



## پتانسیل یابی و اکتشافات ژئوشیمیایی ناحیه‌ای اورانیم با استفاده از عناصر ردیاب در برگه‌ی ۱:۱۰۰,۰۰۰ اسفوردی

یوسف قنبری\*<sup>۱</sup>، سینا صائنی<sup>۲</sup>، ایوب معمار<sup>۳</sup>

- ۱- شرکت اکتشاف و تأمین مواد اولیه صنعت هسته‌ای (امکا)، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران-ایران  
۲- دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۱۵۹۱۴، تهران-ایران  
۳- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۸۴۸۶-۱۱۳۶۵، تهران-ایران

**چکیده:** در راستای اجرای طرح سراسری اکتشاف ذخایر اورانیم در ایران مرکزی توسط سازمان انرژی اتمی ایران، برگه‌ی ۱:۱۰۰,۰۰۰ اسفوردی واقع در استان یزد و در حد فاصل شهرهای بافق و بهاباد مورد پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی قرار گرفت. به منظور پتانسیل‌یابی عناصر پرتوزا در این برگه، از نتایج تجزیه‌ی نمونه‌های رسوب آبراهه‌ای برداشت شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده شد. چون عناصر اورانیم و توریم و همچنین عناصر خاکی نادر مورد تجزیه قرار نگرفته بودند، از ردیاب‌های اورانیم برای بررسی استفاده شد. فرایند پردازش داده‌ها شامل بهنجارسازی داده‌ها، بررسی‌های تک‌متغیره و چندمتغیره و در نهایت ترسیم و تفسیر نقشه‌ی آنومالی عناصر است. با توجه به نتایج به دست آمده از بررسی‌های ژئوشیمی، سه محدوده به عنوان مناطق پتانسیل‌دار برای ذخایر اورانیم معرفی شد. این سه محدوده توالی‌های مارن و کانگلوامرا در شمال‌غرب ناحیه، جنوب توده‌ی گرانیته‌ی زیرگان و توالی‌های ماسه‌سنگی همراه با توده‌های کوچک نفوذی در محدوده‌ی اطراف معدن اسفوردی و حد فاصل آن تا حوالی معدن کوشک است. با توجه به نتایج حاصله، می‌توان گفت که برگه‌ی اسفوردی به لحاظ ذخایر اورانیم رسوبی اهمیتی زیادی دارد.

**واژه‌های کلیدی:** عناصر پرتوزا، رسوب آبراهه‌ای، عناصر کم‌مقدار، اسفوردی

## Potential Map Ping and Regional Geochemical Exploration of Uranium by Using Tracers in Esfordi 1:100,000 Sheet

Y. Ghanbari\*<sup>1</sup>, S. Saeni<sup>2</sup>, A. Memar<sup>3</sup>

- 1- Exploration and Preparation of Raw Material of the Nuclear Industry Company (Emka), AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran  
2- Mining and Metallurgy Department, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 15914, Tehran - Iran  
3- Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran - Iran

**Abstract:** According to Atomic Energy Organization of Iran (AEOL) Uranium exploration program in Central Iran, Esfordi 1:100,000 sheet which is located in Yazd province, between Bafq & Behabad cities was prospected. The analysis result of the stream sediment samples which were collected by the Geography Society of Iran (GSI) have been used for radioactive resources of this area. Due to lacking of uranium, thorium and Rare Earth Elements (REE) analysis data, the uranium tracers have been used. The data processing, i.e. normalization, univariate and multivariate analysis were studied and ultimately, anomalies maps were prepared. Three uranium potential areas were introduced. These areas include marl and conglomerate sequence in North-west of region, south of Zarigan granite and sandstone sequence with aplites between Esfordi mine and Kooshk mine. Thus, Esfordi sheet is important as a sediment hosted uranium deposit.

**Keywords:** Radioactive Elements, Stream Sediment, Tracer Elements, Esfordi



با توجه به پتانسیل بالای منطقه‌ی ایران مرکزی به لحاظ داشتن ذخایر مواد معدنی گوناگون به ویژه مواد پرتوزا، این ناحیه بسیار مورد توجه سازمان انرژی اتمی ایران بوده و بر این اساس طرح جامعی برای اکتشاف مواد پرتوزا در این زون به اجرا گذاشته شده است. یکی از نواحی که در این زون مورد پی‌جویی و اکتشاف قرار گرفته، برگه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی است که در استان یزد قرار گرفته و موضوع مورد بررسی در این تحقیق است [۴].

برای پتانسیل‌یابی عناصر پرتوزا در این برگه از داده‌های حاصل از تجزیه‌ی نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای و هم‌چنین از داده‌های رادیومتری هوابرد استفاده شده است. چون نمونه‌ها برای عناصر اورانیم و توریم مورد تجزیه قرار نگرفته‌اند، از عناصر ردیاب، شامل وانادیم، فسفر، روی، مس، آهن، منگنز، استرانسیم و لیتیم برای مطالعات ژئوشیمیایی استفاده شده است. پس از پردازش و تفسیر داده‌های ژئوشیمیایی، نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از بررسی داده‌های رادیومتری مقایسه و در نهایت از تلفیق نتایج این دو روش، سه محدوده به عنوان نواحی دارای پتانسیل اکتشافی برای منابع عناصر پرتوزا معرفی شده است.

## ۲- زمین‌شناسی ناحیه‌ی مورد مطالعه

برگه‌ی ۱:۱۰۰،۰۰۰ اسفوردی در استان یزد و در فاصله‌ی ۳۰ کیلومتری شرق شهر بافق قرار دارد. این برگه با وسعتی در حدود ۲۵۰۰ کیلومتر مربع، محدوده‌ی جغرافیایی ۳۱°۳۰' تا ۳۲°۰۰' عرض شمالی و ۵۵°۳۰' تا ۵۶°۰۰' طول شرقی را شامل می‌شود. از دیدگاه چینه‌شناسی، در این برگه می‌توان نهشته‌های ماسه‌سنگ کوارتزی و شیل سیلتی مربوط به پرکامبرین تا رسوبات آبرفتی عهد حاضر را مشاهده نمود [۵].

به لحاظ سنگ‌شناسی سه دسته سنگ مهم را می‌توان در برگه‌ی اسفوردی تشخیص داد. دسته‌ی اول شامل توالی‌های رسوبی است که رخنمون‌های مارن و کانگلومرایی در شمال برگه و هم‌چنین رخنمون‌های کوچک و بزرگ ماسه‌سنگ و شیلی، در مرکز و شرق و تا حدودی غرب و جنوب آن را دربر می‌گیرد. دسته‌ی دوم شامل توده‌های نفوذی است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به توده‌ی گرانیتی زیریگان در شمال غرب، توده‌ی ناریگان در مرکز و توده‌ی گرانیتی بهاباد در شرق برگه اشاره کرد. دسته‌ی سوم نیز توالی‌های آهکی در جنوب و غرب و رخنمون‌های پراکنده‌ی آن در سایر نقاط را دربر دارد [۶].

با توجه به کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی (که از منابع مهم انرژی به شمار می‌روند) از یک سو و تجدیدپذیری طولانی مدت آن‌ها از سوی دیگر، توجه بشر به سمت و سوی منابع جدید انرژی معطوف شده است. یکی از مهم‌ترین منابع جدید انرژی، انرژی هسته‌ای است و به همین دلیل ذخایر عناصر پرتوزا بسیار مورد توجه بوده و اکتشاف و استخراج آن‌ها برای هر کشور به عنوان یک دارایی راهبردی قلمداد می‌گردد.

در بین عناصر پرتوزا، اورانیم به لحاظ کاربرد آن در رآکتورهای هسته‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. اورانیم در سال ۱۸۹۲ توسط م. کلاپروت، شیمی‌دان آلمانی کشف و با دست‌یابی به رابطه‌ی هم‌ارزی جرم و انرژی اینشتین ( $E=mc^2$ ) اورانیم به عنوان ماده‌ای برای تولید انرژی مطرح و از آن پس به عنوان یکی از منابع انرژی استفاده شد. اورانیم طبیعی دارای سه ایزوتوپ بوده و فراوانی آن در پوسته (مقدار کلارک) برابر ۲,۵ppm است که مقدار آن از سنگ‌های بازیک به سمت اسیدی افزایش می‌یابد. حداقل عیار قابل استخراج اورانیم به روش‌های معمولی، در کانسنگ آن برابر با ۰/۱ درصد است [۱].

کانی‌های اورانیم در محیط کاهنده شامل اکسیدهای اورانیم است که مهم‌ترین آن‌ها اورانینیت و پچیلاند می‌باشد. کانی‌های محیط اکسند شامل گروه وانادات‌ها، فسفات‌ها، سیلیکات‌ها و آرسنات‌ها است [۲].

براساس طبقه‌بندی دالکام [۱]، کانسارهای مهم اورانیم به ترتیب شامل کانسارهای دگرشیبی، کانسارهای ماسه‌سنگی، تکتولیتولوژیک، کانگلومرایی، کانسارهای رگه‌ای، کمپلکس برشی، کانسارهای آذرین، فسفریتی، آتشفشانی و دگرگونی است. از میان کانسارهای یاد شده، کانسارهای ماسه‌سنگی و کانگلومرایی اهمیت بسیاری دارند، به طوری که بیش‌تر معادن در حال استخراج در دنیا از این نوع کانسارها هستند.

مهم‌ترین روش‌های اکتشاف ذخایر اورانیم شامل اکتشافات ژئوشیمیایی و ژئوفیزیکی است. روش‌های ژئوشیمی، شامل نمونه‌برداری و مطالعه‌ی رسوبات آبراهه‌ای، خاک‌های سطحی، آب‌های سطحی و زیرزمینی، نمونه‌برداری لیتوژئوشیمی و مطالعه‌ی مغزه‌های حفاری است. در اکتشافات ژئوفیزیکی، از روش‌های رادیومتری هوابرد و زمینی، روش امانومتری و هم‌چنین روش‌های ژئوفیزیکی غیررادیومتری شامل مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و ژئوالکتریک بهره‌برده می‌شود [۳].



با توجه به این که خطای مجاز تجزیه برای نمونه‌های تکراری ۱۰ درصد در نظر گرفته می‌شود [۸]، نتایج تجزیه برای عناصری چون وانادیم، نیکل، مس، منگنز و ... قابل اطمینان نبوده و در مراحل بعدی پردازش و تفسیر نتایج، می‌بایست به آن‌ها توجه می‌شد.

### ۳-۲ پردازش داده‌ها

داده‌های سنسورد داده‌هایی هستند که مقادیر عددی آن‌ها کوچک‌تر یا بزرگ‌تر از حد حساسیت دستگاه تجزیه می‌باشد. این داده‌ها عدم تشخیص دستگاه را نشان داده و در داده‌پردازی معنی‌دار نیستند. لذا، به روش‌های مختلف باید جای‌گزین شوند.

از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۸]

- بیش‌ترین درست‌نمایی کوهن،
  - نصف مقدار سنسورد برای داده‌های با مقادیر عددی کوچک‌تر و ۱/۵ برابر برای داده‌های با مقادیر بزرگ‌تر از حد حساسیت،
  - ۳/۴ مقدار سنسورد برای داده‌های با مقادیر عددی کوچک‌تر و ۴/۳ برای داده‌های با مقادیر بزرگ‌تر از حساسیت دستگاه،
- با توجه به این که تعداد داده‌های سنسورد برای عناصر W, Ag, As, Bi, Cd, Mo, Sb, Sn بسیار زیاد و درصد آن نسبت به کل نمونه‌ها بیش از ۹۰ درصد بود، این عناصر از فرایند پردازش حذف شدند و سایر داده‌ها با استفاده از روش سوم جای‌گزین شدند.

### ۳-۳ مطالعات آماری تک‌متغیره

مهم‌ترین گام در پردازش داده‌ها، به دست آوردن پارامترهای آماری و نحوه‌ی توزیع آن‌ها است [۹]. پارامترهای مورد بررسی عبارت‌اند از میانگین، میانه، مد، انحراف معیار و واریانس، چولگی و کشیدگی، بیشینه و کمینه‌ی داده‌ها، که برای ۸۴۳ نمونه‌ی برگه اسفوردی محاسبه و در جدول ۱ نشان داده شده است. این اطلاعات نحوه‌ی پراکندگی داده‌ها حول میانگین و نوع توزیع داده‌ها را به نمایش می‌گذارد. براساس اطلاعات جدول ۱، جامعه‌ی داده‌های خام عناصری مانند منگنز توزیع بهنجار دارند. برای مشخص نمودن تابع توزیع می‌توان از هیستوگرام داده‌ها نیز استفاده نمود. برای تمامی داده‌ها هیستوگرام مربوطه ترسیم شده است که در این جا به عنوان نمونه، هیستوگرام عنصر روی در شکل ۲ نشان داده شده است.

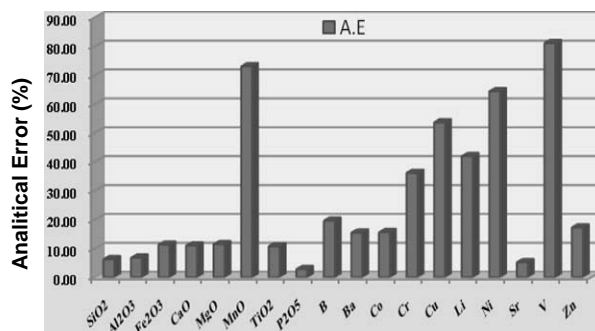
به لحاظ ساخت‌شناسی بیش‌تر گسل‌های موجود با توده‌های نفوذی مرتبط بوده و در اطراف آن‌ها مشاهده می‌شود. مهم‌ترین گسل، گسل کوه‌بنان می‌باشد که در شمال‌شرق محدوده قرار دارد. این گسل از نوع معکوس بوده و امتداد آن شمال‌غربی-جنوب‌شرقی است که سبب جابه‌جایی و به هم ریختگی توالی مارن، ماسه‌سنگ و کانگلوما در این بخش شده است.

از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی کانسارها و معادن مختلفی در ناحیه وجود دارد که از جمله‌ی آن‌ها می‌توان به معادن سرب و روی کوشک، سنگ آهن سه‌چاهون، آپاتیت-مگنتیت اسفوردی و منگنز نارینگان اشاره کرد [۴].

### ۳- مطالعات ژئوشیمیایی

#### ۱-۳ نمونه‌برداری و تجزیه‌ی نمونه‌ها

برای مطالعات ژئوشیمیایی، از داده‌های نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای برداشت شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور استفاده شده است. در مجموع تعداد ۸۴۳ نمونه از کل برگه برداشت شده که با توجه به وسعت تقریبی ۲۵۰۰ کیلومتر مربع آن، چگالی شبکه‌ی نمونه‌برداری، یک نمونه به ازای هر ۳۳ کیلومتر مربع است. نمونه‌ها با استفاده از تکنیک‌های پلاسما جفت شده‌ی القایی (ICP) و فلورسانس پرتو ایکس (XRF) برای ۲۸ عنصر و اکسید تجزیه شدند. نتایج تجزیه برای عناصر برحسب ppm و برای اکسیدها برحسب درصد است. لازم به ذکر است که در پردازش‌های آماری، داده‌های برحسب درصد، با توجه به عدد اتمی به یکای ppm تبدیل و پردازش بر روی آن‌ها صورت گرفته است. از عوامل مهم برای دست‌یابی به نتایج بهینه از عملیات اکتشافی، تجزیه‌ی دقیق نمونه‌ها است [۷]. برای بررسی دقت تجزیه‌ی نمونه‌ها، از نتایج تجزیه‌ی ۳۰ نمونه‌ی تکراری استفاده و درصد خطای تجزیه برای ۱۸ عنصر محاسبه شد که نتایج آن در شکل ۱ ارایه شده است.



شکل ۱- نمودار ستونی خطای تجزیه‌ای محاسبه شده برای عناصر مختلف.



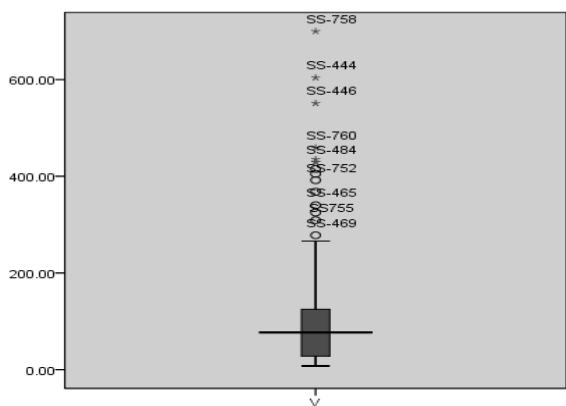
با توجه به این که برای مطالعات آماری چندمتغیره نیاز به جوامعی با توزیع بهنجار بود، داده‌ها به لحاظ آماری بهنجار شدند. برای بهنجارسازی، ابتدا در بین داده‌ها مقادیر خارج از رده با استفاده از روش دورفل [۸] شناسایی و سپس با مقادیر محاسبه شده از این روش جایگزین شدند. از نمودارهای جعبه‌ای برای جدایش مقادیر خارج از رده و تأیید روش دورفل استفاده شد که نمونه‌ای از آن برای عنصر وانادیم در شکل ۳ نشان داده شده است. پس از انجام تصحیح دورفل اکسیدهای فسفر و هم‌چنین عناصر بور و استرانسیم توزیع تقریباً بهنجار نشان دادند.

در مرحله‌ی نهایی داده‌های عناصری مانند باریم، کبالت، مس، لیتیم و وانادیم که پس از انجام مراحل قبل دارای توزیع بهنجار نبودند، از طریق تبدیل به لگاریتم طبیعی، به شکل داده‌های با توزیع بهنجار درآمدند. جدول ۲ پارامترهای آماری تعدادی از داده‌های بهنجار شده را نشان می‌دهد. از نمودارهای هیستوگرام نیز برای بررسی بهنجاری بودن داده‌ها استفاده شد (شکل ۲).

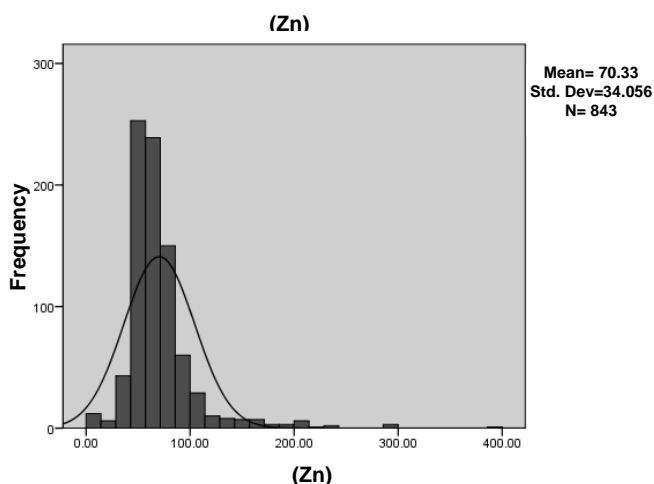
جدول ۱- پارامترهای آماری داده‌های خام.

عنصر	Zn	V	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	MnO*	Cu	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
تعداد داده‌ی معتبر	۸۴۳	۸۴۳	۸۴۳	۸۴۳	۸۴۳	۸۴۳
میانگین	۷۰٫۳۳	۸۶٫۲۵	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۲۴٫۴۳	۶٫۰۷
میانه	۶۳	۷۷	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۲۱	۵٫۴۰
مد	۵۵	۷۵٫۰	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۳٫۷۵	۵٫۳۰
انحراف معیار	۳۴٫۰۶	۷۴٫۲۲	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۲۰٫۲۰	۱۳٫۷۹
واریانس	۱۱۶۰	۵۵۰۸	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۴۰۸	۱۹۰٫۲۸
چولگی	۳٫۳۷	۲٫۴۵	۱۲٫۷۷	۰٫۴۳	۴٫۱۹	۲۸٫۳۷
کشیدگی	۱۹٫۲۷	۱۲٫۳۵	۳۰۶٫۱۹	۲٫۷۳	۳۶٫۴۸	۸۱۷٫۰۴
کمینه	۷۰٫۵۰	۷۵٫۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۳٫۷۵	۲٫۷۰
بیشینه	۳۹۶	۷۰۰	۰٫۴۰	۰٫۳۹	۲۸۲	۴۰۳
چارک‌ها	۲۵	۵۳	۰٫۱۰	۰٫۰۸	۱۴	۴٫۸۰
	۵۰	۶۳	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۲۱	۵٫۴۰
	۷۵	۷۸	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۲۹	۶٫۱۰

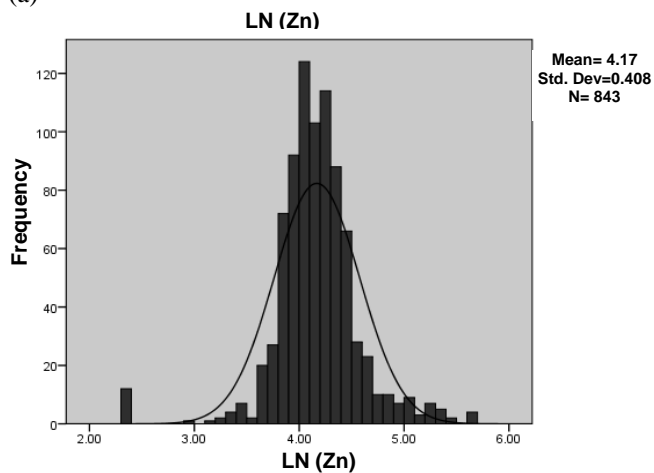
\* داده‌های P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MnO برحسب درصد و سایر داده‌ها برحسب ppm است.



شکل ۳- نمودار جعبه‌ای عنصر روی برای جداسازی مقادیر خارج از رده.



(a)



(b)

جدول ۲- پارامترهای آماری داده‌های بهنجار شده.

عنصر	Zn	V	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cu	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
تعداد داده‌ی معتبر	۸۴۳	۸۴۳	۸۴۳	۸۴۳	۸۴۳	۸۴۳
میانگین	۴٫۱۷	۴٫۰۵	۰٫۱۰۴	۰٫۱۰۳	۲٫۹۳	۵٫۵۲
میانه	۴٫۱۴	۴٫۳۴	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۳٫۰۴	۵٫۴۰
مد	۴٫۰۱	۲٫۰۱	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۱٫۳۲	۵٫۳۰
انحراف معیار	۰٫۴۱	۱٫۰۰۳	۰٫۰۰۶۸	۰٫۰۰۴۶	۰٫۷۶	۱٫۱۶
واریانس	۰٫۱۷	۱٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰۲	۰٫۵۷	۱٫۳۵
چولگی	-۰٫۴۴	-۰٫۵۹	۱٫۰۴	۰٫۲۳	-۰٫۵۲	۰٫۶۷
کشیدگی	۵٫۲۱	-۰٫۴۸	۱٫۸۴	۰٫۳۸۲	۰٫۳۴	۰٫۹۶
کمینه	۲٫۴۰	۲٫۰۱	۰٫۰۹	۰٫۰۱	۱٫۳۲	۲٫۷۰
بیشینه	۵٫۶۶	۶٫۵۵	۰٫۱۳	۰٫۲۶	۴٫۹۸	۹٫۲۰
چارک‌ها	۲۵	۳٫۹۷	۰٫۱۰	۰٫۰۸	۲٫۶۴	۴٫۸۰
	۵۰	۴٫۱۴	۰٫۱۰	۰٫۱۰	۳٫۰۴	۵٫۴۰
	۷۵	۴٫۳۶	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۳٫۳۷	۶٫۱۰

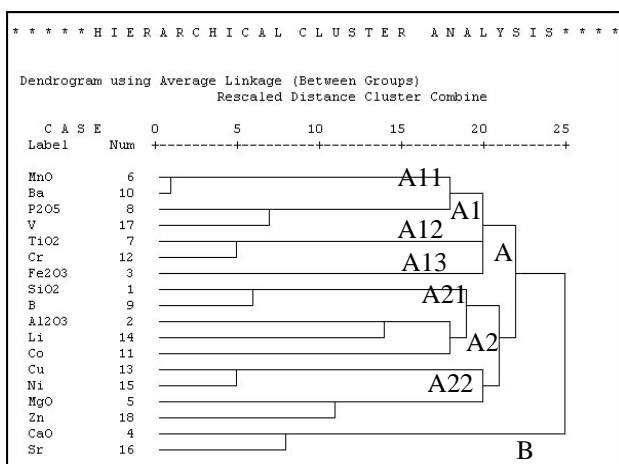
شکل ۲- هیستوگرام توزیع داده‌های خام (a) و بهنجار شده‌ی (b) عنصر روی.



### ۳-۴ تحلیل ضرایب همبستگی

حاصل به صورت دندروگرام نمایش داده شده است (شکل ۴). برای به دست آوردن بهترین دندروگرام از روش‌های مختلف تجزیه‌ی خوشه‌ای استفاده شد و در نهایت بهترین دندروگرام با استفاده از روش اتصال میانگین به دست آمد.

در ساختار خوشه‌ای داده‌ها دو گروه اصلی A و B و ۵ زیرگروه مشاهده می‌شود (شکل ۴). برای مثال، زیرگروه A11 شامل دو زیررده‌ی Ba-MnO و V-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> است. در زیررده‌ی اول Ba و MnO با نزدیکی نسبتاً مناسبی به هم متصل گردیده‌اند. در زیررده‌ی دوم هم P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و V قرار دارند که یک ردیاب برای بررسی حضور کانسارهای اورانیم رسوبی یا گرانیتهی در منطقه می‌باشد [۱۰]. زیرگروه A22 دو زیررده‌ی Cu-Ni و MgO-Zn را دربرمی‌گیرد. در زیررده‌ی اول عناصر Ni و Cu بیش‌ترین نزدیکی را نشان می‌دهند که همراهی این دو عنصر می‌تواند به صورت هاله‌ی ژئوشیمیایی در اطراف کانسارهای ماسیوسولفید یا کانسارهای مس ناشی از توده‌های نفوذی مشاهده گردد.



شکل ۴- دندروگرام حاصل از تجزیه‌ی خوشه‌ای داده‌های رسوب آبراهه‌ای برگی اسفوردی.

ضریب همبستگی، ارتباط و وابستگی متغیرهای مختلف را نشان می‌دهد. در مطالعات ژئوشیمیایی عوامل مختلفی از قبیل عوامل ژنتیکی و غیره می‌تواند در ارتباط و وابستگی متغیرها به یکدیگر مؤثر باشد و مقدار این وابستگی را می‌توان با یک عدد بیان نمود که همان ضریب همبستگی است [۸]. برای محاسبه‌ی ضریب همبستگی از روش مرتبه‌ای اسپیرمن که مستقل از نوع تابع توزیع متغیر مورد بررسی است، استفاده شده است. ماتریس ضرایب همبستگی داده‌ها در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول معنی‌دار بودن هر یک از ضرایب همبستگی در سطح اعتماد ۹۵ درصد توسط یک ستاره و بسیار معنی‌دار در سطح اعتماد ۹۹ درصد با دو ستاره مشخص شده است. معمولاً ضریب همبستگی کم‌تر از ۰/۲ نشان‌گر همبستگی بسیار ضعیف بین دو متغیر است. همبستگی‌هایی که ضرایب آن‌ها بین ۰/۲-۰/۴ است، نشان‌دهنده‌ی همبستگی ضعیف بین متغیرها است. با ضرایب همبستگی بین ۰/۴-۰/۶، مانند ضریب همبستگی بین Co-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (۰/۵۱۹)، V-MnO (۰/۴۴۷) امکان تخمین موفقیت‌آمیز گروهی وجود دارد. با ضرایب همبستگی ۰/۶-۰/۸ میان عناصری چون آهن و تیتانیم، می‌توان تخمین گروهی دقیق انجام داد. با افزایش همبستگی، در محدوده‌های بالاتر امکان تخمین‌های منفرد دقیق نیز وجود دارد. ضرایب همبستگی بالاتر از ۰/۸ نشان‌دهنده‌ی همبستگی بسیار نزدیک بین متغیرها است.

### ۳-۵ تجزیه و تحلیل خوشه‌ای

در تحلیل خوشه‌ای، هدف، دست‌یابی به ملاکی برای طبقه‌بندی هر چه مناسب‌تر متغیرها براساس تشابه هر چه بیش‌تر درون گروهی و اختلاف هر چه بیش‌تر بین گروهی است [۸]. برای گروه‌بندی داده‌ها از روش سلسله‌مراتبی استفاده و نتیجه‌ی

جدول ۳- ضرایب همبستگی داده‌های ژئوشیمیایی.

Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۱/۰۰							
MnO*	**۰/۴۲۳	۱/۰۰						
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	**۰/۳۶۴	**۰/۳۷۶	۱/۰۰					
Co	**۰/۵۱۹	**۰/۱۹۰	**۰/۲۳۵	۱/۰۰				
Cu	**۰/۲۶۶	**۰/۱۰۳	**۰/۱۲۴	**۰/۳۳۳	۱/۰۰			
Sr	-۰/۰۵	**۰/۱۹۵	**۰/۲۳۱	۰/۰۷	۰/۰۲	۱/۰۰		
V	**۰/۲۴۲	**۰/۴۴۷	**۰/۲۵۴	**۰/۰۹۰	*۰/۰۷۷	*-۰/۰۷۲	۱/۰۰	
Zn	**۰/۲۹۷	**۰/۲۰۸	**۰/۱۳۷	**۰/۳۳۸	**۰/۳۷۹	**۰/۱۲۲	-۰/۰۵	۱/۰۰
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Co	Cu	Sr	V	Zn

\* داده‌های P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> و MnO برحسب درصد و بقیه برحسب ppm هستند.



### ۳-۶ تعیین آنومالی‌های ژئوشیمیایی

روش‌های آماری مختلفی برای تعیین مقادیر آستانه‌ای و آنومالی وجود دارد که با مقایسه‌ی نتایج حاصل از هر روش، آنومالی‌های نهایی انتخاب می‌شوند [۱۱]. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان روش حد آستانه‌ای، روش P.N، روش انفصال آماری و روش‌های ساختاری مانند روش فازی، فرکتال و شبکه‌ی عصبی را نام برد [۱۲]. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایبی هستند. در این پروژه برای تعیین آنومالی‌ها از روش حد آستانه‌ای ( $\bar{X} + 2S$ ) استفاده شد. مقدار حد آستانه‌ای برابر مقدار میانگین به اضافه دو برابر انحراف معیار در نظر گرفته شد. بدین ترتیب برای هر متغیر، چهار گروه، متمایز می‌گردد.

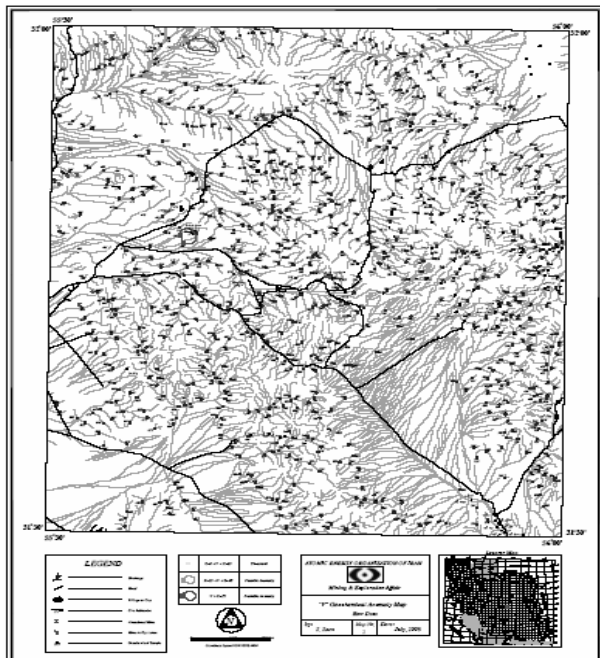
$X$	<	مقدار زمینه	<	$X+1S$
$X+1S$	<	حد آستانه‌ای	<	$X+2S$
$X+2S$	<	آنومالی ممکن	<	$X+3S$
$X+3S$	>	آنومالی احتمالی		

شرط استفاده از روش فوق برای به دست آوردن مقادیر فوق‌الذکر، بهنجار بودن تابع توزیع عناصر می‌باشد.

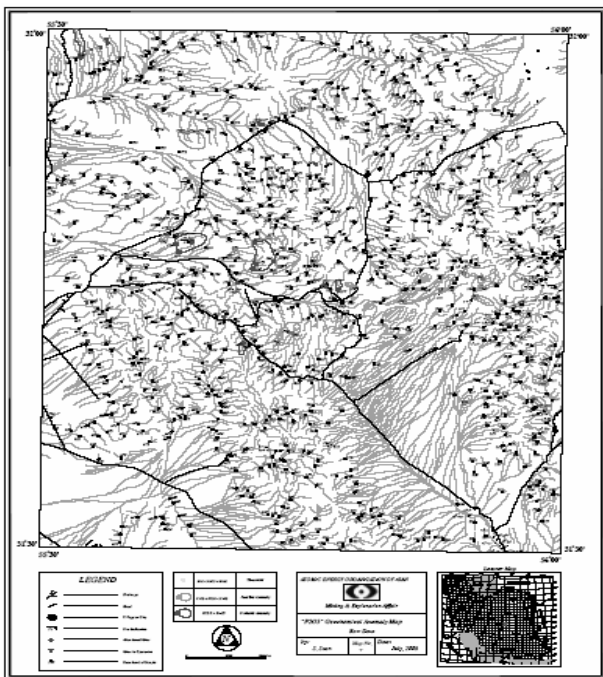
با توجه به این که مقدار عنصر در هر نمونه‌ی رسوب آبراهه‌ای، معرفی از حوضه‌ی بالادست آن است [۱۳]، در این پروژه برای ترسیم نقشه‌ی آنومالی‌ها از نقشه‌های نمادین استفاده شده است. نقشه‌ی نمادین برای عناصر و ترکیبات  $Cu$ ،  $V$ ،  $Zn$ ،  $Fe_2O_3$ ،  $Li$ ،  $P_2O_5$ ،  $Co$  و  $MnO$  رسم شده‌اند. برای نمونه، نقشه‌ی آنومالی  $V$  و  $P_2O_5$ ، به ترتیب، در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. دواپس زرد رنگ در نقشه‌ی آنومالی‌ها معرف نقاط دارای مقادیر زمینه و دواپس و خطوط نارنجی و قرمز به ترتیب معرف آنومالی‌های ممکن و احتمالی است.

مقادیر بزرگ‌تر از  $500 \text{ ppm}$  در نمونه‌های رسوبات آبراهه‌ای برای عنصر وانادیم، مهم تلقی می‌شود. آنومالی‌های این عنصر در محدوده‌ی برگیه‌ی اسفوردی وسعت قابل ملاحظه‌ای ندارند و تنها در بخش شمال‌غربی و غربی برگیه‌ی اسفوردی دیده می‌شوند. با توجه به شکل ۶، آنومالی‌های  $P_2O_5$  در بخش مرکزی و شرقی برگیه به خوبی قابل مشاهده‌اند. اغلب این آنومالی‌ها با توده‌های اسیدی به ویژه گرانیتی مرتبط بوده و در سری سنگ‌های رسوبی مجاور آن‌ها به خصوص در توالی‌های شیل و ماسه‌سنگ قرار گرفته‌اند. از آن‌جا که فسفر به عنوان یکی از عناصر ردیاب

اورانیم در کانسارهای آذرین و متاسوماتیک می‌باشد [۱۰ و ۱۴] و نیز مطابقت آنومالی‌های این عنصر با عناصر روی، مس، آهن و ... در این محدوده، می‌تواند نویدبخش کانی‌سازی اورانیم در این نواحی باشد.



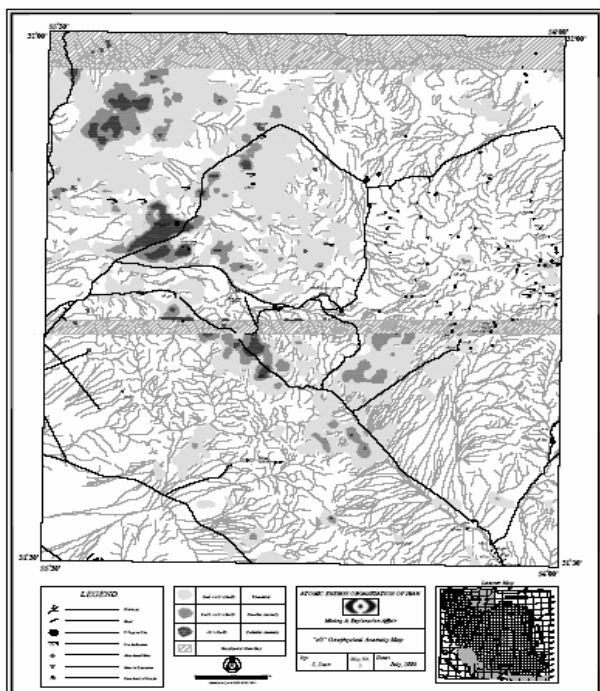
شکل ۵- نقشه‌ی نمادین آنومالی‌های داده‌های رسوبات آبراهه‌ای عنصر وانادیم در برگیه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی.



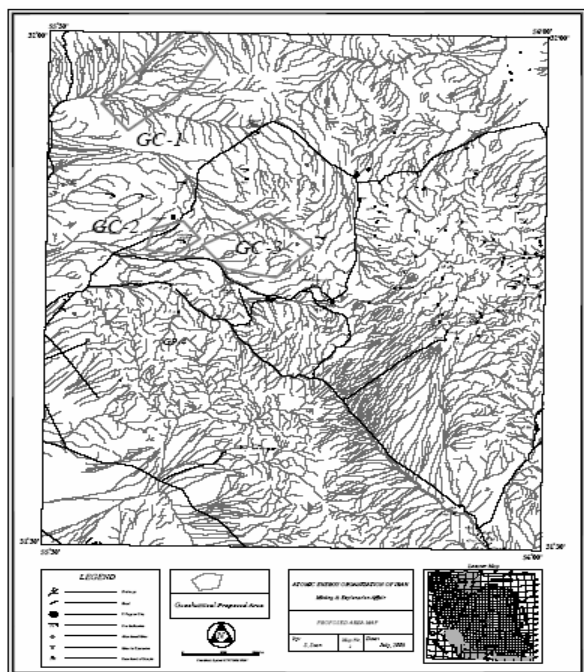
شکل ۶- نقشه‌ی نمادین آنومالی‌های داده‌های رسوبات آبراهه‌ای  $P_2O_5$  در برگیه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی.



ماسه‌سنکی برای مطالعات بیش‌تر و فعالیت‌های اکتشاف نیمه‌تفصیلی، اهمیت بیش‌تری نسبت به توده‌های نفوذی دارند.



شکل ۷- نقشه‌ی آنومالی داده‌های رادیومتری هوابردی برای اورانیم در برگه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی.



شکل ۸- نقشه‌ی جانمایی محدوده‌های پتانسیل‌دار برای اکتشاف تفصیلی اورانیم در برگه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی.

#### ۴- بحث و نتیجه‌گیری

چون در تجزیه‌ی نمونه‌ها، عناصر اورانیم و توریم مورد تجزیه قرار نگرفته بودند، برای رسیدن به هدف تعیین شده در این کار پژوهشی که تعیین پتانسیل عناصر پرتوزا در ناحیه است، از عناصر ردیاب کانسارهای اورانیم برای پتانسیل‌یابی استفاده شد. در کانسارهای رسوبی و رگه‌ای، مهم‌ترین عناصر ردیاب مورد استفاده عناصر روی، وانادیم، فسفر، مس، آهن، کبالت، منگنز و لیتیم هستند [۱۵].

آنومالی‌های وانادیم که به عنوان یکی از مهم‌ترین عناصر ردیاب برای کانسارهای اورانیم رسوبی مطرح هستند [۱۶]، در بخش شمال غرب برگه و در محدوده‌ی رخنمون کانگلومرای نشوژن و هم‌چنین در غرب محدوده و در رخنمون واحدهای ماسه‌سنکی ژوراسیک گسترش زیادی دارند. با توجه به نقشه‌ی آنومالی اورانیم حاصل از داده‌های رادیومتری هوابردی ناحیه‌ی اسفوردی (شکل ۷)، آنومالی‌های اورانیم به خوبی توجیه می‌شوند. آنومالی‌های این عنصر با آنومالی‌های عناصر فسفر، منگنز و آهن مطابقت دارد. این عناصر نیز به عنوان ردیاب‌های مهم اورانیم برای محیط‌های رسوبی مطرح‌اند و لذا محدوده‌هایی را که آنومالی‌های این عناصر در آنجا تطابق دارد می‌توان به عنوان پتانسیل‌هایی برای پی‌جویی اورانیم در ناحیه‌ی برگه‌ی اسفوردی معرفی کرد.

با توجه به مطالعات انجام شده بر روی داده‌های ژئوشیمیایی و مطابقت با نقشه‌های رادیومتری هوابرد موجود نتایج زیر حاصل شد. براساس مطالعات ژئوشیمیایی و مطابقت آن‌ها با داده‌های ژئوفیزیک هوابرد، عناصر وانادیم، فسفر، منگنز، روی و تا حدودی مس به عنوان ردیاب‌های مهم اورانیم در برگه‌ی اسفوردی انتخاب شدند.

با توجه به نتایج حاصل از مطالعه‌ی نقشه‌ی آنومالی عناصر ردیاب مورد بحث در برگه‌ی اسفوردی، سه محدوده براساس داده‌های ژئوشیمیایی به عنوان مناطق دارای پتانسیل کانی‌سازی انتخاب شد. موقعیت این سه محدوده در شکل ۸ نشان داده شده است. از این سه محدوده، محدوده‌ی GC-۱ توالی مارن و کانگلومرای واقع در بخش شمال‌غربی ناحیه و دو محدوده‌ی دیگر، رخنمون‌های ماسه‌سنکی و هم‌چنین توده‌های نفوذی اطراف معدن اسفوردی و حد فاصل آن تا معدن کوشک را شامل می‌شود. در محدوده‌های GC-۲ و GC-۳، رخنمون‌های



- تهیه‌ی نقشه‌ی زمین‌شناسی و زمین‌شناسی ساختمانی محدوده‌ها در مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰.
- بررسی نوع توده‌های گرانیتی به لحاظ تقسیم‌بندی‌های معمول سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی و بررسی منشأ و ارتباط آن‌ها.
- بررسی پتروگرافی ماسه‌سنگ‌ها و جدایش ماسه‌سنگ‌های کوارتزی از انواع دیگر آن‌ها.
- برای انجام اکتشافات بعدی در محدوده‌های معرفی شده در بالا، مراحل زیر پیشنهاد می‌شود.
- انجام مطالعات ژئوشیمیایی به روش نمونه‌برداری از رسوب آبراهه‌ای و لیتوژئوشیمیایی در مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ همراه با تجزیه‌ی نمونه‌ها برای عناصر پرتوزا و همچنین عناصر نادر خاکی در سه محدوده‌ی یاد شده.
- انجام برداشت‌های رادیومتری زمینی در مقیاس ۱:۲۵,۰۰۰ در سه محدوده‌ی پتانسل دار موردنظر.

## References:

1. M. Tauchid, D.H. Underhill, "Uranium deposits of the world," Proceeding of Exploration 97, 177- 180 (1997).
2. F.J. Dahlkamp, "Uranium ore deposits," Springer & Exploration Techniques. V. 460, 23-24 (1993).
3. V.G. Melkov, "Methods of prospecting for uranium deposits," Journal of Nuclear Energy. V. 3, 158-167 (1956).
4. ب. سامانی، "زمین‌شناسی اورانیم و منابع آن،" پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور (۱۳۸۲).
5. ا. مشکانی، "گزارش اکتشافات ژئوشیمیایی در برکه ۱:۱۰۰۰۰۰ اسفوردی،" سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۸۲).
6. خ. جمشیدی، ع. افشاریان‌زاده، م. سهیلی، م. مهدوی، "شرح نقشه زمین‌شناسی برکه ۱:۱۰۰,۰۰۰ اسفوردی،" سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، چاپ افست تهران (۱۳۷۰).
7. L.S. Labaschange, R. Holdsworth, T. Stone, "Regional stream sediment geochemical survey of south africa," Journal of Geochemical Exploration. V. 47, 283-296 (1993).
8. ع.ا. حسینی‌پاک، م. شرف‌الدین، "تحلیل داده‌های اکتشافی،" تهران، مؤسسه چاپ و انتشارات دانشگاه تهران (۱۳۸۰).
9. س. پرند، "روش‌های اکتشاف ژئوشیمیایی ذخایر معدنی،" تهران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور (۱۳۷۵).
10. A. Zielinski, Robert, "Tuffaceous sediments as source rocks for uranium: a case study of the white river formation. Wyoming," Journal of Geochemical Exploration. V. 18, 285-306 (1983).
11. A. Sadeghi, Steele, F. Kenneth, "Use of stream sediment elemental enrichment factors in geochemical exploration for carbonatite & uranium, arkansas, U.S.A.," Journal of Geochemical Exploration. V. 32, 279-286 (1989).
12. ا. حبیب‌نیا، "مطالعه زمین‌شناسی اقتصادی و ارزیابی پتانسیل اکتشافی اورانیم و سایر عناصر پرتوزا در ورکه ۱:۵۰۰۰۰ مغانجق با استفاده از داده‌های ژئوشیمی رسوبات آبراهه‌ای،" پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (۱۳۸۵).
13. G.J.S.ed. Govet, "Hand book of exploration geochemistry," Amsterdam: Elsevier (1994).
14. L. James, Jr. Jerden, "Geochemical coupling of uranium & phosphorous in soils overlying an unmined uranium deposit: coles hill, virginia," Journal of Geochemical Exploration. V. 91, 56-70 (2006).
15. International Atomic Energy Agency (IAEA), "Critical Geochemical Exploration for Uranium," IAEA-TECDOC Technical Reports Series No. 284, IAEA, Vienna, Austria (1998).
16. W. Rose, Arthur; J. Wright, Robert, "Geochemical exploration models for sedimentary uranium deposits," Journal of Geochemical Exploration. V. 13, 153-179 (1980).