

Evaluation of Heavy Metal Pollution Indices for Surface Water of the Sarcheshmeh Copper Mine using Multivariate Statistical Methods and GIS

AKRAM SEIFT^{1*}, HOSSIEN RIAHI²

1. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran.

2. Assistant Professor, Department of Water Engineering, Vali-e-Asr University, Rafsanjan, Iran.

(Received: Apr. 9, 2018- Revised: June. 17, 2018- Accepted: June. 19, 2018)

ABSTRACT

Sarcheshmeh copper mine is the second largest open-pit copper mine in the world which its mining activities, dewatering operations, and dam construction could cause pollution to the surface and groundwater of the region. In this study, the heavy metal pollution index (HPI), heavy metal evaluation index (HEI), and degree of contamination (C_d) were used to evaluate heavy metal concentration in the 82 samples of surface water. Also, the main effective parameters on the heavy metal pollution indices were investigated using principal component analysis (PCA). The hybrid multiple linear regression (MLR) and PCA model was used to develop new equations for HPI, HEI, and C_d indices using minimum number of heavy metal variables. The study area was divided into three sub-sections with different mining activities. The concentrations of elements in water samples were compared with the maximum admissible concentration values of WHO standard for drinking purposes. Based on the spatial distribution maps in GIS, the highest concentrations of heavy metals were found in mining sites and sedimentary dam, and the lowest ones found in the Shour River. Based on the HPI values, 70% of the samples were in the critical range of 100- 482245.3 and only 30% of samples were classified as having low pollution levels. The HEI and C_d results revealed that the 79 (96%) and 69 (84.2%) samples were polluted with heavy metals, respectively. The PCA extracted four components, of which the first component with 63.3% of the total variance contains high loadings for Al, Cd, Co, Fe, Zn, Mn, and Ni elements. Despite of very wide ranges of indices variation, the accuracy of proposed MLR-PCA model was confirmed for less number variables in the study area. Findings of this study can be used for investigating preventive measures and to control pollution in the study area and similar regions for drinking purposes in the future.

Keywords: Cluster analysis, Principal component analysis, Pollutant critical limit, Degree of contamination, Quality classification.

ارزیابی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در آب‌های سطحی معدن مس سرچشمه با روش‌های آماری چندمتغیره و GIS

اکرم سیفی^{۱*}، حسین ریاحی^۲

۱. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ایران

۲. استادیار گروه مهندسی آب، دانشگاه ولیعصر (عج) رفسنجان، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱/۲۰ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۳/۲۷ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۷/۳/۲۹)

چکیده

معدن مس سرچشمه دومین معدن روباز مس بزرگ جهان است که فعالیت‌های معدنی، عملیات آبیگری و سدسازی آن می‌تواند سبب آلودگی منابع آب سطحی و زیرسطحی منطقه شود. در این مطالعه به منظور ارزیابی غلظت فلزات سنگین در ۸۲ نمونه آب سطحی (۹۲۴ پارامتر کیفی) از شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI)، شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI) و درجه آلودگی (C_d) استفاده شده است. همچنین متغیرهای اصلی مؤثر بر شاخص‌های آلودگی با استفاده از تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) شناسایی و از ترکیب PCA و مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) به منظور تدوین روابط جدید برای محاسبه شاخص‌های HPI، HEI، C_d با حداقل پارامترهای مورد نیاز استفاده شد. منطقه مورد بررسی به سه زیربخش با فعالیت‌های مختلف تقسیم و غلظت عناصر سنگین آب در هر زیربخش با حداکثر مجاز قابل شرب WHO مقایسه شد. با توجه به نقشه‌های پهنه‌بندی GIS، بیشترین مقادیر فلزات در سایت‌های معدن کاری و در سد رسوبگیر و کمترین آنها در رودخانه شور مشاهده شد. طبق نتایج شاخص HPI، ۷۰ درصد نمونه‌ها در محدوده بحرانی ۱۰۰ تا ۴۸۲۲۴۵/۳ قرار گرفتند و فقط ۳۰ درصد از نمونه‌ها در طبقه آلودگی کم قرار داشتند. نتایج شاخص‌های HEI و C_d نشان دادند که به ترتیب ۷۹ (۹۶٪) و ۶۹ (۸۴/۲٪) نمونه به فلزات سنگین آلوده می‌باشند. چهار مؤلفه اصلی با روش PCA انتخاب که مؤلفه اول با ۶۳/۳ درصد از واریانس کل داده‌ها شامل بارگذاری عناصر آلومینیوم، کادمیوم، کبالت، آهن، روی، منگنز و نیکل بود. علیرغم محدوده بسیار وسیع تغییرات شاخص‌ها، کارایی مطلوب روابط پیشنهادی MLR-PCA با تعداد متغیرهای کمتر برای منطقه مطالعاتی تأیید شد. از یافته‌های تحقیق حاضر و روابط خطی پیشنهادی می‌توان به منظور بررسی اقدامات پیشگیرانه و کنترل آلودگی آب‌ها به فلزات سنگین در آینده در منطقه مس سرچشمه و توسعه روابطی برای مناطق مشابه استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل خوشه‌ای، تحلیل مؤلفه‌های اصلی، حد بحرانی آلودگی، درجه آلودگی، طبقه‌بندی کیفی.

مقدمه

وجود آنها در آب و محیط‌زیست منعکس‌کننده وجود منابع آلودگی طبیعی یا انسانی است (Akoto et al., 2008). فلزات سنگین در فازهای کلوئیدی، ذرات و نامحلول با منشأ طبیعی (مواد معدنی فرسایش یافته در رسوبات، آبشویی نهشته‌های سنگ معدنی و مواد آتشفشانی) یا انسانی (دفع زباله‌های جامد، فاضلاب‌های خانگی یا صنعتی) در آب وجود دارند (Marcovecchio et al., 2007). تقریباً همه فعالیت‌های معدنکاری، سیستم و کیفیت آب‌های طبیعی منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد که اثرات آن به طور واضح پس از معدنکاری نمایان می‌شود. اثرات معدنکاری روی افزایش آلودگی‌ها در منطقه، به عواملی همچون روش‌های معدنکاری، استخراج، نوع سنگ معدن، کنترل آلودگی معدنی و عوامل محیطی بستگی دارد (Zabowski et al., 2001). با توجه به اثرات مضر فعالیت-

بررسی وضعیت کیفی منابع آب سطحی و زیرزمینی، موضوع محیط زیستی بسیار مهمی است که باید مورد توجه کارشناسان و فعالان آب و خاک و محیط‌زیست قرار گیرد. بنابراین قبل از استفاده از این منابع آب در فعالیت‌های صنعتی، آبیاری، شرب و غیره بایستی خصوصیات کیفی آنها مشخص شود. در دهه‌های اخیر، توجه به تجمع فلزات در محیط‌زیست به دلیل سمیت و پایداری آنها مورد توجه بسیاری قرار گرفته است (Upadhyay et al., 2006). فلزات سنگین ترکیبات سرطان‌زایی هستند که به عنوان یکی از آلوده‌کننده‌های محیطی محسوب می‌شوند و

* نویسنده مسئول: a.seifi@vru.ac.ir

های زیرزمینی مناطق اطراف معدن آهن گل گهر سیرجان با استفاده از سه شاخص HPI، HEI، و C_H نشان داد که میانگین غلظت سه عنصر آلومینیوم، آرسنیک و منگنز به ترتیب در ۹۷، ۴۶ و ۳۴ درصد از نمونه‌ها بیش از حد مجاز WHO برای شرب است. بیشتر نمونه‌های آب حاوی آلودگی کم تا حد میانه بودند (Jahanshahi and Zare, 2015). مطالعه کیفیت آب رودخانه شاهرود با شاخص‌های HPI، MPI و NSF-WQI، مناسب بودن آب این رودخانه را برای اهداف شرب نشان داد (Sharifinia *et al.*, 2016). در همه این مطالعات، نیاز به کنترل منظم کیفیت آب به دلیل تأثیر فلزات سنگین در تهدید و افزایش خطر سلامت انسانی مورد تأکید قرار گرفته است.

برای حصول نتایج بهتر در تحلیل داده‌های کیفیت آب می‌توان از روش‌های آماری در ترکیب با شاخص‌های فلزات سنگین استفاده کرد. روش‌های آماری چندمتغیره مانند تحلیل خوشه‌ای، ماتریس همبستگی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی^۴ (PCA) و رگرسیون خطی چندگانه^۵ (MLR) امکان تفسیر بهتر ارتباط بین داده‌های پیچیده را به منظور درک بهتر کیفیت آب و عوامل مختلف محیطی فراهم می‌آورد. از روش PCA، برای تبدیل مجموعه‌ی بزرگی از متغیرهای اولیه به تعداد کمی از متغیرهای جدید به نام مؤلفه‌های اصلی استفاده می‌شود (Tahri *et al.*, 2005). مجموعه مؤلفه‌های اصلی تولیدشده بیانگر ترکیبات خطی غیروابسته‌ای از متغیرهای اولیه هستند و بر اساس ماتریس کواریانس داده‌های اولیه محاسبه می‌شوند. همه مؤلفه‌های اصلی تولیدشده دارای همبستگی صفر خواهند بود (Giri and Singh, 2014).

مجموع مس سرچشمه دارای بزرگترین معدن مس در ایران و خاورمیانه می‌باشد و فعالیت‌های معدنی در این منطقه، باعث تولید و افزایش آلودگی فلزی منطقه شده است. عدم کنترل نفوذ آب‌های آلوده و پساب‌های معدنی، آلودگی هوا بعلت دودکوره ذوب و عدم فیلتراسیون مناسب آنها، وجود زه‌آب‌های اسیدی در آبهای سطحی و احداث سدهای رسوب‌گذاری مجتمع مس در رودخانه شور از مهم‌ترین دلایل و منابع ایجاد آلودگی آب و خاک منطقه می‌باشند. هدف از این مطالعه، ارزیابی توزیع مکانی شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در آب‌های سطحی منطقه تحت تأثیر معدن مس سرچشمه کرمان و اصلاح شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین مبتنی بر تعداد پارامترهای کمتر می‌باشد. در این تحقیق به منظور ارزیابی کیفیت نمونه-

های معدنی، مانند کاهش کیفیت منابع آب منطقه با آب‌های کم کیفیت حاصل از عملیات آبگیری و زهاب معدنی (Khorasanipour and Eslami, 2014)، مطالعات دقیق، در این زمینه لازم به نظر می‌رسد.

برای مطالعه فلزات سنگین و ارزیابی کیفیت آب، پارامترهای آلودگی مورد بررسی قرار می‌گیرند و با غلظت‌های مجاز فلزات سنگین در آب که در استانداردهای مختلف پیشنهاد شده است، مقایسه می‌شوند. شاخص‌های آلودگی ابزارهای مفیدی برای مدیران بخش آب، مدیران محیط‌زیست و تصمیم‌گیرندگان برای انجام اقداماتی در این حوزه‌ها می‌باشند که این تصمیم‌گیری‌ها تحت تأثیر تمامی پارامترهای قابل کاربرد در برآورد شاخص‌های کیفی قرار می‌گیرند. تحلیل مکانی فلزات سنگین با استفاده از این شاخص‌ها می‌تواند در تشخیص و کمی‌سازی روند کیفیت آب بسیار مفید باشد (Mishra *et al.*, 2017).

در سال‌های اخیر، توجه زیادی به بحث آلودگی آب‌ها معطوف شده است و مطالعات مختلفی در سراسر جهان در زمینه ارزیابی کیفیت آب‌های سطحی و زیرسطحی به منظور استفاده شرب با استفاده از شاخص‌های مختلف انجام شده است (Prasad and Sangita, 2008; Giri and Singh, 2014; Tiwari *et al.*, 2016; Rezaei *et al.*, 2017). در پژوهشی از شاخص‌های C_H^۱، HEI^۲ و HPI^۳ برای ارزیابی کیفیت آب سطحی در قسمت‌هایی از جنوب شرقی نیجریه استفاده شد. بر اساس شاخص HEI، ۶۵/۵ درصد منطقه مورد بررسی در کلاس آلودگی کم قرار داشت؛ اما شاخص‌های C_H و HPI بیانگر کلاس‌های آلودگی به ترتیب زیاد و کم در منطقه بودند (Edet and Offiong, 2002). تفاوت در نتایج شاخص‌های این مطالعه بیانگر تأثیرپذیری شاخص‌ها از تغییرات غلظت عناصر بود که لزوم اعمال تأثیر شدت غلظت عناصر در محاسبات را نمایان می‌ساخت. بنابراین محققان از حاصل ضرب میانگین‌ها برای اصلاح حدود دسته کلاس‌ها استفاده کردند. تحلیل نمونه‌های آب زیرزمینی و خاک‌های اطراف معدن آهنگران در استان همدان و شهرستان ملایر نشان داد که مقدار شاخص HPI در هر ایستگاه نمونه‌برداری کمتر از حد بحرانی برای شرب بود که بیانگر قابلیت استفاده از منابع آب زیرزمینی اطراف معدن آهنگران همدان برای شرب بدون تهدید سلامت انسان و جانوران می‌باشد (Mehrabi *et al.*, 2015). ارزیابی آلودگی فلزات سنگین در آب-

4. Principal component analysis
5. Multiple Linear Regression

1. Degree of contamination
2. Heavy Metal Evaluation Index
3. Heavy Metal Pollution Index

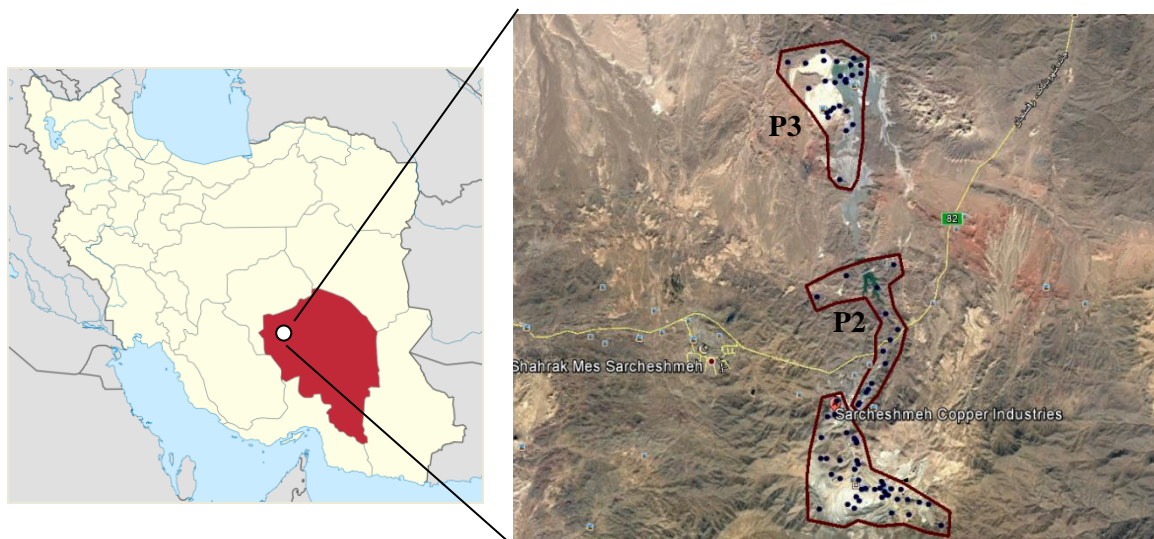
درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی و در ارتفاع ۲۶۰۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است (شکل ۱). فعالیت صنایع مس به مدت چندین دهه در منطقه سرچشمه، تأثیر زیادی بر کیفیت آب، خاک و هوا داشته است. در مدت چندین سال، زه‌آب‌های صنعتی به داخل رودخانه شور تخلیه می‌شوند. چندین معدن مس در این منطقه وجود دارد که به صورت معادن باز حفاری شده‌اند. بیشتر این معادن در ۴۰ سال گذشته فعال شده‌اند. در برخی قسمت‌ها، خاک‌های سطحی به طور طبیعی شامل غلظت‌های زیاد مس و دیگر عناصر سنگین مانند روی، آرسنیک و کادمیوم است. با توجه به فعالیت‌های معدنی و در نتیجه توزیع گرد و غبار، خاک‌های اطراف معادن مس سرچشمه آلوده به فلزاتی مانند مس، روی، آرسنیک، کادمیوم و دیگر فلزات می‌باشند. تغلیظ سنگ معدن با استفاده از روش‌های شناورسازی و ذوب و در نزدیکی سایت‌های معدنی انجام می‌شود که در این صورت گرد و غبار و آب‌های آلوده به مناطق اطراف حمل می‌شوند (Ghaderian and Ravandi, 2012).

های آب از استاندارد WHO (2011) استفاده و شاخص‌های آلودگی HPI، HEI، C_d محاسبه و نقشه‌های توزیع مکانی آن‌ها تهیه شد. از این شاخص‌ها به عنوان معیارهای کمی تشخیص مناطق با درجه آلودگی زیاد فلزات سنگین استفاده شد. علاوه بر این به‌عنوان نوآوری تحقیق، توسعه شاخص‌ها با کاربرد روش‌های آماری چندمتغیره رگرسیون خطی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام، توزیع غلظت فلزات سنگین و اثرات آنها بر یکدیگر بررسی و روابط جدیدی مبتنی بر PCA-MLR برای محاسبه شاخص‌های آلودگی فلزات سنگین در منطقه ارائه شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

مس سرچشمه و مناطق اطراف آن یکی از مهم‌ترین مناطق صنعتی در کشور و در استان کرمان می‌باشد. معدن مس سرچشمه در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غرب شهرستان کرمان، در مختصات جغرافیایی ۵۵ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۲۹



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی معدن، توزیع مکانی داده‌های جمع‌آوری شده و زون‌های فعالیت‌های مس سرچشمه

توسط واحد تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه مربوط به ۸۲ نقطه با مختصات مکانی متفاوت و در مجموع ۹۲۴ نمونه غلظت استفاده شده است. اطلاعات بیشتر در این زمینه در پژوهش‌های (Malakooti *et al.*, 2015)، (Khorasanipour and Eslami, 2014)، (Khorasanipour *et al.*, 2011) و (Keshavarzi *et al.*, 2013) قابل دستیابی است. نمونه‌ها شامل ۱۱ عنصر سنگین می‌باشد که اطلاعات آماری آنها در جدول (۱) آمده است.

جمع‌آوری داده

در این پژوهش، منطقه مطالعاتی مورد نظر به ۳ زیربخش تقسیم شده است (شکل ۱). این تقسیم‌بندی بر اساس نوع فعالیت آنها انجام شده است به طوری که پلیگون شماره ۱ شامل فعالیت‌های معدنی، پلیگون شماره ۲ شامل رودخانه شور و زه‌آب‌های حاصل از فعالیت‌های صنعتی مس سرچشمه و جریان آب در سد ذخیره زه‌آب‌های صنعتی و پلیگون شماره ۳ شامل جریان زه‌آب در رسوبات خشک حاصل از صنعت مس می‌باشد. در این تحقیق از داده‌های کیفیت آب گزارش شده

جدول ۱- شاخص های آماری عناصر مورد بررسی در آب های مورد استفاده مس سرچشمه

| عناصر | حداقل (µg/lit) | حداکثر (µg/lit) | میانگین (µg/lit) | چولگی | کشیدهی | انحراف استاندارد |
|----------------|-------------------|--------------------|---------------------|-------|--------|---------------------|
| آلومینیوم (Al) | ۰ | ۱۰۸۸۶۰۵۰ | ۲۱۳۹۲۱/۶ | ۸/۴۵ | ۷۴/۲۱ | ۱۲۲۲۱۸۰/۸ |
| آرسنیک (As) | ۰/۲۷ | ۴۴۳ | ۲۴/۶۶ | ۴/۹۲ | ۲۴/۰۴ | ۷۶/۲۷ |
| کادمیوم (Cd) | ۰ | ۶۷۱۷/۵۸ | ۱۶۴/۰۱ | ۸/۴۴ | ۷۴/۲۸ | ۷۵۰/۳۱ |
| کبالت (Co) | ۰/۰۱ | ۴۰۷۲۸/۳۳ | ۱۵۵۹/۹۱ | ۵/۶۴ | ۳۶/۸۷ | ۵۳۶۴/۸۳ |
| مس (Cu) | ۰ | ۳۱۱۴۸۳۷ | ۶۴۸۳۸/۰۴ | ۸/۱۹ | ۷۰/۴۳ | ۳۵۳۸۵۱/۱۸ |
| آهن (Fe) | ۵ | ۲۳۸۱۷۴۶ | ۳۹۵۱۲/۱۳ | ۸/۶۸ | ۷۷/۱۵ | ۲۶۵۷۴۰/۳ |
| منگنز (Mn) | ۱ | ۵۷۰۶۷۱/۱ | ۳۷۰۵۸/۹۸ | ۴/۳۱ | ۲۱/۰۶ | ۸۸۵۴۷/۹۴ |
| مولیبدن (Mo) | ۰ | ۳۷۸۶/۳ | ۴۴۸/۹۷ | ۲/۰۵ | ۳/۲۸ | ۸۹۱/۷ |
| نیکل (Ni) | ۰/۱ | ۲۴۰۰۹/۳ | ۱۳۳۸/۹۷ | ۴/۱۷ | ۲۰/۰۶ | ۳۶۴۷/۶۹ |
| سرب (Pb) | ۰/۰۹ | ۱۳۲۰ | ۲۷/۸۱ | ۸/۳۸ | ۷۲/۸۸ | ۱۴۸/۶۹ |
| روی (Zn) | ۱/۲ | ۴۳۸۴۷۹/۴ | ۱۹۹۶۸/۱۴ | ۵/۱۷ | ۳۱/۳ | ۵۹۸۷۷/۹۱ |

شاخص های ارزیابی آلودگی

شاخص های مورد استفاده در مقاله حاضر به منظور ارزیابی گستره ی آلودگی فلزات سنگین شامل شاخص ارزیابی فلزات سنگین (HEI)، شاخص آلودگی فلزات سنگین (HPI) و درجه آلودگی (C_d) می باشند که برای ارزیابی وضعیت شرب آب مورد استفاده قرار می گیرند. در ادامه شاخص های HEI، HPI و C_d شرح داده می شوند.

شاخص HEI کیفیت کلی آب را با توجه به فلزات سنگین بدست می دهد (Edet and Offiong, 2002; Prasanna et al., 2012) و به صورت معادله ۱ بیان می شود:

$$HEI = \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{S_i} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که M_i و S_i به ترتیب بیانگر مقدار اندازه گیری شده و حداکثر غلظت مجاز آلاینده فلز سنگین می باشند. غلظت های زیاد فلز در مقایسه با مقدار S_i نشان دهنده کیفیت نامناسب و بد آب می باشد. بر اساس این شاخص اگر غلظت هر فلز بیشتر از حداکثر مقدار مجاز موجود در استانداردها شود (یعنی نسبت Mi/Si بیشتر از مقدار عدد یک شود)، از این آب نمی توان استفاده کرد. بنابراین، مقدار یک به عنوان آستانه خطر آلودگی بر اساس شاخص HEI در نظر گرفته شده است.

شاخص HPI بر اساس وزن اختصاص داده شده (W_i) به هر پارامتر انتخابی محاسبه و ارزیابی می شود. این وزن انتخابی، مقدار دلخواهی بین صفر تا یک دارد و انتخاب آن به ملاحظات کیفی فردی و مشاهداتی بستگی دارد. در پژوهش حاضر وزن W_i به صورت نسبت عکس مقدار مجاز استاندارد برای هر فلز

سنگین (S_i) در نظر گرفته شده است (Mohan et al., 1996; Prasanna et al., 2012). در مطالعه حاضر، حدود غلظت یعنی مقدار مجاز استاندارد (S_i) و بیشترین مقدار مطلوب (I_i) (حد ایده آل) هر عنصر بر اساس استاندارد سازمان بهداشت جهانی^۱ (WHO, 2011) تعریف شدند (جدول ۲). Mohan et al., (1996) مقدار عددی ۱۰۰ را به عنوان حد بحرانی شاخص آلودگی معرفی کردند. مقدار عددی HPI با استفاده از معادله ارائه شده توسط Mohan et al., (1996) محاسبه می شود:

$$HPI = \frac{\sum_{i=1}^n W_i Q_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (\text{رابطه ۲})$$

که W_i و Q_i به ترتیب بیانگر زیرشاخص و واحد وزن آلاینده سنگین و n نشان دهنده تعداد عناصر مورد بررسی می باشند. زیرشاخص Q_i به صورت زیر تعیین می شود:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - I_i|}{S_i - I_i} \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

که I_i بیانگر غلظت ایده آل و غلظت مجاز استاندارد آلاینده عنصر می باشند.

شاخص آلودگی Cd، دربرگیرنده اثرات ترکیبی چندین پارامتر کیفی آب است که این پارامترها به عنوان عناصر مضر برای آب شرب در نظر گرفته شده اند (Prasanna et al., 2012). بر اساس تحقیقات Edet and Offiong (2002) مقدار عددی C_d را می توان به سه دسته کم (C_d < 1)، متوسط (C_d = 1-3) و زیاد (C_d > 3) تقسیم کرد. پارامتر C_d به صورت زیر محاسبه می شود:

دلیل غیرپارامتریک بودن توزیع یون‌ها در نمونه‌های آب، استفاده از ضریب همبستگی اسپیرمن در تحلیل‌ها مناسب به نظر می‌رسد. ضریب همبستگی r در بازه ۱ تا -۱ تغییر می‌کند. اعداد ۱ و -۱ بیانگر رابطه همبستگی خوب بین پارامترها و عدد صفر نشان‌دهنده عدم همبستگی می‌باشد. در اینجا باید متذکر شد که اگر مقدار r بزرگتر از $0/7$ باشد، دو پارامتر همبستگی زیاد دارند و اعداد بین $0/5$ تا $0/7$ نیز نشان‌دهنده همبستگی متوسط بین پارامترها می‌باشند (Shyu et al., 2011).

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_{fi} \quad (\text{رابطه ۴})$$

$$C_{fi} = \frac{M_i}{S_i} - 1 \quad (\text{رابطه ۵})$$

که C_{fi} نشان‌دهنده فاکتور آلودگی نامین عنصر می‌باشد.

تحلیل‌های آماری

برای درک و فهم رابطه بین غلظت عناصر سنگین و شاخص‌های محاسبه شده ماتریس همبستگی بررسی و ساخته می‌شود. به

جدول ۲- حدود غلظت‌های مجاز استاندارد و بیشترین غلظت مطلوب عناصر سنگین بر اساس استاندارد (WHO (2011) (واحدها بر حسب میکروگرم بر لیتر)

| عنصر | مقدار مجاز بیشترین (I) مطلوب | مقدار استاندارد (S) | عنصر | مقدار مجاز بیشترین (I) مطلوب | مقدار استاندارد (S) |
|---------|------------------------------|---------------------|-----------|------------------------------|---------------------|
| منگنز | ۱۰۰ | ۳۰۰ | آلومینیوم | - | ۵۰ |
| مولیبدن | - | ۷۰ | آرسنیک | ۱۰ | ۵۰ |
| نیکل | - | ۷۰ | کادمیوم | ۳ | ۵ |
| سرب | - | ۵۰ | کبالت | - | ۱۰۰ |
| روی | ۳۰۰۰ | ۵۰۰۰ | مس | ۵۰ | ۱۰۰۰ |
| | | | آهن | ۱۰۰ | ۳۰۰ |

نتایج PCA با MLR برای تدوین روابط جدید شاخص‌ها استفاده شد. بدین منظور ۵۰٪ داده‌ها (۴۶۲ پارامتر) در تحلیل PCA و MLR استفاده شد و از ۵۰٪ باقیمانده (۴۶۲ پارامتر) که وارد محاسبات نشده بودند، برای ارزیابی روابط پیشنهادی در محاسبه شاخص‌های HPI، HEI، و C_d استفاده شد. رویکرد مورد استفاده در تحقیق حاضر در ارائه روابط جدید مشابه رویکرد استفاده شده در تحقیقات دیگر (Khuon et al., 2002; Mohammadpour et al., 2016; Sahu et al., 2011; Ahmad et al., 2017; Araghinezhad et al., 2017; Mohammadpour et al., 2015; Gazzaz et al., 20012; et al.) است با این تفاوت که در تحقیق حاضر روابط صریح و ساده‌ای نیز برای محاسبه شاخص‌های سه‌گانه HPI، HEI، و C_d در آب‌های سطحی منطقه مس سرچشمه توسعه یافته است و دقت آنها در داده‌های مستقل مرحله آزمایش بررسی شده است.

همچنین از تحلیل خوشه‌ای به روش HCA^1 برای بررسی وضعیت عناصر در نمونه‌های آب و گروه‌بندی آنها استفاده شد. از خصوصیات مهم این روش، ترسیم نمودار دندوگرافی است و انتخاب تعداد خوشه‌ها به صورت خودکار انجام می‌شود. از مزایای دیگر این روش آن است که یک نمونه می‌تواند به تنهایی تشکیل یک خوشه را دهد (Fakhri et al., 2016). تحلیل‌ها با

یکی دیگر از روش‌های تحلیل آماری مورد استفاده در تحقیق حاضر، کاربرد تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای کاهش تعداد متغیرها با روابط معنادار و تفسیر بهتر حجم زیادی از اطلاعات و داده‌ها است. این روش امکان کاهش ابعاد متغیرهای اولیه را فراهم می‌آورد (Rezaei et al., 2017). در روش PCA، مقادیر ویژه و بردارهای ویژه از ماتریس کواریانس متغیرهای اولیه استخراج می‌شوند. تحلیل مؤلفه‌های اصلی یکی از ابزارهای قدرتمند تشخیص الگو است که می‌تواند واریانس مجموعه‌ی بزرگی از متغیرهای وابسته را با مجموعه کوچکی از متغیرهای غیروابسته (مؤلفه‌های اصلی) توضیح دهد (Simeonov et al., 2003). در این صورت، مؤلفه‌های اصلی شامل ترکیبات خطی وزن‌دهی شده از متغیرهای اولیه می‌باشند. مؤلفه‌های اصلی بیانگر اطلاعات پارامترهای معناداری هستند که همه مجموعه داده‌ها را توصیف می‌کنند در حالی که داده‌های اولیه کاهش می‌یابند. چون در تشکیل مؤلفه‌ها از متغیرهای اولیه استفاده می‌شود، تفسیر مؤلفه‌ها مشکل خواهد بود، بنابراین متغیرهای جدیدی از چرخش وریماکس متغیرهای حاصل از PCA ایجاد می‌شود که در تفسیر استفاده می‌شوند (Seifi et al., 2011).

در این تحقیق بعد از شناسایی متغیرهای مؤثر بر شاخص‌های آلودگی و کاهش تعداد متغیرهای ورودی از ترکیب

1. Hierarchical cluster analysis

مقادیر آرسنیک بیشتر از حد مجاز داشتند (جدول ۳). غلظت کبالت در قسمت شرقی پلیگون ۱، ابتدا و انتهای رودخانه شور (پلیگون ۲) و قسمت انتهایی سد رسوبگیر کمتر از حداکثر مجاز و در بقیه نقاط بیشتر از آن می باشد. در قسمت هایی از رودخانه شور و قسمت انتهایی سد رسوبگیر، غلظت عناصر مس و آهن کمتر از حداکثر مجاز بوده ولی در بقیه نقاط متجاوز از مقدار حداکثر مجاز است. غلظت منگنز در سایت معدنکاری و کارخانه و در قسمت های مرکزی تا انتهایی رودخانه شور کمتر از حداکثر مجاز ۷۰ میکروگرم بر لیتر است اما در پلیگون ۳، غلظت های زیاد از این عنصر مشاهده شده است.

در اکثر نقاط نمونه برداری، غلظت عنصر سرب کمتر از حداکثر مجاز (WHO 2011) است و غلظت های زیاد این عنصر در محل جمع آوری زهاب خروجی از کارخانه و در ابتدای سد رسوبگیر اندازه گیری شده است. غلظت عنصر روی در رودخانه شور و قسمت های شرقی سایت معدنکاری و محل خروج زه آب به سد جمع آوری زه آب و همچنین در قسمت انتهایی سد رسوبگیر کمتر از حد مجاز بوده است. به طور کلی، کمترین غلظت عناصر سنگین در رودخانه شور و قسمت انتهایی سد رسوبگیر مشاهده شده است که مطابق با استاندارد WHO (2011) آب این قسمت ها مناسب برای شرب می باشد و بیشترین آنها مربوط به سایت اصلی معدنکاری به دلیل معدن باز و رفت و آمد ماشین آلات و همچنین مربوط به آب های موجود در سد رسوبگیر به دلیل تماس با رسوبات خشک نهشته می باشد که در تحقیق (Mahato et al., 2017) نیز این نتیجه در بررسی جریان های سطحی معدن زغال سنگ حاصل شده است. متوسط غلظت فلزات سنگین اندازه گیری شده به صورت توالی آلومینیوم < مس < آهن < منگنز < روی < کبالت < نیکل < مولیبدن < کادمیوم < سرب < آرسنیک می باشد (جدول ۱). غلظت های زیاد عناصر را می توان به ساختار و مواد پوسته زمین و شکل گیری زمین شناسی منطقه و فقدان روش استحصال مناسب فلزات سنگین پساب معدن نسبت داد (Senapaty and Behera, 2012). پسماندهای معدن باطله کانسار مس سرچشمه شامل ۴۲٪ کوارتز، ۹٪ آلبیت، ۲۴٪ سریت، ۱۱٪ کلریت، ۸/۳٪ ارتوکلان و ۷/۵ درصد پیریت است (Khorasanipour et al., 2011). پیریت فراوان ترین سولفید معدنی در این مورد است که خود شامل عناصر آرسنیک، کادمیم، مس، کبالت، مولیبدن و روی است. بالا بودن غلظت آلومینیوم در آب های منطقه به علت ترکیبات کانی شناسی و زمین شناسی کانسار مس سرچشمه است که درصد بالایی از ترکیبات پسماندی مس سرچشمه از نوع آلومینوسیلیکاتی هستند و منجر به پراکنش و انتقال آلومینیوم توسط پساب معدنی مجتمع در طول رودخانه شور

نرم افزار SPSS انجام شده است.

پهنه بندی مکانی

سیستم اطلاعات جغرافیایی^۱ (GIS) از ابزارهای مؤثر و مناسب بررسی توزیع مکانی اطلاعات و داده ها است که امکان تصمیم گیری سریع را فراهم می آورد. در این مطالعه، نقشه های توزیع مکانی عناصر سنگین اندازه گیری شده در منطقه مس سرچشمه و همچنین شاخص های محاسباتی با استفاده از نرم افزار ArcGIS تهیه می شود. از روش میان یابی وزن دهی عکس فاصله^۲ (IDW) به منظور مدلسازی مکانی پارامترها استفاده شده است (Salehi et al., 2017). در روش IDW، فرض بر این است که در یک سطح میان یابی، اثر پارامتر مورد بررسی بر نقاط اطراف یکسان نیست. به طوری که نقاط نزدیک بیشتر و نقاط دورتر کمتر تحت تأثیر قرار می گیرند و هر چه فاصله از مبدأ بیشتر شود، اثر پارامتر کمتر می شود (Rakotondrabe et al., 2018).

نتایج و بحث

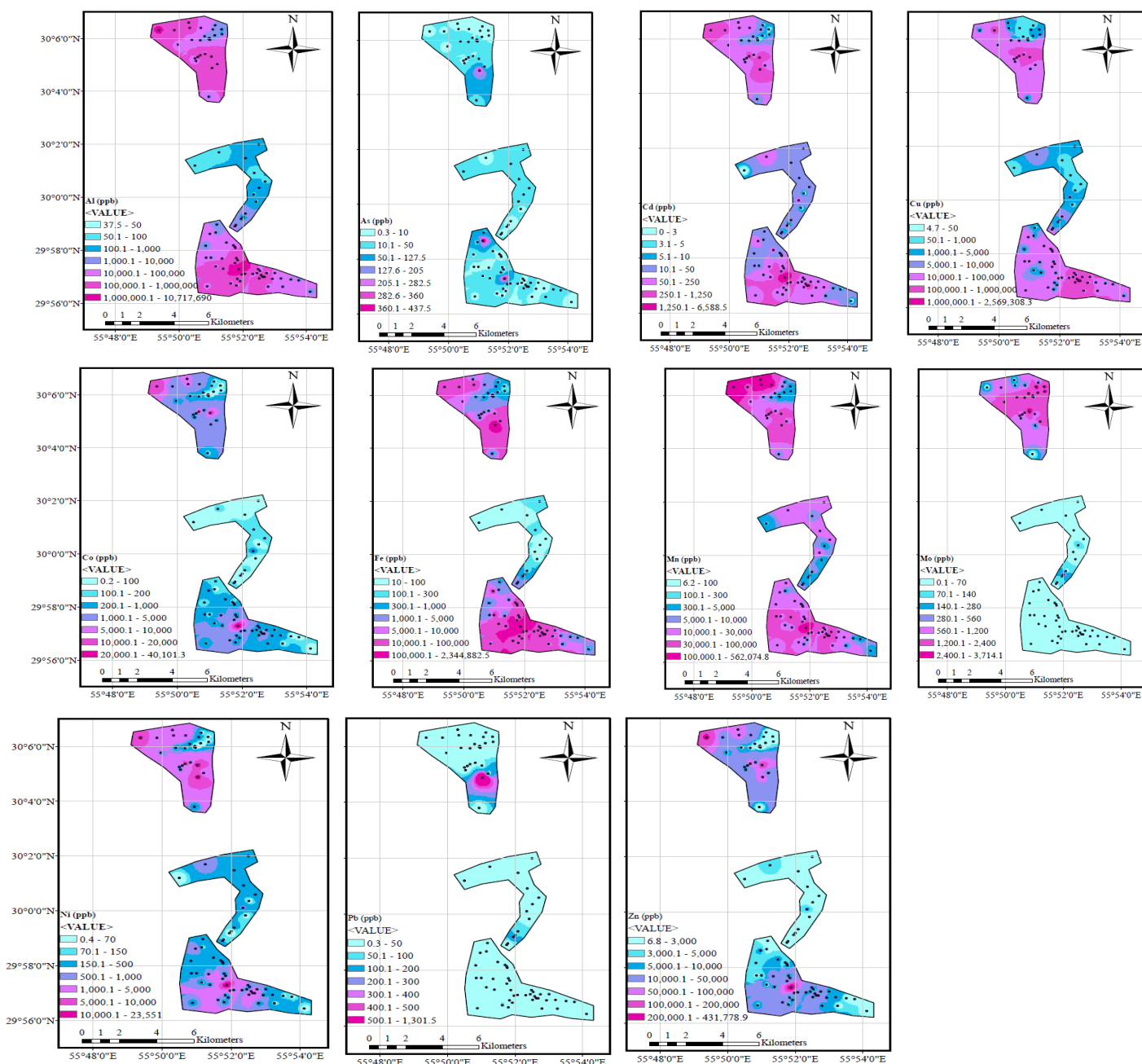
غلظت عناصر سنگین در آب های منطقه مورد مطالعه

به منظور پهنه بندی غلظت عناصر و شاخص های فلزات سنگین ابتدا منطقه مورد مطالعه بر اساس نوع فعالیت صنعتی و معدنی هر محدوده به سه پلیگون بر اساس فعالیت های مختلف تقسیم شد و کیفیت آب ها در هر منطقه مستقل از مناطق دیگر و با توجه به شدت تأثیر زه آب های مجتمع مس، جریان آب های سطحی موجود و توپوگرافی حوضه رودخانه شور مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل (۲) پهنه بندی کیفیت آب ها در منطقه مورد مطالعه با توجه به غلظت فلزات سنگین در مناطق سه گانه آورده شده است. در این شکل ها، غلظت فلزات سنگین با مقادیر استاندارد (WHO 2011) مورد مقایسه قرار گرفته است. بر اساس شکل های پهنه بندی عناصر با روش میان یابی IDW، غلظت عناصر آلومینیوم، کادمیوم، منگنز و نیکل در هر سه پلیگون بیش از حداکثر مجاز می باشند. غلظت های زیاد این عناصر را می توان به زه آب حاصل از مواد تخلیه سطحی و زباله های معدنی نسبت داد (Mahato et al., 2017). غلظت آرسنیک در انتهای سایت معدن کاری، جایی که تخلیه زه آب ها به داخل رودخانه شور انجام می شود (پلیگون ۱) و در قسمت ابتدایی سد رسوبگیر (پلیگون ۳) بیشتر از حد مجاز است. غلظت های زیاد آرسنیک در آب آشامیدنی به عنوان تهدیدی جدی برای سلامت بشر محسوب می شود. ۴/۹ درصد از ایستگاه های اندازه گیری،

1. Geographic information system
2. Inversedistance weighted

است. این امر احتمال نفوذ به جریان آب‌های زیرزمینی دشت رفسنجان و آلودگی آبخوان را افزایش می‌دهد. نقشه پهنه‌های حاصل از غلظت فلزات سنگین نشان‌دهنده انحراف معیار زیاد و تغییرات وسیع آنها در محدوده مجتمع مس و سد رسوبگیر است و انتقال فلزات از محل مجتمع مس و تجمع آنها در سد را نشان می‌دهد. این وضعیت نیاز به پایش و تصفیه فلزات سنگین از زه‌آب تولیدی شرکت مس و لزوم استحصال بهتر فلزات جانبی از زه‌آب مس را ایجاب می‌نماید.

می‌شود. غلظت بالای عنصر کادمیوم در مقایسه با بیشینه محلی آن به علت قابلیت تحرک بالای این عنصر در جریان آب سطحی زه‌آب معدن است (Kargar *et al.*, 2012). کاهش غلظت آلاینده‌ها در طول رودخانه شور نشان‌دهنده رقیق شدن آنها در اثر جریان آب‌های فصلی و سطحی موجود است ولی غلظت بالای عناصر در محل مجتمع مس و در محل سد رسوبگیر نشان‌دهنده عدم استحصال مناسب این فلزات طی فرآیندهای تغلیظ - جداسازی و انحلال سنگ‌های آتشفشانی دگرسان شده در منطقه و رهاسازی آنها در جریان آب‌های سطحی منطقه



شکل ۲- نقشه توزیع مکانی عناصر سنگین در آب‌های مورد بررسی در منطقه مس سرچشمه

شدند (جدول ۴). در جدول ۴ W_i برای عناصر مختلف به صورت نسبت معکوس حداکثر غلظت مجاز این عناصر محاسبه شده است. با توجه به این جدول مقادیر W_i و Q_i محاسبه شدند و مقدار میانگین HPI با استفاده از همه نمونه های آب بیشتر از حد بحرانی ۱۰۰ محاسبه شد و بنابراین به طور میانگین آب های معدنی منطقه مورد بررسی قابلیت استفاده برای شرب را ندارند و این در حالی است که در توزیع مکانی در شکل (۴) مقادیر HPI تغییرات وسیعی و مقادیر بسیار بیشتر از حد بحرانی دارد. به طور مشابه مقادیر HPI برای هر یک از ایستگاه های مورد ارزیابی محاسبه و نقشه توزیع مکانی آن در شکل (۴) آورده شده است. مقادیر حداقل و حداکثر HPI در ۸۲ ایستگاه به ترتیب برابر با ۱۸/۳ و ۴۸۲۲۴۵/۳ محاسبه شد. نقشه توزیع مکانی HPI نشان دهنده مقادیر زیاد و بیشتر از حد بحرانی آلودگی در تقریباً تمامی قسمت ها و علی الخصوص در پلیگون ۱ و ۳ می باشد که با نقشه های توزیع مکانی همخوانی دارد. مقدار حداکثر HPI در پلی گون های شماره ۱ و ۳ می تواند به دلیل آبشویی فلزات سنگین از خاک و زه آب خروجی از فعالیت های معدنکاری و همچنین انتقال این فلزات از رسوبات سد رسوبگیر باشد. در این نقاط HPI بیشتر از حد بحرانی ۱۰۰ است که بیانگر آلودگی با فلزات سنگین و عدم قابلیت استفاده برای شرب می باشد. فقط قسمت شرقی پلیگون شماره ۲ (رودخانه شور) مقدار HPI زیر حد بحرانی ۱۰۰ و در نتیجه قابل شرب است. در این نقشه ایستگاه هایی که مقدار HPI زیر حد بحرانی دارند با دایره های سبزرنگ نیز مشخص شده اند که شامل ۲۴ ایستگاه (حدود ۳۰ درصد ایستگاه ها) می باشد.

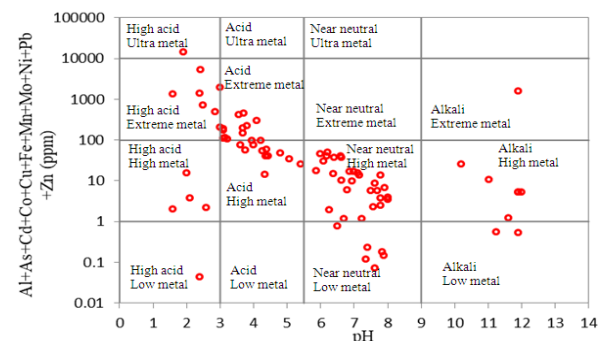
مقدار میانگین HEI با توجه به داده های فلزات سنگین تمام ایستگاه های مورد بررسی برابر با ۴۶۷۷/۵ محاسبه شد (جدول ۴) که بسیار بیشتر از حد بحرانی آلودگی آب های شرب (مقدار عددی یک) است. با محاسبه مقادیر HEI برای هر یک از ایستگاه ها، مقادیر حداقل و حداکثر این شاخص به ترتیب برابر با ۰/۴۶ و ۲۲۹۷۵۳/۷ محاسبه شد. توزیع نقطه ای HEI در شکل (۴) نشان می دهد که فقط دو نقطه در جنوب غربی پلیگون ۱ و یک نقطه در قسمت غربی پلیگون ۳ دارای آلودگی کمتر از حد بحرانی ۱ می باشند که تقریباً شامل ۴ درصد از ایستگاه های مورد بررسی می باشد. نقشه پهنه بندی HEI نیز مانند نقشه HPI مقادیر زیاد آلودگی در سایت معدنکاری و در سد رسوبگیر را نشان می دهد. مقدار میانگین شاخص C_d تمامی ایستگاه ها مطابق با جدول (۴) برابر با ۴۶۶۶/۵ محاسبه شد که این شاخص نیز آلودگی شدید آب های مورد بررسی را نشان می دهد. نقشه پهنه بندی این شاخص کاملاً مطابق با دو شاخص دیگر

طبقه بندی آب های مورد بررسی

برای طبقه بندی نمونه آب های مورد بررسی از نمودار ارتباط بین اسیدیته و مقدار کل فلزات سنگین (بر حسب میلی گرم بر لیتر) ارائه شده توسط Ficklin *et al* (1992) استفاده شده است (شکل ۳). محور عمودی کل فلزات سنگین است به صورت $Al+As+Cd+Co+Cu+Fe+Mn+Mo+Ni+Pb+Zn$ محاسبه شد. نتایج نشان می دهند تعداد زیادی از نمونه ها شامل ۵۳ نمونه (تقریباً ۶۵ درصد) در کلاس فلزات سنگین زیاد (از اسیدی زیاد تا قلیایی) و فقط ۹ نمونه (۱۱ درصد) در کلاس های فلزات کم قرار گرفتند. ۳۶/۶ درصد نمونه ها در کلاس نزدیک به خنثی-فلزات زیاد، ۱۷ درصد نمونه ها در کلاس اسیدی-فلزات زیاد و ۱۶ درصد نمونه ها در کلاس اسیدی-فلزات خیلی زیاد قرار گرفتند. غلظت زیاد فلزات در این ایستگاه ها، تهدیدی جدی برای مصارف شرب می باشد.

جدول ۳- درصد نمونه های موجود در محدوده های غلظتی عناصر مطابق با

| عنصر | تعداد (درصد) نقاط دارای غلظت کمتر از بیشترین مقدار مطلوب | | تعداد (درصد) نقاط دارای غلظت بین بیشترین مقدار مطلوب و غلظت بیشتر از حداکثر مجاز | |
|------|--|--------|--|--------|
| | تعداد | درصد | تعداد | درصد |
| Al | - | - | ۶۱ | (۷۴/۴) |
| As | ۵۹ | (۷۱/۹) | ۱۹ | (۲۳/۲) |
| Cd | ۲۷ | (۳۲/۹) | ۳ | (۳/۷) |
| Co | - | - | ۳۸ | (۴۶/۳) |
| Cu | ۲۳ | (۲۸) | ۱۶ | (۱۹/۵) |
| Fe | ۳۲ | (۳۹) | ۷ | (۸/۵) |
| Mn | ۱۳ | (۱۵/۸) | ۳ | (۳/۷) |
| Mo | - | - | ۵۸ | (۷۰/۷) |
| Ni | - | - | ۵۱ | (۶۲/۲) |
| Pb | - | - | ۷۷ | (۹۳/۹) |
| Zn | ۴۳ | (۵۲/۴) | ۱۵ | (۱۸/۳) |



شکل ۳- طبقه بندی نمونه های آب بر اساس دیگرام Ficklin *et al* (1992)

ارزیابی توزیع مکانی شاخص های آلودگی فلزات سنگین برای ارزیابی توزیع آلودگی و قابلیت شرب آب های معدنی مورد بررسی در مس سرچشمه، شاخص های HPI، HEI و C_d محاسبه

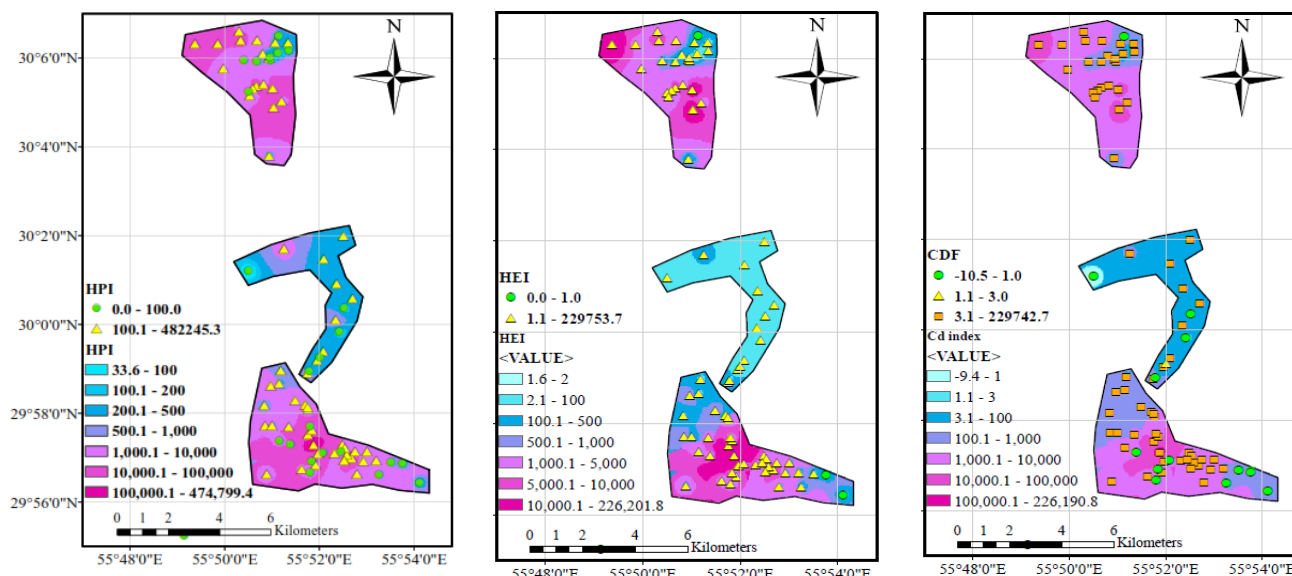
آلودگی فلزات سنگین در منابع آب زیرزمینی همدان را مطالعه نموده و میانگین مقادیر HPI، HEI و C_d را به ترتیب ۱/۹۵-، ۸/۶۹ و ۲/۰۴ بدست آورده‌اند که نشان‌دهنده سطوح آلودگی کم است ولی در تحقیق حاضر به علت وجود ساختار کانساری مس سرچشمه شدت آلودگی فلزات سنگین بسیار بالا است.

است و بیشترین مقادیر آلودگی را در پلیگون‌های ۱ و ۳ نشان می‌دهد. بر اساس توزیع نقطه‌ای شاخص C_d ، ۱۳ ایستگاه (۱۵/۸ درصد) آلودگی کم، یک ایستگاه (۱/۲ درصد) آلودگی متوسط و ۶۸ ایستگاه (۸۳ درصد) آلودگی زیاد آب شرب را نشان می‌دهند. در این زمینه (Sobhanardakani 2016) شاخص‌های

جدول ۴- مقادیر میانگین غلظت فلزات سنگین و محاسبات مرتبط با شاخص‌های آلودگی

| عنصر | میانگین (µg/lit) | Q_i | W_i | $W_i \times Q_i$ | M_i / S_i | $(M_i / S_i) - 1$ |
|------|------------------|---------|-------|------------------|-------------|-------------------|
| Al | ۲۱۳۹۲۱/۶ | ۴۲۷۸/۴۳ | ۰/۰۲ | ۸۵/۵۷ | ۴۲۷۸/۴۳ | ۴۲۷۷/۴۳ |
| As | ۲۴/۶۶ | ۰/۳۷ | ۰/۰۲ | ۰/۰۱ | ۰/۴۹ | -۰/۵۱ |
| Cd | ۱۶۴/۰۱ | ۸۰/۵۱ | ۰/۳ | ۲۴/۱۵ | ۳۲/۸ | ۳۱/۸ |
| Co | ۱۵۵۹/۹۱ | ۱۵/۶ | ۰/۰۱ | ۰/۱۶ | ۱۵/۶ | ۱۴/۶ |
| Cu | ۶۴۸۳۸/۰۴ | ۶۸/۲ | ۰/۰۰۱ | ۰/۰۷ | ۶۴/۸۴ | ۶۳۴/۸۴ |
| Fe | ۳۹۵۱۲/۱۳ | ۱۹۷/۰۶ | ۰/۰۰۵ | ۰/۹۹ | ۱۳۱/۷۱ | ۱۳۰/۷۱ |
| Mn | ۳۷۰۵۸/۹۸ | ۱۸۴/۷۹ | ۰/۰۲ | ۳/۷ | ۱۲۳/۵۳ | ۲۳/۵۳ |
| Mo | ۴۴۸/۹۷ | ۶/۴۱ | ۰/۰۱۴ | ۰/۰۹ | ۶/۴۱ | ۵/۴۱ |
| Ni | ۱۳۳۸/۹۷ | ۱۹/۱۳ | ۰/۰۵ | ۰/۹۶ | ۱۹/۱۳ | ۱۸/۱۳ |
| Pb | ۲۷/۸۱ | ۰/۵۶ | ۰/۷ | ۰/۳۹ | ۰/۵۶ | -۰/۴۴ |
| Zn | ۱۹۹۶۸/۱۴ | ۸/۴۸ | ۰/۰۰۲ | ۰/۰۰۲ | ۳/۹۹ | ۲/۹۹ |

$$\sum W_i = 1.14, \sum W_i Q_i = 116.07, HPI = 101.77, HEI = 4677.5, C_d = 4666.5$$

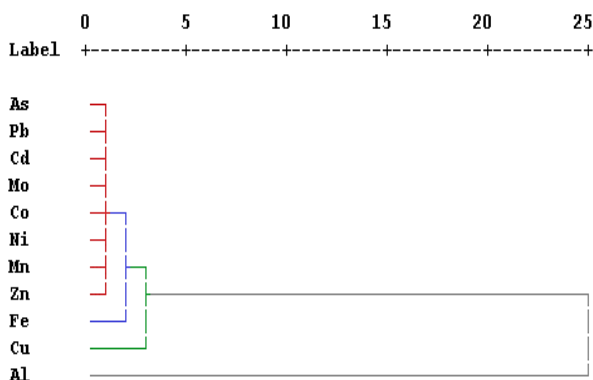


شکل ۴- پهنه‌بندی شاخص‌های آلودگی آب شرب در منطقه مس سرچشمه

مشاهده می‌شود، اکثر عناصر در خوشه یک قرار گرفته‌اند. خوشه اول که با رنگ قرمز نشان داده شده است شامل فلزاتی همچون As، Pb، Cd، Mo، Co، Ni، Mn و Zn است که در نمونه‌های آب بیشترین شباهت را از نظر مقداری با یکدیگر دارند. خوشه دوم حاوی فلز Fe، خوشه سوم حاوی فلز Cu و در نهایت خوشه چهارم شامل فلز Al می‌باشد که در ارتباط با خوشه اول می‌باشد. بر اساس نتایج آنالیز خوشه‌بندی در شکل (۵) که سه

توسعه روابط بر اساس تحلیل خوشه‌ای، تحلیل همبستگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی با توجه به شدت تغییرات بسیار وسیع آلاینده‌ها و شاخص‌ها در منطقه مورد مطالعه روش‌های آنالیز خوشه‌ای، تحلیل همبستگی و تحلیل مؤلفه‌های اصلی عناصر با استفاده از نرم‌افزار SPSS انجام شد. در شکل (۵) نمودار دندوگرام تحلیل خوشه‌ای غلظت فلزات سنگین مورد بررسی آورده شده است. همان‌طور که

ضریب همبستگی آن برابر با ۰/۹۵ محاسبه شد و نتایج نشان دادند که روند مشابهی در توزیع مکانی این شاخص‌ها وجود دارد (شکل ۴). شاخص HPI همبستگی خوبی با عناصر آلومینیوم، کادمیوم، کبالت، منگنز، نیکل و روی ($r > 0/8$) دارد و همبستگی بین HPI و دو عنصر آرسنیک ($r = -0/06$) و مولیبدن ($r = -0/19$) منفی و غیرمعنادار است. عناصر مس، آهن و سرب دارای همبستگی معنادار به ترتیب برابر با ۰/۵۶، ۰/۵۴ و ۰/۳۵ با HPI هستند. این وضعیت در مورد همبستگی عناصر با شاخص‌های HEI و C_d نیز صادق است.



شکل ۵- دندوگرام حاصل از تحلیل خوشه‌ای غلظت فلزات سنگین

عنصر Fe، Cu و Al خوشه آلودگی جداگانه‌ای دارند، در هنگام ارزیابی آلودگی آب‌های منطقه مس سرچشمه حداقل باید غلظت سه عنصر Fe، Cu و Al حتماً مورد بررسی قرار گیرد. ماتریس همبستگی عناصر سنگین و شاخص‌های آلودگی در منطقه مورد مطالعه (جدول ۵) نشان می‌دهد که بیشترین مقدار همبستگی بین عناصر کبالت و نیکل و همچنین کبالت و روی با ضریب ۰/۹۶ وجود دارد و منشاء یابی و شدت تأثیر یکسانی را برای این عناصر نشان می‌دهد. همبستگی خوبی (با ضرایب همبستگی بیش از ۰/۷) بین عناصر آلومینیوم و کادمیوم، آلومینیوم و کبالت، کادمیوم و کبالت، آلومینیوم و منگنز، کادمیوم و منگنز، کبالت و منگنز، آلومینیوم و نیکل، کادمیوم و نیکل، کبالت و نیکل، منگنز و نیکل، آلومینیوم و روی، کادمیوم و روی، کبالت و روی، منگنز و روی و همچنین نیکل و روی وجود دارد. عنصر مولیبدن با تمامی فلزات سنگین مورد بررسی به جز آرسنیک ($r = 0/27$) و آهن ($r = 0/07$)، همبستگی منفی و ضعیفی دارد که در این صورت با افزایش غلظت سایر عناصر، غلظت مولیبدن کاهش می‌یابد و برعکس. ضرایب همبستگی آرسنیک نیز با سایر عناصر کم و در محدوده $-0/3$ تا $0/27$ قرار داشت. همبستگی بین HPI و دو شاخص HEI و C_d معنادار و

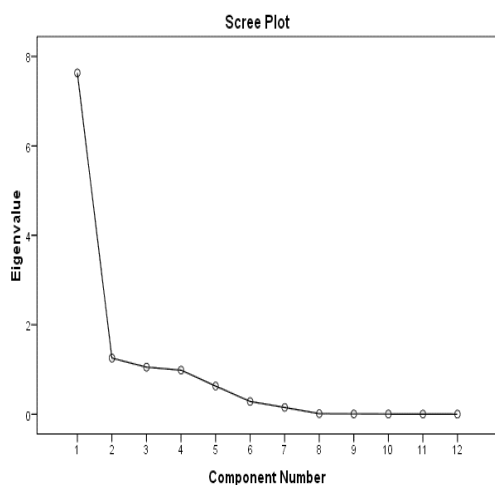
جدول ۵- ماتریس همبستگی عناصر سنگین و شاخص‌های آلودگی در منطقه مورد مطالعه (همبستگی اسپیرمن)

| عنصر | C_d | HEI | HPI | Zn | Pb | Ni | Mo | Mn | Fe | Cu | Co | Cd | As | Al |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|----|
| Al | ۰/۹۵** | ۰/۹۵** | ۰/۸۳** | ۰/۷۶** | ۰/۴۱** | ۰/۷۴** | -۰/۰۴ | ۰/۷۳** | ۰/۶۸** | ۰/۴۵** | ۰/۸** | ۰/۷۳** | -۰/۱۵ | ۱ |
| As | -۰/۱۱ | -۰/۱۱ | -۰/۰۶ | -۰/۱۱ | ۰/۲۳* | ۰/۰۴ | ۰/۲۷* | ۰/۰۰۵ | -۰/۰۶ | -۰/۳** | -۰/۰۶ | ۰/۰۴ | ۱ | |
| Cd | ۰/۸۷** | ۰/۸۷** | ۰/۹۳** | ۰/۹۲** | ۰/۲۴* | ۰/۹۲** | -۰/۰۲ | ۰/۹۴** | ۰/۴۱** | ۰/۵۳** | ۰/۹۱** | ۱ | | |
| Co | ۰/۹۲** | ۰/۹۲** | ۰/۹۳** | ۰/۹۶** | ۰/۳۲** | ۰/۹۶** | -۰/۲۱ | ۰/۹۴** | ۰/۵۸** | ۰/۵۱** | ۱ | | | |
| Cu | ۰/۵۷** | ۰/۵۷** | ۰/۵۶** | ۰/۴۹** | ۰/۲۷* | ۰/۴۲** | -۰/۲۱ | ۰/۴۳** | ۰/۲۶* | ۱ | | | | |
| Fe | ۰/۶۳** | ۰/۶۳** | ۰/۵۴** | ۰/۵۴** | ۰/۵۲** | ۰/۵۲** | ۰/۰۷ | ۰/۴۶** | ۱ | | | | | |
| Mn | ۰/۸۷** | ۰/۸۷** | ۰/۹۲** | ۰/۹۴** | ۰/۲۲* | ۰/۹۳** | -۰/۳** | ۱ | | | | | | |
| Mo | -۰/۱ | -۰/۱ | -۰/۱۹ | -۰/۳** | -۰/۰۳ | -۰/۱۶ | ۱ | | | | | | | |
| Ni | ۰/۸۶** | ۰/۸۶** | ۰/۹۱** | ۰/۹۴** | ۰/۲۸* | ۱ | | | | | | | | |
| Pb | ۰/۳۶** | ۰/۳۶** | ۰/۳۵** | ۰/۳۵** | ۱ | | | | | | | | | |
| Zn | ۰/۸۸** | ۰/۸۸** | ۰/۹۲** | ۱ | | | | | | | | | | |
| HPI | ۰/۹۵** | ۰/۹۵** | ۱ | | | | | | | | | | | |
| HEI | ۱** | ۱ | | | | | | | | | | | | |
| C_d | ۱ | | | | | | | | | | | | | |

تحلیل‌ها است (Seifi et al., 2011). با تحلیل PCA، مشخصات هر مؤلفه بدست آمد که بر اساس نتایج، چهار مؤلفه اول قادر به توجیه ۹۷ درصد از کل واریانس موجود در سری داده‌ها بودند. تغییرات مقادیر ویژه در مقابل شماره مؤلفه‌ها نشان داد برای مؤلفه‌های پنجم به بعد، نمودار به صورت افقی شده و بنابراین چهار مؤلفه اول در چرخش واریماکس استفاده شد (شکل ۶).

از PCA برای ارزیابی تفسیر داده‌های عنصری و تشخیص گروه داده‌های که منشأ یکسانی دارند و همچنین استخراج درجه اهمیت متغیرهای مؤثر بر شاخص‌ها استفاده شد. آزمون KMO و بارتلت نشان داد که ضریب $KMO=0.617$ و آزمون بارتلت برابر $991/75$ و معنی‌دار در سطح ۹۵٪ بدست آمد و نشان دهنده قابلیت استفاده از دو روش PCA و PFA در

پس از تشکیل مقادیر بردارهای ویژه که ضرایب هر مؤلفه را برای محاسبه آنها نشان می‌دهند، این بردارها با چرخش و ریماکس دوران داده شدند (جدول ۶). این چرخش سبب می‌شود تا وابستگی عوامل بارگذاری با مؤلفه‌های اصلی واضح‌تر شود و تشخیص اینکه تغییرات هر یک از مؤلفه‌ها تحت تأثیر کدام عامل (عنصر) است، آسان‌تر گردد. با توجه به نتایج مربوط به شاخص HPI، بیشترین بارگذاری‌ها در مؤلفه اول (PC1) مربوط به عناصر آلومینیوم، کادمیوم، کبالت، آهن، روی، منگنز و نیکل است که این مؤلفه بیانگر ۶۳/۳ درصد از کل واریانس موجود در داده‌ها می‌باشد. مؤلفه اول مربوط به شاخص فلزات سنگین است. این مؤلفه با توجه به وزن عناصر مؤثر در آن بیانگر ترکیب فعالیت‌های معدنی و تشکیلات زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه است و نشان‌دهنده آشوبی فلزات سنگین آلومینیوم، کادمیوم، کبالت، آهن، روی، منگنز و نیکل به داخل منابع آب سطحی و زیرزمینی موجود در معدن است که باعث آلودگی منابع آب می‌شوند (Mahato et al., 2017). مؤلفه دوم و C_d نیز صادق هستند.



شکل ۶- نمودار واریزه‌ای (Scree plot) داده‌های عناصر سنگین منطقه مورد مطالعه

PCA, PFA بزرگتر از ۰/۷۵، بین ۰/۷۵-۰/۵ و کوچکتر از ۰/۵ معادل بارعاملی قوی، متوسط و ضعیف است. برای تدوین روابط جدید شاخص‌ها، ۵۰٪ داده‌ها بصورت کاملاً تصادفی انتخاب شد و با توجه به مقادیر بردار ویژه برای تشکیل هر مؤلفه و لحاظ آستانه پذیرش ۰/۸۵ برای بردار ویژه هر متغیر، پارامترهای مؤثر بر مؤلفه PC1 در شاخص‌های سه‌گانه استخراج شد. نتایج نشان داد پارامترهای آلومینیوم، کادمیوم، کبالت، نیکل و روی به ترتیب با مقدار ویژه ۰/۹۷، ۰/۸۷، ۰/۹۹ و ۰/۹۱ قابل بیان است و بنابراین مؤلفه مؤثر را با حاصل ضرب غلظت این عناصر در مقادیر بردار ویژه محاسبه و PC1 سپس به عنوان

طبق جدول (۶) ملاحظه می‌شود که PC1 بیشترین همبستگی را با شاخص‌های HPI، HEI و C_d دارد و در تحلیل PCA-MLR نیز پس از پردازش و تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی بر اساس نتایج چهار مؤلفه اول در نهایت مشخص شد که ساده‌ترین و دقیق‌ترین معادله برای محاسبه شاخص‌ها با استفاده از نتایج مؤلفه اول قابل دستیابی است. مقدار بار عاملی حاصله از روش تحلیل عاملی و تحلیل مؤلفه‌ها ملاک انتخاب متغیرهای اصلی در برآورد شاخص‌های آلودگی است و این مقدار آستانه تابع پیچیدگی و وسعت منطقه مورد مطالعه متفاوت است. طبق دسته‌بندی Liu et al., (2003) قدر مطلق بار عاملی حاصل از

جدول ۶- مشخصات مؤلفه‌های اصلی با چرخش و ریماکس

| عنصر | مؤلفه‌های HPI | | | | مؤلفه‌های HEI و C_d | | | |
|-----------------|---------------|-------|--------|--------|-----------------------|-------|--------|--------|
| | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ |
| Al | ۰/۹۷ | ۰/۱ | -۰/۰۲ | -۰/۰۰۵ | ۰/۹۸ | ۰/۱ | -۰/۰۲ | -۰/۰۰۵ |
| As | ۰/۵۸ | ۰/۶۳ | -۰/۰۹ | -۰/۰۱ | ۰/۵۶ | ۰/۶۳ | -۰/۰۹ | -۰/۰۱ |
| Cd | ۰/۹۷ | ۰/۱ | -۰/۰۴ | -۰/۰۰۳ | ۰/۹۸ | ۰/۱ | -۰/۰۴ | -۰/۰۰۳ |
| Co | ۰/۹۶ | ۰/۰۱ | ۰/۱۴ | -۰/۰۳ | ۰/۹۶ | ۰/۰۱ | ۰/۱۴ | -۰/۰۳ |
| Cu | ۰/۱ | ۰/۱ | ۰/۹۵ | ۰ | ۰/۱۱ | ۰/۱ | ۰/۹۶ | ۰/۰۱ |
| Fe | ۰/۹۴ | ۰/۱۴ | -۰/۰۷ | ۰/۰۱ | ۰/۹۴ | ۰/۱۴ | -۰/۰۷ | ۰/۰۱ |
| Mn | ۰/۸۵ | ۰/۰۱ | ۰/۱۸ | -۰/۱۶ | ۰/۸۵ | ۰/۰۱ | ۰/۱۸ | -۰/۱۶ |
| Mo | -۰/۰۵ | -۰/۰۴ | ۰ | ۰/۹۹ | -۰/۰۵ | -۰/۰۵ | ۰ | ۰/۹۹ |
| Ni | ۰/۸۶ | ۰/۲۹ | ۰/۳۱ | -۰/۰۲ | ۰/۸۶ | ۰/۲۹ | ۰/۳۱ | -۰/۰۲ |
| Pb | -۰/۰۱ | ۰/۹۵ | ۰/۰۶ | -۰/۰۴ | ۰/۹۵ | ۰/۰۶ | -۰/۰۲ | -۰/۰۴ |
| Zn | ۰/۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۱۶ | -۰/۰۵ | ۰/۹۴ | ۰/۰۵ | ۰/۱۶ | -۰/۰۵ |
| HPI, HEI, C_d | ۰/۹۸ | ۰/۱۱ | -۰/۰۰۲ | -۰/۰۰۱ | ۰/۹۸ | ۰/۱ | -۰/۰۰۱ | -۰/۰۰۴ |

در تحلیل همبستگی را با شاخص‌های HPI، HEI و C_d دارد و در تحلیل PCA-MLR نیز پس از پردازش و تحلیل رگرسیون چند متغیره خطی بر اساس نتایج چهار مؤلفه اول در نهایت مشخص شد که ساده‌ترین و دقیق‌ترین معادله برای محاسبه شاخص‌ها با استفاده از نتایج مؤلفه اول قابل دستیابی است. مقدار بار عاملی حاصله از روش تحلیل عاملی و تحلیل مؤلفه‌ها ملاک انتخاب متغیرهای اصلی در برآورد شاخص‌های آلودگی است و این مقدار آستانه تابع پیچیدگی و وسعت منطقه مورد مطالعه متفاوت است. طبق دسته‌بندی Liu et al., (2003) قدر مطلق بار عاملی حاصل از

توان عناصر مؤثر بر شاخص های آلودگی فلزات سنگین در منطقه سرچشمه را با استفاده از اجزای مؤثر در اولین مؤلفه اصلی استخراج نمود و سایر عناصر کیفی کم اهمیت تر را حذف نمود. در این حالت محاسبه شاخص های آلودگی فلزات سنگین با تعداد متغیرهای کمتر و سریع تر انجام خواهد شد که صرفه جویی قابل توجهی در زمان و هزینه آزمایش و اندازه گیری عناصر سنگین را فراهم می آورد. همچنین تخمین شاخص های آلودگی فلزات سنگین، سریع تر و ساده تر خواهد بود. به طور کلی، طبق نتایج، استفاده از روش PCA-MLR نسبت به روش مرسوم محاسبه شاخص ها با استفاده از تمامی ۱۱ عنصر قابل توصیه است.

استفاده از مدل های مختلف PCA، برنامه نویسی بیان ژن (GEP)، ماشین بردار پشتیبان (SVM)، شبکه های عصبی مصنوعی (ANN) و سیستم استنتاج عصبی فازی (ANFIS) در پیش بینی شاخص های کیفیت آب توسط محققین دیگر نیز انجام شده است (Khuon et al., 2002; Mohammadpour et al., 2016; Sahu et al., 2011; Ahmad et al., 2017; Mohammadpour et al., 2015; Gazzaz et al., 20012; Araghinezhad et al., 2017). در این تحقیقات همواره مشاهده شده است که با استفاده از این روش ها می توان تعداد پارامترهای مورد نیاز برای سنجش آلودگی را کاهش داد و با دقت مطلوبی وضعیت آلودگی آب را بررسی نمود که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی دارند. علاوه بر این، در تحقیق حاضر، روابط صریح و ساده ای نیز برای محاسبه شاخص های آلودگی آب ارائه شد که در ارزیابی کیفی سریع وضعیت آب های منطقه و انتخاب استراتژی های پایش کیفی منطقه قابل استفاده است.

نتیجه گیری کلی

پژوهش حاضر به منظور بررسی وضعیت آلودگی فلزات سنگین در آب های سطحی منطقه مس سرچشمه، پهنه بندی مخاطرات زه آب های معدنی، توسعه روابط ساده و کاربردی تر محاسبه شاخص های آلودگی فلزات سنگین انجام شد. بدین منظور با توجه به نوع فعالیت های مجتمع مس، تفکیک مکانی محدوده تأثیر زه آب های مجتمع صورت گرفته و نقشه پهنه های شدت آلودگی بر اساس استاندارد (WHO 2011)، با استفاده از شاخص های ارزیابی آلودگی آب شامل HPI، HEI، و C_d تدوین شد.

نتایج پهنه بندی کیفی نشان داد که غلظت عناصر و شاخص های آلودگی در مناطق سه گانه متفاوت است. سه عنصر آلومینیوم، کادمیوم، منگنز و نیکل در هر سه پلیگون غلظت بسیار بالایی داشته و مقادیر آنها بیش از حداکثر مجاز شرب بود

ورودی به مدل رگرسیون خطی استفاده شد. ضرایب رابطه بین هر شاخص با این مؤلفه بر اساس داده های مرحله توسعه روابط به صورت زیر بدست آمد که ضرایب و ثابت ها نیز در سطح ۹۵٪ معنی دار بودند:

(رابطه ۴)

$$PC_1 = \sum_{i=1}^n a_i \cdot C_i = 0.97[Al] + 0.97[Cd] + 0.87[Co] + 0.99[Ni] + 0.91[Zn]$$

(رابطه ۵)

$$HPI = 322.419 + 0.41PC_1, HEI = -245.96 + 53.011PC_1, C_d = 337.157 + 53.011PC_1$$

مقادیر شاخص های آماری برای HPI به صورت $R^2 = 0.96$ ، $RMSE = 1068.9$ ، $MAE = 582.43$ ، برای HEI به مقدار $R^2 = 0.99$ ، $RMSE = 333.08$ ، $MAE = 118.94$ ، برابر با $R^2 = 0.99$ ، $RMSE = 332.08$ ، $MAE = 118.94$ در مرحله آموزش بدست آمد. در مرحله ارزیابی با استفاده از ۵۰٪ باقیمانده داده ها نیز مقادیر $RMSE = 4645.2$ ، $MAE = 1265.9$ ، $R^2 = 0.86$ و برای HPI، مقادیر $MAE = 761.26$ ، $RMSE = 3594.35$ و برای HEI و مقادیر برابر با $R^2 = 0.99$ ، $RMSE = 3601.5$ ، $MAE = 780.5$ ، $R^2 = 0.97$ حاصل شد. با توجه به مقدار R^2 حاصل در هر سه رابطه، روابط توسعه یافته دقت مطلوبی در پیش بینی الگوی تغییرات شاخص ها دارند و همچنین با توجه به محدوده وسیع تغییرات شاخص ها در شکل (۴) که از کمتر از ۱۰۰ تا بیشتر از ۵۰۰۰۰۰ می باشند مقادیر $RMSE$ ، MAE روابط پیشنهادی نسبت به این محدوده وسیع کم است. نتایج نشان دهنده دقت مطلوب رویکرد پیشنهادی ترکیبی PCA-MLR در کاهش تعداد متغیرهای مورد نیاز در محاسبه شاخص های آلودگی فلزات سنگین و دقت مطلوب آن در منطقه مورد مطالعه است و به جای استفاده از ۱۱ عنصر فلز سنگین مختلف و تعیین غلظت آنها در منطقه می توان تنها غلظت عناصر پنج گانه آلومینیوم، کادمیوم، کبالت، نیکل و روی را اندازه گیری و تعیین نمود و شاخص های آلودگی فلزات سنگین را با روابط پیشنهادی برآورد نمود. در این مورد، برآوردها نیز با توجه به محدوده تغییرات بسیار گسترده شاخص ها از دقت مطلوبی برخوردار می باشند. با توجه به اینکه هزینه های سالانه اندازه گیری و سنجش غلظت عناصر سنگین امری مهم و درخور توجه است، روش PCA-MLR قادر است با استفاده از ۵ پارامتر Al ، Cd ، Co ، Ni ، Zn درجه آلودگی عناصر سنگین در آب های سطحی معادن را تعیین کند. بنابراین قابل توصیه است که پارامترهای پنج گانه فوق در بازه های زمانی کوتاه تر اندازه گیری شده و سایر پارامترها در مقیاس زمانی طولانی تر اندازه گیری شوند. بنابراین بر اساس نتایج PFA می -

کاهش داده است. اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن و منگنز، وابستگی بسیار شدیدی با تمرکز فلزات دیگر در محیط‌های آبدار یا اشباع از آب دارند. عوامل انسانی آلودگی آب‌های منطقه شامل تخلیه پساب کارخانه تغلیظ و زهاب اسیدی معدن مس سرچشمه به داخل رودخانه شور و رهاسازی مقادیر زیادی خرده‌سنگ و باطله در بستر آبراهه است. این رسوبات غنی از فلزات سنگین با ته‌نشینی در سد رسوبگیر با نفوذ و تراوش از منطقه، باعث افزایش آلودگی فلزات سنگین در آب‌های زیرزمینی منطقه می‌شوند.

از تحلیل خوشه‌ای و تحلیل مؤلفه‌های اصلی برای تعیین ارتباط چند متغیره بین نمونه‌های آب و غلظت عناصر استفاده شد. نتایج تحلیل خوشه‌ای، PCA و PFA در شناسایی عناصر مؤثر بر شاخص‌های آلودگی منطقه استفاده شد و با تحلیل رگرسیون خطی روابطی برای محاسبه این شاخص‌ها حاصل شد. نتایج PCA-MLR و مقادیر خطای روابط نشان داد که استفاده از ۵ عنصر کلیدی در منطقه مطالعاتی به‌جای ۱۱ عنصر در محاسبه شاخص‌های HPI، HEI و C_d با توجه به محدوده تغییرات وسیع شاخص‌ها در منطقه مطالعاتی دقت مطلوبی دارد. با این روش می‌توان هزینه آزمایش‌های فلزات سنگین و زمان را کاهش داده و با استفاده از پارامترهای کمتر، شاخص‌ها را برآورد نمود. مطابق رویکرد تحقیق حاضر، بهینه‌سازی تعداد پارامترهای مؤثر با رویکرد PCA-MLR جهت دستیابی به یک برنامه پایش مطلوب قابل انجام است و پیشنهاد می‌شود در تحقیقات دیگر از این رویکرد جهت بهینه‌سازی تعداد پارامترهای کیفی موردنیاز در آنالیز مخاطرات زیست‌محیطی استفاده شود. در نهایت شاخص‌ها و روابط مناسب هر منطقه نیز با توجه به اینکه غلظت عناصر و شدت آلودگی در مناطق مختلف متفاوت است، استخراج شود.

REFERENCE

- Ahmad, Z., Rahim, N. A., Bahadori, A. and Zhang, J. (2017). Improving water quality index prediction in Perak River basin Malaysia through a combination of multiple neural networks. *International Journal of River Basin Management*, 15(1), 79-87.
- Akoto, O., Bruce, T. N. and Darko, D. (2008). Heavy metals pollution profiles in streams serving the Owabi reservoir. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 2(11), 354-359.
- Araghi Nezhad, S., Dezfuli, D., Hosseini Moghari, S. M. and Ebrahimi, K. (2017). Water quality classification based on minimum qualitative parameter (Case Study: Karun River). *Natural environment*, 70(3), 583-595 (In Farsi).
- Cheng, H., & Hu, Y. (2010). Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: a review. *Environmental Pollution*, 158(5), 1134-1146.
- Edet, A. E. and Offiong, O. E. (2002). Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring. A study case from Akpabuyo-Odukpani area, Lower Cross River Basin (southeastern Nigeria). *GeoJournal*, 57(4), 295-304.
- Fakhri, M.S., Asghari Moghaddam, A. and Najib, M. (2016). Application of statistical methods and saturation indices in groundwater quality assessment of the Marand plain. *Water and Soil Conservation*, 22(6): 117-133 (In Farsi).
- Ficklin, W. H., Plumlee, G. S., Smith, K. S. and

که نشان دهنده عدم حذف آنها از پساب‌های خروجی مجتمع مس سرچشمه است. گسترش این عناصر از محل معدن تا پایین‌دست در طول رودخانه شور همراه با جریان‌های فصلی و زه‌آب معدنی است که تجمع آنها در مخزن سد رسوبگیر قابل‌ملاحظه بود. بنابراین منابع آب شرب و کشاورزی دشت رفسنجان در پایین‌دست را تحت تأثیر قرار می‌دهند. به طور کلی، کمترین غلظت عناصر سنگین در رودخانه شور و قسمت انتهایی سد رسوبگیر و بیشترین آنها در سایت اصلی معدنکاری و قسمت‌های مرکزی سد مشاهده شد.

با محاسبه مقدار شاخص HPI برای هر ایستگاه مشخص شد در حدود ۳۰ درصد ایستگاه‌ها مقدار آلودگی کمتر از حد بحرانی و در ۷۰٪ موارد آلودگی بالاتر از حد بحرانی است. نقشه پهنه‌بندی نیز حاکی از مقادیر زیاد و بیشتر از حد بحرانی آلودگی در سایت معدنکاری و سد رسوبگیر بود و بیانگر تأثیر مخرب مجتمع مس سرچشمه و پساب‌های آن بر منابع آب سطحی منطقه است. همچنین غلظت کم عناصر مس و مولیبدن در آب‌های سطحی منطقه نشان‌دهنده راندمان مطلوب مجتمع مس در بازیابی این دو فلز از زه‌آب‌های منطقه بود. در مقابل غلظت بالای عناصر دیگر همچون آلومینیوم، کبالت، نیکل، روی و کادمیوم نشان‌دهنده عدم حذف این عناصر از زه‌آب خروجی مجتمع، رهاسازی آن در رودخانه شور و نهایتاً رسوب‌گذاری در سد تنظیمی و سد رسوبگیر است. بنابراین استفاده از روش‌های ویژه تصفیه این عناصر مورد نیاز است تا مجتمع مس اثرات زیست‌محیطی کمتری بر منابع آب پیرامونی منطقه داشته باشد. عوامل دیگری از قبیل تنوع سنگ منشأ و خاک منطقه، فرایندهای هوازدگی دگرسانی، پدیده‌های جذب سطحی و شیب کم بستر در محل کارخانه ذوب و تغلیظ و سد رسوبگیر باعث انباشت فلزات سنگین و بالارفتن غلظت در محل می‌شود. اما شیب تند در طول مسیر رودخانه شور، ته‌نشینی و انباشت را

- McHugh, J. B. (1992). Geochemical classification of mine drainages and natural drainages in mineralized areas. *Water-Rock Interaction*, 1, 381-384.
- Gazzaz, N. M., Yusoff, M. K., Aris, A. Z., Juahir, H. and Ramli, M. F. (2012). Artificial neural network modeling of the water quality index for Kinta River (Malaysia) using water quality variables as predictors. *Marine pollution bulletin*, 64(11), 2409-2420.
- Ghaderian, S. M. and Ravandi, A. A. G. (2012). Accumulation of copper and other heavy metals by plants growing on Sarcheshmeh copper mining area, Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 123, 25-32.
- Giri, S. and Singh, A. K. (2014). Assessment of surface water quality using heavy metal pollution index in Subarnarekha River, India. *Water Quality, Exposure and Health*, 5(4), 173-182.
- Jahanshahi, R. and Zare, M. (2015). Assessment of heavy metals pollution in groundwater of Golgohar iron ore mine area, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74(1), 505-520.
- Kargar, M., Khorasani, N., Karami, M., Rafiee, G. and Naseh, R. (2012). Statistical source identification of major and trace elements in groundwater downward the tailings dam of Miduk Copper Complex, Kerman, Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 184(10), 6173-6185.
- Keshavarzi, B., Moore, F. and Sharifi, R. (2013). Evaluation of dispersion and chemical partitioning patterns of heavy metals in the SarCheshmeh porphyry copper deposit: geochemical data from mine waste, water and stream sediments. *International journal of environmental studies*, 70(1), 73-93.
- Khorasanipour, M. and Eslami, A. (2014). Hydrogeochemistry and contamination of trace elements in Cu-porphyry mine tailings: a case study from the Sarcheshmeh mine, SE Iran. *Mine Water and the Environment*, 33(4), 335-352.
- Khorasanipour, M., Tangestani, M. H., Naseh, R. and Hajmohammadi, H. (2011). Hydrochemistry, mineralogy and chemical fractionation of mine and processing wastes associated with porphyry copper mines: a case study from the Sarcheshmeh mine, SE Iran. *Applied Geochemistry*, 26(5), 714-730.
- Liu, R. X., Kuang, J., Gong, Q. and Hou, X. L. (2003). Principal component regression analysis with SPSS. *Computer methods and programs in biomedicine*, 71(2), 141-147.
- Mahato, M. K., Singh, G., Singh, P. K., Singh, A. K. and Tiwari, A. K. (2017). Assessment of mine water quality using heavy metal pollution index in a coal mining area of Damodar River Basin, India. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 99(1), 54-61.
- Malakooti, S. J., Shahhosseini, M., Ardejani, F. D., Tonkaboni, S. Z. S. and Noaparast, M. (2015). Hydrochemical characterisation of water quality in the Sarcheshmeh copper complex, SE Iran. *Environmental Earth Sciences*, 74(4), 3171-3190.
- Marcovecchio, J. E., Botté, S. E. and Freije, R. H. (2007). Heavy metals, major metals, trace elements. *Handbook of water analysis*, 2, 275-311.
- Mehrabani, B., Mehrabani, S., Rafiei, B. and Yaghoubi, B. (2015). Assessment of metal contamination in groundwater and soils in the Ahangaran mining district, west of Iran. *Environmental monitoring and assessment*, 187(12), 727.
- Mishra, S., Kumar, A., Yadav, S. and Singhal, M. K. (2017). Assessment of heavy metal contamination in water of Kali river using principle component and cluster analysis, India. *Sustainable Water Resources Management*, 1-9.
- Mohammadpour, R., Shaharuddin, S., Zakaria, N. A., Ghani, A. A., Vakili, M. and Chan, N. W. (2016). Prediction of water quality index in free surface constructed wetlands. *Environmental Earth Sciences*, 75(2), 139.
- Mohammadpour, R., Shaharuddin, S., Chang, C. K., Zakaria, N. A., Ab Ghani, A. and Chan, N. W. (2015). Prediction of water quality index in constructed wetlands using support vector machine. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(8), 6208-6219.
- Mohan, S. V., Nithila, P. and Reddy, S. J. (1996). Estimation of heavy metals in drinking water and development of heavy metal pollution index. *Journal of Environmental Science and Health: Part A*, 31(2), 283-289.
- Prasad, B. and Sangita, K. (2008). Heavy metal pollution index of ground water of an abandoned open cast mine filled with fly ash: a case study. *Mine water and the Environment*, 27(4), 265-267.
- Prasanna, M. V., Praveena, S. M., Chidambaram, S., Nagarajan, R. and Elayaraja, A. (2012). Evaluation of water quality pollution indices for heavy metal contamination monitoring: a case study from Curtin Lake, Miri City, East Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 67(7), 1987-2001.
- Rakotondrabe, F., Ngoupayou, J. R. N., Mfonka, Z., Rasolomanana, E. H., Abolo, A. J. N. and Ako, A. A. (2018). Water quality assessment in the Betare-Oya gold mining area (East-Cameroon): Multivariate Statistical Analysis approach. *Science of the Total Environment*, 610, 831-844.
- Rezaei, A., Hassani, H., Hayati, M., Jabbari, N. and Barzegar, R. (2017). Risk assessment and ranking of heavy metals concentration in Iran's Rayen groundwater basin using linear assignment method. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 1-20.
- Riahi, H. and Seifi, A. (2016). Spatial group analysis and fuzzy spatial analysis of Shahr-e-Babak plain groundwater quality for drinking and irrigation. *Iranian Water Resources Research*, 12(2), 152-157 (In Farsi).
- Riahi, H. and Seifi, A. (2017). Qualitative zoning of Shahr-e-Babak aquifer based on its corrosiveness, sedimentation, and applicability for agricultural, drinking, and pressure irrigation uses. *Water and Wastewater*, 28(5), 92-105 (In Farsi).
- Sahu, M., Mahapatra, S. S., Sahu, H. B. and Patel, R. K.

- (2011). Prediction of water quality index using neuro fuzzy inference system. *Water Quality, Exposure and Health*, 3(3-4), 175-191.
- Salehi, H., ZaneiWand, H. and Ahmadi, S. (2017). Groundwater quality assessment and selecting the most appropriate interpolation method using GIS (Case study: Saghez city, Iran). *Wetland Ecobiology*, 9 (2), 5-18 (In Farsi).
- Seifi, A., Mirlatifi, S.M. and Riahi, H. (2011). Developing a Combined Model of Multiple Linear Regression-Principal Component and Factor Analysis (MLR-PCA) for Estimation of Reference Evapotranspiration (Case Study: Kerman Station). *Water and Soil*, 24(6): 1186-1196 (In Farsi).
- Senapaty, A. and Behera, P. (2012). Concentration and distribution of trace elements in different coal seams of the Talcher Coalfield, Odisha. *Earth Science Engineering*, 5(05), 80-87.
- Sharifinia, M., Mahmoudfard, A., Namin, J. I., Ramezanpour, Z. and Yap, C. K. (2016). Pollution evaluation in the Shahrood River: Do physico-chemical and macroinvertebrate-based indices indicate same responses to anthropogenic activities. *Chemosphere*, 159, 584-594.
- Shyu, G. S., Cheng, B. Y., Chiang, C. T., Yao, P. H. and Chang, T. K. (2011). Applying factor analysis combined with kriging and information entropy theory for mapping and evaluating the stability of groundwater quality variation in Taiwan. *Environmental Research and Public Health*, 8(4), 1084-1109.
- Simeonov, V., Stratis, J. A., Samara, C., Zachariadis, G., Voutsas, D., Anthemidis, A. and Kouimtzis, T. (2003). Assessment of the surface water quality in Northern Greece. *Water research*, 37(17), 4119-4124.
- Sobhanardakani, S., Taghavi, L., Shahmoradi, B. and Jahangard, A. (2016). Groundwater quality assessment using the water quality pollution indices in Toyserkan Plain. *Environmental Health Engineering and Management*, 4(1), 21-27.
- Sobhanardakani, S. (2016). Evaluation of the water quality pollution indices for groundwater resources of Ghahavand plain, Hamadan province, western Iran. *Iranian Journal of Toxicology*, 10(3), 35-40.
- Tahri, M., Benyaich, F., Bounakhla, M., Bilal, E., Gruffat, J. J., Moutte, J. and Garcia, D. (2005). Multivariate analysis of heavy metal contents in soils, sediments and water in the region of Meknes (central Morocco). *Environmental Monitoring and Assessment*, 102(1-3), 405-417.
- Tiwari, A. K., Singh, P. K., Singh, A. K. and De Maio, M. (2016). Estimation of heavy metal contamination in groundwater and development of a heavy metal pollution index by using GIS technique. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 96(4), 508-515.
- Upadhyay, A. K., Gupta, K. K., Sircar, J. K., Deb, M. K. and Mundhara, G. L. (2006). Heavy metals in freshly deposited sediments of the river Subernarekha, India: an example of lithogenic and anthropogenic effects. *Environmental Geology*, 50(3), 397-403.
- World Health Organization (WHO). (2011) Guidelines for drinking water quality (4th ed.). ISBN 9241546387
- Zabowski, D., Henry, C. L., Zheng, Z. and Zhang, X. (2001). Mining impacts on trace metal content of water, soil, and stream sediments in the Hei River basin, China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 131(1-4), 261-273.