

ارزیابی ژئوشیمیایی و زیست محیطی فلزات سنگین در خاک‌های حاصل از شیب‌های گرگان

مجتبی گراوند^۱، حبیب‌الله قاسمی^۲، ناصر حافظی مقدس^۲

^۱ کارشناس ارشد زمین‌شناسی زیست محیطی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۲ دانشیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۵/۱۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۰۴/۱۷

چکیده

در این مقاله، نقش مجموعه دگرگونی گرگان به عنوان منبع زمین‌زادی فلزات سنگین، در خاک‌های نواحی جنوبی گرگان و کردکوی، مورد بررسی قرار گرفته است. به همین دلیل، برخی از پارامترهای مهم شیمیایی خاک از قبیل EC، pH و CEC، و همچنین غلظت فلزات سنگین در ۱۴ نمونه خاک و ۶ نمونه سنگ بررسی و تفسیر شده است. برای این هدف، ضریب غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی، ضریب آلودگی و درجه آلودگی خاک به عناصر Fe، V، Pb، Mo، Mn، Cu، Cr، Co، Cd، As، مورد مطالعه قرار گرفته است. از روش‌های آماری چندمتغیره، شامل همبستگی پیرسون، آنالیز خوشه‌ای و تحلیل مؤلفه اصلی برای بررسی همبستگی‌ها و روابط پارائزی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقدار میانگین آهن (۸۰۵۰۳ پی‌پی‌ام) بالاتر از حد بیشینه مجاز (پی‌پی‌ام ۷۰۰۰۰) و نزدیک به حد آستانه (پی‌پی‌ام ۱۰۰۰۰۰) است. همچنین، مقدار میانگین وانادیم (۱۶۵ پی‌پی‌ام) نیز بالاتر از حد بیشینه مجاز (۱۵۰ پی‌پی‌ام) ولی بسیار کمتر از حد آستانه (۴۵۰ پی‌پی‌ام) می‌باشد. مقادیر میانگین کروم، نیکل، کبالت و مس در حد مقادیر زمینه و مقادیر سرب، آرسنیک، مولیبدن و کادمیم، کمتر از مقادیر زمینه هستند. محاسبه ضریب غنی‌شدگی نشان می‌دهد که آرسنیک و آهن در خاک این مناطق از غنی‌شدگی متوسط برخوردارند. آهن با شاخص زمین‌انباشتگی ۰/۱۴، غیرآلاینده تا اندکی آلاینده به‌شمار می‌رود. افزون بر این، ضرایب آلودگی آهن، وانادیم و کبالت در حد پایین بوده و در مجموع، خاک این مناطق از نظر کیفیت زیست محیطی در گروه مناطق فاقد آلودگی یا با آلودگی بسیار ضعیف، طبقه‌بندی می‌شود. نتایج حاصل از تحلیل‌های آماری داده‌های فلزات سنگین نشان می‌دهند که غلظت این عناصر در خاک‌های مشتق از شیب‌های پلیتی به‌ویژه در دره توسکستان در حد کمترین میزان و در خاک‌های مشتق از سنگ‌های با ترکیب بازیگ نظیر دره ناهارخوران، در حد بیشترین میزان است. این نتایج، بیانگر منشأ طبیعی زمین‌زادی فلزات سنگین و نقش ترکیب شیمیایی سنگ‌های مجموعه دگرگونی گرگان در ورود آنها به خاک‌های منطقه است.

کلیدواژه‌ها: ارزیابی، ژئوشیمیایی، زیست محیطی، فلزات سنگین، خاک، شیب‌های گرگان.

نویسنده مسئول: حبیب‌الله قاسمی

E-mail: h-ghasemi@shahroodut.ac.ir

۱- مقدمه

به مخاطره افتادن سلامتی آنها شوند. نقش مواد والد مختلف در تمرکز طبیعی فلزات سنگین در خاک و آب، در بسیاری از مطالعات مورد توجه قرار گرفته است (مثلاً، Hernandez et al., 2003; Tijani et al., 2006; Doelsch et al., 2006; Upadhyay et al., 2006; Jordan et al., 2007). اثرات زیست محیطی زیان‌بار این فلزات، آنها را به یکی از مباحث اصلی مورد بررسی در تحقیقات زیست محیطی تبدیل کرده است (Kabata - Pendias and Mukherjee, 2007).

۲- زمین‌شناسی ناحیه مورد مطالعه

مجموعه دگرگونی (شیب‌های) گرگان به عنوان یکی از واحدهای مهم زمین‌شناسی ایران، عمدتاً از سنگ‌های کم‌دگرگون شده‌ای مانند اسلیت، فیلیت، کالک‌شیست، کلریت‌شیست، شیست سبز و میکاشیست، به همراه سنگ‌های آتشفشانی و آذرآواری اسیدی دگرگونه (ریولیت‌ها، ایگنیمیریت‌ها و توف‌های اسیدی دگرگون شده) تشکیل گردیده و توده‌های گابرویدیوریتی نیز به درون آنها نفوذ نموده‌اند (شکل ۱). این مجموعه، تحت تأثیر یک فاز دگرگونی ناحیه‌ای در حد رخساره شیست سبز زیرین و حداقل دو فاز دگرشکلی قرار گرفته است. دست کم یکی از این دگرشکلی‌ها ناشی از عملکرد پهنه‌های برشی بوده و با میلوئیتی شدن سنگ‌ها همراه بوده است. این مجموعه در نواری به طول ۱۱۰ و عرض ۱۰-۲ کیلومتر، از علمدار محله در ۸ کیلومتری خاور بهشهر در باختر، تا زرین گل در ۹ کیلومتری جنوب خاور علی‌آباد در خاور، سنگ‌های رسوبی ارتفاعات شمال البرز را از رسوبات جلگه گرگان و فرورفتگی خاور دریای خزر جدا می‌کند (رحیمی، ۱۳۸۱). در گذشته، بیشتر محققان سن این مجموعه را پرکامبرین در نظر گرفته‌اند، اما به تازگی براساس پالئومورف‌های یافت شده در آن، سن اردوویسین پسین به آن نسبت داده شده است (Ghavidel- Syooki, 2008). نظر به این که بخش مهمی از سنگ

آلودگی را می‌توان به صورت تغییرات ناخوشایند فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی آب، خاک و هوا تعریف کرد که بر زندگی بشر، گیاهان و جانوران مرتبط با آنها، فرایندهای صنعتی و سرمایه‌های فرهنگی اثرگذار است. منابع آلودگی، اساساً به دو گروه طبیعی زمین‌زاد و بشرزاد تقسیم‌بندی می‌شوند. نوع طبیعی شامل آلودگی‌های ناشی از سازندهای زمین‌شناسی، معادن، چشمه‌های معدنی، منابع آب‌های شور و لب‌شور بوده و انواع بشرزادی، ناشی از فعالیت‌های بشر از قبیل فعالیت‌های صنعتی، حمل و نقل، کاربرد کودها، حشره‌کش‌ها و آفت‌کش‌های کشاورزی، فعالیت‌های معدن‌کاری و غیره می‌باشند (Misra et al., 2009). فلزات سنگین، از مهم‌ترین آلاینده‌های زیست محیطی به‌شمار می‌روند. منشأ عمده ورود این فلزات به محیط زیست (بیش از ۸۰ درصد)، از طریق هوازدگی و فرسایش مواد پوسته‌ای و یا از طریق فعالیت‌های آتشفشانی است. به نظر (Adriano 2001)، فلزات سنگین به استثنای آرسنیک، بور و سلنیم به تعدادی از فلزات و یون‌های آنها اطلاق می‌شود که غالباً چگالی بالاتر از 6 g/cm^3 دارند. تمرکز این عناصر معمولاً در حد مقادیر زمینه ژئوشیمیایی بی‌خطر است اما وقتی که به حد مقادیر ناهنجار و بالاترین میزان مجاز می‌رسند، باید مورد توجه و مطالعه قرار گیرند و اگر به حد آستانه برسند باید محیط را از آنها پاک‌سازی نمود. در این موارد، مقدار زمینه به عنوان معیار پاکسازی موردنظر است (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). حضور فلزات سنگین در محیط زیست، بسیار مشکل‌ساز است. این امر، به پایداری طولانی مدت آنها بر می‌گردد، زیرا این فلزات برخلاف سایر آلاینده‌های آلی، از طریق شیمیایی یا فرایندهای زیستی، در طبیعت قابل تجزیه نیستند و در نتیجه، پس از ورود به بدن موجودات زنده، در بافت‌های آنها ذخیره شده و می‌توانند در طول زنجیره غذایی، در اعضای بالاتر زنجیره به مقادیر بسیار بیشتری تجمع یابند. به علاوه، آنها می‌توانند جایگزین املاح و مواد معدنی موردنیاز بدن جانداران شده و از این طریق، موجب

آنها دارند. تحلیل‌های آماری یاد شده با استفاده از بسته نرم‌افزاری SPSS.18 محاسبه و نقشه‌های لازم نیز با استفاده از نرم افزار Arc GIS, 9.3 تهیه شدند.

۴- سنگ‌شناسی

سنگ مادر شیب‌های گرگان را سنگ‌های آذرین و رسوبی به سن اردوویسین بالایی تشکیل داده‌اند که همگی در رخدادهای زمین‌شناسی بعدی در حد رخساره‌شیب‌سبز زیرین دگرگون شده‌اند. بخش آذرین این شیب‌ها عمدتاً از لایه‌های نازک گدازه بازالتی تشکیل شده که در نمونه دستی حالت تیره رنگ دارند. این سنگ‌ها دارای بافت‌های جریان، حفره‌دار، بادامکی، پورفیری و گلومروپورفیری هستند. زمینه این سنگ‌ها از شیشه و میکروولیت‌های ریز پلاژیوکلاز تشکیل شده و کلینوپروکسن‌های خودشکل‌کلریتی شده و گاهی پلاژیوکلازها، درشت بلورهای آنها را تشکیل می‌دهند (شکل ۲-الف). کانی‌های تیره (اپک) این سنگ‌ها نیز بیشتر شامل منیتیت، همتایت، پیریت و کالکوپیریت هستند. کانی‌های آهن و منیزیم‌دار اصلی (کلینوپروکسن و گاهی الیوین) و کانی‌های فرعی تیره، میزبان اصلی و جنبی عناصر آهن، گوگرد، مس، کروم، کبالت، وانادیم و آرسنیک هستند. سنگ‌های آذرین نفوذی تا نیمه‌نفوذی به شکل توده‌های کوچک گابرویی-دیابازی به درون این شیب‌ها نفوذ کرده و به همراه آنها دگرگون شده‌اند. در دره ناهارخوران بهترین رخنمون این توده‌ها دیده می‌شود. در منطقه رادکان افزون بر گابرو، حجم کمی گابروپوریت و تراکیت نیز مشاهده می‌شود که در نمونه دستی به رنگ‌های سبز، خاکستری و قهوه‌ای دیده می‌شوند. بافت چیره در این سنگ‌ها از نوع دانه‌ای، اینترگرانولار، افیتیک و ساب افیتیک است (شکل ۲-ب). پلاژیوکلاز و کلینوپروکسن، کانی‌های اصلی موجود در این سنگ‌ها هستند که در جریان دگرگونی برگشتی به شدت تحت تأثیر دگرسانی‌های کلریتی، آلپیتی و سریستی قرار گرفته‌اند. بر اثر این دگرسانی‌ها، در سنگ اسفن ثانویه تشکیل شده که نشان می‌دهد کلینوپروکسن‌ها از جنس تیتان‌اوزیت هستند. افزون بر این، پلاژیوکلازها نیز در جریان این دگرگونی برگشتی به مجموعه کانی‌های آلپیت، اپیدوت، کلریت، زوئزیت و کلینوزوئزیت تبدیل شده‌اند که نشان دهنده رخساره شیب‌سبز زیرین است. در بعضی مناطق به‌ویژه در جاده توسکستان، این گدازه‌ها بر اثر فعالیت‌های برشی به میلوئیت تبدیل شده‌اند. کانی‌های تیره این سنگ‌ها نیز بیشتر شامل منیتیت، پیریت و کالکوپیریت هستند. بخش رسوبی شیب‌ها نیز شامل لایه‌های ماسه‌سنگی، سیلتستونی، گل‌سنگی، آهکی و مارنی بوده که در جریان دگرگونی به معادل‌های دگرگونه درجه پایین خود شامل اسلیت‌های خاکستری تیره با بافت دانه‌ریز اسلیتی (شکل ۲-پ)، مسکوویت-کلریت‌شیب‌های متورق براق و سبز رنگ با جلای صابونی و بافت شیبی جهت‌دار (شکل ۲-ت) کوارتزیت‌های سفید با بافت گرانوبلاستی و خمیره کربناته (شکل ۲-ث)، فیلیت‌های خاکستری متورق، متاکربنات‌ها و کالک‌شیب‌های خاکستری روشن و گاهی سفیدرنگ با بافت گرانوفلسی (شکل ۲-ج) تبدیل شده‌اند. در نمونه‌های دستی اسلیت‌ها و فیلیت‌ها، می‌توان بلورهای مکعبی پیریت هماتیتی شده را با چشم غیرمسلح مشاهده نمود. بررسی پتروگرافی سنگ‌های مجموعه دگرگونی گرگان حاکی از نقش مهم و مستقیم ترکیب کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی این مجموعه در ترکیب خاک‌های حاصل از آنهاست.

۵- بحث

۵-۱. بررسی مقادیر پارامترهای شیمیایی خاک

مقادیر پارامترهای ژئوشیمیایی نمونه‌های خاک منطقه، شامل pH، EC و CEC توسط روش‌های ذکر شده در بخش پیشین تعیین و در جدول ۲ ارائه شده‌اند. براساس مقادیر هدایت الکتریکی (EC) نمونه‌ها، خاک‌های منطقه در رده خاک‌های خنثی تا کمی قلیایی و غیرشور طبقه‌بندی ۹ گانه انجمن علوم خاک آمریکا (۱۹۸۷) (نقل

والد این مجموعه دگرگونی را سنگ‌های آذرین بازیک (بازالتی-گابرویی) تشکیل می‌دهند، از این رو، عناصر کمیاب به‌ویژه فلزات سنگین در آن حضور دارند. افزون بر این، بخش دیگری از سنگ والد این مجموعه از مواد ریزدانه‌ای (اسلیت، فیلیت و شیبست) تشکیل شده است که توانایی بالایی برای جذب فلزات سنگین دارند. نظر به تحرک متفاوت این عناصر در خلال فرایندهای هوازدگی و تشکیل خاک، امکان حضور این فلزات سنگین در خاک‌های حاصل از این مجموعه و پتانسیل نسبتاً بالای آلاینده‌گی زمین‌زادی آنها وجود دارد. با توجه به فراهم بودن بسیاری از عوامل اقلیمی و زمین‌شناسی تشکیل خاک در منطقه، از جمله فراوانی بارش‌های جوی، رطوبت نسبی بالا، گسترش وسیع سیستم درزه، شکستگی و گسل‌ها در نتیجه تکتونیزه بودن منطقه، وضعیت توپوگرافی، پوشش گیاهی مناسب، رخنمون‌های فراوان سنگ بستر، و حساسیت بالای آنها به هوازدگی و غیره، خاک‌های منطقه از پتانسیل بالایی برای داشتن آلاینده‌های فلزی طبیعی برخوردار هستند (گراوند، ۱۳۸۹). اگرچه، این عناصر اساساً از سنگ والد به خاک وارد می‌شوند اما توزیع آنها در داخل نیمرخ و سازندگان مختلف خاک، منعکس‌کننده فرایندهای گوناگون خاک‌زایی و همچنین، عملکرد عوامل خارجی نظیر فعالیت‌های کشاورزی و آلودگی‌های بشرزادی است (Kabata-Pendias and Pendias, 2001).

۳- شرح روش‌ها (نمونه‌گیری و تجزیه شیمیایی نمونه‌ها)

هدف از این مطالعه، بررسی وضعیت آلودگی طبیعی خاک‌های موجود در محدوده گسترش شیب‌های گرگان به فلزات سنگین است. به همین منظور، ۱۸ نمونه از سنگ‌های مختلف این مجموعه جهت انجام مطالعات سنگ‌نگاری و ۶ نمونه از آنها برای انجام تجزیه فلزات سنگین انتخاب شد. افزون بر این، ۱۴ نمونه از خاک برجای حاصل از این سنگ‌ها (از ژرفای ۴۰-۲۰ سانتی‌متری) نیز برای تجزیه فلزات سنگین برداشت گردید. با توجه به پوشش انبوه جنگلی منطقه، نمونه‌برداری به صورت انتخابی و از محل بیرون‌زدگی رخنمون شیب‌ها و خاک‌های برجای حاصل از آنها صورت گرفت (شکل ۱). نمونه‌های خاک برداشت شده در دمای آزمایشگاه خشک گردید و پس از خرد کردن کلوخه‌ها و عبور دادن آنها از الک ۱۰امش (۲ mm) توسط هاون آگاتی تا حد ۲۰۰ مش ($63 \mu m$) پودر شدند. نمونه‌های سنگی نیز پس از خردایش توسط سنگ‌شکن فکی (تا حد ۲ میلی‌متر)، به منظور پرهیز از ایجاد آلودگی آهن، توسط هاون آگاتی تا حد $63 \mu m$ پودر شدند (Galan et al., 2008). به‌منظور اندازه‌گیری غلظت فلزات سنگین موجود در نمونه‌های خاک و سنگ (As, Cd, Co, Cr, Cu, Mn, Mo, Pb, V, Fe)، نمونه‌ها به آزمایشگاه ژئوشیمی دانشگاه تربیت مدرس تهران ارسال و در آنجا توسط دستگاه اسپکتروفتومتر جذب اتمی (Atomic absorption spectrophotometry) مورد تجزیه قرار گرفتند. در جدول ۱، نتایج تجزیه ۱۴ نمونه خاک به همراه مقادیر میانگین، تغییرات، انحراف معیار و ضریب تغییرات آنها و تجزیه ۶ نمونه سنگ آمده است.

pH نمونه‌های خاک با استفاده از روش استاندارد EPA SW-846 Method 9045 اندازه‌گیری شد و EC آنها نیز از طریق عصاره‌گیری نسبت ۱ به ۵ خاک به آب تعیین گردید. از روش پیشنهادی (Chapman (1965) (نقل از غازان شاهی، ۱۳۸۵) برای اندازه‌گیری میزان CEC نمونه‌های خاک استفاده شد. به منظور تعیین میزان غنی‌شدگی و همچنین ارزیابی درجه آلودگی و کیفیت زیست‌محیطی خاک منطقه، پارامترهای مختلف ژئوشیمیایی خاک همچون ضریب غنی‌شدگی، شاخص زمین‌انباشتگی، ضریب آلودگی و درجه آلودگی اصلاح شده، محاسبه شدند. روش‌های آماری دو و چندمتغیره نظیر ضریب همبستگی (Correlation Coefficient)، تحلیل خوشه‌ای (Clustral Analysis) و تحلیل مؤلفه اصلی (Principle Component Analysis)، کاربردهای زیادی در مطالعه داده‌های چندمتغیره به‌ویژه برای تقسیم‌بندی یا طبقه‌بندی مجموعه‌ای از نمونه‌ها، بررسی روابط پاراژنری بین عناصر و تعیین منشأ

خاک برای جذب مس، اکسیدهای آهن و منگنز، مواد آلی، سولفیدها و کربنات‌ها هستند. درحالی که کانی‌های رسی و فسفات‌ها اهمیت کمتری دارند (Jenne, 1968)، بنابراین، می‌توان رابطه مثبت مس و کبالت ($r = 0.654, p < 0.05$) را به رفتار مشابه این دو عنصر نسبت داد، هرچند که در برخی مطالعات وجود منشأ مشترک را برای این عناصر محتمل دانسته‌اند (Hernandez et al., 2003).

۴-۳-۵. بررسی ضریب غنی‌شدگی (EF) عناصر

بر اساس این ضریب، می‌توان مقدار یک عنصر را نسبت به مقدار طبیعی آن سنجید و برای ارزیابی غنی‌شدگی یک محیط توسط محیطی دیگر مورد استفاده قرار داد (Loska et al., 1995). محاسبه این ضریب، روشی مناسب جهت تعیین منشأ طبیعی و بشرزاد آلودگی است (Adamo et al., 2005). این ضریب از رابطه (۱) محاسبه می‌شود (Loska et al., 1995):

$$EF = \frac{\frac{C_{1Me} + n}{C_{1n}}}{\frac{C_{2Me} + n}{C_{2n}}} \quad (1)$$

در این رابطه، (EF)، ضریب غنی‌شدگی، (C_{1Me}^{+n})، غلظت فلز در محیط مورد بررسی (خاک)، (C_{1n})، غلظت فلز مینا (Al) در محیط مورد بررسی، (C_{2Me}^{+n}) غلظت همان فلز در یک محیط مینا (پوسته زمین)، (C_{2n})، غلظت فلز مینا (Al) در محیط مینا است. میانگین Al به عنوان فلز مینا در پوسته زمین برابر با ۸۲۰۰۰ ppm (یا ۸/۲ درصد) در نظر گرفته می‌شود (Bowen, 1979).

ضریب غنی‌شدگی برای نمونه‌های خاک منطقه محاسبه و مقادیر فاکتور غنی‌شدگی میانگین عناصر مورد بررسی (جدول ۴)، به صورت نمودار در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. مقادیر ضریب غنی‌شدگی برای کادمیم، کبالت، مس، نیکل، سرب، کروم، مولیبدن، وانادیم، آهن، و آرسنیک به ترتیب برابر با ۱/۹۹، ۱/۶۵، ۱/۰۴، ۱/۱۲، ۱/۱۲، ۱/۰۴، ۱/۵۴، ۱/۹۵، ۳/۱۲، ۵/۴۳ است (شکل ۳). بر اساس طبقه‌بندی (Chen et al., 2007) (جدول ۴) در خاک‌های منطقه، مولیبدن بدون غنی‌شدگی، آرسنیک و آهن غنی‌شدگی متوسط و سایر عناصر مورد بررسی، غنی‌شدگی اندک نشان می‌دهند. همچنین با توجه به این که مقادیر فاکتور غنی‌شدگی خاک‌های منطقه کمتر از ۱۰ می‌باشد، طبیعی بودن (زمین‌زادی) منشأ این عناصر مورد تأیید قرار می‌گیرد (Rey et al., 2009).

۴-۴-۵. استفاده از آنالیز خوشه‌ای (CA) برای تعیین وابستگی عناصر

آنالیز خوشه‌ای (Cluster Analysis)، در حقیقت یک فرایند طبقه‌بندی غیرکنترلی است که مواد مورد بررسی را برحسب میزان شباهت یا تفاوت آنها، خوشه‌بندی می‌کند. با توجه به دندروگرام حاصل (شکل ۴)، می‌توان دو خوشه اصلی را در نمونه‌ها تشخیص داد. خوشه نخست، شامل نیکل، کروم، کبالت، مس، وانادیم و آهن بوده و خوشه دوم متشکل از کادمیم، آرسنیک، مولیبدن و سرب است. خوشه یا گروه نخست را بر حسب اختلاف درجه وابستگی فلزات می‌توان به سه زیرخوشه تقسیم‌بندی کرد: الف) نیکل - کروم، ب) کبالت - مس، ج) وانادیم - آهن. وابستگی هر سه زیرخوشه گویای رفتار مشابه آنها در خاک ناحیه مورد مطالعه است. البته، وابستگی نیکل و کروم خیلی بیشتر و متفاوت از وابستگی سایر فلزات می‌باشد. در گروه دوم نیز می‌توان دو زیر خوشه تعیین نمود: در زیر شاخه الف) کادمیم - آرسنیک - مولیبدن، و در زیر شاخه ب) سرب، جای می‌گیرد. در این میان، کادمیم و آرسنیک، بیشترین وابستگی را با همدیگر داشته و در سطوح پایین‌تر با مولیبدن و سرب وابسته هستند (Moller et al., 2005). براساس این آنالیز خوشه‌ای، وجود حداقل دو منبع زمین‌زادی متفاوت برای ورود این عناصر به خاک پیشنهاد می‌گردد. این دو منبع شامل سنگ‌های با ماهیت بازیک (گابروها و بازالت‌ها) به عنوان منشأ عناصر Fe, Ni, Cr, Co, Cu, V و سنگ‌های با ماهیت اسیدی (ریولیت‌ها، ائگنیمیریت‌ها و توف‌های اسیدی دگرگون شده) و همچنین رسوبات پلیتی دگرگونه (اسلیت‌ها و فیلیت‌ها) به عنوان منشأ عناصر Pb, Cd, Mo, As هستند.

از غازان شاهی، ۱۳۸۵) قرار می‌گیرند. این پارامتر، تحت تأثیر غلظت کاتیون‌هایی همچون Mg, Ca, K و Na است که با انحلال و شستشو از سنگ بستر و ورود به خاک، سبب بالا رفتن EC خاک می‌شوند. همچنین با توجه به مقادیر CEC خاک‌های منطقه و بر اساس رده‌بندی (Miller & Donahue, 1990) می‌توان گفت که این خاک‌ها قطعاً فاقد کلویدهای با CEC بالا مثل هوموس هستند و مقادیر فعلی CEC نمونه‌ها در ارتباط با کلویدهایی همچون هیدروکسیدهای آهن، آلومینیم، منگنز و یا کاتولن موجود در بخش رسی خاک است. براساس نظر (Kabata-Pendias and Pendias, 2001) پارامترهای اصلی حاکم بر جذب و واجذب عناصر نادر در خاک را می‌توان شامل مقادیر pH و Eh، کسر رسی خاک (ذرات کوچک‌تر از دو میکرون)، مواد آلی، اکسیدها و هیدرواکسیدهای آهن، منگنز و آلومینیم و ریزجانداران دانست. این متغیرها، مقادیر و رفتار عناصر نادر را در خاک کنترل می‌کنند.

۴-۵-۲. بررسی روابط همبستگی پارامترهای شیمیایی خاک با عناصر مورد نظر

پس از اطمینان از نرمال بودن توزیع داده‌ها و بررسی مقادیر خارج از رده، برای تعیین ضرایب همبستگی (r) پیرسون داده‌ها از نرم‌افزار آماری SPSS 18 استفاده شد (Acosta et al., 2009). مقادیر ضریب همبستگی (r) در جدول ۳ آمده است. برخلاف انتظار، پارامترهای EC، pH و CEC (به جز در چند مورد CEC)، هیچ گونه همبستگی آشکاری با فلزات مورد بررسی نشان ندادند. این موضوع می‌تواند ناشی از تغییرات کم این پارامترها در ناحیه مورد مطالعه باشد (Qishlaqi et al., 2009). براساس داده‌های جدول ۳، آرسنیک با کادمیم، رابطه معنی‌دار مثبت ($r = 0.626, p < 0.05$) و با وانادیوم ($r = -0.641, p < 0.05$) و آهن ($r = -0.541, p < 0.05$)، رابطه معنی‌دار منفی نشان می‌دهد. رابطه مثبت آرسنیک و کادمیم وجود یک منشأ مشترک را برای این دو عنصر پیشنهاد می‌کند (Qishlaqi et al., 2009). با توجه به قلیایی بودن خاک‌های منطقه ($pH = 7-8$) و انتظار وجود همبستگی مثبت میان آرسنیک، کلسیم و منگنز، رابطه منفی آهن با آرسنیک را می‌توان به نقش بیشتر عناصر مذکور در جذب آرسنیک، ارتباط داد. افزون بر این، رابطه منفی آرسنیک با وانادیم را می‌توان به شباهت رفتار ژئوشیمیایی وانادیم با آهن نسبت داد. در این مطالعه، سرب با هیچ یک از عناصر و پارامترهای خاک رابطه معنی‌داری نشان نداد. آهن از نظر شیمیایی بسیار فعال است و رفتار شیمیایی آن مشابه دیگر فلزات به‌ویژه کبالت می‌باشد (Kabata - Pendias and Mukherjee, 2007). این امر، دلیلی بر همبستگی مثبت آهن با کبالت ($r = 0.589, p < 0.05$) است. چون، ظرفیت کل تبادل کاتیونی خاک، برابر با مجموع ظرفیت تبادل کاتیونی کلویدهای آلی و معدنی آن است و از آن‌جا که مقادیر CEC خاک این منطقه، نشان از حضور بیشتر کلویدهای غیرآلی همچون هیدروکسیدهای آهن، منگنز، آلومینیم و کانی‌های رسی دارد، بنابراین رابطه معنی‌دار مثبت آهن و CEC ($r = 0.753, p < 0.01$)، بدیهی است. حضور وانادیم در خاک، عمدتاً در ارتباط با اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و مقدار مواد آلی خاک (SOM) است (Kabata - Pendias and Sadurski, 2004)، بنابراین، همچنان که در این مطالعه مشاهده شد، همبستگی معنی‌دار مثبت وانادیم و آهن ($p < 0.05$)، $r = 0.627$ و وانادیم با CEC خاک ($r = 0.568, p < 0.05$) امری قابل پیش‌بینی است. همبستگی بالای مولیبدن و CEC ($r = 0.843, p < 0.01$) را می‌توان متأثر از ظرفیت جذبی خاک، به‌ویژه حضور کلویدهای غیرآلی همچون هیدروکسیدهای آهن، منگنز، آلومینیم و کانی‌های رسی با CEC دانست، به طوری که در بین عوامل کنترل‌کننده غلظت مولیبدن در خاک، بیشترین سهم را به خود اختصاص داده‌اند. کروم و نیکل به شدت با هم وابستگی دارند ($r = 0.822, p < 0.01$) که دلیلی بر وجود منشأ مشترک این دو عنصر است (Qeshlaqi et al., 2009; Dragovic et al., 2008). از سوی دیگر، نیکل با وانادیم نیز رابطه مثبت نشان می‌دهد ($r = 0.668, p < 0.01$) که این موضوع می‌تواند بر وجود منشأ یکسان آنها دلالت داشته باشد. مهم‌ترین اجزای

۵-۵. استفاده از تحلیل مؤلفه اصلی (PCA) برای تعیین وابستگی عناصر

فرض اساسی در روش تحلیل مؤلفه اصلی (Principal Component Analysis) وجود ارتباط بین متغیرهاست. این ارتباط در قالب یک فاکتور، در یک مدل فرضی ظاهر می‌شود. به طور کلی، هدف از این روش آماری چند متغیره، تعیین متغیرهای کنترل‌کننده اصلی در بین یک سری داده‌ها، یا به عبارت دیگر، یافتن حداقل تعداد متغیرهایی است که بیشترین تغییرات مشاهده شده را در بین سری داده‌ها نشان می‌دهند (یوسفی و کاکایی، ۱۳۸۵). همان‌طور که در جدول ۵ و شکل ۵ مشاهده می‌شود، تحلیل مؤلفه اصلی، یک مدل سه مؤلفه‌ای را برای داده‌ها پیشنهاد می‌کند. ویژگی‌هایی مانند شعاع و بار یونی، میزان تحرک، میزان ارتباط رفتاری عناصر با اجزای خاک (مواد آلی و کانی‌های رسی) وجود منابع مشترک و غیره، از جمله مواردی هستند که باعث توزیع عناصر در مؤلفه‌های مختلف می‌شوند.

در مؤلفه نخست، عناصر کادمیم، آرسنیک و مولیبدن، در مؤلفه دوم، عناصر کبالت، مس و آهن و در مؤلفه سوم، عناصر وانادیم، نیکل و کروم به هم‌دیگر وابسته‌اند (شکل ۵). سرب، اگرچه یک گروه مجزا را تشکیل داده، اما بیشتر با مؤلفه نخست (کادمیم، آرسنیک و مولیبدن) وابستگی نشان می‌دهد. این نتیجه‌گیری با نتایج حاصل از آنالیز خوشه‌ای (شکل ۴) نیز سازگار است. بر اساس آنالیزهای آماری انجام گرفته، می‌توان گفت که کادمیم-آرسنیک-مولیبدن و سرب منبع یکسانی دارند (سنگ‌های آذرین اسیدی و رسوبات پلیتی دگرگون شده). این مطلب در مورد کبالت-مس و آهن و همچنین کروم و نیکل نیز صادق است (سنگ‌های آذرین بازیک). با توجه به برجا بودن خاک نمونه‌های برداشتی، این گوناگونی مؤلفه‌ها و خوشه‌بندی‌ها به نوبه خود بیانگر تفاوت در سنگ‌شناسی مجموعه دگرگونی گرگان است. این ترکیب سنگ‌شناسی گوناگون شامل سنگ‌های بازیک (بازالت-گابرو)، اسیدی (ریولیت‌ها، ایگنیمیریت‌ها و توف‌های اسیدی)، شیل‌ها و ماسه‌سنگ‌ها و به میزان اندک، سنگ‌های کربناتی دگرگونه است. شکل ۶، نقشه‌های توزیع مکانی امتیاز فاکتوری هر سه مؤلفه اصلی (جدول ۵ و شکل ۵) بر روی نقشه گسترش شیب‌های گرگان را که توسط نرم افزار Arc GIS 9.3 و به روش درون‌یابی وزنی معکوس (Acosta et al., 2009) تهیه شده‌اند، به نمایش می‌گذارد. این شکل نیز اگرچه در مجموع، گروه‌بندی عناصر در مؤلفه‌های مزبور را به پیروی از ترکیب سنگ‌شناسی نشان می‌دهد، اما برای بررسی دقیق‌تر باید اولاً نمونه‌برداری گسترده‌تر باشد و ثانیاً نقشه بسیار دقیق و با جزئیات بیشتری از شیب‌های گرگان تهیه نمود.

۵-۶. ارزیابی ژئوشیمیایی و زیست‌محیطی آلودگی فلزات سنگین در خاک‌های منطقه

برای تعیین میزان آلودگی خاک به فلزات سنگین، باید میزان غلظت عناصر در منطقه مورد نظر با استاندارد ملی یا بین‌المللی شناخته شده، مقایسه شود. در کشور ما، به دلیل عدم وجود استاندارد خاص برای درجه آلودگی خاک، از استانداردهای موجود در دیگر کشورها و یا استانداردهای جهانی استفاده می‌شود. جدول ۶، میزان میانگین غلظت‌های عناصر مورد بررسی در ناحیه مورد مطالعه، شاخص کلی (Kelly, 1980)، مقادیر زمینه، حد بیشینه مجاز و حد آستانه خاک (Beyer, 1990) مقادیر به ppm می‌باشند). براساس مقادیر این جدول، مقدار میانگین آهن (۸۰۵۰۳) بالاتر از حد بیشینه مجاز (۷۰۰۰۰) و نزدیک به حد آستانه (۱۰۰۰۰۰) است. همچنین براساس جدول ۱، اگرچه آهن دارای بالاترین میزان تغییرات و انحراف معیار است اما ضریب تغییرات آن که معیار مناسب‌تری برای بیان تغییرپذیری است، پایین می‌باشد (۲۳/۵۵ درصد). مقدار میانگین وانادیم (۱۶۵) نیز بالاتر از حد بیشینه مجاز (۱۵۰) ولی بسیار کمتر از حد آستانه (۴۵۰) است. ضریب تغییرات این عنصر از آهن بالاتر است (۳۱/۴۱ درصد). اما مقادیر میانگین کروم (۶۵/۳۱) با ضریب تغییرات (۵۳/۹۴)، نیکل (۵۶/۵۶) با ضریب تغییرات (۱۵/۶۳)، کبالت (۲۵/۰۶) با ضریب تغییرات (۲۰/۶۴)

و مس (۳۲/۶۲) با ضریب تغییرات (۳۱/۷۶) در حد مقادیر زمینه و مقادیر سرب (۱۶/۰۲) با ضریب تغییرات (۳۹/۵۰)، آرسنیک (۵/۱۲) با ضریب تغییرات (۶۲/۶۸)، مولیبدن (۰/۵۱) با ضریب تغییرات (۶۹/۹۴) و کادمیم (۰/۱۱) با ضریب تغییرات (۳۸/۱۷)، کمتر از مقادیر زمینه می‌باشند.

به غیر از آهن و وانادیم که مقادیر آنها نسبتاً بالاست، غلظت کروم در نقاط KGG92NO, KG136NO, KN6-7-8, KN4-5, KGG92NO, KR2 و نیکل در نقاط KGG19NO, KB2, KN6-7-8, KN4-5, KG136NO, KR2 و کبالت در نقاط KGG90NO, KSH, KB2, KN6-7-8, KN4-5, KGG92NO, KGG90NO, KSH, KB2 و مس در نقاط KR2 و KCH1, KN6-7-8, KN4-5, KGG90NO, KSH, KB2 بالاتر از مقادیر زمینه هستند ولی غلظت‌های سرب، آرسنیک، مولیبدن و کادمیم حتی به حد زمینه نیز نمی‌رسند (جدول ۱ و ۶). مقایسه میانگین نتایج تجزیه فلزات سنگین با شاخص کلی نیز، نمایانگر وجود اندکی آلودگی برای وانادیم و نیکل در خاک ناحیه مورد مطالعه است. افزون بر این، مقایسه نتایج تجزیه کروم در نقاط مختلف نمونه‌برداری با این شاخص، حاکی از آلودگی اندک این عنصر در نقاط KN4,5, KN6,7,8 است. در دره ناهارخوران و مرتبط با متاگابروها و نقطه KGG92NO در نزدیکی روستای درازنو و مرتبط با همین سنگ‌ها می‌باشد. بقیه عناصر، براساس شاخص کلی فاقد آلودگی هستند.

به طور کلی از اطلاعات فوق می‌توان ماهیت بازیک سنگ‌های والد خاک‌های دارای سطوح بالاتر عناصری همچون آهن، نیکل، وانادیم، کروم و کبالت را استنباط نمود. همچنین مقدار آرسنیک در منطقه را می‌توان به غنی‌شدگی این عنصر و ارتباط آن با سنگ‌های شیبی دانست (مهندسین مشاور معدنکاو، ۱۳۷۹). افزون بر امکان استفاده از چنین استانداردهایی، معیارهای دیگری به شرح ذیل نیز به منظور بررسی درجه آلودگی خاک ارائه شده‌اند که می‌توان بر اساس آنها به وجود یا عدم وجود آلودگی خاک پی برد.

- ارزیابی شاخص زمین‌انباشتی (Igeo)

به منظور تعیین شدت آلودگی، می‌توان از شاخص زمین‌انباشتی که توسط Muller (1969) پیشنهاد شده، استفاده کرد. این شاخص با علامت Igeo نشان داده شده و از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right] \quad \text{رابطه (۲)}$$

در این رابطه، (Igeo)، شاخص زمین‌انباشتی یا شاخص شدت آلودگی، (Log₂)، لگاریتم در پایه دو، (C_n)، غلظت فلز در رسوب یا خاک و (B_n)، غلظت زمینه فلز مورد نظر (میانگین شیل) است. ضریب ۱/۵، به عنوان ضریب تصحیح اثر احتمالی ماتریکس زمینه در رابطه فوق گنجانده شده است. از غلظت متوسط عنصر در شیل به عنوان غلظت زمینه استفاده می‌شود (Goorzadi et al., 2009; Abraham & Parker, 2008). بر اساس این شاخص، Muller (1969) خاک‌ها را از نظر درجه آلودگی به شش گروه تقسیم بندی نموده است (جدول ۷). همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان Igeo، به صورت Mo > As > Cd > Cr > Cu > Pb > Ni > V > Co > Fe کاهش می‌یابد. آهن در ناحیه مورد مطالعه، دارای بالاترین میزان زمین‌انباشتی (۰/۶۶) و میانگین (۰/۱۴) است و طبق تقسیم بندی Muller (1969)، با داشتن درجه آلودگی کمتر از یک، غیرآلوده تا اندکی آلوده می‌باشد، در حالی که وانادیم در سه نقطه KN4,5-KN7,8 و KR2 و کبالت در نقطه KR2 این حالت را دارد و سایر فلزات با داشتن مقادیر زمین‌انباشتی کمتر از صفر و درجه آلودگی صفر، غیر آلوده محسوب می‌شوند (جدول ۸). بنابراین براساس شاخص زمین‌انباشتی (جدول ۸)، خاک منطقه مورد مطالعه از نظر کیفیت زیست‌محیطی، در مجموع غیرآلوده است و صرفاً میزان اندکی آلودگی در ارتباط با آهن و در مواردی مرتبط با وانادیم و کبالت دیده شده

پایین است. کانی‌های اولیه اصلی موجود در خاک که از مواد والد به ارث می‌رسند نیز شامل دو گروه فلسیک (فلسپات‌ها، مسکویت و کوارتز) و مافیک (الیون، پیروکسن، آمفیبول و بیوتیت) هستند. با توجه به توزیع متفاوت این کانی‌ها در سنگ‌والدهای گوناگون و حساسیت متفاوت آنها به هوازدگی، خاک‌های حاصل از هر کدام از سنگ‌والدها، حاوی مقادیر متفاوتی از فلزات سنگین هستند. بر همین اساس، در خاک‌های حاصل از سنگ‌والدهای مافیک (بازالت‌ها و گابروها)، عناصر کروم، نیکل، آهن، وانادیم و کبالت بالاتر است.

جدول ۱۲ مقادیر متوسط برخی از فلزات سنگین را در خاک‌های سطحی برخی از کشورها نشان می‌دهد. براساس داده‌های جدول‌های ۱ و ۱۲، خاک حاصل از شیت‌های گرگان از نظر مقادیر وانادیم، کروم، مولیبدن و تا حدودی مس با خاک انگلستان، از نظر میزان کبالت و آرسنیک با خاک کانادا، از نظر میزان مس با خاک ژاپن، از نظر میزان سرب با خاک لهستان و از نظر کادمیم با خاک همه کشورهای این جدول به غیر از انگلستان و آلمان قابل مقایسه است. اما از نظر مقدار نیکل، خاک حاصل از شیت‌های گرگان به دلیل ماهیت بازیک سنگ‌والد خود، از خاک همه کشورهای موجود در جدول ۱۲ غنی‌تر است.

۶- نتیجه گیری

مجموعه دگرگونی گرگان که با عنوان شیت‌های گرگان معروف است، در گستره خود، سنگ‌شناسی یکنواختی نداشته و متشکل از سنگ‌های متنوعی مانند متاگابرو، متاریولیت، متابازالت، متاکربنات، سرسیت کلریت شیت، استیپنولان شیت، اسلیت و فیلیت است که در رخساره شیت سبز زیرین دگرگون شده‌اند. نتایج حاصل از تطبیق نقشه توزیع مکانی با تحلیل مؤلفه اصلی، تحلیل خوشه‌ای و مطالعات سنگ‌نگاری در نقاط نمونه‌برداری شده، نشان‌دهنده نقش زمین‌شناسی در بروز تمرکز فلزات سنگین در خاک منطقه است. بر اساس تجزیه فلزات سنگین و تحلیل‌های آماری، در خاک نواحی با سنگ‌شناسی شیتی به‌ویژه دره توسکستان، کمترین غلظت فلزات سنگین وجود دارد. در سایر نواحی به فراخور سنگ‌شناسی، مقادیر متفاوتی از این عناصر وجود دارند، به طوری که مشخصاً می‌توان گفت، نواحی دارای سنگ‌های با ماهیت بازیک، مقادیر بالاتری از عناصر سنگین (Fe, Cr, Ni, V) دارند. اما در برخی موارد، به‌رغم مشابهت سنگ بستر، خاک‌های حاصل دارای مقادیر متفاوتی از این عناصر هستند. این تفاوت‌ها را می‌توان به دیگر عوامل زمین‌زادی نظیر میزان توسعه فرایندهای خاک‌زایی، هوازدگی، درصد مواد آلی، کانی‌های رسی و سایر عوامل مرتبط با تحرک و تمرکز فلزات سنگین در خاک‌ها (پارامترهای فیزیکوشیمیایی خاک)، نسبت داد. نتایج حاصل از این مطالعه بیانگر منشأ زمین‌زادی فلزات سنگین، تمرکز اغلب آنها در حد زمینه ژئوشیمیایی و نقش ترکیب شیمیایی سنگ‌های مجموعه دگرگونی گرگان در آزادسازی این فلزات در خاک‌ها می‌باشد. با این حال، در کل، خاک ناحیه مورد مطالعه از نظر کیفیت زیست‌محیطی، غیرآلوده است و صرفاً میزان اندکی آلودگی در ارتباط با آهن و در مواردی مرتبط با وانادیم و کبالت دارد. با توجه به ماهیت بازیک بخش مهمی از سنگ‌والد مجموعه دگرگونی گرگان و شباهت رفتاری عناصر وانادیم و کبالت با آهن، این رفتار نیز به‌خوبی قابل توجیه است.

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله از حوزه معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود به خاطر حمایت مالی از انجام این تحقیق تقدیر می‌نمایند.

است. با توجه به ماهیت بازیک بخش مهمی از مواد والد مجموعه دگرگونی گرگان و شباهت رفتاری عناصر وانادیم و کبالت با آهن، این رفتار قابل توجیه است.

– ارزیابی ضریب آلودگی (CF) و درجه آلودگی اصلاح شده (mCd)

برای بیان وضعیت آلودگی محیط به یک فلز خاص، می‌توان از ضریب آلودگی نیز استفاده کرد (Ahdy & Khaled, 2009). این ضریب از طریق رابطه زیر به دست می‌آید (Satyanarayana et al., 1994):

$$C_f = \frac{C_0}{C_n} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در این رابطه، CF برابر با ضریب آلودگی، C_0 ، غلظت فلز در خاک یا رسوب و C_n ، غلظت همان فلز در ماده مرجع (میانگین شیل) می‌باشد. مقادیر این پارامتر برای نمونه‌های مورد بررسی محاسبه و در شکل ۷ ارائه شده‌اند.

درجه آلودگی (Cd)، نیز برای ارزیابی شدت آلودگی کلی محیط به کار می‌رود و از مجموع ضرایب آلودگی تمام فلزات، به شرح ذیل حاصل می‌شود (Hakanson, 1980):

$$C_d = \sum_{i=0}^n C_f \quad \text{رابطه (۴)}$$

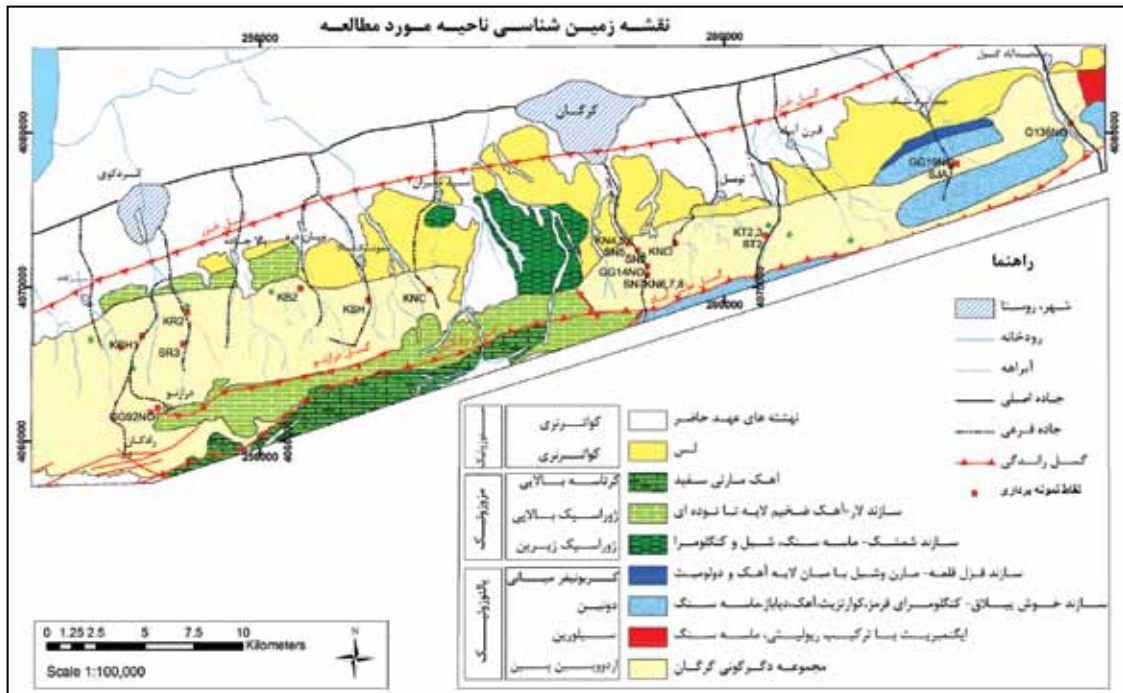
با توجه به محدودیت‌های رابطه (۴)، (Abraham (2005) درجه آلودگی اصلاح شده (mCd) را به شرح ذیل معرفی نموده است:

$$mC_d = \frac{\sum_{i=0}^n C_f^i}{n} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در این رابطه mC_d ، درجه آلودگی تصحیح شده، C_f^i ، ضریب آلودگی عنصر i و n ، تعداد عناصر تجزیه شده مورد بررسی می‌باشد. با توجه به مقادیر ضریب آلودگی و درجه آلودگی، به ترتیب می‌توان توصیفی از آلودگی مربوط به فلز مورد بررسی و آلودگی کلی محیط (رسوب یا خاک)، ارائه نمود (جدول‌های ۹ و ۱۰).

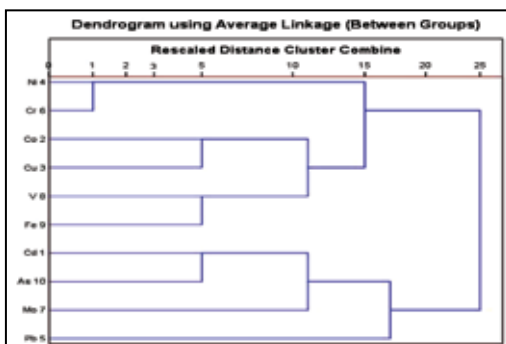
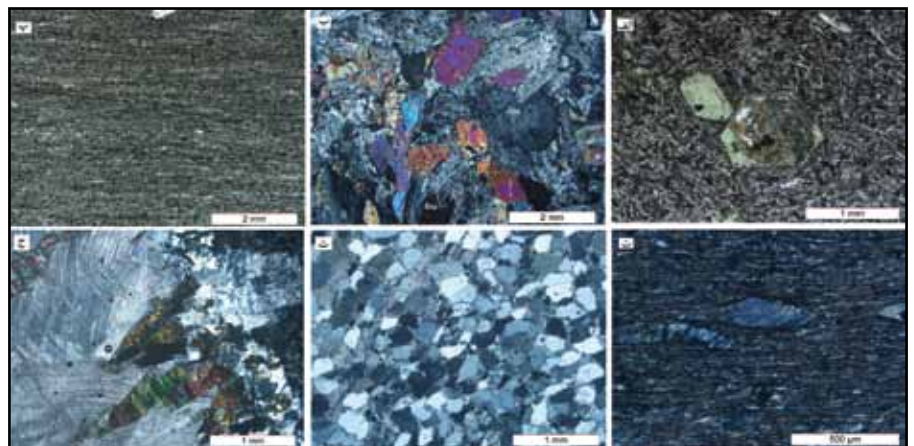
آهن، کبالت و وانادیم بر حسب میانگین مقادیر ضریب آلودگی (به ترتیب ۱/۷۱، ۱/۳۲ و ۱/۱۸) دارای آلودگی متوسطی در ناحیه بوده که با توجه به ماهیت بازیک سنگ‌های والد و همبستگی ژئوشیمیایی آنها امری قابل انتظار است. در حالی که سایر فلزات مورد بررسی، با داشتن مقادیر میانگین ضریب آلودگی کمتر از یک، فاقد آلودگی و یا آلودگی بسیار اندک هستند. افزون بر این، همچنان که آشکارا از شکل ۸ استنباط می‌شود، ناحیه مورد مطالعه از نظر کیفیت زیست‌محیطی، با داشتن درجه آلودگی تصحیح شده کمتر از ۱/۵، در تمامی نقاط نمونه‌برداری، طبق تقسیم‌بندی (Abraham (2005)، در زمره مناطق غیرآلوده تا مناطق با آلودگی بسیار اندک طبقه‌بندی می‌شود.

در جدول ۱۱ مقادیر متوسط فلزات سنگین مورد مطالعه در سنگ‌های معمول و همچنین مقادیر حد زمینه، حد هشدار (حداکثر میزان مجاز) و حد آستانه (خطرناک) آنها در یک خاک سطحی معمول آمده است (Beyer, 1990; Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007). همانگونه که مشاهده می‌شود، غلظت‌های این عناصر وابستگی شدیدی به ترکیب سنگ نشان می‌دهند. به عنوان نمونه، غلظت آهن، نیکل، کروم و کبالت در سنگ‌های اولترامافیک- مافیک، غلظت عناصر وانادیم و مس در سنگ‌های مافیک و غلظت عناصر سرب و آرسنیک در سنگ‌های حدواسط بیشتر است. مطالعه بیش از ۱۰۰۰ نمونه خاک نشان می‌دهد که بین میزان فلزات سنگین خاک و مقدار بخش رسی آن یک تطابق مثبت قوی وجود دارد. کروم، نیکل و آهن بالاترین وابستگی (۶۰ تا ۷۰ درصد) و کادمیم، سرب و مس کمترین وابستگی (۱۰ تا ۳۰ درصد) را نشان می‌دهند (Kabata-Pendias and Pendias, 2001). بر همین اساس، در جدول ۱۱ مقادیر عناصر کروم، نیکل و آهن در رسوبات رسی و شیل‌ها بالاست ولی مقادیر عناصر دیگر

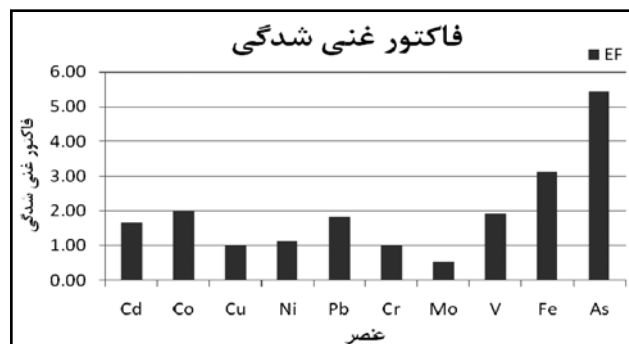


شکل ۱- موقعیت محل برداشت نمونه‌ها بر روی نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، تلفیق شده از اطلاعات نقشه‌های زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ گرگان (شهری)، ۱۳۶۹ و ۱/۱۰۰۰۰۰ گرگان (زمانی و حسینی، فاقد سال انتشار)، علی‌آباد (زمانی و همکاران، ۱۳۸۵)، و نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شیب‌های گرگان (شاه‌پسندزاده، ۱۳۷۱).

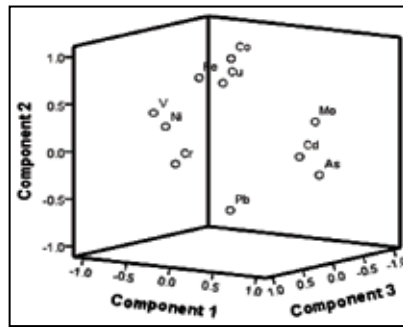
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی از سنگ‌های مختلف موجود در شیب‌های گرگان: الف) بافت هیالومیکروولیتی پورفیری متشکل از شیشه، میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و درشت بلورهای کلینوپیروکسن کلریتی شده در یک نمونه بازالتی، نور PPL. ب) بافت دانه‌ای متشکل از بلورهای کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در گابروهای دره ناهارخوران، نور XPL. پ) بافت بسیار دانه‌ریز اسلیتی در یک نمونه اسلیت، نور PPL. ت) بافت پورفیروبلاستی در یک نمونه کلریت شیب، بلورهای درشت مرکز تصویر از جنس کلریت هستند، نور XPL. ث) بافت گرانوبلاستی در یک نمونه کوارتزیتی، نور XPL. ج) بافت گرانوفلسی در یک نمونه اپیدوت مرمر، نور XPL.



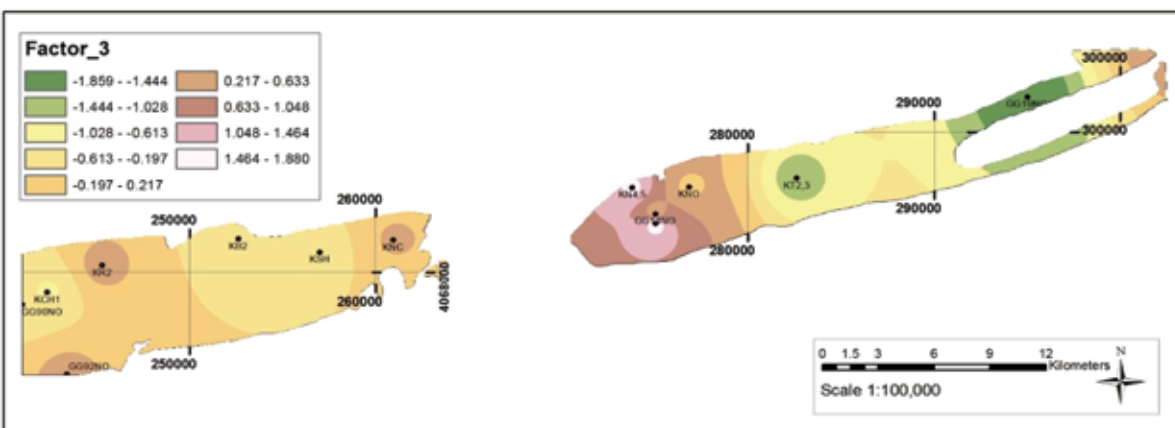
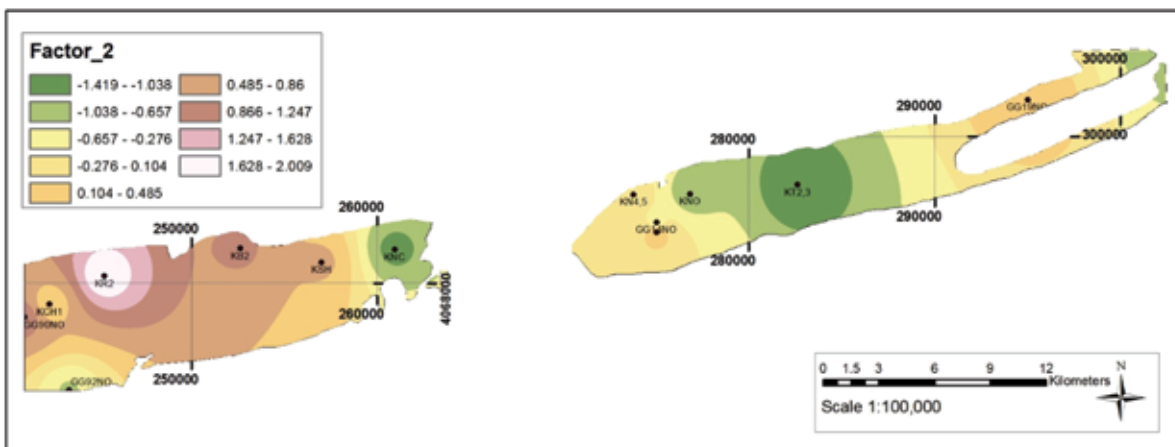
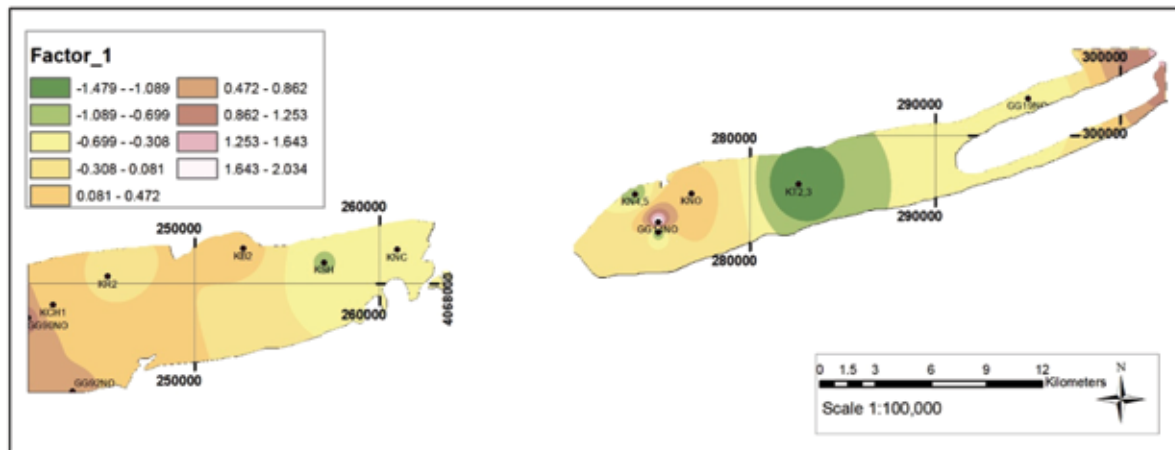
شکل ۴- دندروگرام سلسله مراتبی حاصل از تحلیل خوشه‌ای فلزات سنگین در نمونه‌های خاک حاصل از شیب‌های گرگان.



شکل ۳- نمودار میانگین فاکتور غنی‌شدگی فلزات سنگین در ناحیه مورد مطالعه.



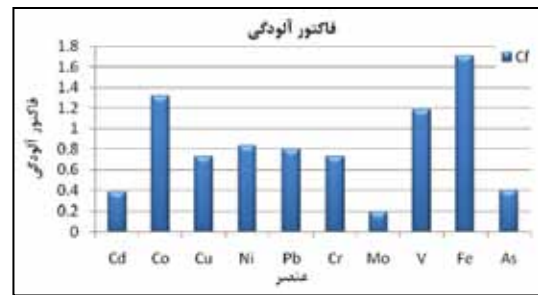
شکل ۵- نمودار سه بعدی تحلیل مؤلفه اصلی برای عناصر مورد مطالعه در خاک های منطقه.



شکل ۶- نقشه های توزیع مکانی امتیاز فاکتوری حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی به روش وزنی معکوس برای خاک های حاصل از شیب های گران.



شکل ۸- مقادیر درجه آلودگی اصلاح شده در نقاط نمونه برداری.



شکل ۷- میانگین فکتور آلودگی فلزات مورد بررسی در ناحیه مورد مطالعه

جدول ۱- نتایج تجزیه‌های شیمیایی نمونه‌های خاک و سنگ شیب‌های گرگان (مختصات جغرافیایی محل برداشت نمونه‌ها برحسب UTM و مقادیر غلظت عناصر بر حسب ppm می‌باشد).

| شماره نمونه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | Fe | V | Cr | Ni | Co | Cu | Pb | As | Mo | Cd |
|--------------|---------------|---------------|------------|---------|---------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|
| KT2,3 | ۲۸۲۶۳۱/۷ | ۴۰.۷۳۳۵۴/۵ | ۸۴۳۹۰ | ۱۶۴/۱۶ | ۳۵/۵۲ | ۴۵ | ۱۶/۲۵ | ۱۵/۸۴ | ۱۲/۰۹ | ۳/۴ | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۷ |
| KN4,5 | ۲۷۳۸۰۲/۲۸ | ۴۰.۷۲۸۳۵/۲۴ | ۷۹۸۳۰ | ۲۲۴/۵ | ۱۲۵/۲ | ۷۰/۹۴ | ۲۶/۳۵ | ۳۶/۶۸ | ۱۷/۱۸ | ۱/۹ | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۸ |
| KN6,7,8 | ۲۷۵۰۵۴/۹ | ۴۰.۷۰۷۵۷/۷۴ | ۹۵۳۵۰ | ۲۵۶/۶ | ۱۲۷ | ۷۵ | ۲۹/۵۷ | ۳۹/۱۳ | ۱۹/۴۱ | ۰/۵ | ۰/۰۳۸ | ۰/۰۹ |
| KR2 | ۲۴۵۲۹۷/۶۷ | ۴۰.۶۸۳۷۴/۸ | ۱۱۱۶۰۰ | ۲۴۹/۵ | ۷۳/۶۹ | ۶۶/۸۵ | ۳۳/۲۷ | ۴۵/۲۹ | ۱۰/۹ | ۴/۲ | ۰/۹۳۶ | ۰/۱۱ |
| KCH1 | ۲۴۲۳۶۴/۷۳ | ۴۰.۶۶۸۴۷/۲ | ۸۸۳۳۰ | ۱۳۳/۷۵ | ۴۲/۵۹ | ۴۹/۱۵ | ۲۸/۱۶ | ۳۴/۶۳ | ۱۹/۰۱ | ۷/۵۷ | ۰/۶۵۲ | ۰/۰۶ |
| KSH | ۲۵۶۹۹۸/۹۲ | ۴۰.۶۹۱۳۸/۵ | ۸۱۴۷۰ | ۱۳۵/۷۵ | ۵۷/۴ | ۵۴/۷۷ | ۲۵/۸۳ | ۴۸/۱۴ | ۶ | ۲/۵۵ | ۰/۱۸۳ | ۰/۰۷ |
| KNC | ۲۶۰۹۴۰/۰۸ | ۴۰.۶۹۸۴۱/۲ | ۷۳۵۵۰ | ۲۲۰/۰۱ | ۵۹/۰۹ | ۵۳/۶۸ | ۱۶/۹۸ | ۲۶/۷۵ | ۲۲/۷۵ | ۴/۸۶ | ۰/۳۱۶ | ۰/۱۲ |
| KNO | ۲۷۶۸۲۶/۸۸ | ۴۰.۷۲۸۶۵/۸ | ۸۳۸۷۰ | ۱۲۹/۹ | ۵۳/۲ | ۵۱/۲ | ۲۰/۴۷ | ۲۸/۷۸ | ۲۹/۰۵ | ۵/۱۳ | ۰/۳۶۲ | ۰/۱۵ |
| KB2 | ۲۵۲۶۳۰/۰۵ | ۴۰.۶۹۹۰۲/۲ | ۱۰۴۱۰۰ | ۱۷۰/۰۳ | ۲۶/۶۶ | ۵۵ | ۲۹/۰۹ | ۳۸/۴۵ | ۱۲/۲۱ | ۶/۹ | ۰/۳۴۶ | ۰/۱۵ |
| KGG14NO | ۲۷۵۰۴۵ | ۴۰.۷۱۳۲۸ | ۵۰۸۵۴ | ۹۹ | ۶۹ | ۵۲/۳ | ۲۱/۱ | ۳۳/۴ | ۱۸/۹ | ۱۳/۰۷ | ۰/۸ | ۰/۱۸ |
| KGG19NO | ۲۹۵۰۱۴/۴۳ | ۴۰.۷۸۰۰۵/۷۵ | ۹۱۰۴۵ | ۱۵۲ | ۷ | ۵۰ | ۲۸/۱ | ۱۶/۸ | ۷/۴ | ۲/۱ | ۱ | ۰/۰۸ |
| KGG90NO | ۲۴۱۰۲۰/۸۲ | ۴۰.۶۶۱۴۰ | ۸۱۴۸۵ | ۱۴۴ | ۵۳ | ۴۹/۳ | ۳۰/۵ | ۴۵/۱ | ۱۲/۲ | ۵/۱۸ | ۰/۸ | ۰/۱۸ |
| KGG92NO | ۲۴۳۴۰۰/۷۳ | ۴۰.۶۲۱۶۲/۵ | ۴۸۵۳۳ | ۱۱۷ | ۱۰۸ | ۵۸/۲ | ۲۳/۱ | ۲۵/۷ | ۱۵/۷ | ۶/۲۱ | ۰/۸ | ۰/۰۹ |
| KGI36NO | ۳۰۲۳۷۰/۸۴ | ۴۰.۸۰۶۰۶/۲ | ۵۲۶۳۳ | ۱۱۵ | ۷۷ | ۶۰/۴ | ۲۲ | ۲۲ | ۲۱/۵ | ۸/۱۵ | ۰/۸ | ۰/۱۷ |
| میانگین | | | ۸۰۵۰۲/۸۶ | ۱۶۵/۰۹ | ۶۵/۳۱ | ۵۶/۵۶ | ۲۵/۰۶ | ۳۲/۶۲ | ۱۶/۰۲ | ۵/۱۲ | ۰/۵۱ | ۰/۱۱ |
| تغییرات | | | ۳۵۹۳۶۱۰/۷۲ | ۲۶۸۹/۰۲ | ۱۲۴۰/۹۵ | ۷۸/۰۹ | ۲۶/۷۳ | ۱۰۷/۳۷ | ۴۰/۰۶ | ۱۰/۳۱ | ۰/۱۳ | ۰/۰۰۲ |
| انحراف معیار | | | ۱۸۹۵۶/۸ | ۵۱/۸۶ | ۳۵/۲۳ | ۸/۸۴ | ۵/۱۷ | ۱۰/۳۶ | ۶/۳۳ | ۳/۲۱ | ۰/۳۶ | ۰/۰۴۴ |
| ضریب تغییرات | | | ۲۳/۵۵ | ۳۱/۴۱ | ۵۳/۹۴ | ۱۵/۶۳ | ۲۰/۶۴ | ۳۱/۷۶ | ۳۹/۵۰ | ۶۲/۶۸ | ۶۹/۹۴ | ۳۸/۱۷ |
| SN7 | ۲۷۵۰۵۴/۹۰ | ۴۰.۷۰۷۵۷/۷۴ | ۹۱۴۶۰ | ۱۲۷/۴ | ۷۹/۸ | ۵۷/۸ | ۲۴/۴ | ۷۸/۴۷ | ۵/۴۸ | ۲/۳ | ۰/۰۵ | ۰/۰۶۷ |
| SJA | ۲۹۴۶۲۱/۸۴ | ۴۰.۷۷۸۷۰/۸۲ | ۱۳۷۷۰۰ | ۲۹۶/۴ | ۲۵/۱ | ۲۹/۴۱ | ۳۱/۷۴ | ۳۲/۷۷ | ۴/۶۹ | ۱/۹۸ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ |
| SN2 | ۲۷۴۴۱۳/۳۱ | ۴۰.۷۲۳۷۹/۷ | ۱۵۰۸۰۰ | ۹۳/۷۵ | ۳۹۶/۸ | ۴۳۵/۹ | ۶۳/۳۱ | ۴۰/۵۸ | ۰/۰۶۴ | ۳/۱ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ |
| ST2 | ۲۸۲۶۳۱/۶۸ | ۴۰.۷۳۳۵۴/۶۲ | ۱۷۲۲۰۰ | ۲۱۶/۵ | ۰/۴۹ | ۶/۸۴ | ۳۱/۳۵ | ۱۰/۲۲ | ۴/۳۶ | ۱/۹۹ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ |
| SN5 | ۲۷۳۸۰۲/۲۸ | ۴۰.۷۲۸۳۵/۲۴ | ۱۷۷۱۰۰ | ۱۳۸/۷ | ۲/۶۳ | ۱۶۰/۷ | ۴۳/۲۸ | ۱۹/۲ | ۱۰/۲/۹ | ۳/۹ | ۰/۰۵ | ۰/۰۵ |
| SR3 | ۲۴۵۰۲۲/۷۱ | ۴۰.۶۶۳۲۷/۷۶ | ۱۱۱۳۰۰ | ۰/۶ | ۰/۳۸ | ۴/۳۱ | ۵/۷۴ | ۹/۲۲ | ۷/۱۱ | ۰/۵ | ۰/۲۱ | ۰/۰۵ |

جدول ۲- مقادیر پارامترهای ژئوشیمیایی نمونه‌های خاک شیب‌های گرگان (مختصات جغرافیایی محل برداشت نمونه‌ها برحسب UTM است).

| شماره نمونه | طول جغرافیایی | عرض جغرافیایی | pH | EC ($\mu\text{s}/\text{cm}$) | CEC (meq/100g) |
|-------------|---------------|---------------|------|--------------------------------|----------------|
| KT2,3 | ۲۸۲۶۳۱/۷ | ۴۰.۷۳۳۵۴/۵ | ۷/۶۴ | ۹۹/۳۵ | ۲۷/۸۳ |
| KN4,5 | ۲۷۳۸۰۲/۲۸ | ۴۰.۷۲۸۳۵/۲۴ | ۷/۵۵ | ۱۲۳ | ۲۶/۵۲ |
| KN6,7,8 | ۲۷۵۰۵۴/۹ | ۴۰.۷۰۷۵۷/۷۴ | ۷/۲۴ | ۸۵/۵۶ | ۲۸/۷ |
| KR2 | ۲۴۵۲۹۷/۶۷ | ۴۰.۶۸۳۷۴/۸ | ۷/۶۲ | ۴۲۶/۳۱ | ۲۴/۷۸ |
| KCH1 | ۲۴۲۳۶۴/۷۳ | ۴۰.۶۶۸۴۷/۲ | ۷/۸۹ | ۱۰۷/۴ | ۲۲/۶۱ |
| KSH | ۲۵۶۹۹۸/۹۲ | ۴۰.۶۹۱۳۸/۵ | ۷/۷۳ | ۱۴۷/۸۶ | ۲۹/۵۷ |
| KNC | ۲۶۰۹۴۰/۰۸ | ۴۰.۶۹۸۴۱/۲ | ۷/۶۴ | ۳۴۵/۷۸ | ۲۶/۰۹ |
| KNO | ۲۷۶۸۲۶/۸۸ | ۴۰.۷۲۸۶۵/۸ | ۸/۰۵ | ۱۲۴/۰۸ | ۲۶/۰۹ |
| KB2 | ۲۵۲۶۳۰/۰۵ | ۴۰.۶۹۹۰۲/۲ | ۷/۹۵ | ۱۹۶/۴۶ | ۲۷/۸۳ |
| KGG14NO | ۲۷۵۰۴۵ | ۴۰.۷۱۳۲۸ | ۸/۰۸ | ۵۵۰ | ۳۶/۸ |
| KGG19NO | ۲۹۵۰۱۴/۴۳ | ۴۰.۷۸۰۰۵/۷۵ | ۸ | ۵۲۰ | ۳۲/۶ |
| KGG90NO | ۲۴۱۰۲۰/۸۲ | ۴۰.۶۶۱۴۰ | ۷/۹۴ | ۴۳۰ | ۳۶/۵۲ |
| KGG92NO | ۲۴۳۴۰۰/۷۳ | ۴۰.۶۲۱۶۲/۵ | ۷/۹۵ | ۵۵۰ | ۴۱/۳ |
| KGI36NO | ۳۰۲۳۷۰/۸۴ | ۴۰.۸۰۶۰۶/۲ | ۷/۱۳ | ۴۹۰ | ۴۳ |

جدول ۳- ماتریس مقادیر همبستگی (r) پارامترهای شیمیایی و فلزات سنگین نمونه‌های خاک شیبست‌های گرگان.

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|---------|----|--|
| | pH | | | | | | | | | | | | | |
| pH | 1 | Ec | | | | | | | | | | | | |
| EC | 0.197 | 1 | CEC | | | | | | | | | | | |
| CEC | -0.063 | 0.228 | 1 | Cd | | | | | | | | | | |
| Cd | 0.135 | 0.457 | 0.462 | 1 | Co | | | | | | | | | |
| Co | 0.004 | 0.018 | -0.146 | -0.065 | 1 | Cu | | | | | | | | |
| Cu | 0.014 | -0.216 | -0.257 | 0.097 | 0.654* | 1 | Ni | | | | | | | |
| Ni | -0.334 | -0.116 | -0.050 | -0.129 | 0.417 | 0.375 | 1 | Pb | | | | | | |
| Pb | -0.134 | -0.138 | -0.039 | 0.353 | -0.454 | -0.232 | 0.106 | 1 | Cr | | | | | |
| Cr | -0.515 | -0.069 | 0.168 | -0.084 | 0.077 | 0.272 | 0.822** | 0.318 | 1 | Mo | | | | |
| Mo | 0.334 | 0.481 | 0.843** | 0.359 | 0.300 | -0.098 | -0.232 | -0.150 | -0.285 | 1 | V | | | |
| V | -0.487 | -0.348 | 0.568* | -0.313 | 0.334 | 0.287 | 0.668** | -0.050 | 0.375 | -0.402 | 1 | Fe | | |
| Fe | -0.006 | 0.498 | 0.753** | -0.293 | 0.589* | 0.370 | 0.154 | -0.338 | -0.288 | -0.206 | 0.627* | 1 | As | |
| As | 0.351 | 0.468 | 0.394 | 0.626* | -0.252 | -0.079 | -0.373 | 0.309 | -0.170 | 0.479 | -0.641* | -0.541* | 1 | |

*Correlation is significant at the 0.05 level (p=0.05) (2-tailed)

**Correlation is significant at the 0.01 level (p=0.01) (2-tailed)

جدول ۵- نتایج حاصل از تحلیل مؤلفه اصلی.

| | مؤلفه (Component) | | |
|----|-------------------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Cd | .798 | -.007 | .106 |
| Co | .003 | .950 | .101 |
| Cu | .084 | .735 | .350 |
| Ni | -.221 | .319 | .860 |
| Pb | .263 | -.570 | .483 |
| Cr | -.055 | -.048 | .935 |
| Mo | .675 | .288 | -.327 |
| V | -.626 | .367 | .482 |
| Fe | -.542 | .656 | -.152 |
| As | .872 | -.225 | -.116 |

جدول ۴- طبقه‌بندی فاکتور غنی‌شدگی از (Chen et al. (2007).

| شدت غنی‌شدگی | فاکتور غنی‌شدگی (EF) |
|------------------------|----------------------|
| بدون غنی‌شدگی | کمتر از ۱ |
| غنی‌شدگی اندک | بین ۱ تا ۳ |
| غنی‌شدگی متوسط | بین ۳ تا ۵ |
| غنی‌شدگی نسبتاً شدید | بین ۵ تا ۱۰ |
| غنی‌شدگی شدید | بین ۱۰ تا ۲۵ |
| غنی‌شدگی خیلی شدید | بین ۲۵ تا ۵۰ |
| غنی‌شدگی بی‌نهایت شدید | بیشتر از ۵۰ |

جدول ۶- مقادیر متوسط فلزات سنگین در خاک منطقه به همراه شاخص آلودگی خاک از Kelly (1980) و مقادیر زمینه، حد بیشینه مجاز و حد آستانه از Beyer (1990); Kabata-Pendias and Pendias (2001); Atanassov (2007). اعداد داخل پرانتز در ستون‌های مقادیر زمینه، حد بیشینه مجاز و حد آستانه از Atanassov (2007).

(NR = ثبت نشده). همه مقادیر به ppm است.

| حد آستانه | حد بیشینه مجاز | مقادیر زمینه | شاخص آلودگی Kelly (1980) | | | | | میانگین غلظت در خاک منطقه به ppm | نوع فلز |
|-----------|----------------|--------------|--------------------------|-------------|----------|-------------|-----------|----------------------------------|---------|
| | | | خیلی خطرناک | بسیار آلوده | آلوده | اندکی آلوده | غیر آلوده | | |
| 100000 | 70000 | 40000 | NR | NR | NR | NR | NR | 80502.86 | Fe |
| 450 | 150 | 70 | 2500< | 500-2500 | 200-500 | 100-200 | 0-100 | 165.09 | V |
| 800 (550) | 250 (250) | 100 (65) | 2500< | 500-2500 | 200-500 | 100-200 | 0-100 | 65.31 | Cr |
| 500 (300) | 100 (80) | 50 (46) | 1000< | 200-100 | 50-200 | 20-50 | 0-20 | 56.56 | Ni |
| 300 | 50 | 20 (20) | NR | NR | NR | NR | NR | 25.06 | Co |
| 500 (500) | 100 (170) | 50 (34) | 2500< | 500-2500 | 200-500 | 100-200 | 0-100 | 32.62 | Cu |
| 600 (500) | 150 (130) | 50 (26) | 5000< | 1000-5000 | 500-1000 | 200-500 | 0-200 | 16.02 | Pb |
| 50 (90) | 30 (30) | 20 (10) | 500< | 100-500 | 50-100 | 30-50 | 0-30 | 5.12 | As |
| 200 | 40 | 10 | NR | NR | NR | NR | NR | 0.51 | Mo |
| 20 (12) | 5 (2.5) | 1 (0.4) | 50< | 10-50 | 3-10 | 1-3 | 0-1 | 0.11 | Cd |

جدول ۷- مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی مورد استفاده در تعیین آلودگی خاک (Muller, 1969).

| شاخص زمین‌انباشتگی (Igeo) | درجه آلودگی (Igeo Class) | شدت آلودگی |
|---------------------------|--------------------------|----------------------------|
| کمتر یا برابر با صفر | ۰ | غیر آلوده |
| صفر تا یک | ۱ | غیر آلوده تا کمی آلوده |
| ۱ تا ۲ | ۲ | کمی آلوده |
| ۲ تا ۳ | ۳ | کمی آلوده تا خیلی آلوده |
| ۳ تا ۴ | ۴ | خیلی آلوده |
| ۴ تا ۵ | ۵ | خیلی آلوده تا شدیداً آلوده |
| بیشتر از ۵ | ۶ | شدیداً آلوده |

جدول ۸- مقادیر شاخص زمین‌انباشتگی در خاک ناحیه مورد مطالعه.

| عنصر/نمونه | Igeo | | | | | | | | | | درجه آلودگی (Igeo class) | شدت آلودگی |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|--------------------------|
| | Cd | Co | Cu | Ni | Pb | Cr | Mo | V | Fe | As | | |
| KT2,3 | -۲/۶۸ | -۰/۸۱ | -۲/۰۹ | -۱/۱۸ | -۱/۳۱ | -۱/۹۳ | -۶/۶۸ | -۰/۳۶ | ۰/۲۵ | -۲/۵۲ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KN4,5 | -۲/۴۹ | -۰/۱۱ | -۰/۸۸ | -۰/۵۲ | -۰/۸۰ | -۰/۱۱ | -۶/۶۸ | ۰/۱۰ | ۰/۱۷ | -۳/۳۶ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KN6,7,8 | -۲/۳۲ | ۰/۰۵ | -۰/۷۹ | -۰/۴۴ | -۰/۶۳ | -۰/۰۹ | -۶/۶۸ | ۰/۲۹ | ۰/۴۳ | -۵/۲۹ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KR2 | -۲/۰۳ | ۰/۲۲ | -۰/۵۸ | -۰/۶۱ | -۱/۴۶ | -۰/۸۷ | -۲/۰۶ | ۰/۲۵ | ۰/۶۶ | -۲/۲۲ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KCH1 | -۲/۹۱ | -۰/۰۲ | -۰/۹۶ | -۱/۰۵ | -۰/۶۶ | -۱/۶۶ | -۲/۵۸ | -۰/۶۵ | ۰/۳۲ | -۱/۳۷ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KSH | -۲/۶۸ | -۰/۱۴ | -۰/۴۹ | -۰/۹۰ | -۲/۳۲ | -۱/۲۳ | -۴/۴۱ | -۰/۶۳ | ۰/۲۰ | -۲/۹۳ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KNC | -۱/۹۱ | -۰/۷۵ | -۱/۳۳ | -۰/۹۳ | -۰/۴۰ | -۱/۱۹ | -۳/۶۳ | ۰/۰۷ | ۰/۰۵ | -۲/۰۰ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KNO | -۱/۵۸ | -۰/۴۸ | -۱/۲۳ | -۰/۹۹ | -۰/۰۵ | -۱/۳۴ | -۳/۴۳ | -۰/۶۹ | ۰/۲۴ | -۱/۹۳ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KB2 | -۱/۵۸ | ۰/۰۳ | -۰/۸۱ | -۰/۸۹ | -۱/۳۰ | -۲/۴۴ | -۳/۴۹ | -۰/۳۰ | ۰/۵۶ | -۱/۵۰ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KGG14NO | -۱/۳۲ | -۰/۴۳ | -۱/۰۲ | -۰/۹۶ | -۰/۶۷ | -۰/۹۷ | -۲/۲۹ | -۱/۰۸ | -۰/۴۸ | -۰/۵۸ | ۰/۰۰ | غیر آلوده |
| KGG19NO | -۲/۴۹ | -۰/۰۲ | -۲/۰۱ | -۱/۰۳ | -۲/۰۲ | -۴/۲۷ | -۱/۹۶ | -۰/۴۷ | ۰/۳۶ | -۳/۲۲ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KGG90NO | -۱/۳۲ | ۰/۱۰ | -۰/۵۸ | -۱/۰۵ | -۱/۳۰ | -۱/۳۵ | -۲/۲۹ | -۰/۵۴ | ۰/۲۰ | -۱/۹۱ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |
| KGG92NO | -۲/۳۲ | -۰/۳۰ | -۱/۳۹ | -۰/۸۱ | -۰/۹۳ | -۰/۳۲ | -۲/۲۹ | -۰/۸۴ | -۰/۵۴ | -۱/۶۵ | ۰/۰۰ | غیر آلوده |
| KG136NO | -۱/۴۰ | -۰/۳۷ | -۱/۶۲ | -۰/۷۶ | -۰/۴۸ | -۰/۸۱ | -۲/۲۹ | -۰/۸۷ | -۰/۴۳ | -۱/۲۶ | ۰/۰۰ | غیر آلوده |
| min | -۲/۹۱ | -۰/۸۱ | -۲/۰۹ | -۱/۱۸ | -۲/۳۲ | -۴/۲۷ | -۶/۶۸ | -۱/۰۸ | -۰/۵۴ | -۵/۲۹ | - | - |
| max | -۱/۳۲ | ۰/۲۲ | -۰/۴۹ | -۰/۴۴ | -۰/۰۵ | -۰/۰۹ | -۱/۹۶ | ۰/۲۹ | ۰/۶۶ | -۰/۵۸ | - | - |
| mean | -۲/۰۸ | -۰/۲۲ | -۱/۱۳ | -۰/۸۷ | -۱/۰۲ | -۱/۳۲ | -۳/۶۳ | -۰/۴۱ | ۰/۱۴ | -۲/۲۷ | ۰-۱ | غیر آلوده تا اندکی آلوده |

جدول ۹- توصیف مقادیر ضریب آلودگی (Satyanarayana et al., 1994).

| مقادیر فاکتور (ضریب) آلودگی (C _p) | شدت آلودگی |
|---|-------------------|
| کمتر از یک | آلودگی اندک |
| بین ۱ تا ۳ | آلودگی متوسط |
| بین ۳ تا ۶ | آلودگی قابل توجه |
| بیشتر از ۶ | آلودگی بسیار زیاد |

جدول ۱۰- توصیف کیفیت محیط بر اساس مقادیر درجه آلودگی اصلاح شده (Abraham, 2005).

| مقدار درجه آلودگی اصلاح شده (mC _p) | کیفیت محیط مورد بررسی |
|--|---|
| درجه آلودگی کمتر از ۱/۵ | غیر آلوده تا آلودگی بسیار اندک (Very low) |
| درجه آلودگی بین ۱/۵ تا ۲ | آلودگی اندک (Low) |
| درجه آلودگی بین ۲ تا ۴ | آلودگی متوسط (Moderate) |
| درجه آلودگی بین ۴ تا ۸ | آلودگی زیاد (High) |
| درجه آلودگی بین ۸ تا ۱۶ | آلودگی بسیار زیاد (Very high) |
| درجه آلودگی بین ۱۶ تا ۳۲ | آلودگی فوق‌العاده زیاد (Extremely high) |
| درجه آلودگی بیشتر از ۳۲ | آلودگی بی‌نهایت زیاد (Ultra high) |

جدول ۱۱- مقادیر متوسط برخی از فلزات سنگین در سنگ‌ها و خاک (به ppm) به همراه مقادیر زمینه، حد پیشینه مجاز و حد آستانه آنها (برگرفته از (Beyer, 1990; Kabata-Pendias and Pendias, 2001; Kabata-Pendias and Mukherjee, 2007).

| سنگهای | | | | | | | | خاک | | | نوع فلز |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------|----------|----------|--------------------|---------|
| اولترامافیک | مافیک | حدواسط | اسیدی | رسوبات رسی | شیل‌ها | ماسه سنگ‌ها | آهک‌ها / دولومیت‌ها | حد زمینه | حد هشدار | حد آستانه (خط‌ناک) | |
| 94000-100000 | 56000-87000 | 37000-59000 | 14000-27000 | 33000-47000 | 43000-48000 | 10000-30000 | 4000-10000 | 40000 | 70000 | 100000 | Fe |
| 4-100 | 200-250 | 30-100 | 40-90 | 80-130 | 100-130 | 10-60 | 10-45 | 70 | 150 | 300 | V |
| 1600-3400 | 170-200 | 15-50 | 4-25 | 80-120 | 60-100 | 20-40 | 5-16 | 100 | 250 | 800 | Cr |
| 1400-2000 | 130-160 | 5-55 | 5-15 | 40-90 | 50-70 | 5-20 | 7-20 | 50 | 100 | 500 | Ni |
| 100-200 | 35-50 | 1-10 | 1-7 | 14-20 | 11-20 | 0.3-10 | 0.1-3 | 20 | 50 | 300 | Co |
| 10-40 | 60-120 | 15-80 | 10-30 | 40-60 | 40 | 5-30 | 2-10 | 50 | 100 | 500 | Cu |
| 0.1-1 | 3-8 | 12-15 | 10-24 | 20-40 | 18-25 | 5-10 | 3-10 | 50 | 150 | 600 | Pb |
| 0.5-1 | 0.6-2 | 1-2.5 | 1-2.6 | 13 | 5-13 | 1-1.2 | 1-2.4 | 20 | 30 | 50 | As |
| 0.2-0.3 | 1-1.5 | 0.6-1 | 1-2 | 2-2.6 | 0.7-2.6 | 0.2-0.8 | 0.16-0.4 | 10 | 40 | 200 | Mo |
| 0.03-0.05 | 0.13-0.22 | 0.13 | 0.09-0.2 | 0.3 | 0.22-0.3 | 0.05 | 0.035 | 1 | 5 | 20 | Cd |

جدول ۱۲- مقادیر متوسط برخی از فلزات سنگین در واحد وزن خشک به ppm در خاک‌های سطحی برخی از کشورها (برگرفته از Kabata-Pendias and Pendias, 2001).

| روسیه | دانمارک | رومانی | ژاپن | لهستان | کانادا | آلمان | ایتالیا | انگلستان | آمریکا | نوع فلز |
|-------|---------|--------|------|--------|--------|-------|---------|----------|--------|---------|
| ۶۹ | - | - | - | - | - | - | ۷۶ | ۱۵-۲۰۰ | ۱-۹۸ | V |
| - | ۱۵ | - | ۵۰ | ۲۰ | ۵۰ | ۲۸ | ۹۵ | ۶۹ | ۵۰ | Cr |
| - | ۸ | ۱۵ | ۲۸ | ۹ | ۲۰ | ۱۹ | ۱۴ | ۲۳ | ۱۹ | Ni |
| - | ۳ | ۳ | ۱۰ | - | ۲۱ | ۱۵ | ۱۴ | - | ۱۱ | Co |
| ۲۸ | ۱۳ | - | ۳۴ | ۸ | ۲۲ | - | ۲۴ | ۲۳ | ۲۶ | Cu |
| - | - | - | - | ۱۸ | ۲۰ | ۱۵-۶۸ | ۲۶ | ۲۹ | ۲۶ | Pb |
| - | - | - | ۱۱ | - | ۶ | - | ۴۱ | ۱۶ | ۷ | As |
| ۲ | - | - | ۳ | - | - | - | ۱ | ۱ | ۲ | Mo |
| <۱ | <۱ | - | <۱ | <۱ | <۱ | ۱ | <۱ | ۱ | <۱ | Cd |

کتابنگاری

- رحیمی، ب.، ۱۳۸۱- رساله دکتری، مطالعات ساختاری رشته کوه البرز در شمال دامغان، دانشکده علوم، دانشگاه شهید بهشتی. ۲۲۰ صفحه
- زمانی پدram، م.، کریمی، ح.ر.، حسینی، ح.، بهره‌مند، م.، ۱۳۸۵- نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ علی آباد. انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- زمانی پدram، م. و حسینی، ح.، نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ گرگان. انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- شاه‌پسندزاده، م.، ۱۳۷۱- پایان نامه کارشناسی ارشد، تحلیل ساختاری و تفسیر محیط رسوبی مجموعه سنگهای دگرگونی گرگان (شسیت‌های گرگان)، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت معلم تهران. ۱۷۵ صفحه.
- شهرایی، م.، ۱۳۶۹- نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ گرگان. انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران.
- غازان شاهی، ج.، ۱۳۸۵- ترجمه، آنالیز خاک و گیاه، نوشته وان رنست، ورلو، ام وندو. انتشارات آبیژ، تهران. ۲۷۲ صفحه.
- گراوند، م.، ۱۳۸۹- پایان نامه کارشناسی ارشد، ارزیابی آلودگی طبیعی فلزات سنگین در خاک‌های حاصل از شسیت‌های گرگان، دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده علوم زمین، ۱۵۶ صفحه.
- مهندسین مشاور معدنکاو، ۱۳۷۹- گزارش نهایی مرحله اول پی جویی و پتانسیل یابی مواد معدنی در شسیت‌های گرگان (دره توسکستان)، اداره کل معادن و فلزات استان گلستان، وزارت معادن و فلزات. ۲۳۸ صفحه
- یوسفی، م.، کاکایی، ر.، ۱۳۸۵- کاربرد کامپیوتر در معدن، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی امیرکبیر. ۲۸۲ صفحه.

References

- Abraham, G. M. S., 2005- Holocene sediments of Tamaki Estuary: Characterisation and impact of recent human activity on an urban estuary in Auckland, New Zealand, Ph.D. thesis, University of Auckland, Auckland, New Zealand, 361p.
- 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, Environ Monit Assess, v. 136, pp: 227- 238.
- Acosta, J. A., Faz, A., Mrtinez, S. M., 2009- Identification of heavy metal sources by multivariable analysis in a typical Mediterranean city (SE Spain), Environ Monit Assess, DOI 10.1007/s10661-1194-0.

- Adamo, P., Arenzo, M., Imperato, M., Naimo, D., Nardi, G., Stanzione, D., 2005- Distribution and partition of heavy metal in surface and sub-surface sediments of Naplescity Por, *Chemosphere*, v. 61, pp: 800-809.
- Adriano, D. C., 2001- Trace elements in terrestrial environments, 2nd ed. Springer, New york.
- Ahdy, H., Khaled, A., 2009- Heavy Metals Contamination in Sediments of the Western Part of Egyptian Mediterranean Sea, *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 3(4), pp: 3330-3336.
- Atanassov, I., 2007- New Bulgarian soil pollution standards, *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 14 (No1), pp: 68-75.
- Beyer, W.N., 1990-Evaluating soil contamination. U.S. fish Wildl. Serv., *Biological Report*90 (2).25pp.
- Bowen, H.J.M., 1979- Environmental Chemistry of the Elements, Academic Press, New York, 1979. (In: Bradli, H. B., (2005), *Heavy Metals in the Environment*, Elsevier Ltd, Vol, 6).
- Chen, C, W., Kao, C, M., Chen, C, F., Dong, C, D., 2007- Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsinung Harbor, Taiwan, *Chemosphere*, 66, pp: 1431-1440.
- Doelsch, E., Macary, H. S., Van de Kerchove, V., 2006- Sources of very high heavy metal content in soils of volcanic island (La Re´union), *Journal of Geochemical Exploration*, v. 88, pp: 194– 197.
- Dragović, S., Mihailović, N., Gajić, B., 2008-Heavy metals in soils: distribution relationship with soil characteristics and radionuclides and multivariate assessment of contamination sources, *Chemosphere*, v. 72, pp: 491-495.
- Galan, E., Fernandez-Caliani, J.C., Gonzalez I., Aparicio P., Romero, A., 2008-Influence of geological setting on geochemical baselines of trace elements in soils. Application to soil of South-West Spain, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 98, pp: 89-106.
- Ghavidel – Syooki, M. , 2008-Palynostratigraphy and Palaeogeography of the Upper Ordovician Gorgan Schists (Southeastern Caspian Sea), Eastern Alborz Mountain Ranges, Northern Iran, *Comunicaçes Geolgicas*, 2008, t. 95, pp: 123-155.
- Goorzadi, M., Vahabzadeh, Gh., Ghanbarpour, M. R. and Karbassi, A, R., 2009-Assessment of heavy metal pollution in Tilehbon river sediment, Iran, *Journal of applied sciences*, 9(6), pp: 1190-1193.
- Hakanson, L., 1980-An ecological risk index for aquatic pollution control a sedimentological approaches, *Water Research*, 14: 975–1001.
- Hernandez, L., Probst, A., Probst, J. L., Ulrich, E., 2003-Heavy metal distribution in some French forest soils: evidence for atmospheric contamination, *The Science of the Total Environment*, v. 312, pp: 195–219.
- Jenne, E.A., Chem., A., 1968- (In: Bradli, H. B., (2005), “Heavy Metals in the Environment”, Elsevier Ltd, Vol, 6).
- Jordan, C., Zhang, C., Higgins, A., 2007 Using GIS and statistics to study influences of geology on probability features of surface soil geochemistry in Northern Ireland, *Journal of Geochemical Exploration*, v. 93,pp: 135–152.
- Kabata-Pendias A., Mukherjee, A. B., 2007-Trace Elements from Soil to Human, Springer Berlin Heidelberg New York.
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 1999-Biogeochemistry of trace elements, 2nd ed., Wyd Nauk PWN, Warszawa (in Polish). (In: Kabata-Pendias A., Mukherjee, A. B., (2007), “Trace Elements from Soil to Human” Springer Berlin Heidelberg New York).
- Kabata-Pendias, A., Pendias, H., 2001- Trace elements in soils and plants. Third edition. CRC Press LLC. 408p.
- Kabata-Pendias, A., Sadurski. W., 2004-Trace elements and compounds in soil, In: Merian E, Anke M, Ihnat M, Stoeppler M (eds) *Elements and their compounds in the environment*, Wiley-VCH, Weinheim, 2nd ed., pp: 79–99.
- Kelly Indices (former Creater London Council), 1980-Site investigation and materials problems, Proc. Conference on Reclamation of Contaminated Land, Eastbourne, UK, October 1979 (Society of the Chemical Industry, London 1980).
- Loska, K., Chebual, J., Pleczar, J., Wiechla, D., Kwapulinski, J., 1995-Use of environment and contamination factors togheder with geoaccumulation indexes to elevate the content of Cd, Cu and Ni in the Rybink water reservoir in Poland” *Water, Air and Soil pollution*, 93, pp: 347-365.
- Miller, R. W., Donahue, R. L., 1990-Soils, an introduction to soils and plant growth, (6th ed), Prentice-Hall, London.
- Misra, S. G., Dinesh Mani, 2009-Soil Pollution, Published by S.B. Nangia, New Delhi.
- Möller, A., Muller, H. W., Abdullah, A., Abdelgawad, G., Utermann, J. ,2005- Urban soil pollution in Damascus, Syria: Concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta, *Geoderma*, v. 124, pp: 63–71.
- Müller, G., 1969-Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, v. 2, pp: 108–118.
- Qishlaqi, A., Moore, F., Forghani, G., 2009-Characterization of metal pollution in soils under two landuse patterns in the Angouran region, NW Iran; a study based on multivariate data analysis, *Journal of Hazardous Materials* 172, pp:374–384.
- Satyanarayana, D., Panigrahy, P. K., Sahu, S. D., 1994-Metal pollution in Harborand coastal sediments of visakhpatnam, est of India, *Indian journal of marine science*, v. 23, pp: 52-54.
- Tijani, M. N., Okunlola, O. A., Abimbola, A. F., 2006-Lithogenic concentrations of trace metals in soils and saprolites over crystalline basement rocks: A case study from SW Nigeria”, *Journal of African Earth Sciences*, v. 46, pp: 427–438.
- Upadhyay, A, K., Gupta, K, K., Sircar, J, K., Deb, M, K., Mundhara, G, L., 2006-Heavy metals in freshly deposited sediments of the river Subernarekha, India: an example of lithogenic and anthropogenic effects, *Environ Geol*,v. 50, pp: 397-403.