

بررسی استراتژی‌های مدیریت زهاب اسیدی معدن

مهسا صادقی وزین^۱، سید محسن کرابی^۲، علی اخترپور^۳، فرزاد دلیری^۴

^۱ دانشگاه فردوسی، مشهد mahsa.sadeghivazin@mail.um.ac.ir

^۲ دانشگاه فردوسی، مشهد karrabi@um.ac.ir

^۳ دانشگاه فردوسی، مشهد akhtarpour@um.ac.ir

^۴ دانشگاه صنعتی سجاد، مشهد farzad.daliri@sadjad.ac.ir

چکیده

منابع معدنی که از مهم‌ترین پشتوانه‌های توسعه صنعت هستند، با تولید حجم عظیمی از باطله همراه می‌باشند که به دلیل اثرات مخرب مختلف و گسترده بر محیط زیست، نیازمند توجه ویژه‌ای است. نگرانی‌های مربوط به اثرات منفی زیست‌محیطی معدن تنها مربوط به دوره فعالیت آن نیست، بلکه مهم‌تر از آن تأثیراتی است که سال‌ها بعد می‌تواند بر روی محیط زیست داشته باشد. یکی از مهم‌ترین مشکلاتی که در محل انباشت باطله‌های خشک ایجاد می‌گردد، تولید زهاب اسیدی (Acid Mine Drainage) از باطله است. زهاب اسیدی معدن، زهابی با pH پایین، غلظت بالای فلزات سنگین و مواد سمی است و هنگامی ایجاد می‌شود که پسماندهای غنی از سولفید در معرض اتمسفر قرار گیرند. تاکنون روش‌های مختلفی برای کنترل زهاب اسیدی معدن ارائه شده است که با توجه به شرایط سایت معدن می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه انواع روش‌های متداول مدیریت زهاب اسیدی معدن شامل تصفیه پساب خروجی کارخانه، پوشش‌های خاکی و پوشش‌های آبی مورد بررسی قرار گرفته است و سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی و با کمک نرم افزار Expert choice مناسب‌ترین روش احیای معدن انتخاب گردید. نتایج حاصل از مقایسه زوجی در این بررسی نشان داد که استفاده از پوشش با اثرات مانع موینگی بهترین روش برای احیا و بازسازی معدن خواهد بود.

واژه‌های کلیدی

مدیریت زهاب اسیدی معدن، مس سونگون، فلزات سنگین، AHP.

۱. مقدمه

معدن کاری و استخراج فلزات که از پشتوانه‌های صنعتی و اقتصادی یک کشور محسوب می‌شود، با تولید حجم زیادی از باطله همراه است و به دلیل داشتن اثرات مخرب مختلف و گسترده بر محیط زیست، نیازمند توجه ویژه‌ای است. نگرانی‌های مربوط به اثرات منفی زیست‌محیطی معدن تنها مربوط به دوره فعالیت آن نیست، بلکه مهم‌تر از آن تأثیراتی است که سال‌ها بعد می‌تواند بر روی محیط زیست داشته باشد [۱]. باطله‌های تولید شده از معادن سولفیدی معمولاً حاوی مواد معدنی سولفیدی بی‌ارزشی مانند پیریت، پیروتیت و آرسنوپیریت هستند که توانایی تولید زهاب اسیدی معدن^۱ (AMD) را دارند. زهاب اسیدی معدن که به عنوان یک مشکل جدی زیست‌محیطی در

¹ Acid Mine Drainage

سراسر جهان محسوب می‌شود، هنگامی ایجاد می‌شود که پسماندهای غنی از سولفید در معرض اتمسفر قرار بگیرند [۲]. این زهاب شامل آلاینده‌هایی از جمله فلزات سنگین Cu^{2+} ، Fe^{3+} ، Mn^{2+} ، Zn^{2+} ، Cd^{2+} ، Pb^{2+} است [۳] که به دلیل pH پایین محلول هستند و توانایی آلودگی آب‌های زیرزمینی را دارند. فلزات سنگین زیست تخریب‌پذیر نیستند و در صورت ورود به بدن موجودات زنده، در بدن آن تجمع می‌یابند و باعث بیماری‌ها و اختلالات مختلف می‌شوند [۴]. زهاب اسیدی معدن یک بحران جهانی است که کمتر به آن پرداخته شده است. سازمان ملل متحد از آن به عنوان دومین مشکل بزرگ جهانی پس از گرم شدن زمین یاد کرده است. در ایالات متحده آمریکا زهاب اسیدی معدن و سایر مواد و فلزات سمی حاصل از معادن ۱۸۰۰۰ جریب زمین و ۱۲۰۰۰ مایل از رودخانه‌ها و جریان‌های آبی را آلوده کرده است. طبق برآورد آژانس حفاظت از محیط زیست^۲ (EPA) تخمین زده شده است که هزینه پاکسازی ۱۵۶ معدن در ایالات متحده آمریکا می‌تواند بین ۷ تا ۲۴ میلیون دلار باشد. علاوه بر این در اکثر این موارد احیا و پاکسازی سایت‌های معدن ده‌ها سال به طول خواهد انجامید [۵].

۲. استراتژی‌های پیشگیری

به منظور به حداقل رساندن اثرات زیست محیطی زهاب اسیدی معدن میتوان سه سناریو کلی در نظر گرفت:

- ۱- جمع آوری و تصفیه
- ۲- جلوگیری از مهاجرت زهاب اسیدی تولید شده به آب‌های زیرزمینی
- ۳- پیشگیری از فرایند تولید

۱.۲. تصفیه زهاب اسیدی

به طور کلی روش‌های تصفیه به دو روش فعال و غیرفعال تقسیم‌بندی می‌شود. در روش تصفیه فعال از مواد شیمیایی به ویژه مواد قلیایی برای رسوب‌گذاری فلزات و سایر روش‌ها مانند جذب تبادل یونی و فناوری غشا استفاده می‌شود [۶ و ۷]. استراتژی‌های مبتنی بر روش غیرفعال هزینه‌های عملیاتی و نگهداری کمی دارند و نیاز به انرژی آن‌ها بسیار کم است. در حالی که روش‌های فعال همانطور که گفته شد نه تنها نیاز مداوم به مواد شیمیایی دارند بلکه استفاده از انرژی و نیروی انسانی از ضرورت‌های آن‌هاست. در روش‌های تصفیه غیرفعال معمولاً از سنگ آهک همراه و یا بدون مواد آلی برای کنترل شرایط redox و فعالیت‌های بیولوژیکی استفاده می‌شود که باعث پایداری و مقرون به صرفه بودن این روش می‌شود اما محدودیت اصلی این روش عدم تاثیرگذاری آن‌ها در شرایطی است که pH زهاب اسیدی تولید شده پایین تر از ۲ باشد و با سرعت جریانی بیشتر از ۵۰ لیتر بر ثانیه تولید شوند. در مقایسه با این روش استراتژی‌های مبتنی بر روش فعال به دلیل در نظر گرفتن ویژگی‌های مختلف ژئوشیمیایی باطله‌ها انعطاف‌پذیری بیشتری دارند. اما با توجه به اینکه تولید زهاب اسیدی می‌تواند تا صدها سال ادامه داشته باشد، این روش علاوه بر تولید ماده زائد آهن‌دار به دلیل استفاده از مواد شیمیایی برای مدت پرهزینه و ناپایدار است. بنابراین بهترین روش مقابله با مشکل زهاب اسیدی جلوگیری از تولید آن‌هاست [۸].

۲.۲. جلوگیری از مهاجرت زهاب اسیدی به آب‌های زیرزمینی

در این روش برای جلوگیری از مهاجرت زهاب اسیدی از backfill استفاده می‌شود. Backfill به هر نوع ماده زائدی گفته می‌شود که در حفره‌های ایجاد شده در سایت‌های معدن به منظور دفع و یا اهداف مهندسی قرار داده می‌شود. در سایت معدن برای جلوگیری از مهاجرت زهاب اسیدی، این مواد که خاصیت قلیایی برای خنثی کردن اسیدیته را دارند در زیرزمین قرار داده می‌شوند. یاماگوچی و همکاران در سال ۲۰۲۰ با مدلسازی سه بعدی جریان آب زیرزمینی اطراف یک معدن متروکه اثرات پرکردن مجدد معدن با مواد حفاری شده را مورد بررسی قرار دادند. مدل آن‌ها شامل سازندهای مختلف زمین شناسی، شفت‌های عمودی و رانش‌های افقی و سایر فضاهای خالی زیرزمینی بود که در شرایط بارندگی‌های مختلف مدل‌سازی شد. نتایج مدل‌سازی نشان داد که با پرکردن مجدد فضاهای خالی زیرزمین نرخ مهاجرت AMD در بارش‌های شدید تا ۳۰ درصد و ۵ درصد بدون توجه به رخداد بارندگی، کاهش یافته است که نشان دهنده این است که این روش در فصول بارندگی مؤثرتر است. اما در نمونه ای دیگر از کاربرد این روش می‌توان معدن مس کیمهدن^۳ شمال سوئد را نام برد که

² Environmental Protection Agency

³ Kimheden

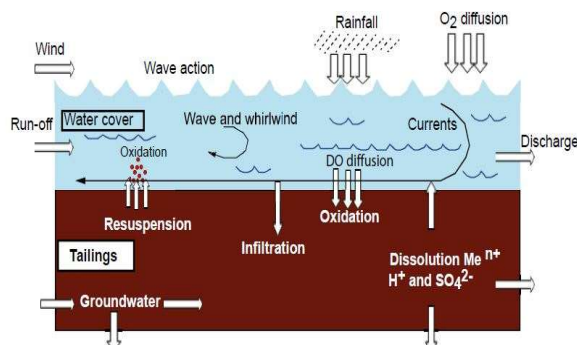
علی‌رغم نتایج موفقیت آمیز اولیه، بررسی تراوش از یکی از چاه‌های معدن حاوی غلظت بالای مس، آلومینیوم، روی و pH حدود ۳ و هم‌چنین غلظت اکسیژن محلول نسبتاً بالایی در آب‌های زیرزمینی بود که نشان دهنده آن است که این روش در شرایط این معدن چندان کارآمد نیست [۹]. اکثر روش‌های کنترل و جلوگیری از تولید AMD با هدف به حداقل رساندن روند اکسیداسیون سولفیدها انجام می‌شوند [۱۰]. این امر می‌تواند با جلوگیری از تماس هوا یا آب با ماده سولفیدی به وسیله پوشش‌های طراحی شده یا جداکردن مواد سولفیدی از پسماندها به دست آید [۱۱]، که در ادامه به معرفی آن‌ها پرداخته خواهد شد.

۳.۲. پیشگیری از فرآیند تولید

همانطور که گفته شد پیشگیری از تولید AMD عمدتاً نیازمند به محافظت از مواد معدنی سولفیدی در مقابل هوا، آب و باکتری که سه عنصر مهم در تشکیل AMD محسوب می‌شوند، هستند. چندین روش مختلف بدین منظور ایجاد شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به پوشش‌های خشک، پوشش‌های آبی و پوشش مانع مویبگی به منظور محدود کردن انتشار اکسیژن اشاره کرد.

۱.۳.۲ پوشش‌های آبی

دفع مواد زائد معدنی در اقیانوس‌ها و دریاچه‌ها در گذشته به عنوان یکی از بهترین روش‌های جلوگیری از تولید زهاب اسیدی معدن به شمار می‌رفت. نتیجه تحقیقات فراسر و همکاران در سال ۱۹۹۴ بر روی چهار دریاچه‌ی آب شیرین که برای دفع باطله‌های معدنی زیرآب استفاده می‌شد، نشان داد که واکنش باطله‌ها در زیر آب ناچیز است و غلظت کمی از فلزات محلول وجود دارد [۱۲]. با این حال اگرچه هنوز این عمل در چندین کشور انجام می‌شود اما اکثر کشورها آن را ممنوع کرده‌اند. امروزه از پوشش‌های آب با عمق کافی در جهت محدود کردن نفوذ اکسیژن استفاده می‌شود چراکه در شرایط عادی میزان حلالیت اکسیژن در آب کم و حدود 8×10^{-3} میلی‌گرم بر لیتر و ضریب نفوذ اکسیژن در آب 1.12×10^{-4} برابر کمتر از هواست (شکل ۱ به صورت شماتیک فرایندهای دخیل در این نوع پوشش را نمایش داده است). با وجودی که غرقاب کردن باطله‌ها می‌تواند مصرف اکسیژن محلول را بیش از ۲۰۰۰ برابر نسبت به باطله‌های در معرض هوا کاهش دهد اما چالش‌هایی را نیز به همراه دارد که در صورت استفاده از این روش بایستی برطرف شوند؛ مانند تحرک فلزات سنگین در آب که نیازمند تصفیه اولیه باطله‌هاست. علاوه بر این تامین ضخامت کافی لایه آب اغلب نیازمند طراحی سد است. متأسفانه نرخ شکست‌های باطله ۱۰۰ برابر بیشتر از سدهای ذخیره آب است (۱.۲ درصد در مقایسه با ۰.۰۱ درصد) [۱۳]. به عنوان مثال خرابی فاجعه بار سد باطله مونت پلی^۴ در بریتیش کلمبیا کانادا در ۴ اگوست ۲۰۱۴ که علاوه بر مرگ ۱۹ نفر منجر به آزادسازی تقریباً ۲۵ میلیون مترمکعب باطله مایع و جامد در رودخانه و دریاچه پلی شد. این حادثه از این جهت منحصر به فرد است که باطله‌های جامد حاوی مقادیر قابل توجهی از آلاینده‌های فلزی (آرسنیک، مس، طلا، منگنز، نیکل، سرب و وانادیوم) است که می‌تواند به مدت ۱۰۰۰ سال در خاک و رسوبات منطقه باقی بماند و به عنوان منبع ثانویه آلودگی عمل کند؛ به خصوص در فصل بهار که با ذوب برف پتانسیل انتقال مجدد این مواد تشدید می‌شود [۱۴].



شکل ۱ مکانیزم محدود کردن اکسیژن توسط پوشش‌های آبی

۴.۲. پوشش های خاکی

از پوشش های خاکی معمولا در جهت محدود کردن نفوذ اکسیژن و یا متان در سدهای باطله و یا محل دفن زباله استفاده می شود. این پوشش ها سه هدف عمده را دنبال می کنند:

- ۱- به حداقل رساندن نفوذ آب
- ۲- به حداقل رساندن انتشار اکسیژن یا متان
- ۳- احیای مجدد زمین و کاشت پوشش گیاهی

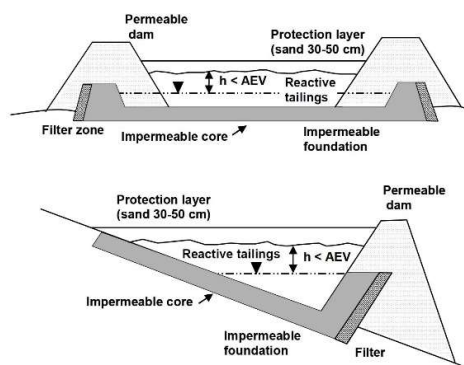
سنس در سال ۱۹۹۴ پوشش های خاکی را بر اساس مکانیزم اثر آن به چند دسته، پوشش های مانع اکسیژن، پوشش های مصرف کننده اکسیژن، پوشش های بازدارنده واکنش طبقه بندی کرد. نوع دیگری نیز از پوشش ها وجود دارد که به منظور ذخیره و آزادسازی رطوبت طراحی شده اند که با توجه به شرایط آب و هوایی و سایت معدن می توان از آن ها استفاده کرد. در جدول ۱ مکانیزم اثر این پوشش ها در پیشگیری زهاب اسیدی معدن آورده شده است [۱۵].

جدول ۱ طبقه بندی انواع پوشش

مکانیزم اثر در پیشگیری از زهاب اسیدی معدن	طبقه بندی پوشش های خشک
نگهداشتن رطوبت و کاهش نفوذ اکسیژن از اتمسفر	پوشش های مانع اکسیژن
مصرف کننده اکسیژن و کاهش غلظت اکسیژن در بین فاز	پوشش های مصرف کننده اکسیژن
جلوگیری از واکنش ها به عنوان مثال با خنثی کردن pH	پوشش های بازدارنده واکنش
حداقل رساندن شار با حداکثر ذخیره سازی رطوبت همراه با آزادسازی به وسیله تبخیر	ذخیره و آزاد سازی

۱.۴.۲. پوشش تک لایه با تراز آب بالا آمده

پوشش های تک لایه از یک لایه مواد به عنوان مانع در برابر نفوذ آب و اکسیژن استفاده می کنند. این پوشش ها را می توان با تکنیک تراز آب بالا آمده به منظور اطمینان از حفظ درجه اشباع ترکیب کرد. در سال های اخیر استفاده از مفهوم تراز آب بالا آمده به عنوان گزینه ای احتمالی برای مدیریت باطله های معدن گسترش یافته است. علت علاقه به این فناوری جدید مزایای فیزیکی و اقتصادی آن است. یک مدل مفهومی از این روش در شکل ۲ نمایش داده شده است. با این روش بالا آمدن مویبندی که تابعی از موقعیت تراز آب و ویژگی های مواد است، باید به اندازه کافی باشد تا از اشباع بودن باطله ها اطمینان حاصل شود [۱۶].



شکل ۲ مدل مفهومی کاور تک لایه با تراز آب بالا آمده به منظور کاهش تولید زهاب اسیدی معدن [۱۷]

به این منظور فاصله تراز آب و سطح باطله‌ها باید از مقدار میزان ورودی هوا^۵ (AEV) فراتر نرود (این فاصله معمولاً بین ۱/۵ تا ۴ متر است). استفاده از این رویکرد نیاز به داشتن اطلاعات کاملی از مشخصات باطله‌ها مانند منحنی نگهداشت آب، هدایت هیدرولیکی (که خود به توزیع اندازه دانه‌ها و تخلخل بستگی دارد) و پتانسیل تولید اسید دارد [۱۸].

۲.۴.۲. پوشش‌های ذخیره و آزادسازی^۶

این پوشش‌ها که در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک به کار می‌روند، در دوره‌های بارندگی زیاد و یا ذوب شدن برف‌ها در بهار در لایه‌های بالایی تا جایی که شرایط جوی قادر به تبخیر آن نباشد، آب را در خود ذخیره کرده و مانع از ورود اکسیژن می‌شوند. نوع پیشرفته‌ی آن از لایه‌های اضافی به منظور محدود کردن نفوذ خالص در طول مدت نسبتاً کوتاه استفاده می‌کند که در آن ممکن است میزان نفوذ از ظرفیت ذخیره‌سازی لایه فراتر رود. وجه تمایز نوع پیشرفته این پوشش‌ها با پوشش‌هایی که به عنوان مانع عمل می‌کنند در این است که در این نوع نفوذپذیری لایه‌ها فقط در طول رویدادهای بارندگی کوتاه مدت بایستی کمتر از متوسط شار سالانه باشد و نیازی نیست تا به عنوان مانعی در مقابل جریان آب در طول سال عمل کند. در واقع هدف اضافه کردن لایه با نفوذپذیری کم ایجاد تاخیر در نفوذ بارندگی به لایه‌های پایینی است. در صورت استفاده از این لایه دوره‌های تر و خشک شدگی، نفوذ ریشه و غیره باید مورد بررسی قرار بگیرد و از یک لایه خاک با ضخامت کافی برای محافظت از آن استفاده شود. البته این لایه نفوذناپذیر می‌تواند منجر به افزایش جریان در سطح شده و خطر فرسایش را افزایش دهد [۱۹].

۲.۴.۲. پوشش‌های جلوگیری از نفوذ آب

همانطور که قبلاً گفته شد، آب یکی از مولفه‌های تولید زهاب اسیدی معدن است. بنابراین با محدود کردن آب می‌توان از تولید اسید توسط باطله‌های معدن جلوگیری نمود. مواد به کار رفته در این پوشش می‌تواند خاک با هدایت هیدرولیکی پایین و یا مواد مصنوعی مانند ژئوممبران‌ها یا ژئوکامپوزیت‌های بنتونیتی باشد. با این وجود در مورد استفاده از این روش نگرانی‌های زیادی وجود دارد. به عنوان مثال در مورد ژئوممبران مواردی که لازم است به آن توجه شود شامل موارد زیر است: (۱) طول عمر آن محدود و معمولاً ده‌ها سال است در حالیکه برای احیای سایت معدن قرن‌ها زمان لازم است. (۲) وجود چروک و نقص‌های اجرایی به طور قابل ملاحظه‌ای از کارایی آن می‌کاهد. (۳) توپوگرافی سایت بر روی اثرات پوشش تاثیرگذار است.

۴.۴.۲. پوشش‌های آلی مصرف کننده اکسیژن

از پوشش‌های آلی می‌توان برای جلوگیری از انتشار اکسیژن درون باطله‌ها استفاده کرد. مواد تشکیل دهنده‌ی این نوع پوشش می‌تواند از لجن‌های فاضلاب، پسماندهای شهری و یا سایر مواد آلی باشد. تجزیه مواد آلی ($C_6H_{12}O_6$) توسط عمل بیولوژیکی شامل دو فرآیند تجزیه هوازی و بی‌هوازی است. تجزیه بی‌هوازی زمانی در طبیعت اتفاق می‌افتد که میکروارگانیسم‌ها به راحتی به اکسیژن دسترسی ندارند. این موجودات برای زنده ماندن و ایجاد پروتوپلاسم سلول به نیتروژن، فسفر و سایر مواد مغذی نیاز دارند. در طول این فرآیند میکروارگانیسم‌ها نیتروژن آلی را به اسیدهای آلی و آمونیاک کاهش می‌دهند. کربن حاصل از ترکیبات آلی که در پروتئین سلولی استفاده نمی‌شود مطابق واکنش معادله (۱) به متان و دی‌اکسیدکربن تبدیل می‌شود:



در فرآیند هوازی، میکروارگانیسم‌ها با استفاده از اکسیژن مواد آلی را مصرف و دی‌اکسیدکربن آزاد می‌کنند. معادله (۲) بیانگر این واکنش است:



در پوشش‌های آلی لایه‌ی بالایی مواد در شرایط هوازی تجزیه می‌شود در حالیکه لایه‌ی تحتانی در شرایط بی‌هوازی به سر می‌برند. بنابراین مواد آلی اکسیژن را به دام انداخته و اکسیداسیون باطله‌های زیرین را به حداقل می‌رسانند [۲۰]. با وجود کارایی این نوع پوشش،

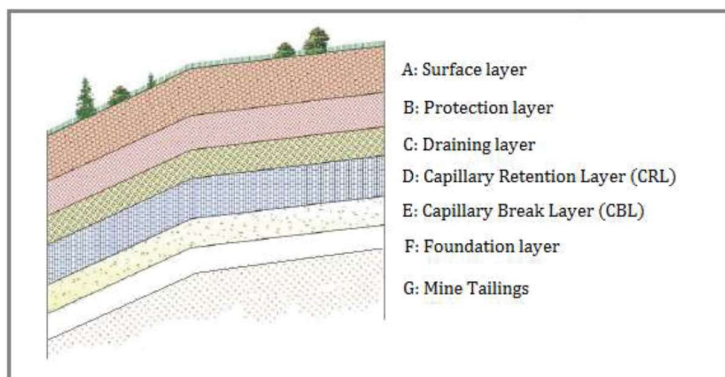
⁵ Air Entry Value

⁶ Store-and-Release

براساس مطالعه‌ی ریبت و همکاران در سال ۱۹۹۵ استفاده از این روش یک مشکل اساسی دارد و آن این است که پوشش آلی ممکن است باعث انحلال مواد معدنی ثانویه‌ی کاهنده مانند Fe(III) شود که این انحلال سبب آزاد شدن عناصر سمی مانند آرسنیک، کادمیم، مس، سرب و سلینیوم که قبلاً جذب و یا تجمع یافته‌اند، می‌شود [۲۱].

۵.۴.۲. پوشش با اثرات مانع مویبگی^۷

پوشش با اثرات مانع مویبگی یک پوشش چند لایه است که با حفظ یک لایه‌ی اشباع، انتشار اکسیژن به باطله‌های زیرین را محدود می‌کند. این پوشش که بر پایه تقابل ویژگی نگهداشت آب بین دو محیط متخلخل ریزدانه و درشت دانه است، معمولاً در آب‌وهوای مرطوب استفاده می‌شود و زمانی به خوبی عمل می‌کند که یک لایه خاک ریزدانه بر روی یک لایه خاک درشت‌دانه قرار بگیرد. هرچه اختلاف خاک ریزدانه و درشت‌دانه در پوشش بیشتر باشد مانع مویبگی موثرتر است این بدین معناست که مانع مویبگی ایده‌آل از دو خاک با اختلاف شدید در اندازه منافذ یا اندازه ذرات تشکیل شده است [۲۲]. استفاده از چنین لایه‌ی پوششی از نظر تئوری می‌تواند ضریب نفوذ اکسیژن و نرخ تولید اسید را تا ۴ مرتبه کاهش دهد. این موضوع می‌تواند تفاوت اساسی در هزینه‌های بالقوه تصفیه‌ی شیرابه‌ی باطله‌ها باشد. لایه‌های تشکیل دهنده این سیستم می‌تواند بین ۳ تا ۵ لایه باشد. در شکل ۳ پوشش با اثرات مانع مویبینه به صورت شماتیک نشان داده شده است. لایه‌های A و B که به صورت اختیاری و به جهت احیای سایت در نظر گرفته می‌شوند، لایه‌های محافظ برای پوشش گیاهی در مقابل اثرات تجزیه شیمیایی و گرمایی هستند. حضور لایه C با کاهش تجمع آب به واسطه‌ی جریان افقی به جای عمودی باعث کاهش گرادیان هیدرولیکی در سطح مشترک لایه C و D می‌شود. علاوه بر این باعث کاهش تبخیر لایه‌ی ریزدانه می‌شود و در هنگام بارندگی ذخیره مناسبی برای جبران رطوبت از دست رفته لایه‌ی ریزدانه فراهم می‌کند. به طور کلی برای این لایه از مواد درشت‌دانه و یا زهکش‌های ژئوتکستایل استفاده می‌شود. لایه C همچنین بالا آمدن مویبگی^۸ که می‌تواند باعث غیراشباع شدن لایه‌ی D شود، را کاهش می‌دهد. D لایه نگهداشت مویبگی است که به عنوان مانعی بین اتمسفر و باطله‌های معدن برای جلوگیری از نفوذ اکسیژن عمل می‌کند. برای این لایه مواد استفاده شده باید دارای AEV بالایی باشند و برای رعایت این شرط حضور ذرات ریزدانه در مواد از اهمیت خاصی برخوردار است. ضخامت این لایه بسته به مواد مورد استفاده می‌تواند بین ۱۰۰-۵۰ سانتی‌متر باشد. لایه E دارای عملکرد شکست مویبگی^۹ است. هدایت هیدرولیکی پایین این لایه در حالت غیر اشباع این امکان را فراهم می‌کند که لایه‌ی D در درجه بالای اشباع باقی بماند. همچنین ارتفاع پایین مویبگی در این لایه، بالا آمدن آلودگی تا لایه‌ی D را محدود می‌کند. [۲۳].



شکل ۳ شماتیک CCBE

⁷ Cover with capillary effect barrier

⁸ capillary rise

⁹ capillary breakage

۳. انتخاب بهترین روش جلوگیری از تولید AMD

به منظور انتخاب بهترین روش برای احیای سایت معدن پس از پایان عملیات معدن کاری از روش تحلیل سلسله مراتبی^{۱۰} (AHP) استفاده شد. تکنیک AHP که در سال ۱۹۸۰ توسط ساعتی ایجاد شد، روشی منعطف است که در دسته‌ی روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره قرار می‌گیرد و با کمک آن می‌توان مسائل دشوار را در سطوح مختلف تحلیل کرد. هدف تحلیل سلسله مراتبی انتخاب بهترین گزینه براساس معیارهای مختلف تصمیم‌گیری از طریق مقایسه زوجی است. این معیارها که می‌تواند کمی و یا کیفی باشد، براساس قضاوت اولیه تصمیم‌گیرندگان خبره، وزندهی و در قالب ماتریس مقایسه‌ها ارائه می‌شود [۲۴]. در این روش هرگونه ناسازگاری و خطا در مقایسه و تعیین اهمیت بین گزینه‌ها و معیارها توسط خبرگان با استفاده از پارامتر نرخ ناسازگاری مشخص می‌شود. نرخ ناسازگاری پارامتری است که نشان می‌دهد تا چه اندازه می‌توان به اولویت‌های حاصل از مقایسه‌های انجام شده اعتماد کرد. تجربه نشان داده است که اگر نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱۰ باشد، میزان سازگاری مقایسه قابل قبول بوده و نیازی به وزندهی مجدد نمی‌باشد. در ادامه ضمن معرفی پارامترهای تصمیم‌گیری به طور مختصر به مراحل این روش پرداخته و در نهایت روش برتر احیای سایت معدن مورد مطالعه انتخاب خواهد شد.

۱.۳. معیارهای تصمیم‌گیری

انتخاب روش برتر احیای سایت معدن مورد مطالعه، براساس شاخص‌های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مطابق شش معیار اصلی زیر تحلیل گردید.

- ۱) **کاهش پدیده AMD:** کاهش زهاب اسیدی معدن که در واقع هدف اصلی از احیای معدن می‌باشد، یکی از مهم‌ترین معیارهای تصمیم‌گیری است. در این مقایسه با توجه به عملکرد مناسب گزینه‌های پیش‌رو این مقدار برای تمامی گزینه‌ها یکسان در نظر گرفته شده است.
- ۲) **طول عمر:** با توجه به این که احیای معدن یک فرآیند طولانی مدت است، روش انتخاب شده بایستی ماندگاری کافی برای صدها سال را داشته باشد.
- ۳) **محصولات جانبی:** در کنار کاهش زهاب اسیدی معدن در نظر گرفتن این نکته که روش انتخابی، محصولات جانبی مانند اسید، مواد زائد و یا رسوبات تولید نکند حائز اهمیت است. لذا در نظر گرفتن این پارامتر امری ضروری است.
- ۴) **پایداری ژئوتکنیکی:** با توجه به لرزه‌خیز بودن منطقه معدن مورد مطالعه، پایداری ژئوتکنیکی یکی از معیارهای مهم تصمیم‌گیری است. علاوه بر این همان‌طور که پیش‌تر نیز گفته شده خرابی سدهای باطله به دلیل مسائل زیست محیطی اهمیت زیادی دارد.
- ۵) **کاربری در آینده:** سایت معدن معمولاً وسعت زیادی را به خود اختصاص داده و طبیعت منطقه را تحت تاثیر قرار می‌دهند. استفاده مجدد از این زمین‌ها به منظور درخت کاری و یا احداث پارک می‌تواند علاوه بر جلوگیری از تولید زهاب اسیدی معدن، زمین‌های منطقه را احیا کند.
- ۶) **هزینه:** همان‌طور که گفته شد، با توجه به وسعت زیاد سایت معدن و حجم زیاد باطله‌های تولید شده، هزینه یک فاکتور اساسی در انتخاب گزینه‌های پیش‌روست.

۲.۳. مقایسه و انتخاب بهترین روش

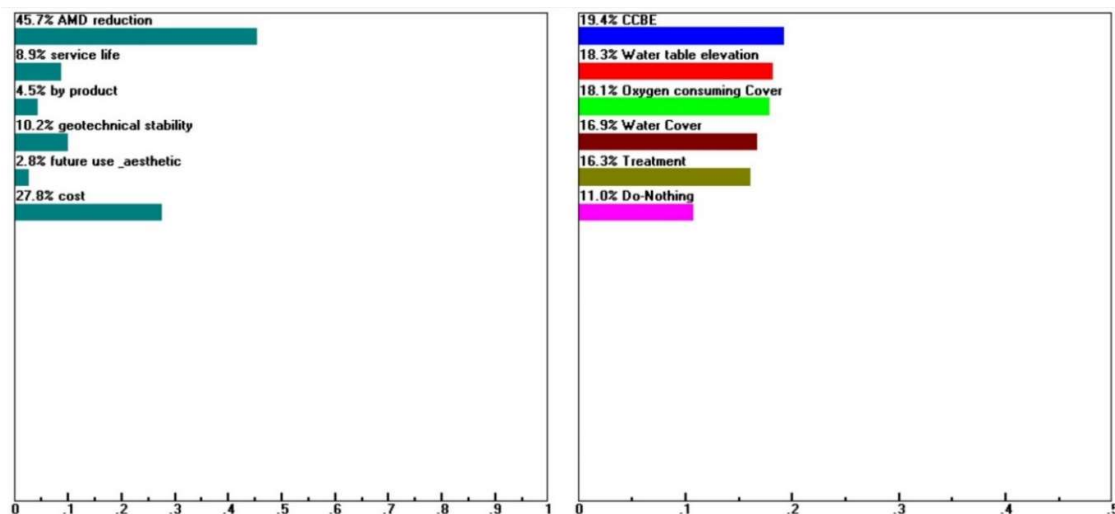
بعد از مشخص کردن معیارها و تعیین گزینه‌های احیای معدن، ضروری است که توسط کارشناسان خبره، معیارها به صورت زوجی نسبت به یکدیگر مقایسه شوند. پس از مقایسه‌های صورت گرفته توسط کارشناسان، میانگین ارزش وزنی محاسبه شده و مبنای مقایسه نهایی قرار گرفته است. جدول شماره ۲ ارزش وزنی معیارهای انتخاب شده را نشان می‌دهد. در میان این معیارها که مجموع آن‌ها باید برابر یک باشد؛ کاهش AMD نسبت به سایرین اولویت بیشتری دارد و بعد از آن به دلیل وسعت سایت معدن هزینه بیشترین امتیاز را به خود اختصاص می‌دهد.

¹⁰ Analytical Hierarchy Process

جدول ۲ وزن دهی معیارهای تصمیم گیری

معیارهای تصمیم گیری	وزن نسبی
کاهش AMD	۰/۴۵۰
طول عمر	۰/۰۸۴
محصولات جانبی	۰/۰۴۲
پایداری ژئوتکنیکی	۰/۱۱۰
کاربری در آینده	۰/۰۲۶
هزینه	۰/۲۸۸

پس از وزن دهی و میانگین گیری نهایی گزینه‌های پیش رو در مقایسه زوجی، نوبت به مقایسه‌ی نهایی گزینه‌ها و انتخاب گزینه برتر می‌باشد. در این مطالعه جهت انتخاب گزینه برتر از نرم‌افزار تخصصی Expert choice استفاده شده است که محاسبات ماتریسی روش AHP با استفاده از آن انجام می‌گیرد. براساس مطالعات انجام شده توسط USEPA، Mend و Vigneault پارامتر کاهش AMD برای همه پوشش‌ها در این مطالعه یکسان در نظر گرفته است [۲۶، ۲۷]. بر مبنای معیار طول عمر سرویس دهی پوشش‌های CCBE و مصرف کننده اکسیژن به دلیل ویژگی‌های ساختاری آن‌ها، تحت دوره‌های مختلف بارندگی به دفعات اشباع شده لذا کارایی آن در طول عمر مفید پوشش حفظ می‌شود. از این رو امتیاز بالاتری نسبت به سایر روش‌ها می‌گیرند. طول عمر روش تصفیه وابسته به عمر کارخانه است، در این پژوهش فرض بر آن است که در طول مدت احیای سد باطله کارخانه فعال می‌ماند. روش پوشش تراز آب بالا آمده در مقایسه با پوشش آبی به دلیل احتمال غیراشباع شدن در دراز مدت امتیاز کمتری گرفته و در رتبه پنجم قرار می‌گیرد. محصولات جانبی پوشش‌ها ناشی از واکنش‌هایی است که مواد تشکیل دهنده پوشش در تعامل با محیط می‌تواند ایجاد کند. از این منظر پوشش CCBE و تراز آب بالا آمده به دلیل استفاده از مواد طبیعی در مقایسه با سایرین بیشترین امتیاز را می‌گیرند. پوشش مصرف کننده اکسیژن به دلیل واکنش‌های بی‌هوازی که در لایه پایینی ریزدانه اتفاق می‌افتد، توانایی تولید اسید دارد، بنابراین در رتبه چهارم این مقایسه قرار می‌گیرد. روش تصفیه نیز به دلیل استفاده از مواد زائد آهن‌دار بیشترین تولید محصولات جانبی را به خود اختصاص می‌دهد. مسئله زیبایی شناسی و کاربری در آینده باتوجه به قرارگیری سایت معدن و اهمیت جنگل‌های ارسباران از بعد درخت کاری در این مسئله مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو در این مرحله پوشش‌های خاکی بیشترین امتیاز را نسبت به پوشش‌های آبی و روش تصفیه به خود اختصاص می‌دهند. در معیار هزینه بالاترین امتیاز به روش‌ها کردن باطله‌ها در طبیعت و کمترین مربوط به روش تصفیه به جهت استفاده از مواد شیمیایی تعلق می‌گیرد. پوشش مصرف کننده اکسیژن نیز به علت استفاده از لجن‌های تصفیه‌خانه در رتبه پنجم این مقایسه قرار گرفته است. پایداری ژئوتکنیکی که از لحاظ اهمیت در رتبه سوم قرار گرفته است برای همه‌ی گزینه‌ها به جز پوشش‌های آبی - به دلیل احتمال خرابی سد، همان‌طور که در بخش ۴-۲-۱ گفته شد - یکسان در نظر گرفته شده است. براساس نتایج این مقایسه که در شکل ۴ نشان داده شده است، پوشش با اثرات مانع مویبگی با امتیاز ۱۹/۴ درصد و اختلاف ۱/۱ درصد نسبت به گزینه دوم (تراز آب بالا آمده)، گزینه برتر ماتریس کلی می‌باشد.



شکل ۴ خروجی نرم افزار براساس معیارهای تصمیم گیری

۳.۳. آنالیز حساسیت

یکی از عوامل تاثیرگذار در رتبه بندی گزینه‌ها در روش AHP، نحوه امتیازدهی است. با توجه به عدم قطعیت در امتیازدهی آنالیز حساسیت گزینه‌ها امری ضروری است. در واقع هدف از این کار سنجش حساسیت گزینه‌ها نسبت به معیارهای موجود است. در آنالیز حساسیت با تغییر وزن یکی از معیارها، نرم‌افزار به‌طور خودکار وزن سایر معیارها را متناسب با آن تغییر می‌دهد و می‌توان اثر تغییرات را در رتبه بندی نهایی گزینه‌ها مشاهده نمود. به این منظور در هر مرحله معیارهای موجود به میزان ده درصد افزایش یافت و گزینه‌ها مجدداً با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج تحلیل نشان داد که در صورت تغییر اهمیت معیار هزینه پوشش‌های آبی گزینه برتر خواهد بود و بعد از آن پوشش تراز آب بالا آمده در رتبه دوم قرار می‌گیرد. با افزایش معیارهای زیبایی شناسی و کاربری در آینده و همچنین طول عمر مفید پوشش، گزینه برتر همچنان پوشش با اثرات جبهه مویینگی باقی مانده و تنها گزینه پیشنهادی دوم از پوشش تراز آب بالا آمده به پوشش مصرف اکسیژن تغییر می‌کند. میزان حساسیت معیارهای تولید محصولات جانبی و پایداری ژئوتکنیکی نیز نسبت به افزایش ده درصدی کم بوده و تغییری در روند گزینه‌های فعلی ایجاد نمی‌کند.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله روش‌های مختلف کنترل زهاب اسیدی معدن بررسی شد. سپس با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی بهترین روش برای بازسازی مورد بررسی قرار گرفت. در این مقایسه روش پوشش ذخیره و آزادسازی به دلیل نیاز به شرایط خاص آب و هوایی، در ابتدا حذف گردید. به منظور انتخاب گزینه بهتر احیای معدن، معیارهای کاهش زهاب اسیدی معدن، طول عمر پوشش، محصولات جانبی، پایداری ژئوتکنیکی، کاربری در آینده و هزینه تعریف و با کمک نرم افزار Expert choice بهترین گزینه انتخاب شد و در نهایت با استفاده از آنالیز حساسیت وابستگی گزینه‌ها به معیارهای تعریف شده بررسی گردید. بر اساس این مقایسه و با در نظر گرفتن معیارهای ارائه شده، استفاده از پوشش با اثرات مانع مویینگی و تراز آب بالا آمده به ترتیب گزینه‌های برتر می‌باشند. در حالیکه اگر تنها معیار هزینه در نظر گرفته شود، پوشش‌های آبی گزینه برتر خواهد بود. افزایش ده درصدی سایر معیارها نشان داد که پوشش با اثرات جبهه مویینگی همچنان به عنوان گزینه برتر خواهد بود و این تغییر ممکن است تنها در اولویت دوم اثرگذار باشد.

منابع

- [1] م. کردی، ع. مقصودی، "بررسی روند تغییرات آلودگی فلزات سنگین و پارامترهای کیفی آب ناشی از سد باطله معدن مس سونگون در حوضه آبریز زرنکاب-اهر". اولین کنفرانس ملی، جغرافیا، گردشگری منابع طبیعی و توسعه پایدار، تهران، ۱۳۹۳.
- [2] R. Olobatoke and M. Mathuthu, "Heavy metal concentration in soil in the tailing dam vicinity of an old gold mine in Johannesburg, South Africa," *Canadian journal of soil science*, vol. 96, no. 3, pp. 299-304, 2016.
- [3] C. Garcia, D. Moreno, A. Ballester, M. Blazquez, and F. Gonzalez, "Bioremediation of an industrial acid mine water by metal-tolerant sulphate-reducing bacteria," *Minerals Engineering*, vol. 14, no. 9, pp. 997-1008, 2001.
- [4] M. Sprynskyy, B. Buszewski, A. P. Terzyk, and J. Namieśnik, "Study of the selection mechanism of heavy metal (Pb²⁺, Cu²⁺, Ni²⁺, and Cd²⁺) adsorption on clinoptilolite," *Journal of colloid and interface science*, vol. 304, no. 1, pp. 21-28, 2006.
- [5] Tuffnell S. Acid drainage: The global environmental crisis you've never heard of. The Conversation, Environment and Energy: The Conversation Media Group Melbourne, Australia; 2017.
- [6] RW G, RS S, VS S. Removal of copper ions from acid mine drainage wastewater using ion exchange technique: factorial design analysis. *Journal of Water Resource and Protection*. 2010;2010.
- [7] Kefeni KK, Msagati TA, Mamba BB. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review. *Journal of Cleaner Production*. 2017;151:475-93.
- [8] Trumm D. Selection of active and passive treatment systems for AMD—flow charts for New Zealand conditions. *New Zealand journal of geology and geophysics*. 2010;53(2-3):195-210.
- [9] Demers, I., Mbonimpa, M., Benzaazoua, M., Bouda, M., Awoh, S., Lortie, S., Gagnon, M., 2016. Use of acid mine drainage treatment sludge by combination with a natural soil as an oxygen barrier cover for mine waste reclamation : Laboratory column tests and intermediate scale field tests. *Miner*.
- [10] M. Vila, J. Carvalho, A. Futuro da Silva, and A. Fiúza, Preventing acid mine drainage from mine tailings. 2008, pp. 729-738.
- [11] N. Kuyucak, "Acid mine drainage prevention and control options," *CIM Bulletin*, vol. 95, pp. 96-102, 04/01 2002.
- [12] Fraser, W., Robertson, J., 1994. Subaqueous disposal of reactive mine waste: an overview and update of case studies-MEND/Canada. Proceedings, International Land Reclamation and Mine Drainage Conference, USDI, Bureau of Mines SP 06A-94
- [13] Azam, S., & Li, Q. (2010). Tailings dam failures: A review of the last one hundred years. *Geotechnical News*, 28(4), 50–53.
- [14] Byrne P, Hudson-Edwards K, Macklin M, Brewer P, Bird G, Williams R. The long-term environmental impacts of the Mount Polley mine tailings spill, British Columbia, Canada. April 01, 2015. p. 6241.
- [15] Vanapalli S, Barbour SL, O'Kane M. Review of Soil Cover Technologies for Acid Mine Drainage: A Peer Review of the Waite Amulet and Heath Steele Soil Covers: University of Saskatchewan, Unsaturated Soils Group; 1997..
- [16] Ouangrawa M, Aubertin M, Molson JW, Bussière B, Zagury GJ. Preventing acid mine drainage with an elevated water table: Long-term column experiments and parameter analysis. *Water, Air, & Soil Pollution*. 2010;213(1):437-58.
- [17] Aubertin M, Bussière B, Monzon M, Joanes A, Gagnon D, Barbera J, et al. Étude sur les barrières sèches construites à partir de résidus miniers Phase II—Essais en place.[A study of dry covers constructed from mine tailings, Phase II: In situ test.]. *Mine Environment Neutral Drainage Report (NEDEM/MEND)*. 1999;2.
- [18] Ouangrawa M, Molson J, Aubertin M, Zagury G, Bussière B, editors. The effect of water table elevation on acid mine drainage from reactive tailings: a laboratory and numerical modeling study. Proceedings of the 7th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), St Louis, Mo; 2006.
- [19] O'Kane M, Ayres B. Cover systems that utilise the moisture store-and-release concept—do they work and how can we improve their design and performance. Proceedings of Mine Closure. 2012:401-17.
- [20] Peppas A, Komnitsas K, Halikia I. Use of organic covers for acid mine drainage control. *Minerals Engineering*. 2000;13(5):563-74.
- [21] Park I, Tabelin CB, Jeon S, Li X, Seno K, Ito M, et al. A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling. *Chemosphere*. 2019;219:588-606.
- [22] Lu N, Likos WJ. *Unsaturated soil mechanics*: Wiley; 2004.
- [23] N. E. El Kadri and A. Chillali, "Design of covers with capillary barrier effect for protection of mine tailings," in *American Institute of Physics Conference Series*, 2019, vol. 2074, no. 2
- [24] Betrie GD, Sadiq R, Morin KA, Tesfamariam S. Selection of remedial alternatives for mine sites: A multicriteria decision analysis approach. *Journal of environmental management*. 2013;119:36-46.
- [25] MEND (Canadian Mine Environment Neutral Drainage), 1999a. Construction and Instrumentation of a Multi-layer Cover. Report 2.22.4a.
- [26] Vigneault, B., Kwong, Y.T.J., Warren, L., 2007. Assessing the Long Term Performance of a Shallow Water Cover Limit Oxidation of Reactive Tailings at Louvicourt Mine. MEND Report 2.12.2.



[27] USEPA (US Environmental Protection Agency), 2000. Abandoned Mine Site Characterization and Cleanup Handbook. EPA 910-B-00-001.