

شناسایی ناهنجاری‌ها و پتانسیل‌های احتمالی کانه‌سازی اورانیوم در اکتشافات هیدروژئوشیمیایی منطقه کدکن با استفاده از تحلیل عاملی

مصطفی اسماعیلی وردنجانی*^۱، ایرج رسا^۲، محمد یزدی^۳، کاوه پازند^۴، رسول سپهری‌راد^۱

۱- دانشجوی دکتری زمین‌شناسی اقتصادی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

۲- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

۳- استاد گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

۴- باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۴/۱۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۶/۱/۲۳

چکیده

در حین انجام اکتشافات هیدروژئوشیمیایی، معمولاً چندین عنصر با یکدیگر مطالعه می‌شوند و نقشه‌های توزیع آن‌ها برای مشخص کردن ناهنجاری‌های احتمالی آماده می‌شود. در این مطالعه جهت انجام هر چه بهتر این مفهوم در منطقه کدکن تعداد ۱۱۰ نمونه آب زیرزمینی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت و بررسی توزیع عناصر، از روش عامل R استفاده شد. پس از بررسی‌های آماری و انتخاب تعداد عامل‌های مختلف، نهایتاً مدل شش عاملی انتخاب گردید که مجموعاً ۶۹٫۷۲ درصد کل واریانس داده‌ها را در بر می‌گیرد و بیشترین مطابقت را با واحدهای سنگ‌شناسی، هیدرووشیمی و بخش‌های دارای پتانسیل کانی‌سازی احتمالی اورانیوم دارد. برای شناسایی ناهنجاری‌ها، امتیازات عاملی برای کل نمونه‌های منطقه محاسبه شد بر این اساس عامل کانی‌سازی (عامل ۴) بار مثبت قوی بر روی عناصر اورانیوم، گوگرد، مولیبدن، یون فلوراید، فسفات، سولفات و سلنیوم دارد. با توجه به اینکه این عناصر از ردیاب‌های کانسارهای اورانیوم نوع رسوبی هستند می‌توانند نشان دهنده مناطق احتمالی دارای پتانسیل کانی‌سازی اورانیوم باشند.

واژه‌های کلیدی: اکتشافات هیدروژئوشیمیایی، پتانسیل کانی‌سازی، تحلیل عاملی.

مقدمه

در این مطالعه سعی شده است تا با استفاده از روش تحلیل عاملی که یک روش آماری چند متغیره است به بررسی نمونه‌های آب زیرزمینی جهت مطالعه پتانسیل کانی‌سازی اورانیوم براساس مطالعات هیدروژئوشیمیایی در منطقه کدکن پرداخته شود. این منطقه در ۱۱۰ کیلومتری جنوب‌غربی مشهد و حدود ۳۵ کیلومتری شمال غرب تربت‌حیدریه واقع شده است (شکل ۱). در بررسی همزمان چند پارامتر، روش‌های آماری چند متغیره ابزار قدرتمندی در بررسی روابط بین متغیرها می‌باشند (چاپمن، ۱۹۷۸؛ جانسون و ویچرن، ۱۹۹۸). در بین این روش‌ها تحلیل عاملی توسط محققین مختلف در مطالعات هیدروژئوشیمیایی آب زیرزمینی بکار گرفته شده‌اند (سینگ و همکاران، ۲۰۰۵؛ پاپاتئودرو و همکاران، ۲۰۰۶؛ شرستا و کازاما، ۲۰۰۷؛ امو-ایرابور و همکاران، ۲۰۰۸؛ ویتک و همکاران، ۲۰۰۹؛ راولیکومار و سوماشکار، ۲۰۱۲). اصولاً زمانی که تحلیل عاملی در مورد داده‌های هیدروژئوشیمیایی به کار برده می‌شود، فرآیندهای عمده در قالب عامل‌هایی بیان می‌شوند که پیوند دهنده مجموعه‌ای از متغیرهای دارای وابستگی‌های بالا می‌باشند (جئونگ، ۲۰۰۱). تجزیه و تحلیل عاملی بین مجموعه‌ای از متغیرها که ظاهراً بی ارتباط هستند، رابطه خاصی را تحت یک مدل فرضی برقرار می‌کند و یکی از اهداف اصلی آن کاهش ابعاد داده‌هاست. بنابراین پس از انجام تجزیه و تحلیل عاملی، تعداد متغیرهای به دست آمده (عامل‌ها) کمتر از تعداد متغیرهای اصلی خواهد شد. فرض اساسی در این روش، وجود ارتباط در قالب یک عامل در یک مدل فرضی ظاهر می‌شود و به طور کلی هدف از تجزیه و تحلیل عاملی عبارت است از تعیین متغیرهای کنترل کننده اصلی در بین یک

سری داده‌های زمین شیمی و یا به عبارت دیگر یافتن حداقل تعداد متغیرهایی است که بیشترین تغییرات مشاهده شده را در بین سری داده‌ها نشان می‌دهند. اگر متغیرهای اولیه هم‌بسته نباشند (ضریب همبستگی کوچکی داشته باشند)، دلیلی برای کاربرد این روش وجود ندارد، چرا که نتایج قابل قبولی از آن‌ها به دست نمی‌آید. تجزیه و تحلیل فاکتوری زمانی صورت می‌گیرد که تعداد متغیرهای اولیه به حد کافی باشد. تجزیه و تحلیل فاکتوری در چهار مرحله انجام می‌گیرد:

۱- محاسبه ضرایب همبستگی، ۲- استخراج عامل‌ها که شامل تعیین تعداد و روش محاسبه عامل‌ها است، ۳- دوران و اعمال تبدیلاتی خاص بر روی عامل‌ها، برای آنکه روابط میان داده‌ها بهتر تفسیر شود، ۴- محاسبه امتیاز هر عامل برای تک تک نمونه‌ها (گووت، ۲۰۰۰).

در روش تحلیل عاملی دو نوع گروه‌بندی وجود دارد، (حسنی‌پاک و شرف‌الدین، ۱۳۸۰):

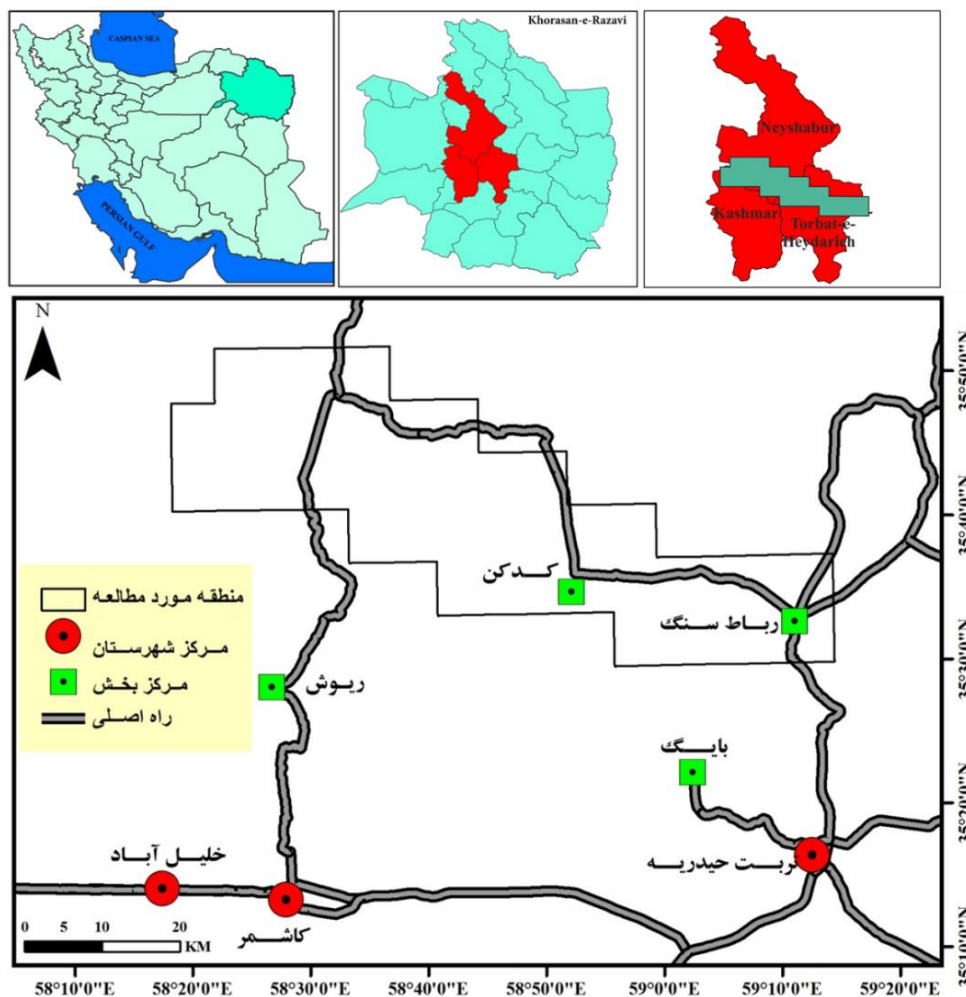
- نوع اول به گروه‌بندی متغیرها می‌پردازد و نوع R نام دارد.

- نوع دوم به گروه‌بندی نمونه‌ها می‌پردازد و به نوع Q معروف است.

در حین انجام مطالعات هیدروژئوشیمیایی، معمولاً چندین عنصر با یکدیگر مطالعه می‌شوند و نقشه‌های توزیع آن‌ها برای مشخص کردن ناهنجاری‌های احتمالی آماده می‌شود. آن‌گونه که در اکتشافات ژئوشیمیایی مشخص است، کانسارهای معدنی به ندرت از یک عنصر به تنهایی تشکیل می‌شود. بنابراین اگر مجموعه‌ای از عناصر را با هم بررسی کنیم احتمالاً تاثیر بیشتری خواهد داشت تا هر یک را به تنهایی بررسی کنیم (تریپاتی، ۱۹۷۹). فاکتور R ابزار مناسبی جهت تشخیص مجموعه عناصر مربوط به کانی‌سازی احتمالی و لیتولوژی است. این

مفهوم در منطقه و بررسی توزیع عناصر از گروه-
بندی نوع R استفاده شد.

هدف با گروه‌بندی مجموعه‌ای از عناصر درون یک
عامل حاصل می‌شود (دیویس، ۲۰۰۲؛ الوئز،
۱۹۸۵). در این مطالعه جهت انجام هر چه بهتر این



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه (اقتباس از اطلس راه‌های ایران، ۱۳۸۴).

محدوده مورد مطالعه

جغرافیا

و بیشینه دما در مرداد ماه ($37/3^{\circ}\text{C}$) و کمینه دما در اسفند ماه ($-14/6^{\circ}\text{C}$) می‌باشد. متوسط بارش سالانه ۲۲۰ میلیمتر بوده که بیش‌ترین میزان بارش طی فصول بهار و زمستان رخ می‌دهد. از نظر توپوگرافی سه ناحیه اصلی شامل: کوهستان‌ها در

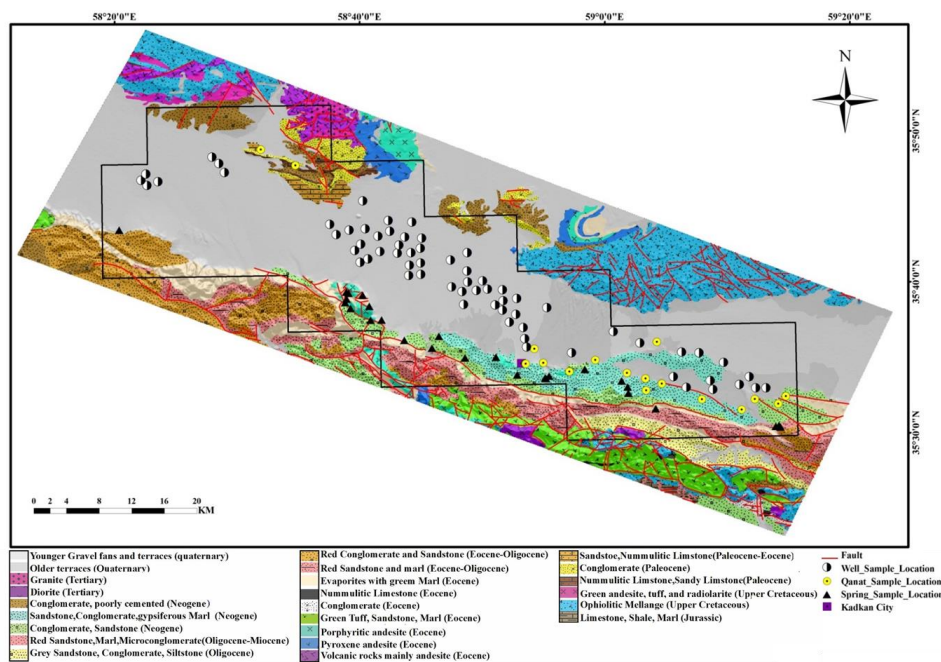
منطقه کدکن با ارتفاع ۱۹۰۰ متر از سطح دریا در دشت نیشابور قرار گرفته و حوزه جنوب‌شرقی این دشت را تشکیل می‌دهد. از دیدگاه آب و هوایی منطقه مورد مطالعه در تیپ اقلیمی نیمه خشک سرد قرار دارد. متوسط دمای سالانه $14/3^{\circ}\text{C}$ بوده

شده است. واحدهای رسوبی و رخساره‌های کلاستیک عمدتاً شامل کنگلومرا، ماسه سنگ، سیلتستون و مارن نیز که عمدتاً در سنوزوئیک نهشته شده‌اند با روند شرقی-غربی در بخش‌های جنوبی قرار دارند (شکل ۲). افق‌های مس‌دار (مس رسوبی) که بخشی از واحدهای ائوسن-الیگوسن هستند، در واحدهای مذکور و در بخش‌های ماسه‌سنگی و کنگلومرایبی واقع گردیده‌اند. جوان‌ترین واحدهای زمین‌شناسی شامل آبرفت‌ها و تراس‌های جوان، اکثراً نواحی مرکزی منطقه را پوشانده و در مقاطعی از دشت، پهنه‌های رسی و ماسه‌ای که حاصل فرآیندهای فرسایشی بر روی برونزدهای سنگی اطراف می‌باشد، گسترده شده‌اند (نادری میقان و ترشیزیان، ۱۳۷۷).

جنوب، تپه ماهورها با روند شمال‌غربی- جنوب- شرقی در مرکز و مناطق دشتی در شمال منطقه مورد مطالعه قرار دارند.

زمین‌شناسی

از لحاظ زمین‌شناسی این منطقه در زون ایران مرکزی و زیر زون سبزوار و در چهارگوش نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ تربت حیدریه و کاشمر قرار دارد. ملانژ افیولیتی به سن کرتاسه در شمال- شرق محدود رخنمون داشته که بخشی از افیولیت‌های سبزوار می‌باشد. عقیده بر این است که رخداد لارامید حاکم بر منطقه، سبب جایگزینی این افیولیت‌ها بوده است. شمال‌غربی محدوده نیز عمدتاً توسط ولکانیک‌های ترشیری (عمدتاً آندزیت) با سن ائوسن و آهک و کنگلومرا (پالئوسن) پوشیده



شکل ۲: نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و موقعیت‌های نمونه‌برداری از منابع آب

مواد و روش‌ها

به ندرت شرب و صنعتی داشتند (شکل ۲). از هر یک از این منابع آب سه نمونه انتخاب و در بطری‌های پلی اتیلن چگال ۲۵۰ میلی لیتری جمع‌آوری گردید که به سه گروه تقسیم شدند:

به منظور انجام مطالعات هیدروژئوشیمیایی در منطقه مورد مطالعه، در مجموع از ۱۱۰ نقطه شامل ۲۷ چشمه، ۱۷ قنات و ۶۶ چاه عمیق، نمونه‌های آب برداشت گردید که عمدتاً مصارف کشاورزی و

مولفه ششم به بعد تاثیر مولفه‌ها بر روی پردازش داده‌ها کم و تقریباً صفر شده و خط اسکری پلات هموار شده و تغییرات مقادیر ویژه کم می‌شود. پس با توجه به این نمودار می‌توان شش عامل را به عنوان عوامل مهم که بیش‌ترین نقش را در تبیین واریانس داده‌ها دارند استخراج کرد (شکل ۳). این شش عامل مجموعاً ۶۹,۷۲٪ کل واریانس داده‌ها را در بر می‌گیرند. انتخاب تعداد عامل یک مرحله مهم در استفاده از روش تحلیل عاملی است. راه حل ریاضی کاملاً مشخص و واضحی در انتخاب تعداد عامل‌ها وجود ندارد، بنابراین انتخاب تعداد عامل‌ها نیز یکی از اهداف تحلیل عاملی است. در این مطالعه سعی شده است تا انتخاب عامل‌ها بیش‌ترین مطابقت را با پارامترها و عناصر ردیاب معمول در کانه‌سازی اورانیوم را داشته باشد. قبل از انتخاب شش عامل در این مدل، مدل پنج عاملی و هفت عاملی نیز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت اما عامل‌های به دست آمده به اندازه مدل شش عاملی معنادار نبودند. لذا در نهایت مدل شش عاملی انتخاب گردید و نتایج آن در جداول ۲ و ۳ آورده شده است. جهت تعدیل محور عاملی به منظور دستیابی به عامل‌های معنی‌دار و ساده نیز مولفه‌های خام تحت تابع واریماکس^۲ چرخش داده شده تا بهترین واریانس عمومی بدست آید. این مولفه‌های چرخش یافته، مولفه‌های اصلی برای محاسبه امتیازات هستند.

الف) آب فیلتر شده بعد از عبور از فیلتر $0.45 \mu\text{m}$ و اسیدی شده (اسید نیتریک 0.01 مولار خالص)، جهت اندازه‌گیری غلظت کاتیون‌ها. ب) آب فیلتر شده و اسیدی نشده جهت اندازه‌گیری غلظت یون‌های NO_3^- ، HCO_3^- ، CO_3^{2-} ، SO_4^{2-} ، Cl^- ، NH_4^+ ، F^- ، PO_4^{3-} و ج) آب فیلتر نشده و اسیدی نشده جهت اندازه‌گیری غلظت آلکالینیتی. بطری‌های نمونه‌برداری ابتدا سه مرتبه توسط آب مورد نمونه‌برداری شستشو شده و سپس پر می‌گردید. pH، Eh، دما، قابلیت هدایت الکتریکی (EC)، کل املاح محلول (TDS)، شوری، چگالی، اکسیژن محلول (BOD) و مقاومت نیز از موارد برداشت شده در صحرا توسط دستگاه قابل حمل HACH multimeter بودند. اندازه‌گیری غلظت CO_3^{2-} و HCO_3^- با روش تیتراسیون و سایر آنیون‌ها با روش کروماتوگرافی در آزمایشگاه خراسان مشهد صورت گرفت. آنالیز کاتیون‌ها (عناصر اصلی، عناصر فرعی و نادر) نیز با روش ICP-MS در آزمایشگاه زرآرما انجام گردید. (جدول ۱). تجزیه و تحلیل عاملی داده‌ها نیز با استفاده از گروه‌بندی نوع R و تحلیل به روش PC با استفاده از نسخه ۱۸ نرم‌افزار PASW انجام شد.

بحث و نتایج

اسکری پلات مولفه‌های اصلی تغییرات مقادیر ویژه را در ارتباط با عامل‌ها نشان داده و برای تعیین تعداد بهینه مولفه‌ها به کار می‌رود. بر این اساس از

جدول ۱: خلاصه آماری پارامترهای فیزیکوشیمیایی نمونه‌های آب زیرزمینی.

Parameter	N	Minimum	Maximum	Mean	Std. Deviation
Ag (ppb)	110	.7	40.4	1.821	4.2867
Al (ppb)	110	.01	.13	.0182	.02156
As (ppb)	110	.4	35.5	4.756	5.4486
Ba (ppb)	110	.8	322.9	32.289	41.3576
Bi (ppb)	110	.3	.7	.477	.1029
Ca (ppm)	110	1.7	519.0	91.228	79.2540
Ce (ppb)	110	.4	11.5	.893	1.1263
Cl (mg/l)	110	14	1773	547.58	459.654
CO ₃ ²⁻ (mg/l)	110	0	45	.76	4.628
Cr (ppb)	110	.8	186.4	29.014	34.4268
Density (gr/cm ³)	110	.991	1.005	.99549	.001824
BOD (mg/l)	110	.45	10.24	7.4265	1.95549
Dy (ppb)	110	.1	.5	.192	.1004
EC (μs/cm)	110	302	23800	2773.45	2633.271
Eh (mV)	110	-392.0	263.9	160.495	91.5269
Eu (ppb)	110	.4	1.0	.517	.1333
F (ppb)	110	0	2060	511.91	333.542
Gd (ppb)	110	.1	1.2	.310	.1776
HCO ₃ ⁻ (mg/l)	110	42.7	543.0	177.965	93.6850
K (ppm)	110	.49	22.21	4.4148	3.57894
La (ppb)	110	.4	6.2	1.067	.6647
Li (ppb)	110	1.0	254.4	31.887	38.0514
Mg (ppm)	110	.3	98.3	27.564	18.8265
Mo (ppb)	110	.1	127.6	4.250	12.8571
Na (ppm)	110	35.2	4809.0	429.937	516.6107
NH ₄ ⁺ (mg/l)	110	0	20.4	.2697	1.94262
NO ₃ (mg/l)	110	1.4	118.8	9.656	15.1999
P (ppm)	110	.0075	.1300	.015182	.0165128
pH	110	7.18	9.48	7.9854	.35853
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	110	.06	33.00	.6887	3.11652
Pr (ppb)	110	.3	1.9	.505	.2766
Rb (ppb)	110	3.5	77.3	24.349	14.8169
S (ppm)	110	1	969	114.67	115.440
Salinity (‰)	110	.14	15.07	1.4992	1.61070
Sc (ppb)	110	1.4	4.3	2.704	.6485
Se (ppb)	110	.1	36.6	2.809	5.3357
Si (ppm)	110	.0	15.6	8.392	2.9440
Sm (ppb)	110	0	1	.39	.151
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	110	2	1160	287.27	190.519
Sr (ppm)	110	.08	11.34	2.5164	2.01143
T (°C)	110	13.6	27.3	18.346	2.6620
Ta (ppb)	110	.1	2.6	.552	.5943
TDS (mg/l)	110	147	14290	1461.46	1531.371
Te (ppb)	110	.1	1.2	.253	.2391
Th (ppb)	110	.2	2.2	1.130	.6395
U (ppb)	110	.8	30.2	2.447	3.1521
V (ppb)	110	.8	299.5	18.850	37.9296
Y (ppb)	110	.1	2.0	.301	.2613

جدول ۳: سهم عاملی عناصر در عامل‌های مختلف (پس از اعمال چرخش)

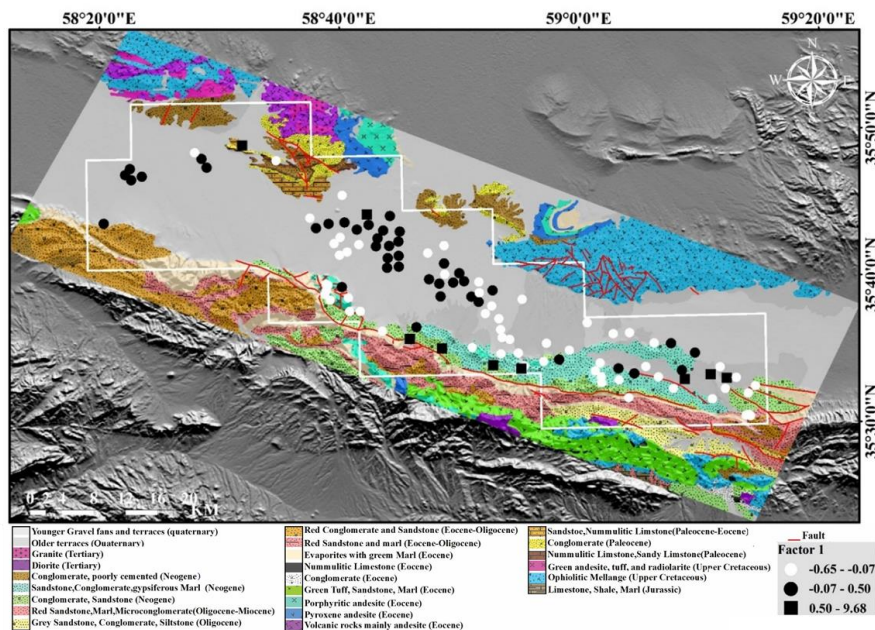
Factor Element	1	2	3	4	5	6
NH ₄ ⁺	0.939655					
Na	0.935065					
Salinity	0.930117					
TDS	0.92817					
EC	0.907608					
Li	0.680226					
NO ₃ ⁻	0.649533					
Ba	0.641008					
Density	0.640908					
Eh	-0.63063					
Sr	0.600016					
Ca	0.547906					
Pr		0.968682				
Sm		0.933611				
La		0.922749				
Y		0.882408				
Gd		0.84256				
Ce		0.768349				
Eu		0.697287				
Te		0.689907				
Ag		0.544536				
Th			0.930996			
Dy			0.869116			
Ta			-0.80708			
Sc			-0.79525			
Bi			0.783696			
Cr			0.675555			
BOD			0.476514			
U				0.910272		
S				0.843488		
Mo				0.815313		
F				0.786529		
P				0.74089		
SO ₄ ²⁻				0.601088		
Se				0.573962		
T				0.493421		
Si					-0.65059	
K					0.625789	
HCO ₃ ⁻					-0.57009	
Rb					0.542989	
Cl					0.491536	
Al					0.293209	
PO ₄ ³⁻					0.177146	
pH						-0.78475
Mg						0.70405
As						-0.68442
V						-0.59132
CO ₃ ²⁻						-0.39712

چگالی می‌باشد. با دور شدن از زون اصلی تغذیه (شرق منطقه)، با کاهش سطح آب زیرزمینی، افزایش زمان ماندگاری آب زیرزمینی، افزایش نمک‌های محلول در آب زیرزمینی (افزایش شوری)، افزایش چگالی و در نهایت افزایش هدایت الکتریکی آب زیرزمینی و افزایش مقادیر بار عاملی فاکتور ۱ آب مواجه هستیم (در مقابل کاهش Eh) (شکل‌های ۴ و ۵). ارزش بالای مقادیر عامل ۱ در NO₃⁻ و NH₄⁺ نیز احتمالاً با فعالیت‌های انسانی مرتبط

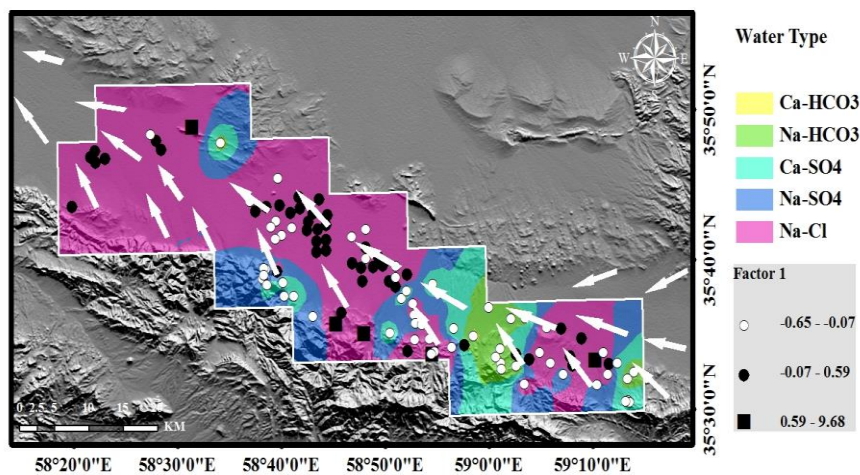
عامل ۱ (NH₄⁺، Na، Salinity، TDS، EC، Li) و عامل ۱ در حدود ۱۶،۹ واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهد و بار مثبت قوی بر روی عناصر و پارامترهای NH₄⁺، Na، Salinity، TDS، EC، Li، NO₃⁻، Ba، Eh، Density، Sr و Ca دارد. این عامل را می‌توان عامل فعل و انفعالات آب/سنگ (انحلال کانی‌های تبخیری) و همچنین فعالیت‌های انسانی نامید. افزایش شوری دارای ارتباط مثبت با EC، TDS و

نئوزن و یا در نزدیکی آن‌ها قرار می‌گیرد. این عامل می‌تواند به عنوان یکی از فاکتورهای کنترل کننده لیتولوژی در نظر گرفته شود. نقشه این عامل در زیر آورده شده است (شکل ۴). مقادیر بار عاملی منفی Eh بیان کننده افزایش کاتیون‌ها و پارامترهای ذکر شده در مقابل کاهش Eh است.

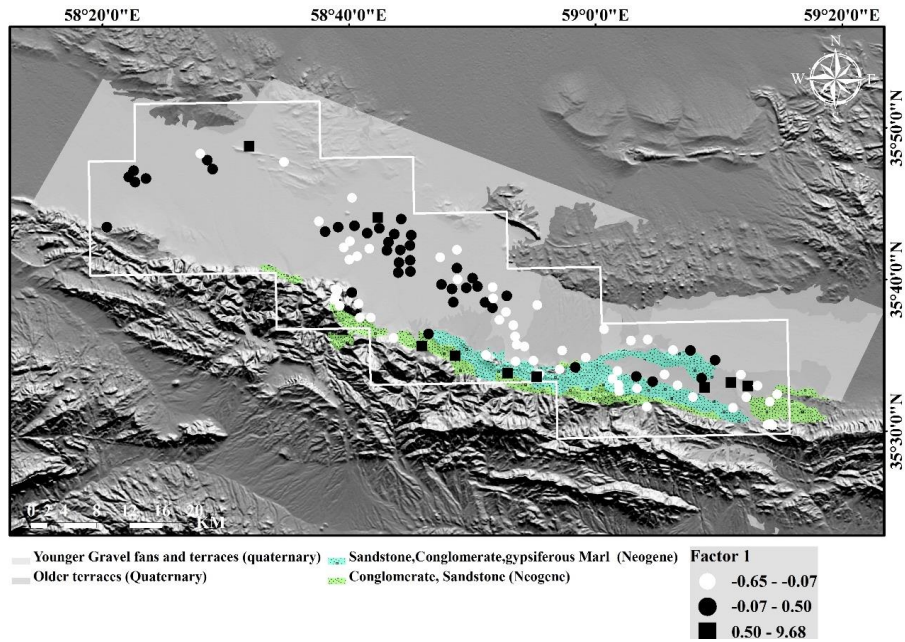
است. همچنین حضور Sr، Ca و Li احتمالاً ناشی از فعل و انفعالات آب/سنگ و حضور پلاژیوکلاز بویژه نوع کلسیک است (آکاریش و گوهری، ۲۰۰۸). به طور کلی فلدسپات‌ها می‌توانند غلظت‌های عناصر مذکور را کنترل می‌کنند (رولینسون، ۱۹۹۳). عامل ۱ بیش‌تر بر روی واحدهای ماسه سنگی و کنگلومرای ژیبس‌دار



شکل ۴: نقشه امتیازات عاملی عامل ۱.



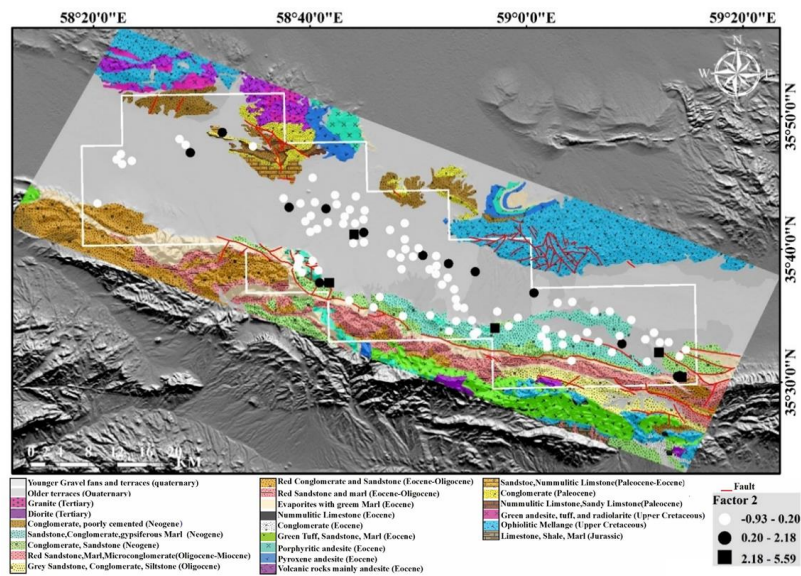
شکل ۵: نقشه امتیازات عاملی عامل ۱ و رابطه آن با انواع آب زیرزمینی.



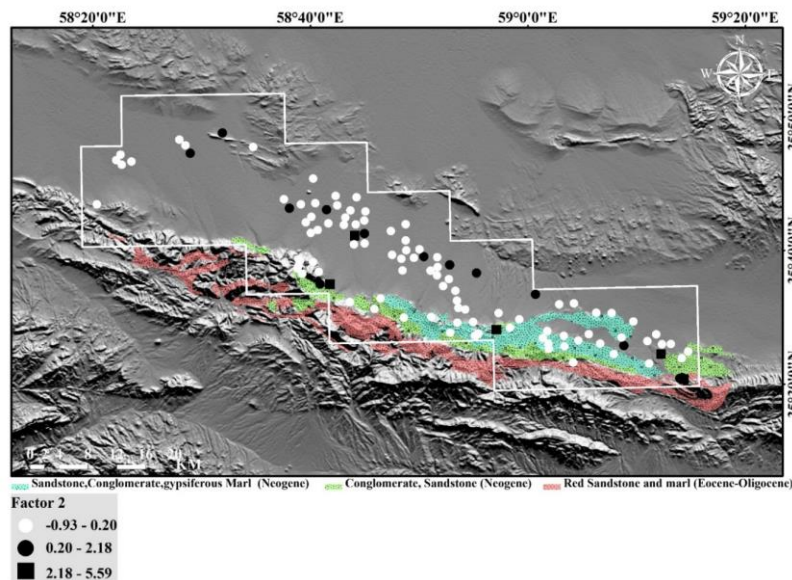
شکل ۶: نقشه امتیازات عاملی عامل ۱ و مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی کنترل کننده.

نئوژن و هم‌چنین ماسه سنگ‌های قرمز رنگ ائوسن و یا در نزدیکی آن‌ها قرار می‌گیرد. این عامل نیز می‌تواند به عنوان یکی از فاکتورهای کنترل کننده لیتولوژی در نظر گرفته شود. ماسه سنگ‌های مذکور عمدتاً از قطعات لیتیک سنگ‌های آذرین درونی با ترکیب اسیدی و ولکانیک‌های شیشه‌ای تجدید تبلور یافته تشکیل شده‌اند و می‌توانند به عنوان منشاء عناصر مذکور در نظر گرفته شوند (سپهری راد، ۱۳۸۹) (شکل ۸).

عامل ۲ (Ag, Te, Eu, Ce, Gd, Y, La, Sm, Pr): این عامل ۱۴ درصد کل واریانس مدل ۶ عاملی را در بر می‌گیرد. این عامل را می‌توان عامل عناصر نادر خاکی نامید. Eu, Ce, Gd, Y, La, Sm, Pr. جزء این گروه از عناصر می‌باشند. عناصر REE به دلیل آرایش الکترونی مشابه، اختلاف زیادی در رفتار شیمیایی ندارند. لذا این عناصر تمایل دارند که به صورت گروهی در تمامی محیط‌های طبیعی یافت شوند (شکل ۷). این عامل بیشتر بر روی واحدهای ماسه سنگی و کنگلومرای ژئوپس‌دار



شکل ۷: نقشه امتیازات عاملی عامل ۲.

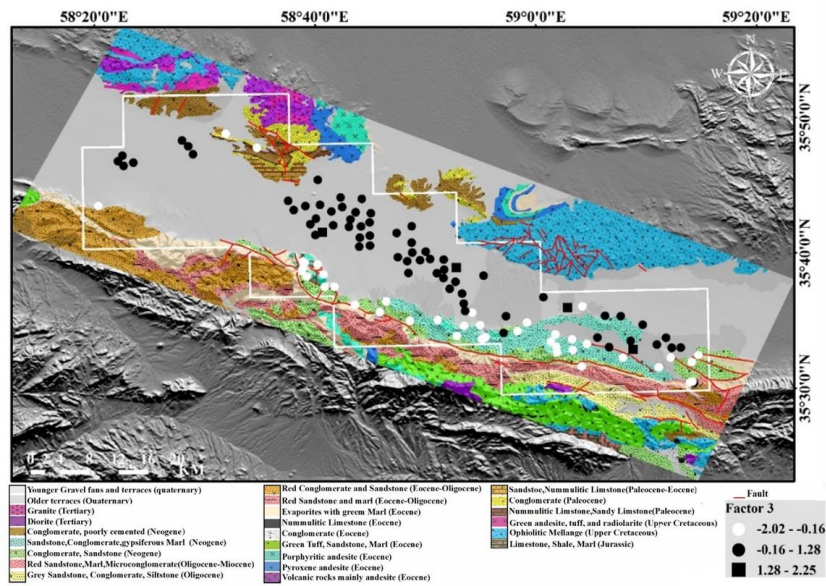


شکل ۸: نقشه امتیازات عاملی عامل ۲ و مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی کنترل کننده.

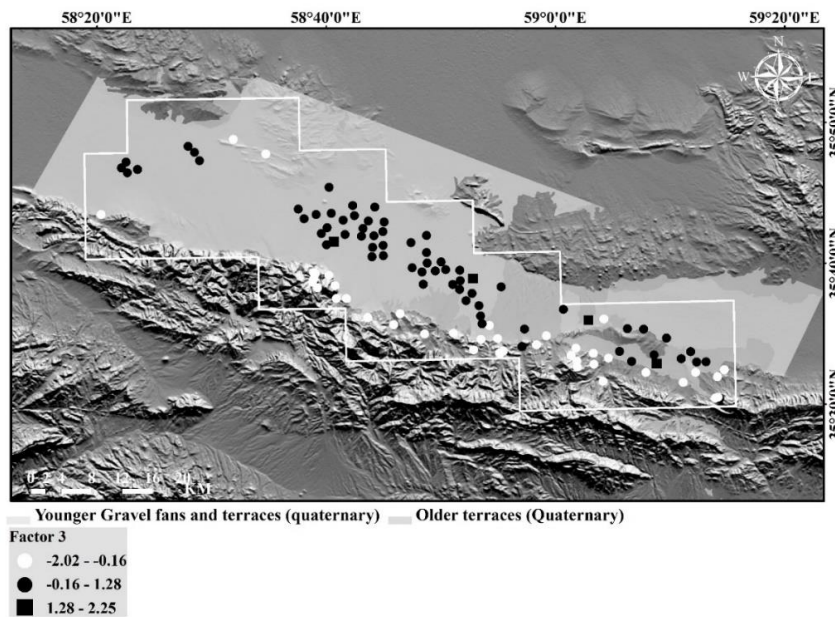
آبرفتی منطقه مورد مطالعه، میزان BOD آب زیرزمینی در نتیجه ایجاد شرایط اکسیدان در این دشت‌ها افزایش یافته و در این بخش‌ها، BOD ارزش عاملی بالایی نشان می‌دهد. با وجود تحرک پایین عناصر Th، Dy، Bi و Cr بدلیل افزایش شرایط اکسیدان و در نتیجه افزایش غلظت عناصر مذکور، این عناصر نیز از ارزش عاملی بالایی برخوردار هستند. (شکل ۱۰). مقادیر بار عاملی منفی Sc و Ta بیان کننده وجود رابطه منفی بین

عامل ۳ (Th، Dy، Ta، Sc، Bi، Cr، BOD): این عامل، ۱۲،۴۶ درصد واریانس کل داده‌ها را در بر می‌گیرد و مقادیر قوی آن بیشتر در بخش‌های مرکزی و آبرفت‌های کواترنری واقع می‌شوند. Th و Dy که یکی از عناصر نادر خاکی می‌باشد، رفتار ژئوشیمیایی تقریباً مشابه‌ای دارند (ساهو و همکاران، ۲۰۱۱). نقشه این عامل در شکل ۹ ارائه شده است. به دلیل افزایش پمپاژ و برداشت زیاد آب زیرزمینی توسط چاه‌های کشاورزی در دشت‌های

Sc و Ta با سایر عناصر و پارامترهای عامل ۳ می‌باشد.



شکل ۹: نقشه امتیازات عاملی عامل ۳.



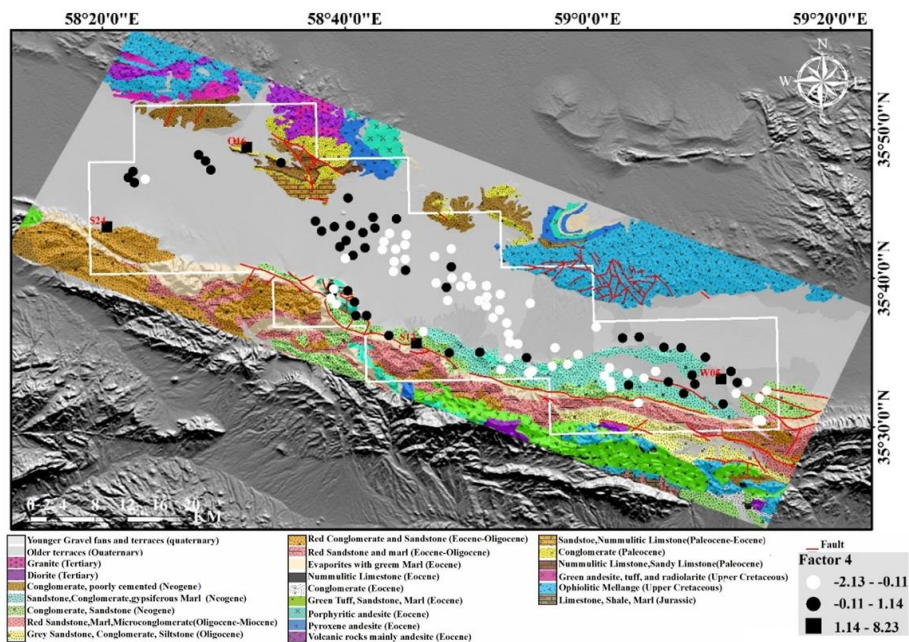
شکل ۱۰: نقشه امتیازات عاملی عامل ۳ و مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی کنترل‌کننده.

اورانیوم را مشخص می‌نماید (S12، S24، Q16 و W05)، بنابراین می‌توان آن را عامل کانی‌سازی نامید (شکل ۱۱). اورانیوم، مولیبدن و سلنیوم از مهم‌ترین ردیاب‌های اورانیوم نوع رسوبی هستند. همراهی گوگرد، سولفات، فلورید نیز می‌تواند نشان

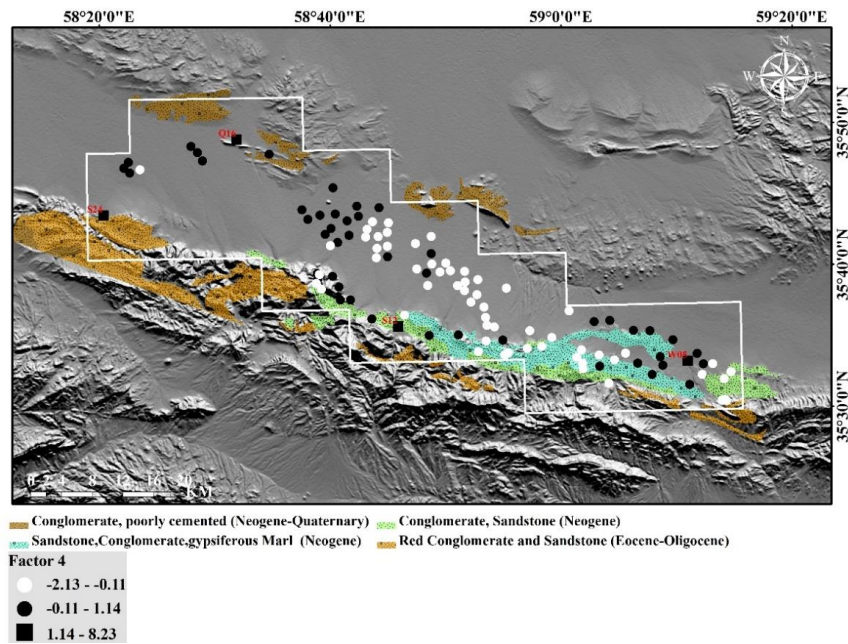
عامل ۴ (U، S، Mo، F، P، SO₄²⁻، Se، T): عامل ۴ در حدود ۱۱/۷۵ درصد واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهد و بار مثبت قوی بر روی عناصر و پارامترهای U، S، Mo، F، P، SO₄²⁻ و Se و T (دما) دارد و به روشنی مناطق دارای پتانسیل کانی‌سازی

برخی کناسارها علاوه بر Cu منشا مهمی برای U نیز می‌باشند (هیتزمن و همکاران، ۲۰۰۵). شرایط زمین‌شناسی تشکیل کناسارهای مس با میزبان رسوبی گویای آن است که لایه‌های قرمز (ماسه‌سنگ‌های قرمز) ضخیم با میان‌لایه‌ها و عدسی‌های ماسه‌سنگی احیایی (خاکستری رنگ)، همراه با شرایط ساختی و بافتی مناسب، می‌توانند میزبان کانی‌سازی اورانیوم بوده و یا به‌عنوان منشاء ذخایر رسوبی ثانویه این عنصر مطرح باشند (هیتزمن و همکاران، ۲۰۰۵؛ کاکس و همکاران، ۲۰۰۷؛ هیتزمن و همکاران، ۲۰۱۰).

دهنده نوع کمپلکس‌های احتمالی حمل‌کننده اورانیوم باشد. این عامل بیشتر بر روی واحدهای ماسه‌سنگی و کنگلومرای ژیبس‌دار نئوژن و هم-چنین ماسه‌سنگ‌ها و کنگلومراهای قرمز رنگ ائوسن-الیگوسن و یا در نزدیکی آن‌ها قرار می‌گیرد (شکل ۱۲). شواهد سنگ‌شناسی و کنترل صحرایی نیز موید این عامل به‌عنوان عامل احتمالی کانی‌سازی می‌باشد چرا که مطالعات صحرایی، کانی‌سازی مس رسوبی همراه با لایه‌های قرمز اکسیدان را در بخش‌های فوق‌الذکر تایید کرده‌اند (سپهری راد، ۱۳۸۹). رخدادهای مس رسوبی در



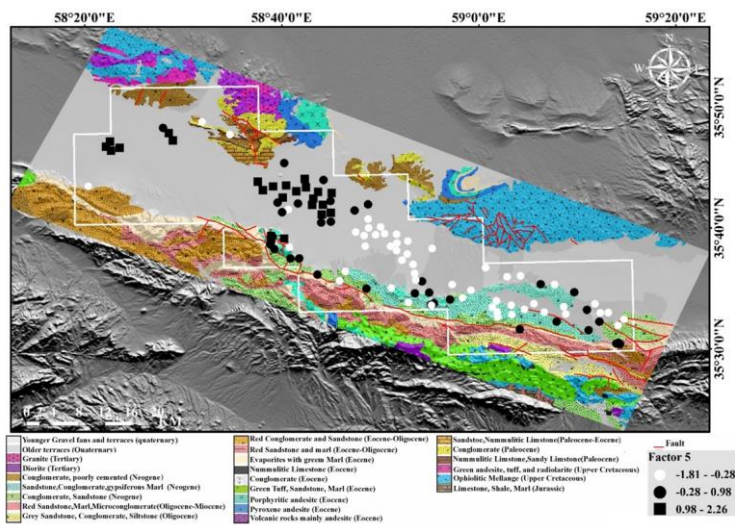
شکل ۱۱: نقشه امتیازات عاملی عامل ۴.



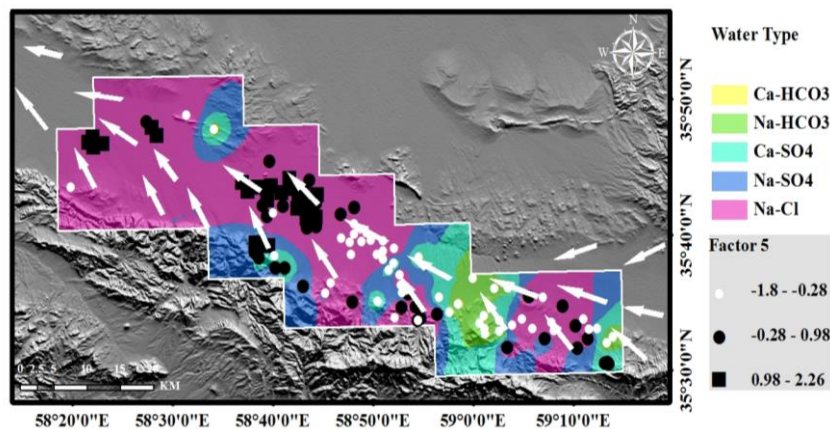
شکل ۱۲: نقشه امتیازات عاملی عامل ۴ و مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی کنترل کننده.

کربناته ← سولفات ← کلریدی). افزایش مقادیر عاملی Cl نیز موید این مطلب است. مقادیر بار عاملی منفی Si و HCO_3^- نشان دهنده رابطه عکس آن‌ها با سایر پارامترها است که نقشه امتیاز عاملی عامل ۵ پارامتر HCO_3^- نیز تقریباً از الگوی توزیع تیپ‌های آب Ca-HCO_3 و Na-HCO_3 تبعیت می‌کند (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).

عامل ۵ (Si, K, HCO_3^- , Rb, Cl, Al, PO_4^{3-}): عامل ۴ در حدود ۷,۷۷ درصد واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهد. این عامل نیز با انواع تیپ آب زیرزمینی در این منطقه مرتبط است. مقادیر قوی عامل ۵ عمدتاً در مرکز و شمال غرب منطقه واقع شده‌اند و تقریباً از سمت زون تغذیه به سمت زون تخلیه افزایش نشان می‌دهند



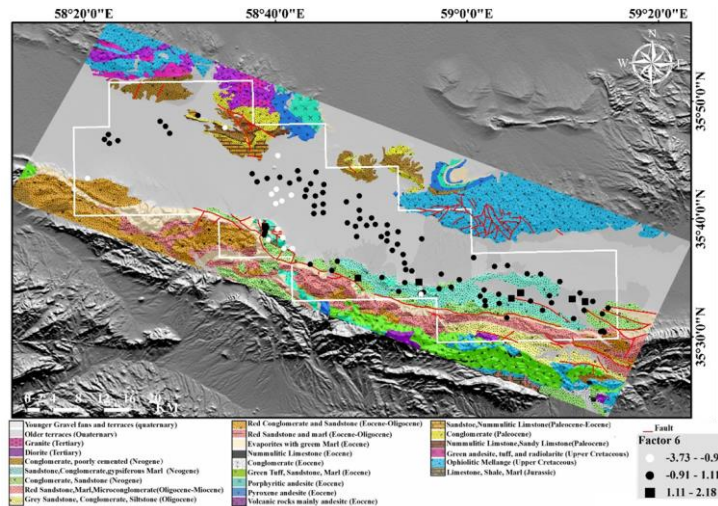
شکل ۱۳: نقشه امتیازات عاملی عامل ۵ و رابطه آن با انواع تیپ آب زیرزمینی.



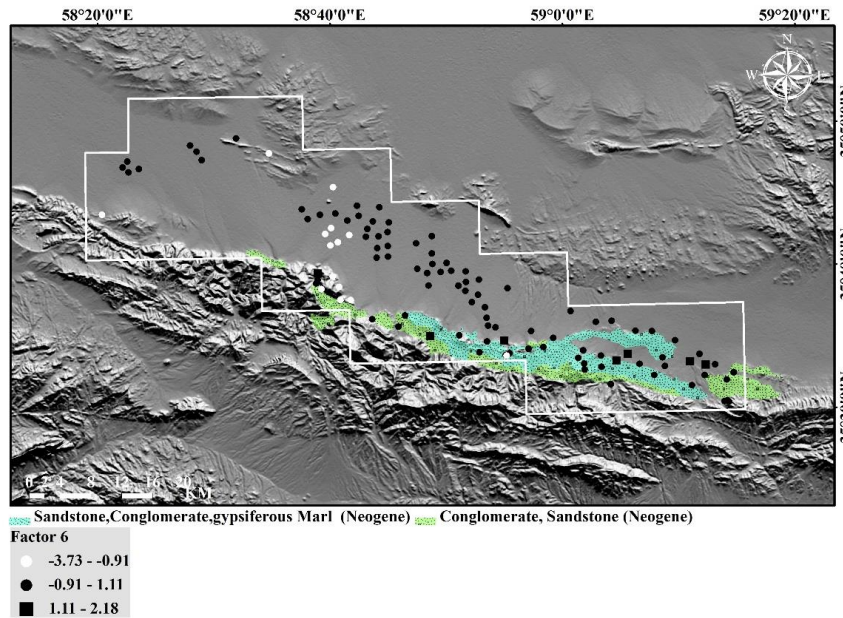
شکل ۱۴: نقشه امتیازات عاملی عامل ۵ و رابطه آن با انواع تیپ آب زیرزمینی.

زیرزمینی کاهش می‌یابد، در مقابل pH با Mg ارتباط عکس داشته و با کاهش اسیدیته پایداری این عنصر در محلول افزایش می‌یابد (کت و گیلیام، ۱۹۸۹). در این عامل تنها Mg بار عاملی مثبت دارا بوده و سایر پارامترها مقادیر بار عاملی منفی دارند و رابطه عکس این عنصر را با سایر پارامترها نشان می‌دهد. مقادیر قوی این عامل به صورت پراکنده و بیشتر بر روی واحدهای ماسه‌سنگی و کنگلومرایی ژئوپس‌دار نئوژن و یا در نزدیکی آن‌ها قرار می‌گیرد. عامل ۶ را نیز می‌توان به عنوان یکی دیگر از فاکتورهای کنترل کننده لیتولوژی در نظر گرفت. نقشه عامل مذکور در زیر آمده است (شکل های ۱۵ و ۱۶).

عامل ۶ (pH, Mg, As, V, CO_3^{2-}): عامل ۶ در حدود ۶,۸۲ درصد واریانس کل داده‌ها را توضیح می‌دهد. pH در آب زیرزمینی توسط عوامل در تعامل با آن (یون‌ها، مولکول‌ها، کمپلکس‌ها، محیط متخلخل و...) کنترل می‌شود. از مهم‌ترین این کنترل کننده‌ها در آب زیرزمینی سیستم کربنات (تغییرات تعادلی بین گونه‌های HCO_3^- - CO_2 - CO_3^{2-}) است که با pH ارتباط و همبستگی مثبت دارد. حضور کربنات و اسیدیته در این عامل نیز نشان دهنده این رابطه مستقیم می‌باشد. همچنین در محیط‌های هیدروژئوشیمیایی بین pH با As و V ارتباط مستقیم وجود داشته و برای مثال با کاهش اسیدیته و تشکیل فازهای جامد در حالت اکسیدی عناصر مذکور غلظت آن‌ها نیز در آب‌های



شکل ۱۵: نقشه امتیازات عاملی عامل ۶.



شکل ۱۶: نقشه امتیازات عاملی عامل ۶ و مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی کنترل کننده.

می‌گیرد به خوبی توانست ناهنجاری‌های هیدروژئوشیمیایی در منابع آبی با کانه‌سازی احتمالی اورانیوم را در محدوده مورد مطالعه مشخص کند. نتایج حاصل از این روش می‌تواند موثر بودن آن در اکتشافات هیدروژئوشیمیایی در مناطق مستعد و دارای اولویت جهت اکتشاف اورانیوم را تأیید نماید. به‌خصوص همراهی عنصر اورانیوم، مولیبدن و سلنیوم گوگرد درون عامل ۴ می‌تواند موید ارتباط احتمالی این عناصر با

نتیجه‌گیری

در منطقه کدکن ابزار تحلیل عاملی به خوبی توانست در شناسایی عامل‌های مختلف کانه‌زایی عمل کرده و از روی نشانه‌هایی که عناصر در نمونه‌های هیدروژئوشیمیایی به جا می‌گذارند آن‌ها را گروه‌بندی و مجزا نماید. استفاده از تحلیل عاملی R و روش مولفه‌های اصلی و در نهایت مدل ۶ عاملی استخراج شده از آن در منطقه کدکن به گونه‌ای که حدود ۶۹٫۷۲ درصد واریانس کل داده‌ها را در بر

اورانیوم نوع رسوبی هستند. پیشنهاد می‌گردد در آینده منابع آبی S12، S24، Q16 و W05 و واحدهای اطراف آنها مورد بررسی و پی‌جویی دقیق‌تر قرار گیرند.

کانی‌سازی اورانیوم نوع رسوبی به‌ویژه در واحدهای ماسه سنگی و کنگلومرایبی نئوژن و هم‌چنین ماسه سنگ‌ها و کنگلومراهای قرمز رنگ ائوسن-الیگوسن باشد چرا که این عناصر مهم‌ترین ردیاب‌های

منابع

-سپهری راد، ر.، ۱۳۸۹. گزارش پی‌جویی مس رسوبی در محور کدکن-ششتمد (شمال تربت حیدریه)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۱۲۶ ص.

-اطلس راه‌های ایران، ۱۳۸۴. موسسه جغرافیایی و کارتوگرافی گیتاشناسی، ۲۷۱ ص.
-حسنی پاک، ع.ا. و شرف‌الدین، م.، ۱۳۸۴. تحلیل داده‌های اکتشافی، انتشارات دانشگاه تهران، ۹۸۵ ص.

-Akarish, A.I.M. and Gohary, A.M.E., 2008. Petrography and geochemistry of lower Paleozoic sandstones, East Sinai, Egypt: Implications for provenance and tectonic setting: *Journal of African Earth Sciences*, v. 52, p. 43-54.
-Chapman, R.P., 1978. Evaluation of some statistical methods of interpreting multi-element geochemical drainage: *Journal of Mathematical Geology*, v. 10 (2), p. 195-224.
-Cote, P. and Gilliam, T.M., 1989. Environmental aspects of stabilization and solidification of hazardous and radioactive wastes: American Society for Testing Materials, Philadelphia, 440 p.
-Cox, D., Lindsey, D.A., Singer, D.A., Moring, B.C. and Diggles, M.F., 2007. Sediment- Hosted copper Deposits of the world: Deposit Models and Data base, USGS, Open file Report, 53 p.
-Davis, J.C., 2002. Statistics and data analysis in geology: John Wiley & Sons, New York, 656 p.
-Elueze, A.A. and Olade, M.A., 1985. Interpretation through factor analysis of stream-sediment reconnaissance data for gold exploration in Ilesha greenstone belt, Southwest Nigeria: *Transactions of*

the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, v. 94, p. 155-161.
-Jeong, C., 2001. Mineral-water interaction and hydrogeochemistry in the Samkwang mine area, Korea: *Geochemical Journal*, v. 35, p. 1-12.
-Johnson, R.A. and Wichern, D.W., 1988. Applied Multivariate Statistical Analysis: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 605 p.
-Govett, G.J.S., 2000. Handbook of exploration geochemistry: Elsevier, Amsterdam, 549 p.
-Hitzman, M.W., Kirkham, R., Broughton, D., Thorson, J. and Selly, D., 2005. The Sediment-Hosted Copper ore System: Economic geology, 100th anniversary volume, p. 609-642.
-Hitzman, M.W., Selly, D. and Bull, S., 2010. Formation of Sedimentary Rock-Hosted Stratiform Copper Deposits through Earth History: *Economic Geology*, v. 105, p. 627-639.
-Kvítek, T., Zlá'bek, P., Bystricky, V., Fucí'k, P., Lexa, M., Gergel, J., Nova'k, P. and Ondr, P., 2009. Changes of nitrate concentrations in surface waters influenced by land use in the crystalline complex of the Czech Republic: *Physics*

- and Chemistry of the Earth, v. 34(8-9), p. 541-551.
- Mahimairaja, S., Bolan, N.S. and Adriano, D.C., 2005. Arsenic Contaminatin and its risk management in complex environmental settings: Advances in Agronomy, v. 86, p. 1-82.
- Omo-Irabor, O.O., Olobaniyi, S.B., Oduyemi, K. and Akunna, J., 2008. Surface and groundwater water quality assessment using multivariate analytical methods: a case study of the Western Niger Delta, Nigeria: Physics and Chemistry of the Earth, v. 33(8-13), p. 666-673.
- Papatheodorou, G., Demopouloua, G. and Lambrakis, N., 2006. A long-term study of temporal hydrochemical data in a shallow lake using multivariate statistical techniques: Ecological Modelling, v. 193, p. 759-776.
- Ravikumar, P. and Somashekar, R. K., 2012. Assessment and Modelling of Groundwater Quality Data and Evaluation of Their Corrosiveness and Scaling Potential Using Environmetric Methods in Bangalore South Taluk, Karnataka State, India: Water Resources, v. 39, p. 446-473.
- Rollinson, H.R., 1993. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation: Longman, UK., 352 p.
- Sahoo, S.K., Hosoda, M., Kamagata, S., Sorimachi, A., Ishikawa, T., Tokonami, S. and Uchida, S., 2011. Thorium, Uranium and Rare Earth Elements Concentration in Weathered Japanese Soil Samples: Progress in NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, v. 1, p. 416-419.
- Singh, K.P., Malik, A. and Sinha, S., 2005. Water Quality Assessment and Apportionment of Pollution Sources of Gomti River (India) Using Multivariate Statistical Techniques-A Case Study: Analytica Chimica Acta, v. 538, p. 355-374.
- Shrestha, S. and Kazama, F., 2007. Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: a case study of the Fuji river basin, Japan: Environmental Modelling & Software, v. 22, p. 464-475.
- Tripathi, V.S., 1979. Factor analysis in geochemical exploration: Journal of Geochemical Exploration, v. 11, p. 263-275.