

ارزیابی و رتبه‌بندی مخاطره فلزات سنگین در رسوبات معدن مس سرچشمه با استفاده از روش‌های ELECTRE و FDAHP

محمد رضا توکلی محمدی^{۱*}

r.tavakoli@acecr.ac.ir

علی رضایی^۲

محمد حیاتی^۳

حسین حسنی^۴

تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۷/۱۴

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۸/۰۱

چکیده

زمینه و هدف: فلزات سنگین به دلیل پایداری، تجزیه ناپذیری و مشکلات دسترس‌پذیری زیستی، از آلاینده‌های مهم و خطرناک محیط‌زیست به شمار می‌روند. رسوبات معدن مس سرچشمه ایران، حاوی غلظت‌های بالایی از این آلاینده‌ها می‌باشد. هدف اول این پژوهش، ارزیابی مخاطره زیست محیطی فلزات سنگین این رسوبات با تعیین شاخص ضریب آلودگی، شاخص بار آلودگی، شاخص غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی و هدف دوم، رتبه‌بندی این فلزات بر اساس میزان بحرانیّت با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است.

روش بررسی: در این تحقیق، ابتدا با تعیین شاخص‌های ارزیابی مخاطره به بررسی میزان آلودگی فلزات سنگین (Fe و Ti, Pb, Ni, Mn, Cr, Zn, Mo, Cu, Co) در رسوبات معدن مس سرچشمه منتهی به سد باطله پرداخته شده است. در ادامه، با جمع‌آوری نظرات خبرگان در خصوص میزان اهمیت نسبی هر کدام از شاخص‌های یاد شده و تعیین وزن نهایی شاخص‌ها با استفاده از فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی دلفی فازی، رتبه‌بندی و خوشه‌بندی فلزات سنگین رسوبات در منطقه مورد مطالعه، با استفاده از روش الکترون صورت گرفته است.

نتیجه‌گیری: بر اساس نتایج سنجش شاخص‌های ارزیابی مخاطره، شدت آلودگی منطقه به فلزات سنگین، به صورت $Zn > Cu > Fe > Mo > Pb > Mn > Cr$ می‌باشد و کلیه فلزات رسوبات به جز مس، روی و آهن تقریباً در محدوده غیرآلوده قرار داشتند. همچنین بر اساس نتایج رتبه‌بندی، مخاطره‌های ۱۰ گانه در ۷ دسته خوشه‌بندی شدند، به طوری که مس، آهن و روی به ترتیب بالاترین میزان آلودگی و بحرانیّت مخاطره را در بین فلزات سنگین رسوبات مورد مطالعه داشتند.

واژه‌های کلیدی: فلزات سنگین، ارزیابی و رتبه‌بندی مخاطره، فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی دلفی فازی، روش الکترون، معدن مس سرچشمه.

*۱- (مسئول مکاتبات): استادیار پژوهشکده فرآوری مواد معدنی، جهاد دانشگاهی تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری مهندسی اکتشاف معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

۴- دانشیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

Risk Assessment and Ranking of Heavy Metals in the Sediments of Sarcheshmeh Copper Mine Using FDAHP and ELECTRE Methods

Mohammad Reza Tavakoli Mohammadi ^{1*}

r.tavakoli@acecr.ac.ir

Ali Rezaei ²

Mohammad Hayaty ³

Hossein Hasani ⁴

Abstract

Background and Objective: Heavy metals are considered the serious pollution source for the environment because of their stability, atomic and biological accessibility problems. The sediments of Sarcheshmeh copper mine in Iran contain high concentrations of these pollutants. Thus, environmental evaluation and ranking them based on emission levels are important for timely environmental measures with the lowest operating costs. The first aim of this study is to evaluate the environmental risk of these sediments by determining the contamination factor, pollution load index, enrichment factor and Geoaccumulation index. The second aim is ranking these metals based on the level of risk critical using the Multi-Attribute Decision Making (MADM) method.

Method: In this study, first, by determining risk evaluation indices, heavy metals contamination (Co , Cu , Mo , Zn , Cr , Mn , Ni , Pb , Ti and Fe) in the sediments of Sarcheshmeh copper mine which conduce to the tailings dam was assessed. Then, by collecting expert opinions on the relative importance of each indicator mentioned in the environmental contamination risk of heavy metals, through final weighting of the indices using Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process (FDAHP), ranking and clustering of heavy metals in the sediments of the study area were performed using ELECTRE method.

Results: Based on the results measuring the risk evaluation indices, the intensity of contamination related to these metals was in order of Zn> Cu> Fe> Mo> Pb > Mn > Cr, and all the metals except for copper, zinc and iron were almost cited to be in the unpollutant limit. Also based on ranking results, the ten risks were clustered in seven categories with copper, iron and zinc having the highest pollution and critical risk amongst the heavy metals in the studied sediments, respectively.

Conclusion: Considering the boilers with high energy consumption and low efficiency in this factory, the replacement of old boiler with the new one through CDM project is cost effective.

Keywords: Heavy metals, Risk assessment and ranking, Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process (FDAHP), ELECTRE method, Sarcheshmeh copper mine.

1- Assistant Professor of Mineral Processing Research Center, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR) on TMU, Tehran, Iran. *(*Corresponding Author*)

2- PhD Student of Mine Exploration, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran.

3- Assistant Professor of Mining Engineering Department, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

4- Associate Professor of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology Tehran, Iran.

مقدمه

فلزات سنگین اجزای طبیعی تشکیل دهنده پوسته زمین هستند ولی فعالیت‌های انسان، چرخه زمین‌شیمی و بیوشیمیایی تعادل این فلزات را به هم زده و باعث انتشار آن‌ها در محیط زیست می‌شود و در اغلب کاربردهای رایج، این واژه به فلزاتی اشاره دارد که وزن مخصوص آن‌ها بیش از ۴/۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد (۱).

فلزات سنگین از آلاینده‌های پایدار و بادوام محیط زیست به شمار می‌آیند، چون مانند آلوده‌کننده‌های آلی، از طریق شیمیایی یا فرآیندهای زیستی در طبیعت تجزیه نمی‌شوند. این فلزات، با ایجاد سازو کارهای متعدد، سبب به هم خوردن تعادل در موجودات زنده به ویژه انسان می‌شوند و طیف گسترده‌ای از عوارض و اختلالات را به وجود می‌آورند. این عوارض و اختلالات در تمامی بافت‌ها دیده می‌شوند و شاخص‌های مختلفی از جمله نوع فلز در آن‌ها دخالت دارند. از مهم‌ترین اختلالات و عوارض آن‌ها می‌توان به سرطان‌زایی، اثر بر سیستم اعصاب مرکزی و محیطی، اثر بر روی پوست، اثر بر روی سیستم خون‌ساز، اثر بر سیستم قلبی و عروقی، آسیب به کلیه‌ها و تجمع در بافت‌ها اشاره کرد. شناسایی عوارض خطرناک این آلاینده‌ها، منجر به تحقیقات گسترده‌ای جهت کاهش میزان مخاطره ناشی از حضور آن‌ها در بخش‌های مختلف محیط زیست از جمله رسوبات معدنی شده است (۲ و ۳).

بر اساس فرآیندهای هیدرودینامیکی و شرایط زیست محیطی (pH، شوری و دما)، رسوبات معدنی به عنوان منشا مهم فلزات سنگین در سامانه‌های آبی شناخته شده‌اند، ولی با تغییر در شیمی رسوبات، می‌تواند فلزات و آلاینده‌ها را به آب روی رسوب خود انتقال داده و با تحرک دوباره آلاینده‌ها در بوم سامانه، به عنوان منبع آلودگی عمل کند (۴). به همین دلیل، تعیین غلظت فلزات سنگین در رسوبات معدنی، برای ارزیابی کیفیت محیط زیست ضروری است.

فلزات سنگین موجود در رسوبات معدنی دارای دو منشا طبیعی و انسان‌ساز هستند و انباشتگی و توزیع آن‌ها در رسوبات، تحت تاثیر عواملی چون بافت رسوبات، ترکیب کانی‌شناسی فرآیندهای جذب و پس‌دهی و همچنین نقل و انتقال فیزیکی می‌باشد (۵ و ۶). فرآیندهای طبیعی که در مناطق معدنی، با کاهش پایداری و مقاومت سنگ‌ها، باعث حضور طبیعی فلزات سنگین در رسوبات معدنی می‌شوند، دگرسانی و هوازدگی هستند. انواع فعالیت‌های معدن‌کاری، فرایندهای ذوب و تغلیظ نیز از عوامل انسان‌ساز حضور فلزات سنگین در رسوبات معدنی محسوب می‌شوند که به مراتب نقش موثرتری در آلودگی این رسوبات نسبت به عوامل طبیعی بازی می‌کنند (۷-۹).

امروزه، یکی از مهم‌ترین اقدامات کنترلی برای جلوگیری از انتشار گسترده مواد باطله و آلاینده حاصل از فعالیت‌های معدن‌کاری، بالاخص در معادن روباز، احداث سدهای باطله می‌باشد. از آن‌جاکه در حین عملیات کارخانه تغلیظ، پساب‌های آلاینده‌ای حاوی انواع مواد شیمیایی، یون‌های فلزات سنگین سمی و ذرات ریز معلق تولید می‌شوند، لذا طراحی سدهای باطله، به منظور کنترل آلودگی ناشی از باطله‌ها و حفاظت از متابولیسم طبیعی، امری حیاتی می‌باشد. اما در مقابل، حضور طولانی مدت فلزات سنگین سمی در این سدها نیز نوعی تهدید زیست محیطی محسوب می‌شود، زیرا اگر سدهای

باطله از پایداری لازم در طراحی برخوردار نباشند، نفوذ این عناصر آلاینده به داخل آب‌های زیرزمینی، خسارات زیست محیطی جبران ناپذیری را به دنبال خواهد داشت (۱۰). بنابراین، از آنجا که اقدامات پیشگیرانه به مراتب بهتر از اقدامات کنترلی برای جلوگیری از انتشار آلودگی می‌باشد، لذا ارایه راهکارهای متمرکز و راهبردی جهت شناسایی منابع این رسوبات و ارزیابی مخاطره زیست محیطی آلاینده‌های آن‌ها می‌تواند در جلوگیری و یا کاهش میزان آلاینده‌گی آن‌ها موثرتر باشد. در واقع، شناسایی عوامل مخاطره‌انگیز و آگاهی از میزان و نوع تاثیرات آن‌ها در رسوبات از یک سو و رتبه‌بندی درست آن‌ها از سوی دیگر، گامی اساسی در جهت ارزیابی صحیح و پاسخ‌دهی به موقع و مناسب به مخاطره‌های زیست محیطی ناشی از آلاینده‌گی آن‌ها می‌باشد و کاهش خسارت‌های آن‌ها را در صورت وقوع به دنبال خواهد داشت (۱۱).

زمانی‌که توزیع ژئوشیمیایی عناصر در محیط، ناشی از عوامل طبیعی و انسان‌ساز می‌باشد، عمدتاً برای ارزیابی روند تغییرات غلظت آلاینده در مطالعات زیست محیطی، از شاخص‌هایی نظیر ضریب آلودگی، شاخص بار آلودگی، شاخص غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی استفاده می‌شود (۱۲-۱۵). که در این پژوهش ضمن محاسبه شاخص‌های یاد شده برای رسوبات معدن مس سرچشمه، از آن‌ها به عنوان شاخص‌های ارزیابی مخاطره آلاینده‌گی ناشی از فلزات سنگین استفاده شده است. نظریه مجموعه‌های فازی قادر است بسیاری از مفاهیم و متغیرها و سیستم‌هایی را که نادقیق و مبهم هستند، صورت‌بندی ریاضی ببخشد و زمینه را برای استدلال، استنتاج، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم سازد (۳).

بدین منظور جهت در نظر گرفتن تاثیر توام و همزمان میزان همه شاخص‌ها - به ازای عناصر مختلف - در ارزیابی‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه نظیر الکتور استفاده شده است که استفاده از این قبیل روش‌ها نقاط قوت بسیاری از قبیل امکان در نظر گرفتن همزمان چندین شاخص، لحاظ نمودن وزن‌های متفاوت برای شاخص‌ها، تبادل بین شاخص‌ها، انعطاف‌پذیری روش و نیز تحلیلی بودن نتایج را شامل می‌شود. و با توجه به این‌که از ملزومات استفاده این روش محاسبه وزن اهمیت نسبی شاخص‌های مورد نظر می‌باشد، از روش تحلیل سلسله مراتبی در تلفیق با منطق فازی تحت عنوان FDAHP نیز استفاده شده است.

معدن مس سرچشمه ایران، یکی از بزرگ‌ترین معادن مس سولفیدی دنیا است. رسوبات سد باطله این معدن، به علت هوازدگی و دگرسانی سنگ‌ها و تولید حجم قابل توجهی از زهاب‌های اسیدی، ناشی از فعالیت‌های معدن‌کاری و فرایندهای تغلیظ طی سالیان متمادی، حاوی مقادیر بالایی از فلزات سنگین آلاینده و سمی می‌باشد و مطالعه میزان غنی‌شدگی و انباشتگی این آلاینده‌ها در رسوبات آن، برای تشخیص فعالیت‌های تاثیرگذار انسان بر روی محیط زیست منطقه بسیار حایز اهمیت است. هدف اول این پژوهش، بررسی شاخص‌های ارزیابی نظیر ضریب شاخص آلودگی^۱، شاخص بار آلودگی^۲،

روش بررسی

منطقه مورد مطالعه

معدن مس سرچشمه در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غربی استان کرمان و ۵۰ کیلومتری شهر رفسنجان قرار دارد (۱۶). موقعیت جغرافیایی مجتمع مس سرچشمه در شکل ۱ نشان داده شده است. سد باطله معدن در ۱۷ کیلومتری شمال شرق مجتمع مس سرچشمه قرار دارد. این سد به منظور ذخیره باطله واحد تغلیظ و استفاده مجدد از آب آن احداث شده است. از جمله ورودی‌های این دریاچه، رودخانه شور می‌باشد که سرچشمه آن زهاب اسیدی معدن می‌باشد و در بین راه فاضلاب‌های مجتمع و آب تعدادی چشمه نیز به آن اضافه می‌شود. رسوبات حاصل، ترکیبات گوناگونی از انواع کانی‌ها و ذرات آلی می‌باشند که نقش مهمی در تشخیص الگوهای آلودگی سامانه‌های آبی دارند. این مواد هم حمل‌کننده و هم مخزنی برای آلاینده‌ها محسوب می‌گردند (۱۷ و ۱۸).

شاخص غنی‌شدگی^۱ و شاخص زمین‌انباشتگی^۲، به منظور ارزیابی مخاطره میزان آلودگی ناشی از فلزات سنگین (Ni, Mn, Cr, Zn, Mo, Cu, Co) در رسوبات این معدن می‌باشد. هدف دوم، رتبه‌بندی این فلزات بر اساس میزان بحرانیت یا مخاطره بالای آلاینده‌گی با بررسی تاثیرات همه شاخص‌ها در ارزیابی به طور همزمان با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه^۳ است. در این راستا، با جمع‌آوری نظرات خبرگان در خصوص میزان اهمیت نسبی هر کدام از شاخص‌های یاد شده در میزان مخاطره آلودگی زیست محیطی و تعیین وزن نهایی شاخص‌ها با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی^۴، رتبه‌بندی و خوشه‌بندی فلزات سنگین رسوبات در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش الکترو^۵ صورت گرفته است تا بتوان با توجه به رتبه‌های به دست آمده و محدودیت‌های زمانی و مالی موجود، اقدامات زیست محیطی مناسب را برای کاهش مخاطره و میزان آلاینده‌گی ناشی از آن‌ها انجام داد.

-
- 1- Enrichment Factor
 - 2- Geoaccumulation Index
 - 3- Multi Attribute Decision Making (MADM)
 - 4- Fuzzy Delphi Analytic Hierarchy Process (FDAHP)
 - 5- Elimination and Choice Translating Reality (ELECTRE)



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی مجتمع مس سرچشمه.

Figure 1- Geographic location of Sarcheshmeh copper complex.

غلظت‌های کل و قابل جذب عناصر سنگین با دستگاه نشر اتمی جرمی قرائت گردید. برای اطمینان از دقت و صحت آنالیزهای انجام یافته، ۱۰ نمونه تکراری نیز ارسال شد. مقایسه میانگین دو سری اندازه‌گیری با استفاده از آزمون آماری ستیودنت-t در نرم افزار SPSS.17 انجام گرفت. با استفاده از این آزمون، مشخص شد که اختلاف معناداری بین نتایج آزمایشگاه وجود ندارد و صحت نتایج نیز مورد تایید است.

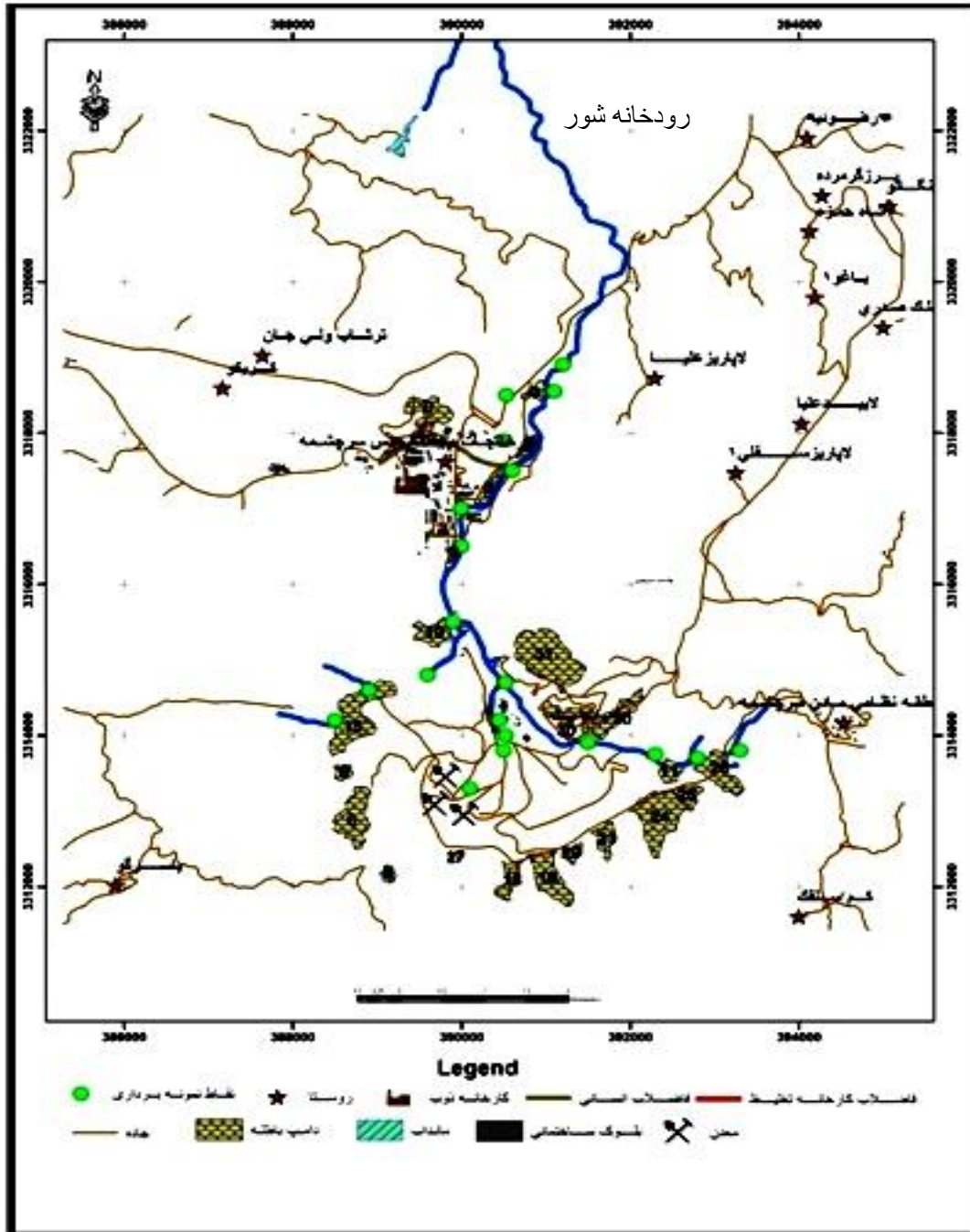
روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی

هر زیر مجموعه فازی A در مجموعه مرجع X را می‌توان به وسیله تابع مشخصه‌ای تعریف کرد. این تابع مشخصه که تابع عضویت نامیده می‌شود، برای هر عضو X از مجموعه مرجع X، یک عدد $A(x)$ در بازه بسته $[0,1]$ قرار می‌دهد که مبین درجه عضویت X در مجموعه فازی A می‌باشد. بنابراین، توابع عضویت را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$A: X \rightarrow [0,1] \quad (1)$$

روش نمونه‌برداری

نمونه‌برداری از رسوبات مجتمع مس سرچشمه منتهی به سد باطله در ۲۰ ایستگاه در مرداد ماه ۱۳۸۷، انجام یافت. شکل ۲، موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. نمونه‌برداری از جریان کم‌عمق توسط بیلچه پلاستیکی و از هر ایستگاه، یک نمونه برداشت گردید و نمونه‌های به دست آمده در کیسه‌های پلی اتیلنی ایزوله شدند. از آنجائی که کانی‌های رسی و ذرات ریزدانه، توانایی زیادی در جذب عناصر سنگین دارند، پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه و خشک کردن (در دمای اتاق) و همگن‌سازی آن‌ها، ذرات کوچک‌تر از ۶۳ میکرون نمونه توسط الک جدا شدند. تقسیم نمونه‌ها به روش چهارقسمتی (Quartering) صورت گرفت و برای آنالیز عناصر سنگین به روش نشر اتمی جرمی به آزمایشگاه Acme کانادا ارسال شدند. برای اندازه‌گیری غلظت کل عناصر سنگین از روش هضم نمونه‌های خاک با $HClO_4$ ، HNO_3 ، HF ، H_2O_2 و HCl استفاده شد [۱۹] و برای اندازه‌گیری غلظت قابل جذب آن‌ها از عصاره‌گیر DTPA استفاده شد [۲۰] و



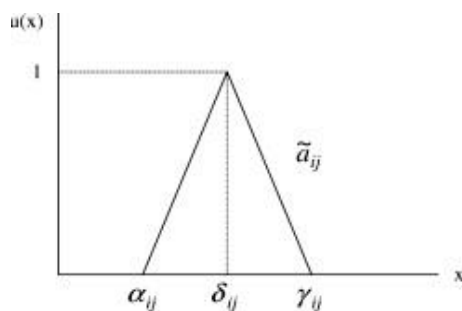
شکل ۲- نقشه موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رسوبات مجتمع مس سرچشمه.

Figure 2- Map of sampling stations of sediments in Sarcheshmeh copper complex.

مرکزی دارای بیش‌ترین درجه عضویت می‌باشد و هر چه به طرف چپ یا راست این مقدار حداکثر حرکت کنیم درجه عضویت به صورت خطی کاهش می‌یابد تا به صفر برسد (۶).

مطابق با شکل ۳، عدد فازی مثلثی^۱ (TFN) \tilde{a}_{ij} به صورت $(\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij})$ نشان داده می‌شود که در آن، α_{ij} ، δ_{ij} و γ_{ij} به ترتیب نشان دهنده حد پایین نظرات داوران، بیش‌ترین مقدار محتمل و حد بالای نظرات داوران هستند و علامت "-" بیان کننده مجموعه فازی می‌باشد. هر عدد فازی مثلثی، در نقطه

1- Triangular Fuzzy Number

شکل ۳- عدد فازی مثلثی a_{ij} (۱۱)Figure 3- Triangular fuzzy number of a_{ij} (11)

خلاف روش‌های دیگر که در آن‌ها، پس از جمع‌آوری داده‌ها و وزن‌ها، تصمیم‌گیرنده هیچ ارتباطی با اطلاعات خروجی نداشته و اطلاعات حاصل به عنوان ملاک تصمیم‌گیری قرار می‌گیرد، در این روش، تصمیم‌گیرنده در سه مرحله می‌تواند در شیوه تحلیل دخالت کند و تحلیل را جهت‌دهی نماید (۳۳). این برتری به‌واسطه امکان در نظر گرفتن همزمان چندین شاخص، لحاظ نمودن وزن‌های متفاوت برای شاخص‌ها، تبادل بین شاخص‌ها، انعطاف‌پذیری روش و نیز تحلیلی‌تر بودن نتایج آن می‌باشد (۳۴).

یافته‌ها

تعیین شاخص‌های ارزیابی مخاطره رسوبات

نتایج کمی آنالیز رسوبات مورد مطالعه، بیانگر غلظت متغیر فلزات سنگین موجود در آن‌ها بود و لذا از شاخص‌های آماری اشاره شده در جدول ۱، برای نشان دادن گستره آن‌ها در ایستگاه‌های مورد نمونه‌برداری استفاده شد.

در روش دلفی، پیش‌بینی‌های ارایه شده توسط افراد خبره در قالب اعداد قطعی بیان می‌شوند، در حالی که استفاده از اعداد قطعی برای پیش‌بینی‌های بلندمدت، نتایجی دور از واقعیت را به دنبال دارد. از طرفی، افراد خبره از شایستگی‌ها و توانایی‌های ذهنی خود برای پیش‌بینی استفاده می‌کنند، لذا بهتر است که با استفاده از مجموعه‌های فازی (با به کارگیری اعداد فازی) به پیش‌بینی بلندمدت و تصمیم‌گیری در دنیای واقعی پرداخته شود. بدین ترتیب، باید اطلاعات لازم را در قالب زبان طبیعی از خبرگان اخذ نموده و مورد تحلیل قرار داد. این روش تحلیل، روش دلفی فازی نامیده می‌شود. در این روش، با توجه به شکل ۳، مولفه‌های یک عدد فازی به صورت روابط ۲ تا ۵ تعریف می‌شوند (۵).

$$a_{ij} = (\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij}) \quad (2)$$

$$\alpha_{ij} = \text{Min}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\delta_{ij} = \left(\prod_{k=1}^n \beta_{ijk} \right)^{1/n}, k = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$\gamma_{ij} = \text{Max}(\beta_{ijk}), k = 1, \dots, n \quad (5)$$

که β_{ijk} ، نشان دهنده اهمیت نسبی پارامتر i بر پارامتر j از دیدگاه متخصص k ام می‌باشد.

در این تحقیق، جهت تعیین اوزان اهمیت نسبی فاکتورهای ارزیابی مخاطره از این روش تحلیل استفاده شده است.

روش الکترو

روش الکترو، یکی از مهم‌ترین تکنیک‌های MADM و از گروه مدل‌های جبرانی^۱ است که در آن، تبادل بین شاخص‌ها صورت می‌گیرد و تغییر در یک شاخص، توسط تغییری مخالف در شاخص یا شاخص‌های دیگر جبران می‌شود. این تکنیک که روش مجموعه‌های هماهنگ نیز نامیده می‌شود بر مبنای مفهوم روابط غیررتبه‌ای^۲ بنا نهاده شده و کلیه گزینه‌ها در آن، با استفاده از مقایسه‌های غیررتبه‌ای مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. برتری این تکنیک نسبت به برخی دیگر از روش‌ها در ایجاد تعامل با تصمیم‌گیرنده است. در واقع، بر

1- Compensatory Methods

2- Out Ranking

جدول ۱- پارامترهای آماری فلزات سنگین در رسوبات منطقه مورد مطالعه (mg/kg)

Table 1- Statistical parameters of heavy metals in sediments of the region under study (mg/kg)

انحراف معیار	میانگین	دامنه	عناصر
۵۰/۳۷	۱۶۱/۱۹۵	۲۱/۵-۲۴۷	Zn
۱۱۲۶/۵۶	۱۳۷۳/۵۰	۹۷-۶۷۰۰	Cu
۷/۵۶	۲۶/۳۵	۱۱-۴۰	Cr
۸/۲۹	۲۱/۷۹	۱۴/۱۰-۵۳/۲۰	Co
۲۰/۰۲	۲۱/۲۱	۱/۱-۸۵/۳۰	Mo
۴۷۴/۶۱۵	۹۰۳/۱۰	۱۹۵-۱۸۴۰	Mn
۵/۷۸	۲۴/۷۰	۱۴-۳۶	Ni
۳۱/۷۱	۶۲/۶۶	۲۱/۶-۱۲۷	Pb
۱۲۳۳/۴۲	۴۳۱۰	۱۵۶۰-۶۴۱۰	Ti
۱۳۶۲۲/۸۷	۵۱۸۶۰	۲۷۶۰۰-۸۴۹۰۰	Fe

که در آن، M_x و F_{ex} به ترتیب غلظت فلزات سنگین نمونه‌های رسوب و فلز آهن (فلز نرمالیزه شده) و M_b و F_{eb} به ترتیب غلظت فلزات سنگین نمونه‌های زمینی و مرجع می‌باشند (۱۵، ۲۵). از آنجایی که آهن به طور معمول غلظت طبیعی بالایی دارد و توزیع آن نسبت به بقیه فلزات سنگین متناسب نیست، در محاسبه EF از آن به عنوان فلز نرمالیزه شده استفاده شده است. نتایج سنجش EF فلزات سنگین برای رسوبات منطقه مورد مطالعه و طبقه بندی آن‌ها بر اساس استاندارد در جدول ۲ ارائه شده است (۲۶). طبق نتایج به دست آمده، بالاترین مقادیر EF محاسبه شده، به ترتیب مربوط به فلزات مس و آهن بودند.

شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo})

شاخص دیگری که برای ارزیابی مخاطره فلزات سنگین در رسوبات به کار برده می‌شود I_{geo} یا اندیس مولر می‌باشد که به صورت زیر بیان می‌شود (۲۷-۳۰).

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right] \quad (9)$$

در این رابطه، C_n غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در نمونه و B_n غلظت همان عنصر در نمونه زمینی است. ضریب ۱/۵ نیز برای حذف تغییرات احتمالی زمینه به علت تأثیرات زمین‌شناختی اعمال می‌شود (۳۱ و ۳۲). در جدول ۲، مقادیر محاسبه شده این شاخص برای فلزات سنگین رسوبات و شدت آلودگی منطقه بر اساس آن آمده است (۵).

طبق نتایج به دست آمده، شدت آلودگی عناصر سنگین رسوبات معدن مس سرچشمه به صورت $Pb > Mn > Cr > Fe > Cu > Zn$ است و کلیه فلزات رسوبات به جز مس، روی و آهن تقریباً در محدوده غیرآلوده قرار می‌گیرند. پیش‌بینی می‌شود آلودگی منطقه به فلزات یاد شده ناشی از فعالیت‌های معدن‌کاری و فرایندهای ذوب و تغلیظ باشد. خردایش کانه برای فرآوری، سطح تماس سنگ با آب را افزایش داده و امکان هوازگی شیمیایی آن را بالا برده است. لذا با اکسید شدن سنگ‌های سولفیدی و تولید اسید سولفوریک،

محاسبه ضریب آلودگی (CF)

به منظور محاسبه ضریب آلودگی از رابطه ۶ استفاده شد. در واقع، ضریب آلودگی، نسبت غلظت عنصر در نمونه برداشت شده به غلظت همان عنصر در نمونه زمینی است که در مقادیر بزرگ‌تر از یک، بیانگر آلودگی رسوبات به فلز سنگین می‌باشد:

$$CF = \frac{C_{Sample}}{C_{Background}} \quad (6)$$

در این رابطه: n تعداد فلزات، C_{sample} غلظت عنصر در نمونه و $C_{background}$ غلظت عنصر در نمونه زمینی است. نمونه زمینی از مقایسه رسوبات منطقه با رسوبات محلی توسط روش‌های آماری در منطقه مورد مطالعه به دست می‌آید (۲۱ و ۲۲). در جدول ۲، ضریب آلودگی رسوبات معدن مس سرچشمه ارائه شده است.

شاخص بار آلودگی (PLI)

برای محاسبه این شاخص از معادله زیر استفاده شده است:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n} \quad (7)$$

مقادیر بیش از یک این شاخص، بیانگر آلودگی رسوب و مقادیر نزدیک به یک آن، نشان دهنده مشابه بودن غلظت آلاینده در نمونه‌های مورد مطالعه و زمینه می‌باشد (۲۲ و ۲۳). مقدار محاسبه شده PLI در این پژوهش، ۱/۷۵ به دست آمد.

شاخص غنی‌شدگی (EF)

برای محاسبه شاخص غنی‌شدگی (EF)، غلظت عنصر مدنظر در نمونه‌های آلوده و زمینه مقایسه می‌گردد و برای حذف برخی غنی‌شدگی‌ها، تأثیر غلظت عناصری مانند Fe ، Ti ، Y ، Sc ، Al (۱۵) و Sr (۲۴) در رابطه غنی‌شدگی، در نظر گرفته می‌شود. این شاخص طبق رابطه زیر محاسبه شده است:

$$EF = \frac{M_x \times Fe_b}{M_b \times Fe_x} \quad (8)$$

زهاب‌های اسیدی حاوی فلزات سنگین سمی به وجود آمده‌اند و متعاقباً سبب غنی‌شدگی و زمین‌انباشتگی فلزات آلاینده شده‌اند.

جدول ۲- نتایج محاسباتی میانگین شاخص‌های مخاطره برای فلزات سنگین رسوبات منطقه مورد مطالعه

Table 2- Calculation results of average of risk indicators for heavy metals in sediments of the region under study

شدت آلودگی منطقه بر اساس I_{geo}	I_{geo}	طبقه‌بندی فاکتور غنی‌شدگی	EF	CF	عنصر
غیرآلوده	<۰	فاقد غنی‌شدگی	۰/۹۵	۰/۸۷	کبالت (Co)
خیلی آلوده	۳/۳۵	غنی‌شدگی شدید	۱۶/۶۳	۱۵/۳۰	مس (Cu)
غیرآلوده تا کمی آلوده	۰/۵۳	غنی‌شدگی متوسط	۳/۸۴	۳/۵۴	مولیبدن (Mo)
خیلی آلوده	۳/۹۷	غنی‌شدگی کم	۱/۹۵	۱/۷۹	روی (Zn)
غیرآلوده تا کمی آلوده	۰/۰۱	فاقد غنی‌شدگی	۰/۸۷	۰/۷۹۸	کروم (Cr)
غیرآلوده تا کمی آلوده	۰/۱۱	غنی‌شدگی کم	۱/۲۷	۱/۱۷	منگنز (Mn)
غیرآلوده	<۰	فاقد غنی‌شدگی	۰/۳۶	۰/۳۳	نیکل (Ni)
غیرآلوده تا کمی آلوده	۰/۲۷	غنی‌شدگی کم	۱/۶۲	۱/۴۹	سرب (Pb)
غیرآلوده	<۰	فاقد غنی‌شدگی	۰/۸۳	۰/۷۶	تیتانیوم (Ti)
کمی آلوده تا خیلی آلوده	۲/۶۳	غنی‌شدگی شدید	۱۰/۰۱	۹/۲۱	آهن (Fe)

گردید. بدین منظور، با استفاده از طیف وزن‌دهی آمده در جدول ۳، اقدام به جمع‌آوری نظرات خبرگان در مورد شاخص‌های مخاطره گردید. جدول ۴، نظرات افراد خبره و کارشناس را در مورد اهمیت نسبی این فاکتورها نشان می‌دهد.

نتایج مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی دلفی

نظرسنجی از متخصصان

در این مرحله، به منظور ارزیابی مخاطره آلودگی فلزات سنگین و رتبه‌بندی آن‌ها با استفاده از تکنیک‌های کمی تصمیم‌گیری چند شاخصه، ضریب اهمیت نسبی شاخص‌های چهارگانه با استفاده از نظرات خبرگان تعیین

جدول ۳- مقایسه ۹ کمیته ساعتی برای مقایسه دو دویی معیارها

Table 3- Comparison of 9 quantites of the Satty for pair wise comparison of indicators

اهمیت بینابین حالات فوق	اهمیت خیلی زیاد	اهمیت زیاد	اهمیت متوسط	اهمیت کم	اهمیت خیلی کم	تعریف
۸ و ۴ و ۲	۹	۷	۵	۳	۱	امتیاز (شدت اهمیت)

جدول ۴- اهمیت نسبی فاکتورهای ارزیابی با توجه به نظرات خبرگان

Table 4- Relative importance of risk assessment indicators according to expert opinions

خبره ششم	خبره پنجم	خبره چهارم	خبره سوم	خبره دوم	خبره اول	خبرگان
						فاکتورهای ارزیابی
۶	۶	۴	۴	۵	۵	ضریب آلودگی (C ₁)
۷	۸	۷	۵	۶	۷	غلظت میانگین (C ₂)
۵	۵	۷	۷	۶	۷	فاکتور غنی‌شدگی (C ₃)
۸	۷	۸	۹	۸	۹	شاخص زمین‌انباشتگی (C ₄)

محاسبه اعداد فازی

فاکتور با توجه به میزان برتری آن، یک عدد فازی مثلثی در نظر گرفته می‌شود. میزان برتری هر فاکتور نسبت به فاکتور دیگر، از تقسیم دو عدد فازی

برای محاسبه اعداد فازی (\tilde{a}_{ij})، نتایج نظرسنجی از متخصصان به طور مستقیم مدنظر قرار می‌گیرد. بدین منظور، بعد از جمع‌آوری نظرات خبرگان، برای هر

در این مرحله، هر یک از فاکتورها باید به وسیله یک ماتریس مقایسه زوجی نسبت به هم سنجیده شوند. با توجه به اعداد فازی به دست آمده در مرحله قبل، ماتریس مقایسه زوجی فازی بین فاکتورهای مختلف طبق رابطه ۱۰ تشکیل شد. ماتریس حاصل، در جدول ۵ نشان داده شده است.

مثلی نسبت به هم به دست می‌آید. در این تحقیق، با در نظر گرفتن $\alpha_{ij}, \delta_{ij}, \gamma_{ij} \in [1/9, 1] \cup [1, 9]$ اعداد فازی بر اساس تابع عضویت مثلی محاسبه شدند.

تشکیل ماتریس معکوس فازی

(۱۰)

$$\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}], \tilde{a}_{ij} \times \tilde{a}_{ij} \approx 1, \forall i, j = 1, 2, \dots, n$$

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1, 1, 1) & (\alpha_{12}, \delta_{12}, \gamma_{12}) & (\alpha_{13}, \delta_{13}, \gamma_{13}) \\ (1/\gamma_{12}, 1/\delta_{12}, 1/\alpha_{12}) & (1, 1, 1) & (\alpha_{23}, \delta_{23}, \gamma_{23}) \\ (1/\gamma_{13}, 1/\delta_{13}, 1/\alpha_{13}) & (1/\gamma_{23}, 1/\delta_{23}, 1/\alpha_{23}) & (1, 1, 1) \end{bmatrix}$$

جدول ۵- ماتریس مقایسه زوجی فاکتورها

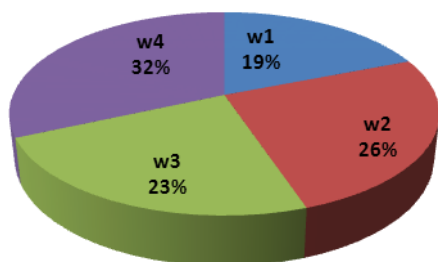
Table 5- Pair wise comparison matrix of factors

شاخص	C ₁			C ₂			C ₃			C ₄		
C ₁	۱	۱	۱	۰/۵۷	۰/۷۵	۰/۸۶	۰/۵۷	۰/۸۱	۱/۲۰	۰/۴۴	۰/۶۱	۰/۸۶
C ₂	۱/۱۷	۱/۳۴	۱/۷۵	۱	۱	۱	۰/۷۱	۱/۰۸	۱/۶۰	۰/۵۶	۰/۸۱	۱/۱۴
C ₃	۰/۸۳	۱/۲۴	۱/۷۵	۰/۶۳	۰/۹۲	۱/۴۰	۱	۱	۱	۰/۶۳	۰/۷۵	۰/۸۸
C ₄	۱/۱۷	۱/۶۵	۲/۲۵	۰/۸۸	۱/۲۳	۱/۸۰	۱/۱۴	۱/۳۳	۱/۶۰	۱	۱	۱

غیر فازی کردن وزن فاکتورها

پس از یافتن وزن فازی نهایی هر یک از فاکتورها (شکل ۴)، کلیه اعداد به دست آمده با استفاده از رابطه ۱۲ به حالت غیر فازی تبدیل شدند و تنها به صورت یک عدد بیان گردیدند که نتایج این تبدیل در جدول ۷ آمده است.

$$\tilde{W}_i = (\prod_{j=1}^3 \omega_j)^{1/3} \tag{۱۲}$$



شکل ۴- وزن فازی نهایی فاکتورها

Figure 4- Final fuzzy weight of factors.

جدول ۷- وزن غیر فازی نهایی فاکتورها

Table 7- Final defuzzy weight of factors

وزن (W)	معیار
W ₁ =۰/۱۹۱	C ₁
W ₂ =۰/۲۵۷	C ₂
W ₃ =۰/۲۳۶	C ₃
W ₄ =۰/۳۱۶	C ₄

محاسبه وزن فازی نسبی فاکتورها

بعد از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، وزن فازی نسبی فاکتورها از رابطه زیر محاسبه شد:

$$\tilde{Z}_i = [\tilde{a}_{ij} \otimes \dots \otimes \tilde{a}_{in}]^{1/n}$$

$$\tilde{W}_i = \tilde{Z}_i \otimes (\tilde{Z}_i \oplus \dots \oplus \tilde{Z}_n) \tag{۱۱}$$

که در آن، $\tilde{a}_1 \otimes \tilde{a}_2 = (\alpha_1 \times \alpha_2, \delta_1 \times \delta_2, \gamma_1 \times \gamma_2)$ بوده و \otimes ، نماد ضرب اعداد فازی، \oplus ، نماد جمع اعداد فازی و \tilde{W}_i ، یک بردار سطری است که نشان دهنده وزن فازی پارامتر نام می‌باشد. در جدول ۶، وزن نسبی معیار (شاخص) آمده است.

جدول ۶- وزن فازی نسبی فاکتورها

Table 6- Relative fuzzy weight of factors

وزن فازی نسبی			معیار
۰/۳۹۹	۰/۱۹۱	۰/۱۲۱	C ₁
۰/۴۱۳	۰/۲۵۶	۰/۱۶۱	C ₂
۰/۳۷۴	۰/۲۳۷	۰/۱۴۸	C ₃
۰/۴۹۳	۰/۳۱۶	۰/۲۰۳	C ₄

ماتریس ناهمبستگی، ماتریسی است به ابعاد $m \times m$ که قطر آن فاقد عنصر و سایر عناصر آن با استفاده از عناصر ماتریس بی‌مقیاس وزنی V طبق رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$NI_{KL} = \frac{\max_{j \in D_{KL}} |V_{kj} - V_{ij}|}{\max_{j \in j} |V_{kj} - V_{ij}|} \quad (17)$$

ماتریس NI_{KL} نسبت عدم مطلوبیت مجموعه ناهمبستگی K و L را به کل ناهمبستگی در شاخص‌ها بیان می‌کند. در واقع، این ماتریس بیانگر عدم مطلوبیت نسبت به مجموعه ناهمبستگی می‌باشد.

ایجاد ماتریس همبستگی مؤثر

برای ایجاد این ماتریس، نیاز به تعریف حد آستانه^۶ تصمیم‌گیری (\bar{I}) می‌باشد. \bar{I} مشخص‌کننده حدی است که در مقادیر بیش‌تر از آن، تصمیم‌گیرنده گزینه K را به گزینه L ترجیح دهد. یکی از روش‌های متعارف برای محاسبه آن، متوسط‌گیری از ماتریس همبستگی طبق رابطه زیر می‌باشد:

$$\bar{I} = \sum_{K=1}^m \sum_{L=1}^m \frac{I_{KL}}{m(m-1)} \quad (18)$$

اگر هر عنصر ماتریس I بزرگ‌تر از آستانه باشد، آن عنصر واحد در ماتریس F (ماتریس همبستگی مؤثر) مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر خواهد گرفت، یعنی:

$$\begin{aligned} \text{IF } I_{KL} \geq \bar{I} &\Rightarrow F_{KL} = 1, & \text{IF} \\ I_{KL} < \bar{I} &\Rightarrow F_{KL} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

قطر ماتریس F فاقد عنصر خواهد بود، بنابراین، هر عنصر واحد در این

نتایج مراحل اجرای روش الکترون

نرمال‌سازی

در این مرحله، ماتریس تصمیم با استفاده از نرم اقلیدسی^۱ به یک ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده^۲ (N_D) به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$N_D = [n_{ij}] = \left[\frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m r_{ij}^2}} \right] \quad (13)$$

که m ، تعداد شاخص‌ها، n ، تعداد گزینه‌ها و N_D ماتریسی است که امتیازات شاخص‌ها در آن بی‌مقیاس و قابل مقایسه شده است.

تشکیل ماتریس بی‌مقیاس وزنی^۳

ماتریس بی‌مقیاس وزنی طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V = N_D \times W_{mn} = \begin{bmatrix} V_{11} & \dots & V_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ V_{m1} & \dots & V_{mn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

که W_{mn} ماتریسی قطری است و فقط عناصر قطر اصلی آن غیر صفر می‌باشد. وزن شاخص‌ها که عناصر قطر اصلی ماتریس هستند، معمولاً توسط روش‌هایی مانند آنتروپی شانون^۴، بردار ویژه^۵ و کم‌ترین مجذورات وزنی، به تنهایی و یا ترکیب با منطق فازی تعیین می‌شوند. در این پژوهش، از روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی استفاده شده است.

مشخص نمودن مجموعه همبستگی و ناهمبستگی

در این مرحله، کلیه گزینه‌ها به صورت زوجی نسبت به تمام شاخص‌ها ارزیابی شده و مجموعه‌های همبستگی و ناهمبستگی تشکیل می‌شوند.

$$\begin{aligned} S_{KL} &= \{j | r_{kj} \geq r_{lj}\}, D_{KL} = \{j | r_{kj} < r_{lj}\} \\ j &= 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (15)$$

مجموعه همبستگی S_{KL} مشتمل بر کلیه شاخص‌هایی است که بر اساس آن گزینه K بر گزینه L ارجحیت و مطلوبیت بیشتری دارد و برای مجموعه نا-همبستگی D_{KL} حالت عکس وجود دارد.

محاسبه ماتریس همبستگی

ماتریس همبستگی، ماتریسی است به ابعاد $m \times m$ که قطر آن فاقد عنصر و سایر عناصر از مجموع وزن‌های به دست آمده برای شاخص‌های متعلق به مجموعه همبستگی K و L حاصل می‌شود و مؤلفه‌های آن به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$I_{KL} = \sum_{j \in S_{KL}} W_j \quad (16)$$

معیارهای همبستگی (I_{KL})، منعکس‌کننده اهمیت نسبی گزینه K به گزینه L می‌باشند به طوری که $0 < I_{KL} < 1$ خواهد بود.

محاسبه ماتریس ناهمبستگی

- 1- Euclidean Norm
- 2- Weighted Normalization Matrix
- 3- Weighted Normalization Matrix
- 4- Shannon Entropy
- 5- Eigenvector

اگر هر عنصر ماتریس \bar{N}_{i} بزرگتر از آستانه باشد آن عنصر واحد در ماتریس G (ماتریس ناهماهنگ موثر) مقدار صفر و در غیر این صورت مقدار یک خواهد گرفت، یعنی:

$$\begin{aligned} \text{IF } N_{i_{KL}} \leq \bar{N}_{i} &\Rightarrow G_{KL} = 1, \\ \text{IF } N_{i_{KL}} > \bar{N}_{i} &\Rightarrow G_{KL} = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

با توجه به مقدار حد آستانه به دست آمده ($\bar{N}_{i} = 0.684$) در این تحقیق، ماتریس G طبق جدول ۹ به دست آمد.

جدول ۹- ماتریس ناهماهنگ موثر (G)

Table 9- Effective incoordination matrix (G)

-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۱	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱
۱	۰	-	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۱	۰	۱	-	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۱	۰	۰	۰	-	۰	۱	۰	۱	۰
۱	۰	۰	۰	۱	-	۱	۰	۱	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰
۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	-	۱	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	-	۰
۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-

حداکثر صفر یا سطر آن دارای حداکثر یک باشد. جدول ۱۰، ماتریس H به دست آمده در این تحقیق را نشان می‌دهد. با توجه به این ماتریس، امتیاز و ترتیب ارجحیت (میزان بحرانیته) عناصر، از نظر مخاطره آلاینده‌گی زیست محیطی، بر اساس تعداد یک در سطر مربوط به هر یک از آن‌ها می‌باشد، بدین معنی عنصری که امتیاز بالاتری کسب کرده باشد در رتبه بالاتری (نزدیک به یک) قرار می‌گیرد و بحرانیته بیش‌تری از نظر آلودگی زیست محیطی دارد. چنان‌که اشاره شد، هدف کلی از انجام این پژوهش، ارزیابی و رتبه‌بندی مخاطره آلاینده‌گی ناشی از فلزات سنگین در رسوبات معدن مس سرچشمه بر اساس چهار شاخص موثر و مهم در تعیین میزان آلاینده‌گی آنها بود، تا اقدامات زیست محیطی مناسب برای کاهش مخاطره آن‌ها با توجه به محدودیت‌های زمانی و مالی موجود انجام شود. جدول ۱۱، نتایج رتبه‌بندی و خوشه‌بندی فلزات سنگین را در رسوبات معدن مس سرچشمه نشان می‌دهد.

ماتریس نشان دهنده یک گزینه موثر و مسلط بر دیگری است. با توجه به مقدار حد آستانه بدست آمده ($\bar{I} = 0.481$) در این تحقیق، ماتریس F طبق جدول ۸ بدست آمد.

ایجاد ماتریس ناهماهنگ موثر

ماتریس ناهماهنگ موثر با حد آستانه \bar{N}_{i} سنجیده می‌شود. برای محاسبه \bar{N}_{i} نیز از روش میانگین‌گیری از ماتریس ناهماهنگ طبق رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$\bar{N}_{i} = \frac{\sum_{K=1}^m \sum_{L=1}^m N_{i_{KL}}}{M(M-1)} \quad (20)$$

جدول ۸- ماتریس هماهنگ موثر (F)

Table 8- Effective coordination matrix (F)

-	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰	۰	۰
۱	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۱	۰	-	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰
۱	۰	۱	-	۱	۱	۱	۱	۱	۰
۰	۰	۰	۰	-	۰	۱	۱	۰	۰
۱	۰	۰	۰	۱	-	۱	۰	۰	۰
۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰
۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	-	۰	۰
۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	-	۰
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-

مشخص نمودن ماتریس کلی مؤثر (H)

در این مرحله، ماتریس H ، طبق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H_{KL} = F_{KL} \times G_{KL} \quad (22)$$

این ماتریس که از عناصر مشترک دو ماتریس F و G تشکیل شده، نشان دهنده ترتیب ارجحیت‌های نسبی از گزینه‌ها می‌باشد. برای مثال، اگر $H_{KL} = 1$ باشد، گزینه K بر گزینه L هم از نظر معیار هماهنگی و هم از نظر معیار ناهماهنگی ارجح است.

حذف گزینه‌های نامؤثر

شرط این‌که گزینه K یک گزینه موثر باشد آن است که برای حداقل یک L ، $H_{KL} = 1$ و به ازای کلیه L ها، $H_{KL} = 0$ باشد. معمولاً احتمال رخداد دو شرط فوق به طور همزمان کم است و گزینه موثر را می‌توان به سادگی تعیین کرد. همچنین بهتر است هر ستون از ماتریس H که حداقل یک عنصر واحد دارد حذف شود، زیرا آن ستون تحت تسلط ردیف یا ردیف‌هایی می‌باشد. لذا گزینه مطلوب و ارجح گزینه ای است که ستون آن دارای

جدول ۱۰- ماتریس کلی مؤثر و رتبه نهایی هر عنصر

Table 10- Total effective matrix and final ranking of each element

امتیاز	Fe	Ti	Pb	Ni	Mn	Cr	Zn	Mo	Cu	Co	گزینه ها (عناصر)
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	-	Co
۸	۰	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-	۱	Cu
۵	۰	۰	۱	۱	۱	۱	۰	-	۰	۱	Mo
۷	۰	۱	۱	۱	۱	۱	-	۱	۰	۱	Zn
۱	۰	۰	۰	۱	۰	-	۰	۰	۰	۰	Cr
۳	۰	۰	۰	-	۱	۱	۰	۰	۰	۱	Mn
۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	Ni
۴	۰	۰	-	۱	۱	۱	۰	۰	۰	۱	Pb
۱	۰	-	۰	۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	Ti
۸	-	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰	۱	Fe

جدول ۱۱- خوشه‌بندی و رتبه‌بندی فلزات سنگین رسوبات بر اساس روش الکتور

Table 11- Clustering and ranking of heavy metals in sediments based on ELECTRE method

عناصر	امتیاز	خوشه	عناصر	امتیاز	خوشه
Cu	۸	۱	Mn	۳	۵
Fe	۸		Cr	۱	
Zn	۷	۲	Ti	۱	۶
Mo	۵		Co	۰	
Pb	۴	۴	Ni	۰	۷

فلزات سنگین (Co, Cu, Mo, Zn, Cr, Mn, Ni, Pb, Ti, Fe) در رسوبات منتهی به سد باطله مجتمع مس سرچشمه استفاده گردید. بر اساس نتایج به دست آمده، ضریب آلودگی برای فلزات Pb, Mn, Zn, Mo, Cu و Fe، بالاتر از یک بود که نشان دهنده افزایش غلظت این آلاینده‌ها ناشی از تاثیر عوامل انسان‌ساز (نظیر پساب تولیدی کارخانه تغلیظ و زهاب اسیدی معدن) علاوه بر عوامل طبیعی بود. نتایج همچنین بیانگر غنی‌شدگی فلزات سنگین Cu, Mo, Zn, Mn, Pb و Fe در رسوبات منطقه مورد مطالعه بودند. غنی‌شدگی صورت گرفته برای برخی از فلزات ناشی از تاثیر فرآیندهای طبیعی و عمدتاً تولید پساب‌های مختلف در حین عملیات کارخانه تغلیظ مجتمع مس سرچشمه در سال‌های اخیر بوده است. محیط ژئومورفولوژی نیز بر شرایط و مسایل زیست محیطی منطقه مؤثر بوده است. از آنجائی‌که محیط ژئومورفولوژی منطقه، آب باران را به صورت جریان‌های سطحی و زیرزمینی به سمت معدن و سد باطله و داخل سرباره‌های معدنی هدایت می‌کند، لذا امکان آلوده شدن منابع آب و انتقال آلودگی را فراهم ساخته است. از سوی دیگر، رهاسازی حجم قابل توجهی کانسنگ و باطله در بستر آبراه‌ها و کاهش شیب آن‌ها نیز باعث افزایش نفوذپذیری آب، هوازدهی شیمیایی و

مطابق با این جدول، مخاطره‌های ۱۰ گانه در ۷ دسته خوشه‌بندی شده‌اند و مس، آهن و روی به ترتیب بالاترین میزان آلاینده‌گی و بحرانیته مخاطره را در بین فلزات سنگین رسوبات مورد مطالعه دارند. لازم به ذکر است که عناصری که دارای امتیاز یکسانی می‌باشند در خوشه واحدی قرار می‌گیرند. بر مبنای نتایج حاصله، مدیریت پروژه می‌تواند جهت ارایه پاسخ مناسب و به موقع به این مخاطره‌ها برنامه‌ریزی کند و کمک شایانی به انجام هرچه موفق‌تر فرایند مدیریت مخاطره نماید.

بحث و نتیجه‌گیری

فلزات سنگین به علت عدم تجزیه پذیری شیمیایی و زیستی، از آلاینده‌های پایدار و بادوام محیط زیست به شمار می‌آیند. این فلزات، از طریق آب، خاک و هوا به واسطه منابع مختلف طبیعی و مصنوعی به چرخه طبیعت منتقل می‌شوند و اثرات کوتاه مدت و بلند مدت خطرناکی در آن‌ها ایجاد کرده و در نتیجه، به عنوان یک مخاطره جدی در ادامه حیات موجودات زنده تلقی می‌شوند. در تحقیق حاضر، از شاخص‌های مخاطره ضریب آلودگی، ضریب بار آلودگی، شاخص غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشته‌گی، برای ارزیابی آلاینده‌گی

- 2- Sengupta, A.K. 2002. "Environmental Separation of Heavy Metals: Engineering Processes", Lewis Publishers.
- 3- Prasad, M.N.V., 2004. "Heavy Metal Stress in Plants: from Biomolecules to Ecosystems", Springer.
- 4- Zhang, W., 2009, "Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes", Environmental Pollution, Vol. 1-11.
- 5- Gonzales- Macias, C., Schifter, I., Liuch- Cota, D.B.,endez- Rodriguez, L., Hernandez- Vazquez, S., 2006. "Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of Salina Cruz Bay, Mexico", Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 118, pp. 211-230.
- 6- Wang, Sh., Cao, Z., Lan, D., Zheng, Z., Li, G., 2008, "Concentration distribution and assessment of several heavy metals in sediments of west- four Pearl River, Estuary", Environmental Geology 155, pp.963- 975.
- 7- اسلامی، محمد، اسدی پور میبیدی، مرتضی، طاهری، علی، «تأثیر دگرسانی و هوازدگی بر مقاومت سنگ‌های معدن مس سرچشمه»، دومین کنفرانس معادن روباز ایران، ۱۳۸۴، ۱۱۷-۱۱۱.
- 8- Gonzalez, A., Rodriguez, M., Sanchez, J.C., Espinosa, A.J., La Rosa, F.J., 2000. "Assessment of metals in sediments in a tributary of GUADALQUIVIR river (Spain). Heavy metal partitioning and relation between the water and sediment system water", Air and soil pollution, Vol. 121, pp. 11-29.
- 9- Milenkovic, N., Damjanovic, M., Ristic, M., 2005. "Study of heavy metal pollution in sediments from the Iron Gate (Danube River), Serbia and Montenegro", Polish Journal of Environmental studies, Vol.14, No. 6, pp. 781-787.
- 10- شایسته‌فر، محمدرضا، رضایی، علی، «ارائه راهکار در کاهش آلودگی زیست محیطی سد رسوبگیر معدن مس سرچشمه با استفاده از داده‌های ژئوشیمیایی»، بیست و هفتمین گردهمایی علوم زمین و سیزدهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، ۱۳۸۸، تهران، ۲۵۴.
- 11- Hwang, C.L., Yoon, K., 1981. "Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications", Springer-Verlag, Berlin.
- 12- Reddy, M., Basha, S., Sraavan Kumar, V.G., Joshi, H.V., Ramachandraiah, G., 2004. "Distribution, enrichment and accumulation of heavy metals in coastal sediments of the Alang- Sosiya ship scrapping yard, India", Marine Pollution Bulletin, Vol. 48, pp. 1055- 1059.

تولید زهاب‌های اسیدی معدنی گردیده و بالطبع، غنی شدگی فلزات سنگین در رسوبات منطقه را به دنبال داشته است. شاخص زمین‌انباشتی (I_{geo}) محاسبه شده برای فلزات سنگین نیز بیانگر آلودگی شدید رسوبات توسط فلزات سنگین Cu، Zn و Fe و عدم آلودگی آنها توسط فلزات سنگین Mn، Ni و Ti بودند. فعالیت‌های معدنی، زهاب اسیدی معدن و باطله‌های حاصل از کارخانه فرآوری و ذوب منشا عمده این آلودگی محسوب می‌شوند. تنوع آلاینده‌های موجود در رسوبات و محدودیت‌های زمانی و مالی برای انجام اقدامات زیست محیطی مناسب، جهت کاهش مخاطره و پیامدهای منفی جریان‌ناپذیر آن‌ها بر محیط زیست، منجر به اقدام برای رتبه‌بندی مناسب این آلاینده‌ها جهت موفقیت بیشتر تر فرایند مدیریت مخاطره شد. لذا با جمع آوری نظرات خبرگان با تکنیک‌های تصمیم‌گیری گروهی و تجمیع آن‌ها با روش تحلیل سلسله مراتبی دلفی فازی، به رتبه‌بندی و خوشه‌بندی فلزات سنگین رسوبات با روش الکترو پرداخته شد. بر اساس نتایج به دست آمده، مخاطره-های ۱۰ گانه در ۷ دسته خوشه‌بندی شدند و مس، آهن و روی به ترتیب بالاترین میزان آلاینده‌گی و بحرانیت مخاطره را در بین فلزات سنگین رسوبات مورد مطالعه داشتند. روش الکترو، رتبه‌بندی قابل اعتمادی ارائه داده و نتایج خوشه‌بندی توسط این روش، بر اساس میزان بحرانی بودن و نزدیکی تاثیر و تاثرات عناصر صورت گرفته است. این اعتبار به‌واسطه امکان در نظر گرفتن همزمان چندین شاخص، لحاظ نمودن وزن‌های متفاوت برای شاخص‌ها، تبادل بین شاخص‌ها، انعطاف‌پذیری روش و نیز تحلیلی بودن نتایج آن می‌باشد. همچنین استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی در تلفیق با منطق فازی از دیگر نقاط قوت این پژوهش بوده است، زیرا از یک سو، اوزان اهمیت شاخص‌ها به صورت کیفی و بر اساس نظرات خبرگان تعیین شده است و از سوی دیگر، عدم قطعیت و ابهام ذاتی موجود در متغیرهای بیانی و قضاوت‌های کیفی، جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در ارزیابی و اتخاذ نتایج دقیق‌تر و علمی‌تر از منطق فازی استفاده شده است. پیش‌بینی می‌شود مدیریت پروژه با شناسایی این عوامل مخاطره و آگاهی از میزان آلاینده‌گی آن‌ها بتواند جهت ارائه پاسخ به موقع و مناسب به این مخاطره‌ها برنامه‌ریزی کند و موفق به انجام هرچه بهتر فرایند مدیریت مخاطره و کاهش زیان رویدادها در صورت وقوع شود.

تشکر و قدردانی

در خاتمه، نگارندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبیر، هسته پژوهشی مهندسی محیط زیست دانشگاه شهید باهنر کرمان و شرکت ملی صنایع مس ایران به دلیل حمایت مالی در جهت انجام این پژوهش تشکر و قدردانی نمایند.

منابع

- 1- Fenglian Fu., Wang Qi, 2011. "Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater: A Review", Journal of Environmental Management, Vol. 92, pp. 407-418.

- in Shiraz suburban area, SW Iran”, Environmental Monitoring Assessment, Vol. 149, pp. 254- 262.
- 24- Pekey, H., 2006. “The distribution and sources of heavy metals in Izmit Bay surface sediments affected by a Polluted stream”, Marine Pollution Bulletin, Vol. 52, pp. 1197- 1208.
- 25- Hernandez, L., Probst, J.L., Ulrich, E., 2003. “Heavy metal distribution in some French Forset soils: for evidence atmospheric contamination”, the science of the Total Environment, Vol. 31, pp. 195- 212.
- 26- Cevik, F., Goksu, M., Derici, O., Findik, O., 2009, “An assessment of metals pollution in surface sediments of Seykan dam by using enrichment factor, Geoaccumulation index and statistical analysis”, Environmental Monitoring Assessment, Vol. 152, pp. 309-317.
- 27- Muller, G., 1979. “Schwermetalle in den sedimenten des Rheins Veranderungen seit 1971, Umschau”, Vol. 79, No. 24, pp. 778- 783.
- 28- Munendra, S., Muller, G., Sinhg, B., 2002. “Heavy metals in freshly deposited stream sediments of rivers associated with urbanization of the Ganga plain, India”, Water, Air Soil Pollut, Vol. 141, pp. 35- 54.
- 29- Bermejo Santos, J.C., Beltran, R., Gomez Araiza, J.L., 2003. “Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel River (southwest Spain)”, Environ Int, Vol. 29, No.1, pp. 69- 77.
- 30- Audry, S., Schafer, J., Blanc, G., Jouanneau, JM, 2004. “Fifty- year sedimentary record of heavy metal pollution(Cd, Zn, Cu, Pb) in the Lot River reservoirs(France)”, Environmental Pollution, Vol. 132, No. 3, pp. 413- 426.
- 31- Ghrefat, H., Yusuf, N., 2006, “Assessing Mn, Fe, Cu, Zn and Cd pollution in bottom sediments of Wadi AL- Arab Dam, Jordan”, Chemosphere, Vol. 65, pp. 2114- 2121.
- 32- Chen, C.W., Kao, C.M., Chen, C.F., & Dong, C.D., 2007. “Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan”, Chemosphere, Vol. 66, No. 8, pp. 1431- 1440.
- ۳۳- میرفخرالدینی، سیدحیدر، «تحلیل داده‌ها در شش‌سیگما با رویکرد MADM، رساله دوره دکتری مدیریت گرایش تحقیق در عملیات»، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۶، تهران.
- ۳۴- اصغری‌پور، محمدجواد، «تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره»، ۱۳۷۷، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- 13- Selvaraj, K., Rom Mohan, V., Szefer, P., 2004; “Evaluation of metal contamination in coastal sediments of the Bay of Bengal, India; geochemical and statistical approaches”, Marine Pollution Bulletin, Vol. 49, pp. 174- 185.
- 14- Adama, P., Arienzo, M., Imperato, M., Noimo, D., Nardi, G., Stanzione, D., 2005, “Distribution and partition of heavy metals in surface and sub- surface sediments of Naples city port”, Chemosphere, Vol. 61, pp. 800- 809.
- 15- Vard'es, J., Var Gas, G., Sifeddine, M., 2005, “Distribution and enrichment evaluation of heavy metals in Mejillones Bay (23 AS), Northern Chile: geochemical and statistical approach”, Marine Pollution Bulletin, Vol. 50, pp. 1558- 1568.
- 16- Shayestehfar, M.R, KarimiNasab, S., Mohammadalizadeh, H., 2007. “Mineralogy, petrology, and chemistry studies to evaluate oxide copper ores for heap leaching in Sarcheshmeh copper mine, Kerman, Iran”, Journal of Hazardous Materials, pp. 602- 612.
- 17- Alkarkhi, A.F.M., Ismai, N., Ahmed, A., Easa, A., 2008. “Analysis of heavy metal concentrations in sediments of selected estuaries of malaysia-a statistical assessment”, Environmental Monitoring Assessment, Vol. 151, pp.311- 318.
- 18- Cevik, F., Goksu, M., Derici, O., Findik, O., 2009, “An assessment of metals pollution in surface sediments of Seykan dam by using enrichment factor, Geoaccumulation index and statistical analysis”, Environmental Monitoring Assessment, Vol. 152, pp. 309-317.
- 19- Baker, D. E., and Amacher, M. C. 1981. The development and interpretation of a digestic soil testing program. Bulletin no. 826, Pensylvania State University Agric. Pensylvania University.
- 20- Lindsay, W. L., and Norvel, W. A. 1978. Development of a DTPA soil test for zinc, iron, manganese and copper. J. Soil Science. 42: 421- 428
- 21- Abraham, G.M.S., Parker, R.J., 2008. “Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree contamination in marine sediments from Tamaki. Estuary, Auckland, New Zealand”, Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 136, pp. 227- 238.
- 22- Adomako, D., Nyarko, B.J.B, Dampare, S.B., Serfor- Armah, Y., Osa, S., Fianko, J.R., Akaho, E.H., 2008. “Determination of toxic elements in waters and sediments from River Subin in the Ashanti Region of Ghana”, Environmental Monitoring Assessment, Vol. 141, pp. 165- 175.
- 23- Qishlag, A., Moore, F., Forghani, G., 2007. “Impact of untreated wastewater irrigation on soils and crops