



بررسی و تحلیل آماری ارتباط ژئوشیمیایی عنصرهای پرتوزای لایه‌های فسفات‌دار رسوبی منطقه‌ی تاقدیس کوه لار- زاگرس

فرید بلورچی فرد^{۱،۳*}، بهزاد مهرابی^۲، ایوب معمار^۱، فرج‌الله فیاضی^۳

۱. پژوهشکده‌ی مواد و سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران - ایران
۲. گروه ژئوشیمی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، صندوق پستی: ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، تهران - ایران
۳. گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، صندوق پستی: ۱۴۹۱۱-۱۵۷۱۹، تهران - ایران

چکیده: لایه‌های رسوبی سازند پابده که حاوی مقدارهای مختلف فسفات، به صورت کانی اصلی خانواده‌ی آپاتیت هستند، بررسی شد. به منظور تعیین عناصر شیمیایی موجود از نتیجه‌های تجزیه‌های عنصری با استفاده از تکنیک‌های پراش پرتو ایکس (XRD) و فلورئورسانی پرتو ایکس (XRF) استفاده شد. با توجه به اهمیت ارتباط ژئوشیمیایی عنصرها، برای شناسایی و تحلیل همبستگی آن‌ها در این مقاله روش‌های آماری و تجزیه‌ی خوشه‌ای و تجزیه به عامل‌های اصلی به کار گرفته شد. استفاده از این روش‌ها برای تحلیل آماری مؤلفه‌های اصلی بر روی نتیجه‌های تجزیه‌ی فلورئورسانی پرتو ایکس نمونه‌های این پژوهش بسیار مناسب بوده است. به طور ویژه مؤلفه‌ها (عنصرها و ترکیب‌های موجود) برای ۵۴ نمونه‌ی انتخاب شده (با بیش‌ترین مقدار P_2O_5) شناسایی شد که آن‌ها به خوبی ارتباط ژئوشیمیایی عناصر پرتوزا و عناصر خاکی نادر با کانی فسفات را نشان می‌دهند. براساس نتیجه‌های حاصل از ماتریس همبستگی مؤلفه‌ها بعد از چرخش با روش دایرکت ابلیمین، و با بهنجار کردن به روش کایزر، مقدار مؤلفه‌ها و نسبت بین آن‌ها نشان داده شده است و نتیجه‌های تجزیه‌ی فلورئورسانی پرتو ایکس به خوبی به دو مؤلفه‌ی اصلی تقسیم‌بندی شد.

کلیدواژه‌ها: عنصرهای پرتوزا، فسفات رسوبی، فلورئورسانی پرتو ایکس، پراش پرتو ایکس

Study and Statistical Analysis of Geochemical Relations Active Elements in Sedimentary Phosphate Layers of Kuh-e- Lar Zagros-Anticline

F. Bolourchifard^{1,3*}, B. Mehrabi², A. Memar¹, F. Fayazi³

1. Materials and Nuclear Fuel Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 11365-8486, Tehran – Iran
2. Geochemistry Department, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, P.O.Box: 15719-14911, Tehran – Iran
3. Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, P.O.Box: 15719-14911, Tehran – Iran

Abstract: In this research, the layers of the sedimentary environment of the Pabdeh formation, which have different variation amounts of phosphate minerals (Apatite), were studied. The XRF and XRD analyses were performed for determination of the minerals and the radioactive elements, REEs and compounds for 54 selected samples (with high amounts of P_2O_5). According to the importance of the geochemical elements relations and their interpretation, the statistical analysis methods cluster analysis and principal component analysis, (PCA) were used. According to the results of the component correlation matrix, after rotation through the direct oblimin method, and normalizing with Kaiser method, the amounts of components and the ratio between them are well illustrated and the XRF results were divided into two principal components.

Keywords: Radioactive Elements, Sedimentary Phosphate, XRF, XRD

**۱. مقدمه**

لایه‌های فسفات‌دار از محل ترانشه‌ها، چاه‌های حفاری شده و رخنمون‌ها، انجام شده است. نمونه‌ی میکروسکوپی سنگ‌های فسفات‌دار سازند پابده براساس تقسیم‌بندی استاندارد سنگ‌های رسوبی کربناته [۱۲] به‌طور کلی تحت عنوان فسفاتیک بیوکلاستیک و کستون تا گرین‌ستون به همراه گلوکونیت^(۵) قابل نام‌گذاری هستند (شکل ۲).

به‌طور کلی در استفاده از تحلیل‌های آماری، یک یا چند فرضیه‌ی ذهنی در مورد عامل‌های ایجادکننده‌ی همبستگی در بین متغیرها وجود دارد. در این پژوهش نتیجه‌های تجزیه با تکنیک پراش پرتو ایکس وجود کانی‌هایی نظیر آپاتیت (فلوئوروآپاتیت)، کلسیت و کوارتز را نشان داده است، اما ارتباط عنصرهای پرتوزا و هم‌چنین دیگر عنصرهای با این کانی‌ها توسط روش‌های آماری مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت درستی این فرضیه‌ها (در این پژوهش ارتباط عنصرهای موجود در کانی و همبستگی آن‌ها) به کمک دو روش آماری تحلیل عاملی و تحلیل خوشه‌ای^(۶) (شکل ۳) بررسی شده است.

انجام هر تحلیل آماری در این رابطه با آماده‌سازی استاندارد داده‌ها آغاز می‌شود [۱۳، ۱۴]. به‌طور کلی داده‌ها در زمین‌شناسی به‌صورت داده‌های چند متغیره هستند که حجم وسیعی دارند و تنها ممکن است دو یا چند متغیر وابستگی بالایی باهم داشته باشند. بعضی از تحلیل‌های آماری برای کاهش داده‌ها و حذف متغیرهای زاید در مجموعه‌ی داده‌ها استفاده می‌شوند.

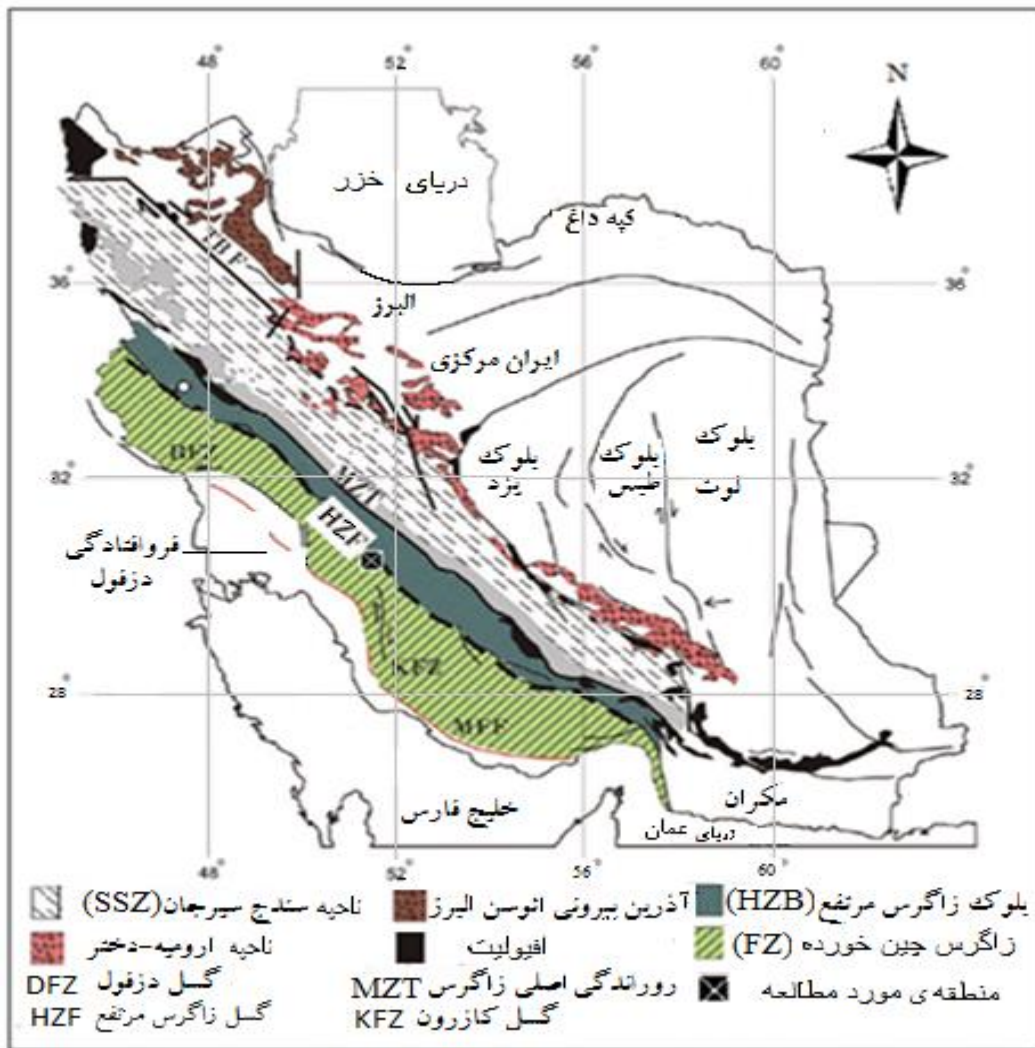
۱.۲ روش‌های آماری

روش‌های تحلیل خوشه‌ای و تجزیه به عامل‌های اصلی^(۷) (PCA) دو روشی هستند که می‌توانند مجموعه‌ای از متغیرهای پیچیده را به صورت الگویی ساده نمایان کنند. بنابر تعریف خوشه‌ای‌سازی^(۸)، عبارت است از گروه‌بندی مجموعه‌ای از اشیاء به صورتی که آن دسته‌ی اشیایی که در یک گروه قرار می‌گیرند آن‌هایی هستند که بیش‌تر به هم شباهت دارند. و نیز هم‌چنین بنابر تعریف، تجزیه به عامل‌های اصلی یک روش آماری است برای تبدیل مجموعه‌ی مشاهده‌ها (که احتمالاً دارای متغیرهای وابسته‌اند) به مجموعه‌ای از مقادیرها که متغیرهای غیروابسته‌ی خطی‌اند. در واقع در تجزیه به عامل‌های اصلی، مؤلفه‌های اصلی غیروابسته به هم، در مجموعه‌ی مشاهده‌های ظاهراً وابسته به هم، از یک‌دیگر تفکیک می‌شوند.

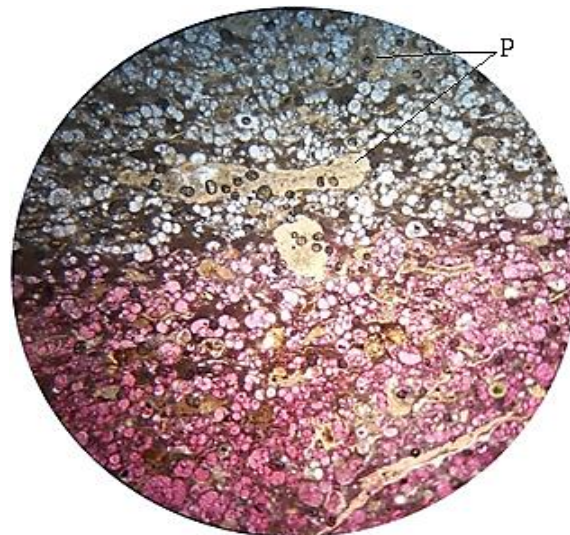
حوضه‌ی رسوبی فسفات‌دار مورد مطالعه در جنوب غرب ایران در کوه‌های زاگرس واقع شده است و سازند زمین‌شناختی اصلی مورد بررسی، سازند پابده^(۱) نام دارد. در بررسی‌های به عمل آمده در محدوده‌ی تاق‌دیس کوه لار لایه‌های فسفات‌دار با ضخامت حدود ۵ متر در طول ۱۴ کیلومتر قابل پی‌جویی هستند. از نظر کانی‌شناسی لایه‌های فسفات‌دار این سازند را کانی آپاتیت فرانکولیت^(۲) با فرمول $(F, Cl, OH)_x (Ca_5(PO_4)_3(CO_3)_z)$ تشکیل می‌دهد [۱]. هم‌چنین نتیجه‌های پراش پرتو ایکس در برخی از برش‌های زمین‌شناختی، حاکی از حضور کانی فلوئوروآپاتیت است. براساس مطالعه‌های انجام شده در سراسر دنیا اغلب ذخیره‌های رسوبی فسفات در دنیا به‌دلیل خصوصیت‌های ژئوشیمیایی خود حاوی مقدارهای مختلفی از مواد پرتوزا و عناصر خاکی نادر (REE) هستند [۵-۱]. البته این فرمول به ظاهر ساده‌ی آپاتیت، عناصر مختلفی را می‌تواند در خود جای دهد و به صورت کامل‌تر $(Th, U, Y, La, \dots, Ca)_5 (PO_4)_3 (F, Cl, OH)_x$ نمایش داده شود و حتی در برخی از متون علمی به صورت: $(Ca_{1-a-b} Na_a Mg_b (PO_4)_{3-x} (CO_3)_{x-y-z} (CO_3 F)_y (SO_4)_z F_z)$ نیز ارایه شده است [۴-۶]. الگوی نمونه‌برداری به دلیل نقش بنیادی آن در مطالعه‌های تجربی باید در ابتدا به‌عنوان یک راهبرد کلی در نظر گرفته شود. به‌طور کلی در مطالعه‌ی پترولوژی سنگ‌های رسوبی اگر برداشت نمونه تنها به‌طور تجربی و بدون تحلیل انجام شود، بی‌شک یک کار بی‌نتیجه، احتمالی و فاجعه‌آمیز خواهد بود [۷]. محیط رسوبی فسفات‌دار در زاگرس چین خورده^(۳) با سنگ بستر به عمق ۲۵ تا ۵۰ کیلومتر [۸-۱۰] در جنوب غرب ایران با توجه به وسعت و مقدار فسفات در سازند پابده، محیط مناسبی برای این پژوهش است. منطقه‌ی مورد مطالعه در زاگرس چین خورده و در جنوب گسل زاگرس مرتفع^(۴) واقع شده است (شکل ۱).

۲. تئوری

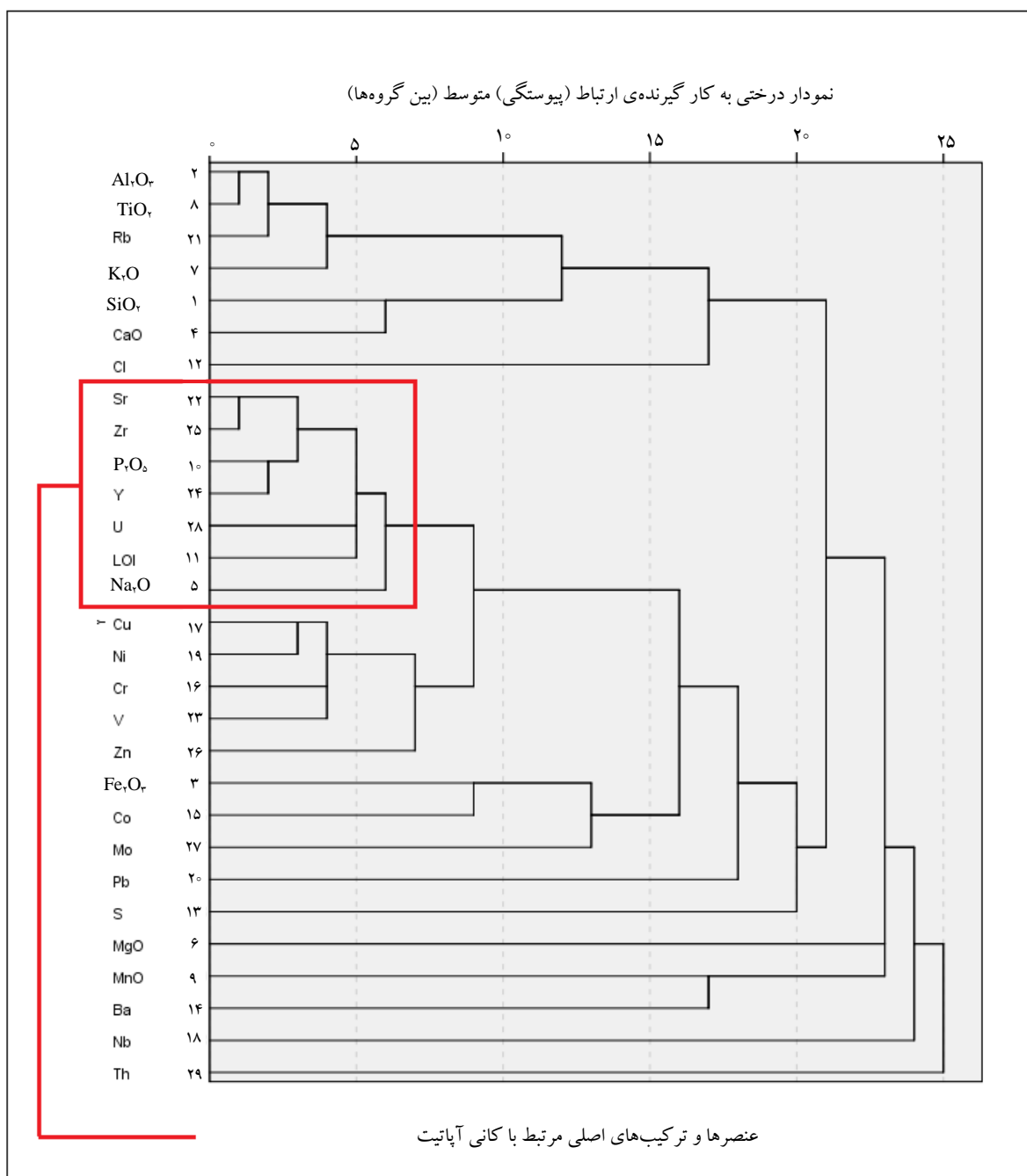
لایه‌های فسفات‌دار سازند پابده، دارای سن ائوسن میانی [۱۱] و از نظر سنگ‌شناسی دارای سنگ‌های آهکی، شیل و مارن هستند و در بعضی از نقطه‌ها رخنمون‌های مناسبی از خود به‌جا گذاشته‌اند. سازند پابده با لیتولوژی خاص خود در بین سازندهای گورپی در پایین و سازند آسماری در بالا واقع شده است. نمونه‌برداری از این



شکل ۱. منطقه‌ی مورد مطالعه در نقشه‌ی زمین‌شناسی ایران [۱۰].



شکل ۲. تصویر میکروسکوپی نمونه‌ی مقطع سنگ فسفات‌دار (P=فسفات) (بزرگ‌نمایی X ۴۰ و PPL) (سنگ آهکی: فسفاتیک بیوکلاستیک و کستون تا گرین ستون به همراه کانی گلوکونیت) با مقدار حدود ۲۹ درصد P_2O_5 دانه‌های کرم قهوه‌ای رنگ که به صورت کشیده و برخی به صورت پخت و یا اوئید دارای هسته (اغلب هسته‌ها از فسیل‌های فرامینیفر هستند) و آنکوئید قابل مشاهده هستند. نیمه‌ی پایینی مقطع توسط محلول آلزارین و پتاسیم سانید مطابق استاندارد با روش دیکسون (۱۹۶۵) رنگ‌آمیزی شده است [۱، ۱۲، ۱۵].



شکل ۳. نمودار درختی^(۹)، عنصرها و ترکیب‌های مرتبط با کانی فسفات‌دار آپاتیت در یک خوشه قرار گرفته‌اند.

برای استفاده از این روش‌ها باید دست کم پنجاه داده باشد. بنابراین به منظور ساده کردن فرایند و تحلیل مجموعه‌ی بزرگ داده‌ها از این روش‌ها استفاده می‌شود و از این رو مفهوم‌های ویژه مقدارها^(۱۰) و ویژه بردارها^(۱۱)، به کار گرفته می‌شوند و در این رابطه، بارگذاری و امتیازدهی مقدارها در چارچوب داده‌های زمین‌شناختی پیچیده است.

این روش‌های آماری بهترین روش برای کاهش حجم متغیرهای اصلی و تبدیل آن‌ها به چند عامل کوچک و قابل تحلیل هستند. البته متغیرهای جدید به گونه‌ای بیان می‌شوند که به‌طور کامل و دقیق می‌توانند مجموعه‌ای از متغیرهای پیچیده را توضیح داده و قابل تحلیل و تفسیر جامع باشند. در اکتشاف کانی‌ها بیش‌ترین کاربرد این روش‌ها در شناسایی ارتباط‌های کانسارها با مجموعه‌ی گسترده و انبوه داده‌های ژئوشیمی است. حجم داده‌ها



جدول ۱. نحوه‌ی جمع شدن خوشه‌ها

ضرب‌های همبستگی (بدون یکا)	خوشه‌های ترکیب شده		مرحله‌های ترکیب خوشه‌ها
	خوشه‌ی ۲	خوشه‌ی ۱	
۰,۹۷۱	۸	۲	۱
۰,۹۶۵	۲۵	۲۲	۲
۰,۹۳۰	۲۴ (Y)	۱۰ (P _۲ O _۵)	۳
۰,۹۰۲	۲۱	۲	۴
۰,۸۷۷	۱۹	۱۷	۵
۰,۸۷۱	۲۲	۱۰	۶
۰,۸۶۰	۷	۲	۷
۰,۸۵۳	۲۳	۱۶	۸
۰,۸۳۱	۱۷	۱۶	۹
۰,۸۲۶	۲۸ (U)	۱۰ (P _۲ O _۵)	۱۰
۰,۸۰۸	۱۱	۱۰	۱۱
۰,۷۸۶	۴	۱	۱۲
۰,۷۷۱	۱۰	۵	۱۳
۰,۷۳۶	۲۶	۱۶	۱۴
۰,۶۷۶	۱۶	۵	۱۵
۰,۶۷۲	۱۵	۳	۱۶
۰,۵۶۹	۲	۱	۱۷
۰,۵۳۳	۲۷	۳	۱۸
۰,۴۰۸	۵	۳	۱۹
۰,۳۷۸	۱۴	۹	۲۰
۰,۳۷۷	۱۲	۱	۲۱
۰,۳۳۹	۲۰	۳	۲۲
۰,۳۰۰	۱۳	۳	۲۳
۰,۲۴۸	۳	۱	۲۴
۰,۱۷۸	۶	۱	۲۵
۰,۱۶۶	۹	۱	۲۶
۰,۱۳۲	۱۸	۱	۲۷
۰,۰۹۱	۲۹	۱	۲۸

در طول عملیات اکتشاف کانی‌ها و معدن‌کاری توده‌های معدنی، مجموعه‌ی داده‌ها به‌طور طبیعی جمع‌آوری می‌شوند. بزرگی و پیچیدگی این مجموعه‌ی داده‌ها یافتن ساختار آن‌ها را مشکل می‌سازد. روش‌های آماری این ساختار را به مجموعه‌ای از اطلاعات معنی‌دار تبدیل می‌کنند. معمولاً داده‌های ژئوشیمیایی به‌صورت ویژه مقدارهای ترکیب‌های مواد گزارش می‌شوند. در واقع تحلیل خوشه‌ای و تجزیه به عامل‌های اصلی به منظور تعیین دسته‌بندی نمونه‌ها بدون داشتن اطلاعات اولیه از ارتباط فضایی و یا زمانی بین آن‌ها به انجام می‌رسد [۱۶].

۲.۲ ارتباط منطقی بین داده‌های عنصرها از طریق نمودار درختی تحلیل خوشه‌ای: این روش بر اساس تشکیل خوشه‌ها بنا شده است، از این‌رو برای استفاده در پدیده‌های زمین‌شناختی بسیار مناسب است. نرم‌افزار SPSS به عنوان یک نرم‌افزار مناسب، میانگین فاصله‌ی بین تمامی زوج-گروه‌ها و دسته‌ها را که نزدیک به هم هستند محاسبه می‌کند [۱۷، ۱۸]. این نرم‌افزار ابتدا هر کدام از عنصرها یا ترکیب‌ها (مثل U و یا P_۲O_۵) را به صورت یک خوشه در نظر می‌گیرد ولی هدف این مقاله این است که مجموعه‌ی عنصرها و ترکیب‌هایی را که وابستگی بیش‌تری به P_۲O_۵ دارند مشخص و به عنوان یک خوشه در نظر بگیرد و این خوشه، خوشه‌ی اصلی مورد نظر است. همان‌طور که در جدول ۱ و شکل ۳ دیده می‌شود، هر کدام از عنصرها و ترکیب‌ها که شماره‌ی خاص مربوط به خود را دارند ابتدا به‌عنوان یک خوشه در نظر گرفته شده است مثلاً شماره‌ی عنصر U همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود برابر ۲۸ است (در واقع هر یک از این خوشه‌ها یک عنصر یا یک ترکیب از نتیجه‌های تجزیه‌ی فلورسانتی پرتو ایکس ۵۴ نمونه‌ی انتخاب شده با بیش‌ترین مقدار P_۲O_۵ از فسفات‌های لایه‌ی رسوبی فسفات‌دار سازند پابده هستند). بنابر این، در جدول ۱ هر شماره که به یک خوشه نسبت داده شده است در واقع یک عنصر یا یک ترکیب مشخص شده در نمودار شکل ۳ است.



۳. یافته‌ها و بحث

پس از مقیاس‌گذاری خودکار^(۱۳)، بررسی خود-همبستگی (واریانس) عنصرها یا ترکیب‌ها، به منظور تحلیل آماری ارتباط داده‌ها، برای عنصرهای مختلف با استفاده از نرم‌افزار آماری SPSS بر روی داده‌های فلونورسانی پرتو ایکس انجام شد. این همبستگی عنصرها یا ترکیب‌ها به صورت آمار توصیفی، در جدول ۲ درج شده است. تجزیه‌ی فلونورسانی پرتو ایکس هر کدام از عنصرها یا ترکیب‌ها بر روی ۵۴ نمونه صورت گرفت که به دلیل حجم زیاد داده‌ها تنها آمار توصیفی آن‌ها در جدول ۲ درج شده است. به منظور آزمایش مناسب و کافی بودن تعداد نمونه‌ها یا داده‌ها برای انجام تجزیه به عامل‌های اصلی که تجزیه‌ی عاملی هم نامیده می‌شود، از آزمون‌های کایزر-مایر-الکین (KMO) و بارتلت^(۱۴) استفاده شد [۱۹]. مقدار عددی این آزمون هرچه به یک نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی کافی بودن تعداد نمونه‌ها است. مقدار عددی ۰٫۷۶۸ به دست آمده برای آزمون KMO (که نزدیک به یک است)، نشان‌دهنده‌ی کافی بودن تعداد نمونه‌ها برای به کارگیری روش تجزیه‌ی عاملی است. از آنجا که برای معنی دار بودن یک عامل اصلی (از مجموع تمامی عامل‌های اصلی) لازم است متغیرها همبستگی داشته باشند، برای اطمینان از این که ماتریس همبستگی‌هایی که پایه‌ی روش تجزیه‌ی عاملی قرار می‌گیرند در جامعه (جامعه در این پژوهش، لایه‌ی فسفات‌دار سازند پابده است) برابر با صفر نباشد، باید از آزمون بارتلت استفاده کرد. این آزمون زمانی که مقدار عددی آن کم‌تر از ۰٫۰۵ باشد، نشان می‌دهد ارتباط معنی دار بین متغیرها برقرار است. در مورد داده‌های مورد استفاده‌ی این مقاله همان‌طور که در جدول ۳ ملاحظه می‌شود این مقدار برابر ۰٫۰۰۰ (کم‌تر از ۰٫۰۵) است که نشان‌دهنده‌ی همبستگی متغیرهای موجود و مناسب بودن روش تجزیه‌ی عاملی است.

از تحلیل‌های خوشه‌ای انجام شده در این پروژه، مشخص شد که محدوده‌ی قرار گرفته در مستطیل شکل ۳ خوشه‌ی اصلی موردنظر این مقاله است. در این خوشه همان‌طور که دیده می‌شود عنصرها و ترکیب‌های $Y, U, Na_2O, Zr, Sr, P_2O_5$ قرار گرفته‌اند؛ این بدان معنی است که به بیان ساده‌تر عنصرها و ترکیب‌های $Y, U, Na_2O, Zr, Sr, P_2O_5$ وابستگی زیادی به P_2O_5 (کانی آپاتیت) دارند (جدول ۱ و شکل ۳).

روش تحلیل تجزیه به عامل‌های اصلی (PCA): روش تحلیلی تجزیه به عامل‌های اصلی، شیوه‌ی مناسبی برای شناسایی عامل‌هایی است که از لحاظ آماری واریانس و کواریانس بین متغیرها را تعیین می‌کند. به طور کلی تعداد عامل‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای از تعداد متغیرها کم‌تر است، در نتیجه، متغیرها به تعداد عامل‌ها خلاصه می‌شوند. از این دیدگاه تحلیل عاملی از این جهت که برای کاهش تعداد زیاد متغیرهایی است که با هم هم‌پوشانی دارند، روش بسیار مناسبی محسوب می‌شود [۱۸] و به تنهایی ساختار داده‌ها را در جایی که تشخیص همبستگی عنصرها مقدور نیست به وضوح آشکار می‌سازد. برخی از مقدارهای تکراری بین گروه‌های تعیین شده در عامل‌ها ممکن است نیاز داشته باشند که از نظر ریاضی بهینه‌سازی و متعادل شده، و به صورت سه‌بعدی مشاهده شوند. در این پژوهش با توجه به جدول ارتباط عنصرها و ترکیب‌های موجود برای رسیدن به نتیجه‌ی مناسب، از روش تحلیلی تجزیه به عامل‌های اصلی توسط نرم‌افزار SPSS استفاده و با به کارگیری مناسب عامل‌های اصلی از روی منحنی اسکری^(۱۲)، مناسب‌ترین ساختار ارتباطی بین گروه‌های اصلی معرفی شده است. منحنی اسکری، نموداری است که محور عمودی آن ویژه مقدارها و محور افقی آن تعداد متغیرها است. ویژه مقدار میزانی از واریانس متغیرهایی است که توسط یک عامل توصیف و تبیین می‌شود [۱۸].



جدول ۲. آمار توصیفی داده‌ها (ی حاصل از نتیجه‌های تجزیه‌ی فلوتورسانی پرتو ایکس)

تعداد نمونه‌ها	معیار انحراف (یکاهای هر کدام مطابق داده‌های ستون قبلی)	میانگین (یکاهای هر کدام مطابق داده‌های ستون قبلی)	عنصرها و ترکیب‌ها	تعداد
۵۴	۷,۰۱۷۶۸۸	۱۱,۸۹۹۶۹	SiO _۲ (%)	۱
۵۴	۱,۱۱۷۳۱۰	۱,۶۵۳۷۶	Al _۲ O _۳ (%)	۲
۵۴	۰,۵۵۷۴۶۲	۱,۸۳۵۵۴	Fe _۲ O _۳ (%)	۳
۵۴	۵,۷۲۸۳۲۶	۴۱,۵۲۰۳۰	CaO* (%)	۴
۵۴	۰,۰۴۰۲۹۹	۰,۰۸۳۳۰	Na _۲ O (%)	۵
۵۴	۲,۰۶۵۸۵۲	۰,۸۰۲۷۶	MgO (%)	۶
۵۴	۰,۲۷۱۵۸۷	۰,۶۷۳۳۱	K _۲ O (%)	۷
۵۴	۰,۰۴۸۸۷۷	۰,۰۷۶۹۶	TiO _۲ (%)	۸
۵۴	۰,۰۰۰۳۲۰۰	۰,۰۲۰۰۶	MnO (%)	۹
۵۴	۸,۹۷۴۴۸۸	۱,۲۰۵۰۷	P _۲ O _۵ * (%)	۱۰
۵۴	۸,۶۶۴۵۱۱	۲۴,۸۹۰۹۳	LOI (%)	۱۱
۵۴	۴۲,۰۹۴۴۲۱	۲۱,۰۷۲۲۲۲	Cl(ppm)	۱۲
۵۴	۳۸۶,۳۵۶۸۰۳	۷۰۴,۰۷۴۰۷	S(ppm)	۱۳
۵۴	۱۷۵,۹۶۳۰۱۱	۱۲۳,۳۳۳۳۳	Ba(ppm)	۱۴
۵۴	۲,۲۶۳۰۱۷	۴,۵۳۷۰۴	Co(ppm)	۱۵
۵۴	۸۸,۰۰۱۱۷۲۵	۱۴۶,۱۲۹۶۳	Cr(ppm)	۱۶
۵۴	۱۱,۳۰۸۲۸۷	۹,۱۶۶۶۷	Cu(ppm)	۱۷
۵۴	۱,۷۵۷۴۸۴	۲,۰۷۴۰۷	Nb(ppm)	۱۸
۵۴	۴۱,۹۷۰۶۴۰	۷۴,۱۱۱۱۱	Ni(ppm)	۱۹
۵۴	۲,۷۰۳۱۰۵	۷۹,۷۰۳۷۰	Pb(ppm)	۲۰
۵۴	۵,۷۲۵۱۵۷	۲۷,۴۲۵۹۳	Rb(ppm)	۲۱
۵۴	۳۵۷,۸۵۴۴۲۵	۱۱۰۹,۶۱۱۱۱	Sr(ppm)	۲۲
۵۴	۲۱,۹۱۲۹۶۱	۴۳,۴۶۲۹۶	V(ppm)	۲۳
۵۴	۲۳,۰۶۴۰۳۴	۴۳,۴۴۴۴۴	Y(ppm)	۲۴
۵۴	۲۹,۵۸۷۹۹۹	۱۰۹,۷۲۲۲۲	Zr(ppm)	۲۵
۵۴	۱۰,۶۰۵۱۲۰۲۳	۱۲۳,۹۸۱۴۸	Zn(ppm)	۲۶
۵۴	۲,۷۱۷۰۳۰	۳۱,۲۹۸۳۰	Mo(ppm)	۲۷
۵۴	۱۹,۶۳۴۰۳۸	۲۱,۲۹۶۳۰	U*(ppm)	۲۸
۵۴	۰,۴۱۹۶۴۳	۰,۱۱۱۱۱	Th(ppm)	۲۹

شده‌اند (۲۹ عنصر یا ترکیب مربوط به نتیجه‌های فلوتورسانی پرتو ایکس)، کمیت‌های مهمی هستند و در جدول ۴ در ستون ویژه مقادارها درج شده‌اند. ویژه مقدار برای یک مؤلفه باید بزرگ‌تر یا مساوی صفر باشد و نباید به تعداد کل مؤلفه‌ها (که در این جا ۲۹ است) برسد. در جدول ۴ پارامتر درصد واریانس برابر با ویژه مقدار تقسیم بر مقدار کل مؤلفه‌ها ضرب در ۱۰۰ است. به عنوان مثال: ویژه مقدار برای عامل اول برابر ۱۱,۰۹۲ و درصد واریانس آن به صورت زیر به دست می‌آید:

$$(\text{جدول ۴ ردیف اول}) \times 100 = 38,247 \quad (11,092:29)$$

جدول ۳. نتیجه‌های آزمون کوما و بارتلت نمونه‌ها

آزمون کوما و بارتلت		
شایستگی اندازه یا تعداد نمونه‌گیری کایزر-مایر-الکین		۰,۷۶۸
آزمون بارتلت کره‌واری	معنی داری	۰,۰۰۰

اقدام بعدی در روش تجزیه به عامل‌های اصلی این است که ویژه مقدارها را برای هر کدام از ۲۹ عنصر یا ترکیب مربوط به نتیجه‌های فلوتورسانی پرتو ایکس به دست آوریم (جدول ۲ را ملاحظه کنید). ویژه مقدارهایی که برای مؤلفه‌های ۱ تا ۲۹ فهرست

**جدول ۴.** ویژه مقادارهای مربوط به ۲۹ مؤلفه (عنصر یا ترکیب)

(عنصر یا ترکیب)	ویژه مقادارهای اصلی (بدون یکا)		
	درصد واریانس	کل	درصد تجمعی
۱	۳۸,۲۴۷	۱۱,۰۹۲	۳۸,۲۴۷
۲	۲۰,۷۸۰	۶,۰۲۶	۵۹,۰۲۷
۳	۷,۰۳۸	۲,۰۴۱	۶۶,۰۶۵
۴	۵,۶۰۰	۱,۶۲۴	۷۱,۶۶۵
۵	۵,۱۱۹	۱,۴۸۵	۷۶,۷۸۴
۶	۳,۸۶۳	۱,۱۲۰	۸۰,۶۴۷
۷	۳,۲۶۶	۰,۹۴۷	۸۳,۹۱۲
۸	۲,۸۳۶	۰,۸۲۳	۸۶,۷۴۹
۹	۲,۵۶۸	۰,۷۴۵	۸۹,۳۱۷
۱۰	۲,۰۷۱	۰,۶۰۱	۹۱,۳۸۸
۱۱	۱,۸۷۲	۰,۵۴۳	۹۳,۲۶۰
۱۲	۱,۵۳۵	۰,۴۴۵	۹۴,۷۹۵
۱۳	۱,۳۰۳	۰,۳۷۸	۹۶,۰۹۸
۱۴	۰,۹۶۴	۰,۲۸۰	۹۷,۰۶۳
۱۵	۰,۶۲۰	۰,۱۸۰	۹۷,۶۸۲
۱۶	۰,۵۲۴	۰,۱۵۲	۹۸,۲۰۷
۱۷	۰,۴۳۲	۰,۱۲۵	۹۸,۶۳۹
۱۸	۰,۳۳۹	۰,۰۹۸	۹۸,۹۷۸
۱۹	۰,۳۰۱	۰,۰۸۷	۹۹,۲۸۰
۲۰	۰,۱۸۴	۰,۰۵۳	۹۹,۴۶۴
۲۱	۰,۱۵۸	۰,۰۴۶	۹۹,۶۲۱
۲۲	۰,۱۰۰	۰,۰۲۹	۹۹,۷۲۱
۲۳	۰,۰۹۱	۰,۰۲۶	۹۹,۸۱۲
۲۴	۰,۰۶۴	۰,۰۱۸	۹۹,۸۷۶
۲۵	۰,۰۵۹	۰,۰۱۷	۹۹,۹۳۴
۲۶	۰,۰۳۲	۰,۰۰۹	۹۹,۹۶۶
۲۷	۰,۰۱۵	۰,۰۰۴	۹۹,۹۸۱
۲۸	۰,۰۱۳	۰,۰۰۴	۹۹,۹۹۴
۲۹	۰,۰۰۶	۰,۰۰۲	۱۰۰,۰۰۰

معیار دوم: استفاده از آزمون اسکری ویژه مقادارها با بررسی خروجی آن در منحنی اسکری است. معیار به این صورت است که تنها آن دسته از ویژه مقادارها که در قسمت شیب- زیاد منحنی پیش گفته قرار گرفته‌اند ملاک تعیین تعداد عامل‌های اصلی هستند. این معیار، نتیجه‌های دقیق‌تری را نسبت به معیار اول ارائه می‌دهد. بنابراین در این پژوهش، مطابق نمودار اسکری تهیه شده باید دو عامل اصلی برای متغیرهای موجود در نظر گرفته می‌شد. متغیرها بعد از چرخش براساس همبستگی آن‌ها به این دو عامل تقسیم‌بندی می‌شوند. به شکل نمودار اسکری توجه کنید (شکل ۴).

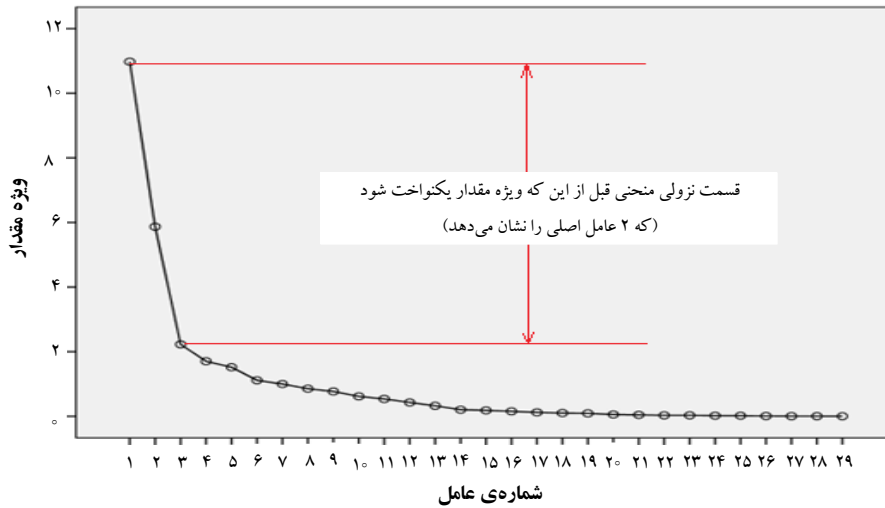
۴. تحلیل آماری براساس نتیجه‌های نرم‌افزاری و داده‌های زمین‌شناختی سنگ‌شناسی

۱.۴ ماتریس عامل چرخیده‌ی حاصل از روش تجزیه‌ی عاملی به‌طور کلی هدف‌های چرخش در تجزیه‌ی عاملی عبارت است از: (۱) چرخش باعث می‌شود تا بدانیم کدام متغیر به کدام عامل تعلق دارد. (۲) ساختار عامل‌های اصلی با چرخش ساده می‌شود. یعنی تعداد عامل‌ها کم‌تر و تفسیر آن‌ها آسان‌تر می‌شود. (۳) با چرخش، پیچیدگی متغیرها کم می‌شود. (۴) پس از چرخش، معنی عامل‌ها، که قبل از آن قابل تشخیص نیستند، مشخص می‌شود. دو روش برای چرخش عامل‌ها وجود دارد: (۱) چرخش‌های متعامد (مانند واریمکس^(۱۵))؛ (۲) چرخش‌های مایل (مانند ابلیمین^(۱۶)).

در این مقاله از روش چرخش مایل ابلیمین استفاده شده است که در آن هر یک از محورها به‌صورت منفرد و بدون حفظ درجه‌ی اولیه می‌چرخند. در چرخش مایل عامل‌ها با یک‌دیگر همبسته‌اند اما در این چرخش دو عامل ایجاد شده بیش‌ترین جداسازی ممکن بین مؤلفه‌ها را ایجاد می‌کنند. در این مقاله با توجه به وجود همبستگی بین متغیرهای اولیه، نتیجه‌های حاصل از این روش چرخش ابلیمین منطقی‌تر و مناسب‌تر بوده است. با استفاده از این روش، موردهای $Th, U, Zn, Y, Cl, Sr, Na_2O, P_2O_5, Al_2O_3, MnO, TiO_2, K_2O, MgO, CaO, Fe_2O_3, SiO_2, Mo, Ba, Co, Cr, Cu, Ni, Nb, Rb, V, Zr, S$ و هدر رفت افروزش^(۱۷) عامل دوم هستند. با یک بررسی ساده می‌توان فهمید که این داده‌ها به‌صورت خود- جهت یافته بوده (یعنی خودشان در عامل مربوط به خود قرار گرفته‌اند) و جدا از عامل دیگر هستند.

ویژه مقادارها برای تصمیم‌گیری در خصوص این که چه تعداد عامل برای تحلیل‌ها باید استفاده شود، سودمند هستند. اکثر معیارها به منظور این که بدانیم چه تعداد عامل لازم است بررسی شود، باید براساس بزرگی و مقدار ویژه مقادارها انتخاب شود. این معیارها عبارت‌اند از:

معیار اول: یکی از معیارها این است که تمامی عامل‌هایی را که ویژه مقادارهای آن‌ها از ۱ بزرگ‌تر است در بررسی وارد کنیم.



شکل ۴. نمودار اسکری.

مناسب بوده و توانسته است به طور ویژه همان طوری که نشان داده شد مؤلفه‌ها (عنصرها و ترکیب‌های موجود) برای ۵۴ نمونه‌ی جمع‌آوری شده را به خوبی به دو عامل اصلی تقسیم نماید. نتیجه‌ی تحلیل عامل‌های اصلی در این پژوهش عبارت است از: مورد‌های $Th, U, Zn, Y, Cl, Sr, Na_2O, P_2O_5, Al_2O_3, Ba, Mo, MnO, TiO_2, K_2O, MgO, CaO, Fe_2O_3, SiO_2, S, Zr, V, Rb, Pb, Ni, Nb, Cu, Cr, Co$ و هدر-رفت آفرزش عامل دوم هستند و به خوبی ارتباط ژئوشیمیایی عنصرهای پرتوزا و عنصرهای خاکی نادر با کانی فسفات را در عامل اول نشان می‌دهند. بنابراین ملاحظه می‌شود که هر دو روش تحلیل خوشه‌ای و تحلیل عامل‌های اصلی ما را به یافته‌های تقریباً یکسانی می‌رسانند. در نهایت استفاده از روش‌های آماری ارایه شده در این مقاله، به منظور بررسی صحت فرضیه‌ها و نیز تفسیر دقیق ارتباط متغیرهای موجود و کنترل یافته‌ها در انجام پروژه‌های اکتشافی مناسب بوده و برای استفاده در پروژه‌های مشابه پیشنهاد می‌شود.

جدول ۵. ماتریس همبستگی مؤلفه‌ها (بعد از چرخش به روش ابلیمین)

ماتریس همبستگی مؤلفه‌ها (بدون یکا)		
مؤلفه‌ها	مؤلفه‌ی اول	مؤلفه‌ی دوم
۱	۱,۰۰۰	۰,۰۷۷
۲	۰,۰۷۷	۱,۰۰۰

روش استخراج: تحلیل مؤلفه‌های اصلی

روش چرخش: ابلیمین همراه با بهنجارسازی کایزر

نرم‌افزار SPSS قبل از چرخش پیش گفته برای داده‌های مورد استفاده پیش‌بینی کرده بود که ۶ عامل اصلی وجود دارد؛ این نتیجه به این دلیل که قبل از چرخش بوده است معتبر نبود و از این رو عملیات چرخش فوق برای به دست آوردن عامل‌های اصلی تا حد امکان کم‌تر صورت گرفت و بعد از چرخش ابلیمین در روش تجزیه به عامل‌های اصلی دو عامل به دست آمد.

بر اساس نتیجه‌های ماتریس همبستگی مؤلفه‌ها به وضوح مشخص می‌شود که نسبت و میزان ارتباط بین دو مؤلفه با روش چرخش مایل با بهنجار کردن کایزر، برابر ۰,۰۷۷ بود، که خیلی به صفر نزدیک است؛ این نشان از همبستگی بسیار جزئی بین دو عامل اصلی ایجاد شده دارد (جدول ۵).

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به نمودار درختی و روش تجزیه‌ی خوشه‌ای برای نمونه‌های موجود مشاهده شد که عنصرها و ترکیب‌های Sr و Zr, Na_2O, U, Y, P_2O_5 در یک خوشه قرار گرفته‌اند که منطبق بر ساختار کانی آپاتیت (و منطبق بر نتیجه‌های تجزیه‌ی پراش پرتو ایکس) است و بنابراین، در روش تجزیه‌ی خوشه‌ای در نهایت در واقع به این نتیجه رسیده‌ایم که تنها عنصرها و ترکیب‌های نامبرده در خوشه‌ی فوق وابستگی زیاد به P_2O_5 دارند و در نتیجه بقیه‌ی عنصرها و ترکیب‌های خوشه وابستگی کمی به P_2O_5 دارند. بنابراین، در تجزیه‌ی خوشه‌ای عملاً به دو خوشه رسیدیم. هم‌چنین نشان داده شد که روش تحلیل عامل‌های اصلی برای تحلیل آماری تجزیه‌ی فلوئورسانی پرتو ایکس نمونه‌های این پژوهش بسیار



قدردانی

بدین وسیله یاد استاد و همکار پژوهشی این مقاله، شادروان آقای دکتر ایوب معمار را که همواره هدایت آن را بر عهده داشته و با کمال تأسف پیش از چاپ این مقاله به رحمت ایزدی پیوستند، گرامی می‌داریم، روحشان شاد.

مرجع‌ها

- [1] A.E. Adams, W.S. Mackenzie, C. Guilford, Atlas of sedimentary rocks under the microscope, Staining a thin section of Limestone (Adapted; Dickson, 1965), Appendix 2, (1984) 99.
- [2] F. Bolourchifard, A. Memar, The Study of Phosphate Rock Forming Minerals (Francolite) of Iran through the EDX-SEM to Assessment of Compositions in Nano-scale, Elsevier- Science Direct Procedia Materials Science, 11 (2015) 108-113.
- [3] I. Jarvis, W.C. Burnett, Y. Nathan, F.S.M. Almbaydin, A.K.M. Attia, L.N. Castro, R. Flicoteaux, M.E. Hilmy, V. Husain, A.A. Qutawnah, A. Serjani, Y.N. Zanin, Phosphorite geochemistry—State-of-the-art and environmental concerns, *Eclogae Geologicae Helvetiae* (Journal of the Swiss Geological Society) 87 (1994) 643-700.
- [4] H. Schlasinger William, H.D. Holland, K.K. Turekian, Biogeochemistry: Treatise on Geochemistry, The Global Phosphorus Cycle, (Ruttenberg, K.C. University of Hawaii, Honolulu, HI, USA), Vol. 8, Chap., 8, 13 (2004) 603.
- [5] J. Asfahani, M. Aissa, R. Al-Hent, Uranium migration in a sedimentological phosphatic environment in northern Palmyrides, Al-Awabed area, Syria, *Journal of Applied radiation and isotopes*, 65 (2007) 1078–1086.
- [6] A. Asma, Aba-Hussain, S. Khaldoun, Al-Bassam, T. Yehya, Al-Rawi, Rare earth elements geochemistry of some paleocene carbonate fluorapatites in Iraq, *Iraqi Bulletin of Geology & Mining*, 6, 1 (2010) 81-94.
- [7] Koch, S. George, J.R. Link, F. Richard, *Statistical Analysis of Geological Data*, John Wiley & Sons, ISBN 0-471-49690-1, Vol. 1 (1970) 265.
- [8] G. Dehghani, J. Makris, The gravity field and crustal structure of Iran, *N. Jb. Geol. Palaeont. Abh* 168 (1984) 215-229.

پی‌نوشت‌ها

1. Pabdeh Formation
2. Francolite
3. Folded Zagros
4. High Zagros Fault (HZF)
5. Phosphatic Bioclastic Mudstone to Wackestone with Glauconite
6. Cluster Analysis
7. Principal Component Analysis
8. Clustering
9. Dendrogram
10. Eigenvalues
11. Eigenvectors
12. Scree Plot
13. Auto-Scaling
14. Kaiser- Meyer- Olkin (KMO) and Bartlett's Test
15. Varimax
16. Oblimin
17. Loss of Ignition (LOI)



- [9] J. Makris, C. Stobbe, Physical properties and state of the crust and upper mantle of the Eastern Mediterranean Sea deduced from geophysical data. *Mar. Geol.* 55 (1984) 347–363.
- [10] M. Berberian, G.C.P. King, Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18, 2 (1981) 210-265, <https://doi.org/10.1139/e81-019>.
- [11] J. Daneshian, Sh. Shariati, A. Salsani, Biostratigraphy and planktonic foraminiferal abundance in the phosphate-bearing Pabdeh Formation of the Lar Mountains (SW Iran), *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen*, 278, 2 (2015) 175-189(15). <https://doi.org/10.1127/njgpa/2015/0522>.
- [12] R.J. Dunham, Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Textures, AAPG Special Volumes, Pub. Id: A038 (1962) 108-121.
- [13] A.S. Kaplunovsky, Factor analysis in environmental studies, *HAIT J. Sci. Eng. B2*, (2005) 54-94.
- [14] C. Reimann, P. Filzmoser, R.G. Garrett, Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities, *Applied Geochemistry*, 17 (2002) 185–206.
- [15] J.A.D. Dickson, A Modified Staining Technique for Carbonates in Thin Section, *NATURE*, 4971 (1965) 587.
- [16] M.F. Gazley, K.S. Collins, J. Roberston, B.R. Hines, L.A. Fisher, A. McFarlane, Application of principal component analysis and cluster analysis to mineral exploration and mine geology, *Aus IMM New Zealand Branch Annual Conference* (2015).
- [17] J. Marques de Sá, Estimating Data Parameters, *Applied Statistics Using SPSS, STATISTICA, MATLAB and R*, (2007) 81-109,
- [18] S.B. Green, N.J. Salkind, *Using SPSS for Windows and Macintosh: Analyzing and understanding data*, Prentice Hall Press (2010).
- [19] S. Shrestha, F. Kazama, T. Nakamura, Use of principal component analysis, factor analysis and discriminant analysis to evaluate spatial and temporal variations in water quality of the Mekong River. *J. Hydroinformatics*, 10 (2008) 43-56.