

ارزیابی آلودگی فلزات سنگین خاک‌های سرپانتینیتی منطقه هرسین - صحنه، کرمانشاه

آرتیمس قاسمی‌دهنوی

استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد

نویسنده مسئول: Ghasemi.a@lu.ac.ir

دریافت: ۹۹/۴/۱۴ پذیرش: ۹۹/۶/۳

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

آلودگی فلزات سنگین نه تنها به طور مستقیم بر ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک تأثیر می‌گذارد بلکه فعالیت‌های بیولوژیکی و دسترسی به مواد غذایی را در خاک کاهش و خطری جدی برای سلامتی انسان محسوب می‌شود. یافته‌های حاصل از شاخص زمین‌انباشت نمونه‌های خاک‌های سرپانتینیتی نشان می‌دهد که شدت خاک در محدوده عدم آلودگی تا متوسط در مورد کروم و نیکل طبقه‌بندی شده است. علاوه بر این، شاخص بار آلودگی کروم و نیکل بیش از ۱ است که کیفیت نامناسب خاک و آلودگی خاک منطقه را ثابت می‌کند. مقدار متوسط EF منطقه، غنی‌شدگی عناصر کروم و نیکل را نشان می‌دهد. با توجه به ضریب همبستگی پیرسون، بین کبالت، کروم و نیکل همبستگی زیادی وجود دارد که نشان‌دهنده منبع برابر یا رفتار ژئوشیمیایی مشابه عناصر نسبت به یکدیگر است. با توجه به مقادیر زمین‌آماری مانند زمین‌انباشت، شاخص غنی‌شدگی و شاخص بار آلودگی در منطقه مورد مطالعه، بیش‌ترین غلظت عناصر نیکل و کروم است. ضریب همبستگی پیرسون نشان می‌دهد که بین کبالت، کروم و نیکل همبستگی بالایی وجود دارد. بر اساس نقشه پهنه‌بندی فلزات سنگین در خاک منطقه تراکم زیاد عناصر در برخی ایستگاه‌ها به عامل زمین‌شناسی مربوط می‌شود. تجزیه و تحلیل خوشه‌ای عناصر شاخص‌هایی نظیر ضریب همبستگی، نشان از همبستگی بالای بین کروم و نیکل داشته و حاکی از منشاء یکسان و یا رفتار مشابه ژئوشیمیایی آن‌ها نسبت به هم می‌باشد.

واژگان کلیدی: آلودگی، غنی‌شدگی خاک، خاک‌های سرپانتینیتی، شاخص زمین‌انباشت

۱- پیشگفتار

محسوسی دارد (لاسات، ۲۰۰۲) و لذا این واقعیت، سبب می‌شود تا فلزات سنگین به یکی از خطرناک‌ترین گروه آلاینده‌های زیست‌محیطی مبدل شوند. هرچند روند تجمع عناصر سنگین در خاک و رسوبات کواترنر بسیار کند است اما به دلیل فرآیند تقریباً برگشت‌ناپذیر انباشت این عناصر، در درازمدت شرایط کاهش کیفیت خاک بوضوح فراهم می‌گردد. در راستای بررسی تأثیرات ناشی از وقوع هوازدهی و بویژه سرپانتینیزاسیون سنگ‌های اولترامافیک، مطالعاتی در ایران و جهان به انجام رسیده است. کریمی و همکاران (۲۰۲۰) با بررسی تحرک فلزات سنگین نیکل (Ni)، کروم (Cr)، کبالت (Co)، سرب (Pb) و وانادیوم (V) در خاک‌های حاصل از اولترامافیک - های افیولیت کردستان (محور کامیاران - مریوان) به بررسی نقش و تأثیر فرآیند سرپانتینیزاسیون، معدنکاری و تغییرات pH در آزادسازی و غنی‌شدگی این عناصر در خاک مناطق مورد اشاره پرداختند. نتایج مطالعات انجام

وجود بخش‌های اولترامافیک در توالی‌های افیولیتی، تشکیل سرپانتین، خاک‌های سرپانتینیتی و رسوبات کواترنر در مناطقی که این نوع سنگ‌ها دارای رخنمون هستند را به دنبال دارد. در این میان آلودگی فلزات سنگین در خاک نه تنها به‌طور مستقیم بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک، کاهش فعالیت‌های بیولوژیکی و کاهش دستیابی زیستی مواد غذایی خاک تأثیر می‌گذارد، بلکه به دلیل ورود به زنجیره غذایی و نیز امنیت زیست‌محیطی از طریق نفوذ در آب‌های زیرزمینی خطری جدی برای سلامتی انسان محسوب می‌شود (فکچینلی و همکاران، ۲۰۰۱؛ قاسمی و همکاران، ۲۰۱۵؛ لی و همکاران، ۲۰۱۹). این موضوع زمانی اهمیت چشمگیرتری پیدا می‌کند که در می‌یابیم آلودگی خاک ناشی از فلزات سنگین به دلیل ماندگاری طولانی‌تر نسبت به سایر بخش‌های بیوسفر با آلودگی آب یا هوا تفاوت

کمبرند چین‌خورده زاگرس، زون خرد شده همراه با افیولیت‌ها (زاگرس مرتفع) و زون سندج - سیرجان می‌باشد. در این میان مجموعه افیولیتی کرمانشاه در بخش شمال باختری زون افیولیتی زاگرس و بین سپر عربی و زون سندج- سیرجان واقع شده است.

این مجموعه افیولیتی به دو بخش مجزا قابل تقسیم است: مجموعه هرسین- صحنه در جنوب‌خاور و مجموعه میانراهان در شمال باختر. مجموعه هرسین- صحنه با مختصات $34^{\circ}10'$ تا $34^{\circ}30'$ عرض شمالی و $47^{\circ}30'$ تا $48^{\circ}00'$ طول خاوری عمدتاً متشکل از پریدوتیت‌ها در جایگاه نخست و توالی گابرویی در جایگاه بعدی است که توسط دایک‌ها مورد هجوم قرار گرفته و بوسیله گدازه‌های بالشی و جریان‌های بازالتی و هم‌چنین سنگ‌آهک (واحد بیستون) پوشیده شده‌اند (شکل ۱). به لحاظ سنگ‌شناسی پریدوتیت‌ها شامل دونیت، هارزبورژیت، لرزولیت و ورلیت (مرادپور و همکاران، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹) می‌باشند. در این مجموعه توالی گابرویی عمدتاً به صورت گابروهای پگماتوئیدی و گابروهای فولیاسیون‌دار قابل مشاهده‌اند که به ترتیب در شمال‌باختر و جنوب‌خاور منطقه ذکر شده دارای رخنمون‌اند. در هر دو نوع گابرو، تروکتولیت‌ها بصورت اجزایی کوچک وجود دارند. کمپلکس دایکی در چند رخنمون کوچک در امتداد روخانه گاماسیاب (جنوب صحنه) قابل رویت می‌باشند. سنگ‌های آتشفشانی که عمدتاً متشکل از گدازه‌های بالشی با بافت حفره‌دار و جریان‌های بازالتی هستند، در اطراف روستاهای گشور- تمرک و سرماج (به ترتیب خاور و شمال هرسین) دیده می‌شوند (زارعی و مرادپور، ۲۰۱۵).

مجموعه میانراهان با مختصات $34^{\circ}35'$ تا $34^{\circ}55'$ عرض شمالی و $47^{\circ}00'$ تا $47^{\circ}25'$ طول خاوری با فاصله‌ای حدود ۵۰ کیلومتر از شمال مجموعه افیولیتی هرسین- صحنه قرار دارد که شامل چندین ورقه رانده شده متشکل از پریدوتیت‌های سرپانتینیتی، گابرو، جریان‌های بازالتی و رسوبات فلیشی است. سنگ‌های اولترامافیک که دارای گسترش بسیار محدودی در این مجموعه هستند، عمدتاً در بخش‌های باختری منطقه (خاور کامیاران) رخنمون دارند. گدازه‌های بالشی موجود در این ورقه بوسیله توده‌های نفوذی بزرگ گابرویی، دیوریتی، بازالت‌های پالئوسن- ائوسن و رسوبات از یکدیگر مجزا شده‌اند. بیش‌ترین فراوانی در سنگ‌های رسوبی موجود در

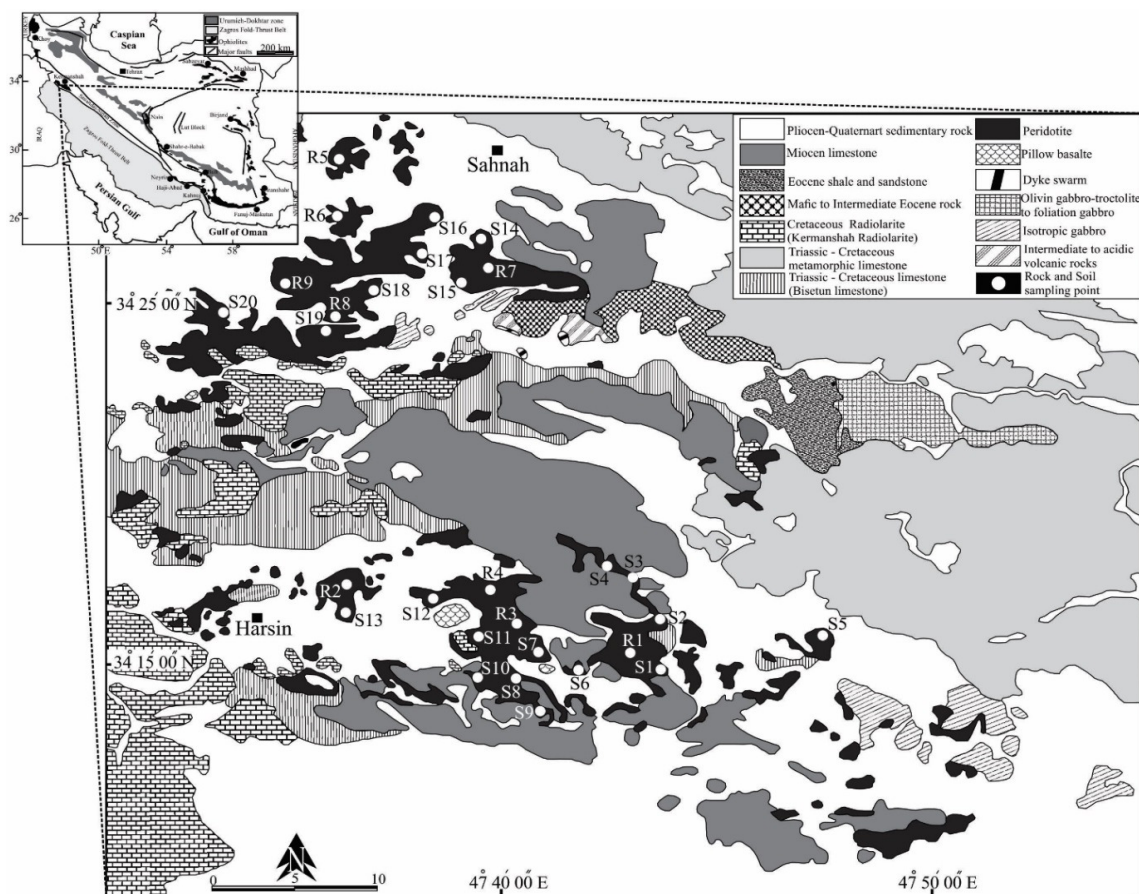
گرفته توسط پنتورو و همکاران (۲۰۱۹) بر روی خاک‌های حاوی کانی‌های رشته‌ای و غیررشته‌ای گروه سرپانتین در منطقه باسیلیکاتا (جنوب ایتالیا) نشان داد که انجام عملیات کشاورزی بر روی خاک‌های تولید شده بر سنگ بستر متشکل از آزبست، کریزوتیل، ترمولیت و آنتی‌گوریت، علاوه بر آلودگی عناصر سنگین در خاک این مناطق، به علت پراکنده شدن عناصر آلاینده حاصل از این خاک‌ها در هوا، منبع آلودگی زیست‌محیطی و تهدیدی جدی برای ساکنین روستاهای این محدوده به شمار می‌آید. مطالعات شبیه‌سازی سرپانتین فعال شده حرارتی در خاک‌های آلوده که توسط کائو و همکاران (۲۰۲۰) به انجام رسیده نیز نشان می‌دهد افزایش pH خاک ناشی از افزایش سرپانتین بیش‌ترین تاثیر را در کاهش $TCLP-Cd$ یا همان روش شستشوی سمیت کادمیوم در خاک دارد و نیز سرپانتین فعال شده حرارتی قادر به جذب و رسوب سطحی کادمیوم (Cd) بوده و می‌تواند این عنصر را به حالت غیر قابل دسترس برای گیاه در خاک در آورد. افیولیت‌های موجود در مناطق مختلف نظیر سروآباد، کرمانشاه، نیریز، بافت (وایت‌چرچ و همکاران، ۲۰۱۳؛ ساکانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ الهیاری و همکاران، ۲۰۱۴، رفیعی و همکاران، ۲۰۱۴) و پنجوبین- والش در عراق (اسواد و همکاران، ۲۰۱۱) قابل رویت‌اند که نقش مهمی در آلودگی و تجمع عناصر در خاک‌های این مناطق دارند (آگارد و همکاران، ۲۰۱۱). لذا توضیحات ارائه شده در خصوص نقش و اهمیت سنگ‌های اولترامافیک در آلودگی‌های زیست‌محیطی خاک زراعی ناشی از آن‌ها، نگارندگان این پژوهش را بر آن داشته تا ابتدا تجزیه ژئوشیمیایی را بر روی سنگ‌های پریدوتیتی و سرپانتینیتی منطقه هرسین- صحنه به عنوان منشاء آلودگی به انجام رسانده و سپس با تجزیه شیمیایی خاک‌های سرپانتینیتی موجود در زمین‌های زراعی این منطقه، میزان آلودگی این خاک‌ها به عناصر سنگین و سمی را بررسی نموده و مناطق آلوده در مناطق را بررسی نمایند.

۲- موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی

در منطقه کرمانشاه از جنوب‌باختر به شمال‌خاور سه واحد ساختاری اصلی وجود دارد که به ترتیب شامل:

می‌گردد (ریکو و همکاران، ۱۹۷۷). سازند قم نیز در محدوده‌های مورد بررسی متشکل از کربنات‌های پلتفرم دریایی کم عمق با کنگلومرای قاعده‌ای است و سن الیگوسن تا اوایل میوسن دارد. این سازند بصورت ناپیوسته بر روی کل افیولیت‌های کرمانشاه قرار گرفته است (وایت‌چرچ و همکاران، ۲۰۱۳).

مناطق هرسین، صحنه و میانراهان مربوط به رادیولاریت‌های دگرشکل شده، واحد بیستون و سازند قم می‌باشند. رادیولاریت‌های به شدت تغییرشکل یافته عمدتاً در منطقه هرسین - صحنه دیده می‌شوند (شکل ۱). در این مناطق واحد بیستون متشکل از ضخامت زیادی از کربنات کم عمق بوده و به لحاظ سنی دامنه‌ای از تریاس پایانی تا کرتاسه آغازین - پایانی را شامل



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه هرسین - صحنه (شهیدی و نظری، ۱۹۹۷؛ با تغییرات). R و S نقاط برداشت نمونه‌های سنگ و خاک

ورقه، ضخامت خاک بر روی سنگ مادر اولترامافیکی بسیار ناچیز و یا بعضاً وجود ندارد، لذا به رغم انجام و در دسترس بودن تجزیه شیمیایی سنگ کل پریدوتیت‌های منطقه میانراهان، امکان برداشت نمونه‌های خاک مناسب طبق استانداردهای موجود فراهم نبوده لذا در بررسی پیش‌رو، مطالعه انجام شده و نتایج حاصله متمرکز بر داده‌های به دست آمده از سنگ کل پریدوتیتی و خاک‌های زراعی منطقه هرسین - صحنه می‌باشد.

۳- مواد و روش‌ها

در راستای انجام این پژوهش، فعالیت‌های مطالعاتی صورت گرفته به دو بخش قابل تفکیک است: تجزیه و مطالعه ژئوشیمیایی سنگ‌های اولترامافیک منطقه هرسین - صحنه و تجزیه و مطالعه آلودگی عناصر سنگین خاک‌های زراعی سرپانتینیته حاصل از آنها در منطقه ذکر شده. اما از آنجا که در مجموعه میانراهان گسترش سنگ‌های پریدوتیتی بسیار محدودتر از منطقه هرسین - صحنه بوده و از طرفی به دلیل وضعیت توپوگرافی این

بررسی، از روش هاکنسون، ۱۹۸۰ و بر پایه رابطه $C_f = (C_0/C_n)$ صورت گرفته است. در این رابطه C_f ضریب آلودگی، C_0 غلظت عنصر در نمونه مورد بررسی و C_n غلظت عنصر در شیل میانگین به عنوان مرجع می‌باشد. شاخص بارآلودگی از دیگر پارامترهای مهم برای ارزیابی و تخمین شدت آلودگی خاک به شمار می‌رود. این شاخص بر اساس ضریب غلظت هر عنصر در خاک محاسبه می‌شود و با تقسیم غلظت هر عنصر در خاک به غلظت آن در نمونه مرجع (CF) بدست می‌آید. شاخص بارآلودگی برای مجموعه‌ای از عناصر آلاینده به صورت میانگین هندسی غلظت تمامی عناصر مورد نظر محاسبه می‌شود. با توجه به مقادیر استاندارد تامپلسون و همکاران، ۱۹۸۰ در صورتی که غلظت $P.L.I$ به عدد یک نزدیک باشد نشان‌دهنده نزدیک بودن غلظت به مقدار زمینه و در حالتی که $P.L.I$ بالاتر از یک باشد آلودگی خاک را نشان می‌دهد (مپاندا و همکاران، ۲۰۰۷). آلودگی کلی عنصری با استفاده از این شاخص از رابطه $P.L.I = \frac{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n}{n}$ (محمد و همکاران، ۲۰۱۰). یکی از روش‌های رایج برای ارزیابی اثرات زمین‌زاد یا انسان‌زاد بر روی خاک، محاسبه ضریب غنی‌شدگی بهنجار شده (EF) برای غلظت‌های بالاتر از حد زمینه عناصر است. در راستای محاسبه EF می‌بایست مقدار عنصر اندازه‌گیری شده را با توجه به عنصر مرجع نمونه مانند آهن، اسکاندیم، تیتان، منگنز یا آلومینیم بهنجار نمود (بینگان و لینسنگ، ۲۰۱۰). در این مطالعه برای ارزیابی اثر زمین‌زاد عناصر در خاک، از عنصر اسکاندیم به دلیل غیرمتحرک بودن و نیز داشتن کمترین تغییرات در نمونه‌ها به عنوان عنصر بهنجار کننده و مرجع هم‌چنین میانگین غلظت براساس شیل جهانی به عنوان محیط مرجع استفاده گردیده است. برای محاسبه ضریب غنی‌شدگی عناصر خاک از رابطه $EF = \frac{C_n(\text{sample})/C_{ref}(\text{sample})}{B_n(\text{background})/B_{ref}(\text{background})}$ استفاده گردیده است (محمد و همکاران، ۲۰۱۰). در این رابطه $C_n(\text{sample})$ غلظت عنصر در نمونه خاک مورد مطالعه و $C_{ref}(\text{sample})$ غلظت عنصر مرجع در نمونه خاک است. $B_n(\text{background})$ و $B_{ref}(\text{background})$ نیز به ترتیب غلظت عنصر در نمونه مرجع و غلظت عنصر مرجع را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی وضعیت ژئوشیمیایی سنگ‌های اولترامافیک، سرپانتینیتی و خاک‌های سرپانتینیتی محدوده مورد مطالعه، تعداد ۹ نمونه سنگ و ۲۰ نمونه خاک به روش $Fusion\ ICP/MS$ لیتیم متابورات/تتراپورات و مولتی‌اسید دایجست در آزمایشگاه $Act\ lab$ کانادا به انجام رسیده است. در این روش ابتدا لیتیم متابورات/تتراپورات گداخته با نمونه سنگی از قبل پودر شده، در بوتله گرافیتی مخلوط و سپس در کوره القایی و در حرارت $1150^\circ C$ ذوب گردیده است. سپس محتویات بوتله مذاب گداخته بلافاصله در مخلوطی از اسید نیتریک ۵٪ و متشکل از یک استاندارد خاص ریخته شده و بطور کامل و به مدت تقریباً ۳۰ دقیقه حل شده‌اند تا فلزات اصلی در مخلوط مذاب بصورت محلول در آیند. نمونه‌ها پس از انحلال و رقیق‌سازی با دستگاه $Perkin\ Elmer\ Sciex\ ELAN\ 6100$ آنالیز شده‌اند. برای تعیین دقیق مقدار فلزاتی مانند Ag, Cu, Pb, Zn, Ni فرآیند هضم با ۴ نوع اسید انجام شده است. تعیین مقدار As, Sb, W پس از تبدیل نمونه به کپسول در محفظه پلی‌اتیلن در معرض شار نوترون حرارتی $10^{12}\ n\ cm^{-2}\ s^{-1}$ قرار گرفته و سپس بوسیله یک دکتور با خلوص بسیار بالایی از جنس ژرمانیوم و با دقت تفکیک‌پذیری بالا صورت گرفته است. در حین آنالیز ۳ شاهد و ۵ مرحله کنترل برای هر گروه از نمونه‌ها انجام شده است. به ازاء هر نمونه یک نمونه مورد ذوب مجدد قرار گرفته و به ازاء هر ۲۰ نمونه آنالیز شده یک بار دستگاه مجدداً با استفاده از مرجع تایید شده $USGS$ و $CANMET$ کالیبره گردیده است. برای تعیین و تفسیر میزان آلودگی نمونه‌های خاک مورد مطالعه، با توجه به غلظت عناصر، از فاکتور غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشت و شاخص بار آلودگی استفاده شده است. شاخص زمین‌انباشت از فاکتورهای ژئوشیمیایی مهم برای توصیف غلظت عناصر در هر منطقه به شمار می‌آید (مولر، ۱۹۶۹) و می‌توان آنرا از رابطه $Igeo = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5 B_n} \right)$ مورد مطالعه در نمونه خاک یا رسوب، B_n : غلظت عنصر مورد مطالعه در مقدار زمینه (متوسط شیل جهانی) و ضریب ۱/۵ برای حذف تاثیر سنگ‌شناسی است. ضریب آلودگی را می‌توان به منظور بیان وضعیت آلودگی محیط نسبت به یک عنصر خاص استفاده نمود (ابراهیم و پارکر، ۲۰۰۸). محاسبه ضریب آلودگی برای نمونه‌های مورد

۴- یافته‌ها

۴-۱- ارزیابی سنگ‌های سرپانتینیتی

سرپانتینیت‌ها در مناطق مورد بررسی اغلب در زون‌های برشی و شکستگی‌ها قابل مشاهده‌اند. در نمای ظاهری این سنگ‌ها (کریزوتیل و آنتیگوریت‌های رشته‌ای و توده‌ای) با حالت برگوارگی، قطعات باقی مانده سنگ‌های اولترامافیک (هارزبورژیتی) که سالمترند را در برگرفته و قطعات را دور زده‌اند. در برخی نمونه‌های هارزبورژیتی سرپانتینیتی شدن دانه‌های الیوین به حدی است که تمامی الیوین‌ها با لیزاردیت با ساخت برگه‌ای جایگزین شده‌اند. بافت‌های ساعت شنی^۱، شبکه‌ای^۲، باستیتیکی^۳ و کرنل^۴ از مهم‌ترین و عمده‌ترین بافت سرپانتینیت‌های موجود در سنگ‌های اولترامافیک محدوده‌های مورد بررسی به شمار می‌آیند. نتایج تجزیه شیمیایی کانی سرپانتین و طرح نتایج تجزیه این کانی در نمودارهای مختلف بیانگر آن است که همگی سرپانتین‌های موجود در منطقه جزء گروه سرپانتین‌های فقیر از آلومینیم قرار می‌گیرند (Al_2O_3 کمتر از ۱/۵٪). هم‌چنین نتایج حاکی از آنند که کانی‌های سرپانتین همگی سرپانتینیت‌های پسودومورفی بوده که این موضوع بیانگر آن است که این کانی‌ها از جایگزینی پسرونده الیوین، ارتوپروکسن و کلینوپروکسن با سرپانتین‌ها بوجود آمده‌اند.

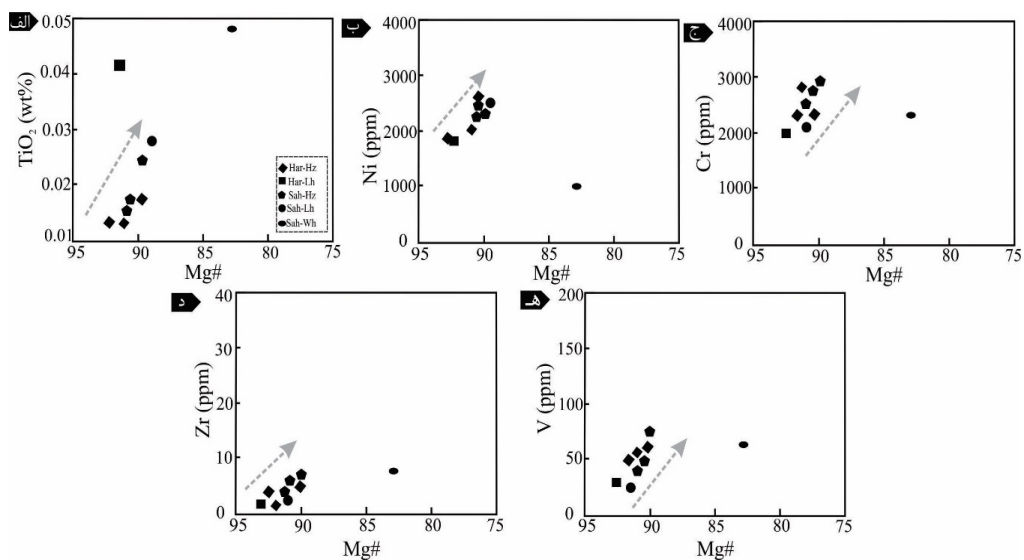
۴-۲- ارزیابی خاک‌های سرپانتینیتی

با توجه به تغییرات غلظت عناصر در خاک منطقه، عناصر آرسنیک (*As*)، منگنز (*Mn*)، کبالت (*Co*)، کروم (*Cr*)، نیکل (*Ni*)، روی (*Zn*)، سرب (*Pb*)، مس (*Cu*)، استرانسیم (*Sr*) و اسکاندیم (*Sc*) جهت ارزیابی انتخاب گردیدند. در جدول ۱ نتایج حاصل از آنالیز *ICP-MS* حاصله از ۲۰ نمونه خاک برداشت شده از ورقه مورد بررسی ارائه گردیده است. با مقایسه صورت گرفته بین میانگین غلظت‌های به دست آمده از عناصر در جدول ۲ می‌توان مشاهده نمود روند تغییرات فلزات سنگین در خاک‌های سرپانتینیتی مورد بررسی به صورت $Mn > Ni > Cr > Sr > Zn > Co > Cu > Pb > Sc > As$ می‌باشد. آنگونه که نتایج ارائه شده از آنالیز سنگ کل نیز گویا بود

منگنز، نیکل و کروم با بیش‌ترین اختلاف با دیگر عناصر، بالاترین غلظت و آرسنیک و اسکاندیم پایین‌ترین غلظت را در نمونه‌های خاک مورد آنالیز دارا می‌باشند.

نتایج حاصل از محاسبه شاخص زمین‌انباشت برای نمونه‌های خاک برداشت شده از محل‌های مختلف نمونه‌برداری محدوده هرسین- صحنه در جدول ۳ ارائه شده است. جهت سهولت در مشخص شدن عناصر با غلظت بالا مقدار بر پایه شیل میانگین در انتهای جدول ارائه شده است. نتایج حاکی از آن است که عناصر کروم و نیکل در دو رده با شدت آلودگی متوسط تا شدید ($2 < Igeo < 3$)، عناصر استرانسیم و کبالت در یک رده با شدت آلودگی، متوسط تا بدون آلودگی ($1 < Igeo < 0$) و سایر عناصر در محدوده بدون آلودگی ($1 < Igeo < 2$) قرار می‌گیرند. در جدول ۴ نتایج ضریب آلودگی در نقاط مورد بررسی بر اساس شیل میانگین و نیز در انتهای جدول میانگین ضریب آلودگی عناصر مورد بررسی ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده، عناصر آرسنیک، مس، منگنز، سرب، اسکاندیم و روی در محدوده آلودگی پایین ($1 > Cf$)، عناصر کبالت و استرانسیم در محدوده آلودگی متوسط ($3 < Cf < 1$) و عناصر کروم و نیکل دارای آلودگی بسیار ($6 < Cf$) بالا قرار می‌گیرند. نتایج محاسبه شاخص بار آلودگی خاک محدوده مورد بررسی در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج به دست آمده از این پارامتر بیانگر آن است که عناصر آرسنیک، مس، منگنز، سرب، اسکاندیم و روی در محدوده مناسب ($1 > PLI$) و عناصر کبالت و استرانسیم در محدوده نامناسب ($1 < PLI$) قرار دارند؛ عناصر کروم و نیکل با اختلاف بسیار محسوسی شاخص بار آلودگی خیلی بالایی را نسبت به دیگر عناصر به نمایش می‌گذارند (جدول ۵). بر اساس فاکتور غنی‌شدگی ارائه شده توسط ساترلند (۲۰۰۰) پنج سطح آلودگی قابل تمایز است و طبق نظر هرناندز و همکاران (۲۰۰۳) مقدار عامل غنی‌شدگی بین ۰/۵ تا ۲ به عنوان اثر انسان‌زاد یا طبیعی تلقی می‌شوند. نتایج حاصل از محاسبه *EF* و میانگین آن برای عناصر مورد بررسی خاک‌های سرپانتینیتی منطقه هرسین- صحنه در جدول ۶ نمایش داده شده است. طبق نتایج به دست آمده عناصر کروم و نیکل دارای غنی‌شدگی قابل توجه هستند، در این میان کبالت دارای غنی‌شدگی متوسط است.

¹ Hourglass texture² Mesh texture³ Bastitic texture⁴ Kernel texture



شکل ۲. تغییرات برخی عناصر اصلی و فرعی نسبت به $Mg\#$ در پریدوتیت‌های مورد مطالعه

واژه‌های اختصاری: ($Mg\# [Mg\# = \text{molar } Mg/(Mg+Fe) \times 100]$), *Sah*: صحنه، *Har*: هرسین، *HZ*: هارزبورژیت، *Wh*: ورلیت، *Lz*: لوزولیت.

جدول ۱. نتایج آنالیز *ICP-MS* نمونه‌های خاک سرپانتینیتی منطقه هرسین - صحنه (بر حسب *ppm*)

Sample	Locality		Zn	Sr	Sc	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr	Co	As
S1	34° 14' 08"N	47° 44' 52"E	۴۸	۱۹۰	۶۱۰	۶	۱۶۲۴	۷۹۷	۱۱	۱۳۷۲	۸۳/۶۰	۰/۱۰
S2	34° 14' 21"N	47° 45' 16"E	۴۴/۵۰	۱۲۸	۵/۸۰	۷/۱۰	۲۸۷	۵۶۸	۲۷/۳۰	۹۸	۲۵/۵۰	۳/۷۰
S3	34° 14' 45"N	47° 45' 20"E	۵۲	۱۵۳/۳۰	۸/۵۰	۶	۱۰۸۴	۷۱۲	۱۷	۱۱۳۴	۵۶/۱۰	۲/۳۰
S4	34° 14' 43"N	47° 45' 19"E	۵۹	۱۶۱/۷۰	۱۰/۷۰	۶	۹۸۰	۶۶۲	۲۸	۱۲۳۶	۵۵/۵۰	۳/۶۰
S5	34° 14' 28"N	47° 45' 17"E	۶۶/۹۰	۱۶۵	۱۵/۱۰	۳/۶۳	۲۳۸	۸۰۸	۵۹/۲۰	۱۴۰	۳۵/۲۰	۱/۷۰
S6	34° 13' 38"N	47° 44' 27"E	۶۴	۱۲۸	۱۱/۶۰	۷	۵۴۴	۶۹۵	۲۵	۴۸۵	۴۰	۲/۳۰
S7	34° 14' 41"N	47° 41' 49"E	۸۲/۷۰	۷۳/۹۰	۹/۸۰	۱۴/۹۰	۲۰۶۶	۷۸۴	۳۹/۲۰	۱۲۱	۲۰/۹۰	۷/۵۰
S8	34° 14' 40"N	47° 41' 47"E	۵۹	۱۶۴/۳۰	۱۲/۲۰	۳	۸۲۷	۸۵۸	۳۴	۹۲۷	۵۷	/۹۰
S9	34° 14' 39"N	47° 41' 47"E	۹۷	۱۴۶/۷۰	۱۹	۶	۲۷۱	۱۰۲۷	۵۷	۵۰۷	۴۲/۲۰	۷/۱۰
S10	34° 14' 39"N	47° 41' 43"E	۷۴	۱۵۷/۷۰	۱۲/۳۰	۱۶	۱۴۹	۷۰۶	۳۳	۱۹۸	۲۰/۱۰	۶
S11	34° 14' 40"N	47° 41' 42"E	۸۱	۱۲۸	۱۲/۵۰	۱۱	۲۰۰	۸۵۶	۴۰	۲۷۲	۲۳/۲۰	۵/۴۰
S12	34° 14' 39"N	47° 41' 32"E	۷۸/۶۰	۳۶/۹۰	۹/۵۰	۱۰/۲۰	۱۱۰۰	۱۱۸۰	۳۱/۲۰	۴۴۶	۷۳	۳
S13	34° 14' 35"N	47° 41' 30"E	۷۴	۱۱۵/۲۰	۱۴/۲۰	۱۴	۶۴۶	۸۱۳	۳۱	۶۷۲	۴۴/۴۰	۷
S14	34° 14' 29"N	47° 41' 32"E	۶۱/۴۰	۹۴/۲۰	۱۰/۳۰	۱۰	۸۱۷	۷۹۱	۲۷/۷۰	۳۱۶	۴۵	۶/۲۰
S15	34° 14' 40"N	47° 41' 39"E	۷۰	۴۰/۶۰	۱۲/۶۰	۸	۱۶۵۲	۹۶۰	۲۲	۱۳۷۵	۹۰/۳۰	۳/۱۰
S16	34° 14' 44"N	47° 41' 39"E	۹۰	۱۵۹/۸۰	۱۶	۸/۳۸	۲۴۰	۹۶۸	۴۶	۳۳۵	۳۱/۵۰	۴/۶۰
S17	34° 14' 45"N	47° 41' 41"E	۸۷	۱۷۷/۴۰	۱۵/۷۰	۸/۳۸	۲۱۵	۹۲۲	۶۰	۳۱۲	۳۱/۱۰	۳/۶۰
S18	34° 15' 10"N	47° 41' 19"E	۷۱	۵۰/۳۰	۱۲/۶۰	۱۰	۱۳۶۶	۸۷۶	۲۱	۱۱۱۴	۶۷/۵۰	۱/۷۰
S19	34° 15' 11"N	47° 41' 17"E	۶۴	۱۰۳/۳۰	۱۱/۵۰	۴	۱۱۹۳	۷۶۱	۲۴	۱۱۹۰	۵۸/۸۰	۲/۳۰
S20	34° 15' 13"N	47° 41' 12"E	۷۸	۱۸۵/۶۰	۱۴/۱۰	۸	۵۳۳	۹۵۲	۳۵	۸۱۵	۴۰/۴۰	۵/۴۰

جدول ۲. مقایسه استاندارد غلظت فلزات در خاک با خاک‌های سرپانتینیتی منطقه هرسین - صحنه (بر حسب *ppm*)

Zn	Sr	Sc	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr	Co	As	
۹۵	۳۰۰	۱۳	۲۰	۶۸	۸۵۰	۴۵	۹۰	۱۹	۱۳	متوسط شیل
۲۰۰	*	*	۳۰۰	۶۰	۸۵۰	۲۰	۵۴	۵۰	۲۰	USEPA
۷۰/۱	۳۴۵/۲۳	۱۲	۱۴/۳۹	۷۰۸/۶۰	۸۳۴/۸۰	۳۳/۴۳	۶۵۳/۲۵	۴۷/۰۵	۳/۸۷	خاک منطقه

جدول ۳. نتایج محاسبه شاخص زمین‌انباشت (*Igeo*) و میانگین شاخص زمین‌انباشت خاک‌های سرپانتینیتهی منطقه هرسین - صحنه

Sample	Zn	Sr	Sc	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr	Co	As
S1	-۱/۵۷	-۱/۲۴	-۱/۶۷	-۲/۳۲	۳/۹۹	-۰/۶۷	-۲/۶۱	۳/۳۵	۱/۵۵	-۷/۶۱
S2	-۱/۶۸	-۰/۳۷	-۱/۷۵	-۲/۰۸	۱/۴۹	-۱/۱۶	-۱/۳۰	-۰/۴۶	-۰/۱۴	-۲/۴۰
S3	-۱/۴۵	-۱/۵۵	-۱/۱۹	-۲/۳۲	۳/۴۱	-۰/۱۴	-۱/۹۹	۳/۰۷	۰/۹۸	-۳/۰۸
S4	-۱/۳۷	-۱/۴۸	-۰/۸۶	-۲/۳۲	۳/۲۶	-۰/۹۴	-۱/۲۳	۳/۱۹	۰/۹۶	-۲/۴۴
S5	-۱/۰۹	-۱/۴۵	-۰/۳۶	-۳/۰۵	۱/۲۲	-۰/۶۵	-۰/۱۸	۰/۰۵	۰/۳۰	-۳/۵۲
S6	-۱/۱۵	۲/۶۵	-۰/۷۴	-۲/۱۰	۲/۴۱	-۰/۸۷	-۱/۴۳	۱/۸۵	۰/۴۹	-۳/۰۸
S7	-۰/۷۸	-۲/۶۱	-۰/۹۹	-۱/۰۱	۱/۰۱	-۰/۷۰	-۰/۷۸	-۰/۱۵	-۰/۴۵	-۱/۳۸
S8	-۱/۳۷	-۱/۴۵	-۰/۶۷	-۳/۳۲	۳/۰۱	-۰/۵۷	-۰/۹۹	۲/۷۷	۱	-۴/۴۴
S9	-۰/۵۵	-۱/۶۲	-۰/۰۳	-۲/۳۲	۱/۴۰	-۰/۳۱	-۰/۲۴	۱/۹۰	۰/۵۷	-۱/۴۶
S10	-۰/۹۴	-۱/۵۱	-۰/۶۶	-۰/۹۱	۰/۵۴	-۰/۸۵	-۱/۰۳	۰/۵۵	-۰/۵۰	-۱/۷۰
S11	-۰/۸۱	۱/۷۸	-۰/۶۴	-۱/۴۵	۰/۹۷	-۰/۵۷	-۰/۷۵	۱/۰۱	-۰/۳۰	-۱/۸۵
S12	-۰/۸۵	-۳/۶۰	-۱/۰۳	-۱/۵۶	۳/۴۳	-۰/۱۱	-۱/۱۱	۱/۷۲	۱/۳۵	-۲/۷۰
S13	-۰/۹۴	-۱/۹۶	-۰/۴۵	-۱/۱۰	۲/۶۶	-۰/۶۵	-۱/۱۲	۲/۳۱	۰/۶۴	-۱/۴۸
S14	-۱/۳۱	-۲/۲۶	-۰/۹۲	-۱/۵۸	۳	-۰/۶۸	-۱/۲۸	۱/۲۲	۰/۶۶	-۱/۶۵
S15	-۱/۰۲	-۳/۴۷	-۰/۶۳	-۱/۹۱	۴/۰۱	-۰/۴۰	-۱/۶۱	۳/۳۵	۱/۶۶	-۲/۶۵
S16	-۰/۶۶	-۱/۴۹	-۰/۲۸	۱/۵۲	۱/۲۳	-۰/۳۹	-۰/۵۵	۱/۳۱	۰/۱۴	-۲/۰۸
S17	-۰/۷۱	-۱/۳۴	-۰/۳۱	۰/۷۶	۱/۰۷	-۰/۴۶	-۰/۱۶	۱/۲۰	۰/۱۲	-۲/۴۴
S18	-۱	-۳/۱۶	-۰/۶۳	-۱/۵۸	۳/۷۴	-۰/۵۴	-۱/۶۸	۳/۰۴	۱/۲۴	-۳/۵۰
S19	-۱/۱۵	-۲/۱۲	-۰/۷۶	-۲/۹۱	۳/۵۵	-۰/۷۴	-۱/۴۹	۳/۱۴	۱/۰۲	-۳/۰۸
S20	-۰/۸۶	-۱/۲۸	-۰/۴۶	-۱/۹۱	۲/۳۸	-۰/۴۲	-۰/۹۴	۲/۵۹	۰/۵۰	-۱/۸۵
<i>Igeo shale</i>	-۱/۰۲	۰/۲۰	-۰/۷۰	-۱/۰۶	۲/۸۰	-۰/۶۱	-۱/۰۱	۲/۳۷	۰/۷۲	-۲/۳۳

جدول ۴. نتایج محاسبه ضریب آلودگی *Cf* و میانگین ضریب آلودگی خاک‌های سرپانتینیتهی منطقه هرسین - صحنه

Sample	Zn	Sr	Sc	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr	Co	As
S1	۰/۵۰	۰/۶۳	۰/۴۷	۰/۳۰	۲۳/۸۸	۰/۹۴	۰/۲۴	۱۵/۲۴	۴/۴۰	۰/۰۰۷
S2	۰/۴۷	۱/۱۶	۰/۴۴	۰/۳۵	۴/۲۲	۰/۶۹	۰/۶۱	۱/۰۸	۱/۳۴	۰/۲۸
S3	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۶۵	۰/۳۰	۱۵/۹۴	۰/۸۴	۰/۳۸	۱۲/۶۰	۲/۹۵	۰/۱۸
S4	۰/۶۲	۰/۵۳	۰/۸۲	۰/۳۰	۱۴/۴۱	۰/۷۸	۰/۶۲	۱۳/۷۳	۲/۹۲	۰/۲۸
S5	۰/۷۰	۰/۵۵	۱/۱۶	۰/۱۸	۳/۵۰	۰/۹۵	۱/۳۱	۱/۵۵	۱/۸۵	۰/۱۳
S6	۰/۶۷	۹/۴۴	۰/۸۹	۰/۳۵	۸	۰/۸۲	۰/۵۵	۵/۳۸	۲/۱۱	۰/۱۸
S7	۰/۸۷	۰/۲۵	۰/۷۵	۰/۷۴	۳/۰۲	۰/۹۲	۰/۸۷	۱/۷۷	۱/۱۰	۰/۵۷
S8	۰/۶۲	۰/۵۵	۰/۹۴	۰/۱۵	۱۲/۱۶	۱/۰۱	۰/۷۵	۱۰/۳۰	۳/۰۱	۰/۰۶
S9	۱/۰۲	۰/۴۹	۱/۴۶	۰/۳۰	۳/۹۸	۱/۳۱	۱/۳۷	۵/۶۳	۲/۲۲	۰/۵۵
S10	۰/۷۸	۰/۵۲	۰/۹۵	۰/۸۰	۲/۱۹	۰/۸۳	۰/۷۳	۲/۳۰	۱/۰۶	۰/۴۶
S11	۰/۸۵	۵/۱۵	۰/۹۶	۰/۵۵	۲/۹۴	۱/۰۱	۰/۸۹	۳/۰۲	۱/۲۲	۰/۴۱
S12	۰/۸۳	۰/۱۲	۰/۷۳	۰/۵۱	۱۶/۱۷	۱/۳۹	۰/۶۹	۴/۹۵	۳/۸۴	۰/۲۳
S13	۰/۷۸	۰/۳۸	۱/۰۹	۰/۷۰	۹/۵۰	۰/۹۶	۰/۶۸	۷/۴۶	۲/۳۴	۰/۵۴
S14	۰/۶۵	۰/۳۱	۰/۷۹	۰/۵۰	۱۲/۰۱	۰/۹۳	۰/۶۱	۳/۵۱	۲/۳۷	۰/۴۸
S15	۰/۷۳	۰/۱۳	۰/۹۷	۰/۴۰	۲۴/۲۹	۱/۱۳	۰/۴۹	۱۵/۲۷	۴/۷۵	۰/۲۴
S16	۰/۹۵	۰/۵۳	۱/۲۳	۴/۳۰	۳/۵۳	۱/۱۴	۱/۰۲	۳/۷۲	۱/۶۶	۰/۳۵
S17	۰/۹۱	۰/۵۹	۱/۲۰	۲/۵۵	۳/۱۶	۱/۰۸	۱/۳۳	۳/۴۶	۱/۶۴	۰/۲۸
S18	۰/۷۵	۰/۱۴	۰/۹۷	۰/۵۰	۲۰/۰۸	۱/۰۳	۰/۴۶	۱۲/۳۷	۳/۵۵	۰/۱۳
S19	۰/۶۷	۰/۳۴	۰/۸۸	۰/۲۰	۱۷/۵۴	۰/۸۹	۰/۵۳	۱۳/۲۲	۳/۰۸	۰/۱۸
S20	۰/۸۲	۰/۶۲	۱/۰۸	۰/۴۰	۷/۸۳	۱/۱۲	۰/۷۸	۹/۰۵	۲/۱۳	۰/۴۱
<i>Cf shale</i>	۰/۷۳	۱/۱۴	۰/۹۲	۰/۷۱	۱۰/۴۱	۰/۹۸	۰/۷۴	۷/۲۷	۲/۴۷	۰/۲۹

جدول ۵. نتایج شاخص بار آلودگی (PLI) خاک‌های سرپانتینیتی منطقه هرسین - صحنه

PLI_{Zn}	PLI_{Sr}	PLI_{Sc}	PLI_{Pb}	PLI_{Ni}	PLI_{Mn}	PLI_{Cu}	PLI_{Cr}	PLI_{Co}	PLI_{As}
۰/۵۲	۰/۳۸	۰/۷۹	۰/۱۷	۶۱/۷۰	۰/۷۵	۰/۴۷	۳۰/۰۴	۵/۱۰	۰/۰۵

جدول ۶. نتایج محاسبه ضریب غنی‌شدگی (EF) و میانگین ضریب غنی‌شدگی خاک‌های سرپانتینیتی منطقه هرسین - صحنه

Sample	EF_{Zn}	EF_{Sr}	EF_{Sc}	EF_{Pb}	EF_{Ni}	EF_{Mn}	EF_{Cu}	EF_{Cr}	EF_{Co}	EF_{As}
S1	۱/۰۸	۱/۳۵	۱	۰/۶۳	۵۰/۹۰	۱/۹۹	۰/۵۲	۳۲/۵۰	۹/۳۸	۰/۰۱
S2	۱/۰۵	۲/۶۱	۱	۰/۷۹	۹/۴۶	۱/۵۰	۱/۳۶	۲/۴۴	۳/۰۱	۰/۶۴
S3	۰/۸۴	۰/۷۸	۱	۰/۴۶	۲۴/۳۸	۱/۲۸	۰/۵۸	۱۹/۲۸	۴/۵۲	۰/۲۷
S4	۰/۷۵	۰/۶۵	۱	۰/۳۶	۱۷/۵۱	۰/۹۴	۰/۷۵	۱۶/۶۹	۳/۵۵	۰/۳۴
S5	۰/۶۰	۰/۴۷	۱	۰/۱۶	۳/۰۱	۰/۸۲	۱/۱۳	۱/۳۴	۱/۶۰	۰/۱۱
S6	۰/۷۵	۱۰/۵۸	۱	۰/۳۹	۸/۹۷	۰/۹۲	۰/۶۲	۶/۰۴	۲/۳۶	۰/۲
S7	۱/۱۵	۰/۳۳	۱	۰/۹۹	۴/۰۲	۱/۲۲	۱/۱۶	۱/۷۸	۱/۴۶	۰/۷۶
S8	۰/۶۶	۰/۵۸	۱	۰/۱۶	۱۲/۹۶	۱/۰۷	۰/۸۰	۱۰/۹۸	۳/۲۰	۰/۰۷
S9	۰/۷۰	۰/۳۳	۱	۰/۲۰	۲/۷۳	۰/۸۲	۰/۸۷	۳/۸۶	۱/۵۲	۰/۳۷
S10	۰/۸۲	۰/۵۵	۱	۰/۸۴	۲/۳۲	۰/۸۸	۰/۷۷	۲/۳۳	۱/۱۲	۰/۴۹
S11	۰/۸۸	۵/۳۶	۱	۰/۵۷	۳/۰۶	۱/۰۵	۰/۹۲	۳/۱۴	۱/۲۷	۰/۴۳
S12	۱/۱۳	۰/۱۷	۱	۰/۷۰	۲۲/۱۴	۱/۹۰	۰/۹۵	۶/۷۸	۵/۲۶	۰/۳۱
S13	۰/۷۱	۰/۳۵	۱	۰/۶۴	۸/۷۰	۰/۸۷	۰/۶۳	۶/۸۴	۲/۱۴	۰/۴۹
S14	۰/۸۱	۰/۴۰	۱	۰/۶۳	۱۵/۱۷	۱/۱۷	۲/۶۹	۴/۴۳	۲/۹۹	۰/۶۰
S15	۰/۷۶	۰/۱۴	۱	۰/۴۱	۲۵/۰۷	۱/۱۶	۰/۵۰	۱۵/۷۷	۴/۹۱	۰/۲۴
S16	۰/۷۷	۰/۴۳	۱	۳/۴۹	۲/۸۷	۰/۹۲	۰/۸۳	۳/۰۲	۱/۳۵	۰/۲۹
S17	۰/۷۶	۰/۴۹	۱	۲/۱۱	۲/۶۲	۰/۹۰	۱/۱۰	۲/۸۷	۱/۳۷	۰/۲۳
S18	۰/۷۷	۰/۱۷	۱	۰/۵۱	۳۰/۷۳	۱/۰۶	۰/۴۸	۱۲/۷۸	۳/۶۷	۰/۱۳
S19	۰/۷۶	۰/۳۹	۱	۰/۲۲	۱۹/۸۳	۱/۰۱	۰/۶۰	۱۴/۹۵	۳/۴۸	۰/۲۰
S20	۰/۷۵	۰/۵۷	۱	۰/۳۷	۷/۲۳	۱/۰۳	۰/۷۲	۸/۳۵	۱/۹۶	۰/۳۸
EF	۰/۸۷	۱/۳۳	۱	۰/۷۳	۱۳/۱۸	۱/۱۲	۰/۹۰	۸/۸۰	۲/۶۸	۰/۳۲

پیرسون استفاده شده است که نتایج آن در جدول ۷ ارائه گردیده است. این نتایج حاکی از آن است که همبستگی بالایی بین آرسنیک با (روی $r=0.588$, $p<0.05$)، کبالت با (کروم $r=0.833$, $p<0.05$)، نیکل با (کروم $r=0.619$, $p<0.05$)، مس با (کبالت $r=0.833$, $p<0.05$)، نیکل با (کروم $r=0.563$, $p<0.05$)، مس با (روی $r=0.701$, $p<0.05$)، اسکاندیوم با (روی $r=0.749$, $p<0.05$)، منگنز با (روی $r=0.679$, $p<0.05$)، نیکل با (کبالت $r=0.619$, $p<0.05$)، کروم با (روی $r=0.563$, $p<0.05$) و (کروم $r=0.263$, $p<0.05$)، سرب با (روی $r=0.380$, $p<0.05$)، اسکاندیوم با (مس $r=0.749$, $p<0.05$) و منگنز با (روی $r=0.499$, $p<0.05$)، روی با (روی $r=0.701$, $p<0.05$)، مس با (آرسنیک $r=0.588$, $p<0.05$) و (مس $r=0.701$, $p<0.05$)، منگنز با (روی $r=0.679$, $p<0.05$)، نیکل با (کروم $r=0.263$, $p<0.05$)

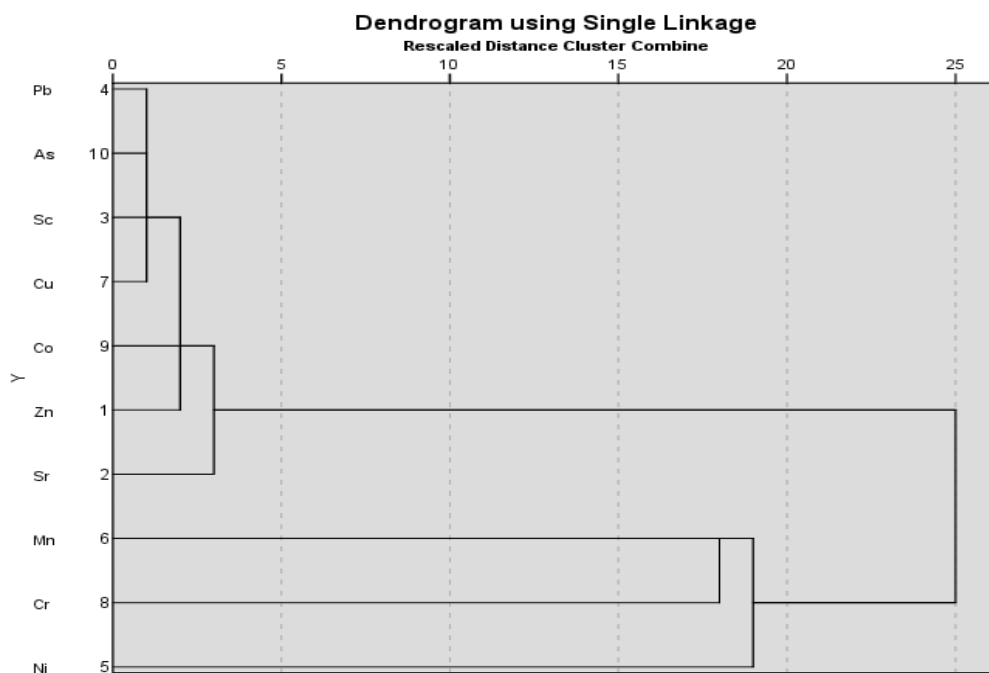
در راستای پهنه‌بندی آلودگی فلزات سنگین، نقشه هم‌ارزش توزیع فلزات در محدوده مورد مطالعه به وسیله روش درونیایی کریجینگ ترسیم گردیده است. به منظور تعیین مقدار آلودگی این فلزات، لایه‌های رستری به دست آمده برای هر عنصر، در نرم‌افزار Arc GIS v10.2 با هم تلفیق گردید و از تمامی نقشه‌های توزیع مکانی (برای هر عنصر به صورت مجزا) یک نقشه واحد به دست آمد. نقشه تهیه شده حاکی از آن است حداکثر آلودگی در نقاط ۴، ۶، ۹ و ۲۰ مشاهده می‌شود.

۵- تحلیل آماری

پس از انجام آنالیزهای شیمیایی، به منظور بررسی نحوه ارتباط عناصر با یکدیگر و نیز تعیین منشأ آن‌ها، نتایج به دست آمده تحت آنالیزهای آماری قرار گرفتند. برای بررسی همبستگی عناصر مورد مطالعه از آنالیز همبستگی

شده از منطقه نیز مشخص می‌باشد (شکل ۱) سازندهایی نظیر آهک‌های بیستون، سازند کربناته دریایی قم و آهک‌های میوسن از عمده‌ترین و وسیع‌ترین واحدهای سنگی گسترش یافته در بین پریدوتیت‌های مورد مطالعه بوده و قطعاً نقش چشمگیری در افزایش میزان کربنات خاک‌های منطقه دارند. لذا علاوه بر غلظت بالای کروم در سنگ‌های پریدوتیتی منطقه و متعاقباً فراوانی این فلز در خاک‌های سرپانتینیتی مورد بررسی، قطعاً نقش تاثیر افزایش کربنات خاک در تجمع فلز کروم در خاک‌های سرپانتینیتی منطقه هرسین- صحنه نیز بسیار موثر بوده است. به اعتقاد برادی (۱۹۷۴) خاک‌های اولترامافیکی شدیداً غنی از آهن و منیزیم، به دلیل ماهیت شیمیایی و ساختاری خود از پایداری چندانی برخوردار نیستند، با توجه به اقلیم مرطوب و موفولوژی اغلب کوهستانی منطقه هرسین- صحنه بویژه در مناطق رخنمون یافته توالی افیولیتی و خاک‌های وابسته، می‌توان ادعان داشت که عامل فرسایش توسط آب‌های جاری می‌تواند به عنوان یک عامل مهم پخش کننده عناصر آلاینده در منطقه مورد توجه قرار گیرد. گام بعدی در تجزیه و تحلیل نمونه‌های مورد بررسی استفاده از نمودارهای خوشه‌ای بوده که نتایج آن در شکل ۳ ارائه گردیده است.

$p < 0.01$ ، سرب $r = 0.380$ ، $p < 0.01$ ، اسکاندیوم $r = 0.797$ ، $p < 0.05$ وجود دارد. همبستگی معنی‌دار سه فلز کروم، کبالت و نیکل نشانه‌ای بر منشاء مشترک این فلزات و نیز شباهت آن‌ها در انتقال و تجمع این فلزات می‌باشد (د. تمرمن و همکاران، ۲۰۰۳؛ آکاستا و همکاران، ۲۰۱۰). تحقیقات مارتین و همکاران (۲۰۰۶) بر روی فلزات سنگین نشان داد مقدار نیکل همبستگی مثبتی با مقدار رس موجود در خاک دارد و این در حالی است که این تحقیقات حاکی از آنند که مقدار کروم با مقدار کربنات خاک همبستگی مثبتی نشان می‌دهد به نحوی که مقدار رس از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده توزیع و غلظت فلزات سنگین است (د. تمرمن و همکاران، ۲۰۰۳). از آنجا که وقوع فرآیند آلتراسیون و بویژه سرپانتینیزاسیون بر روی کانی‌هایی نظیر الیوپین و پیروکسن که از سازندگان اصلی سنگ‌های اولترامافیک می‌باشند، در تشکیل کانی‌های رسی خاک نقش عمده‌ای را ایفا می‌نماید، به نظر می‌رسد افزایش غلظت نیکل موجود در خاک‌های مورد بررسی علاوه بر غلظت بالای این فلز در سنگ مادر پریدوتیتی منشاء، از درصد بالای رس تشکیل شده بر اساس دانه‌بندی در خاک‌های سرپانتینیتی منطقه هرسین- صحنه نیز متاثر گردیده است. از طرفی همانگونه که در نقشه زمین‌شناسی ارائه



شکل ۳. نمودار خوشه‌ای عناصر سنگین خاک‌های سرپانتینیتی منطقه هرسین- صحنه

جدول ۷. ضریب همبستگی پیرسون بین عناصر سنگین خاک‌های سرپانتینیتی منطقه هرسین - صحنه

	Zn	Sr	Sc	Pb	Ni	Mn	Cu	Cr	Co	As
Zn	۱									
Sr	-۱۰۳	۱								
Sc	۱۷۹۷**	۱۶۵	۱							
Pb	۱۳۸۰	-۱۳۴۷	-۱۰۰۹	۱						
Ni	-۱۲۶۳	-۱۵۲۳*	-۱۴۸۳*	۱۰۵۵	۱					
Mn	۱۶۷۹**	-۱۲۷۹	۱۴۹۹*	۱۰۳۶	۱۰۳۱	۱				
Cu	۱۷۰۱*	۱۲۸۸	۱۷۴۹*	-۱۰۰۸	۱۵۸۷**	۱۳۵۳	۱			
Cr	-۱۳۸۷	-۱۰۴۹	-۱۱۹۹	-۱۴۱۴	۱۵۶۳**	۱۰۱۱	-۱۶۳۷**	۱		
Co	-۱۳۳۷	-۱۳۴۵	-۱۲۵۷	-۱۳۷۳	۱۶۹۱**	۱۳۱۰	-۱۵۸۳**	۱۸۳۳**	۱	
As	۱۵۸۸**	-۱۰۷	۱۳۵۶	۱۶۸۱**	-۱۲۲۳	۱۰۹۳	۱۳۷۶	-۱۵۲۵*	-۱۵۹۰**	۱

ضریب آلودگی بیانگر آلودگی بسیار عنصر کروم و نیکل است. همچنین نتایج شاخص بار آلودگی نشان از آن دارند که عناصر کروم و نیکل با اختلاف محسوسی شاخص بار آلودگی بسیار بالایی را نسبت به دیگر عناصر به نمایش می‌گذارند و این موضوع توسط فاکتور غنی‌شدگی نیز تایید می‌گردد. با توجه به نتایج حاصل از ضریب همبستگی پیرسون، مشخص شد که همبستگی بالایی بین عناصر کبالت، کروم و نیکل وجود دارد که حاکی از منشاء یکسان آن‌ها است. نتایج حاصل از آنالیز هم بستگی خوشه‌ای حاکی از تقسیم‌بندی عناصر به سه خوشه می‌باشد و عناصری که دارای ارتباط ساختاری بودند را در زیر خوشه‌های بعدی به هم مرتبط نموده است. ترکیب خوشه‌های ۶ و ۷ باهم منشاء یکسانی را برای این عناصر نشان می‌دهد. با توجه به مراجع و استانداردهای موجود حد مجاز نیکل و کروم در خاک به ترتیب 60 ppm و 54 ppm است، اما با توجه به آنالیز نمونه‌های برداشت شده از خاک‌های کشاورزی منطقه مورد مطالعه، میزان غلظت این عناصر بسیار بالاتر از حد استاندارد توصیه شده و به ترتیب معادل 708 ppm و 653 ppm می‌باشد. ورود نیکل به دستگاه گردش خون از راه محصولات کشاورزی، تنفس و یا مصرف آب‌های زیرزمینی دارای مقادیر بالای نیکل (چاه‌های حفر شده در مناطق مورد مطالعه) می‌تواند موجبات تخریب اندام‌های درونی بدن، اختلال در سیستم دفاعی بدن، ابتلا به انواع سرطان‌های خون و مغز استخوان، عفونت‌های موضعی، التهاب و مرگ را فراهم آورد و همچنین عنصر کروم مشکلات عصبی، گوارشی و هیپوگلیسمی و آسیب‌های کبدی، کلیوی و تپش قلب، آسیب‌های پوستی و حتی

انجام این خوشه‌بندی سلسله مراتبی با هدف دست‌یابی به ملاکی برای طبقه‌بندی هرچه مناسب‌تر متغیرها و یا نمونه‌ها و منشاء‌یابی آماری عناصر (آداما و همکاران، ۲۰۰۵)، براساس تشابه هرچه بیشتر درون گروهی و اختلاف بیشتر بین گروهی به انجام رسیده است. آنگونه که در نمودار دندروگرام (شکل ۳) مشخص گردیده، عناصر مورد بررسی در سه خوشه قرار می‌گیرند. خوشه اول Mn, Cr, Ni خوشه دوم Co, Zn, Sr و خوشه سوم Cu, Pb, As, Sc قرار گرفتن کبالت و نیکل در یک خوشه و ارتباط آن در یک رده بالاتر با خوشه کروم بوضوح از هم منشأ بودن این سه و نیز غلظت بالای کبالت، نیکل و کروم در سنگ مادر پریدوتیتی منطقه به نسبت دیگر عناصر مورد بررسی حکایت دارد. این موضوع از جدول ۶ نیز که بیانگر بیش‌ترین همبستگی بین این سه عنصر با یکدیگر می‌باشد هم آشکار است.

۵- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی‌های انجام شده بر روی سنگ‌های پریدوتیتی و خاک‌های سرپانتینیتی حاصل از آن‌ها در منطقه هرسین - صحنه در استان کرمانشاه حاکی از آن است که این سنگ‌ها و متعاقباً خاک‌های حاصل از آن‌ها دارای غلظت‌های بسیار بالایی از برخی از عناصر سنگین می‌باشند. غلظت‌های بالای عناصری نظیر نیکل، کروم و کبالت و منگنز در سنگ مادر اولترامافیکی منطقه منجر به تمرکز بالای این عناصر در خاک‌های سرپانتینیتی گردیده است. مقادیر زمین‌انباشت خاک‌های مورد بررسی حاکی از آن است که عناصر نیکل و کروم در دو رده با شدت آلودگی متوسط تا شدید قرار می‌گیرند. فاکتور

- Aswad, K. JA., Aziz, N. R. H., Koyi, H. A (2011) *Cr-spinel compositions in serpentinites and their implications for the petroectonic history of the Zagros Suture Zone, Kurdistan Region, Iraq. Geological Magazine, 148-818.*
- Binggan, W., Linsheng, Y. (2010) A review of heavy metal contaminations in urban soils, urban road dusts and agricultural soils from China. *Microchemical Journal, 94(2): 99-107.*
- Cao, C. Y., Yu, B., Wang, M., Zhao, Y. Y., Wan, X., Zhao, S (2020) Immobilization of cadmium in simulated contaminated soils using thermal-activated serpentine. *Soil Science and Plant Nutrition, 1-7.*
- De Temmerman, L., Vanongeval, L., Boon, W., Hoenig, M., Geypens, M (2003) *Heavy Metal Content of Arable Soils in Northern Belgium. Water, Air, & Soil Pollution, 148(1): 61-76.*
- Facchinelli, A., Sacchi, E., Mallen, L (2001) *Multivariate statistical and GIS-based approach to identify heavy metal sources in soils. Environ Pollut, 114(3): 313-324.*
- Ghasemi Dehnavi, A., Sarikhani, R., Peyrawan, H. R., Shoaee, Z., & Kerimi, M (2015) *Investigation of chemical and physical properties of neogen marls effects on the forms and intensity of erosion in Varamin area, southwest of Tehran province. Applied Sedimentology, 3(6): 57-69.*
- Hakanson, L (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach *Water research, 14(8): 975-1001.*
- Hernandez, L., Probst, A., Probst, J. L., et al (2003) Heavy metal distribution in some French forest soil, evidence for atmospheric contamination. *Sci Total Environ, 312: 195-219.*
- Karimi, A., Ahmadi, A., Partabian, A (2020) Potential soil pollution by heavy metals in Kurdistan region, western Iran: the impact of ultramafic bedrock. *Geopersia, 10 (1): 41-52.*
- Lasat, M. M (2002) Phytoextraction of toxic metals – A review of biological mechanisms. *Journal of Environmental Quality, 31: 109-120.*
- Li, C., Zhou, K., Qin, W., Tian, C., Qi, M., Yan, X., Han, W (2019) A review on heavy metals contamination in soil: effects, sources, and remediation techniques. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal, 28(4): 380-394.*
- Mapanda, F., Mangwayana, E. N., Nyamangara J., Giller K. E (2007) Uptake of heavy metals by vegetables irrigated using wastewater and the subsequent risks in Harare, Zimbabwe *Physics and Chemistry of the Earth, 32: 1399-1405.*
- سرطان ریه را به دنبال دارد. با در نظر گرفتن اثرات منفی ذکر شده در خصوص فلزات سنگین مورد مطالعه بر محیط‌زیست و بویژه انسان و با در نظر گرفتن غلظت بسیار بالای دو عنصر نیکل و کروم در خاک‌های سرپانتینیتی موجود در زمین‌های کشاورزی محدوده مورد بررسی بویژه نقاط ۴، ۶، ۹ و ۲۰، روش‌های بیولوژیک نظیر زیست‌پالایی و گیاه‌پالایی (تثبیت گیاهی و استخراج گیاهی)، جلوگیری از کشت گیاهان برگی نظیر کلم و کاهو، جلوگیری از چرای دام و کاشت درختان مقاوم و سرپانتین دوست به دلیل کم هزینه‌تر بودن این روش‌ها نسبت به دیگر روش‌های اصلاح خاک توصیه می‌گردد.
- تشکر و قدردانی**
- از داوران محترم این نشریه که در جهت ارتقای کیفیت این مقاله، پیشنهادات ارزنده‌ای ارائه نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.
- منابع**
- Abraham, G. M. S, Parker, R. J (2008) *Assessment of Heavy Metal Enrichment Factors and the Degree of Contamination in Marine Sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. Environmental Monitoring and Assessment, 136 (1): 227-238.*
- Acosta, J., Faz, A. Martinez- Martinez, S (2010) *Identification of heavy metal sources by multivariable analysis in a typical Mediterranean city (SE Spain). Environmental Monitoring Assessment, 169 (1): 519-530.*
- Adama, P., Arienzo, M., Imporato, M., Noimo, D., Nardi, G., Stanzione, D (2005) *Distribution and partition of heavy metals in surface and subsurface sediments of Naples city port, Chemosphere, 61:800-809.*
- Agard, P., Omrani J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monie, P., Meyer, B., Wortel, R (2011) *Zagros orogeny: a subduction-dominated process. Geological Magazine, 148: 692-725.*
- Allahyari, K., Saccani, E., Rahimzadeh, B., Zeda, O (2014) *Mineral chemistry and petrology of highly magnesium ultramafic cumulates from the Sarve-Abad (Sawlava) ophiolites (Kurdistan, NW Iran): new evidence for boninitic magmatism in intra-oceanic fore arc setting in the Neo-Tethys between Arabia and Iran. Journal of Asian Earth Sciences, 79: 312-328.*

- Sutherland, R. A (2000) *Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. Environmental Geology*, 39(6): 611-627.
- Tomlinson, D. L, Wilson, J. G. Harris, C. R. Jeffrey, D. W (1980) *Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index. Environmental Pollution*, 33(1): 566-573.
- Whitechurch, H., Omrani, J., Agard, P, Humbert, F., Montigny, R., Jolivet, L (2013) *Evidence for Paleocene–Eocene evolution of the foot of the Eurasian margin (Kermanshah ophiolite, SW Iran) from back–Arc to arc: implications for regional geodynamics and obduction. Lithos*, 182: 11-32.
- Zarei Sahamieh, R., Moradpour, A (2015) *Geochemistry and petrology of Harsin–Sahneh ophiolitic complex (NE of Kermanshah–west of Iran) an evidence of Southern Neo-Tethys Ocean tectonic. Arabian Journal of Geosciences*, 8: 8347-8360.
- Martin, J. A., Arias, M. L., Grau, C, J. M (2006) *Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geo-statistical methods to study spatial variations. Environmental Pollution*, 144 (3): 1001-1012.
- Mohammad, A., Bhuiyana Lutfar, H., Parvezb, M. A. Islamc, A., Samuel, B., Dampare and Shigeyuki, S (2010) *Heavy metal pollution of coal mine-affected agricultural soils in thenorthern part of Bangladesh. Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3): 384-392.
- Moradpour, A., Zarei Sahamieh, R., Ahmadi Khalaji, A., Sarikhani, R (2017) *Textural records and geochemistry of the Kermanshah mantle peridotites (Iran): implications for the tectonic evolution of southern Neo-Tethys. Journal of Geosciences*, 62: 165-186.
- Moradpour, A., Zarei Sahamieh, R., Ahmadi Khalaji, A., Sarikhani, R (2019) *Environmental pollution and Pattern formation of the Harsin–Sahneh ophiolitic complex (NE Kermanshah–west of Iran). Indian Journal of Geo Marine Sciences*, 48(2): 193-204.
- Muller, G (1969) *Index of Geo-accumulation in sediments of the Rhine River. Geojournal*, 2(3): 108-118.
- Punturo, R., Ricchiuti, C., Bloise, A (2019) *Assessment of Serpentine Group Minerals in Soils: A Case Study from the Village of San Severino Lucano (Basilicata, Southern Italy). Fibers*, 7(2): 18.
- Rafiei, B., Hoseinpanahi, F., Shakiba Azad, A., & Sadeghi Far, M (2014) *Distribution and origin of heavy metals (Ni, Co, Mn, Ti, V) in bed sediments of the Zarivar Lake. Applied Sedimentology*, 2(3): 1-11.
- Ricou, L. E., Braud, J., Brunn, J. H (1977) *Le Zagros. Livre à la Mémoire de Albert F. de Lapparent. Soc, Géologique de France, Mémoire hors-série*, 8: 33-52.
- Rodriguez Martin, J. A., Arias, M. L. and Grau Corbi, J. M (2006) *Heavy metals contents in agricultural topsoils in the Ebro basin (Spain). Application of the multivariate geo-statistical methods to study spatial variations, Environmental Pollution*, 144(3): 1001-1012.
- Saccani, E., Allahyari, K., Beccaluva, L., Bianchini, G (2013) *Geochemistry and petrology of the Kermanshah ophiolites (Iran): implication for the interaction between passive rifting, oceanic accretion, and OIB-type components in the Southern Neo-Tethys Ocean. Gondwana Research*, 24: 392-412.
- Shahidi, M., Nazari, H (1997) *Geological map of Harsin, 1/100.000 scale. Tehran, Geological Survey of Iran.*