فصلنامه علوم محیطی، دوره نوزدهم، شماره ۳، پائیز ۱۴۰۰

۱۴۳-۱۶۰

بررسی کمی و کیفی زهاب اسیدی معدن های (AMD) در دامپ باطله معدن مس سونگون با تأکید بر تصفیه‌پذیری آن

محمد رضا افشون [۱*] و ناصر مهردادی [۲]

[۱] گروه مهندسی محیط زیست، پردیس بین المللی کیش، دانشگاه تهران، تهران، ایران

[۲] گروه مهندسی محیط زیست، دانشکده مهندسی محیط زیست، پردیس دانشکدههای فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

تاریخ دریافت:۱۳۹۹/۰۸/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۷

افشون، م.ر. و ن. مهردادی. ۱۴۰۰. بررسی کمی و کیفی زهاب اسیدی معدن‌های (AMD) در دامپ باطله معدن مس سونگون با تأکید بر تصفیه‌پذیری آن. فصلنامه علوم محیطی ۱۹ (۳): ۱۴۳-۱۶۰

سابقه و هدف: اکسیداسیون زون‌های کانی سازی شده سولفیددار طی فرآیند هوازدگی در اثر واکنش‌های بیولوژیکی و شیمیایی تشدید شده و زهاب اسیدی (AMD)[۱] حاصله سبب آزادسازی و تحرک عناصر فلزی سمی و سنگین از سنگ مادر و تمرکز آن‌ها در محیط خاک یا آب می‌شود. زهاب اسیدی تولید شده در دامپ باطله معدنی مس سونگون وارد جریان‌های سطحی موجود در منطقه می‌گردد که می‌تواند آسیب‌های محیط زیستی به‌دنبال داشته باشد. هدف این مقاله، بررسی ویژگی‌های کمی و کیفی زهاب اسیدی تولید شده در معدن مس سونگون و بررسی انواع سیستم‌های تصفیه و پیشنهاد سیستم بهینه می‌باشد.

مواد و روش‌ها: نمونه برداری از زهاب اسیدی از پاشنه باطله‌های معدن مس سونگون دره پخیر در ۷ نوبت جمع آوری و برای آنالیز به آزمایشگاه شرکت عمران زیست آزما منتقل شد. در زمان نمونه‌برداری برای پارامترهای اسیدیته، سولفات و (TDS)[۲]، از بطری جنس پلی پروپیلن به ظرفیت ۲۰۰ سی سی استفاده شد و برای نمونه برداری از فلزهای سنگین (مس، آهن و منگنز) بطری از جنس (HDPE)[۳] به ظرفیت ۲۵۰ سی سی و سپس به‌منظور پایدار سازی از اسید نیتریک غلیظ استفاده گردید. دبی جریان با استفاده از مولینه و به روش سنجش جریان (جریان‌سنج و سطح مقطع جریان) انجام شده است. پارامترهای دما و pH با استفاده از دستگاه مولتی متر مارک LOVIGAE مدل LOVIBOND150 با دقت ۱۴-۰ در محل اندازه‌گیری شده است. میزان اسیدیته با روش تیتراسیون، پارامتر TDS با دستگاه مولتی متر مارک LOVIGAE مدل LOVIBOND150 با دقت ۱۴ - ۰، پارامتر سولفات به روش اسپکتوفتومتری با دستگاه HACH مدل DR2800 و با دقت ۷۰-۲ مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. فلزهای سنگین (مس، آهن و منگنز) به‌وسیله دستگاه جذب اتمی مارک VARIAN مدل ۴۰۰ به روش شعله اندازه‌گیری شد که میزان دقت برای پارامتر مس، آهن و منگنز به ترتیب ۵-۰/۰۰۵، ۱۰-۰/۰۲ و ۲-۰/۰۱ می‌باشد.

نتایج و بحث: نتایج به‌دست آمده از نمونه برداری‌ها نشان دهنده درجه آلودگی بالایی از پارامترهای pH، سولفات، مس و منگنز در بیشتر نمونه‌ها می‌باشد. مقادیر بالای این عناصر می‌تواند سبب بالا رفتن خطر آلودگی جدی در جریان‌های سطحی باشد که زهاب اسیدی به آن

* Corresponding Author: *Email Address*. afshoon@alumni.ut.ac.ir
http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.36082

تخلیه می‌گردد. بنابراین کنترل و تصفیه زهاب اسیدی معدن مس سونگون قبل از تخلیه به محیط ضروری است.

نتیجه‌گیری: به‌منظور تصفیه زهاب اسیدی دو سیستم تصفیه فعال و غیر فعال وجود دارد. انواع مختلفی از سیستم‌های تصفیه فعال و غیرفعال به تنهایی یا با ترکیب با یکدیگر راهکارهای مناسبی برای حذف فلزهای سنگین از زهاب اسیدی معدن‌ها می‌باشد. انتخاب این سیستم بستگی به ترکیب شیمیایی زهاب اسیدی، نوع ماده معدنی و شرایط توپوگرافی و آب و هوا، pH، اسیدیته، بار اسیدی، دبی و فعال بودن معدن دارد. با توجه به فعال بودن معدن، اسیدیته ۱۶۰۰ میلی گرم در لیتر، بارگذاری اسید ۴۴۲۳/۶۸ کیلوگرم بر روز، pH =3.94 و دبی ۳۲ لیتر بر ثانیه سیستم تصفیه فعال به روش DAOS پیشنهاد شده که روش پیشنهادی شامل مرحله‌های خنثی‌سازی با مواد شیمیایی، اکسیداسیون با روش‌های مختلف و در نهایت رسوب‌دهی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: معدن مس سونگون، زهاب اسیدی، تصفیه فعال، تصفیه غیرفعال.

مقدمه

فعالیت‌های معدنی مجموعه‌ای پیچیده از فرایندهایی است که به‌صورت مداوم و پشت می‌باشند که عبارتند از معدنکاری[۴]، فرآوری مواد معدنی[۵] و استخراج متالورژی[۶] که هر یک به نوبه خود سبب تولید باطله می‌گردد (Lottermoser, 2010).

فعالیت‌های معدنی مانند اکتشاف، استخراج و فرآوری مواد معدنی، حداقل روی یکی از اجزای محیطی تأثیرگذار است و نقش مهمی در مشکل‌های محیط زیستی از قبیل کاهش سطح جنگل‌ها، فرسایش خاک و آلودگی آب، خاک و هوا دارد (Barakan and Aghazadeh, 2018). از میان فرایندهای بالا، معدنکاری از نظر محیط زیست اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا در این فرایند باطله‌های فراوانی تولید می‌شود (Marcus, 1997). این باطله‌ها شامل خاک روئی[۷] و سنگ‌های باطله[۸] است (Marcus, 1997). بیشترین میزان پسماندهای جامد تولیدی در فعالیت‌های معدنی باطله‌ها می‌باشند که میزان آن سالانه کمابیش ۲۰۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰ میلیون تن است. پیامدهای باطله‌های معدن بر محیط زیست بیش از ۲۰۰۰ سال است که شناخته شده ولی امروزه مدیریت این پیامدها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (Lottermoser, 2010). در ایالات متحده آمریکا سالانه ۲۰۰۰ میلیون تن باطله‌های معدنی جامد تولید می‌شود که بیش از ۱۰ برابر زباله‌های شهری است (Boger, 2009). در کشور چین، باطله‌های معدن‌ها از ۸۸۴۰ معدن دولتی و ۲۶۰۰۰۰ معدن‌های فلزی خصوصی تولید می‌شوند که هر ساله ۲۰۰۰ هکتار از زمین‌ها را برای دامپ شدن اشـغال می‌کنند (Liao *et al.*, 2007). کمابیش در تمامی عملیات معدنکاری باطله‌های تولید شده که بیشتر از حجم بالایی برخوردارند در نزدیکی محل معدن‌کاری و در قالب توده‌های بزرگ انباشته می‌شوند (Marcus, 1997). زهاب اسیدی معدن منبع مهم آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی در سراسر دنیا شناخته شده است. زهاب اسیدی معدن در اثر اکسیداسیون سولفیدهای فلزی (بویژه پیریت) در حضور اکسیژن هوا و رطوبت در دامپ‌های سنگ باطله تولید می‌شود (Masoumi *et al.*, 2014). این زهاب با توجه به دارا بودن خاصیت اسیدی، جانوران و گیاهان آبزی محیط اطراف را در معرض خطر قرار می‌دهد و آلودگی محیط زیست را فراهم می‌آورد (Omidpur *et al.*, 2008). در بین کانی‌های سولفیدی، پیریت[۹]، متداول‌ترین کانی‌ها محسوب می‌شود که اکسیداسیون آن منجر به تولید زهاب‌های اسیدی معدن‌ها (AMD) می‌گردد که امروزه بزرگترین و بیشترین مشکل محیط زیستی معدن‌ها در دنیا است (Liu *et al.*, 2008).

اکسیداسیون پیریت در قالب مکانیسم‌های متفاوتی انجام می‌گیرد (Evangelou and Zhang, 1995) که عبارتند از:

۱- اکسیداسیون به‌وسیله اکسیژن (اکسیداسیون غیرزنده و مستقیم)

۲-اکسیداسیون به‌وسیله اکسیژن در حضور میکروارگانیسم‌ها

(اکسیداسیون بیوتیک مستقیم)

واکنش استوکیومتری این مکانیزم‌ها عبارتند از

$$FeS_2 + \frac{7}{2} O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2SO_4^{2-} + 2H^+ + energy \quad (۱)$$

۳- اکسیداسیون به‌وسیله اکسیژن و آهن (اکسیداسیون غیرزنده و غیرمستقیم)

۴- اکسیداسیون به‌وسیله اکسیژن و آهن در حضور میکروارگانیسم‌ها (اکسیداسیون بیوتیک و غیرمستقیم)

مکانیسم‌های ۳ و ۴ در سه مرحله انجام می‌گیرد که واکنش‌های استوکیومتری آن به قرار زیر است:

مرحله اول

$$Fes_2 + \frac{7}{2} O_2 + H_2O \rightarrow Fe^{2+} + 2\,SO_4^{2-} + 2\,H^+ + energy \quad (۲)$$

مرحله دوم

$$Fe^{2+} + \frac{1}{4} O_2 + H^+ \rightarrow Fe^{3+} + \frac{1}{2} H_2O + energy \quad (۳)$$

مرحله سوم

$$FeS_2 + 14Fe^{3+} + 8\,H_2O \rightarrow 15Fe^{2+} + 2\,SO_4^{2-} + 16H^+ + energy \quad (۴)$$

اکسیداسیون پیریت و سایر سولفیدها مهمترین عامل ایجاد یون‌های هیدروژن در آب‌های معدنی محسوب می‌شوند اما پایین بودن pH تنها یکی از ویژگی‌های زهاب‌های اسیدی است. آزادسازی فلزها و شبه فلزها و سایر عناصر در باطله‌های معدن‌ها توسط اسید تولید شده، ترکیب اصلی زهاب اسیدی معدن‌ها را تشکیل می‌دهد (Geldenhuis and Bell, 1998).

در معادن، کنترل آب‌های آلوده و زهاب‌های اسیدی (AMD) یکی از اساسی‌ترین استراتژی‌های مدیریت آب[۱۰] می‌باشد که مهمترین آن‌ها استفاده از روش‌های تصفیه و رساندن به حد مجاز برای رهاسازی به محیط است (Dold *et al.*, 2009).

هزینه‌های مربوط به تصفیه (AMD) سالانه در جهان حدود ۱۰ میلیارد دلار برآورد می‌شود، در ایالات متحده آمریکا صنایع مرتبط با معدن‌کاری روزی یک میلیون دلار برای تصفیه (AMD) هزینه می‌کنند (Brown *et al.*, 2002).

در یک طبقه بندی کلی روش‌های تصفیه (AMD) به دو روش فعال[۱۱] و غیرفعال[۱۲] انجام می‌شود که در روش فعال با استفاده مواد شیمیائی و توسط دستگاه‌های مکانیکی و در روش غیرفعال با استفاده از جریان طبیعی و فرایندهای شیمیائی، فیزیکی و بیولوژیکی برای تصفیه (AMD) اقدام می‌شود (Johnson and Hallberg, 2005). هدف این مقاله، بررسی زهاب اسیدی تولید شده در دامپ باطله معدنی مس سونگون بوده تا مشخص گردد که نیاز به سیستم تصفیه دارد یا خیر و در صورت نیاز به سیستم تصفیه، سیستم بهینه پیشنهاد گردد.

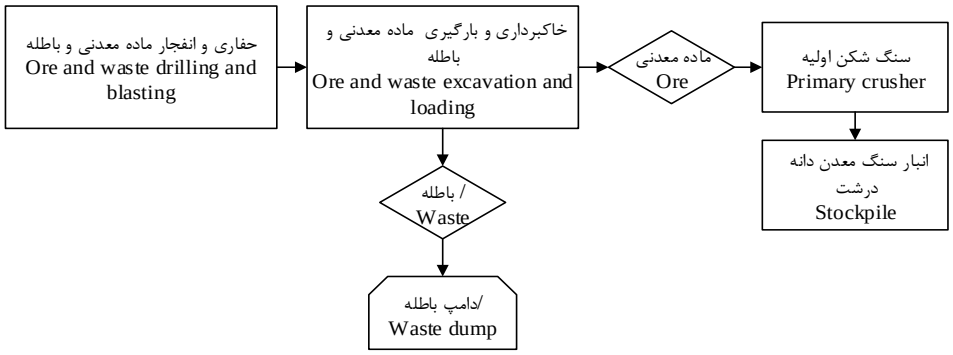
به‌منظور بررسی کیفی زهاب اسیدی تولید شده در معدن مس سونگون از محل خروج زهاب اسیدی از پاشنه دامپ باطله نمونه‌برداری از پارامترهای فیزیکوشیمیایی و فلزهای سنگین انجام شده است.

مواد و روش‌ها

محدوده بررسی

معدن مس سونگون در شمال غرب ایران و در ۱۳۰ کیلومتری شمال شهر تبریز و ۳۰ کیلومتری شمال شهر ورزقان قرار دارد. محدوده معدن مس سونگون مبین رودخانه‌های سونگون و پخیرچای واقع شده و هر دو جزء سرشاخه‌های رودخانه ایلگینه چای می‌باشند. در معدن سونگون رودخانه پخیر چای در زیر دامپ باطله قرار دارد. در این معدن سالانه ۷ میلیون تن سنگ معدن با عیار ۰/۶ درصد تولید می‌شود که فرایند تولید در این معدن بنابر دیاگرام زیر است.

میزان تولید باطله در این معدن ۱۱/۲ میلیون تن در سال است و مساحتی بالغ بر ۳ کیلومتر مربع در دره پخیر اشتغال نموده است که با توجه به ماهیت سولفیدی بودن باطله‌ها (وجود پیریت و کالکوپریت به میزان ۱ تا ۱۰ درصد) و همچنین وجود بارندگی‌های زیاد در منطقه، تولید زهاب حاوی فلزات سنگین و pH اسیدی قطعی به نظر می رسد.



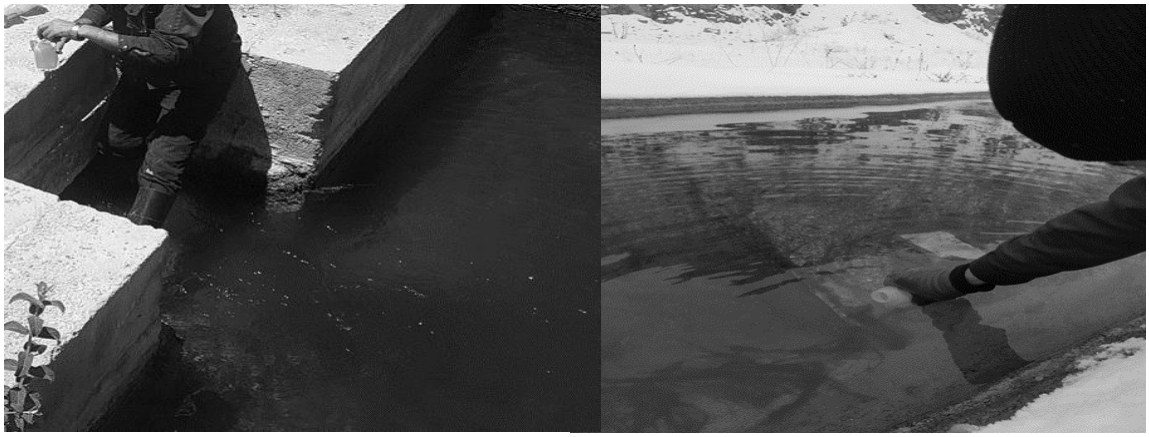
شکل ۱- دیاگرام تولید در معدن مس سونگون

Fig. 1- Production diagram in Sungun mine

روش

در این پژوهش، نمونه‌برداری از زهاب اسیدی از پاشنه باطله‌های دره پخیر در ۷ نوبت (آبان و دی ۱۳۹۸، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد و شهریور ۱۳۹۹) انجام و برای آنالیز به آزمایشگاه شرکت عمران زیست آزما منتقل شد. در زمان نمونه برداری برای پارامترهای اسیدیته، سولفات و TDS، از بطری جنس پلی پروپیلن به ظرفیت ۲۰۰ سی سی استفاده شد و برای نمونه‌برداری از فلزهای سنگین (مس، آهن و منگنز)، بطری از جنس HDPE به ظرفیت ۲۵۰ سی سی و سپس به‌منظور پایدار سازی از اسید نیتریک غلیظ استفاده گردید.

پارامترهای دما و pH با استفاده از دستگاه مولتی متر مارک LOVIGAE مدل LOVIBOND150 با دقت ۱۴-۰ در محل اندازه گیری شده است. میزان اسیدیته با روش تیتراسیون، پارامتر TDS با دستگاه مولتی متر مارک LOVIGAE مدل LOVIBOND150 با دقت ۱۴-۰، پارامتر سولفات به روش اسپکتوفتومتری با دستگاه HACH مدل DR2800 و با دقت ۷۰-۲ مورد اندازه گیری قرار گرفت. فلزهای سنگین (مس، آهن و منگنز) به‌وسیله دستگاه جذب اتمی مارک VARIAN مدل ۴۰۰ به روش شعله اندازه گیری شد که میزان دقت برای پارامتر مس، آهن و منگنز به‌ترتیب ۵-۰/۰۰۵، ۱۰-۰/۰۲ و ۲-۰/۰۱ می‌باشد. در شکل ۲ محل نمونه‌برداری‌ها در مسیر جریان زهاب اسیدی نشان داده شده است.



شکل ۲- ایستگاه نمونه‌برداری از (AMD)

Fig. 2- AMD sampling station

در جدول زیر خلاصه پارامترهای فیزیکی - شیمیایی و فلزهای سنگین زهاب اسیدی معدن مس سونگون نشان داده شده است.

جدول ۱- نتایج فیزیکی - شیمیایی و فلزهای سنگین زهاب اسیدی معدن مس سونگون
Table 1. Physico-chemical parameters and heavy metals of acidic drainage of Sungun copper mine

دوره (Period)	دما (Temp.) (°C)	pH -	TDS (mg/l)	اسیدیته (Acidity) (mg/l)	سولفات (SO_4^{-2}) (mg/l)	مس (Cu) (mg/l)	آهن (Fe) (mg/l)	منگنز (Mn) (mg/l)
آبان ۹۸ (November 2019)	-1	3.95	3750	1600	2424.2	344.3	0.091	39.6
دی ۹۸ (January 2019)	0	3.8	4970	1190	4242.4	169.3	<0.02	41.7
اردیبهشت ۹۹ (May 2020)	4	4.01	3010	963	1444.5	153.6	0.231	30.2
خرداد ۹۹ (June 2020)	6	3.98	3050	1616	1400	288.3	0.411	56.2
تیر ۹۹ (July 2020)	4	4.09	4210	1642	3272	317.06	0.256	54.2
مرداد ۹۹ (August 2020)	7	3.85	4200	1658	3000	320.6	0.078	60.8
شهریور ۹۹ (September 2020)	-1	3.95	3750	1600	2424.2	344.3	0.091	39.6
کمینه (Min)	-1	3.8	3010	963	1400	153.6	<0.02	28.7
بیشینه (Max)	7	4.09	4970	1658	4242.4	344.3	0.411	60.8
متوسط (Ave)	2.71	3.94	3448.57	1467	26010.4	276.78	0.193	46.04

به‌منظور بررسی کمی زهاب اسیدی تولید شده در معدن مس سونگون، دبی جریان با استفاده از مولینه و به روش سنجش جریان (جریان‌سنج و سطح مقطع جریان) است. در جدول زیر نتایج مربوط به دبی جریان مشخص شده است.

جدول۲- نتایج دبی جریان زهاب اسیدی معدن مس سونگون
Table 2. Results of acid flow of Sungun copper mine

دوره (Period)	سطح مقطع (A) m2	سرعت متوسط (V) m/s	دبی کل (Q) m3/hr
خرداد ۹۹ (June 2020)	0.108	0.314	122.4
تیر ۹۹ (July 2020)	0.2	0.1462	97.2
مرداد ۹۹ (August 2020)	0.2	0.1762	115.2
شهریور ۹۹ (September 2020)	0.3	0.1311	126
کمینه (Min)	0.108	0.1311	97.2
بیشینه (Max)	0.3	0.1762	126
متوسط (Ave)	0.202	0.191	115.2

نتایج و بحث

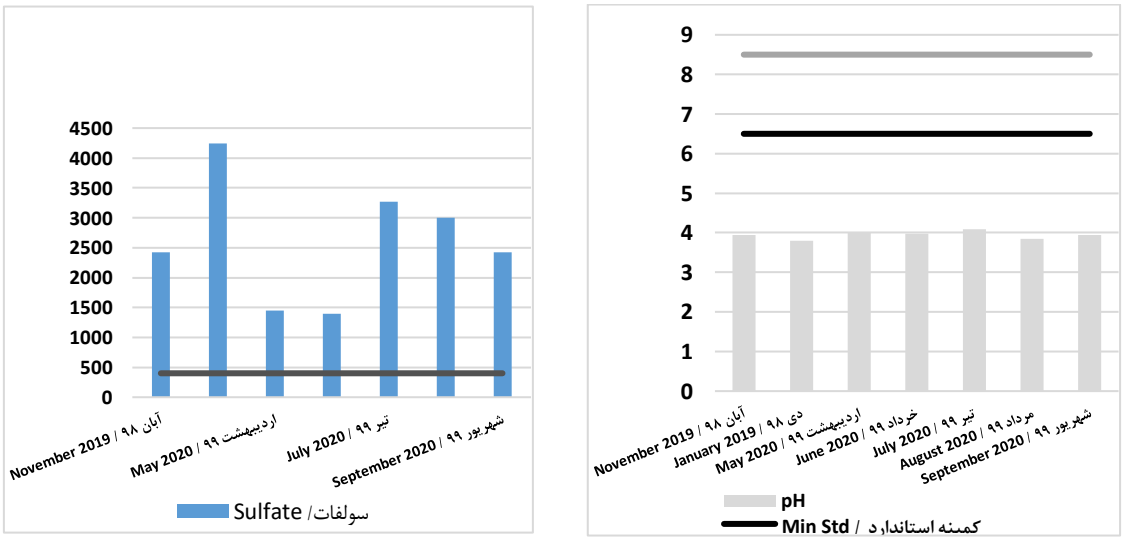
نتایج

زهاب اسیدی تولید شده در اثر فعالیت معدن مس سونگون پس از طی مسافت حدود ۵۰۰ متری به رودخانه سونگون می‌ریزد. بنابراین زهاب اسیدی تخلیه شده به رودخانه سونگون باید استانداردهای تخلیه به آب‌های سطحی را رعایت نماید. از این رو در این بخش نتایج حاصل از نمونه برداری‌های انجام شده با حدود مجاز سازمان حفاظت محیط زیست مورد مقایسه قرار گرفته است.

جدول ۳- مقایسه نتایج فیزیکی - شیمیایی و فلزهای سنگین با حدود مجاز تخلیه فاضلاب به آب‌های سطحی سازمان حفاظت محیط زیست

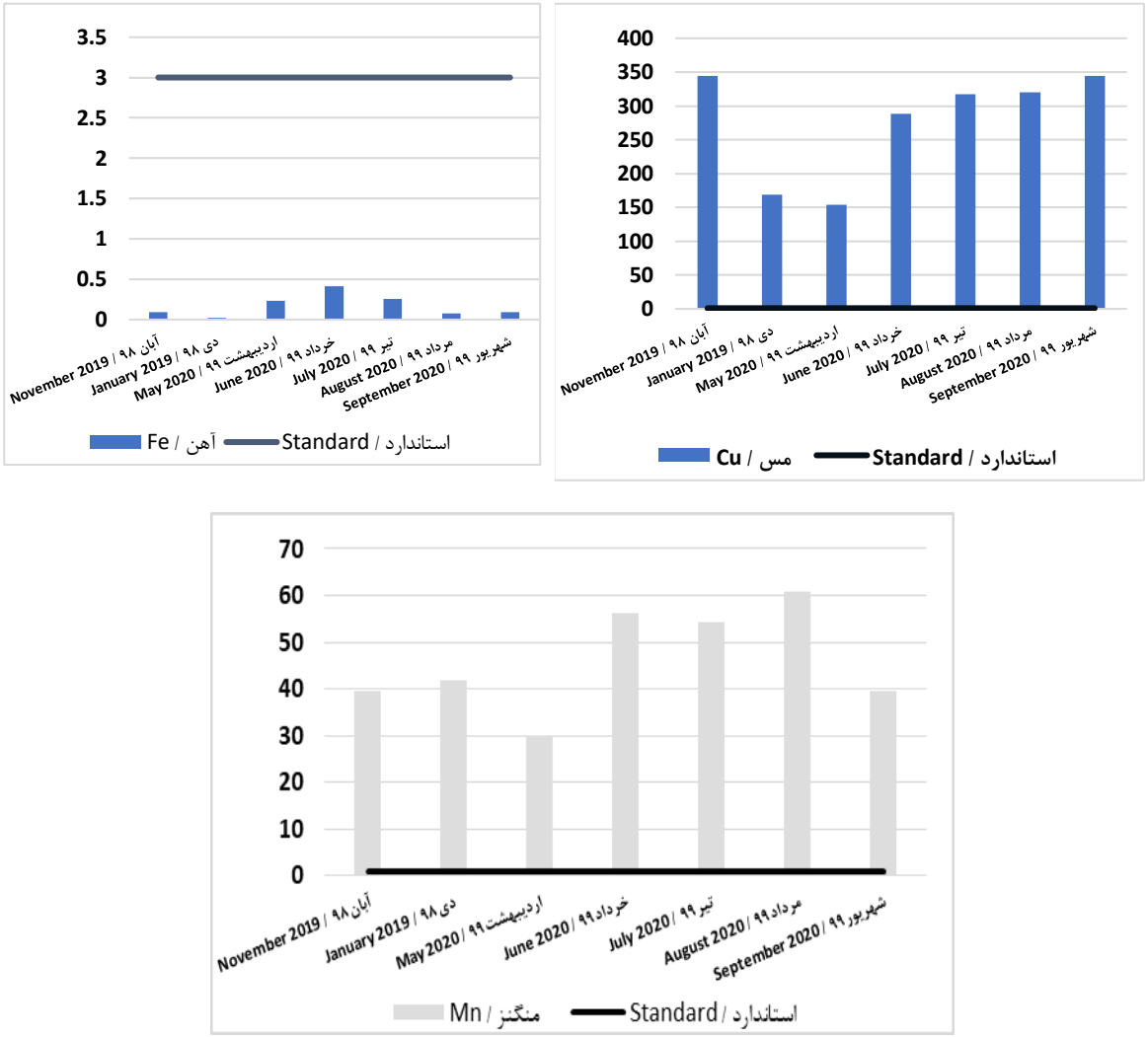
Table 3. Comparison of physico-chemical parameters and heavy metals with the permissible limits of wastewater discharge to surface waters of the Environmental Protection Organization

دوره (Period)	دما (°C)	pH	TDS (mg/l)	اسیدیته (Acidity) (mg/l)	سولفات (SO_4^{-2}) (mg/l)	مس (Cu) (mg/l)	آهن (Fe) (mg/l)	منگنز (Mn) (mg/l)
حدود استاندارد تخلیه فاضلاب به آب‌های سطحی	-	6.5-8.5	-	-	400	1	3	1
آبان ۹۸ (November 2019)	-1	3.95	3750	1600	2424.2	344.3	0.091	39.6
دی ۹۸ (January 2019)	0	3.8	4970	1190	4242.4	169.3	<0.02	41.7
اردیبهشت ۹۹ (May 2020)	4	4.01	3010	963	1444.5	153.6	0.231	30.2
خرداد ۹۹ (June 2020)	6	3.98	3050	1616	1400	288.3	0.411	56.2
تیر ۹۹ (July 2020)	4	4.09	4210	1642	3272	317.06	0.256	54.2
مرداد ۹۹ (August 2020)	7	3.85	4200	1658	3000	320.3	0.078	60.8
شهریور ۹۹ (September 2020)	-1	3.95	3750	1600	2424.2	344.3	0.091	39.6



شکل ۳- مقایسه نتایج فیزیکی - شیمیایی با حدود مجاز تخلیه فاضلاب به آب‌های سطحی سازمان حفاظت محیط زیست

Fig. 3- Comparison of physico-chemical results with the permissible limits of wastewater discharge to surface waters (Environmental Protection Organization)



شکل ۴- مقایسه نتایج فلزهای سنگین با حدود مجاز تخلیه فاضلاب به آب‌های سطحی سازمان حفاظت محیط زیست

Fig. 4- Comparison of heavy metals results with the permissible limits of wastewater discharge to surface waters (Environmental Protection Organization)

همانطور که از جدول‌ها و نمودارهای بالا مشخص می‌باشد، میزان پارامترهای pH، سولفات، مس و منگنز بالاتر از حدود استاندارد مشخص شده از سوی سازمان حفاظت محیط زیست می‌باشد. بنابراین قبل از رهاسازی به محیط باید پارامترها به پائین‌تر از حدود مجاز رسانیده شده باشند که این نتایج نیاز به سیستم تصفیه زهاب اسیدی مس سونگون را تأیید می‌نماید.

بحث

پساب اسیدی معدن (AMD) بدون شک ناهنجارترین مشکل محیط زیستی است که در معدن‌های سولفیدی فلزی به‌دلیل حجم بالای باطله‌های سولفیدی و ایجاد شرایط مناسب برای اکسایش این کانی‌ها، امکان تولید آن وجود دارد (Hamidi, 2015). خاصیت اسیدی حاصل از زهاب اسیدی موجب افزایش غلظت فلزهای سنگین شده و اثرهای سمی و مخرب آن‌ها را تشدید می‌کند. آرسنیک، کادمیم، جیوه، سرب، نیکل، منگنز، مولبیدنیوم و سلنیوم از کاتیون‌هایی هستند که به‌طور معمول در این زهاب‌ها حضور دارند. آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی و رسوبات از جمله محیط‌های میزبان زهاب‌ها می‌باشند (Masomei *et al.*, 2014).

تأثیرهای زهاب‌های اسیدی معدن‌ها (AMD) می‌تواند به‌طور نامحدود در زمان فعالیت یک معدن و یا حتی سال‌ها

پس از پایان عملیات معدنکاری وجود داشته باشد، زیرا فرایندهای تشکیل آن آتو کاتالیستی[۱۳] است و به محض وقوع در مقیاس بزرگ نمی‌توان جلوی آن را گرفت (Kontopoulos, 1998). از ویژگی‌های اصلی یک (AMD) تیپیک می‌توان به پایین بودن pH (در محدوده ۳ تا ۳/۵)، سولفات بسیار بالا (بالاتر از ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر) و بالا بودن میزان فلزهای سنگین نظیر آهن، آلومینیم، مس، کروم، نیکل، سرب و روی اشاره کرد (Geldenhuis and Bell, 1998). زهاب‌های اسیدی معدن‌ها یکی از مهمترین جنبه‌های منفی محیط زیستی ناشی از عملیات معدن‌کاری محسوب می‌شوند. از مهمترین پیامدهای آن می‌توان به آلودگی آب‌های سطحی، تأثیر بر زندگی آبزیان و انسان، آلودگی بستر رودخانه‌ها و آلودگی آب‌های زیرزمینی اشاره کرد (Brown *et al*., 2002; Eary *et al.*, 2003; Dolenec *et al*., 2007; Morais *et al*., 2008; Hammarstrom *et al.*, 2008; Butler 2009; Casiot *et al*., 2009; Luís *et al*., 2009).

در معدن‌ها، کنترل آب‌های آلوده بویژه زهاب های اسیدی با استفاده از استراتژی‌های مدیریت آب بسیار دارای اهمیت می‌باشد و از مهمترین استراتژی‌های تعریف شده در مدیریت آب‌های آلوده، تصفیه (AMD) و سپس رهاسازی آن به محیط است (Dold *et al*., 2009). هدف نهائی از تصفیه (AMD) حذف مواد جامد معلق، خنثی‌سازی اسیدیته و حذف آهن و سایر فلزهای سنگین مانند سولفات‌ها است به‌طوریکه خروجی سیستم تصفیه حدود مجاز تخلیه به محیط را به‌دست آورد (Eary *et al*., 2003).

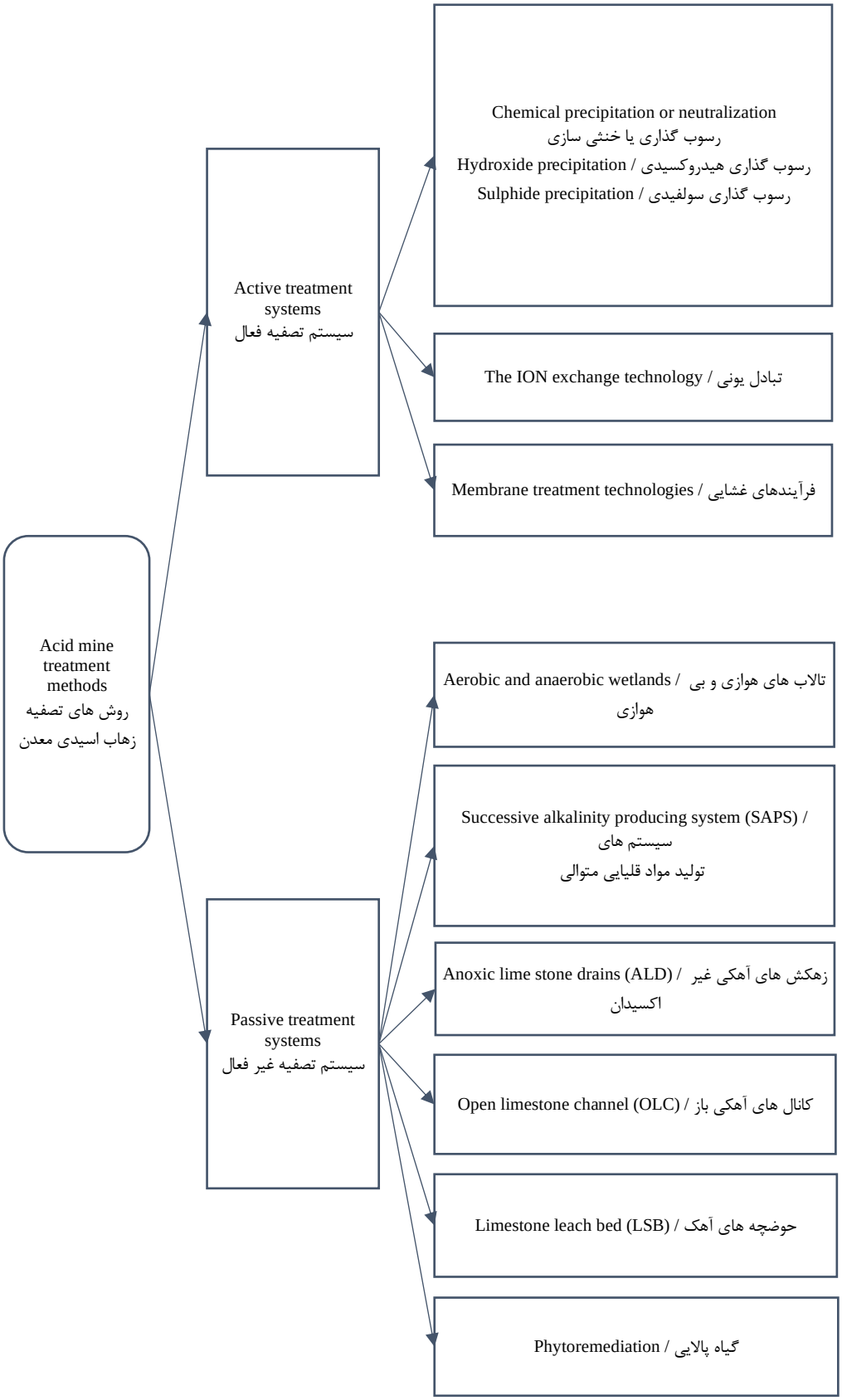
تصفیه (AMD) می‌تواند به دو روش فعال و یا غیرفعال انجام شود (Walton-Day, 2003; Johnson and Hallberg, 2005). سیستم‌های غیرفعال بر مبنای فرایندهای فیزیکی، ژئوشیمیایی و بیولوژیکی طبیعی استوارند و به‌عنوان یک راه حل بلند مدت طراحی می‌شوند. بیشتر این سیستم‌ها برای تصفیه آب‌های اسیدی نیاز به استفاده از موادی دارند که به صورت عادی به‌عنوان مواد زاید طبقه‌بندی شده و حاصل فرایندهای صنعتی و کشاورزی می‌باشند (Skousen *et al*., 2000; Novhe, 2012).

انواع مختلفی از سیستم‌های تصفیه فعال و غیرفعال به تنهایی یا با ترکیب یکدیگر راهکارهای مناسبی برای حذف فلزهای سنگین از زهاب اسیدی معدن‌ها می‌باشد. انتخاب این سیستم به ترکیب شیمیایی زهاب اسیدی، نوع ماده معدنی و شرایط توپوگرافی و آب و هوا وابسته است (Azizi *et al*., 2015).

روش‌های تصفیه فعال زهاب اسیدی برای جداسازی فلزها و رفع اسیدیته، اغلب پرهزینه‌اند. از مهمترین روش‌های تصفیه فعال زهاب اسیدی می‌توان به روش‌های رسوب-گذاری، تغییر شرایط پتانسیل اکسیداسیون، احیاء و روش‌های متفرقه دیگر اشاره کرد (Shayesteh and Rezaie, 2007). سیستم‌های فعال از تأسیسات مهندسی شده‌ای استفاده می‌کنند که براساس رویکرد اصلاح شیمیائی است و به‌طور معمول در معدن‌هایی که فعالند به‌کار گرفته می‌شوند زیرا محدودیت فضا برای ایجاد سیستم تصفیه و تغییرات دبی خروجی پساب‌های آلوده از مهمترین ویژگی‌های این گونه معدن‌ها محسوب می‌شوند (Trumm, 2010). این سیستم‌ها به تجهیزاتی نظیر تانک، مخلوط کننده‌ها، پمپ‌ها و بهره‌برداری منظم و تغییرات و تزریق مداوم مواد شیمیایی و نیروی برق نیاز دارند (Skousen *et al*., 2000).

برای انتخاب یک سیستم تصفیه چندین عامل و فاکتور وجود دارد که در تصمیم‌گیری و استفاده از روش تصفیه فعال و یا غیرفعال مؤثرند (Browne *et al*., 2000).

فلودیاگرام زیر که توسط Waters *et al*. (2003) ارائه شده و بارگذاری اسیدیته محاسبه شده بر حسب میلی‌گرم بر لیتر $CaCO_3$ و براساس فرمول زیر در نظر گرفته شده است، کمک می‌کند تا سیستم تصفیه مناسب برای تصفیه (AMD) معدن مس سونگون انتخاب شود (Trumm, 2010).



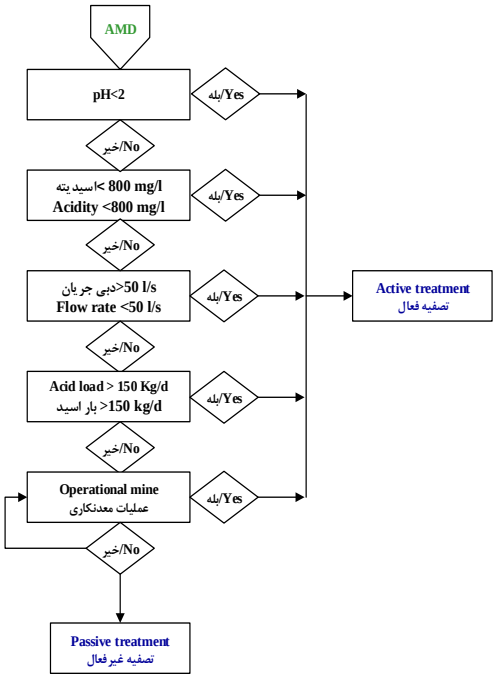
شکل ۵- انواع روش‌های تصفیه زهاب اسیدی

Fig. 5- Types of acidic drainage treatment methods

$$CaCO_3\left(\frac{mg}{l}\right) \times Flow\ rate\left(\frac{l}{s}\right) \times 0.0864 \quad (۵)$$

فرایند انتخاب سیستم تصفیه برای معدن مس سونگون با تمرکز بر فاکتورهای ارائه شده در فلودیاگرام شکل (۳) شروع و پس از بررسی جزئیات کیفیAMD در نتایج به‌دست آمده در جدول‌های ۲ و ۳ این معدن نهائی خواهد شد. از پنج فاکتور ارائه شده در شکل (۳)، میزان اسیدیته (۱۶۰۰ میلی‌گرم بر لیتر)، بارگذاری اسید (۴۴۲۳/۶۸ کیلوگرم بر روز) و وضعیت فعال بودن این معدن، انتخاب سیستم فعال را دیکته می‌کند. البته باید در نظر داشت که فاصله کم میزان pH=3.94 و دبی ۳۲ لیتر بر ثانیه (۱۱۵/۲ متر مکعب بر ساعت) با میزان موجود در شکل ۳، قطعیت انتخاب را صحه‌گذاری می‌نماید. بنابراین سیستم تصفیه فعال یک سیستم مناسب برای تصفیه (AMD) این معدن است.

روش تصفیه فعال برای (AMD) بر مبنای تکنولوژی تصفیه فاضلاب که در صنایع استفاده می‌شوند بنا شده است. از مهمترین روش‌های استفاده شده در تصفیه فعال می‌توان به روش (DAOS[۱۴]) اشاره کرد (Browne *et al.*, 2000;USEPA, 2004; Trumm, 2010) که خنثی‌سازی با مواد شیمیائی، اکسیداسیون با روش‌های مختلف و در نهایت رسوب‌دهی با روش‌های موجود از اصلی‌ترین فرایندهای این روش محسوب می‌شود.



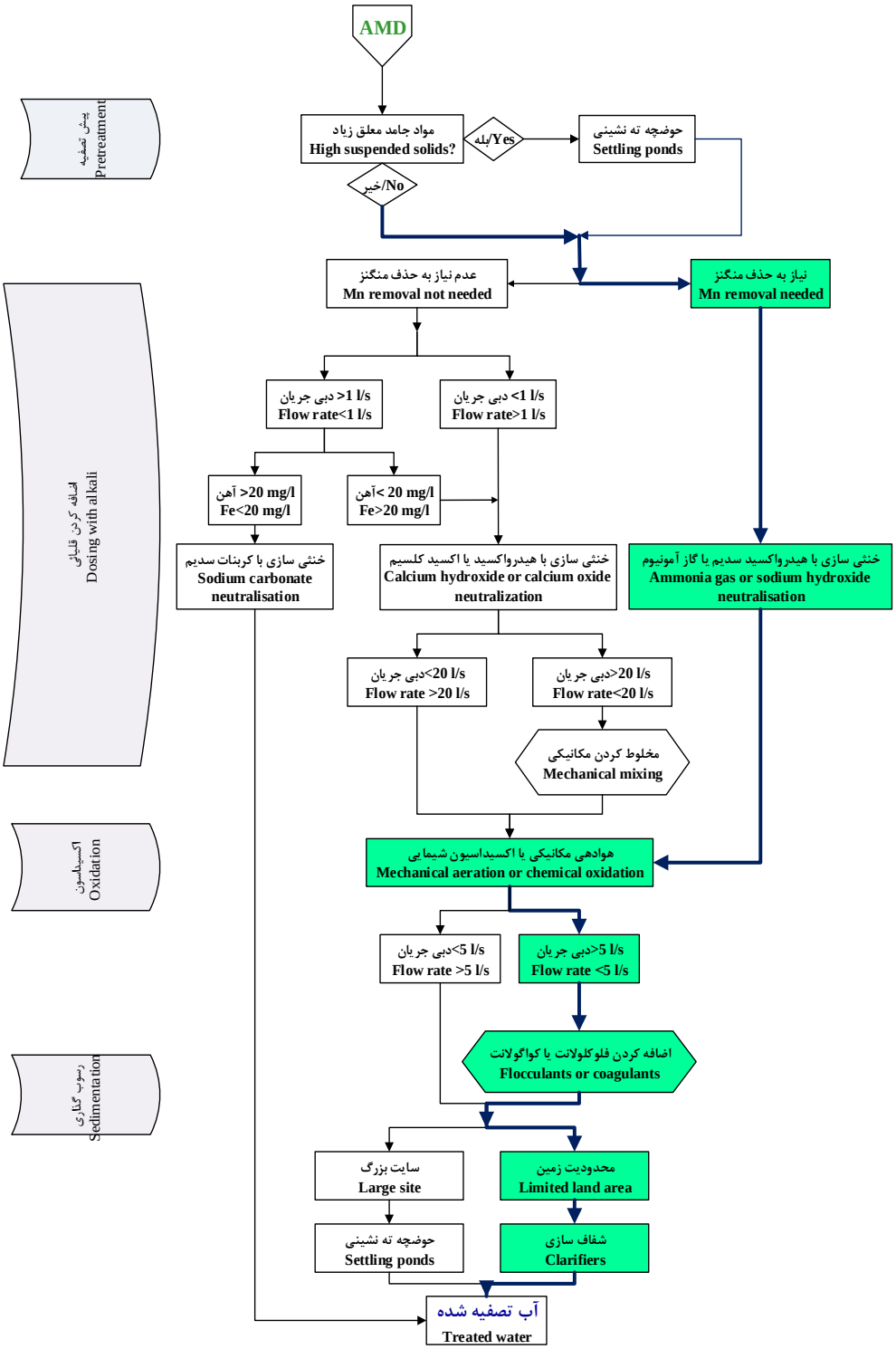
شکل ۶- فلودیاگرام انتخاب سیستم تصفیه فعال یا غیرفعال (اصلاح شده توسط Waters *et al.*, 2003)

Fig. 6- Flow diagram of active or passive treatment system selection (modified by Waters *et al.*, 2003)

طیف وسیعی از عامل‌ها در انتخاب تصفیه فعال مناسب در نظر گرفته می‌شوند که می‌توان به TSS، سرعت جریان[۱۵]، غلظت آهن، نیاز به حذف منگنز و در دسترس بودن زمین کافی برای ساخت سیستم تصفیه اشاره کرد (Trumm, 2010). در این معدن روش (DAOS) برای تصفیه فعال (AMD) این معدن پیشنهاد می‌شود و به جهت افزایش کارایی سسیستم تصفیه با توجه به (TDS) قابل توجه در آنالیز انجام شده، یک سیستم پیش تصفیه هم در نظر گرفته می‌شود.

فلوچارت طراحی یک سایت اختصاصی برای روش تصفیه فعال (AMD) توسط Rajaram *et al.*, (2001) ارائه شده است که مبنای اصلی طراحی برای این معدن در نظر گرفته شده است (Rajaram *et al* , 2000; Trumm, 2010).

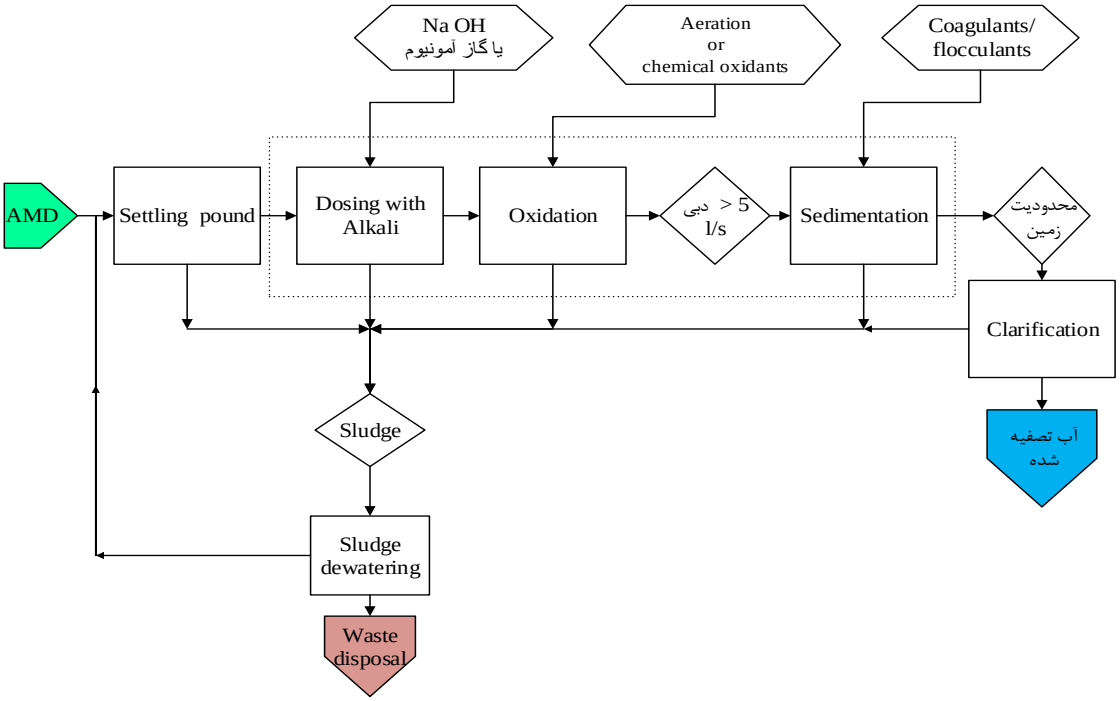
براساس این فلودیاگرام که در شکل ۴ ارائه شده است با تمرکز بر عامل‌های مؤثر در انتخاب یک سیستم مناسب، فرایند تصفیه در سیستم فعال برای تصفیه زهاب اسیدی این معدن پیشنهاد می‌شود.



شکل ۷- فلوچارت طراحی سیستم تصفیه فعال برای (AMD) (مسیر رنگی)

Fig. 7- Flowchart design of active purification system for AMD (Color path)

با توجه به خروجی فرایند تصفیه براساس شکل (۷) فرایند اصلی تصفیه (AMD) این معدن براساس فلودیاگرام زیر ارائه می‌شود.



شکل ۸- فلوچارت پیشنهادی سیستم تصفیه فعال (AMD) دامپ باطله معدن

Fig. 8- Proposed flowchart of AMD active mine dump treatment system

در نمونه های برداشت شده از زهاب اسیدی مورد مطالعه مشخص شده است که میزان پارامتر مواد جامد معلق (TSS) به طور متوسط کمتر از ۵ میلی گرم بر لیتر می باشد و بر اساس شکل (۷) نیاز به پیش تصفیه وجود نخواهد داشت ولی از آنجائیکه در برخی شرایط در صورت افزایش کدورت به این بخش نیاز خواهد بود بعنوان یک گزینه آورده شده است تا عملکرد سیستم تصفیه از طریق تکنیک رسوب‌گذاری با داشتن زمان ماند کافی در حوضچه ته نشینی اولیه افزایش یابد. در بخش خنثی‌سازی (DA) هدف اصلی افزایش pH و خذف فلزهای سنگین با تشکیل هیدرواکسیدهای فلزی و اکسی هیدرواکسیدها است. هیدرواکسیدسدیم (NaOH) و آمونیوم (NH_3) با توجه به خذف (Mn) و میزان دبی (AMD) برای خنثی‌سازی این زهاب اسیدی مناسب ترین مواد شیمیائی هستند زیرا محدوده حلالیت (Mn) در طیف وسیعی از pH (۴/۵ تا ۸) است و اکسیداسیون این فلز با سرعت کم انجام می‌شود ولی با توجه به اقتصادی بودن آمونیم این ماده برای خنثی سازی مناسب است. در مرحله اکسیداسیون هدف اصلی حذف باقیمانده فلزهای با رسوب کردن فلزهای اکسید شده و تشکیل هیدرواکسید، کربنات و اکسیدهای فلزی است که در این بخش هوادهی مکانیکی[۱۶] گزینه بهتری است.

در نهایت برای اینکه تمامی رسوب‌های فلزی تشکیل شده از محیط خارج شوند، یک سیستم شفاف‌سازی به‌همراه استفاده از مواد منعقد کننده[۱۷] و یا لخته‌ساز[۱۸] برای رسوب‌دهی پیشنهاد می‌گردد. در فرایند پیشنهادی با توجه به خذف فلزهای محلول در (AMD) احتمال تولید لجن[۱۹] وجود خواهد داشت، بنابراین به یک سیستم آبگیری[۲۰] لجن نیاز می‌باشد و درنهایت در یک مکان مناسب دفع می‌گردد و آب حاصل از فرایند آبگیری دوباره به ابتدای سیستم هدایت خواهد شد.

نتیجه‌گیری

آلایندگی بسیار تأثیرگذار فعالیت‌های معدنی بر محیط‌زیست بویژه رژیم هیدرولوژی قوی معدن مس سونگون با تولید زهاب اسیدی قطعی می‌باشد بنابراین زهاب اسیدی باید

دارای شرایط استاندارد، برای منبع پذیرنده باشد. برای این منظور تصفیه (AMD) و سپس رهاسازی به محیط بهترین استراتژی مدیریت آن محسوب می‌گردد. تصفیه (AMD) شامل خنثی‌سازی (افزایش pH و حذف فلزهای سنگین) و هوادهی مکانیکی برای اکسیداسیون فلزهای (تشکیل رسوب هیدرواکسیدهای فلزی و اکسی هیدرواکسیدها) می‌باشد. بنا به شرایط هر معدن، روش‌های مختلفی برای تصفیه در نظر گرفته می‌شود. دو روش کلی تصفیه (AMD)، تصفیه فعال و غیر فعال می‌باشد. به‌منظور انتخاب روش تصفیه شناسایی و بررسی کمی و کیفی زهاب اسیدی تولیدی دارای اهمیت بسیار است.

با توجه به میزان pH، اسیدیته، دبی، بارگذاری اسید، وضعیت بهره‌برداری معدن، محدودیت زمین و وجود امکانات زیربنائی نظیر برق، سیستم تصفیه فعال برای معدن مس سونگون مناسب می‌باشد. این سیستم تصفیه باید به ترتیب با اضافه نمودن ماده قلیایی اکسیداسیون و سپس رسوب دهی (Dosing with alkali, Oxidation DAOS and Sedimentation) نسبت به تصفیه (AMD) اقدام کند و همان‌طور که در فلوچارت نشان داده شده است به یک سیستم پیش تصفیه نیز نیاز است که حوضچه ته‌نشینی این کار را انجام خواهد داد. در انتهای سیستم تصفیه متناسب با فضای موجود، روش مناسب شفاف‌سازی با استفاده از فلوکولانت و یا کواگولانت‌ها انجام می‌شود و درنهایت AMD تصفیه شده دارای پارامترهای پائین‌تر از حدود مجاز سازمان حفاظت محیط زیست می‌باشد و می‌تواند آن‌را به محیط رها کرد. مدیریت لجن تولید شده هم با جمع‌آوری در هر فرایند و آبگیری، در این سیستم پیشنهاد می‌گردد.

پی‌نوشت‌ها

[1] Acid Mine Drainage
[2] Total Dissolved Solids
[3] High Density Polyethylene
[4] Mining
[5] Mineral Processing
[6] Metallurgical Extraction
[7] Overburden
[8] Waste Rocks
[9] Pyrite
[10] Water management strategies
[11] Active
[12] Passive
[13] Autocatalytic
[14] Dosing with Alkali, Oxidation and Sedimentation
[15] Flow rate
[16] Mechanical Aeration
[17] Coagulant
[18] Flocculants
[19] Sludge
[20] Dewatering

منابع

Brown, M., Barley, B. and Wood, H., 2002. Minewater Treatment: IWA publishing.

Browner, C.M., 2000. Development Document for Effluent Limitations Guidelines and Standards for the Centralized Waste Treatment Industry: Final (Vol. 1). US Environmental Protection Agency, Office of Water.

Butler, B.A., 2009. Effect of pH, ionic strength, dissolved organic carbon, time, and particle size on metals release from mine drainage impacted streambed sediments. Water Research. 43(5), 1392-1402.

Azizi, B., Vaezi, A., Siah Cheshm, K. and Aber, S., 2016. Design of acid drainage system for sungun molybdenum copper mine, 8th National Conference and Specialized Exhibition of Environmental Engineering, 7th November, Tehran, Iran.

Barkan, Sh. and Aghazadeh, V., 2016. Removal of sulfate under acidic mine drainage conditions using Pilard nano-bentonite of aluminum and iron. Journal of Mineral Resources Engineering. 3, 57-75.

Boger, D.V., 2009. Rheology and the resource industries. Chemical Engineering Science, 64(22), 4525-4536.

Casiot, C., Egal, M., Elbaz-Poulichet, F., Bruneel, O., Bancon-Montigny, C., Cordier, M.A. and Aliaume., C., 2009. Hydrological and geochemical control of metals and arsenic in a Mediterranean river contaminated by acid mine drainage (the Amous River, France); preliminary assessment of impacts on fish (Leuciscus cephalus). Applied Geochemistry. 24(5), 787-799.

Dold, B., Wade, C., and Fontboté, L., 2009. Water management for acid mine drainage control at the polymetallic Zn–Pb–(Ag–Bi–Cu) deposit Cerro de Pasco, Peru. Journal of Geochemical Exploration. 100(2-3), 133-141.

Dolenec, T., Serafimovski, T., Tasev, G., Dobnikar, M., Dolenec, M. and Rogan, N., 2007. Major and trace elements in paddy soil contaminated by Pb–Zn mining: a case study of Kočani Field, Macedonia. Environmental Geochemistry and Health. 29(1), 21-32.

Eary, L.E., Runnells, D.D., and Esposito, K., 2003. Geochemical controls on ground water composition at the Cripple Creek mining district, Cripple Creek, Colorado. Applied Geochemistry. 18(1), 1-24.

Evangelou ,V.P. and Zhang, Y., 1995. A review: pyrite oxidation mechanisms and acid mine drainage prevention. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. 25(2), 141-199.

Hamidi, A., 2015. Feasibility study of industrial wastewater treatment using nanosorbent of Salvadora Persica Plant, Case Study of Sarcheshmeh mineral wastewater. Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics, M.Sc. Thesis. University of Shahrood, Iran.

Geldenhuis, S. and Bell, F., 1998. Acid mine drainage at a coal mine in the eastern Transvaal, South Africa. Environmental Geology. 34(2-3), 234-242.

Johnson, D.B. and Hallberg, K.B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the Total Environment. 338(1-2), 3-14.

Johnson, D.B. and Hallberg, K.B., 2005. Acid mine drainage remediation options: a review. Science of the Total Environment. 338(1-2), 3-14.

Kontopoulos, A., 1998. Acid mine drainage control. Effluent Treatment in the Mining Industry. 57-118.

Liao, B., Huang, L., Ye, Z., Lan, C. and Shu, W., 2007. Cut-off Net acid generation pH in predicting acid-forming potential in mine spoils. Journal of Environmental Quality. 36(3), 887-891.

Liu, R., Wolfe, A.L., Dzombak, D.A., Horwitz, C.P., Stewart, B.W. and Capo, R.C., 2008. Electrochemical study of hydrothermal and sedimentary pyrite dissolution. Applied Geochemistry. 23(9), 2724-2734.

Lottermoser, B.G., 2010. Introduction to Mine Wastes. In Mine Wastes, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany. pp. 1-41.

Luís, A., Teixeira, P., Almeida, S., Ector, L., Matos, J. and Da Silva, E.F., 2009. Impact of acid mine drainage (AMD) on water quality, stream sediments and periphytic diatom communities in the surrounding streams of Aljustrel mining area (Portugal). Water, Air, and Soil Pollution. 200(1-4), 147-167.

Marcus, J.J., 1997. Mining Environmental Handbook: Effects of Mining on the Environment and American Environmental Controls on Mining, World Scientific, USA.

Masoumim, A., Dolati Ardeh Jani, F. and AslaniMehdi Khorasanipour, S., 2014. Acid mine drainage, formation sources and related chemical relationships, The First National Conference on

Environmental Pollution With a Focus on Clean Land, 12th May, Ardebil, Iran.

Morais, C., Rosado, L ,.Mirão, J., Pinto, A., Nogueira, P. and Candeias, A., 2008. Impact of acid mine drainage from Tinoca Mine on the Abrilongo dam (southeast Portugal). Mineralogical Magazine. 72(1), 467-472.

Novhe, N.O., 2012. Evaluation of the applicability of the passive treatment for the management of polluted mine water in the Witwatersrand Goldfields. International Mine Water Association Conference, 4th October, South Africa.

Omidpur, A., Salari, M., Aazami, M., Khodadadi, A. and Marzban, M., 2008. Preliminary prediction of acid mine drainage (Potential for AMD Formation) using static methods in Songon Copper ore mine. The Second Iranian Mining Engineering Conference. 11th November, Tehran, Iran.

USEPA. 2004. Primer For Municipal Wastewater Treatment Systems, OoW Management, USA.

Rajaram, V., Glazer, A. and Coghlan, G., 2000. Methodology for estimating the costs of treatment of mine drainage. Paper presented at the Proceedings, The 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET. 19-22th June, Ankara, Turkey.

Seal II, R.R., Hammarstrom, J.M., Johnson, A.N., Piatak, N.M., and Wandless, G.A., 2008. Environmental geochemistry of a Kuroko-type massive sulfide deposit at the abandoned Valzinco mine, Virginia, USA. Applied Geochemistry. 23(2), 320-342.

Shayestehfar, M.R. and Rezaei, A., 2007. Selection of the most appropriate acid drainage treatment method in Sarcheshmeh copper mine, Conference on Applied Identity and Environment, Islamic Azad Universit, 22th February, Kerma, Iran.

Skousen, J.G., Sexstone, A. and Ziemkiewicz, P.F., 2000. Acid mine drainage control and treatment. Reclamation of Drastically Disturbed Lands. 41, 131-168.

Trumm, D., 2010. Selection of active and passive treatment systems for AMD-flow charts for New Zealand conditions. New Zealand Journal of Geology and Geophysics. 53(2-3), 195-210.

Walton-Day, K., 2003. Geochemistry of active and passive treatment processes used to treat mine drainage. Science for a Changing World. 31, 335-359.

Environmental Sciences Vol.19 / No.3 / Autumn 2021

143-160

Quantitative and qualitative study of acid mine drainage (AMD) in Sungun copper mine tailings dump with emphasis on its refineability

Mohammad Reza Afshoon[1*] and Nasser Mehrdadi[2]

[1] Environmental Engineering majoring in Water and Waste water, Kish International Campus, University of Tehran, Tehran, Iran
[2] Department of Environmental Engineering, Faculty of Environment, Campus of Technical Faculties, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2020.11.03 Accepted: 2021.05.28

Afshoo, M.R. and Mehrdadi, N., 2021. Quantitative and qualitative study of acid mine drainage (AMD) in Sungun copper mine tailings dump with emphasis on its refineability. Environmental Sciences. 19(3): 143-160

Introduction: In copper industries, mining has great importance from the environmental point of view, as many by-products are generated during this process. Most of the mining tailings are sulfide minerals that are oxidized after they are extracted and exposed to oxygen and water, which consequently leads to the production of acid mine drainage (AMD). Water management strategies are conducted to control AMD. Generally, one of the most important methods to refine AMD and release it into the environment is treatment technology. AMD treatment methods are classified as active and passive systems. In the present study, the need for the treatment methods was investigated and then the optimum system was specified.

Material and methods: Sungun copper mine is located in northwestern Iran, 130 km north of Tabriz and 30 km north of Varzeqan. The production rate of tailings in this mine is roughly 11.2 million tons per year, which has over 3 km^2 area in Pakhir Valley. Samples of acidic drainage from Pakhir Chay River were collected 7 times and transferred to the laboratory of Omran Zist Azma Company. Bottles of polypropylene (200 ml) were used to gather samples for analyzing acidity, sulfate, and TDS, and HDPE bottles (250 ml) were used to collect samples for analyzing heavy metals (copper, iron, and manganese) parameters. Moreover, concentrated nitric acid was used for stabilizing the samples. The flow rate of the river was measured by Mouline (flow meter and flow cross-section method), which was on average 32 liters per second.

Results and discussion: Analyzing the results of seven sampling periods, it was found that the average value of pH, sulfate, copper, iron, and manganese parameters were 3.94, 2601.4, 276.78, 0.193, and 46.04 mg /l,

Corresponding Author: *Email Address*. afshoon@alumni.ut.ac.ir *
http://dx.doi.org/10.52547/envs.2021.36082

respectively. According to the standard limits of the Environmental Protection Organization for discharging wastewater into surface water, all parameters except iron had exceeded the permissible limits, so a treatment system will be required before releasing AMD into the environment.

Conclusion: Based on the quantitative and qualitative characteristics of the acid mine drainage in the present study and various acidic effluent treatment methods, it can be concluded that the active treatment method is a promising option to eliminate contaminants from the acidic effluent. Moreover, among the active purification methods, the DAOS method will have better efficiency so that it leads to higher efficiency of system's operation, and the best quality output will be discharged into the environment.

Keywords: Acid drainage, Active treatment, Passive treatment, Songun copper mine.