



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 6, No. 21, Spring 2025



The role of main elements distribution and evaluation of loess weathering indexes in reconstruction of ancient climatic changes in Golestan province

Somayeh Ghandhari¹, Arash Amini^{2*}, Hamed Rezaei³

¹ PHD Graduate of Sedimentology and Sedimentary Petrology, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Associate Professor of Sedimentology and Sedimentary Petrology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran, Email: a.amini@gu.ac.ir

³ Assistant Professor of Engineering Geology, Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran.

Article Info

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 2024-7-24

Accepted: 2024-11-15

Keywords:

Loess

Climate change

reconstruction

Geochemistry

Weathering index

Golestan

ABSTRACT

Loesses are one of the most important indicators of Quaternary climate changes. Golestan province, as one of the most extended loess areas in the northeast of Iran, links the loess of Central Asia with the loess of Eurasia. In this study, the geochemical composition (main elements) and the weathering rate of the loess of Golestan province were comparatively analyzed in 16 stations scattered throughout three main areas. Geochemical evaluation of the Golestan loess showed different percentages of SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO, MgO, Na₂O and K₂O oxides in its chemical composition. SiO₂, which was the most abundant oxide, increased with the increase of Al₂O₃, indicating the abundance of aluminosilicate minerals such as feldspars and mica. The loess weathering rate was measured using 5 different indices. The results showed that the sediment weathering rate increased from Region 3 (east and northeast) to Region 1 (west), which could be attributed to the wetter climate of Region 1. These indices also indicated an average chemical change in the loess of Golestan province. Evaluation of the main oxides changes and their correlation with the weathering indices directly illustrated the ancient climatic changes in the study area. Comparative analyses of the five indices revealed that the use of CPA index, as the most suitable index with the least error, could be recommended for the Golestan loess.

Cite this article: Ghandhari, S., Amini, A., Rezaei, H. (2025). The role of main elements distribution and evaluation of loess weathering indices in reconstruction of ancient climatic changes in Golestan province. *Journal of the Climate Change research*, 6 (21), 67-86.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

Doi: 10.30488/CCR.2024.468797.1229



نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی



فصلنامه علمی دانشگاه گلستان

سال ششم / شماره مسلسل بیست و یکم / بهار ۱۴۰۴ / صفحات: ۸۶-۶۷

نقش توزیع عناصر اصلی و ارزیابی شاخص‌های هوازدگی لس‌ها در بازسازی تغییرات اقلیمی دیرینه استان گلستان

سمیه قندهاری^۱، آرش امینی^{۲*}، حامد رضایی^۳

^۱ دانش‌آموخته دکتری رسوب شناسی و سنگ شناسی رسوبی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، تهران، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران، رایانامه: a.amini@gu.ac.ir

^۳ استادیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۲۵</p> <p>واژه‌های کلیدی: لس بازسازی تغییرات اقلیمی ژئوشیمی شاخص هوازدگی گلستان</p>	<p>لس‌ها از مهمترین شاخص‌های تغییرات آب و هوایی کواترنری به شمار می‌روند و استان گلستان به‌عنوان یکی از گسترده‌ترین پهنه‌های لسی ایران، حلقه ارتباطی بین لس‌های آسیای مرکزی و اوراسیا محسوب و در شمال شرق ایران گسترده شده است. در این مطالعه ترکیب ژئوشیمیایی لس‌های استان گلستان (عناصر اصلی) و میزان هوازدگی این لس‌ها به‌صورت مقایسه‌ای در ۱۶ ایستگاه پراکنده در ۳ ناحیه اصلی مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. ارزیابی ژئوشیمیایی لس‌های گلستان نشان می‌دهد در ترکیب شیمیایی لس‌های استان گلستان اکسیدهای K_2O و Na_2O، MgO، CaO، SiO_2، Al_2O_3، Fe_2O_3 با درصدهای متفاوتی وجود دارد که SiO_2 فراوان‌ترین اکسید است. مقدار SiO_2 با افزایش Al_2O_3 افزایش می‌یابد که حاکی از حضور فراوان کانی‌های آلومینوسیلیکاته مانند فلدسپارها و میکاهاست. محاسبه شاخص‌های هوازدگی لس‌های گلستان با ۵ شاخص مختلف اندازه‌گیری شده و نشان می‌دهد از منطقه ۳ (شرق و شمال شرقی) به منطقه ۱ (غرب) میزان هوازدگی رسوبات بیشتر می‌شود که می‌توان آن را به آب‌وهوای مرطوب‌تر ناحیه ۱ نسبت داد. همچنین این شاخص‌ها نشان‌دهنده دگرسانی شیمیایی متوسط در لس‌های استان گلستان است. ارزیابی تغییرات اکسیدهای اصلی و میزان همبستگی آنها با شاخص‌های هوازدگی، به صورت مستقیم نشان‌دهنده رصد تغییرات اقلیمی دیرینه در منطقه است. بررسی‌های مقایسه‌ای و تطبیقی در بین شاخص‌های پنجگانه نشان می‌دهد در لس‌های گلستان استفاده از شاخص CPA به‌عنوان مناسب‌ترین شاخص پیشنهادی با کمترین خطا قابل توصیه می‌باشد.</p>

استناد: قندهاری، سمیه؛ امینی، آرش؛ رضایی، حامد. (۱۴۰۴). نقش توزیع عناصر اصلی و ارزیابی شاخص‌های هوازدگی لس‌ها در بازسازی تغییرات اقلیمی دیرینه استان گلستان. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۱)، ۸۶-۶۷.

Doi: 10.30488/CCR.2024.468797.1229

ناشر: دانشگاه گلستان

© نویسندگان.



مقدمه

فلات‌های لسی شمال شرق ایران از مناسب‌ترین بسترها برای بازسازی شرایط اقلیمی دیرینه خصوصاً در دوره کواترنر هستند (کریمی و همکاران، ۱۳۹۰؛ امیری و همکاران، ۱۴۰۱). لس‌های واقعی رسوبات بادی در اندازه سیلت درشت، سست، غالباً لایه‌بندی نشده، متخلخل، نفوذپذیر به رنگ زرد کم‌رنگ به علت ذرات ریز لیمونیتی (هیدروکسید آهن) هستند که معمولاً از کوارتز به‌عنوان کانی اصلی (۴۰-۸۰٪)، فلدسپار به مقدار متغیر، کانی‌های رسی (۵-۲۰٪) و کربنات (۱-۲۰٪) تشکیل شده‌اند (Pécsi 1990). رسوبات به‌ویژه کانی‌های رسی به دلیل ساختار فیزیکی (شبکه فضایی) و ترکیب شیمیایی خاص خود می‌توانند عناصر مختلفی را به خود جذب کنند و آن را به محیط‌های دیگر انتقال دهند از این‌رو مطالعه ژئوشیمی آنها می‌تواند ابزار قدرتمند در درک مبانی لس و مکانیسم تشکیل آنها باشد (Mhus, 2017). رسوبات بادی، معمولاً از جنبه‌های مختلفی مانند آنالیز اندازه ذرات، میکرومورفولوژی، نسبت‌های ایزوتوپی، جمع‌آوری بقایای گرده‌ها و جانوران، خصوصیات ژئوشیمیایی و اندیس‌های هوازدگی شیمیایی، مورد مطالعه قرار می‌گیرند (Ding et al., 2001).

اصولاً در طی هوازدگی و تشکیل خاک از مواد مادری، ترکیب عنصری مواد مادری تغییر می‌کند. عناصر قابل انحلال و متحرک در این فرآیند، مهاجرت نموده و غلظت آن‌ها کاهش می‌یابد؛ درحالی‌که عناصری باقابلیت انحلال اندک باقی‌مانده و غلظت آن‌ها در محیط افزایش می‌یابد. با استفاده از شاخص‌های ژئوشیمیایی، می‌توان یک توصیف کمی از وضعیت هوازدگی و الگوی از شرایط اقلیم دیرینه منطقه ارائه نمود. نمایش کمی وضعیت هوازدگی، یک مرحله مهم برای تعیین مراحل تکامل خاک‌ها است (Duzgoren- Aydin et al., 2002) از این شاخص‌های هوازدگی علاوه بر اندازه‌گیری شدت توسعه و تکامل خاک برای ارزشیابی اثرات اقلیم روی هوازدگی و هم‌چنین برای تفسیر تاریخچه هوازدگی رسوبات در مطالعات متعددی

استفاده‌شده است (Price and Velbel, 2003). شاخص‌های هوازدگی شیمیایی بر اساس ترکیب عناصر اصلی سنگ و خاک بناشده‌اند. بیش‌تر این شاخص‌ها بر اساس نسبت‌های مولکولی و درصد وزنی بین گروه‌های متفاوت اکسیدهای اصلی است (Duzgoren- Aydin et al., 2002) فرض اصلی در فرمول کردن این شاخص‌ها رفتار عنصرهای شیمیایی است که به‌تنهایی به‌وسیله درجه هوازدگی کنترل می‌شود (Price and Velbel, 2003). در مطالعات ژئوشیمیایی برای شدت هوازدگی از شاخص‌هایی استفاده می‌شود که این شاخص‌ها بررسی کمی فرایندهای هوازدگی را امکان‌پذیر می‌کنند. بر اساس مطالعات مهدی پور و همکاران (۱۳۹۲) علاوه بر داده‌های ژئوشیمیایی و تحلیل شاخص‌های هوازدگی لس‌هاکه در بازسازی اقلیم دیرینه نقش دارند، داده‌های مغناطیسی و قابلیت پذیرفتاری مغناطیسی نیز می‌توانند به‌عنوان داده‌های مکمل اطلاعات مهمی در خصوص شرایط اقلیم دیرینه در اختیار ما قرار دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه در استان گلستان واقع شده است. استان گلستان در جنوب شرقی دریای خزر با مساحتی بالغ بر ۲۰۴۳۸ کیلومتر مربع حدود ۱/۳ درصد مساحت کل کشور را دارا است (سالنامه آماری استان گلستان، ۲۰۱۶). این استان بین عرض جغرافیایی ۳۰° ۳۶' تا ۳۸° ۸' و طول جغرافیایی ۵۷° ۵۳' تا ۵۶° ۲۲' شرقی واقع شده است. ۴۷۶۰۰۰ هکتار معادل ۳/۲۳ درصد از مساحت استان گلستان با لس پوشیده شده است. لس‌های استان گلستان بر اساس ویژگی‌های اندازه (خواجه و همکاران، ۱۳۸۳) و خواص مهندسی آن (رضایی، ۱۳۹۲) به سه ناحیه تقسیم شده‌اند: لس‌های ناحیه ۱ که به لس‌های کوهپایه معروف‌اند؛ سهم گسترش لس‌های ناحیه ۱ حدود ۶۰ هزار هکتار است. لس‌های ناحیه ۲ در مناطق مرکزی و شرق استان گلستان با مساحت حدوداً ۳۳۸ هزار هکتار گسترش دارند. ناحیه ۳ مربوط به نهشته‌های لسی شمال مراوه‌تپه، حاشیه

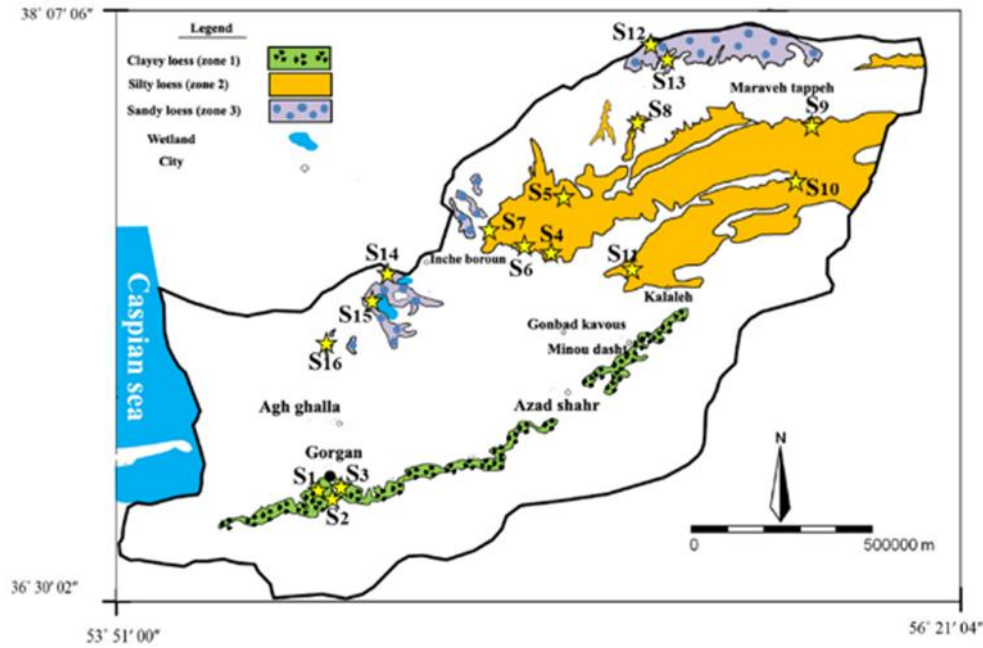
نمونه‌برداری و مطالعه انتخاب شد. در زون یک از ۳ ایستگاه، زون دو ۸ ایستگاه و زون سه ۵ ایستگاه نمونه‌برداری انجام شد. شماره نمونه‌ها و موقعیت هر ایستگاه در جدول ۱ و شکل ۱ آورده شده است.

نمونه‌های لس به‌منظور تجزیه شیمیایی به شرکت کانساران بینالود ارسال گردید. تعداد ۱۶ نمونه به‌منظور تعیین اکسیدهای اصلی توسط دستگاه XRF ساخت کمپانی PHILIPS مدل PW1480 و به‌منظور تعیین عناصر فرعی توسط دستگاه Optima 5300V Perkin - Elmer مورد آزمایش قرار گرفتند.

رودخانه اترک در مرز ایران و ترکمنستان و حواشی دریاچه‌های آلاگل و آلاگل و برخان‌های شمال شرق آق‌قلا است. سهم گسترش لس‌های ناحیه ۳ حدوداً ۷۸ هزار هکتار برآورد می‌گردد (رضایی، ۱۳۹۲؛ خواجه و همکاران، ۱۳۸۳). نمونه‌برداری از سه زون بر اساس سه نوع بافت لسی استان گلستان که شامل لس ماسه‌ای، لس سیلتی و لس رسی هستند صورت گرفت (قندهاری، ۱۳۹۸). ابتدا با توجه به نقشه استان گلستان (با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰) پراکندگی لس‌های استان بررسی و ۱۶ ایستگاه در سه ناحیه با توجه به راه‌های دسترسی، وجود ترانشه مناسب برای

جدول ۱: نام و موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری

ایستگاه	محل	ناحیه
S1	سعدآباد	1
S2	گلند فخرآباد	
S3	نصرآباد	
S4	دوراهی آق بند	2
S5	شمال شرق آق بند	
S6	شمال گنبد	
S7	داشلی برون	
S8	هوتن	
S9	مسکن مهر مراوه‌تپه	
S10	چنارلی	
S11	روستای تمرقره قوزی	3
S12	آق تقه جدید	
S13	مختومقلی	
S14	آلاگل	
S15	آلاگل	
S16	کمربندی آق‌قلا	



شکل ۱: نقشه پراکنش سه تیپ لس در استان گلستان و ایستگاه‌های نمونه‌برداری

۲- شاخص CIW: هارنویز (Harnois, 1988) بیان می‌کند عنصر پتاسیم رفتار یکنواختی در هوازگی نشان نمی‌دهد یعنی در طی هوازگی ضعیف پتاسیم در محصولات هوازگی غنی می‌شود اما در هوازگی شدید تخلیه می‌شود؛ بنابراین وی پتاسیم را از شاخص CIA حذف نمود و شاخص CIW را ارائه نمود.

۳- شاخص PIA: فدو و همکاران (Fedo et al., 1995) شاخص CIW را بر مبنای محتوای آلومینیوم تصحیح نمودند. آنان بیان کرده است چنانچه مقدار فلدسپارهای پتاسیم دار در مواد مادری زیاد باشد، مقدار CIW به صورت غیرعادی زیاد به دست می‌آید؛ بنابراین شاخص PIA را معرفی کردند که نشان‌دهنده هوازگی پلاژیوکلازها است.

۴- شاخص ICV: شاخص تنوع ترکیبی یا ICV توسط کوکس و همکاران (Cox et al 1995) برای تعیین سیکل اول رسوبی یا رسوبات حاصل از چرخه مجدد معرفی و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵- شاخص CPA: از آنجایی که شاخص‌های معمول هوازگی تحت تاثیر کربنات ثانویه یا ایلیتی شدن قرار می‌گیرند باگل و همکاران (Bugge et al., 2011) شاخص CPA را معرفی نمودند که

انواع شاخص‌های هوازگی در لس‌ها: افزایش یا

کاهش عناصر یا اکسیدهای اصلی می‌تواند در بررسی شرایط ژئوشیمی رسوبی محیط در قالب شاخص‌های مختلف بررسی هوازگی لس‌ها موثر باشد. از این شاخص‌ها می‌توان به تمرکز کانی‌های انحلال پذیر یا انحلال ناپذیر در لس‌ها و نقش اقلیم در ترکیب شیمیایی لس‌ها پی برد که در این تحقیق ۵ شاخص مهم مورد بررسی قرار می‌گیرد (جدول ۲):

۱- شاخص CIA: در طی هوازگی فلدسپارهای پتاسیم و پلاژیوکلازهای آلومینیوم در محصولات هوازگی غنی شده و K، Na و Ca به عنوان عناصر متحرک تخلیه می‌شود (Nesbitt and Young, 1982). مقدار CaO در شاخص‌ها منحصراً Ca موجود در کانی‌های سیلیکاته است (گیاهی، ۱۳۸۹). از آنجایی که روش‌های به‌کاررفته در این تحقیق قادر به تمایز بین CaO سیلیکاته و کربناته نیست، مک لنان (Mc Lennan, 1993) بیان می‌کند نسبت Ca/Na به صورت معقولی در کانی‌های سیلیکاته وجود دارد و فرض می‌شود این مقدار با میزان Na₂O برابر است (Gallet et al., 1998).

است که به صورت CaO^* نمایش داده می‌شود و بر اساس این واقعیت محاسبه شده که مقدار CaO/Na_2O موجود در ساختار مواد سیلیکاته بدون حضور کانی‌های کربناتی از واحد تجاوز نمی‌کند (McLennan et al., 1993) محاسبه $Al_2O_3+Na_2O+K_2O$ و قرار دادن آن در مقابل SiO_2 در نمودار می‌توان شرایط اقلیمی گذشته را تخمین زد (Suttner and Dutta, 1986).

مستقیماً تحت تاثیر تغییرات پتاسیم و کلسیم نمی‌باشد. با استفاده از ترکیب عناصر اصلی، میزان هوازدهی طبق شاخص‌های هوازدهی در جدول ۲ محاسبه و سپس تغییرات هوازدهی لس‌های گلستان و روند این تغییرات در سه ناحیه و ۱۶ ایستگاه نمونه برداری از لس‌های استان بررسی گردید. لازم به ذکر است که در شاخص‌های مورد محاسبه مقدار CaO نشان‌دهنده مقدار کلسیم موجود در ساختار کانی‌های سیلیکاته

جدول ۲ - طریقه محاسبه شاخص‌های هوازدهی

منبع	شاخص هوازدهی
(Nesbitt and Young, 1982)	$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO^* + K_2O)] * 100$
(Harnois, 1988)	$CIW = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O + CaO^*)] * 100$
(Fedo et al., 1995)	$PIA = (Al_2O_3 - K_2O) / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O - K_2O) * 100$
(Cox et al., 1995)	$ICV = (Fe_2O_3 + K_2O + Na_2O + CaO + MgO + MnO) / Al_2O_3$
(Buggle, et al., 2011)	$CPA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + Na_2O)] * 100$

۵۳/۵۰ درصد در ناحیه ۱، میانگین ۵۷/۴۶ درصد ناحیه ۲ و میانگین ۴۹/۰۴ درصد در ناحیه ۳ است (شکل ۲). در لس‌های استان گلستان اکسید سیلیسیوم (SiO_2) فراوان‌ترین اکسید است که مقادیر آن بین ۲۹/۴ تا ۶۱/۳ درصد تغییر می‌کند. میانگین مقدار SiO_2 در نمونه‌های منطقه ۱ برابر با ۵۳/۵۰ درصد، در ناحیه ۲ برابر با ۵۷/۴۶ و در منطقه ۳ دارای میانگین ۴۹/۰۴ درصد بوده است. اکسید سیلیسیوم (SiO_2) از ناحیه ۲ به ۱ کاهش یافته است.

نتایج

تغییرات اکسیدهای اصلی در ناحیه‌های سه‌گانه مورد مطالعه: بر اساس نتایج حاصل از آنالیز ژئوشیمی به روش XRF مشاهده می‌شود که SiO_2 فراوان‌ترین اکسید است که مقادیر آن بین ۲۹/۴ تا ۶۱/۳ درصد تغییر می‌کند. کمترین مقدار آن در منطقه کمربندی آق‌قلا و بیشترین مقدار آن در منطقه شمال شرق آق بند مشاهده می‌شود (جدول ۳). مقدار SiO_2 در نمونه‌ها با میانگین

جدول ۳ - مقادیر اکسیدهای اصلی در لس‌های گلستان.

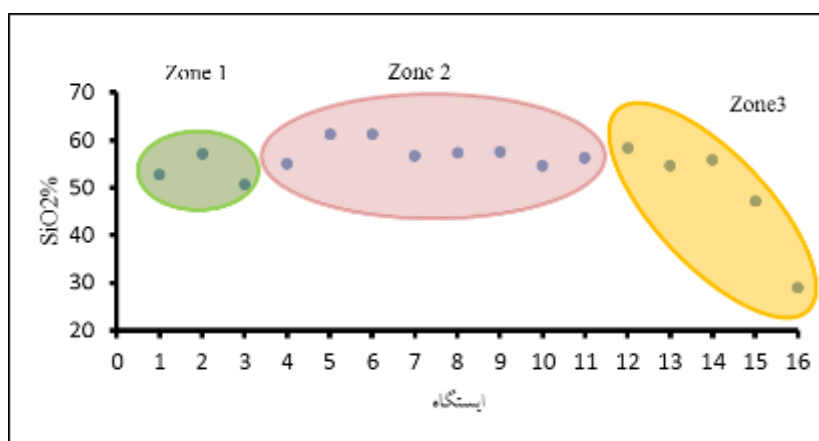
ایستگاه	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	Na_2O	K_2O	MgO	TiO_2	MnO	P_2O_5	L.O.I	SO_3
S1	52/75	10/32	4/64	11/6	1/2	2/21	2/39	0/551	0/096	0/124	13/91	0/01
S2	57/04	10/49	4/58	9	1/45	2/25	2/35	0/56	0/035	0/131	11/95	0/01
S3	50/72	11/11	4/82	12/37	1/28	2/28	2/88	0/563	0/089	0/14	13/52	0/01
S4	54/98	9/98	3/91	10/64	1/77	2/15	2/66	0/527	0/062	0/124	12/14	0/83
S5	61/23	9/79	3/9	7/83	1/78	2/08	2/46	0/513	0/074	0/129	9/76	0/16
S6	61/22	9/63	3/38	8/76	1/99	2/06	2/14	0/494	0/068	0/11	9/49	0/25
S7	56/79	9/21	3/5	9/93	1/9	1/95	2/38	0/463	0/064	0/117	11/96	0/86
S8	57/28	9/58	4/02	8/73	2/01	1/98	2/42	0/523	0/072	0/126	12/37	0/22
S9	57/52	9/29	3/97	9/78	1/72	2/03	2/5	0/517	0/071	0/126	11/73	0/42

جدول ۳- مقادیر اکسیدهای اصلی در لس های گلستان.

ایستگاه	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	L.O.I	SO ₃
S10	54/66	11/01	4/45	9/92	1/6	2/28	2/72	0/556	0/069	0/126	11/95	0/32
S11	56/29	9/19	3/53	12/42	1/35	1/85	2/13	0/588	0/087	0/126	11/68	0/48
S12	58/39	9/71	3/84	8/85	2/04	2/08	2/45	0/547	0/075	0/126	11/11	0/37
S13	54/64	9/98	4/05	10/36	2/1	2/02	2/6	0/535	0/077	0/126	12/35	0/87
S14	55/92	9/32	2/83	12/34	1/93	1/9	2/13	0/349	0/055	0/126	11/41	1/23
S15	47/24	7/23	2/37	16/5	1/47	1/64	1/76	0/31	0/053	0/126	15/98	5/09
S16	29/04	4/83	2/1	26	0/71	1/08	1/89	0/302	0/044	0/126	20/42	13/19

مقدار SiO₂ با افزایش Al₂O₃ افزایش می یابد (شکل ۳) که حاکی از حضور فراوان کانی های آلومینو سیلیکاته مانند فلدسپارها و میکاهاست. از طرف دیگر یکی از شاخص های بلوغ شیمیایی رسوبات مقدار SiO₂ و نسبت SiO₂/Al₂O₃ است و اگر این نسبت بالاتر از ۶-۵ باشد نشان دهنده مچوریتی بالا است (Roser and Korsch, 1988). این نسبت برای لس های استان گلستان از ۴/۵۶ تا ۶/۵۳ تغییر می کند که حاکی از مچوریتی بالای این لس ها است (جدول ۴). این مقدار برای رسوبات کشمیر بین ۳/۳۳-۴/۴۳ است که نشان دهنده رسوبات نابالغ تا بلوغ ضعیف است (احمد و چاندر، ۲۰۰۳).

شکل ۲: نمودار توزیع SiO₂ در مناطق مورد مطالعه.

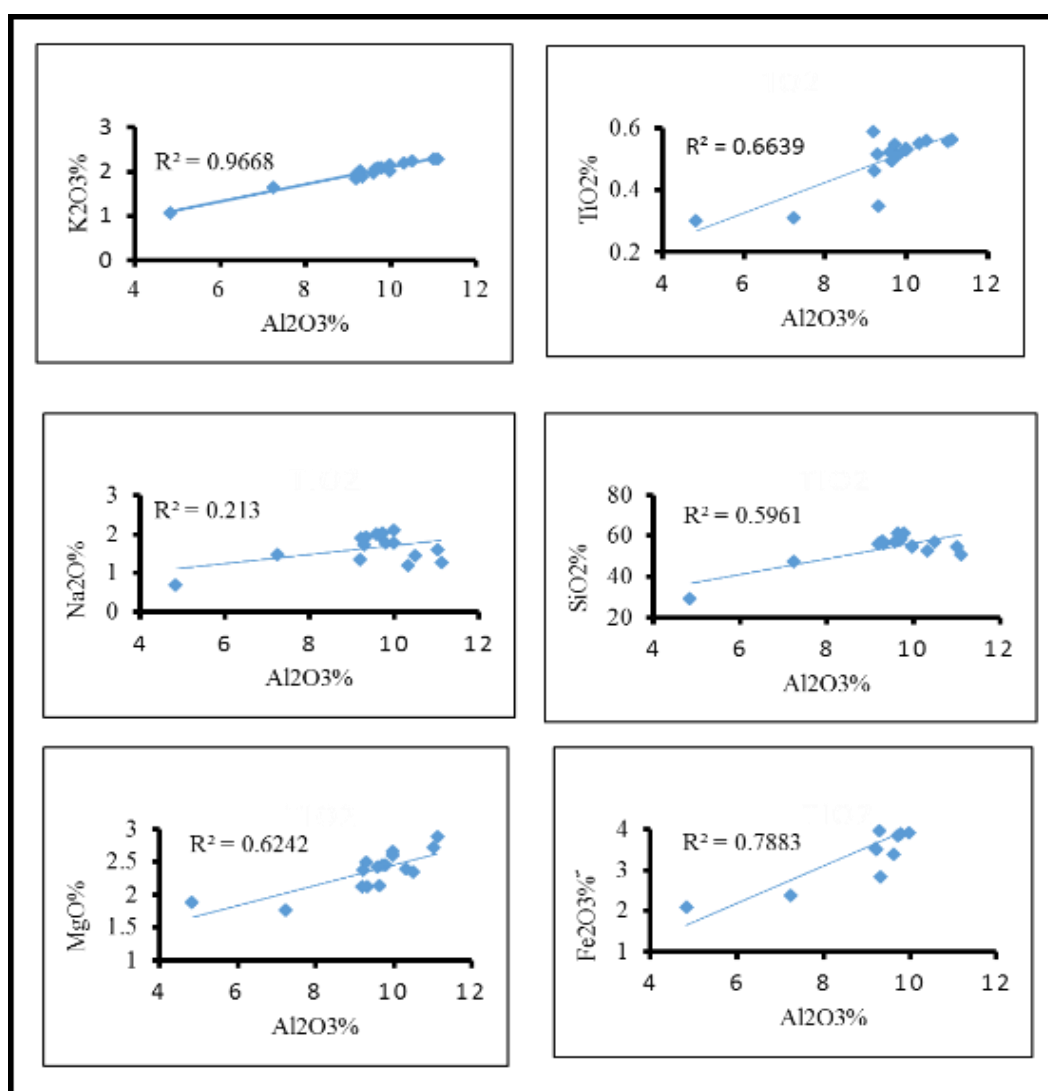
شکل ۲: نمودار توزیع SiO₂ در مناطق مورد مطالعه.

جدول ۴: نسبت های اکسیدهای اصلی در لس های استان گلستان

ایستگاه	MgO/TiO ₂	Na ₂ O/K ₂ O	Al ₂ O ₃ /Na ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	K ₂ O/Al ₂ O ₃	K ₂ O/Na ₂ O
S1	۴/۳۳۸	۰/۵۴۳	۸/۶	۵/۱۱۱	۰/۲۱۴	۱/۸۴۲
S2	۴/۱۹۶	۰/۶۴۴	۷/۲۳۴	۵/۴۳۸	۰/۲۱۴	۱/۵۵۲
S3	۵/۱۱۵	۰/۵۶۱	۸/۶۸	۴/۵۶۵	۰/۲۰۵	۱/۷۸۱
S4	۵/۰۴۷	۰/۸۲۳	۵/۶۳۸	۵/۵۰۹	۰/۲۱۵	۱/۲۱۵
S5	۴/۷۹۵	۰/۸۵۶	۵/۵	۶/۲۵۴	۰/۲۱۲	۱/۱۶۹
S6	۴/۳۳۲	۰/۹۶۶	۴/۸۳۹	۶/۳۵۷	۰/۲۱۴	۱/۰۳۵
S7	۵/۱۴۰	۰/۹۷۴	۴/۸۴۷	۶/۱۶۶	۰/۲۱۲	۱/۰۲۶
S8	۴/۶۲۷	۱/۰۱۵	۴/۷۶۶	۵/۹۷۹	۰/۲۰۷	۰/۹۸۵
S9	۴/۸۳۶	۰/۸۴۷	۵/۴۰۱	۶/۱۹۲	۰/۲۱۹	۱/۱۸۰

جدول ۴: نسبت‌های اکسیدهای اصلی در لس‌های استان گلستان

ایستگاه	MgO/TiO ₂	Na ₂ O/K ₂ O	Al ₂ O ₃ /Na ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	K ₂ O/Al ₂ O ₃	K ₂ O/Na ₂ O
S10	۴/۸۹۲	۰/۷۰۲	۶/۸۸۱	۴/۹۶۵	۰/۲۰۷	۱/۴۲۵
S11	۳/۶۲۲	۰/۷۳۰	۶/۸۰۷	۶/۱۲۵	۰/۲۰۱	۱/۳۷۰
S12	۴/۴۷۹	۰/۹۸۱	۴/۷۶۰	۶/۰۱۳	۰/۲۱۴	۱/۰۲۰
S13	۴/۸۶	۰/۰۴۰	۴/۷۵۲	۵/۴۷۵	۰/۲۰۲	۰/۹۶۲
s14	۶/۱۰۳	۱/۰۱۶	۴/۸۲۹	۶	۰/۲۰۴	۰/۹۸۴
s15	۵/۶۷۷	۰/۸۹۶	۴/۹۱۸	۶/۵۳۴	۰/۲۲۷	۱/۱۱۶
s16	۶/۲۵۸	۰/۶۵۷	۶/۸۰۳	۶/۰۱۲	۰/۲۲۴	۱/۵۲۱

شکل ۳: تغییرات اکسیدهای اصلی در مقابل Al₂O₃ در لس‌های استان گلستان.

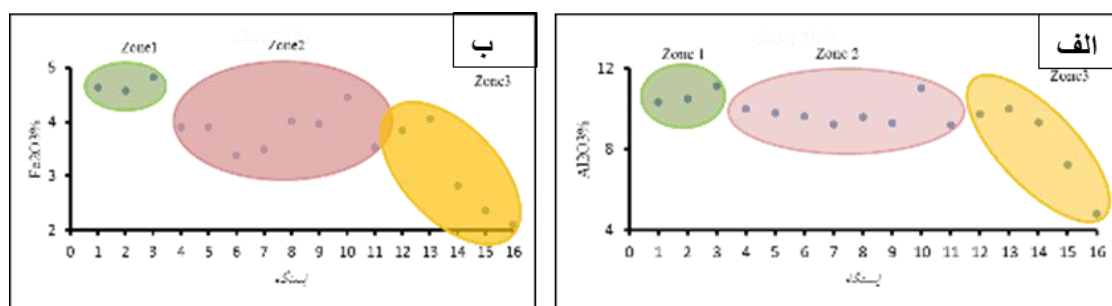
نتایج نشان داد اکسید آلومینیم از منطقه ۱ به منطقه ۳ کاهش می‌یابد. با توجه به اینکه اکسید آلومینیم یک کانی انحلال‌ناپذیر و پایدار بوده و در آب‌وهوای مرطوب با خروج عناصر محلول مقدار آن در محیط

مقدار Al₂O₃ در نمونه‌ها با میانگین ۱۰/۶۴ درصد در ناحیه ۱، میانگین ۹/۷۱ درصد ناحیه ۲ و میانگین ۸/۲۱ درصد در ناحیه ۳ است. (شکل ۴ الف). دومین اکسید از نظر فراوانی با Al₂O₃ میانگین ۹/۴۱ است.

کائولینیت، ایلیت، اسمکتیت، میکا و کلریت و فلدسپارها و به مقدار کمتر در کانی‌های بازی جای می‌گیرد (Zand Moghadm et al., 2013; Jafarzadeh et al., 2014). اکسید آلومینیم جزء عناصر انحلال‌ناپذیر و پایدار است و با اضافه شدن ترکیباتی مانند اکسید کلسیم و اکسید سدیم که انحلال‌پذیر و ناپایدار هستند، کاهش می‌یابد، از همین رو شاهد کاهش این اکسید از منطقه یک به سه هستیم. میانگین مقدار Fe_2O_3 در نمونه‌ها ۴/۶۸ درصد در ناحیه ۱، ۳/۸۳ درصد ناحیه ۲ و ۳/۰۳ درصد در ناحیه ۳ است. (شکل ۴ ب) میزان میانگین این اکسید به وضوح از ناحیه ۱ به ۳ کاهش می‌یابد. از آنجائی که اکسید آهن یک اکسید نامحلول و پایدار همانند Al_2O_3 است، بنابراین در ناحیه ۱ به علت آب‌وهوای مرطوب‌تر با خروج عناصر محلول Fe_2O_3 در محیط افزایش یافته که با نتایج فیضی و همکاران (۱۳۹۶) نیز همخوان است. مقدار Fe_2O_3 با کانی‌های سنگین یا سیمان هماتیته بین دانه‌ها نیز است (Zand Moghadm et al., 2013; Jafarzadeh et al., 2014). در ایستگاه‌های S14 و S15 و S16 مقادیر Fe_2O_3 پایین‌تر از سایر مقادیر است که احتمالاً علاوه بر رطوبت پایین‌تر، منشأ متفاوت لس‌های این ایستگاه نیز در کاهش درصد اکسید آهن مؤثر است.

افزایش می‌یابد (فیضی و همکاران، ۱۳۹۶) لذا نتایج به‌دست‌آمده را می‌توان با این امر تحلیل نمود. از سوی دیگر مقادیر Al_2O_3 در ایستگاه S16 با مقدار ۴/۸۳ بسیار پایین‌تر از سایر مناطق است که احتمالاً علاوه بر رطوبت پایین‌تر، منشأ اولیه متفاوت لس‌های این ایستگاه نیز در این کاهش میزان مؤثر است.

همبستگی مثبت بین Al_2O_3 و SiO_2 (شکل ۳) نشان‌دهنده فراوانی کانی‌های آلوسیلیکات از جمله میکا و فلدسپار در لس‌های استان گلستان است. یکی از اندیس‌ها و اکسیدهای ارزشمند که اطلاعات زیادی در فرآیندهای دیانزنی به ما می‌دهد اکسید آلومینیم Al_2O_3 است. این عنصر به دلیل غیر متحرک بودن در طی هوازدگی، دیانز و دگرگونی پایدار است (Batumike et al., 2006 Adel et al., 2008). تغییرات عناصر اصلی در برابر Al_2O_3 لس‌های استان گلستان نشان می‌دهد که اکسیدهای K_2O ، TiO_2 ، Fe_2O_3 ، MgO و SiO_2 با Al_2O_3 همبستگی مثبت دارند (شکل ۳). پیروی بیشتر اکسیدها از روند تغییرات Al_2O_3 نشان‌دهنده تمرکز و فراوانی کانی‌های رسی همچون ایلیت است (Yang, 2009; Khanehbad et al., 2012). به دلیل حلالیت پایین Al در هنگام هوازدگی، این عناصر به صورت غیر متحرک در محیط باقی می‌مانند (Sugitani et al., 1996). در محصولات هوازده Al عمدتاً در ساختار کانی‌های رسی مانند



شکل ۴- الف- نمودار توزیع Al_2O_3 در مناطق مورد مطالعه و ب- Fe_2O_3 در مناطق مورد مطالعه

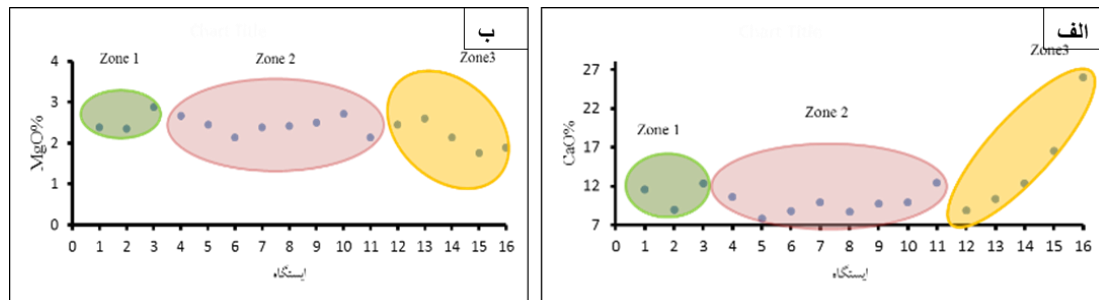
درصد است اما در ناحیه ۳، CaO دو مقدار متفاوت داشت. ایستگاه‌های S12 و S13 دارای میانگین ۹/۶۰ درصد و ایستگاه‌های S14، S15 و S16 داری میانگین ۱۸/۲۸ بوده است (شکل ۵ الف). فراوانی CaO در نمونه‌های مورد مطالعه ۱۱/۵۶ است و معمولاً این

مقادیر CaO در مناطق مورد مطالعه بین حداقل ۷/۸۳ درصد در شمال شرق آق بند تا حداکثر ۲۶ درصد در کمربندی آق فلا متغیر است. در نمونه‌های مورد مطالعه میانگین مقدار CaO در منطقه ۱ با میانگین ۱۰/۹۹ درصد و در منطقه ۲ با میانگین ۹/۷۵

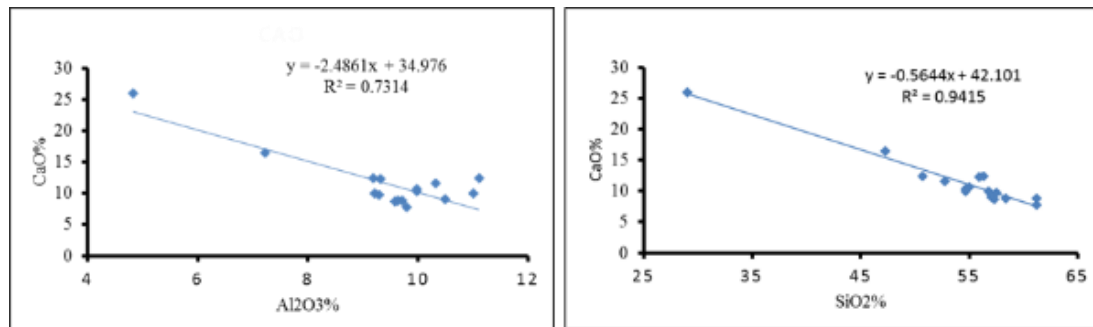
(۲۶) که می‌تواند به دلیل بلوغ رسوبات باشد (Ahmad and Chandra, 2013). همچنین نشان دهنده این است که مواد معدنی کربنات با منشا ثانویه در این رسوبات وجود دارند (موسوی راد و همکاران 2010) که این نتیجه مشابه رسوبات کشمیر (احمد و چاندر ا 2003) می باشد.

در نمونه‌های مورد مطالعه میانگین مقدار MgO در منطقه ۱ برابر با ۲/۵۴ درصد و در منطقه ۲ برابر با ۲/۴۲ درصد است؛ اما در منطقه ۳، در ایستگاه‌های S12 و S13 برابر با ۲/۵۲ و در ایستگاه‌های S14، S15 و S16، ۱/۹۲ است (شکل ۵ ب). این اکسید در منطقه ۱ و منطقه ۳ مقادیر بیشتری دارد. بالا بودن این اکسید در منطقه ۳ به این علت است که این اکسید انحلال‌پذیر و ناپایدار است در آب‌وهوای مرطوب مقادیر این اکسید به علت انحلال و شستشو کاهش یافته و در آب‌وهوای گرم و خشک مقدار این کانی افزایش می‌یابد. بالا بودن میزان این اکسید در منطقه ۱ احتمالاً به دلیل تولید برجای آن یا آبشویی از واحدهای خاک‌های دیرینه و ورود به واحدهای لسی است. میزان MgO در بعضی نمونه‌ها می‌تواند نشان‌دهنده فراوانی دولومیت باشد که نیاز به بررسی پتروگرافی دارد. عنصر Mg با افزایش تأثیر دیاژنز آب و هوایی و شرایط احیایی افزایش می‌یابد و نشان‌دهنده رطوبت زیاد در محیط است (پورمعافی، ۱۳۸۷). لذا کاهش مقدار این عنصر گویای شرایط اقلیمی خشک است و کاهش این عنصر از ناحیه یک به سه حاکی از کاهش رطوبت است. به صورت کلی افزایش مقادیر اکسیدهای آلومینیوم، آهن، سیلیس و منیزیم با توجه به پایداری آنها در محیط رسوبی نشان از آب و هوای گرم و مرطوب زمان تشکیل و کاهش آنها بیانگر شرایط آب و هوای سرد و خشک است (فیضی و همکاران، ۱۳۹۶)

اکسید در ترکیب آلومینوسیلیکاتها حضور دارد. اکسید کلسیم یک عنصر انحلال‌پذیر و ناپایدار است و مقدار آن به شدت تابع شرایط محیطی است (فیضی و همکاران، ۱۳۹۶). در شرایط آب‌وهوای مرطوب این کانی شسته شده و از محیط خارج می‌شود. مقدار این اکسید در نواحی مورد مطالعه از منطقه ۱ به ۳ کاهش می‌یابد. به عقیده شنگ و همکاران (Sheng et al., 2008) کربنات کلسیم به صورت برجای نیز تولید می‌شود و از آنجایی که در منطقه ۱ اقلیم گرم و مرطوب است، می‌توان میزان بالای این اکسید در منطقه ۱ و افزایش از منطقه ۳ به ۱ را در نتیجه افزایش رطوبت هوا و تولید به صورت برجای نسبت داد. از طرف دیگر از آنجایی که این اکسید در خاک‌های دیرینه فراوان تر است ممکن است بر اثر آبشویی از این افق‌ها وارد نمونه‌های لسی شده باشند. نتایج محاسبه کربنات کلسیم به روش تیتراسیون مؤید این نتایج است. در ایستگاه‌های S14، S15 و S16 مقدار CaO بیشتر از سایر نقاط است که احتمالاً به دلیل منشأ متفاوت این مناطق است. نکته قابل تأمل در این نتیجه این است که ایستگاه S16 مقادیر بسیار متفاوت و بیشتری از سایر نقاط نشان داد که می‌تواند نشان‌دهنده منشأ متفاوت این منطقه باشد. نتایج به دست آمده از Cao یک همبستگی منفی با SiO_2 ($R^2=0/94$) و Al_2O_3 ($R^2=0/73$) را نشان می‌دهد (شکل ۶). اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم کانی انحلال‌ناپذیر و اکسید کلسیم یک عنصر انحلال‌پذیر است. میزان آن‌ها برعکس یکدیگر است؛ یعنی با کاهش اکسید کلسیم مقدار اکسید آلومینیوم و اکسید سیلیسیم افزایش می‌یابد؛ که این موضوع با توجه به ماهیت این کانی‌ها شرایط اقلیمی متفاوت را مشخص می‌کند و نشان‌دهنده عکس‌العمل متفاوت این دو عنصر در برابر شرایط محیطی است (فیضی و همکاران، ۱۳۹۶). مقدار CaO تغییرات زیادی را نشان می‌دهد (بین ۷/۸۳ تا



شکل ۵: الف: نمودار توزیع CaO در مناطق مورد مطالعه و ب- نمودار توزیع MgO در مناطق مورد مطالعه.

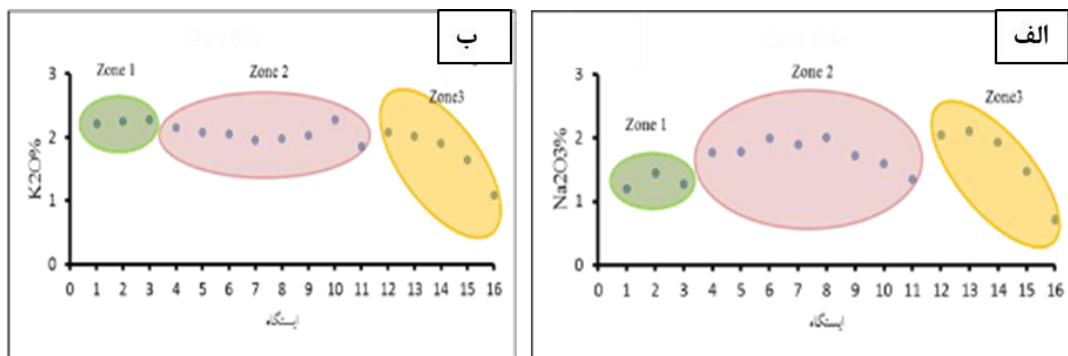


شکل ۶: تغییرات CaO در مقابل Al_2O_3 و SiO_2

S15 و S16 دارای میانگین ۱/۵۴ درصد بوده‌اند (شکل ۷ ب). مقدار این اکسید در منطقه ۱ بیشترین مقدار است. میزان K_2O و Al_2O_3 در ارتباط با میکا و فلدسپات پتاسیم است. همبستگی مثبت و بالای بین K_2O و Al_2O_3 ($R^2 = 0.96$) نشان می‌دهد (شکل ۳) که کانی‌های پتاسیم دار مانند مسکویت و ایلیت بیشترین نقش کنترل‌کننده غلظت آلومینیم را دارند (Jin et al., 2006; McLennan et al., 1993). بر اساس تحقیقات کوکس و همکاران (Cox et al., 1995) نسبت K_2O/Al_2O_3 در رس‌ها کمتر از ۰/۳ بوده و در کانی‌های فلدسپاتی بین ۰/۳ تا ۰/۹ متغیر است. مقدار محاسبه شده برای نمونه‌های مورد مطالعه بین ۰/۲ تا ۰/۲۲ تغییر می‌کند (جدول ۴) که احتمالاً نشان‌دهنده برتری مقدار سایر کانی‌های رسی نسبت به میکا و کانی‌های پتاسیم دار مانند فلدسپاتها است. این نتایج با نتایج مطالعات احمد و چاندر (2013) در کشمیر همخوانی دارد.

در نمونه‌های مورد مطالعه میانگین مقدار Na_2O در منطقه ۱ برابر با ۱/۳۱ درصد و در منطقه ۲ برابر با ۱/۷۶ درصد است؛ اما منطقه ۳، میانگین مقدار Na_2O در ایستگاه‌های S12 و S13 برابر با ۲/۰۷ درصد و در ایستگاه‌های S14، S15 و S16 دارای میانگین ۱/۳۷ درصد بوده است (شکل ۷ الف). نتایج نشان داد میانگین مقدار این اکسید از منطقه ۳ به ۱ کاهش می‌یابد که آن را می‌توان به کاهش دما و رطوبت از منطقه ۱ به منطقه سه ارتباط داد چراکه این اکسید از محیط شسته می‌شود و در ناحیه ۳ نیز به علت آب‌وهوای خشک در محیط باقی می‌ماند. پایین بودن این اکسید در ایستگاه‌های S14، S15 و S16 را می‌توان به دلیل منشأ متفاوت و یا حمل مجدد این نمونه‌ها دانست.

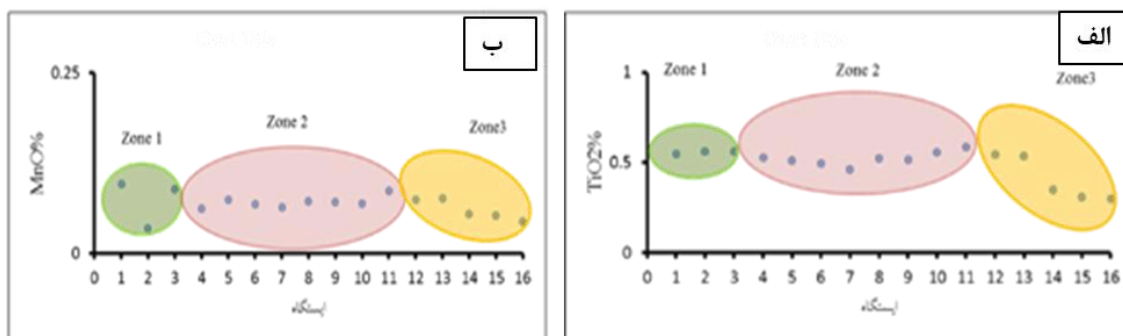
در نمونه‌های مورد مطالعه مقدار میانگین K_2O در منطقه ۱، برابر با ۲/۲۴ درصد و در منطقه ۲ برابر با ۲/۰۴ درصد است. در ناحیه ۳ در ایستگاه‌های S12 و S13 دارای میانگین ۲/۰۵ درصد و ایستگاه‌های S14،



شکل ۷: الف- نمودار توزیع Na_2O در مناطق مورد مطالعه و ب- K_2O در مناطق مورد مطالعه.

سنگ‌های آذرین نسبت Al/Ti افزایش می‌یابد. میزان کم TiO_2 نشان‌دهنده فراوانی پایین کانی‌های تیتان دار در لس‌های گلستان است. از طرفی همبستگی پایین تیتانیوم با سیلیس و همبستگی نسبتاً بالای آن با نیکل نشان‌دهنده پیوند تیتانیوم با فیلوسیلیکات‌ها است. در نمونه‌های مورد مطالعه میانگین مقدار MnO در منطقه ۱ برابر با ۰/۰۷ درصد، در منطقه ۲ برابر با ۰/۰۷ درصد و در منطقه ۳ برابر با ۰/۰۶ درصد است (شکل ۸ ب). عنصر منگنز نشان‌دهنده شرایط احیایی و بارش بیشتر است. این عنصر در بازسازی شرایط آب‌وهوای گذشته یکی از شاخص‌های مهم مورد مطالعه است. تغییرات این عنصر در مناطق مورد مطالعه بسیار کم اما از ناحیه ۱ به ۳ کاهش می‌یابد.

در نمونه‌های مورد مطالعه میانگین مقدار TiO_2 در منطقه ۱ برابر با ۰/۵۶ درصد، در منطقه ۲ برابر با ۰/۵۲ درصد و در منطقه ۳ برابر با ۰/۴۱ درصد است. این اکسید در S14، S15 و S16 پایین‌تر از سایر نمونه‌هاست (شکل ۸ الف). عنصر TiO_2 در سنگ‌های مافیکی ولکانیکی وجود دارد (Khanehbad et al., 2012). به دلیل حلالیت پایین Ti در هنگام هوازدگی، این عناصر به صورت غیر متحرک در محیط باقی می‌مانند (Sugitani et al., 1996). Ti در محصولات هوازدگی عمدتاً در ساختار رس و کانی‌های بازی مانند کلریت، بیوتیت و ایلمنیت قرار می‌گیرد. در سنگ‌های آذرین Al عمدتاً در ساختمان فلدسپار و Ti در ساختمان کانی‌های بازی قرار دارد. با افزایش SiO_2



شکل ۸: الف- نمودار توزیع TiO_2 در مناطق مورد مطالعه و ب- MnO در مناطق مورد مطالعه.

بستگی دارند. برای مطالعه هوازدگی لس‌های مورد مطالعه مقادیر هوازدگی با ۵ شاخص استاندارد محاسبه شد (جدول ۵). براساس محاسبه انجام‌شده غلظت CIA دارای مقدار متوسط ۶۸/۶۲ در منطقه ۱، ۶۳/۵۳ در منطقه

شاخص تنوع ترکیبی و هوازدگی: شاخص‌های تنوع ترکیبی یا شاخص‌های هوازدگی برای کمی کردن شدت هوازدگی شیمیایی به کار می‌روند. این شاخص‌ها به عوامل مختلفی مانند ترکیب شیمیایی منشأ رسوبات، مدت هوازدگی، شرایط محیطی و غیره

شاخص آلتراسیون پلاژیوکلاز در تعیین هوازدهی کاربرد دارد و میزان شاخص دگرسانی پلاژیوکلاز در رسوبات غیر هوازده و تازه حدود ۵۰ و در رسوبات هوازده که تبدیل کامل فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی آلومینیوم‌دار ثانویه از قبیل کائولینیت، ایلیت و ژپسیت صورت می‌گیرد به ۱۰۰ نزدیک است. این شاخص در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۶۵/۱۶ تا ۷۷/۵۲ متغیر است که طبق سلوارج و چن (Selvaraj and Chen, 2006) بیانگر مقدار کم تا متوسط هوازدهی است. بررسی ارتباط PIA با عناصر کلسیم، منیزیم، سدیم و پتاسیم رابطه معکوس و معنی‌داری با سدیم ($R^2 = 0.58$) رابطه مثبت و معنی‌داری با پتاسیم ($R^2 = 0.86$) نشان می‌دهد و با عناصر کلسیم ($R^2 = 0.05$) و منیزیم ($R^2 = 0.07$) رابطه‌ای ندارد (شکل ۹).

مقدار شاخص ICV برای منطقه ۱ میانگین ۱/۱۹، منطقه ۲ میانگین ۱/۲۸ و منطقه ۳ میانگین ۱/۳۱ است (جدول ۵). شاخص تنوع ترکیبی (ICV) توسط کوکس و همکاران (Cox et al., 1995). برای تعیین سیکل اول رسوبی یا رسوبات حاصل از چرخه مجدد معرفی شد. به عقیده کوکس و همکاران (Cox et al., 1995) نمونه‌هایی که دارای کانی‌های رسی فراوان هستند ICV کمتری دارند (کمتر از ۱) و در نواحی با بالآمدگی خیلی کم، همراه با هوازدهی شیمیایی نهشته می‌شوند، همچنین نمونه‌های فاقد رسوبات ICV بالاتری نسبت به نمونه‌های رسی دارند. نمونه‌های با ICV بالاتر از عدد یک رسوبات سیکل اول رسوبی و نمونه‌هایی با ICV کمتر از عدد یک رسوبات چرخه مجدد یا رسوبات به شدت هوازده حاصل از سیکل اول رسوبی تفسیر می‌شوند (Cullers, 2000). با محاسبه میزان ICV در لس‌های گلستان در تمامی نمونه‌ها بیشتر از عدد یک است که نشان‌دهنده سیکل رسوبی اول آنهاست.

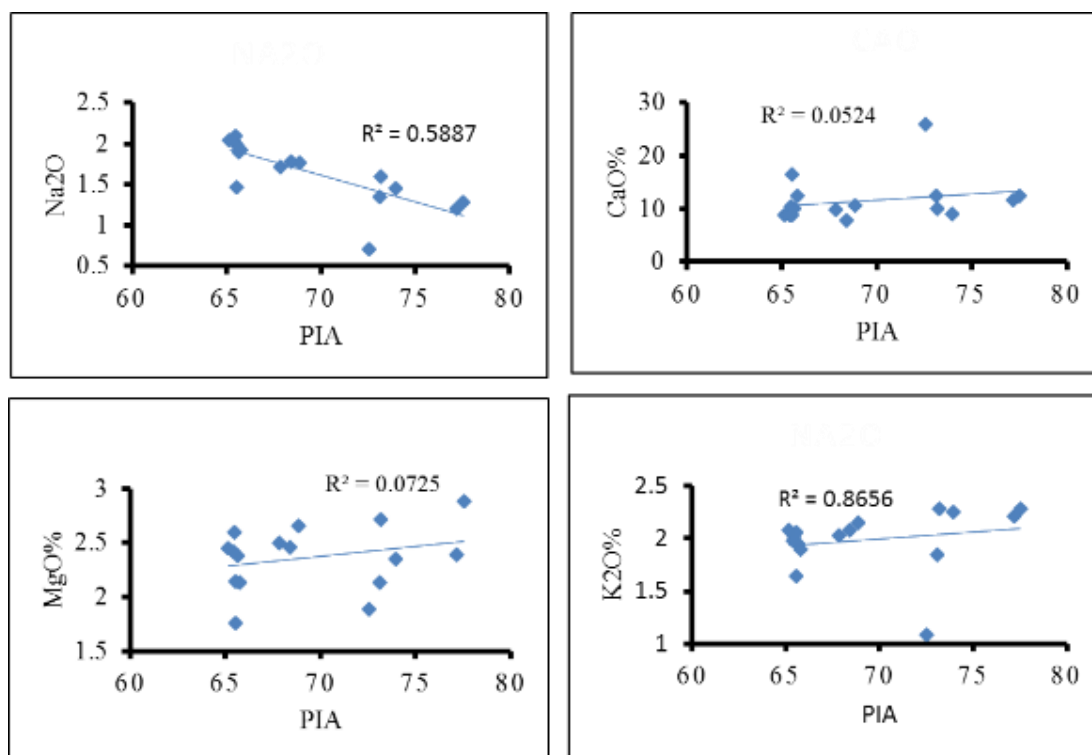
۲ و ۶۲/۳۴ در منطقه ۳ است که نشان‌دهنده اقلیم مرطوب‌تر و بارندگی بیشتر منطقه ۱ است. شاخص دگرسانی شیمیایی (CIA) که از نسبت اکسید غیرمتحرک Al_2O_3 به اکسیدهای متحرک CaO, Na_2O و K_2O به دست می‌آید (Nesbitt and Young, 1989) در محدوده ۵۰ تا ۱۰۰ در نوسان است. برای پلاژیوکلاز و و آلکالی فلدسپارهای هوازده نشده CIA تقریباً ۵۰ هست که مشابه سنگ‌های هوازده نشده پوسته بالایی است (Roy et al 2004). مقادیر کمتر از ۶۰ نشان‌دهنده هوازدهی کم، ۶۰ تا ۸۰ هوازدهی متوسط و بیشتر از ۸۰ هوازدهی زیاد را نشان می‌دهد (Fedot et al 1995). در طی هوازدهی کاتیون‌های پایدار مانند Ca^{+2} , K^{+} , Na^{+} از بین رفته و کاتیون‌های پایدار مانند Ti^{+4} , Al^{+3} باقی می‌مانند و موجب بالا رفتن شاخص CIA می‌شوند و همچنین میزان کم آن نشان‌دهنده هوازدهی کم و نبود دگرسانی شیمیایی است (Nesbitt and Young, 1982). در لس‌های استان گلستان مقدار CIA بین ۶۱/۱۸ تا ۶۹/۶۶ است که نشان‌دهنده دگرسانی شیمیایی متوسط در این رسوبات است.

مقدار شاخص CIW برای منطقه ۱ میانگین ۸۰/۲۴، منطقه ۲ میانگین ۷۳/۳۶ و برای منطقه ۳ میانگین ۷۱/۹۷ بوده است (جدول ۵). در این شاخص نیز منطقه ۱ مرطوب‌تر از سایر مناطق معرفی می‌شود. این شاخص در منطقه کمربندی آق‌قلا دارای مقدار ۷۷/۲۷ بوده که از سایر مناطق ناحیه ۳ بیشتر است.

شاخص PIA به‌طور کلی هوازدهی فلدسپار به کانی‌های رسی را کمی می‌کند (Fedot et al., 1995) و نشان‌دهنده شدت بیشتر هوازدهی در پلاژیوکلازها نسبت به کل رسوبات دربردارنده آن است. مقدار شاخص PIA برای منطقه ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب میانگین ۷۶/۲۱ و ۶۸/۴۹ و ۶۶/۸۹ را نشان می‌دهد (جدول ۵). در بررسی منطقه ای این شاخص، منطقه کمربندی آق‌قلا عددی بالاتر از سایر نقاط منطقه ۳ را نشان می‌دهد (جدول ۵).

جدول ۵: تغییرات شاخص‌های هوازدگی در ایستگاه‌های مورد مطالعه لس‌های گلستان

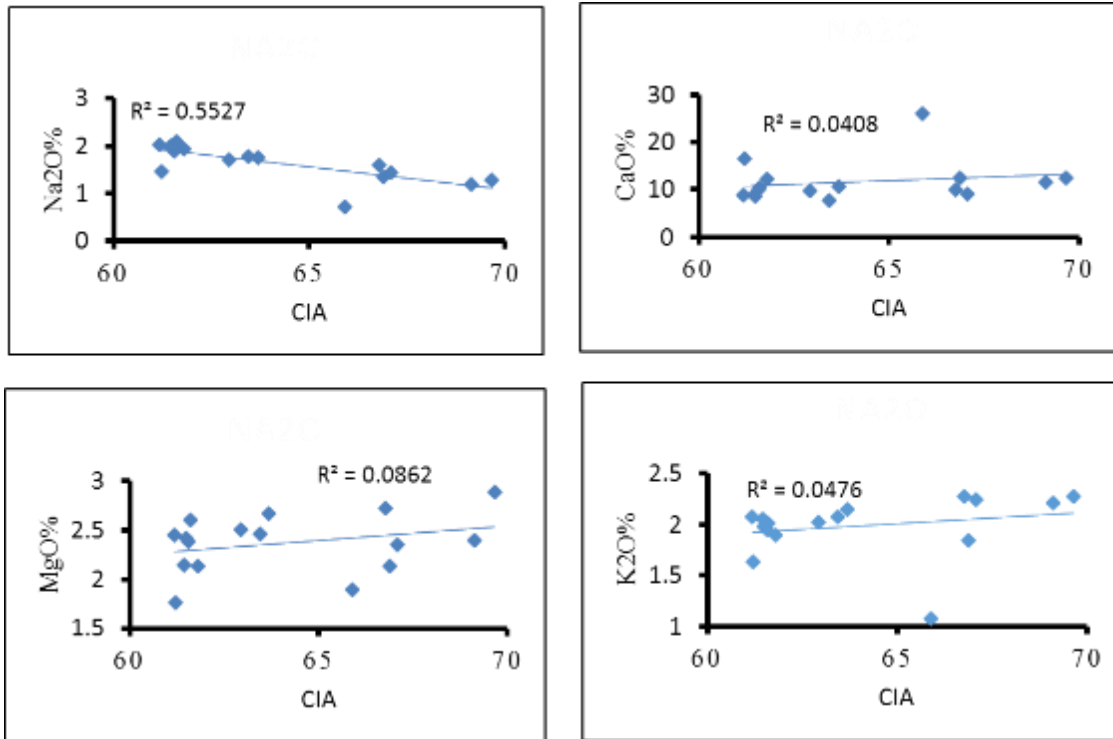
ایستگاه	CIA	CIW	ICV	PIA	CPA
S1	69.12	81.13	1.19	77.16	0.17
S2	67.07	78.34	1.21	73.97	0.19
S3	69.66	81.27	1.19	77.52	0.17
میانگین ناحیه ۱	68.62	80.25	1.20	76.22	0.18
S4	63.69	73.82	1.29	68.87	0.23
S5	63.45	73.33	1.29	68.41	0.25
S6	61.46	70.76	1.26	65.54	0.29
S7	61.56	70.79	1.32	65.64	0.30
S8	61.49	70.44	1.36	65.40	0.27
S9	62.94	72.98	1.35	67.85	0.24
S10	66.77	77.48	1.21	73.18	0.21
S11	66.89	77.29	1.18	73.11	0.24
میانگین ناحیه ۲	63.53	73.36	1.28	68.50	0.25
S12	61.18	70.41	1.35	65.16	0.29
S13	61.60	70.38	1.35	65.46	0.25
S14	61.80	70.71	1.19	65.78	0.28
S15	61.22	71.09	1.25	65.53	0.26
S16	65.89	77.28	1.42	72.53	0.23
میانگین ناحیه ۳	62.34	71.98	1.31	68.86	0.26



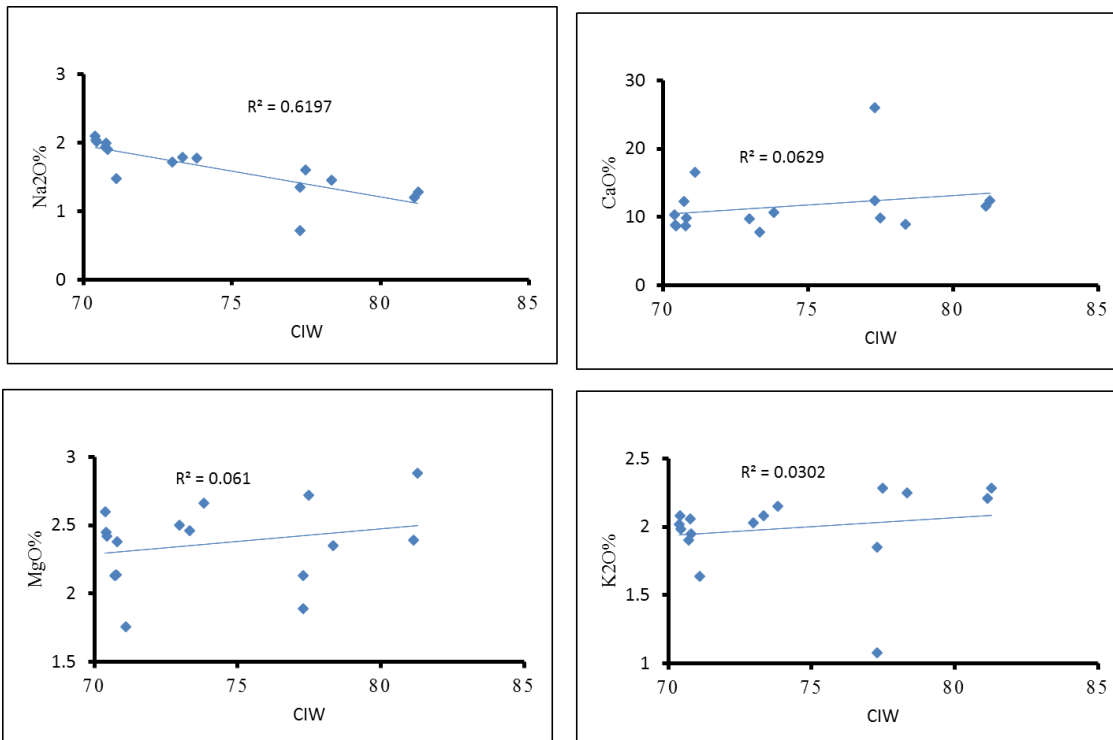
شکل ۹: بررسی ارتباط PIA با عناصر سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم در ایستگاه‌های مورد مطالعه لس‌های گلستان.

شاخص‌های CIA و CIW نیز رابطه‌ای با MgO، K₂O و CaO ندارند (شکل ۱۰ و ۱۱).

شاخص‌های CIA و CIW نیز رابطه منفی و معنی‌داری با سدیم دارند (شکل ۱۰ و ۱۱)، درحالی‌که



شکل ۱۰: بررسی ارتباط CIA با عناصر سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم در ایستگاه‌های مورد مطالعه لس‌های گلستان.



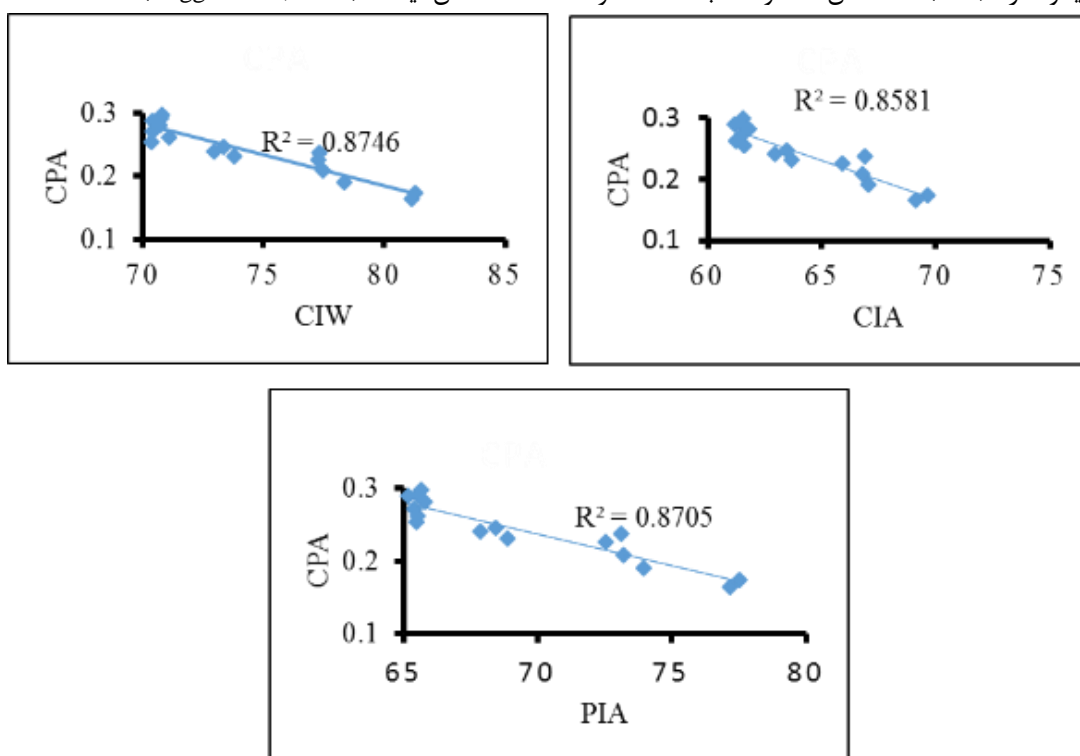
شکل ۱۱: بررسی ارتباط CIW با عناصر سدیم، کلسیم، منیزیم و پتاسیم در ایستگاه‌های مورد مطالعه لس‌های گلستان.

شدت هوازدگی از شاخص‌هایی مانند CPA استفاده می‌شود که تغییرات Na را در برابر عنصر نامحلول Al در نظر می‌گیرند.

نتایج نشان‌دهنده این است که هوازدگی جزئی بوده که در طی آن فقط خروج عناصر با حلالیت بالا مانند سدیم مشاهده می‌شود در این شرایط برای ارزیابی

Rb/Sr مقایسه و ارزیابی شد و از آن می‌توان به عنوان مناسب‌ترین شاخص برای هوازدهی سیلیکاتها یاد نمود. شاخص‌های مورد استفاده بر مبنای استرانسیوم (مانند Rb/Sr, Ba/Sr) احتمالاً تحت تأثیر تحرک کربنات ثانویه قرار می‌گیرند. از سوی دیگر، شاخص‌های رایج (مانند CIW, CIA, ICV, PIA) ممکن است در جداسازی کربنات کلسیم از سیلیکات کلسیم دچار عدم قطعیت شوند یا تحت تأثیر تثبیت پتاسیم (ایلیتی شدن) قرار گیرند درحالی‌که بررسیها نشان می‌دهد شاخص CPA نسبت به چنین اثراتی حساس نیست (Buggle et al., 2011)

با در نظر گرفتن رفتار عناصر در هنگام هوازدهی یا دیازنزا، استفاده از شاخص شیمیایی تغییر (CPA) یعنی نسبت مولی $100 \text{ Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Na}_2\text{O})$ که تغییرات Na را در برابر عنصر نامحلول Al در نظر می‌گیرد توصیه می‌شود که نسبت به شاخص‌های قبلی جدیدتر بوده و در سال ۲۰۱۱ میلادی معرفی شده است. در بررسی‌های تطبیقی شاخص هوازدهی CPA با شاخص‌های هوازدهی متداول از جمله «شاخص تغییرات شیمیایی» (CIA)، «شاخص شیمیایی هوازدهی» (CIW)، «شاخص دگرسانی پلاژیوکلاز» (PIA) و شاخص ICV و نسبت Ba/Sr



شکل ۱۲: همبستگی بین CPA با شاخص‌های CIW, CIA و PIA

قرار گیرند، این عناصر در مطالعات هوازدهی مناسب نیستند. پس از بررسی تمامی معیارهای ذکر شده، Li و Na مناسب‌ترین کاتیون متحرک برای شاخص‌های هوازدهی در توالی‌های لس به نظر می‌رسد. که با آزمایشات بیشتر استفاده از تغییرات عنصر سدیم در قالب شاخص CPA پیشنهاد می‌گردد.

همبستگی بالای بین CPA با شاخص‌هایی مانند CIA, CIW و PIA می‌تواند نشان‌دهنده کارایی این شاخص در این شرایط هوازدهی باشد (شکل ۱۲). در

در یک رسوب حاوی کربنات مانند اکثر ذخایر لس، تحرک کلسیم و منیزیم عمدتاً توسط رفتار کلسیت و دولومیت کنترل می‌شود. این برای عنصر استرانسیوم نیز صادق است، که می‌تواند جانشین کلسیم در کربنات‌ها شود (Wedepohl, 1978; Reeder et al., 2006). بنابراین، انتظار نمی‌رود که شاخص‌های متکی بر کلسیم، منیزیم یا استرانسیوم، شدت هوازدهی لس‌ها منعکس کنند. برخی از عناصر مانند آهن و منگنز ممکن است تحت تأثیر شرایط اکسیداسیون و کاهش

کاهش یافته اما در آب‌وهوای گرم و خشک مقدار این کانی افزایش می‌یابد. بالا بودن این اکسید در منطقه ۱ احتمالاً به دلیل تولید برجای آن یا آبشویی از واحدهای خاک‌های دیرینه و ورود به واحدهای لسی است. میزان MgO در بعضی نمونه‌ها می‌تواند نشان‌دهنده فراوانی دولومیت باشد که نیاز به بررسی پتروگرافی دارد.

میانگین مقدار Na_2O از منطقه ۳ به ۱ کاهش می‌یابد که آن را می‌توان به کاهش دما و رطوبت از منطقه ۱ به منطقه سه ارتباط داد چراکه این اکسید از محیط شسته می‌شود و در ناحیه ۳ نیز به علت آب‌وهوای خشک در محیط باقی می‌ماند. مقدار میانگین K_2O در منطقه ۱ بیشترین مقدار است. نسبت $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ برای نمونه‌های مورد مطالعه بین ۰/۲ تا ۰/۲۲ تغییر می‌کند که نشان‌دهنده برتری مقدار سایر کانی‌های رسی نسبت به میکا و کانی‌های پتاسیم دار مانند فلدسپاتها است.

ایستگاه‌های S14 و S15 و S16 دارای مقادیر Fe_2O_3 ، Al_2O_3 و Na_2O پایین‌تر و مقدار CaO بالاتر از سایر ایستگاهها است که احتمالاً منشأ متفاوت این ایستگاهها در این نتیجه مؤثر است. از دیدگاه اقلیم دیرینه ژئوشیمی عناصر به خوبی نشان‌دهنده شرایط دما و بارش در گذشته است. بالا بودن اکسیدهای آهن و آلومینیوم، سیلیسیم و تیتانیوم نشان‌دهنده آب و هوای گرم و مرطوب و بالا بودن اکسیدهای کلسیم و سدیم و منیزیم و پتاسیم نشان‌دهنده وجود آب و هوای سرد و خشک در لس‌های منطقه است. بررسی ژئوشیمیایی برش لسی کلت نکا (مهدی‌پور و همکاران، ۹۲) و برش لسی نوده آزاد شهر (فیضی و همکاران، ۹۶) و دستاورد مطالعه انجام شده حاضر نشان می‌دهد بازسازی و رصد تغییرات اقلیمی دیرینه به طور مستقیم به فراوانی عناصر انحلال‌پذیر یا انحلال‌ناپذیر، فراوانی یا عدم فراوانی برخی اکسیدهای اصلی و پذیرفتاری مغناطیسی پایین یا بالای نهشته‌های لسی مرتبط است (شکل ۱۳).

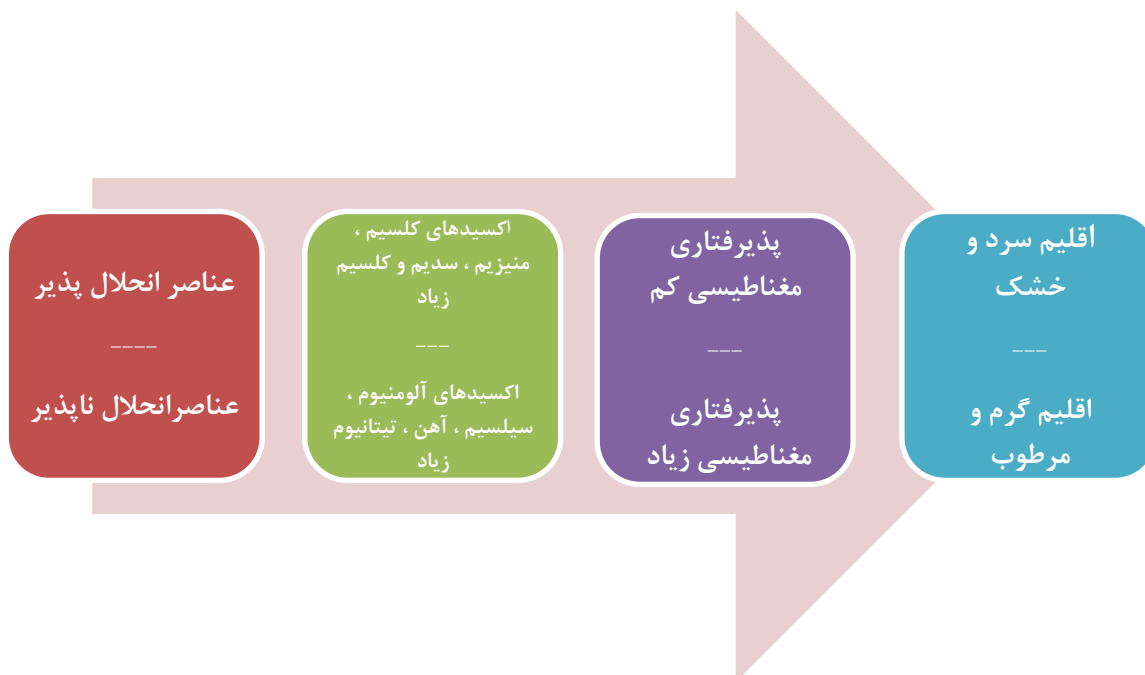
اثر بارندگی شدید و هوازدگی زیاد Na^+ و Ca^{++} شسته شده مقدار $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ کاهش می‌یابد اما CIA و نسبت $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ به دلیل غنی شدن از Al_2O_3 افزایش می‌یابد (Ji et al., 2000; Tao et al., 2006). بررسی نسبت‌های $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ و $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ مؤید آب‌وهوای مرطوب‌تر منطقه ۱ نسبت به مناطق ۲ و ۳ است.

نتیجه‌گیری

در ترکیب شیمیایی لس‌های استان گلستان اکسیدهای Na_2O ، MgO ، CaO ، Al_2O_3 ، Fe_2O_3 ، SiO_2 و K_2O وجود دارد که اکسید سیلیسیوم (SiO_2) فراوان‌ترین آنهاست. مقدار SiO_2 با افزایش Al_2O_3 افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده حضور فراوان کانی‌های آلومینوسیلیکاته مانند فلدسپارها و میکاهاست. دومین اکسید از نظر فراوانی Al_2O_3 است. نتایج نشان داد اکسید آلومینیم از منطقه ۳ به منطقه ۱ افزایش می‌یابد. کانی‌های آلومینوسیلیکات از جمله میکا و فلدسپار در لس‌های استان گلستان فراوان است. مقدار Fe_2O_3 از ناحیه ۳ به ۱ افزایش می‌یابد.

مقادیر CaO در مناطق مورد مطالعه از ناحیه ۳ به ۱ افزایش می‌یابد که مقدار بالای آن در منطقه ۱ می‌تواند به علت تولید برجای آن باشد. از طرف دیگر از آنجایی که این اکسید در خاک‌های دیرینه فراوان‌تر است ممکن است بر اثر آبشویی از این افق‌ها وارد نمونه‌های لسی شده باشند. CaO با SiO_2 و Al_2O_3 ارتباط منفی دارد که نشان می‌دهد مواد معدنی کربنات با منشأ ثانویه در این رسوبات وجود دارند. همبستگی مثبت قوی بین Fe_2O_3 ، Al_2O_3 و TiO_2 ، MnO وجود دارد که نشان می‌دهد TiO_2 به عنوان یک ترکیب شیمیایی ضروری از خاک رس و مواد معدنی مافیک وجود دارد.

مقدار MgO در منطقه ۱ و منطقه ۳ بیشتر است. مقدار این اکسید در منطقه ۳ به این دلیل بالا است که این اکسید انحلال‌پذیر و ناپایدار بوده و در آب‌وهوای مرطوب از طریق انحلال و شستشو



شکل ۱۳: عوامل موثر در رصد تغییرات اقلیم دیرینه در نهشته های لسی شمال ایران

نتایج شاخص CIA در لس‌های استان گلستان نشان‌دهنده دگرسانی شیمیایی متوسط در این رسوبات است. میزان ICV در لس‌های استان نشان‌دهنده سیکل رسوبی اول آن‌هاست. مقدار شاخص PIA بیانگر هوازگی کم تا متوسط است. همبستگی بالای بین CPA با شاخص‌هایی مانند CIA،

نتایج شاخص CIA در لس‌های استان گلستان نشان‌دهنده دگرسانی شیمیایی متوسط در این رسوبات است. میزان ICV در لس‌های استان نشان‌دهنده سیکل رسوبی اول آن‌هاست. مقدار شاخص PIA بیانگر هوازگی کم تا متوسط است. همبستگی بالای بین CPA با شاخص‌هایی مانند CIA،

منابع

۱. الماسی، عباس، پاشایی اول، عباس، جلالیان، احمد و ایوبی، شمس اله. (۱۳۸۵) بررسی کانی‌های رسی و تحول آن‌ها در رسوبات لسی و پارینه خاک‌ها منطقه قیان استان گلستان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۳(۳).
۲. امیری، زانیار، خرمالی، فرهاد، فرشمن، مانفرد و کهل، مارتین. (۱۴۰۱). بررسی میکرومورفولوژی و برآورد بارندگی گذشته در توالی لس - پالتوسل شرق استان گلستان، فصلنامه کواترنری ایران، دوره، شماره ۳ و ۴، ۴۳۰-۴۱۴.
۳. امینی جهرمی حسن، ناصری محمد یوسف، خرمالی، فرهاد، موحدی نائینی سید علیرضا. (۱۳۸۷). کانی شناسی خاک های با مواد مادری لس در دو منطقه از استان گلستان (هوتن، گرگان). مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۵)، ۱۸ - ۲۶.
۴. پورمعافی، م. (۱۳۸۷). ژئوشیمی. انتشارات آرین زمین. تهران، ۲۱۱ ص.
۵. خواجه، منصور، غیومیان، ج، فیض نیا، سادات. (۱۳۸۳). بررسی تغییرات جانبی اندازه ذرات و کانی‌شناسی به‌منظور تعیین جهت بادهای غالب در تشکیل رسوبات لسی استان گلستان. نشریه بیابان جلد ۹ (۲)، ۲۴۹ - ۳۰۶.
۶. رضایی، حامد. (۱۳۹۲). بررسی اثر تراکم دینامیکی و بارهای استاتیکی بر مقاومت برشی خاک‌های لسی استان گلستان. پایان‌نامه دکترا رشته زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد.
۷. سالنامه آماری استان گلستان. (۱۳۹۵). سازمان مدیریت و برنامه ریزی استان گلستان. www.amar.org.ir.
۸. فیضی، وحید، عزیزی، قاسم، علیمحمدیان، حبیب، ملاشاهی، مریم. (۱۳۹۶). تحلیل اقلیم دیرینه برش

- recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in the southwestern United States. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 59: 2919-2940.
19. Cullers, R.L. (2000). The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, U.S.A implications for provenance and metamorphic studies. *Lithos* 51: 305-327.
20. Ding, Z.L., Sun, J.M., Yang, S.L. and Liu, T.S. (2001). Geochemistry of the Pliocene red clay formation in the Chinese Loess Plateau and implications for its origin, source provenance and paleoclimate change. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(6): 901-913.
21. Duzgoren-Aydin N. S., Aydin, A., and Malpas, J. (2002). Re-assessment of chemical weathering indices: case study on pyroclastic rocks of Hong Kong. *Engineering Geology*, 63(1-2): 99-119.
22. 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: 921-924.
23. Gallet, S., Jahn, B., Van Vilet Lanoë, B., Dia, A., Rossello, E. (1998). Loess geochemistry and its implication for particle origin and composition of the upper continental crust. *Earth and Planetary Science Letters*, 156: 157-172.
24. Harnois, L. (1988). The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sedimentary Geology*, 55: 319-322.
25. Hirst, D.M. (1962). The geochemistry of modern sediments from the Gulf of Paria II. The location and distribution of trace elements. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 26: 1174-1187.
26. Ji, H.B., Ouyang, Z.Y., and Wang, S.J. (2000). Element geochemistry of weathering profile of dolomite and its implications for the average chemical composition of the upper-continental crust, case studies from the Xinpu profile, northern Guizhou Province, China. *Science in China, Series D: Earth Sciences*, 43: 23-35.
27. Jin, Z.D., Cao, J.J., Wu, J.L., and Wang, S.M. (2006). A Rb/Sr record of catchment رسوبی نوده (استان گلستان) با استفاده از ژئوشیمی عناصر. فصلنامه کوآترنری ایران (علمی- پژوهشی)، ۳(۱)، ۲۶-۲۹.
۹. قندهاری، سمیه. (۱۳۹۸). مطالعه رسوب شناسی و تحلیل هندسه فراکتالی تغییرات بافت لس های استان گلستان. پایان نامه دکترای رسوب شناسی و سنگ های رسوبی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران، ۲۷۷ صفحه.
۱۰. کریمی، علیرضا، خادمی، حسین، جلالیان، احمد. (۱۳۹۰). لس: ویژگی ها و کاربردها برای مطالعات اقلیم گذشته، پژوهش های جغرافیایی طبیعی، ۴۳ (۷۶)، ۱-۲۰
۱۱. مهدی پورحسکوئی، فرشته، علیمحمدیان، حبیب، صبوری، جعفر. (۱۳۹۲). بازسازی آب و هوای کوآترنر پسین در بخشی از شمال ایران (لس های نکا) با استفاده از داده های مغناطیسی و شیمیایی، فصلنامه علوم زمین، ۲۳ (۸۹)، ۹۷ - ۱۰۸.
12. Adel, I.M., Akarish, B., Amr M. El-Gohary, N. (2008). Petrography and geochemistry of Lower Paleozoic sandstones, East Sinai, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting. *Journal of African Earth Sciences* 52: 43-54.
13. Ahmad, A., Chandra, R. (2013). Geochemistry of loess-paleosol sediments of Kashmir Valley, India: Provenance and weathering. *J. Asi. Earth Sci.* 66: 73-89.
14. Batumike, I.L., Cailteux, H., Kumpunzu, A.B. (2006). Lithostratigraphy, basin development, base metal deposits and regional correlations of the Neoproterozoic Ngoba and Kondelvngu rock Successions, Central African. *Gondwana Research* 11: 432-447.
15. Brady, N. (1990). The nature and properties of soils. 10th edition. Macmillan publishing company. 570p.
16. Buggle, B., Glaser, B., Hambach, U., Gerasimenko, N., Markovic, S. (2011). An evaluation of geochemical weathering indices in loess-paleosol studies. *Quaternary International* 240: 12-21.
17. Condie, K.C., Des Marais, D.J., Abbott, D. (2001). Precambrian superplumes and supercontinents: a record in black shales, carbon isotopes, and paleoclimates. *Precambrian Res.* 106 (3-4): 239-260.
18. Cox, R., Lower, D.R., and Cullers, R.L. (1995). The influence of sediment

36. Roy, M., P. U. Clark, R. W. Barendregt, J. R., Glasmann, R., Enkin, J. (2004). Glacial stratigraphy and paleomagnetism of late Cenozoic deposits of the north-central United States. *Geological Society of America Bulletin*. 116:30-41.
37. Selvaraj, K., Chen, C.T.A.(2006). Moderate chemical weathering of subtropical Taiwan: constraints from solid-phase geochemistry of sediments and sedimentary rocks. *J. Geol.* 114: 101-116.
38. Sheng, X., Jji, T.chen, G.Li and H. H.Teng. (2008). Morphological characters and multi-element isotopic signatures of carbonates from Chinese loess- paleosol sequences. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 72:4323-4337.
39. Sugitani, K., Horiuchi, Y., Adachi, M., and Sugisaki, R. (1996). Anomalously low Al₂O₃/TiO₂ values for Archean cherts from the Pilbara Block, Western Australia: possible evidence for extensive chemical weathering on the early earth. *Precam. Res.* 80: 49-76.
40. Tao, J., Chen, M.T., and Xu, S.(2006). A Holocene environmental record from the southern Yangtze River delta, eastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology Palaeoecology*, 230(3): 204-229.
41. Zand-Moghadam, H., Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Bavi, H.(2013). Comparison of tidalites in siliciclastic, carbonate, and mixed siliciclastic-carbonate System: examples from Cambrian and Devonian deposits of East-Central Iran. *ISRN Geology*.1-21.
42. Wronkiewicz, D.J., and Condie, K.C.(1987). Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance. *Geochem. Cosmochem. Acta*. 51: 2401-2416.
43. Zhang, G.L., Pan, J.H., Huang, C.M., and Gong, Z.T.(2007). Geochemical features of a soil chronosequence developed on basalt in Hainan Island, China. *Revista Mexicana de Ciencias Geologicas*. 24: 261-269.
- weathering response to Holocene climate change in Inner Mongolia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31: 285-291.
28. Khanehbad, M., Moussavi_Harami, R., Mahboubi, A., Nadjafi, A.(2012). Geochemistry of Carboniferous Shales of the Sardar Formation, East Central Iran: Implication for Provenance, Paleoclimate and Paleo-oxygenation conditions at a passive continental margin. *Geochemistry International* 50: 777-790.
29. McLennan, S.M., Hemming, S., Mcdaniel, D.K., and Hanson, G.N.(1993). Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. In: Johnsson, J.M., Basu, A. (Eds.), *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. *Geol. Soc. Am., Spec. Paper*. 284: 21-40.
30. Moosavirad, S.M., Janardhana, M.R., Sethumadhav, M.S., Moghadam, M.R., Shankara, M. (2010). Geochemistry of lower Jurassic shales of the Shemshak Formation, Kerman Province, Central Iran: Provenance, source weathering and tectonic setting. *Chemie der Erde-Geochemistry* 71, 279-288.
31. Nesbitt, H.W., and Young, G.M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*. 299: 715-717.
32. Nesbitt, H.W., and Young, G.M. (1989). Formation and diagenesis of weathering profiles. *The Journal of Geology*. 97 (2): 129-147.
33. Price, J. R., Velbel, M.A. (2003). Chemical weathering indices applied to weathering Profiles developed on heterogeneous felsic metamorphic parent rocks. *Chemical Geology*, 202(3-4): 397-416.
34. Suttner, L.J., and Dutta, P.K.(1986). Alluvial sandstone composition and palaeoclimate. *Framework mineralogy. J. Sed. Pet.* 56(3):329-345.
35. Roser, B.P., Korsch, R.J.(1988). Provenance signatures of sandstone mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem. Geol.* 67: 119-139.