

ارزیابی مخاطرات زیست‌محیطی ناشی از فلزات سنگین با استفاده از روش ELECTRE III (مطالعه موردی: معدن مس سرچشمه کرمان)

محمد حیاتی^{۱*}، محمدرضا توکلی محمدی^۲، علی رضایی^۳، محمدرضا شایسته فر^۴

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان

۲- عضو هیات علمی جهاد دانشگاهی تربیت مدرس، گروه پژوهشی فرآوری مواد معدنی

۳- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۴- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه شهید باهنر کرمان

(دریافت: تیر ۱۳۹۱، پذیرش: تیر ۱۳۹۴)

چکیده

فلزات سنگین به دلیل پایداری، تجزیه ناپذیری و مشکلات دسترس‌پذیری زیستی، از آلاینده‌های مهم و خطرناک محیط‌زیست به شمار می‌روند. رسوبات معدن مس سرچشمه کرمان در ایران، حاوی غلظت‌های بالایی از این آلاینده‌ها است. هدف اول این پژوهش، ارزیابی مخاطره زیست‌محیطی 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 بحرانیت با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است. در این پژوهش، ابتدا با تعیین شاخص‌های ارزیابی مخاطره به بررسی میزان آلودگی فلزات سنگین 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 روش آنتروپی شانون، رتبه‌بندی فلزات سنگین رسوبات در منطقه مورد مطالعه، با استفاده از روش ELECTRE III صورت گرفته است. بر اساس نتایج سنجش شاخص‌های ارزیابی مخاطره، شدت آلودگی منطقه به فلزات سنگین، به صورت $Zn > Cu > Fe > Mo > Pb$ است 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 ۹ دسته خوشه‌بندی شدند، به طوری که آهن و مس به ترتیب بالاترین میزان آلودگی و بحرانیت مخاطره را در بین فلزات سنگین رسوبات مورد مطالعه داشتند.

کلمات کلیدی

فلزات سنگین، ارزیابی و رتبه‌بندی مخاطره، روش ELECTRE III، معدن مس سرچشمه کرمان

۱- 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 محیط‌زیست 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 محیط‌زیست به شمار می‌آیند، چون مانند آلوده‌کننده‌های آلی، از طریق شیمیایی یا فرآیندهای زیستی در طبیعت تجزیه نمی‌شوند. این فلزات، با ایجاد سازوکارهای متعدد، سبب به هم خوردن تعادل در موجودات زنده به‌ویژه 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 محیط‌زیست از جمله رسوبات معدنی شده است [۲-۳]. بر اساس فرآیندهای هیدرودینامیکی و شرایط زیست‌محیطی (pH، شوری و دما)، رسوبات معدنی به‌عنوان منشأ 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 حرکت دوباره آلاینده‌ها در بوم سامانه، به‌عنوان منبع آلودگی عمل کند [۴]. به همین دلیل، تعیین غلظت فلزات سنگین در رسوبات معدنی، برای ارزیابی کیفیت محیط‌زیست ضروری است. فلزات سنگین موجود در رسوبات معدنی دارای دو منشأ طبیعی و انسان‌ساز هستند و انباشتگی و توزیع آن‌ها در رسوبات، تحت تأثیر عواملی چون بافت رسوبات، ترکیب کانی‌شناسی فرآیندهای جذب و پس‌دهی و همچنین نقل‌وانتقال فیزیکی است [۵-۶]. 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 به‌مراتب نقش مؤثرتری 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، بالأخص در معادن روباز، احداث سدهای باطله است. 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، به‌منظور کنترل آلودگی ناشی از باطله‌ها و حفاظت از متابولیسم طبیعی، امری حیاتی است. اما در مقابل، حضور طولانی مدت فلزات سنگین سمی در این سدها نیز نوعی تهدید زیست‌محیطی محسوب می‌شود، زیرا اگر سدهای باطله از پایداری لازم در طراحی برخوردار نباشند، نفوذ این عناصر آلاینده به داخل آب‌های زیرزمینی، خسارات زیست‌محیطی جبران‌ناپذیری را به دنبال خواهد داشت [۱۰]. بنابراین، از آن‌جاکه اقدامات پیشگیرانه به‌مراتب بهتر از اقدامات کنترلی برای جلوگیری از انتشار آلودگی است، لذا ارائه راهکارهای متمرکز و راهبردی جهت شناسایی منابع این رسوبات و ارزیابی مخاطره زیست‌محیطی آلاینده‌های آن‌ها می‌تواند در جلوگیری و یا کاهش میزان آلاینده‌های آن‌ها مؤثرتر باشد. در واقع، شناسایی عوامل مخاطره‌انگیز و آگاهی از میزان و نوع تأثیرات آن‌ها در رسوبات از یک‌سو و رتبه‌بندی درست آن‌ها از سوی دیگر، گامی اساسی در جهت ارزیابی صحیح و پاسخ‌دهی به‌موقع و مناسب به مخاطره‌های زیست‌محیطی ناشی از آلاینده‌های آن‌ها است و کاهش خسارت‌های آن‌ها را در صورت وقوع به دنبال خواهد داشت [۱۱]. هنگامی که توزیع ژئوشیمیایی عناصر در محیط، ناشی از عوامل طبیعی و انسان‌ساز باشد، عمدتاً برای ارزیابی روند تغییرات غلظت آلاینده در مطالعات زیست‌محیطی، 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 به‌عنوان شاخص‌های

ارزیابی مخاطره آلاینده‌گی ناشی از فلزات سنگین استفاده شده است.

بدین منظور جهت در نظر گرفتن تأثیر توأم و همزمان میزان همه شاخص‌ها - به ازای عناصر مختلف - در ارزیابی‌ها از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه نظیر ELECTRE III 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 است، از روش آنتروپی شانون 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 است و مطالعه میزان غنی‌شدگی و انباشتگی این آلاینده‌ها در رسوبات آن، برای تشخیص فعالیت‌های تأثیرگذار انسان بر روی محیط‌زیست منطقه بسیار حائز اهمیت است. هدف اول این پژوهش، بررسی شاخص‌های ارزیابی نظیر ضریب شاخص آلودگی، شاخص بار آلودگی، شاخص غنی‌شدگی و شاخص زمین‌انباشتگی، به‌منظور ارزیابی مخاطره میزان آلودگی ناشی از فلزات سنگین (Cr, Zn, Mo, Cu, Co), (Fe, Ti, Pb, Ni, Mn) در رسوبات این معدن است. هدف دوم، رتبه‌بندی این فلزات بر اساس میزان بحرانبندی یا مخاطره بالای آلاینده‌گی با بررسی تأثیرات همه شاخص‌ها در ارزیابی به‌طور همزمان با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه است. در این راستا، با جمع‌آوری نظرات خبرگان در خصوص میزان اهمیت نسبی هر کدام از شاخص‌های یاد شده در میزان مخاطره آلودگی زیست‌محیطی و تعیین وزن نهایی شاخص‌ها با استفاده از روش آنتروپی شانون، رتبه‌بندی فلزات سنگین رسوبات در منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش ELECTRE III انجام گرفته است تا بتوان با توجه به رتبه‌های به‌دست‌آمده و محدودیت‌های زمانی و مالی موجود، اقدامات

زیست‌محیطی مناسب را برای کاهش مخاطره و میزان آلاینده‌گی ناشی از آن‌ها انجام داد.

۲- روش بررسی

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

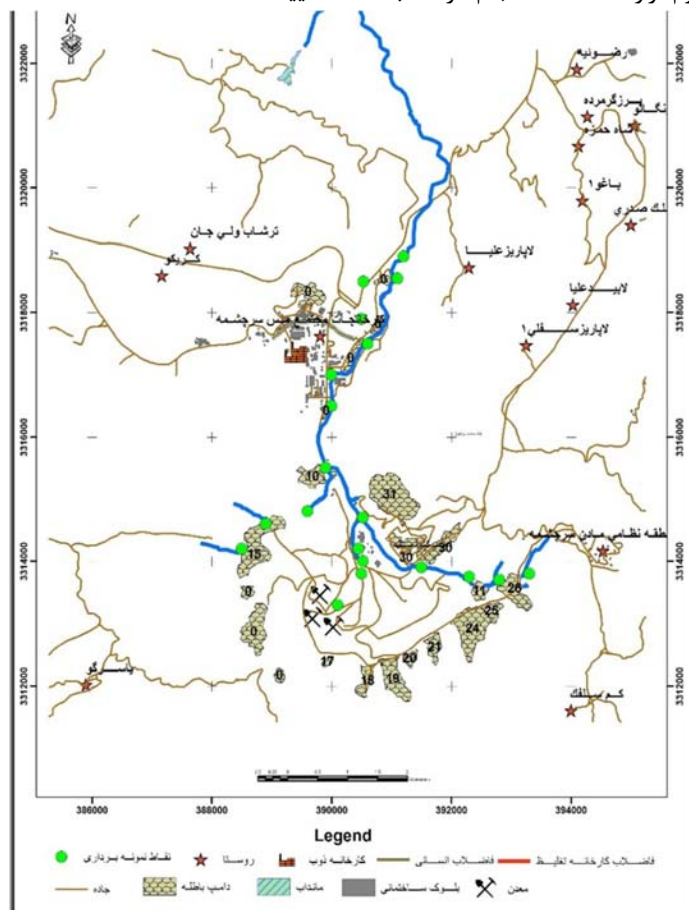
معدن مس سرچشمه در ۱۶۰ کیلومتری جنوب‌غربی استان کرمان و ۵۰ کیلومتری شهر رفسنجان قرار دارد [۱۶]. سد باطله معدن در ۱۷ کیلومتری شمال‌شرق مجتمع مس سرچشمه قرار دارد. این سد به‌منظور ذخیره باطله واحد تغلیظ و استفاده مجدد از آب آن احداث شده است. از جمله ورودی‌های این دریاچه، رودخانه شور است که سرچشمه آن زهاب اسیدی معدن است 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 [۱۷-۱۸].

۲-۲- روش نمونه‌برداری

نمونه‌برداری از رسوبات مجتمع مس سرچشمه منتهی به سد باطله در ۲۰ ایستگاه انجام یافت. شکل ۱، موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری را نشان می‌دهد. نمونه‌برداری از جریان کم‌عمق توسط بیلچه پلاستیکی و از هر ایستگاه، یک نمونه برداشت گردید و نمونه‌های به‌دست‌آمده در کیسه‌های پلی‌اتیلنی ایزوله شدند. از آنجایی 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 غلظت‌های کل و قابل جذب عناصر سنگین با دستگاه نشر اتمی جرمی قرائت گردید. برای اطمینان از دقت و صحت

استفاده از این آزمون، مشخص شد که اختلاف معناداری بین نتایج آزمایشگاه وجود ندارد و صحت نتایج نیز مورد تأیید است.

آنالیزهای انجام یافته، ۱۰ نمونه تکراری نیز ارسال شد. مقایسه میانگین دو سری اندازه‌گیری با استفاده از آزمون آماری تی-استیودنت در نرم‌افزار SPSS.17 انجام گرفت. با



شکل ۱: نقشه موقعیت ایستگاه‌های نمونه‌برداری در رسوبات مجتمع مس سرچشمه.

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad \forall i, j \quad (1)$$

مقدار آنتروپی مشخصه Z_j به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} \quad , k = \frac{1}{\ln m} \quad (2)$$

به کمک E_j مقدار d_j ، برای هر مشخصه محاسبه می‌شود:

$$d_j = 1 - E_j \quad ; \forall j \quad (3)$$

وزن w'_j مشخصه Z_j بدین صورت به دست می‌آید:

۳-۲- روش آنتروپی شانون

در بیشتر روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه نظیر روش ELECTRE III، تعیین اهمیت نسبی شاخص‌های موجود گام مؤثری در فرایند حل مسئله است. از جمله روش‌های استخراج ضرایب شاخص‌ها می‌توان به روش‌های استفاده از نظرات خبرگان و آنتروپی شانون اشاره نمود. مراحل به‌کارگیری روش آنتروپی شانون به شرح ذیل است [۲۱]:

پس از آنکه ماتریس تصمیم‌گیری به دست آمد، مقدار درایه r_{ij} (درایه‌های ماتریس تصمیم) را می‌توان به p_{ij} تبدیل کرد (رابطه ۱):

گام دوم: تعریف آستانه‌ها و اختصاص وزن به معیارها

در روش ELECTRE III به‌منظور تقویت توان شناسایی گزینه‌های برتر و دخالت دادن قضاوت تصمیم‌گیرندگان در مراحل انتخاب از سه آستانه بی‌تفاوتی (q)، آستانه ترجیح (p) و آستانه رد (v) استفاده می‌شود. هر یک از این آستانه‌ها به صورت جداگانه برای هر معیار توسط فرد یا گروه تصمیم‌گیرنده تعیین شده و در همه حالات ارزش آستانه به صورت $v_j > p_j > q_j > 0$ تعریف می‌شود. برای مثال برای گزینه a_1 و a_2 از دیدگاه معیار j ام سه آستانه به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۸]:

$$|g_{ja_2} - g_{ja_1}| \leq q_j \quad (۶)$$

$$g_{ja_2} - g_{ja_1} > p_j \quad (۷)$$

$$g_{ja_2} > g_{ja_1} + v_j \quad (۸)$$

معادله (۶) بدین معنی است که برای معیار j ، گزینه a_1 و a_2 نسبت به هم بی‌تفاوت هستند. معادله (۷) نیز بدین معنی است برای معیار j که گزینه a_1 بر گزینه a_2 ترجیح داده می‌شود. معادله (۸) نیز بدین معنی است که برای معیار j گزینه a_1 به خوبی گزینه a_2 نیست. اگر برای هر معیار مقادیر آستانه تخصیص یابد، نتایج رتبه‌بندی می‌تواند حاصل شود. نتایج رتبه‌بندی انتقال‌پذیر نیست و به صورت رتبه‌بندی جزئی است [۳۴]. از آنجایی که امتیاز منفی یک معیار نمی‌تواند توسط امتیاز مثبت روی یک معیار جبران شود روش ELECTRE III جزو روش‌های غیر جبرانی محسوب می‌شود [۳۵]. یکی از پارامترهای مهم دیگر در انتخاب گزینه مناسب در این روش، وزن یا درجه اهمیت هر یک از معیارها است. وزن معیارها موجود نیز عموماً توسط متخصصان و تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود. مجموع وزن معیارها یک است.

گام سوم: تشکیل ماتریس هماهنگی جزئی برای هر معیار

در این گام با استفاده از ماتریس تصمیم تشکیل شده در مرحله اول و آستانه‌های تعیین شده در مرحله دوم و همچنین با توجه به ارتباط گزینه‌ها از نظر هر یک از معیارها، یک ماتریس هماهنگی (C_k) برای هر یک از معیارها تشکیل می‌شود. هر یک از درایه‌های ماتریس‌های هماهنگی مذکور با استفاده از رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$w'_j = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^m d_j} \quad (۴)$$

اگر تصمیم‌گیرنده در ذهن خود برای شاخص یک ضریب اهمیت نظیر λ_j داشته باشد، محاسبه وزن را می‌توان با کمک رابطه (۵) انجام داد:

$$w_j = \frac{\lambda_j w'_j}{\sum_{j=1}^m \lambda_j w'_j} \quad (۵)$$

۴-۲- روش ELECTRE III

روش ELECTRE III از گروه روش‌های غیر رتبه‌ای و یکی از قوی‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در زمینه‌ی رتبه‌بندی است که توسط بسیاری از محققان به‌عنوان روشی کارا شناخته شده است [۲۱]. این روش دارای ترجیحات همچون مفاهیم برتری و حدود آستانه بی‌تفاوتی و ترجیح و رد است که تصمیم‌گیرنده را با در نظر گرفتن این آستانه‌ها در انتخاب گزینه کارآمد کمک می‌کند که در سایر روش‌های تصمیم‌گیری وجود ندارند [۲۲]. در این تحقیق از میان مدل‌های گوناگون ELECTRE نظیر ELECTRE I، ELECTRE II و ELECTRE III به دلیل بهره‌گیری از شبه معیارها و مدل‌سازی دقیق‌تر مسائل دنیای واقعی انتخاب شده است. روش ELECTRE III کاربرد فراوانی در مسائل تصمیم‌گیری داشته که از جمله آن‌ها می‌توان به کاربرد این روش‌ها در مدیریت و بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی [۲۳-۲۶] ارزیابی و انتخاب قراردادهای برون سپاری [۲۷]، رتبه‌بندی بهینه گزینه‌های منابع آب [۲۸]، انتخاب سیستم مدیریت پسماندها [۲۹]، رتبه‌بندی پروژه‌ها از لحاظ سودآوری [۳۰]، برنامه‌ریزی منابع طبیعی استراتژیک [۳۱] و ... اشاره نمود. مراحل روش ELECTRE III در ادامه توضیح داده شده است [۳۲-۳۳]:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم

در این روش نیز مانند سایر روش‌های تصمیم‌گیری، تشکیل ماتریس تصمیم نخستین گام به شمار می‌آید. در ماتریس تصمیم مشخصات گزینه‌ها از نظر معیارها ذکر می‌شود. در این ماتریس درایه مربوط به گزینه a_i و معیار k با نماد g_{kai} نشان داده می‌شود.

$$c_k(a_1, a_2) = \begin{cases} \frac{g_{ka_1} + p_{ka_2} - g_{ka_2}}{p_{ka_2} - q_{ka_2}} & \text{if } q_{ka_2} < g_{ka_2} - g_{ka_1} < p_{ka_2} \\ 1 & \text{if } g_{ka_2} - g_{ka_1} \leq q_{ka_2} \\ 0 & \text{if } p_{ka_2} < g_{ka_2} - g_{ka_1} \end{cases} \quad (9)$$

گام چهارم: تشکیل ماتریس هماهنگی کلی

در این گام با توجه به ماتریس‌های هماهنگ تشکیل شده برای هر یک از معیارها، ماتریس هماهنگی کلی (C) با متوسط‌گیری وزنی توسط رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$C(a_1, a_2) = \frac{\sum_{k=1}^n w_k c_k(a_1, a_2)}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (10)$$

گام پنجم: تشکیل ماتریس ناهماهنگی جزئی برای هر معیار

در این گام نیز همانند مرحله سوم، با استفاده از ماتریس تصمیم و نیز آستانه‌های تعیین شده، ماتریس‌های ناهماهنگی گزینه‌ها از نظر هر یک از معیارها (d_k) با استفاده از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

گام ششم: تشکیل ماتریس ناهماهنگی کلی

در این گام با توجه به ماتریس ناهماهنگی تشکیل شده برای هر یک از معیارها، ماتریس ناهماهنگی کلی (D) با متوسط‌گیری وزنی توسط رابطه (۱۲) تشکیل می‌شود:

$$d_k(a_1, a_2) = \begin{cases} \frac{g_{ka_1} + p_{ka_2} - g_{ka_2}}{v_{ka_2} - p_{ka_2}} & \text{if } p_{ka_2} < g_{ka_2} - g_{ka_1} < v_{ka_2} \\ 1 & \text{if } v_{ka_2} < g_{ka_2} - g_{ka_1} \\ 0 & \text{if } g_{ka_2} - g_{ka_1} \leq p_{ka_2} \end{cases} \quad (11)$$

گام هفتم: تشکیل ماتریس اعتبار (Credibility matrix) یا

درجه غیر رتبه‌ای (Outranking degree)

پس از تشکیل ماتریس هماهنگ کلی (C) و ناهماهنگ کلی (D) از ترکیب این دو ماتریس با استفاده از رابطه (۱۳) ماتریس اعتبار (S) که اعتبار برتری گزینه a_1 نسبت به گزینه a_2 نشان می‌دهد محاسبه می‌شود:

$$S(a_1, a_2) = \begin{cases} C(a_1, a_2) & \text{if } d_k(a_1, a_2) \leq C(a_1, a_2) \\ C(a_1, a_2) \cdot \prod_{k \in J(a_1, a_2)} \left[\frac{1 - d_k(a_1, a_2)}{1 - C(a_1, a_2)} \right] & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (13)$$

با توجه به ماتریس S محاسبه شده در گام هفتم، برای تشکیل ماتریس مقایسه نهایی، شاخص‌های λ و $S(\lambda)$ به صورت معادله (۱۴) و (۱۵) تعیین می‌شود.

$$\lambda = \max(S) \quad (14)$$

$$S(\lambda) = \alpha - \beta\lambda \quad (15)$$

که در آن $J(a_1, a_2)$ بیانگر آن دسته از شاخص‌هایی است که در آن $d_k(a_1, a_2) > C(a_1, a_2)$ است.

گام هشتم: تشکیل مقایسه نهایی

سپس ماتریس مقایسه نهایی T با استفاده از رابطه (۱۶) محاسبه می‌شود.

$$T(a_1, a_2) = \begin{cases} 1 & \text{if } S(a_1, a_2) < \lambda - S(\lambda) \\ 0 & \text{در غیر این صورت} \end{cases} \quad (16)$$

گام نهم: انجام فرآیند رتبه‌بندی

پس از تشکیل ماتریس مقایسه نهایی، به‌منظور اولویت‌بندی گزینه‌های مورد بررسی، یک بار گزینه‌ها از بهترین حالت به بدترین حالت (O_1) مرتب می‌شوند و یک بار هم از حالت بدترین گزینه به بهترین گزینه (O_2) مرتب می‌شوند. و در نهایت رتبه‌بندی نهایی از $O = O_1 \cap O_2$ حاصل می‌شود.

۳- یافته‌ها

۳-۱- 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.

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

عناصر	دامنه	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات
Zn	۲۱/۵-۲۴۷	۱۶۱/۱۹۵	۵۰/۳۷	۰/۳۱
Cu	۹۷-۶۷۰۰	۱۳۷۳/۵۰	۱۱۲۶/۵۶	۰/۸۲
Cr	۱۱-۴۰	۲۶/۳۵	۷/۵۶	۰/۲۹
Co	۱۴/۱۰-۵۳/۲۰	۲۱/۷۹	۸/۲۹	۰/۳۸
Mo	۱/۱-۸۵/۳۰	۲۱/۲۱	۲۰/۰۲	۰/۹۴
Mn	۱۹۵-۱۸۴۰	۹۰۳/۱۰	۴۷۴/۶۱۵	۰/۵۳
Ni	۱۴-۳۶	۲۴/۷۰	۵/۷۸	۰/۲۳
Pb	۲۱/۶۰-۱۲۷	۶۲/۶۶	۳۱/۷۱	۰/۵۰
Ti	۱۵۶۰-۶۴۱۰	۴۳۱۰	۱۲۳۳/۴۲	۰/۲۹
Fe	۲۷۶۰۰-۸۴۹۰۰	۵۱۸۶۰	۱۳۶۲۲/۸۷	۰/۲۶

۳-۱-۱- محاسبه ضریب آلودگی (CF)

به‌منظور محاسبه ضریب آلودگی از رابطه ۱۷ استفاده شد. در واقع، ضریب آلودگی، نسبت غلظت عنصر در نمونه برداشت شده به غلظت همان عنصر در نمونه زمینه است که در مقادیر بزرگ‌تر از یک، بیانگر آلودگی رسوبات به فلز سنگین است:

$$CF = \frac{C_{Sample}}{C_{Background}} \quad (17)$$

در این رابطه: C_{sample} غلظت عنصر در نمونه و $C_{background}$ غلظت عنصر در نمونه زمینه است. نمونه زمینه از مقایسه رسوبات منطقه با رسوبات محلی توسط روش‌های آماری در منطقه مورد مطالعه به دست می‌آید [۳۶-۳۷]. در

جدول ۲، ضریب آلودگی رسوبات معدن مس سرچشمه ارائه شده است.

۳-۱-۲- شاخص بار آلودگی (PLI)

برای محاسبه این شاخص از معادله زیر استفاده شده است:

$$PLI = \sqrt[n]{CF_1 \times CF_2 \times CF_3 \times \dots \times CF_n} \quad (18)$$

مقادیر بیش از یک این شاخص، بیانگر آلودگی رسوب و مقادیر نزدیک به یک آن، نشان‌دهنده مشابه بودن غلظت آلاینده در نمونه‌های مورد مطالعه و زمینه است [۳۷-۳۸]. مقدار محاسبه شده PLI در این پژوهش، ۱/۷۵ به دست آمد.

۳-۱-۳- شاخص غنی‌شدگی (EF)

شاخص دیگری که برای ارزیابی مخاطره فلزات سنگین در رسوبات به کار برده می‌شود I_{geo} یا اندیس مولر است که طبق رابطه (۲۰) بیان می‌شود [۴۲-۴۵]:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_n}{1.5B_n} \right] \quad (20)$$

در این رابطه، C_n ، غلظت اندازه‌گیری شده عنصر در نمونه و B_n ، غلظت همان عنصر در نمونه زمینه است. ضریب ۱/۵ نیز برای حذف تغییرات احتمالی زمینه به علت تأثیرات زمین‌شناختی اعمال می‌شود [۴۶-۴۷]. در جدول ۲، مقادیر محاسبه شده این شاخص برای فلزات سنگین رسوبات و شدت آلودگی منطقه بر اساس آن آمده است [۵]. طبق نتایج به‌دست‌آمده، شدت آلودگی عناصر سنگین رسوبات معدن مس سرچشمه به صورت $Zn > Cu > Cr > Mn > Pb > Mo > Fe$ 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 هوازدگی شیمیایی آن را بالا برده است. لذا با اکسید شدن سنگ‌های سولفیدی و تولید اسید سولفوریک، زهاب‌های اسیدی حاوی فلزات سنگین سمی به وجود آمده‌اند و متعاقباً سبب غنی‌شدگی و زمین‌انباشتگی فلزات آلاینده شده‌اند.

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 [۳۹] در رابطه غنی‌شدگی، در نظر گرفته می‌شود. این شاخص طبق رابطه زیر محاسبه شده است:

$$EF = M_x \times Fe_b / M_b \times Fe_x \quad (19)$$

که در آن، M_x و Fe_x به ترتیب غلظت فلزات سنگین نمونه‌های رسوب و فلز آهن (فلز نرمالیزه شده) و M_b و Fe_b به ترتیب غلظت فلزات سنگین نمونه‌های زمینه و مرجع هستند [۱۵، ۴۰]. از آنجایی که آهن به‌طور معمول غلظت طبیعی بالایی دارد و توزیع آن نسبت به بقیه فلزات سنگین متناسب نیست، در محاسبه EF از آن به‌عنوان فلز نرمالیزه شده استفاده شده است. نتایج سنجش EF فلزات سنگین برای رسوبات منطقه مورد مطالعه و طبقه‌بندی آن‌ها بر اساس استاندارد [۴۱] در جدول ۲ ارائه شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، بالاترین مقادیر EF محاسبه شده، به ترتیب مربوط به فلزات مس و آهن بودند.

۳-۱-۴- شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo})

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

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

۳-۲- نتایج مراحل اجرای روش آنالیز شانون

در این مرحله مقادیر محاسبه شده فاکتورهای ارزیابی به ازای هر کدام از عناصر ده گانه مورد بررسی، به‌عنوان ماتریس تصمیم در نظر گرفته شده است و به‌منظور استفاده از تکنیک ELECTRE III، با استفاده از روش آنالیز شانون اهمیت نسبی فاکتورهای چهارگانه محاسبه شده است. در این راستا ابتدا اهمیت نسبی شاخص‌های

چهارگانه با استفاده از نظرات خبرگان تعیین گردید. بدین منظور، با استفاده از طیف وزن‌دهی آمده در جدول ۳، اقدام به جمع‌آوری نظرات خبرگان در مورد فاکتورهای ارزیابی مخاطره گردید. جدول ۴، نظرات افراد خبره و کارشناس را در مورد اهمیت نسبی این فاکتورها نشان می‌دهد. در ادامه مطابق روابط (۱ الی ۴) وزن نهایی فاکتورها به‌دست‌آمده است. نتایج در جدول ۵ درج شده است.

جدول ۳: مقایسه ۹ کمیته ساعتی برای مقایسه دو دویی فاکتورها

تعریف	اهمیت خیلی کم	اهمیت کم	اهمیت متوسط	اهمیت زیاد	اهمیت خیلی زیاد	اهمیت بینابین حالات فوق
امتیاز (شدت اهمیت)	۱	۳	۵	۷	۹	۲ و ۴ و ۶ و ۸

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

فاکتورهای ارزیابی	خبره اول	خبره دوم	خبره سوم	خبره چهارم	خبره پنجم	خبره ششم	وزن حاصل از تلفیق نظرات خبرگان
ضریب آلودگی (C ₁)	۵	۵	۴	۴	۶	۶	۰/۱۹۲
غلظت میانگین (C ₂)	۷	۶	۵	۷	۸	۷	۰/۲۵۶
فاکتور غنی‌شدگی (C ₃)	۷	۶	۷	۷	۵	۵	۰/۲۳۷
شاخص زمین‌انباشتگی (C ₄)	۹	۸	۹	۸	۷	۸	۰/۳۱۴

جدول ۵: محاسبه وزن نهایی معیارهای ارزیابی ریسک

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄
E _j	۰/۷۱۴۵	۰/۲۱۲۸	۰/۷۱۴۸	۰/۵۹۳۲
d _j	۰/۲۸۵۵	۰/۷۸۷۲	۰/۲۸۵۲	۰/۴۰۶۸
وزن آنالیز شانون	۰/۱۶۱۸	۰/۴۴۶۱	۰/۱۶۱۶	۰/۲۳۰۵
وزن تلفیقی خبرگان	۰/۱۹۲	۰/۲۵۶	۰/۲۳۷	۰/۳۱۴
وزن نهایی	۰/۱۲۱۴	۰/۴۴۶۴	۰/۱۴۹۶	۰/۲۸۲۶

روش آنالیز شانون در مرحله قبل، در ادامه بر اساس نظرات خبرگان، مقادیر آستانه‌ها تعیین شد (جدول ۶).

۳-۳- نتایج مراحل اجرای روش ELECTRE III

پس از تشکیل ماتریس تصمیم (جدول ۴) و محاسبه اهمیت نسبی فاکتورهای ارزیابی مخاطرات با استفاده از

جدول ۶: مقادیر آستانه‌ها برای فاکتورهای ارزیابی

C ₄	C ₃	C ₂	C ₁	q
۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۵	q
۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	p
۱	۱	۱	۱	v

در ادامه مطابق گام سوم با استفاده از رابطه (۹) برای هر کدام از فاکتورها ماتریس هم‌انگهی جزئی محاسبه شد (جدول ۷ الی ۱۰).

سپس برای هر کدام از معیارها با استفاده از رابطه (۱۰) ماتریس هم‌انگهی کل تعیین شد (جدول ۱۱).

جدول ۹: ماتریس هم‌انگهی جزئی برای فاکتور C_3

۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۳۹	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۰/۹۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۳۲	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۳۳	۱/۰۰	۰/۰۰
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۳۷	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۰/۸۳	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۱۳	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰

جدول ۷: ماتریس هم‌انگهی جزئی برای فاکتور C_1

۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۴۴	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۰/۹۵	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۲۸	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۴۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۷	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۶	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۴۴	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۰/۸۷	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۲۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰

جدول ۱۰: ماتریس هم‌انگهی جزئی برای فاکتور C_4

۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۵	۱/۰۰	۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۷	۱/۰۰	۰/۵۲	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۱۷	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۷۴	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۵	۱/۰۰	۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۵۲	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۵	۱/۰۰	۰/۵۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰

جدول ۸: ماتریس هم‌انگهی جزئی برای فاکتور C_2

۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۰۰
۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰	۱/۰۰

جدول ۱۱: ماتریس هم‌انگهی کل

C	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۰/۰۰۰	۰/۵۵۴	۰/۳۵۲	۰/۵۵۴	۰/۱۴۱	۰/۵۵۴	۰/۰۰۰
A2	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۷۱۷	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۵۵۴	۰/۵۵۴
A3	۰/۵۵۴	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۲۷۱	۰/۵۵۴	۰/۵۵۴	۰/۵۵۴	۰/۵۵۴	۰/۵۵۴	۰/۰۰۰
A4	۱/۰۰۰	۰/۲۸۳	۰/۷۲۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۵۵۴	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۵۵۴	۰/۲۸۳
A5	۰/۹۸۱	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۳۱۳	۱/۰۰۰	۰/۱۴۷	۰/۵۵۴	۰/۰۰۰
A6	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۹۶	۰/۴۴۶	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۷۵۳	۰/۵۵۴	۰/۰۰۰
A7	۰/۷۲۹	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۰/۰۰۰	۰/۲۹۱	۰/۲۴۰	۱/۰۰۰	۰/۱۴۱	۰/۳۱۱	۰/۰۰۰
A8	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۵۹۴	۰/۱۰۹	۱/۰۰۰	۰/۵۵۴	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۵۵۴	۰/۰۰۰
A9	۰/۹۵۸	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶	۱/۰۰۰	۰/۷۳۰	۱/۰۰۰	۰/۵۸۸	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰
A10	۱/۰۰۰	۰/۴۴۶	۱/۰۰۰	۰/۷۱۷	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰

در ادامه مطابق گام پنجم (رابطه ۱۱) با توجه به آستانه رد و آستانه ترجیح، ماتریس ناهماهنگ جزئی را برای هر معیار محاسبه کرده و بر اساس آن‌ها با استفاده از رابطه (۱۲) ماتریس ناهماهنگی کل به دست آمده است.

سپس با توجه به رابطه (۱۳)، با تلفیق ماتریس هماهنگی کل و ماتریس ناهماهنگی کل، ماتریس اعتبار محاسبه شده است. نتایج در جدول (۱۳) نشان داده شده است.

جدول ۱۲. ماتریس ناهماهنگ کلی

D	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۲۸۸	۰/۸۳۱	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶	۰/۵۲۶	۰/۴۴۶	۱/۰۰۰
A2	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۶۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶
A3	۰/۰۷۱	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۷۲۹	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶	۰/۴۴۶	۱/۰۰۰
A4	۰/۰۰۰	۰/۷۱۷	۰/۲۷۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۰/۷۱۷
A5	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۲۸۲	۰/۹۹۸	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۰/۰۰۰	۰/۵۶۸	۰/۴۴۶	۱/۰۰۰
A6	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۲۷۱	۰/۳۶۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۱/۰۰۰
A7	۰/۰۳۷	۱/۰۰۰	۰/۲۸۸	۱/۰۰۰	۰/۴۴۹	۰/۶۵۲	۰/۰۰۰	۰/۷۱۷	۰/۴۴۶	۱/۰۰۰
A8	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۲۷۱	۰/۷۲۹	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۴۴۶	۱/۰۰۰
A9	۰/۰۰۰	۰/۵۵۴	۰/۲۸۸	۰/۵۵۴	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۴۳	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰
A10	۰/۰۰۰	۰/۳۹۵	۰/۰۰۰	۰/۲۸۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰

جدول ۱۳: ماتریس اعتبار

C	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	-	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۱۰۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
A2	۱/۰۰۰	-	۱/۰۰۰	۰/۷۱۷	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
A3	۰/۵۵۴	۰/۰۰۰	-	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
A4	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	-	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
A5	۰/۹۸۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	-	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۸۶	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
A6	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	-	۱/۰۰۰	۰/۷۵۳	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
A7	۰/۷۲۹	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۵۷	-	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
A8	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	-	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
A9	۰/۹۵۸	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۷۳۰	۱/۰۰۰	۰/۵۸۸	-	۰/۰۰۰
A10	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	-

با توجه به ماتریس S محاسبه شده در گام قبل (جدول ۱۳)، بر اساس روابط (۱۴) و (۱۵) شاخص‌های λ و $S(\lambda)$ به ترتیب ۱ و ۰/۲۸ به دست آمدند. همچنین مطابق نظر خبرگان مقادیر α و β به ترتیب برابر (۰/۱۱) و (۰/۳۹) تعیین شدند. لذا مطابق رابطه (۱۶) ماتریس مقایسه نهایی (T) در جدول (۱۴) به دست آمد.

ارزش رتبه‌بندی صعودی و نزولی، رتبه‌بندی نهایی حاصل شده است. در شکل (۲) به ترتیب از بالا به پایین رتبه‌بندی نزولی، صعودی و نهایی انجام شده است.

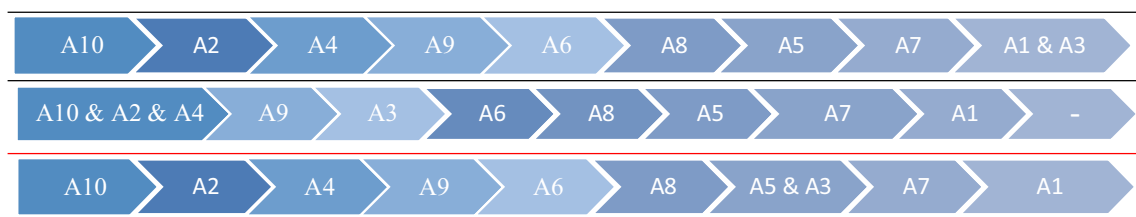
با توجه به نتایج رتبه‌بندی فلزات سنگین با استفاده از روش ELECTRE III مشاهده می‌شود که فلزات Fe، Cu، Co، Ti، Mn، Pb، Mo، Cr، Ni و Zn به ترتیب دارای بیشترین میزان ریسک آلاینده‌گی زیست‌محیطی و بحرانیت مخاطره را در بین فلزات سنگین رسوبات مورد

در آخرین گام به منظور رتبه‌بندی گزینه‌ها (فلزات سنگین) یک‌بار به صورت نزولی و یک‌بار به صورت صعودی رتبه‌بندی انجام گرفته و در نهایت با استفاده از اشتراک

مطالعه دارند. حال بر مبنای نتایج به‌دست‌آمده، مدیریت پروژه می‌تواند جهت ارائه پاسخ مناسب و به‌موقع به این مخاطره‌ها برنامه‌ریزی کند و کمک شایانی به انجام هر چه موفق‌تر فرایند مدیریت مخاطره نماید.

جدول ۱۴: ماتریس مقایسه نهایی

T	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
A1	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
A2	۱	-	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۰	۰
A3	۰	۰	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
A4	۱	۰	۰	-	۱	۰	۱	۱	۰	۰
A5	۱	۰	۰	۰	-	۰	۱	۰	۰	۰
A6	۱	۰	۰	۰	۱	-	۱	۱	۰	۰
A7	۱	۰	۰	۰	۰	۰	-	۰	۰	۰
A8	۱	۰	۰	۰	۱	۰	۱	-	۰	۰
A9	۱	۰	۰	۰	۱	۱	۱	۰	-	۰
A10	۱	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۱	۱	-



شکل ۲: رتبه‌بندی نهایی مخاطرات (فلزات سنگین)

بالتر از یک بود که نشان‌دهنده افزایش غلظت این آلاینده‌ها ناشی از تأثیر 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 تأثیر 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 مسائل زیست‌محیطی منطقه مؤثر بوده است. از آنجایی که 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 آبراهه‌ها و کاهش

۴- بحث و نتیجه‌گیری

فلزات سنگین به علت عدم تجزیه‌پذیری شیمیایی و زیستی، از آلاینده‌های پایدار و بادوام محیط‌زیست 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 کوتاه‌مدت و بلندمدت 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 زمین‌انباشتگی، برای ارزیابی آلاینده‌های فلزات سنگین (Co، Cu، Mo، Zn، Cr، Mn، Ni، Pb، Ti و Fe) در رسوبات منتهی به سد باطله مجتمع مس سرچشمه استفاده گردید. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، ضریب آلودگی برای فلزات Cu، Mo، Zn، Mn، Pb و Fe،

- [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.
- [۱۰] شایسته‌فر، محمدرضا، رضایی، علی، «ارائه راهکار در کاهش آلودگی زیست‌محیطی 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., Sravan 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.
- [13]Selvaraj, K., Rom Mohan, V., Szefer, P., 2004; "Evaluation of metal contamination in coastal sediments of the Bay of Bengal, India; geochemical

شیب آن‌ها نیز باعث افزایش نفوذپذیری آب، هوازدگی شیمیایی و تولید زهاب‌های اسیدی معدنی گردیده و بالطبع، غنی‌شدگی فلزات سنگین در رسوبات منطقه را به دنبال داشته است. شاخص زمین‌انباشتگی (I_{geo}) محاسبه شده برای فلزات سنگین نیز بیانگر آلودگی شدید رسوبات توسط فلزات سنگین Zn، Cu، Fe و عدم آلودگی آن‌ها توسط فلزات سنگین Ni، Mn، Ti بودند. فعالیت‌های معدنی، زهاب اسیدی معدن و باطله‌های حاصل از کارخانه فرآوری و ذوب منشأ عمده این آلودگی محسوب می‌شوند. تنوع آلاینده‌های موجود در رسوبات و محدودیت‌های زمانی و مالی برای انجام اقدامات زیست‌محیطی مناسب، جهت کاهش مخاطره و پیامدهای منفی جبران‌ناپذیر آن‌ها بر محیط‌زیست، منجر به اقدام برای رتبه‌بندی مناسب این آلاینده‌ها جهت موفقیت بیش‌تر فرایند مدیریت مخاطره شد. لذا با جمع‌آوری نظرات خبرگان در خصوص میزان اهمیت نسبی شاخص‌ها به رتبه‌بندی فلزات سنگین رسوبات با روش ELECTRE III پرداخته شد. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، فلزات Cu، Fe، Co، Ti، Mn، Pb، Mo، Cr، Ni و Zn به ترتیب بالاترین میزان آلاینده‌گی و بحرانیت مخاطره را در بین فلزات سنگین رسوبات مورد مطالعه داشتند. روش ELECTRE III، رتبه‌بندی قابل‌اعتمادی ارائه داده و نتایج خوشه‌بندی توسط این روش، بر اساس میزان بحرانی بودن و نزدیکی تأثیر و تأثرات 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 است. پیش‌بینی می‌شود مدیریت پروژه با شناسایی این عوامل مخاطره و آگاهی از میزان آلاینده‌گی آن‌ها بتواند جهت ارائه پاسخ به‌موقع و مناسب به این مخاطره‌ها برنامه‌ریزی کند و موفق به انجام هرچه بهتر فرایند مدیریت مخاطره و کاهش زیان رویدادها در صورت وقوع شود.

۶- مراجع

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

- [26]. Buchanan, J., Shepperd, Ph., Vanderpooten, D., Project Ranking Using ELECTREIII, 1999, www.elsevier.com.
- [27]. Georgopoulou, E., Lalas, D., Papagiannakis, L., A Multicriteria Decision Aids Approach for Energy Planning Problems : The Case of Renewable Energy Option, European Journal of Operational Research, Vol:103, 1997.
- [28]. Hokkanen, J., Salminen, P., Choosing a Solid Waste Management System Using Multicriteria Decision Analysis, European Journal of Operational Research, Vol:98, 1997.
- [29]. Papadopoulos, A., Karagiannidis, A., Application of the Multi criteria Analysis Method ELECTRE III for the Optimization of Decentralized Energy Systems, Omega, Vol:36, 2008.
- [30]. Zhang, T., Yuan, J., Decision-aid for Power Distribution System Planning Problems Using ELECTRE III, 2005, www.ieeeexplore.ieee.org.
- [31]. Tam, C. M., Tong, T. K. L., Lau, C. T., ELECTRE III in Evaluating Performance of Construction Plants, Case Study on Concrete Vibrator, Construction Innovation, Vol:3, 2003.
- [۳۲] عطایی، محمد؛ "تصمیم‌گیری چند معیاره"، شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود، ۱۳۸۹.
- [33] Ishizaka, A., "Multi-criteria Decision Analysis: Methods and Software". John Wiley & Sons, 2013.
- [34] Roy, B., "Multicriteria methodology for decision aiding". Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1996.
- [35] Roy, B., "ELECTRE III: Un algorithme de classements fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples". Cah. du CERO, vol. 20, no. 1, pp. 3-24, 1978.
- [36]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.
- [37]Adomako, D., Nyarko, B.J.B, Dampare, S.B., Serfor- Armah, Y., Osae, 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.
- [38]Qishlag, A., Moore, F., Forghani, G., 2007. "Impact of untreated wastewater irrigation on soils and crops in Shiraz suburban area, SW Iran", Environmental Monitoring Assessment, Vol. 149, pp. 254- 262.
- [39]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.
- [40]Hernandez, L., Probst, J.L., Ulrich, E., 2003. "Heavy metal distribution in some French Forset soils: for evidence atmospheric contamination", The and statistical approaches", Marine Pollution Bulletin, Vol. 49, pp. 174- 185.
- [14]Adama, P., Arienzo, M., Imporato, M., Noimo, D., Nardi, G., Stanzone, 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. Pesyvania 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.
- [۲۱] اصغرپور، محمدجواد، «تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره»، ۱۳۷۷، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- [۲۲] میرفخرالدینی، سیدحیدر، «تحلیل داده‌ها در شش‌سیگما با رویکرد MADM، رساله دوره دکتری مدیریت گرایش تحقیق در عملیات»، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۸۶.
- [23]. Almeida, A. T. D., Multi criteria Decision Model for Outsourcing Contracts Selection Based on Utility Function and ELECTRE Method, 2007, www.elsevier.com.
- [24]. Anand Raj, P., Nagesh Kumar, D., Ranking of River Basin Alternatives Using ELECTRE, Hydrological Science Journal, Vol:41, 1996.
- [25]. Beccali, M., Cellura, M., Mistretta, M., Decision Making in Energy Planning. Application of the ELECTRE Method at Regional Level for the Diffusion of Renewable Energy Technology, 2003, www.elsevier.com.

- science of the Total Environment, Vol. 31, pp. 195-212.
- [41]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.
- [42]Muller, G., 1979. "Schwermetalle in den sedimenten des Rheins Veränderungen seit 1971, Umschau", Vol. 79, No. 24, pp. 778- 783.
- [43]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.
- [44]Bermejo Santos, JC., Beltran, R., Gomez Araiza, JL., 2003. "Spatial variations of heavy metals contamination in sediments from Odiel River (southwest Spain)", Environ Int, Vol. 29, No.1, pp. 69- 77.
- [45]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.
- [46]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.
- [47]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.

Evaluation of Environmental Hazards from Heavy Metals Using ELECTRE III Method (Case Study: Sarcheshmeh Copper Mine)

M. Hayati^{1*}, M. Tavakoli Mohammadi², A. Rezaei³, M. Shayestehfar⁴

1- Assistance Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Iran

2- Faculty member of Academic Center for Education, Culture and Research (ACCER) on TMU, Mineral processing research group, Iran

3- PhD Student of Mining, Dept. of Mining and Metallurgy, Amirkabir University of Technology, Iran

4- Associate Professor, Dept. of Mining, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran

*Corresponding Author: Mohammad_hayaty@yahoo.com

(Received: June 2012, Accepted: June 2015)

Abstract

Because of the stability, atomic and biological accessibility problems of the heavy metals, they are considered as serious pollutants of the environment. The sediments of Sarcheshmeh copper mine in Iran contain high concentrations of these pollutants. and thus environmental evaluation and ranking them based on emission levels is important for timely environmental measures with the lowest operating costs. The first aim of this study is the environmental risk evaluation 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 critical risk using the Multi Attribute Decision Making (MADM) methods. In this study, first, by determining risk evaluation indices, we set out to assess 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. Then, by collecting expert opinions on the relative importance of each of the mentioned indicators, through final weighting of the indices using Antropy Shanoon method, heavy metals in the sediments of the study area were ranked and clustered using ELECTRE III method. Based on measured results of the risk evaluation indices, the intensity of contamination to these metals were as Fe> Cu> Co> Ti> Mn > Pb > Cr, and all the metals except for copper, zinc and iron cited almost in the unpollutant limit. Also based on ranking results, the ten risks were clustered in seven categories with iron and copper having the highest pollution and critical risk amongst the heavy metals in the sediments under study, respectively.

Keywords

Heavy metals, Risk assessment and ranking, ELECTRE III method, Sarcheshmeh copper mine