‌باشند. در این بین نمونه‌های رودخانه‌های گدار چای و باراندوزچای و یک نمونه

نسبت به میانگین سایر رودخانه‌ها کم‌تر است. به طوری که متوسط K_2O در رسوبات سایر رودخانه‌ها نسبت به رسوبات رودخانه‌های گدار و باراندوزچای به ترتیب $1/62$ و $1/47$ برابر بیش‌تر است.

رودخانه گدارچای نیز تقریباً $7/1$ درصد $2/12$ برابر متوسط سایر رودخانه‌هاست. به نظر می‌رسد که تفاوت نمونه‌های رسوب این دو رودخانه با یکدیگر کم بوده و اکسید پتاسیم (K_2O) در رسوبات هر دو رودخانه



شکل ۲- خوشه‌بندی نمونه‌های مربوط به رودخانه‌های مورد مطالعه براساس ترکیبات اکسیدهای اصلی.

Figure 2. Hierarchical cluster analysis of the samples based on the major elemental composition.

(جدول ۳). این امر می‌تواند به آهکی بودن نمونه‌های رسوب مربوط بوده و احتمالاً نشان‌دهنده این واقعیت است که بخش زیادی از کلسیم موجود در نمونه‌های به شکل کربنات‌های کلسیم توزیع شده است.

ضریب همبستگی پیرسون بین مقادیر اکسیدها Al_2O_3 ، Na_2O و SiO_2 نشان‌دهنده ارتباط مثبت بین K_2O و SiO_2 بوده و همچنین ارتباط منفی معنی‌داری بین محتوای CaO با SiO_2 ، Al_2O_3 و Fe_2O_3 است

جدول ۳- همبستگی بین محتوای اکسیدهای اصلی در نمونه‌های رسوب.

Table 3. Correlation matrix showing major oxides of sediments.

Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
							1	SiO ₂
						1	0.7**	Al ₂ O ₃
					1	0.12	-0.13	Fe ₂ O ₃
				1	-0.66**	-0.62**	-0.67**	CaO
			1	0.08	0.44*	-0.75**	0.62**	MgO
		1	-0.79**	-0.08	-0.59**	0.6**	0.61**	K ₂ O
	1	0.21	-0.30	-0.12	-0.22	0.11	0.38*	SO ₃
1	0.06	0.22	-0.18	-0.16	-0.23	-0.03	0.48*	Na ₂ O

می‌تواند نشان‌دهنده این واقعیت باشد که حضور این اکسید ناشی از منشاء آهکی و ترکیبات دولومیت و کلسیت در منطقه است. مؤلفه دوم در حدود ۲۵ درصد از واریانس کل داده‌ها را پوشش داده و وزن مثبت و نسبتاً بالای Al_2O_3 و K_2O در آن می‌تواند مرتبط با فرآیند هوازدگی فلدسپار پتاسیم‌دار باشد (۶).

براساس معیار کایسر، مؤلفه‌های با مقدار ویژه بیش از ۱ انتخاب شدند. سه مؤلفه اول در حدود ۸۳ درصد از واریانس کل داده‌ها را در بر می‌گیرند (جدول ۴). بررسی وزن‌های مربوط به هر یک از اکسیدها بیانگر این است که CaO ، MgO و Na_2O دارای بیش‌ترین وزن به‌ترتیب در مؤلفه‌های اول تا سوم می‌باشند. وزن مثبت و بالای CaO در مؤلفه اول

جدول ۴- ماتریس چرخش‌یافته اوزان مربوط به تجزیه مؤلفه‌های اصلی.

Table 4. Varimax rotation PCA loading matrix.

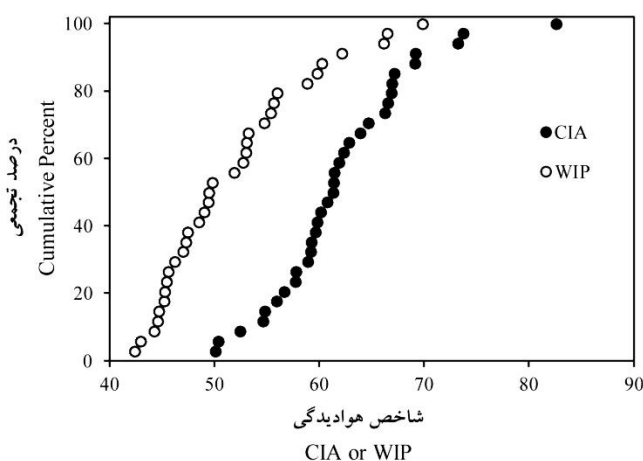
PC3	PC2	PC1	متغیر
0.44	0.23	-0.27	SiO_2
-0.12	0.51	-0.36	Al_2O_3
-0.21	-0.24	-0.60	Fe_2O_3
-0.18	-0.01	0.64	CaO
-0.05	-0.55	-0.07	MgO
0.12	0.50	0.15	K_2O
0.25	0.11	0.04	SO_3
0.80	-0.26	0.04	Na_2O
1.12	2.00	3.53	مقدار ویژه Eigen value
14.00	25.00	44.20	درصد واریانس (%) Variance
83.10	69.20	44.20	واریانس تجمعی Cumulative variance

رودخانه سیمینه‌رود بیش‌ترین و باراندوز چای کم‌ترین شدت هوازدگی را از خود نشان می‌دهند. تفاوت اصلی در ترتیب‌بندی شدت هوازدگی نمونه‌های رسوب در رودخانه‌های مختلف در وهله اول به ساختار محاسباتی این شاخص‌ها مربوط می‌شود چرا که در شاخص WIP مقدار اکسید منیزیم نیز وارد شده است و با توجه به این‌که میانگین درصد اکسید منیزیم در رسوبات رودخانه باراندوز برابر با $10/8$ درصد بوده و در مقایسه با سایر رودخانه‌ها حداکثر است، مقدار شاخص WIP در رسوبات این رودخانه نیز بیش‌ترین مقدار است.

شاخص‌های CIA و WIP نیز با استفاده از روابط ارائه شده برای آن‌ها در مقدمه، محاسبه و مقادیر مربوطه در جدول ۲ ارائه شده است. دامنه CIA در رسوبات مورد مطالعه بسیار گسترده و بین $50/1$ و $82/6$ با میانگین $62/04$ متغیر بود. مقادیر WIP نیز در محدوده $42/4$ تا $69/9$ با میانگین $51/9$ بود. افزایش مقادیر CIA نشان‌دهنده شدت هوازدگی بیش‌تر در نمونه‌های رسوب است. بر اساس ترتیب شاخص CIA، نمونه‌های رودخانه باراندوزچای بیش‌ترین و زولاچای کم‌ترین شدت هوازدگی را از خود نشان دادند. در حالی‌که از نظر شاخص WIP رسوبات

داده‌ها برابر با ۴۹/۴۶ بود. مقایسه آمار توصیفی مقادیر دو شاخص براساس توزیع فراوانی نیز نشان می‌دهد که ضریب تغییرات شاخص WIP (۱۱٪) در مقایسه با ضریب تغییرات شاخص CIA (۱۴٪) اندکی بیشتر است. با این حال بررسی توزیع دو متغیر بر اساس آزمون کولموگروف-اسمیرنوف نشان می‌دهد که این شاخص‌ها با سطح اطمینان ۹۵ درصد دارای توزیع نرمال می‌باشند.

به‌منظور تبیین دقیق‌تر مقادیر شاخص‌های WIP و CIA، نمودار توزیع فراوانی مقادیر آن‌ها در شکل ۳ ارائه شده است. در رابطه با شاخص CIA میانه داده‌ها برابر با ۶۱/۳۳ است. بر اساس توزیع فراوانی، شاخص CIA تقریباً در ۷۰ درصد نمونه‌های رسوب کم‌تر از ۶۵ می‌باشد که بیانگر هوادیدگی ضعیف در نمونه‌ها است. بقیه نمونه‌ها نیز دارای CIA در محدوده ۶۵ تا ۸۲/۵ بودند که نمایانگر شدت هوادیدگی متوسط در نمونه‌ها است. در رابطه با شاخص WIP نیز میانه



شکل ۳- توزیع فراوانی مقادیر شاخص‌های هوادیدگی.

Figure 3. Frequency distribution of weathering indices.

محیط‌های مرطوب بالادست رودخانه‌های مذکور را فراهم آورده است.

در رابطه با شاخص WIP نیز روند شدت هوادیدگی تقریباً مشابه با الگوی شاخص CIA بوده و کم‌تر بودن آن در پایین‌دست رودخانه‌ها بیانگر افزایش شدت هوادیدگی در این مناطق است در این زمینه به‌طور استثنایی رودخانه مه‌بادچای دارای WIP کم‌تری در بالادست رودخانه است که این امر به احتمال قوی همان‌گونه که در بالا نیز توضیح داده شد، مربوط به احداث سد و کاهش ارتباط رسوبات بالادست و پایین‌دست رودخانه است. در این زمینه باید اشاره کرد که سد مه‌باد به‌عنوان قدیمی‌ترین سد

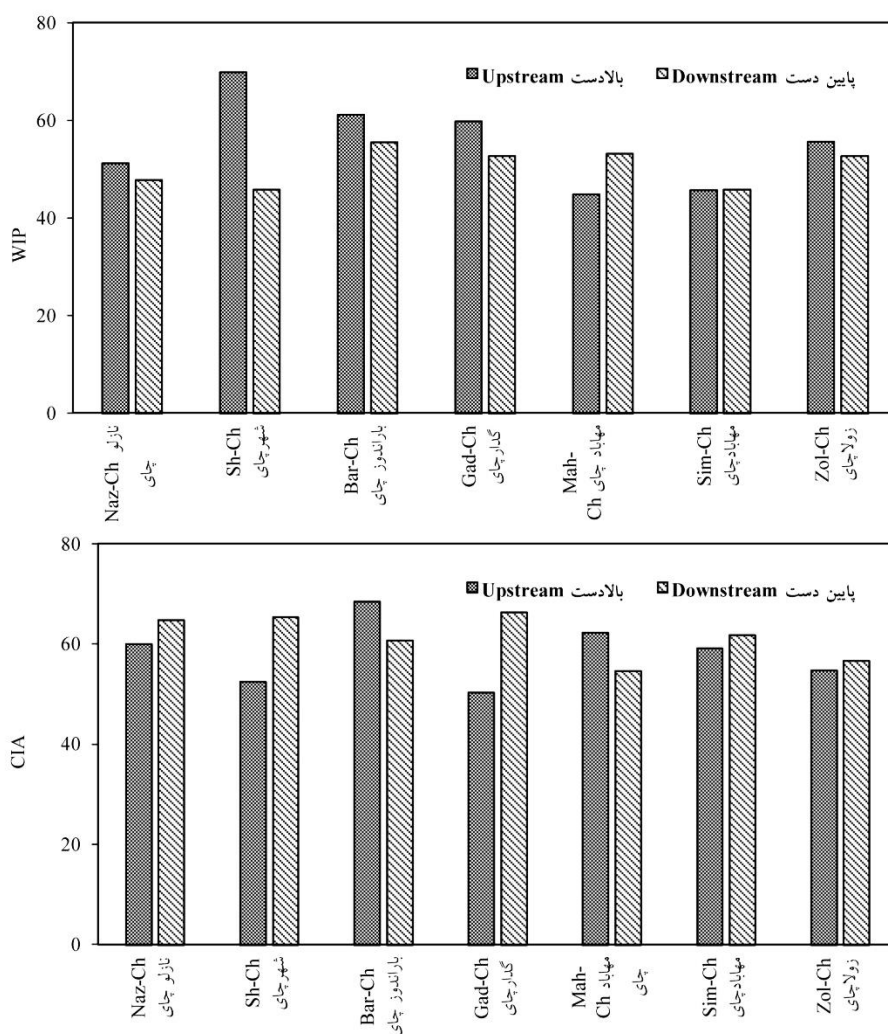
به‌منظور ارزیابی تفاوت بین مقادیر شاخص‌های هوادیدگی در بخش‌های بالادست و پایین‌دست رودخانه‌ها میانگین شاخص‌های مذکور به تفکیک رودخانه‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است. مقادیر CIA به‌صورت عمومی برای رسوبات پایین‌دست رودخانه‌ها بیش از نمونه‌های بالادست بود اما در رسوبات رودخانه‌های باراندوزچای و مه‌بادچای این روند معکوس بود که می‌تواند مربوط به احداث سد و بندهای متعدد در مسیر این رودخانه‌ها باشد که این امر موجب کاهش ارتباط بین رسوبات بالادست و پایین‌دست شده و امکان به دام انداختن رسوبات^۱ در

1- Trapping

رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه نشان‌دهنده این واقعیت است که حوضه‌های آبخیز مختلف، درجات متفاوتی از هوادیدگی را از خود نشان می‌دهند. عوامل مختلفی در ایجاد هوادیدگی شیمیایی نقش دارند که می‌توان از مواد مادری، اقلیم، ناهمواری‌های تکتونیکی، فرسایش فیزیکی، پوشش گیاهی و هیدرولوژی را نام برد (۹، ۲۰، ۲۱، ۲۳، ۳۳، ۳۷، ۴۰ و ۴۲). عامل سنگ بستر و مواد مادری مهم‌ترین عامل در رسوبات رودخانه‌ای محسوب می‌شود (۱۹).

موجود بر روی رودخانه‌های مورد مطالعه است که با قدمتی نزدیک به ۵۰ سال، اثرات قابل‌توجهی بر رژیم جریان رودخانه، سیمای فرسایش و وضعیت رسوب منطقه داشته است.

به‌طورکلی مقادیر CIA و WIP تغییرات زیادی در رسوبات بالادست و پائین‌دست از خود نشان دادند. همین‌طور تغییرات این دو شاخص مابین رودخانه‌ها بیش‌تر از تغییرات بین رسوبات بالادست و پائین‌دست بود. تغییرات CIA و WIP در رسوبات

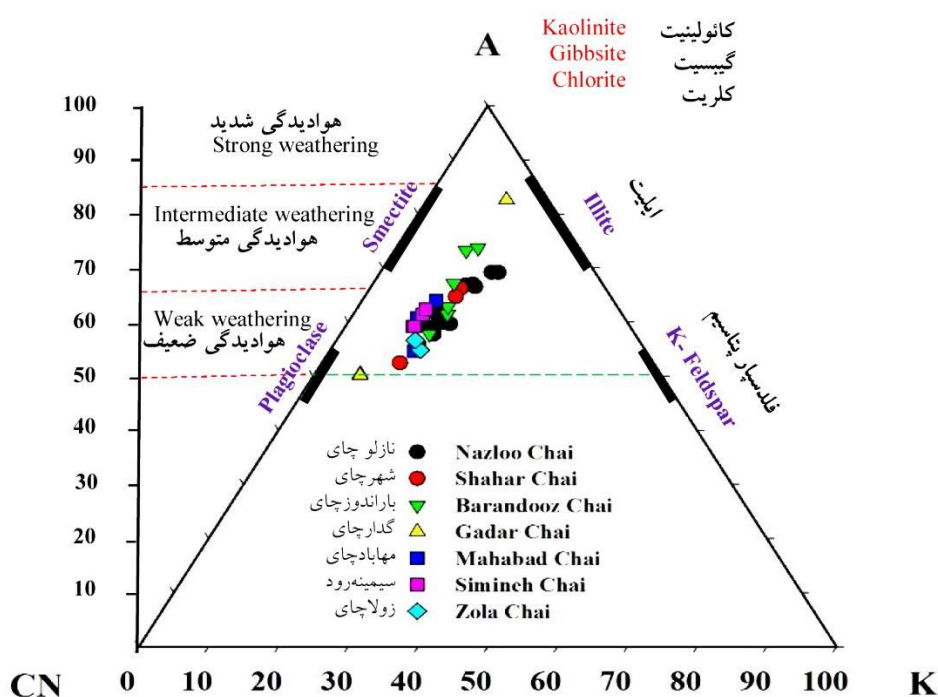


شکل ۴- مقادیر شاخص‌های هوادیدگی WIP و CIA برای بالادست و پائین‌دست رسوبات رودخانه‌ای.

Figure 4. Weathering indices of CIA and WIP in upper and lower part of river sediments.

سدیم نسبت به پتاسیم با ترجیح بیش‌تری آبشویی می‌شوند (۳۴). در مجموع روند هوادیدگی در رسوبات رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه موازی با خط A-CN است که نشان‌دهنده حذف کانی‌های سیلیکاته حاوی کلسیم و سدیم از مواد مادری است و همچنین بیانگر این واقعیت است که کانی‌های پتاسیم‌دار نسبتاً کم‌تر در معرض تخریب قرار گرفته‌اند. به‌نظر می‌رسد به‌رغم شدت‌های متفاوت هوادیدگی در نمونه‌های رسوب تقریباً تمامی آن‌ها از سنگ‌های مادر مشابهی منشاء گرفته‌اند که مشابه با متوسط ترکیب UCC هست. این یافته با گزارش‌های زمین‌شناسی منطقه مبنی بر این‌که بخش غربی حوضه دریاچه ارومیه ساختار زمین‌شناسی یکنواختی دارد، همخوانی دارد. بر اساس گزارش‌های زمین‌شناسی، این منطقه شامل مجموعه‌ای از آمیزه‌های رنگین و سنگ‌های دگرگونی و رسوبات پرمین است که توسط توده‌های نفوذی گرانیت و دیوریت به یکدیگر متصل شده و از فلیش‌های پالیوسن و سنگ آهک و رسوبات تخریبی دوران میوسن-الیگوسن پوشیده شده است (۱۶). به علاوه، متوسط مقادیر CIA در نمونه‌های پائین‌دست گدارچای و نازلوچای و بالادست باراندوزچای تقریباً مشابه با مقادیر متوسط در رودخانه‌های دنیا هست.

منحنی A-CN-K: طبق درجه‌بندی شدت هوادیدگی بر اساس روش پیشنهادی نزیبت و یانگ (۱۹۸۹)، نمونه‌های رسوب رودخانه‌های مورد مطالعه در دامنه نسبتاً وسیعی از شدت هوادیدگی ضعیف تا متوسط و نزدیک به شدید قرار دارند. با این حال اغلب نمونه‌ها در محدوده شدت هوادیدگی ضعیف واقع شده‌اند. توزیع مربوط به درجه‌بندی شدت هوادیدگی رسوبات با استفاده از منحنی A-CN-K که روشی گرافیکی برای کمی کردن شاخص هوادیدگی CIA و بازتابی از شرایط هوادیدگی ذرات فلدسپار می‌باشد در شکل (۵) ارائه شده است. شاخص هوادیدگی CIA روند هوادیدگی را بر اساس تجزیه کانی‌های فلدسپار که غالب‌ترین کانی اولیه در سنگ‌های پوسته زمین می‌باشد، پیش‌بینی می‌کند. در فرمول این شاخص فرض شده است که اکسیدهای Al، Ca، Na و K به‌صورت مشخص و معنی‌داری فقط در کانی‌های فلدسپار حضور دارند (۴۳). این منحنی روند هوادیدگی را تقریباً موازی محود A-CN نشان می‌دهد. بر اساس منحنی A-CN-K روند اصلی هوادیدگی سیلیکات در رسوبات مورد مطالعه نشان دهنده آبشویی ترجیحی CaO، Na₂O و سپس K₂O در رودخانه‌ها و غنی‌شدگی نسبی Al₂O₃ است. پلاژیوکلاز در مقایسه با فلدسپار پتاسیم‌دار نسبت به فرآیند هوادیدگی مستعدتر بوده و در نتیجه کلسیم و



شکل ۵- نمودار A-CN-K در نمونه‌های رسوب رودخانه‌ها.

توجه کنید که رسوبات مورد مطالعه روند هوازدگی موازی محور A-CN از خود نشان می‌دهند.

Figure 5. The A-CN-K diagram of the studied sediment samples.

Note that studied river sediment indicate weathering trend in parallel with the A-CN line.

همبستگی شاخص‌های هوازدگی و ویژگی‌های رسوبات: همبستگی بین ترکیب عنصری رسوبات رودخانه‌ای و شاخص‌های هوازدگی محاسبه شده از آن‌ها با ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های رسوب (جدول ۵) نشان داد که کربنات کلسیم دارای همبستگی مثبت و معنی‌داری ($P < 0.0001$) با CaO است. در بین سایر اکسیدها نیز Al_2O_3 ، SiO_2 و Fe_2O_3 نیز همبستگی منفی و معنی‌داری با محتوای کربنات کلسیم داشتند. این امر به روشنی بیانگر این واقعیت است که محتوای زمین‌شناسی منطقه بسیار متأثر از کلسیت به‌عنوان ماده مادری است. اصولاً غالب خاک‌های مناطق غرب دریاچه ارومیه شامل خاک‌های آهکی می‌باشند. کربنات کلسیم فعال

همبستگی معنی‌داری با CaO داشت ولی مقدار عددی همبستگی به‌شدت کاهش یافته بود که شاید مربوط به توزیع بیش‌تر کلسیم به‌صورت غیرفعال و اولیه ناشی از مواد مادری باشد. در میان اکسیدهای عنصری، Na_2O ، MgO و Al_2O_3 بیش‌ترین همبستگی را با شاخص‌های توزیع اندازه ذرات و بافت رسوبات از خود نشان دادند. نکته جالب در رابطه با همبستگی اکسیدهای عنصری با شاخص‌های توزیع اندازه ذرات، ارتباط قوی‌تر D_{50} در مقایسه با سایر نمایه‌های توزیع اندازه ذرات مانند شن، سیلت و یا رس، با بیش‌تر اکسیدهای عنصری است. به‌نظر می‌رسد این همبستگی قوی‌تر می‌تواند دلیلی بر این واقعیت باشد که قطر میانه ذرات رسوب،

داشت. ارتباط معکوس WIP با ذرات در اندازه رس مورد انتظار بوده و نشان می‌دهد که کاهش اندازه فیزیکی ذرات با تشدید هوازدگی در آن‌ها کاملاً مرتبط است. در این بین افزایش قطر میانه ذرات رسوب به صورت کاملاً آشکاری سبب افزایش شاخص WIP در نتیجه کاهش شدت هوازدگی در نمونه‌ها است (شکل ۶).

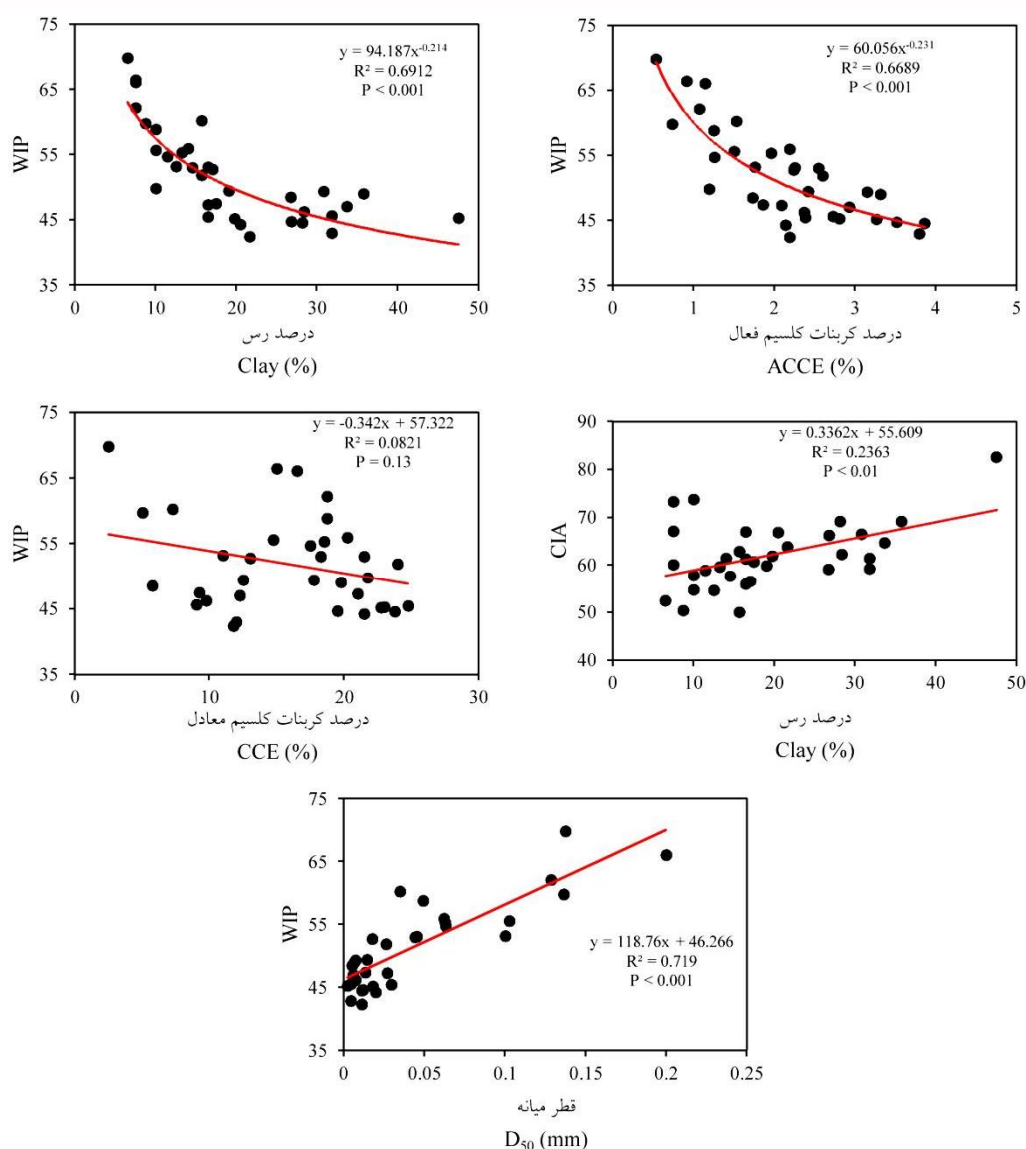
شاخص مفیدی برای ارزیابی وضعیت هوازدگی رسوبات باشد.

شاخص‌های هوازدگی WIP و CIA با ویژگی‌های فیزیکی رسوبات از جمله محتوای ذرات اولیه و قطر میانه ذرات همبستگی معنی‌داری نشان دادند. از میان این دو شاخص، شاخص WIP همبستگی بسیار قوی‌تری با توزیع اندازه ذرات

جدول ۵- همبستگی بین ویژگی‌های نمونه‌های رسوبات با محتوای اکسیدهای اصلی و شاخص‌های هوازدگی.

Table 5. Correlation between sediment physicochemical properties with major elemental oxides and weathering indices.

WIP	CIA	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	
-0.28	0.58**	-0.20	-0.20	-0.12	0.21	0.97**	-0.54**	-0.67**	-0.71**	کربنات کلسیم معادل CCE
-0.29	-0.32	-0.20	0.52**	0.30	-0.44**	-0.34*	0.01	0.49**	0.35*	ماده آلی OM
-0.01	0.28	0.01	-0.52**	0.003	0.15	0.40*	-0.24	-0.30	-0.28	اسیدیته pH
0.17	-0.33	0.01	0.80**	0.21	-0.36*	-0.21	-0.07	0.29	0.36*	هدایت الکتریکی EC
-0.77**	0.33	-0.55**	0.067	0.37*	-0.44**	0.44**	-0.33	0.24	-0.23	کربنات کلسیم فعال ACCE
-0.71**	0.49**	-0.55**	-0.06	0.23	-0.36*	0.06	0.10	0.46**	-0.13	رس Clay
-0.79**	0.18	-0.47**	0.09	0.34*	-0.56**	0.19	-0.15	0.46**	-0.07	سیلت Silt
0.83**	-0.32	0.55**	-0.03	-0.33	0.53**	-0.16	0.06	-0.50**	0.1	شن Sand
0.5**	-0.33	0.56**	-0.01	-0.10	0.29	0.15	-0.25	-0.42**	0.04	شن بسیار ریز Vfs
0.84**	-0.43*	0.3	-0.15	-0.46**	0.68**	-0.18	0.29	-0.51**	-0.07	قطر میانه D ₅₀



شکل ۶- ارتباط بین شاخص‌های هواپدگی با توزیع اندازه ذرات نمونه‌های رسوب.

Figure 6. Correlation between weathering indices with particle size distribution in sediment samples.

افزایش یابد و رسوبات رودخانه‌های منطقه جزء رسوبات آهکی محسوب شوند. به‌ویژه در این خصوص وزن بالای CaO در تجزیه به مؤلفه‌های اصلی دارای اهمیت بوده و تأییدکننده وجود ترکیبات آهکی در منطقه و تأثیر این ترکیبات بر ویژگی‌های رسوبات است. با توجه به مقادیر بالای SiO₂ و Al₂O₃ در نمونه‌های رسوب می‌توان گفت که نمونه‌ها تحت هواپدگی شدید سیلیکاته قرار نگرفته

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی شاخص‌های هواپدگی در رسوبات رودخانه‌های غرب دریاچه ارومیه انجام و نتایج آن نشان داد که در مجموع، رسوبات رودخانه‌ای دامنه نسبتاً وسیعی از ذرات اولیه رس و سیلت را در بردارند. اراضی بالادست رودخانه‌ها دارای سازندهای آهکی بوده و این امر سبب شده که محتوای کربنات کلسیم در رسوبات

این رودخانه همانند رسوبات پایین دست، درجه بالایی از هواپدگی را تجربه نموده‌اند. براساس منحنی A-CN-K روند هواپدگی رسوبات رودخانه‌ای کم و بیش موازی محور A-CN است که نشان‌دهنده حذف کانی‌های سیلیکاته کلسیم و سدیم از مواد مادری است. شاخص‌های هواپدگی به‌ویژه WIP همبستگی معنی‌داری با توزیع اندازه ذرات داشته و در این میان قطر میانه ذرات رسوبات با توجه به ارتباط قوی‌تر با شاخص‌های هواپدگی می‌تواند معیاری ارزنده در ارزیابی شدت هواپدگی رسوبات محسوب گردد.

و غنی‌شدگی فلدسپار پتاسیم در رسوبات رودخانه‌ای صورت گرفته است. در مجموع بر اساس شاخص‌های هواپدگی CIA و WIP نمونه‌های بالادست و پائین دست رودخانه‌ها تفاوت آشکاری از نظر شدت هواپدگی داشتند. با این حال در برخی رودخانه‌ها مانند مه‌باد چای به دلیل وجود سد با قدمت بیش از نیم قرن، الگوی هواپدگی در بالادست و پائین دست رودخانه تا حدودی دست‌خوش تغییر شده است به نحوی که تجمع رطوبت در بالادست رودخانه باعث ایجاد شرایط مطلوب هواپدگی برای رسوبات بالادست سد شده و از این نظر، رسوبات بالادست

منابع

1. Asadzadeh, F., and Samadi, A. 2016. Analysis of physicochemical properties of sediments trapped in successive check dams. *Iran. J. Soil Water Res.* 47: 2. 293-306. (In Persian)
2. Bétard, F. 2012. Spatial variations of soil weathering processes in a tropical mountain environment: the Baturité massif and its piedmont (Ceará, NE Brazil). *Catena.* 93: 18-28.
3. Bouchez, J., Lupker, M., Gaillardet, J., France-Lanord, C., and Maurice, L. 2011. How important is it to integrate riverine suspended sediment chemical composition with depth? Clues from Amazon River depth-profiles. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 75: 22. 6955-6970.
4. Burke, B.C., Heimsath, A.M., and White, A.F. 2007. Coupling chemical weathering with soil production across soil-mantled landscapes. *Earth Surf. Processes Landforms.* 32: 6. 853-873.
5. Chetelat, B., Liu, C.Q., Wang, Q., and Zhang, G. 2013. Assessing the influence of lithology on weathering indices of Changjiang river sediments. *Chem. Geol.* 359: 108-115.
6. Dalai, T.K., Rengarajan, R., and Patel, P. 2004. Sediment geochemistry of the Yamuna River System in the Himalaya: Implications to weathering and transport. *Geochem. J.* 38: 5. 441-453.
7. Duzgoren-Aydin, N.S., Aydin, A., and Malpas, J. 2002. Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Eng. Geol.* 63: 1. 99-119.
8. Fedo, C.M., Nesbitt, H.W., and Young, G.M. 1995. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology.* 23: 10. 921-924.
9. Gaillardet, J., Millot, R., and Dupré, B. 2003. Chemical denudation rates of the western Canadian orogenic belt: the Stikine terrane. *Chemical Geol.* 201: 3-4. 257-279.
10. Gupta, S., Banerjee, R., Babu, P.R., Parihar, P.S., and Maithani, P.B. 2012. Geochemistry of uraniumiferous Banganapalle sediments in the western part of Palnad Sub-basin, Andhra Pradesh: implications on provenance and paleo-weathering. *Gondwana Geol Mag Spec.* 13: 1-14.
11. Hamdan, J., and Bumham, C.P. 1996. The contribution of nutrients from parent material in three deeply weathered soils of Peninsular Malaysia. *Geoderma.* 74: 3-4. 219-233.
12. Harnois, L. 1988. The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sedim Geol.* 55: 3-4. 319-322.

13. Herbillon, A.J. 1986. Chemical estimation of weatherable minerals present in the diagnostic horizons of low activity clay soils. In: Beinroth, F.H., Camargo, M.N. and Eswaran, M. (Ed.). Proceedings of the 8th International Clay Classification Workshop: Classification, Characterization and Utilization of Oxisols (Part 1).
14. Jayawardena, U.D.S., and Izawa, E. 1994. A new chemical index of weathering for metamorphic silicate rocks in tropical regions: a study from Sri Lanka. *Eng. Geol.* 36: 3-4. 303-310.
15. Li, C., and Yang, S. 2010. Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? *Am. J. Sci.* 310: 2. 111-127.
16. Lotfi, A. 2013. Lake Urmia: Description of Basic Conditions. Environmental Protection Agency, Tehran, Pp: 12-14.
17. McLennan, S.M. 1993. Weathering and global denudation. *J Geol.* 101: 295-303.
18. Mehdizadeh, L., Asadzadeh, F., and Samadi, A. 2015. Application of mathematical models to describe the particle size distribution of sediments behind successive check dams. *Water. Engin. Manage.* 6: 4. 323-336. (In Persian)
19. Meybeck, M. 1987. Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved loads. *Am. J. Sci.* 287: 5. 401-428.
20. Millot, R., Gaillardet, J., Dupré, B., and Allègre, C.J. 2002. The global control of silicate weathering rates and the coupling with physical erosion: new insights from rivers of the Canadian Shield. *Earth Planet Sci. Letters.* 196: 1-2. 83-98.
21. Nesbitt, H.W., and Markovics, G. 1980. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 44: 11. 1659-1666.
22. Nesbitt, H.W., and Young, G.M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature.* 299: 5885. 715-717.
23. Nesbitt, H.W., and Young, G.M. 1989. Formation and diagenesis of weathering profiles. *J. Geol.* 97: 2. 129-147.
24. Oliva, P., Viers, J., and Dupré, B. 2003. Chemical weathering in granitic environments. *Chem. Geol.* 202: 3. 225-256.
25. Osat, M., Heidari, A., Eghbal, M.K., and Mahmoodi, S. 2016. Impacts of topographic attributes on Soil Taxonomic Classes and weathering indices in a hilly landscape in Northern Iran. *Geoderma.* 281: 90-101.
26. Panwar, S., and Chakrapani, G.J. 2016. Seasonal variability of grain size, weathering intensity, and provenance of channel sediments in the Alaknanda River Basin, an upstream of river Ganga, India. *Environ. Earth Sci.* 75: 12. 1-13.
27. Parker, A. 1970. An index of weathering for silicate rocks. *Geologic. Magaz.* 107: 06. 501-504.
28. Price, J.R., and Velbel, M.A. 2003. Chemical weathering indices applied to weathering profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chem. Geol.* 202: 3. 397-416.
29. Rowell, D.L. 1994. Soil science: methods and application, Part 7: Measurement of the composition of soil solution, 112p.
30. Ruxton, B.P. 1968. Measures of the degree of chemical weathering of rocks. *J. Geol.* 76: 5. 518-527.
31. Schroeder, P.A., Melear, N.D., West, L.T., and Hamilton, D.A. 2000. Metagabbro weathering in the Georgia Piedmont, USA: implications for global silicate weathering rates. *Chem. Geol.* 163: 1. 235-245.
32. Selvaraj, K., and Chen, C.T.A. 2006. Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: constraints from solid-phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks. *J. Geol.* 114: 1. 101-116.
33. Stallard, R.F., and Edmond, J.M. 1983. Geochemistry of the Amazon: 2. The influence of geology and weathering environment on the dissolved load. *J. Geophys. Res. Oceans.* 88: 9671-9688.

34. Shao, J., Yang, S., and Li, C. 2012. Chemical indices (CIA and WIP) as proxies for integrated chemical weathering in China: inferences from analysis of fluvial sediments. *Sedim Geol.* 265: 110-120.
35. Taboada, T., Rodríguez-Lado, L., Ferro-Vázquez, C., Stoops, G., and Cortizas, A.M. 2016. Chemical weathering in the volcanic soils of Isla Santa Cruz (Galápagos Islands, Ecuador). *Geoderma.* 261: 160-168.
36. Taylor, S.R., and McLennan, S.M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell Scientific Publication, Carlton, 312p.
37. Tipper, E.T., Bickle, M.J., Galy, A., West, A.J., Pomiès, C., and Chapman, H.J. 2006. The short term climatic sensitivity of carbonate and silicate weathering fluxes: insight from seasonal variations in river chemistry. *Geoch Cosmoch Acta.* 70: 11. 2737-2754.
38. Velbel, M.A. 1993. Temperature dependence of silicate weathering in nature: How strong a negative feedback on long-term accumulation of atmospheric CO₂ and global greenhouse warming? *Geology.* 21: 12. 1059-1062.
39. Verma, M., Singh, B.P., Srivastava, A., and Mishra, M. 2012. Chemical behavior of suspended sediments in a small river draining out of the Himalaya, Tawi River, northern India: implications on provenance and weathering. *Himalayan Geol.* 33: 1. 1-14.
40. White, A.F., and Blum, A.E. 1995. Effects of climate on chemical weathering in watersheds. *Geochem Cosmochim Acta.* 59: 9. 1729-1747.
41. Xiao, S., Liu, W., Li, A., Yang, S., and Lai, Z. 2010. Pervasive autocorrelation of the chemical index of alteration in sedimentary profiles and its palaeoenvironmental implications. *Sedimentol.* 57: 2. 670-676.
42. Yang, S., Jung, H.S., and Li, C. 2004. Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage basins: geochemical evidence from river sediments. *Sedim Geol.* 164: 1. 19-34.
43. Yusefifard, M., Ayoubi, S., and Jalalian, A. 2013. Weathering intensity and investigation of weathering indices in some soils developed on igneous rocks in west-north of Iran. *J. Water. Soil.* 27: 266-281. (In Persian)



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 26(2), 2019

<http://jwsc.gau.ac.ir>

DOI: 10.22069/jwsc.2019.14883.2995

Chemical Weathering Evaluation in Western River Sediments of Urmia Lake

H. Arfania¹ and *F. Asadzadeh²

¹Ph.D. Graduate, Dept. of Soil Science, Urmia University,

²Associate Prof., Dept. of Soil Science, Urmia University

Received: 04.05.2018; Accepted: 02.03.2019

Abstract

Background and Objectives: Rivers are delivery vehicles of soluble compounds and sediments eroded from upper reach to wetlands and lakes. Therefore, evaluation of weathering intensity opens new insight into upland erosion, anthropogenic and geochemical process. Weathering indices CIA and WIP have been extensively used for the study of soil genesis. Nonetheless, little information available on the weathering indices in Iran's soil and sediments. Therefore, this study was conducted on sediments of seven main rivers of Urmia Lake basin with objective of evaluation of two weathering indices and influence of particle size distribution on the weathering process.

Materials and Methods: In this study 34 composite sediment samples have been taken from seven main western rivers of Urmia Lake basin including: Nazloo Chai, Shahar Chai, Barandooz Chai, Ghadar Chai, Mahabad Chai, Simineh Chai and Zola Chai. The physical and chemical properties of sediment were determined with routine soil testing methods. Elemental analyses of sediment samples were determined using an X-ray fluorescence (XRF) spectrometry. Major element oxides were measured by using a built-in program SUPERQ. Then the CIA and WIP indices were calculated. The analysis of data was carried out using correlation, principal component analysis (PCA) and cluster analysis.

Results: The major oxides in the studied sediments were silica, aluminum and calcium. The ratio of silica oxide (SiO₂) to upper continental crust (UCC) for all the samples were less than 1 and varied between 0.57 and 0.84 indicating no dilution effect in the mineral transportation. Based on the major oxides component, the similarity among the different rivers was more than 65 and only in the Ghadar and Barandooz rivers the similarity is low because of the presence of MaO. The content of CaO had inverse significant correlation with SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃ (with correlation coefficient between -0.62 to -0.67, P<0.001). The CIA and WIP values were varied between 50.1 to 82.6 and 42.4 to 66.2, respectively. Both indices had normal distribution, but WIP index had higher correlation coefficient with particle size distribution particularly D50 (r=-0.84, P<0.001). The CIA index showed lower significant correlation with D50 in comparison with WIP.

Conclusion: High concentration of CaO and MgO in the river sediments may be due to the presence of calcareous rocks such as limestone, dolomite and calcareous shales in the watersheds. High SiO₂ and Al₂O₃ concentration in river sediments may draw a conclusion that lower silica weathering and enrichment of potassium feldspar in river sediments. High loading value of in the river sediments may be due to the presence of calcareous rocks such as limestone, dolomite and calcareous shales in the watersheds. Overall, the CIA and WIP

* Corresponding Author; Email: f.asadzadeh@urmia.ac.ir

weathering intensity values in upper and lower reach sediments revealed high difference. However, in some rivers such as Mahabad Chai because of construction of dam for more than half century the pattern of weathering intensity was different. Based on the A-CN-K curve. The studied river sediment indicate weathering trend in parallel with the A-CN line, indicating the elimination of silicate minerals of Ca and Na from parent material. Weathering indices in particular WIP had higher correlation coefficient with particle size distribution and D50 and we can conclude a proper index for evaluation of weathering intensity in the sediments.

Keywords: River sediment, Urmia Lake, Weathering Indices

