

## پالئوسل‌های سازند پادها با سن دونین در زون البرز شرقی: ویژگی‌های بافتی، کالنی‌شناسی و زمین‌شیمیایی

مریم کیا اشکوریان، غلامحسین شمعانیان<sup>\*</sup>، بهنام شفیعی

گروه زمین‌شناختی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان

(دریافت مقاله: ۹۰/۲/۱۳، نسخه نهایی: ۹۰/۱۰/۱۱)

چکیده: پالئوسل‌های منطقه مورد بررسی که در فاصله ۵۰ کیلومتری جنوب شهر آزادشهر قرار دارد. بخشی از زون البرز شرقی محسوب می‌شود. این پالئوسل‌ها در رخسارهای دشت سیلابی و دریاچه‌ای سازند پادها با سن دونین قرار دارند. بر اساس شواهد صحرایی و بافتی دو افق اصلی پالئوسل به نام‌های A و B شناسایی شدند. افق A از پالئوسل‌های کالکریتی و غیرکالکریتی تشکیل یافته است و در رخسارهای دشت سیلابی سازند پادها قرار دارد. افق B در رخسارهای دریاچه‌ای مشاهده می‌شود و بیشتر کالکریتی است. کوارتز، کلسیت، دولومیت، میکرولین، هماتیت، آلبیت، سریسیت، ایلیت، کلریت و مونتموریلوبیت در پالئوسل‌ها شناسایی شدند. تجزیه و تحلیل‌های زمین‌شیمیایی پالئوسل‌ها بیانگر غنی‌شدگی عناصر نامتحرک و تهی‌شدگی عناصر متحرک است. بررسی شاخص‌های هوازدگی شیمیایی و هوازدگی مؤثر شیمیایی دلالت بر هوازدگی متوسط در منطقه‌ی مورد بررسی دارد. ظاهر پالئوسل‌های غیرکالکریتی و کالکریتی پیشنهاد‌کننده‌ی تغییرات آب و هوایی از مرطوب به خشک در طول تشکیل خاک است. تلفیق داده‌های بافتی، کالنی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نشان‌دهنده‌ی سنگ مادر بازالتی برای پالئوسل‌های مورد بررسی است.

**واژه‌های کلیدی:** پالئوسل؛ کالکریت؛ سازند پادها؛ البرز شرقی.

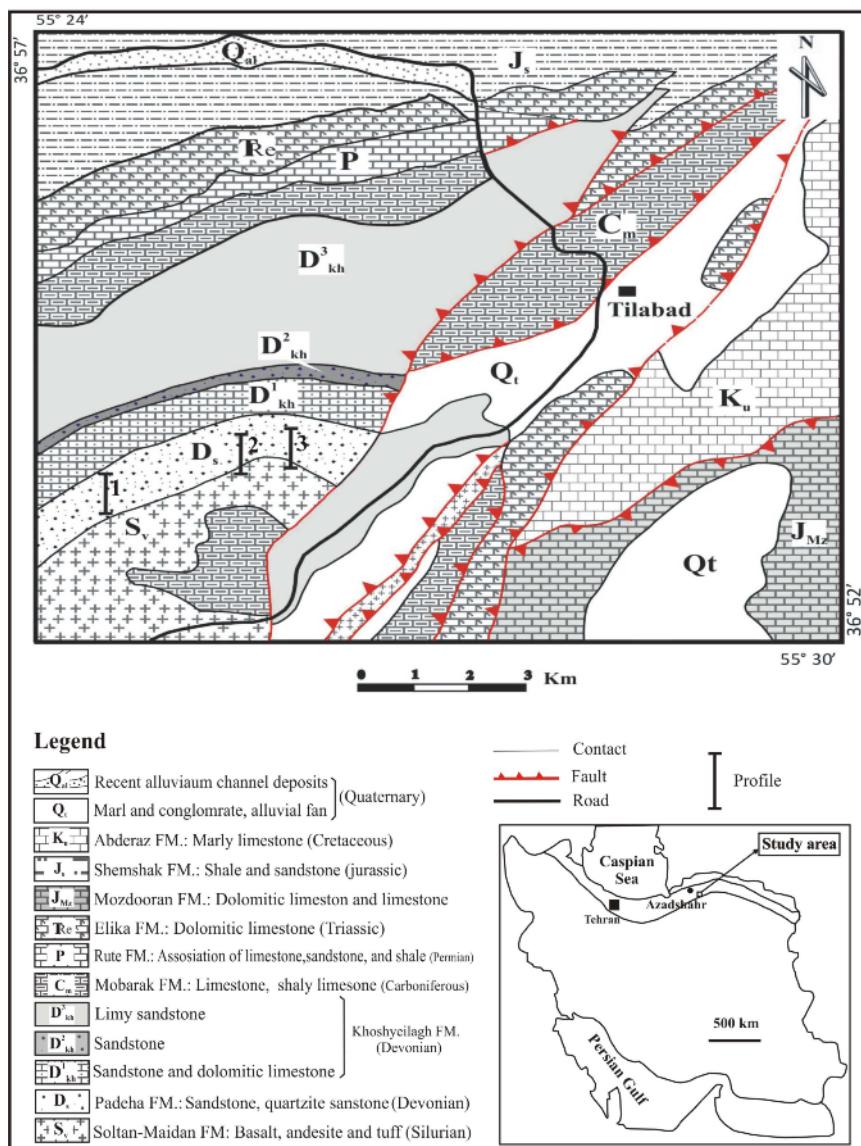
ریخت‌شناسی منطقه، بارندگی، دما و زمان بستگی دارد [۶]. پالئوسل‌ها از نظر مکانی در محیط‌های مختلف قاره‌ای مانند دشت‌های سیلابی [۷]، مردابی [۸]، دلتایی [۹]، محیط‌های بادی [۱۰]، رسوب‌های دریایی [۵] و مخروط‌افکنهای از نظر زمانی در زمان‌های مختلف زمین‌شناسی از پرکامبرین تا کواترنر [۱۱] شناخته شده‌اند. بررسی پالئوسل‌ها دارای کاربردهای فراوانی در تفسیر محیط‌های رسوی و تحلیل‌های چینه‌شناسی [۵]، تحلیل شرایط بوم شناسی [۱۲] و بررسی مجموعه‌های گیاهی و جانوری [۴] در زمان‌های گذشته است. پالئوسل‌ها توسط مک و همکاران [۱۳] براساس حضور کالنی‌های پایدار و ویژگی‌های ریخت شناختی به انواع مختلفی مانند آرژیلیتی،

### مقدمه

مواد سخت نشده‌ی حاصل از هوازدگی سنگ‌ها که بر روی سنگ بستر تشکیل شده، خاک خوانده می‌شوند [۱]. توده‌های خاک را می‌توان بر پایه ویژگی‌های کالنی‌شناسی، فیزیکی، شیمیایی و زیستی به افق‌هایی با ضخامت‌های متفاوت تفکیک و بر مبنای این ویژگی‌ها رده‌بندی کرد [۲،۳]. به گروهی از خاک‌ها که پس از تشکیل در زیر رسوب‌های آبرفتی، لس‌ها و نهشت‌های آشفشانی مدفون شده و در مقابل هوازدگی و فرسایش محفوظ می‌مانند، پالئوسل یا خاک‌فسیل گفته می‌شود [۴،۵]. پالئوسل‌ها طی وقفه‌های رسوبگذاری تشکیل می‌شوند و تشکیل آن‌ها به طور کلی به نوع سنگ بستر،

پالئوسل‌های منطقه خوش‌بیلاق با موقعیت جغرافیایی  $50^{\circ}$  عرض شمالی و  $50^{\circ}$  طول شرقی در فاصله‌ی  $50\text{ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان آزادشهر و ارتفاع ۱۵۰۰ متری از سطح دریا واقع شده‌اند (شکل ۱). این پالئوسل‌ها در سازند پادها با سن دونین قرار دارند [۱۶] و تاکنون بررسی‌های دقیق و جامعی روی آن‌ها انجام نشده است. در این مقاله، این پالئوسل‌ها بر پایه‌ی مشاهدات صحرایی، بررسی‌های میکروسکوپی و داده‌های زمین‌شیمیایی مورد بررسی قرار گرفته و درباره‌ی شرایط تشکیل و خاستگاه آن‌ها اظهار نظر شده است.$

آهن‌دار، کلسیتی یا کالکریتی رده‌بندی شده‌اند. کالکریت‌ها دارای انباشت‌های فراوانی از کربنات‌کلسیم با خاستگاه خشکی‌زد است که از طریق سیمانی شدن ذرات خاک به وسیله‌ی کربنات‌کلسیم در شرایط آب و هوایی خشک تا نیمه‌خشک با میانگین بارندگی  $400$  تا  $600$  میلی‌متر در سال تشکیل می‌شوند. کالکریت‌ها از نظر محتوای مواد زیستی به دو نوع  $\alpha$  (بدون شواهد زیستی) و  $\beta$  (دارای شواهد زیستی) تقسیم می‌شوند [۱۴]. پالئوسل‌های کالکریتی مهم‌ترین نشانگرهای رخنمون‌های نیمه‌سطحی، سطوح پایدار زمین‌ریختی و نواحی نیمه‌فعال در سامانه‌های آبرفتی هستند [۱۵].



شکل ۱ نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه مورد بررسی با تغییرات از [۳۴]. موقعیت زون زمین ساختی- رسوی البرز در بخش شمالی نقشه‌ی ایران و موقعیت نیمرخ‌های مورد بررسی بر روی نقشه زمین‌شناسی نشان داده شده است.

دیواره انجام گرفت. بررسی‌های بافتی و کانی‌شناسی به روش-های مرسوم میکروسکوپی روی ۲۸ مقطع نازک انجام شد. شناسایی کانی‌های مجهول در ۶ نمونه به روش پراش پرتو ایکس (XRD) در آزمایشگاه شرکت کانسaran بینالود انجام گرفت (جدول ۱). برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شیمیایی، تعداد ۷ نمونه به روش فلورسانی پرتو ایکس (XRF) برای اندازه‌گیری اکسیدهای اصلی و عناصر جزئی Zr, Cr, Cu, Co, V, Ni, Ga, Ba در آزمایشگاه شرکت کانسaran بینالود تجزیه شد (جدول ۲).

### روش بررسی

برای شناخت ماهیت کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی پالئوسل‌های خوش‌بیلاق، بررسی‌ها در دو بخش صحرایی و آزمایشگاهی به انجام رسید. در بخش صحرایی، کلیه ویژگی‌های ساختی و بافتی پالئوسل‌ها و چگونگی ارتباط آنها با طبقات بستر و سنگ پوشش در راستای سه نیمرخ عمود بر لایه‌بندی بررسی شدند و از بخش‌های مختلف به روش‌های کلوجه‌ای و تکه‌ای نمونه‌برداری به عمل آمد. بررسی‌های آزمایشگاهی شامل بررسی‌های بافتی، کانی‌شناسی و تجزیه شیمیایی روی پالئوسل‌ها و سنگ

جدول ۱ شناسایی کانی‌های مجهول در پالئوسل‌های مورد بررسی به روش پراش پرتو ایکس (XRD).

شماره نمونه	کانی‌های اصلی	کانی‌های فرعی
P1-3	کوارتز، کلسیت، میکروکلین	آلیت، کلریت، دولومیت
P1-4	کوارتز، کلسیت، دولومیت	آلیت، میکروکلین
P1-8	کوارتز	آلیت، میکروکلین، کلسیت، دولومیت، هماتیت، منموریلونیت، سریسبت، ایلیت
P1-11	کوارتز، کلسیت	سریسبت، هماتیت
P1-15	کوارتز، ارتوکلاز، دولومیت، آلیت	منموریلونیت، کلریت، سریسبت، ایلیت
P1-16	کوارتز، کلسیت، میکروکلین	آلیت، ایلیت، هماتیت، کانولینیت

جدول ۲ نتایج تجزیه شیمیایی و شاخص‌های هوازدگی شیمیایی در پالئوسل‌های منطقه‌ی مورد بررسی. مقادیر اکسیدهای اصلی و جزئی به روش فلورسانی پرتو ایکس (XRF) اندازه‌گیری شده است.

شماره نمونه	نمونه	P1-19	P1-16	P1-15	P1-11	P1-8	P1-4	P1-3
(Wt%) SiO <sub>2</sub>		۵۱,۴۲	۵۷,۲۸	۵۶,۹۱	۵۷,۵۷	۶۲,۸۲	۵۵,۲۸	۵۷,۹۸
TiO <sub>2</sub>		۲,۶۶	۰,۶۴	۰,۸۵	۰,۷۸	۰,۴۷	۰,۳۱	۰,۷۳
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		۱۶,۸۷	۱۱,۱۳	۱۴,۶۰	۱۰,۲۱	۱۱,۶۷	۵,۸۹	۱۱,۹۲
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		۱۰,۹۱	۴,۶۴	۲,۹۰	۵,۳۹	۳,۲۲	۲,۵۹	۲,۷۴
MnO		۰,۰۵۱	۰,۰۳۵	۰,۰۳۱	۰,۰۹۵	۰,۰۴۵	۰,۰۸۶	۰,۰۲۸
MgO		۴,۱۲	۳,۶۴	۹,۱۱	۰,۹۲	۵,۴۱	۵,۶۴	۵,۹۹
CaO		۴,۱۴	۸,۱۶	۲,۶۴	۱۰,۴۴	۴,۰۳	۱۲,۷۱	۶,۹۴
Na <sub>2</sub> O		۲,۹۸	۰,۴۲	۰,۱۱	۰,۱۷	۰,۶۳	۰,۱۲	۰,۳۹
K <sub>2</sub> O		۳,۲۳	۴,۱۹	۴,۹۳	۳,۴۱	۳,۴۹	۱,۷۳	۳,۵۳
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		۰,۸۷	۰,۱۷	۰,۱۸	۰,۱۵	۰,۱۰	۰,۰۹	۰,۲
L.O.I		۲,۸۷	۹,۲۷	۷,۴۲	۱۰,۶۴	۷,۵۲	۱۵,۲۰	۹,۲۶
Zr (ppm)		۳۴۶	۲۵۵	۲۲۲	۱۸۲	۳۰۴	۱۶۵	۲۸۵
Cu		۶	۱۶	۷۷	۹	۱۶	۲۷	۱۷۶
Cr		۴	۴۶	۸۹	۲۸	۲۷	۲۳	۵۸
Co		۱	۲	۲	۳	۱	۱	۳
V		۲۵۱	۸۸	۱۴۹	۱۰۰	۷۶	۴۲	۱۰۳
Ga		۱۸	۱۳	۲۰	۱۳	۱۶	۱۰	۱۴
Nb		۳۱	۱۶	۲۴	۳	۱۶	۲۳	۱۱
Ni		۳۶	۶۳	۸۷	۵۲	۵۳	۴۵	۶۲
Ba		۶۸۳	۴۰۳	۳۷۳	۱۷۱	۶۳۵	۳۶۶	۶۲۰
CIA index		۶۱	۴۷	۶۵	۴۲	۵۸	۲۸	۵۲
MgI index		۸۰	۷۵	۶۱	۹۱	۶۸	۵۱	۶۶

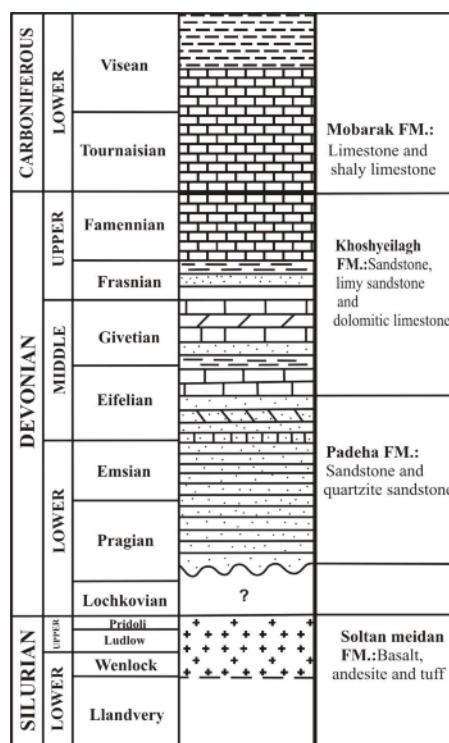
تشکیل یافته است. بلورهای درشت پیروکسن که اغلب به کلریت دگرسان شده‌اند از کانی‌های اصلی سنگ محسوب می‌شوند. پیریت‌های شکل‌دار تا نیمه شکل‌دار از کانی‌های فرعی هستند که بر اثر فرآیندهای سطحی به اکسیدهای آهن ثانویه تبدیل شده‌اند.

سازند پادها با سن دونین تحتنی-میانی به طور کلی از سه رخساره‌ی اصلی شامل رخساره‌ی مخروطافکنه‌ای مت Shankل از کنگلومرا، ماسه‌سنگ و سیلت‌سنگ در بخش پایینی، رخساره‌ی دشت سیلابی مت Shankل از ماسه‌سنگ و شیل در بخش میانی و رخساره‌ی دریاچه‌ای مت Shankل از قطعات آتشفسانی، سیلیسی و کربناتی در بخش بالایی تشکیل یافته است [۱۶]. رخساره‌های دشت سیلابی و دریاچه‌ای که تنها رخساره‌های دارای رخنمون در منطقه‌ی مورد بررسی هستند، دارای افق‌های پالتوسل هستند. سازند پادها با گذر تدریجی به طبقات ماسه‌سنگی، شیلی و سنگ‌آهکی سازند خوش‌بیلاق با سن دونین میانی-بالایی تبدیل می‌شود. سازند خوش‌بیلاق که از گسترش وسیعی در منطقه‌ی مورد بررسی برخوردار است، به تدریج به سنگ آهک‌های نازک تا متوسط لایه‌ی سازند مبارک با سن کربونیفر تبدیل می‌شود (شکل ۲).

### زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

منطقه‌ی مورد بررسی از نظر زمین‌شناسی به زون زمین-ساختی-رسوبی البرز وابسته است (شکل ۱). این زون که به نظر لاسمی [۱۷] بر اثر برخورد گندوانا و اورازیا در اواخر تریاس تشکیل شده است، با پهنه‌ی ۱۰۰ کیلومتر و درازای ۲۰۰۰ کیلومتر با راستای شرقی-غربی در شمال ایران قرار گرفته است و ارتفاع آن از ۵۰۰۰ متر در مناطق مرتفع تا ۲۸۰۰ متر در خط ساحلی خزر در تغییر است. ویژگی‌های رسوبی و چینه‌شناسی در سرتاسر این زون یکنواخت نبوده و از این‌رو به سه زیر زون البرز‌شرقی، البرز‌مرکزی و البرز‌غربی تقسیم شده است. منطقه‌ی مورد بررسی به زیر زون البرز‌شرقی وابسته است و در آن مجموعه‌ای از سنگ‌های با سن سیلورین تا کرتاسه رخنمون دارد (شکل ۱).

قدیمی‌ترین واحد رخنمون یافته در منطقه‌ی مورد بررسی واحد آتشفسانی سازند سلطان‌میدان مت Shankل از بازالت‌ها و آندزیت‌های با سن سیلورین است که با ناپیوستگی فرسایشی با سازند پادها پوشیده شده است (شکل ۲). بازالت‌های این سازند دارای بافت پورفیری و تراکیتی است و به طور کلی از پلازیوکلاز با اندازه‌ی ۳۰ میلی‌متر و فراوانی بیش از ۵۰ درصد



شکل ۲ ستون چینه‌شناسی در منطقه‌ی خوش‌بیلاق، اقتباس از [۱۶، ۳۵].

بالایی با رنگ ظاهری سفید تا خاکستری مشخص می‌شوند و به طور کلی از کوارتزهای درشت دانه با اندازه ۰/۱ تا ۰/۵ میلی-متر با جور شدگی خوب تشکیل یافته است و دارای میکروکلین و قطعات سنگی به عنوان اجزای فرعی و سیمانی از کلسیت هستند. کوارتز، کلسیت، دولومیت، میکروکلین، هماتیت، آلبیت، سریسیت، ایلیت، کلریت و مونتموریلونیت از کانی‌های تشکیل‌دهنده پالئوسل‌های افق A هستند که به روش پراش پرتو ایکس شناسایی شدند.

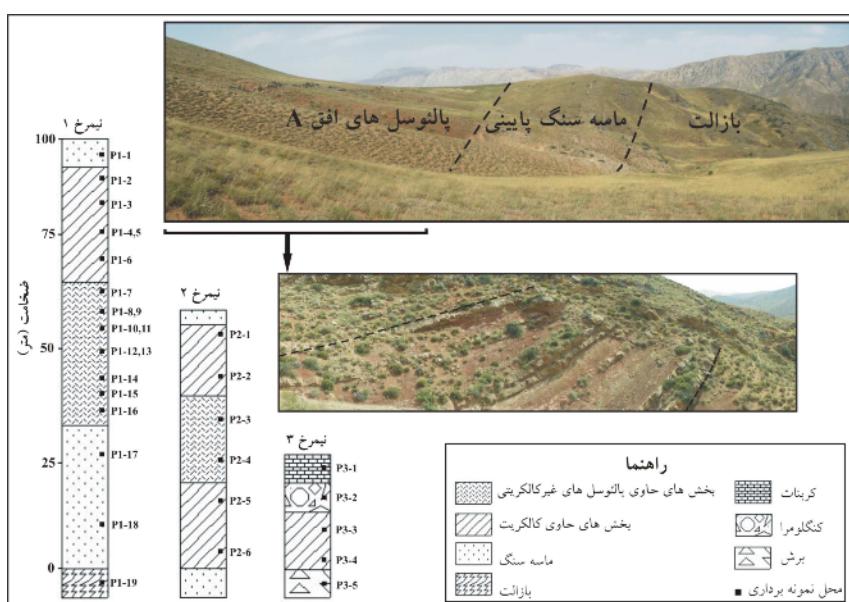
براساس شواهد میکروسکوپی، پالئوسل‌های افق A از دو بخش کالکریتی و غیرکالکریتی تشکیل یافته است. پالئوسل‌های غیرکالکریتی با حضور بافت‌های با آشفتگی زیستی و پوششی اکسیدهای آهن [۱۸] شناسایی شدند. آشفتگی زیستی (شکل ۴-ب) در نتیجه‌ی به هم ریختگی ساختار رسوب‌ها طی فعالیت‌های موجودات زنده که منجر به انباست اکسیدهای آهن می‌شود، به وجود می‌آید [۱۹]. وجود دانه‌های کوارتز با گردش‌گی کم تا متوسط و آشفتگی زیستی در پالئوسل‌های منطقه‌ی مورد بررسی نشان دهنده اثری کم در محیط تشکیل آن‌هاست. تلفیق این نتایج با یافته‌های زمین‌شناسی پیشنهاد‌کننده‌ی تشکیل پالئوسل‌های مورد بررسی در محیط‌های کم‌شیب و با فاصله‌ی زیاد از مخروط افکنه‌های دشت سیلابی است که با نتایج اهری‌پور و همکاران [۱۶] همخوانی دارد. پوشش اکسیدهای آهن با وجود پوشش نازکی

## بحث و بررسی ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی

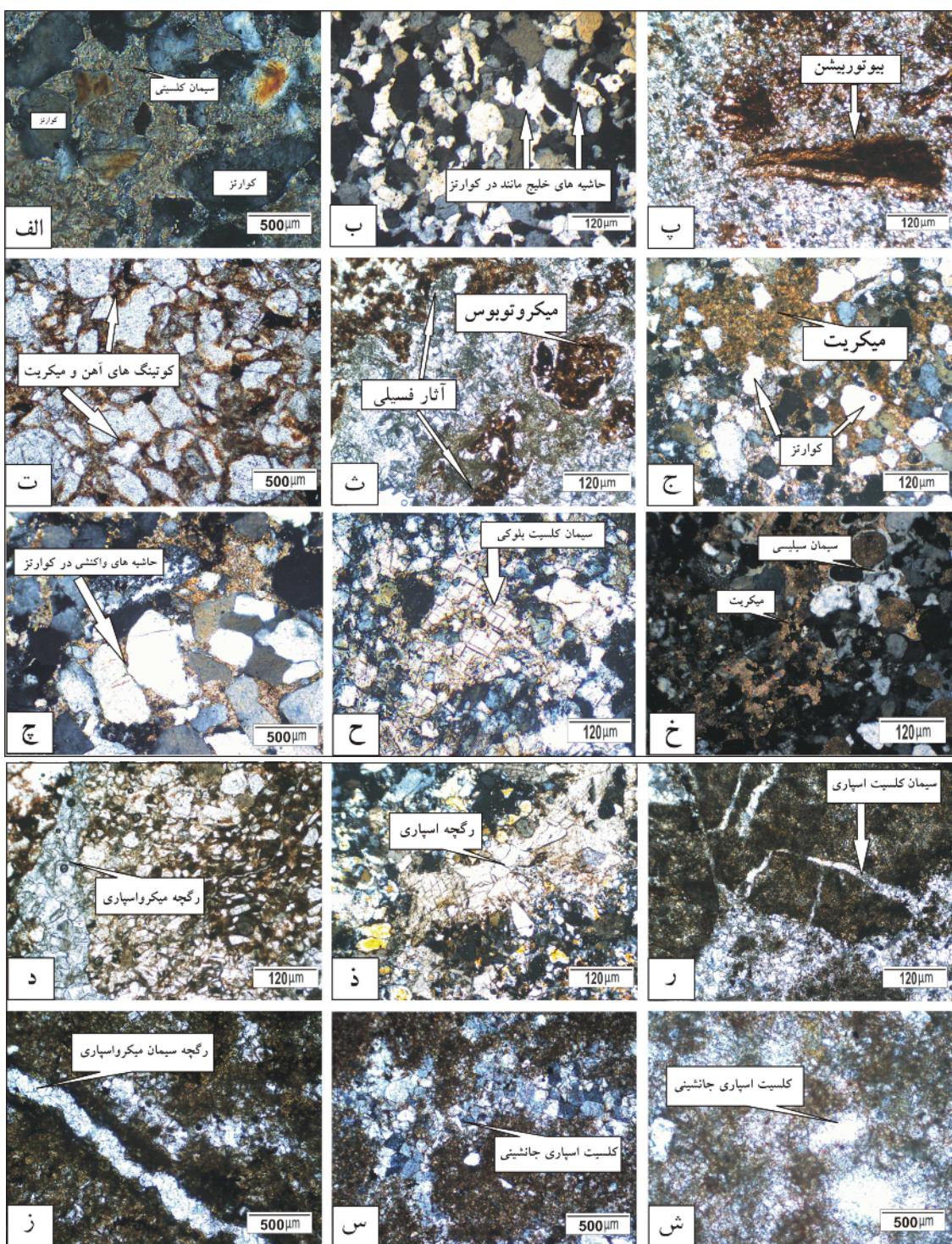
بر اساس بررسی‌های صحرایی، افق‌های پالئوسل در منطقه‌ی مورد بررسی در دو رخساره‌ی دشت سیلابی و دریاچه‌ای دیده می‌شوند که در این مقاله به ترتیب به نام پالئوسل‌های افق A و پالئوسل‌های افق B نام‌گذاری شده‌اند. برای بررسی ویژگی‌های بافتی و کانی‌شناسی این دو افق، دو نیمرخ زمین‌شناسی در رخساره‌ی دشت سیلابی و یک نیمرخ در دریاچه‌ای مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۳).

### پالئوسل‌های افق A

حدود ۴۰ تا ۷۰ متر از نیمرخ‌های مورد بررسی در رخساره‌ی دشت سیلابی واقع در بخش میانی سازند پادها حاوی پالئوسل‌هایی به رنگ ظاهری قرمز است که روی طبقات ماسه‌سنگی قرار گرفته و با یک افق ماسه‌سنگ کوارتز آرنایتی پوشیده شده است. ماسه‌سنگ‌های زیرین دارای رنگ ظاهری شیری تا کرم بوده و به طور کلی از کانی‌های تک بلورین کوارتز با اندازه‌ی ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر و فراوانی ۶۰ تا ۷۰ درصد تشکیل یافته که دارای گردش‌گی و گردش‌گی متوسط بوده و با کلسیت اسپاری سیمانی شده است (شکل ۴-الف). برخی از دانه‌های کوارتز در این ماسه‌سنگ‌ها دارای حاشیه‌های خلیجی است (شکل ۴-ب) و توسط اهری‌پور و همکاران [۱۶] برای آن‌ها خاستگاه آتش‌شانی در نظر گرفته شده است. ماسه‌سنگ‌های



شکل ۳ ستون چینه‌ای سه نیمرخ مورد بررسی و تصاویر صحرایی آن‌ها. نیمرخ‌های ۱ و ۲ در بخش میانی سازند پادها و نیمرخ ۳ در بخش بالایی این سازند واقع شده‌اند.



شکل ۴ تصاویر میکروسکوپی از پالئوسول‌های افق A و B در منطقه مورد بررسی. (الف) ماسه‌سنگ آهکی در بخش پایینی پالئوسول، (ب) کوارتز‌آرنايت با جوشیدگی و گردشیدگی متوسط، (پ) بافت آشمندگی زیستی یا بیوتوربیشن در ماسه‌سنگ کوارتزوکی، (ت) کوتینگ‌های اکسید آهن، میکریت و رس در اطراف دانه‌های کوارتز، (ث) میکروتوبوس و آثار فسیلی، (ج) بافت میکریتی در بین دانه‌های کوارتز، (چ) کوتینگ میکریتی و حاشیه‌های جانشینی در اطراف دانه‌های کوارتز، (ح) سیمان کلسیتی بلوکی، (خ) سیمان سیلیسی که قطعات کاملاً گرد شده میکریت را در بر گرفته‌اند به همراه بافت میکریتی، (د، ذ) رگجه‌های حاوی کلسیت اسپاری، (ر) برش بر جا دارای قطعات زاویدار آهکی که با کلسیت اسپاری سیمانی شده‌اند، (ز) رگجه حاوی کلسیت اسپاری در سنگ آهک، (س، ش) جانشینی کلسیت میکرواسپاری در بطن سنگ آهک (تصاویر ت، چ، د، ش در نور عبوری عادی و بقیه تصاویر در نور عبوری قطبیده گرفته شده‌اند).

[۲۴]. در برخی از نمونه‌های مورد بررسی، حضور توأم سیمان سیلیسی و کلسیتی در اطراف دانه‌های کوارتز و گاه انباسته‌های میکریتی مشاهده شدند (شکل ۴-ج). تشکیل سیمان سیلیسی (شکل ۴-خ) را می‌توان به حضور آب‌های زیرزمینی ابر اشباع از سیلیکا نسبت داد که بر اثر انحلال فشاری ماسه‌سنگ‌های بالایی به سمت پایین مهاجرت کرده‌اند [۲۴].

رگچه‌های اسپاری حاوی کلسیت‌های با اندازه بیش از ۰/۵ میلی‌متر و رگچه‌های میکرواسپاری کلسیتی در اغلب نمونه‌های مورد بررسی شناسایی شدند (شکل ۴-د، ذ). به نظر می‌رسد این رگچه‌ها بر اثر انقباض توده‌های خاک طی دوره‌های متناوب خشک و مرطوب تشکیل شده‌اند.

برخی از دانه‌های کوارتزی موجود در پالئوسل‌های مورد بررسی دارای شواهدی از جانشینی با کلسیت است (شکل ۴-ج). این پدیده که در پالئوسل‌های کالیفرنیا نیز شناسایی شده است [۲۵] نتیجه‌ی بر هم کنش محلول‌های تحت اشباع از سیلیکا با دانه‌های کوارتز و نهشت کلسیت است.

#### پالئوسل‌های افق B

پالئوسل‌های افق B که به طور کلی از کانی‌های کوارتز و کلسیت تشکیل یافته در بخش بالایی سازند پادها قرار دارند و با ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک و کنگلومرا پوشیده شده‌اند. برشی-شدن قطعات میکریتی، رگچه‌های کلسیت اسپاری و تشکیل کلسیت‌های میکرواسپاری به صورت جانشینی و در بطن کانی‌های دیگر از شواهد وجود پالئوسل‌های کالکریتی [۱۱] در این افق است. قطعات میکریتی برشی شده با ابعاد چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر و پرشدگی فضای خالی برش‌ها با کلسیت اسپاری (شکل ۴-ر) نشان دهنده فعالیت ریشه‌ی گیاهان، انحلال و تبلور کلسیت طی دوره‌های متناوب مرطوب و خشک است. رگچه‌های حاوی کلسیت اسپاری با ضخامت بیش از ۲۰ میکرون در برخی از نمونه‌های مورد بررسی یافت شدند (شکل ۴-ز). کلسیت‌های میکرواسپاری با اندازه ۱۰ تا ۵۰ میکرون به صورت جانشینی دیده می‌شوند که به بهای از بین رفتن کانی‌های دیگر تشکیل شده‌اند (شکل ۴-س، ش).

#### ویژگی‌های زمین‌شیمیایی

رفتار عناصر طی فرآیندهای هوازدگی به طور کامل قابل پیش-بینی نیست و تحت تأثیر عواملی مانند زمان، نوع سنگ خاستگاه، آب و هوا، توپوگرافی، pH و محیط قرار دارد [۲۶، ۲۷]. با پیشرفت فرآیندهای هوازدگی شدت جدایش

از هماتیت‌های ریز دانه در پیرامون دانه‌های کوارتز مشخص می‌شود (شکل ۴-ت) و پیشنهاد کننده‌ی تفاوت در شرایط احیایی و زهکشی نامناسب خاک طی دوره‌های خشکی است [۲۰]. یکی از ویژگی‌های قابل توجه پالئوسل‌های غیرکالکریتی در منطقه‌ی مورد بررسی وجود شواهدی از مواد آلی است که با حضور میکروتوبوس<sup>۱</sup> هایی با ابعاد ۲ میلی‌متر و حفره‌های حاصل از فعالیت موجودات (آثار فسیل اسکوینیا<sup>۲</sup>) (شکل ۴-ث) مشخص می‌شود. میکروتوبوس‌ها بر اثر پرشدن بخش‌های درونی اسفنج‌ها با رسوب‌ها و حفظ بخش‌های خارجی آن‌ها توسط پوسته‌هایی با خاستگاه باکتریایی تشکیل می‌شود [۱۱]. پالئوسل‌های کالکریتی با بافت میکریتی، سیمان کلسیتی، رگچه‌های اسپاری و میکرواسپاری، جانشینی کوارتز با کلسیت، حاشیه‌های واکنشی در دانه‌های کوارتز [۱۱] و سیمان سیلیسی [۲۱] شناسایی شدند. این شواهد نشان دهنده وجود کالکریت‌های غیرآلی یا نوع α در منطقه‌ی مورد بررسی است. بافت میکریتی با وجود انباسته‌های بسیار ریزدانه کلسیت و دولومیت شناسایی شد (شکل ۴-ج) که در اغلب کالکریت‌های قدیمی [۲۲] نیز گزارش شده است. در برخی از نمونه‌های مورد بررسی، پوشش‌های میکریتی متشكل از انباسته‌های ریزدانه کربناتی و کانی‌های رسی در اطراف دانه‌های کوارتز مشاهده شد (شکل ۴-ت). این بافت که از بافت‌های رایج در کالکریت‌ها محسوب می‌شود، نشان دهنده مراحل اولیه کالکریتی شدن است [۱۱]. این بافت توسط قازانچی و همکاران [۲۰] در پالئوسل‌های ناهارخوران گرگان شناسایی شده است که وجود آن را به فروشست رس طی دوره‌های مرطوب و نهشت آن طی دوره‌های خشک نسبت داده‌اند. وجود بافت میکریتی، پوششی میکریتی و پوششی اکسیدهای آهن در منطقه‌ی مورد بررسی، از ویژگی پالئوسل‌های چند خاستگاهی و پیشنهاد کننده‌ی چندین دوره تکاملی است [۲۳].

سیمان کلسیتی در کالکریت‌ها شامل انواع میکریتی، دروزی و بلوکی است [۱۱]، که در منطقه‌ی مورد بررسی سیمان‌های کلسیتی میکریتی (شکل ۴-ج) و بلوکی (شکل ۴-ح) شناسایی شد. تشکیل سیمان‌های کلسیتی نتیجه‌ی افزایش غلظت یون کربنات در محلول‌های منفذی بر اثر تبخیر آب‌های زیرزمینی در منطقه وادوز یا در نزدیکی سطح زمین است

1- Microtubus

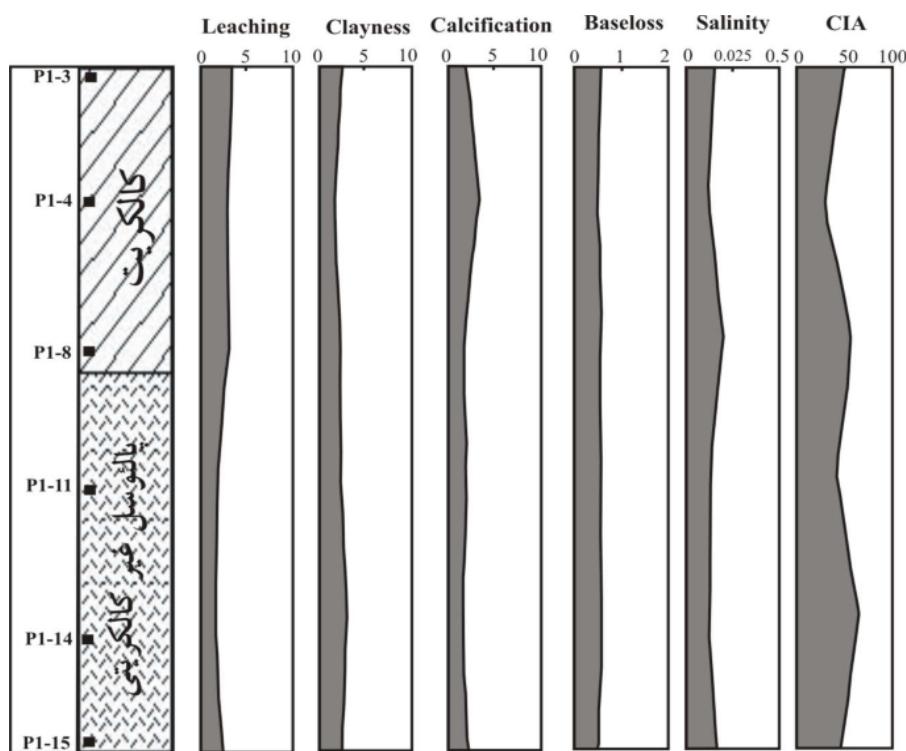
2- Scyenia

می‌شود.  $\text{Na}_2\text{O}$  در مقایسه با اکسیدهای دیگر دارای روند افزایشی در بخش کالکریتی است که نشانگر شسته شدن آن طی فرآیندهای هوازدگی است. بررسی تغییرات غلظت عناصر جزئی مانند  $\text{Zr}$  و  $\text{Ce}$  نشان دهنده شستشوی عناصر  $\text{V}$  و  $\text{Ce}$  از بخش‌های بالای نیمرخ و تمرکز آن در بخش‌های پایینی است. غلظت  $\text{Zr}$  به عنوان یک عنصر نامتحرك تغییرات زیادی را نشان نمی‌دهد.

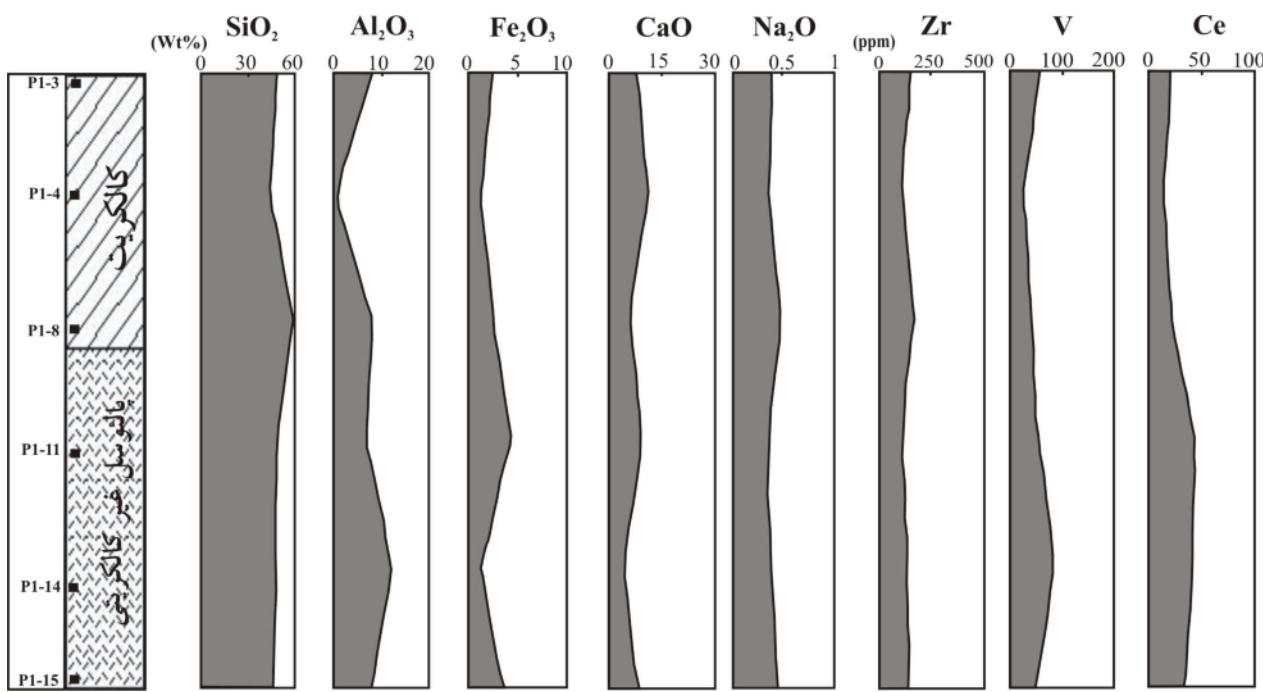
برای بررسی هرچه بهتر تغییرات غلظت اکسیدهای اصلی، تعیین شدت هوازدگی و ارزیابی چگونگی فرآیندهای خاکزایی از معیارهای مختلف زمین‌شیمیایی استفاده شد. یکی از معیارهای مورد استفاده، محاسبه نسبت‌های مولکولی هوازدگی [۲۹، ۴] برای اکسیدهای اندازه‌گیری شده و چگونگی تغییرات آن در نیمرخ مورد بررسی است (شکل ۵). شاخص‌های انباست رس ( $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$ ) و تهی‌شدگی ( $\text{Clayness} = \text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{O}_3/\text{CaO}$ ) برای بررسی غنی‌شدگی اکسید آلومینیوم و شدت هوازدگی مورد استفاده قرار می‌گیرند که به دلیل عدم تغییرات هوازدگی مورد دستورالعمل قرار نمی‌گیرند. نشان دهنده هوازدگی معنی‌دار در پالتوسل‌های افق A، نشان دهنده هوازدگی ضعیف، شستشوی ناقص عناصر متحرك و عدم تشکیل

عناصر از یکدیگر افزایش می‌یابد و عناصر متحرك موجود در خاک با گردش آبهای جوی فرورو شسته شده و با انتقال به بخش‌های پایینی و ایجاد شرایط مناسب نهشته می‌شوند. در مقابل، عناصر نامتحرك وارد محلول‌های فرورو نمی‌شوند و با تبدیل به ترکیبات جدید در شرایط سطحی پایدار می‌مانند.

بررسی تغییرات غلظت عناصر در پالتوسل‌های افق A نشان دهنده تغییرات کم و بیش مشابه اکسیدهای  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{SiO}_2$  در نیمرخ مورد بررسی است (شکل ۵). رفتار مشابه این دو اکسید و عدم جدایش آنها از یکدیگر پیشنهاد کننده شرایط هوازدگی ضعیف تا متوسط است [۲۸]. مقدار  $\text{SiO}_2$  در بخش میانی نیمرخ مورد بررسی دارای افزایش معنی‌دار است و از نظر کانی‌شناسی منطبق بر حضور کانی‌های کوارتز، آلبیت، میکروکلین و مسکویت است (جدول ۱). بررسی تغییرات مقدار  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  نشان دهنده روند افزایشی این اکسید از سطح به عمق و به ویژه در بخش میانی نیمرخ مورد بررسی است که با حضور هماتیت و کلریت در مجموعه کانی‌شناسی همخوانی دارد و نشان دهنده هوازدگی ناهوازی است. غلظت  $\text{CaO}$  به دلیل تمرکز دوباره در بخش کالکریتی به طور ناگهانی افزایش یافته و با فراوانی کلسیت در مجموعه کانی‌شناسی مشخص



شکل ۵ نمودارهای تغییرات غلظت اکسیدهای  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Ce}$ ,  $\text{V}$  در پالتوسل‌های افق A



شکل ۶ نمودارهای تغییرات نسبت‌های مولکولی و شاخص شیمیایی دگرسانی ( $CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} * 100$ ) در پالئوسل‌های افق A

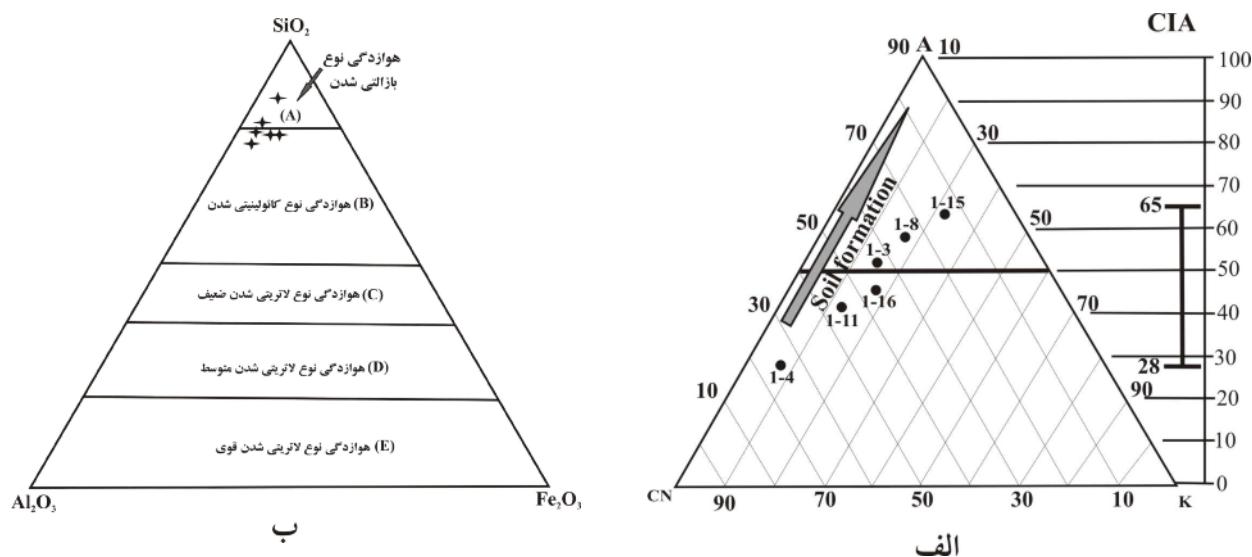
بر هوازده نشدن سنگ‌ها، ۵۰ تا ۶۰ بر هوازدگی متوسط و بیش از ۸۰ بر هوازدگی شدید شیمیایی سنگ‌ها دلالت دارد [۳۰]. این شاخص در منطقه‌ی مورد بررسی از ۲۸ تا ۶۵ درصد (با میانگین ۴۸/۶۶) در تغییر است (جدول ۲). مقادیر بسیار کم CIA اشاره به نهشت دوباره‌ی کلسیت در بخش کالکریتی دارد. در صورت حذف  $CaO$  از رابطه‌ی CIA، مقدار این شاخص دارای میانگین ۷۲/۶۶ خواهد بود که دلالت بر هوازدگی متوسط دارد. شاخص  $MgI = \frac{MgO}{Al_2O_3 + MgO} * 100$  به محاسبه‌ی هوازدگی مؤثر شیمیایی می‌پردازد و مقادیر بیش از ۷۵ بیانگر هوازدگی شدید شیمیایی است. این شاخص در منطقه‌ی مورد بررسی از ۵۱ تا ۹۱ در تغییر است. وجود پالئوسل‌های کالکریتی در منطقه‌ی مورد بررسی و پایین بودن شاخص CIA در مقایسه با  $MgI$  دلالت بر نهشت دوباره‌ی کلسیت در بخش کالکریتی دارد.

روش دیگری که از آن برای نشان دادن مقدار CIA استفاده شد، رسم نمودار مثلثی A-CN-K [۳۰] است که بر اساس مقادیر  $K_2O - Al_2O_3 - (CaO + Na_2O)$  ترسیم می‌شود. در این نمودار (شکل ۷-الف) تمامی نمونه‌های وابسته به پالئوسل‌های مورد بررسی به دلیل هوازدگی ضعیف تا متوسط و

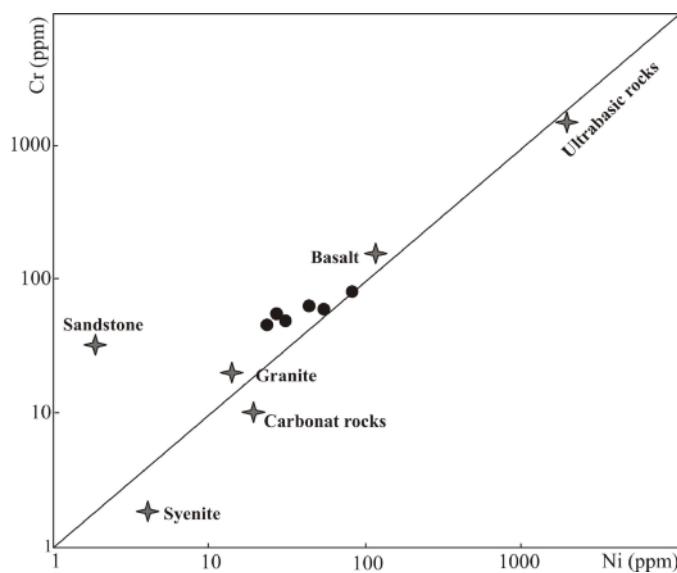
گسترده‌ی کانی‌های رسی در منطقه‌ی مورد بررسی هستند. بررسی شاخص شوری (Salinity=  $\frac{Na_2O}{K_2O}$ ) بیانگر افزایش مقادیر آن در بخش‌های میانی و پایینی افق پالئوسل ناشی از فروشست  $Na_2O$  است. شاخص کلسیتی‌شدن (Calcification =  $\frac{CaO + MgO}{Al_2O_3}$ ) که معرف افزایش  $CaO$  است، در بخش بالایی پالئوسل افزایش یافته و با تشکیل پالئوسل‌های کالکریتی در این بخش منطبق است. شاخص شستشو (Leaching=  $\frac{Ba}{Sr}$ ) که به عنوان معیاری برای بررسی میزان شستشوی خاک به کار می‌رود، نشان‌دهنده‌ی کاهش آن به سمت پایین است و دلالت بر کاهش شستشو از سطح به عمق دارد. بر اساس تمور و همکاران [۲۷] باریم در این شرایط همراه با کلسیت در بخش کالکریتی تمرکز یافته و استرانسیم به سمت پایین فروشسته می‌شود و همراه با  $MgO$  در کانی‌های کلریت و مونتموریلوبنیت تمرکز می‌یابد (جدول ۲). برای تعیین شدت هوازدگی از دو شاخص هوازدگی شیمیایی (CIA= Chemical Index of Alteration) و شاخص هوازدگی مؤثر شیمیایی ( $MgI = Mg$  Index) استفاده شد. شاخص هوازدگی شیمیایی ( $MgI = MgO / (MgO + CaO)$ ) استفاده CIA =  $\frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O} * 100$  شد. شاخص CIA برای بررسی هوازدگی شیمیایی به کار می‌رود و مقادیر آن از ۰ تا ۱۰۰ تغییر می‌کند [۱۲]. مقادیر کمتر از ۵۰

در گستره‌ی هوازدگی نوع بازالتی شدن و کائولینیتی شدن قرار می‌گیرند (شکل ۷-ب). بررسی تغییرات غلظت Ni نسبت به Cr [۳۲] پیشنهاد کننده سنگ خاستگاه بازالتی برای پالئوسلا-های منطقه مورد بررسی است که با شواهد صحرایی و رخمنون گستره‌های بازالتی سلطان میدان در این منطقه سازگار است (شکل ۸).

نهشت کلسیت ثانویه در بخش کالکریتی، دارای روند خطی موادی با ضلع A-CN هستند. به دلیل افزایش مقدار K<sub>2</sub>O در بخش پایینی نیمرخ، نمونه‌های وابسته به این بخش به سمت ضلع A-K متمایل شده‌اند که با حضور کانی‌های سریسیت و ارتوز در مجموعه کانی‌شناسی همخوانی دارد. برای تعیین نوع دگرسانی از نمودار مثلثی شلمن (SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-K<sub>2</sub>O) استفاده شد [۳۱]. بر اساس این نمودار، نمونه‌های مورد بررسی



شکل ۷ الف) نمودار مثلثی A(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-CN(CaO + Na<sub>2</sub>O) - K(K<sub>2</sub>O) [۳۰] برای پالئوسلا-های منطقه مورد بررسی و قرارگیری آن‌ها در گستره‌ی هوازدگی ضعیف تا متوسط، ب) نمودار سه‌تایی شلمن (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) [۳۱] برای تعیین نوع هوازدگی پالئوسلا-های افق



شکل ۸ نمودار تغییرات غلظت Ni نسبت به Cr برای تعیین سنگ مادر پالئوسلا-های منطقه خوش‌بیلاق. نمونه‌های پالئوسلا با دوایر توپر نشان داده شده‌اند. نمودار پایه از [۳۲].

به تشکیل اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و آبزدایی گوتیت و تبدیل آن به هماتیت در محیطی با زهکشی مناسب طی دوره‌های خشک و مرتبط نسبت داد که باعث ایجاد ماتریکس قرمز رنگ در پالئوسل‌ها شده است.

علیرغم وجود شواهدی از فعالیت‌های زیستی در بخش غیر کالکریتی پالئوسل‌های افق A که با حضور میکروتوپوس و اثرهای فسیلی مشخص می‌شود، به نظر می‌رسد با توجه به فراوانی بسیار کم این نوع شواهد، تشکیل پالئوسل‌های مورد بررسی در منطقه‌ای با فعالیت‌های زیستی محدود رخ داده است. عدم وجود شواهد زیستی در بخش کالکریتی پالئوسل‌های مورد بررسی نیز مؤید این فرضیه است و از این رو می‌توان این کالکریت‌ها را از نوع کالکریت‌های  $\alpha$  [۱۴] در نظر گرفت.

#### مراجع

- [1] Bates R. L., Jackson J. A., "Dictionary of geological terms", 3rd edition, New York, (1984) 571p.
- [2] Birkeland P. W., "Soils and geomorphology", 3rd edition, New York (1984) 430p.
- [3] Jenny H., "Factors of soil formation; a system of quantitative pedology", Dover, New York, (1994) 281p.
- [4] Retallack G. J., "Soils of the Past: An Introduction to paleopedology", Unwin Hyman, Boston, (1990) 520p.
- [5] Kraus M., "Paleosols in clastic sedimentary rocks: their geologic applications", Earth-Science Reviews 47 (1999) 41-70.
- [6] Retallack G. J., "The fossil record of soils. IN - Paleosols: Their Recognition and Interpretation", Princeton University Press, (1986) 1-57.
- [7] Tandon S. K., Good A., Andrews J. E., Dennis P. F., "Palaeoenvironments of the dinosaur-bearing Lameta Beds Maastrichtian, Narmada Valley, Central India", Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol 117 (1995) 153-184.
- [8] Tandon S. K., Gibling M. R., "Calcretes at sequence boundaries in upper Carboniferous cyclothem of the Sydney Basin, Atlantic Canada", Sediment Geol 112 (1997) 43-67.
- [9] Arndorff L., "Lateral relations of deltaic palaeosols from the Lower Jurassic Ronne Formation on the Island of Ornholm, Denmark", Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol 100 (1993) 235-250.
- [10] Soreghan G.S., Elmore R.D., Katz B., Cogoini M., Banerjee S., "Pedogenically enhanced

#### برداشت

پالئوسل‌های منطقه‌ی مورد بررسی روی سنگ بستر بازالتی سازند سلطان‌میدان و درون رخسارهای دشت سیلانی و دریاچه‌ای سازند پادها با سن دونین آغازی- میانی قرار گرفته است. بازالت‌های سلطان‌میدان در یک حوضه کافتی درون قاره‌ای در زمان سیلورین و بر اثر ایجاد پالئوتیس تشکیل شده است [۱۷]. این بازالت‌ها بلافاصله پس از تشکیل و به دلیل نبود رسوبگذاری و ایجاد شرایط مناسب از قبیل افزایش دما و  $CO_2$  [۳۳] دستخوش هوazardگی شده است که نتیجه‌ی آن شستشوی عناصر متحرک، تمرکز عناصر نامتحرک و تشکیل افق‌های پالئوسل بوده است. بر اساس نمودار Cr-Ni (شکل ۸)، بازالت‌های سلطان‌میدان را می‌توان به عنوان سنگ مادر پالئوسل‌های منطقه‌ی مورد بررسی در نظر گرفت. این نتایج با استفاده از نتایج کانی‌شناسی مبنی بر حضور کانی‌های ایلیت و مونتموریونیت در مجموعه‌ی کانی‌شناسی پالئوسل‌ها که دارای خاستگاه آتشفسانی هستند، و نیز قطعات بازالتی در کالکریت‌ها [۱۶] تایید می‌شود.

بررسی شاخص هوazardگی شیمیایی (CIA)، عدم جدایش  $SiO_2$  و  $Al_2O_3$  از یکدیگر و عدم تغییر مشخص و معنی‌دار در مقادیر اکسیدهای اصلی و جزیی، نشان‌دهنده‌ی رخداد هوazardگی ضعیف تا متوسط در منطقه‌ی مورد بررسی است. حضور پالئوسل‌های غیر کالکریتی، افزایش مقدار  $MgO$  و حضور کلریت و کائولینیت در بخش پایینی پالئوسل‌های افق A نشان‌گر افزایش سطح آب، ایجاد شرایط احیایی کوتاه مدت و سپس هوazardگی شدیدتر و زهکشی مناسب است که با حضور هماتیت به صورت پوششی و آشفتگی زیستی مشخص می‌شود و دلالت بر حاکم بودن شرایط آب و هوایی گرم و نیمه‌مرطوب دارد. بخش میانی تا بالایی افق A با حضور کالکریت‌های قرمز-رنگ، سیمانی شدن و تشکیل رگچه‌های کلسیتی مشخص می‌شود که نشان‌دهنده‌ی شرایط آب و هوایی گرم و خشک و افزایش مقدار  $CaO$  در منطقه‌ی وادوز است. بالاترین بخش پالئوسل‌های افق A با حضور سیمان سیلیسی مشخص می‌شود که می‌تواند بیانگر وجود شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب باشد [۲۱]. این نتایج پیشنهاد دهنده‌ی نوسان‌های آب و هوایی طی تشکیل پالئوسل‌های افق A است. پالئوسل‌های افق B که از نوع کالکریتی و دارای بافت برشی و غنی از رگچه‌های کلسیت اسپاری است، در شرایط آب و هوایی گرم و خشک تشکیل شده‌اند. رنگ قرمز پالئوسل‌های مورد بررسی را می‌توان

- [23] Duchaufour P., "Pedology: pedogenesis and classification", George Allen & Unwin, London, (1982) 448p.
- [۲۴] موسوی حرمی ر.م.، محبوبی ا.، "سنگشناسی رسوی" (ترجمه)، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد، (۱۳۸۵) ۴۹۳ ص.
- [25] Leyva S. M., Ramirez P. C., "Development and Distribution of Lateritic Paleosols in the Paleogene Silverado Formation, San Joaquin Hills", Long Beach, California, (2000) 60p.
- [26] Ohmoto H., "Evidence in pre-2.2 Ga paleosols for the early evolution of atmospheric oxygen and terrestrial biota", Geology 24 (1996) 1135-1138.
- [27] Temur S., Orhan H., Deli A., "Geochemistry of the Limestone of Mortas Formation and Related Terra Rossa, Seydisehir, Konya, Turkey", Geochemistry International 47 (2009) 67-93.
- [28] Sposito, G., "The Chemistry of Soils", Oxford: Oxford University Press (1989) 277 p.
- [29] Mitchell R. L., Sheldon N. D., "Weathering and paleosol formation in the 1.1Ga Keweenawan Rift", Precambrian Research 168 (2009) 271-283.
- [30] Nesbitt H. W., Young G. W., "Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites", Nature 299 (1984) 715-717.
- [31] Schellmann W., "A new definition of laterite. In: Banerji, P.K. (Ed.), Laterization processes", Geological Survey of India, Memoir 120 (1986) 11-17.
- [32] Mongelli G., Acquafredda A., "Ferruginous concretions in a Late Cretaceous karst bauxite: composition and conditions of formation", Chemical Geology 158 (1999) 315-320.
- [33] Mahmudy ghabraie M. H., Matsumoto R., Atsumoto Kakuda Y., Paul G., "Late Devonian facies variety in Iran: volcanism as a possible trigger of the environmental perturbation near the Frasnian-Famennian boundary", Geological International 48 (2004) 323-332.
- [۳۴] جعفریان م.، جلایی ا.، "نقشه زمین‌شناسی خوش‌بیان" به مقیاس ۱:۱۰۰۰۰، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۳).
- [35] Wendt J., Kaufmann B., Belka Z., Farsan N., Karimibavdipur A., "Devonian/Lower Carboniferous stratigraphy, facies patterns and palaeogeography of Iran", Acta Geologica Polonica 55 (2005) 31-97.
- magnetic susceptibility variations preserved in Paleozoic loessite, Geology 25 (1997) 1003-1006.
- [11] Flugel E., "Microfacies of Carbonate Rocks", Springer, Germany, (2004) 750p.
- [12] Maynard J. B., "Chemistry of modern soils as a guide to interpreting Precambrian palesols", Journal of Geology 100 (1992) 279-289.
- [13] Mack H. G., James W. C., Monger H. C., "Classification of paleosols", Geological Society of American Bulletin 105 (1993) 129-136.
- [14] Wright V. P., "A micromorphological classification of fossil and recent calcic and petrocalcic microstructures", Elsevier, Amsterdam, (1990) 401p.
- [15] Wright V. P., Tucker M. E., "Calcretes: an introduction", Blackwell, Oxford, (1991) 1222p.
- [16] Aharipour R., Moussavi R., Mosaddegh H., Mistiaen B., "Facies features and paleoenvironmental reconstruction of the Early to Middle Devonian syn-rift volcano-sedimentary succession (Padeha Formation) in the Eastern-Alborz Mountains, NE Iran", Facies 56 (2010) 279-294.
- [۱۷] لاسمی ا.، "رخسارهای محیط‌های رسوی و چینه تگاری سکانسی نهشته‌های سنگ‌های پرکامبرین بالای و پالئوزویک ایران"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، شماره ۷۸ (۱۳۷۹)، ۱۸۰ ص.
- [18] Alonso-Zarza A. M., Tanner L. H., "Continental Sequence Stratigraphy and Continental Carbonates", Elsevier, Netherlands, (2010) 215-273.
- [19] Richard A., "The Regolith Glossary, surficial geology, soils and landscapes", Cooperative Research Centre for Landscape Evolution and Mineral Exploration, (2001) 152p.
- [۲۰] قازانچی ر.، پاشایی ا.، خرمالی ف.، ایوبی ش.، "بررسی برخی خصوصیات میکرومورفوژوئیک یک توالی لس-پالئوسول نهارخواران گرگان"، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، شماره دوم (۱۳۸۷).
- [21] Chen X. Y., Lintern M. J., Roach I. C., "Calcrete: Characteristics, Distribution and use in Mineral Exploration", Cooperative Research Centre for Landscape Environments and Mineral Exploration, Western Australia, (2002) 170p.
- [22] Khadkikar A.S., "Elemental composition of calcites in Late Quaternary pedogenic calcretes from Gujarat, Western India". Journal of Asian Earth Sciences 25 (2005) 893-902.