فصلنامه انسان و محیط زیست، شماره ۴۷، زمستان ۹۷

روش‌های نوین دفن پسماندهای جامد عملیات استخراج و فرآوری مواد معدنی با تاکید بر تکنولوژی دفن‌هم‌زمان

علی بهنام فرد[۱] *

behnamfard@birjand.ac.ir

سلمان قاسمی [۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۸/۰۴ **تاریخ پذیرش:۱۳۹۵/۱۰/۱۵**

چکیده

پسماند جامد تولیدی در طی یک عملیات معدن‌کاری را می‌توان به دو گروه سنگ باطله بخش استخراج و باطله فرآوری تقسیم نمود. برای امکان‌پذیری استخراج کانسنگ، سنگ باطله باید برداشته شده و در یک دمپ قرار داده شود. دمپ سنگ باطله دارای ساختار و توزیع ابعادی ناهمگن است. سنگ باطله ممکن است دارای ابعادی کم‌تر از ۰/۱mm تا بزرگ‌تر از ۱m باشد. باطله فرآوری به آن پسماند جامدی گفته می‌شود که پس از عملیات فرآوری دور ریخته می‌شود. پایداری مکانیکی توده باطله به دلیل توزیع اندازه ابعادی کوچک و محتوی آب بالا ضعیف است. آن ممکن است همچنین محتوی فلزات سنگین و واکنش‌گرهای فرآیندی مختلف باشد که احتمالاً برای موجودات زنده در یک اکوسیستم سمی هستند. بنابراین، باطله فرآوری باید در مکان‌های خاصی با لحاظ موارد ایمنی دفن شود. در این مقاله روش‌های متداول و نوین موجود برای دفن باطله‌های فرآوری شامل دفن در سدهای باطله، پرکردن مجدد، دفن در پیت معدن و دفن در زیردریا معرفی شده‌اند. همچنین روش نوین دفن هم‌زمان که در آن باطله‌های بخش فرآوری در منافذ موجود در سنگ‌های باطله بخش استخراج قرار می‌گیرد معرفی شده و مزایای آن برشمرده شده است. سپس پارامترهای مرتبط با برآورد امکان‌پذیری روش دفن هم‌زمان معرفی شده و تکنیک‌های مختلف برای اختلاط دو نوع پسماند جامد در این روش ذکر شده‌اند و یک مثال موردی گزارش شده است. با توجه به مزایای بی‌شمار روش دفن هم‌زمان، می‌توان آن‌را در معادن کشور نیز بکار گرفت.

کلمات کلیدی: فعالیت‌های معدن‌کاری، سنگ باطله بخش استخراج، باطله فرآوری، روش‌های دفن باطله، دفن هم‌زمان.

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران. *(مسوول مکاتبات)

۲- کارشناسی ارشد فرآوری مواد معدنی، دانشکده مهندسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

Human & Environment., No. 47, winter 2019

The novel disposal methods of solid wastes of a mining and milling operation with emphasise on Codisposal technology

Ali behnamfard [1*] *(Corresponding Author)*
behnamfard@birjand.ac.ir
Salman Ghasemi [۲]

Abstract

The solid waste materials produced during mining activities can be divided into two categories of waste rock and tailing. The waste rock must be removed and placed in a dump to mine the ore. The waste rock dump is heterogeneous in terms of structure and grain size. The waste rock may range in size from less than 0.1 mm to greater than 1 m in diameter. Tailing is said to the material which is discarded after ore processing. The tailing has usually a small particle size distribution and high water content which results in a poor mechanical stability. It may also contains heavy metals and different process reagents which probably toxic to biota in an ecosystem. Hence, they must be disposed of in certain locations with implementing safety issues. In this article, the conventional and novel disposal methods including tailing dam disposal, backfilling, in-pit disposal and submarine disposal have been introduced. Furthermore, the novel codisposal method which uses the open void space in waste rock for disposal of the tailing has been introduced and its advantages have been listed. Then, the relevant parameters for the evaluation of the applicability of this method have been introduced and different techniques for mixing of two solid wastes in this method have been mentioned and a case study has been reported. Considering to the high benefits, codisposal method can be applied in different mine sites in our country.

Key Words: Mining Activities, Waste Rock, Mill Tailing, Disposal Methods, Codisposal.

1- Assistant Professor, Faculty of Mining Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran. **(Corresponding Author)*
2- M.Sc. in Mineral processing, Faculty of Mining Engineering, University of Birjand, Birjand, Iran.

مقدمه

فرآیندهای معدن‌کاری بستر رشد و توسعه جوامع بشری است و بدون آن نیاز بشر به فلزات و مواد معدنی مختلف برطرف نمی‌شود. تنها در سال ۲۰۱۰ حدود ۱۴ میلیارد تن پسماند جامد در نتیجه فرآیندهای معدن‌کاری در جهان تولید شده است (۱). پسماندهای جامد فرآیندهای معدن‌کاری در دو گروه سنگ باطله بخش استخراج[1]و باطله فرآوری[2]قرار می‌گیرند. سنگ باطله بخش استخراج به آن‌سری از سنگ‌های فاقد ارزش اقتصادی که در مرحله استخراج ماده معدنی برای دسترسی به ماده معدنی به اجبار باید جابه‌جا گردد گفته می‌شود (۲). مورد دوم پسماندهای جامد فرآیندهای معدن‌کاری باطله فرآوری است که در واقع کانسنگ بی‌رمق[3]باقی‌مانده پس از استحصال ماده باارزش از کانسنگ استخراجی است (۳). این دو نوع پسماند جامد به لحاظ ماهیت فیزیکی و شیمیایی کاملاً از هم متفاوت هستند (۳،۴).

سنگ‌های باطله بخش استخراج دارای اندازه ابعادی بسیار متنوع از کم‌تر از ۰/۱mm تا بزرگ‌تر از ۱m بوده و معمولاً آلوده به واکنشگرهای فرآیندی نیستند و معمولاً آن‌ها را در دمپ‌هایی در نزدیکی پیت معدن و یا چاه اصلی معدن دپو می‌کنند. مشکل زیست‌محیطی عمده مرتبط با این دمپ‌های سنگ باطله، تشکیل زهاب اسیدی معدن[4]است که در صورت وجود کانی‌های سولفیدی در آن احتمال رخداد دارد (۵، ۶).

گروه دوم پسماندهای جامد فعالیت‌های معدن‌کاری که همان باطله فرآوری است معمولاً بسیار ریزدانه (کمتر از ۱۰۰ میکرومتر) بوده که بیان می‌نماید سطح واکنشی کانی‌های موجود در آن بسیار بالا است و در صورت مناسب بودن شرایط، انحلال فلزات از آن‌ها با نرخی زیاد امکان‌پذیر است. باطله‌های فرآوری همچنین آلوده به واکنش‌گرهای فرآیندی برای مثال سیانور، انواع اسیدها، بازها و واکنش‌گرهای فلوتاسیون هستند (۹-۷). علاوه بر این درصورتی‌که محتوی کانی‌های سولفیدی در آن زیاد باشد امکان تشکیل زهاب اسیدی معدن وجود دارد (۵،۶). بواسطه این موارد معمولاً باطله‌های کارخانه فرآوری در رده پسماندهای خطرناک قرار می‌گیرند و باید اقدامات مدیریتی لازم بر روی آن انجام شود. روش متداول برای مهار باطله‌های فرآوری، دفن آن‌ها در سدهای باطله است. در این مقاله انواع روش‌های ساخت سدهای باطله به اختصار معرفی شده و مزایا و معایب آن‌ها بیان شده است. با توجه به اینکه کشور ما جزو کشورهای معدن‌خیز بوده و تعداد زیادی معادن و کارخانه‌های فرآوری در آن وجود داشته و همچنین در آینده نیز معادن زیادی به بهره‌برداری خواهند رسید لزوم آشنایی با روش‌های نوین دفن پسماندهای جامد معدن‌کاری ضروری به نظر می‌رسد. به این منظور در این مقاله روش‌های نوین دفن باطله شامل روش‌های پرکردن مجدد، دفن در پیت معدن و دفن در زیردریا توضیح داده شده و مزایا و محدودیت‌های هر روش بیان شده است. در این مقاله همچنین تکنولوژی تازه بکار گرفته شده دفن همزمان[5]که در آن سنگ‌های باطله بخش استخراج و باطله‌های فرآوری بطور هم‌زمان دفن می‌شوند معرفی خواهد شد.

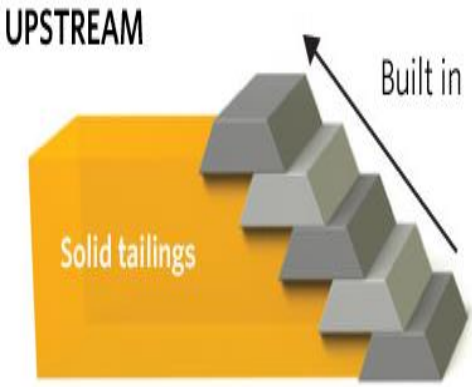
سد باطله

در اکثر پروژه‌های معدن‌کاری، طراحی، ساخت و بهره‌برداری از سد باطله که معمولاً برای دفن باطله‌های فرآوری بکار گرفته می‌شود مورد توجه خاص قرار دارد. سدهای باطله براساس نحوه ساخت به انواع بالارو[6]، پایین‌رو[7]و برجا[8]تقسیم می‌شوند. انتخاب نوع روش ساخت براساس میزان زلزله‌خیز بودن محل قرارگیری معدن، ویژگی‌های باطله و پایداری آن، توزیع ابعادی باطله، شرایط هیدرولوژیکی و سایر عوامل محیطی انجام می‌شود (۱۰).

1-Waste rock
2- Tailing
3- Spent ore
4- Acid Mine Drainage (AMD)
5- Codisposal
6- Upstream
7- Downstream
8- Centerline

در ساخت سد باطله به روش بالارو، ابتدا یک سد اولیه و کوچک در پایین‌ترین نقطه ممکن ساخته می‌شود و دیواره سد به‌طور مداوم به سمت بالادست در طرف سد باطله انتقال می‌یابد (شکل ۱-الف). مواد لازم برای بالابردن سد باطله معمولاً از بخش دانه‌درشت باطله که توسط هیدروسیکلون از بخش دانه‌ریز جدا می‌گردد تامین می‌شود و بخش دانه‌ریز آن به داخل سد باطله ریخته می‌شود (شکل ۱-ب). مزایای اصلی ساخت سد باطله به روش بالارو، هزینه کم و سرعت زیاد افزایش ظرفیت سد بواسطه قرار گرفتن هر پشته است. ضعف این روش آن است که دیوار سد بر روی نرمه‌های باطله که قبلاً درون آب‌گیر ریخته شده است و هنوز متراکم نیست بنا می‌گردد. به این علت وقتی ارتفاع سد از حد خاصی تجاوز می‌کند شکست رخ می‌دهد و جریان باطله به بیرون آن سرازیر می‌شود. به این دلیل، ساخت سد به روش بالارو در حال حاضر معمولاً کم‌تر استفاده می‌شود. تاکنون چندین مورد شکست سد باطله ساخته شده به روش بالارو مشاهده شده است. در مناطق زلزله‌خیز امکان ساخت سد باطله به روش بالارو بواسطه پایداری کم آن اصلاً وجود ندارد (۱۱، ۱۳).

ب

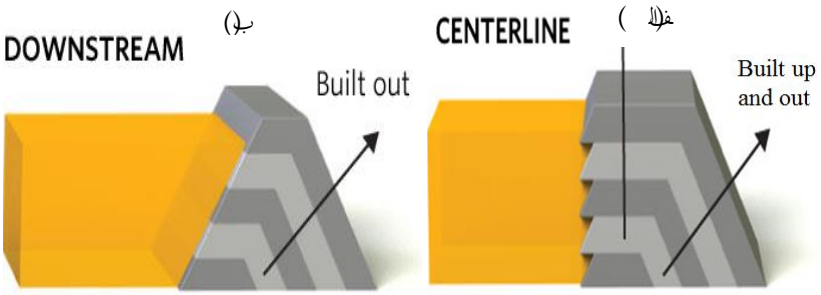


شکل ۱- الف) نمای شماتیک از سد باطله بالارو

ب) تصویری از ساخت دیواره سد باطله با استفاده از ته‌ریز هیدروسیکلون‌ها (۱۲)

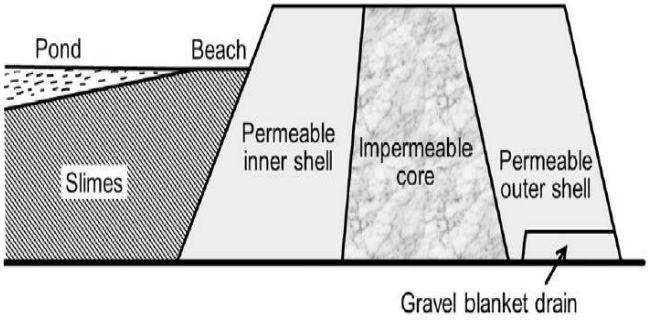
با بالا رفتن دیواره سد باطله در روش پایین‌رو، محور طولی آن در امتداد شیب بستر به سمت پایین جابه‌جا می‌شود (شکل ۲-الف). این سد بر روی بخش دانه‌درشت باطله که از پایداری کافی برخوردار است احداث می‌گردد و به این دلیل تنها روشی است که اجازه طراحی و ساخت سدهای باطله را با لحاظ استانداردهای مهندسی و ایمنی قابل‌قبول می‌دهد. به این دلیل ساخت سدهای باطله خصوصاً در مناطق زلزله‌خیز باید به این روش انجام گیرد. بزرگ‌ترین اشکال این روش، لزوم دسترسی به مقدار زیادی ماسه برای بالا بردن دیواره سد است. تهیه مقدار کافی از بخش دانه درشت باطله ورودی به سد، به‌خصوص در مراحل اولیه کار ممکن است غیرعملی باشد. در این صورت لازم است یا ارتفاع سد اولیه را افزایش داد و یا از محل دیگری ماسه مورد نیاز را تأمین نمود که این امر منجر به افزایش هزینه‌های ساخت این نوع سد باطله می‌شود (۱۱).

سد باطله برجا یکی از انواع سدهای باطله پایین‌رو است که در آن خط مرکزی دیواره سد با بالا رفتن آن در موقعیت ثابتی باقی می‌ماند (شکل ۲-ب). مزیت آن نسبت به روش پایین‌رو آن است که در هر مرحله نیاز به ماسه کم‌تری برای بالا بردن دیواره سد وجود دارد و بنابراین می‌توان سد را با سرعت بیش-تری بالا برد. همچنین سد بر روی مواد دانه‌ریز موجود در داخل آبگیر احداث نشده و مشکل سدهای باطله بالارو را کم‌تر دارد. با این وجود باید دقت شود که شیب دیواره مشرف بر آبگیر، در وضعیت ناپایدار نباشد (۱۱).



شکل ۲- نمای شماتیک از سد باطله (الف) پایین‌رو، (ب) برجا (۱۲)

درصورتی‌که سنگ‌های باطله بخش استخراج به مقدار کافی موجود باشند، بهترین مواد برای ساخت سد باطله هستند زیرا خصوصیات مکانیکی و ژئوتکنیکی ایده‌آلی از جمله توزیع ابعادی مناسب، زاویه اصطکاک داخلی بالا و ظرفیت توزیع آب منفذی بالا دارند (۱۴). شکل ۳ نمایی از این نوع سد باطله را نشان می‌دهد. در این روش، برای ساختن سد نیازی به باطله به دست آمده در بخش فرآوری نیست لذا باطله فرآوری را می‌توان بدون نیاز به جدایش بخش ریزدانه از درشت‌دانه به داخل آبگیر تخلیه نمود. در برخی موارد، امکان دارد سنگ باطله بخش استخراج برای ساختن دیواره سد تا ارتفاعی بالاتر از سطح آبگیر کافی نباشد. در این صورت ممکن است لازم باشد که سنگ‌های باطله بخش استخراج و بخش دانه‌درشت باطله فرآوری را با هم مخلوط نمود تا از نظر اقتصادی ساخت سد مقرون به صرفه باشد (۱۱).



شکل ۳- سد باطله ساخته شده با استفاده از سنگ‌های باطله بخش استخراج (۱۱)

پرکردن مجدد

در معادن زیرزمینی می‌توان از باطله کارخانه فرآوری و یا سنگ‌های باطله برای پر کردن آن‌سری از کارگاه‌های استخراج که عملیات استخراج آن‌ها به اتمام رسیده است استفاده نمود. پس از گذشت چند ماه از پر کردن مجدد کارگاه استخراج، مواد پرکننده می‌توانند به‌عنوان یک ستون نگهداری مناسب عمل نمایند و اجازه استخراج پایه‌های کارگاه که معمولاً از جنس خود کانسنگ است و قبلاً امکان استخراج آن وجود نداشت را بدهد. پر کردن مجدد کارگاه‌های استخراج شده همچنین حجم باطله که باید بر سطح زمین در سد باطله نهشته شوند را کاهش می‌دهد و بنابراین حجم سد باطله و هزینه‌های مدیریت آن‌ها به میزان قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. از این روش در حال حاضر در بسیاری از معادن زیرزمینی مدرن استفاده می‌شود (۱۱). سه نوع اصلی پر کردن مجدد شامل پر کردن به طریق هیدرولیکی[1] پر کردن سنگی[2] و

1-Hydrolic fill
2- Rockfill

پر کردن با مواد چسبان شده با سیمان[1] است. پر کردن هیدرولیکی به‌وسیله باطله فاقد نرمه ایجاد می‌شود و نیاز به اتصال‌دهنده[2] برای فراهم کردن مقاومت مکانیکی مناسب توده پرشده پس از گذشت مدت زمان لازم وجود دارد. در روش پر کردن سنگی، سنگ‌های باطله بخش استخراج توسط کامیون یا نوار نقاله به کارگاه استخراج انتقال می‌یابد (۱۱). پر کردن با مواد چسبان شده با سیمان از سال ۱۹۹۰ شروع شد و به سرعت به دلیل مزایای بالای آن نسبت به پر کردن به طریق هیدرولیکی محبوبیت پیدا کرد. ازجمله این مزایا شامل استفاده از کل باطله و نه فقط باطله نرمه‌زدایی شده، بهبود مقاومت مکانیکی و امکان بازگرداندن باطله‌های مستعد تولید زهاب اسیدی معدن می‌شود (۱۵). این نوع پر کردن شامل مخلوطی از باطله، آب و مواد اتصال‌دهنده (به عنوان‌مثال، سیمان پرتلند) است که معمولاً به کارگاه زیرزمینی با ۷۰ تا ۸۰ درصد وزنی جامد پمپاژ می شود (شکل ۴-الف). نوع و میزان ماده اتصال‌دهنده به ترکیب باطله و آب، مقاومت مکانیکی مورد نیاز و در نهایت به اقتصاد فرآیند بستگی دارد. معمولاً مقدار ماده اتصال‌دهنده بین ۳٪ تا ۷٪ وزن خشک باطله است. هزینه عمده در یک عملیات پر کردن با مواد چسبان شده هزینه مربوط به خرید ماده اتصال‌دهنده است و بنابراین ترجیح داده می‌شود به‌جای سیمان از مواد زاید سایر صنایع که دارای خواص مناسب هستند مانند خاکستر بادی و سرباره استفاده شود (۱۶). ازآنجایی‌که خواص باطله و آب بر روی میزان مقاومت مکانیکی توده ایجادشده تأثیرگذار هستند این روش در هر سایت از طریق آزمایش‌های آزمایشگاهی و پیگیری‌های منظم باید بهینه‌سازی شود (۱۷، ۱۸، ۱۹).

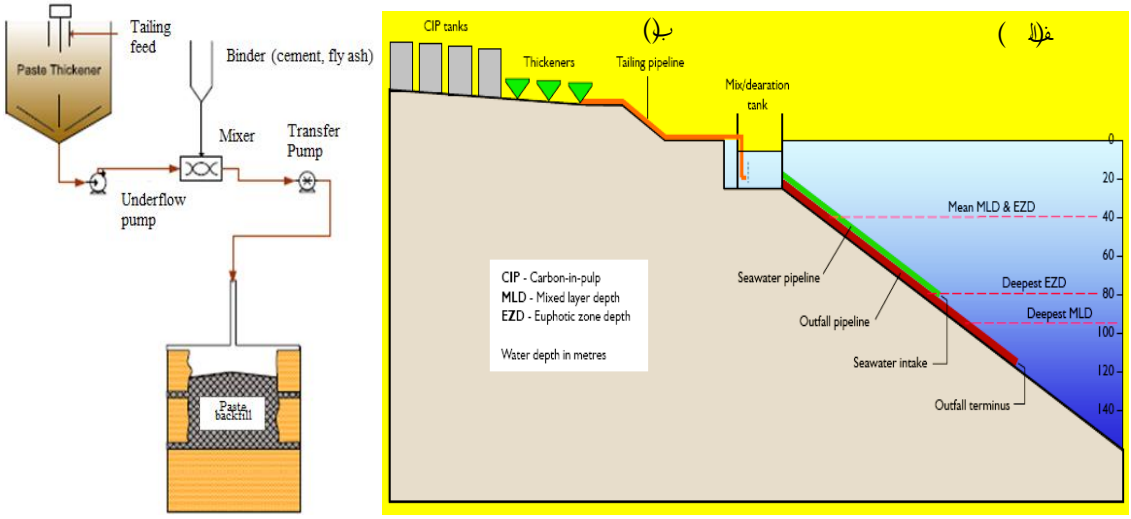
دفن باطله در پیت معدن

در این روش از پیت‌های معادن روباز پس از اتمام عملیات استخراج آن‌ها برای دفن باطله‌های فرآوری استفاده می‌شود (۲۰، ۲۱). مزیت عمده این روش عدم نیاز به ساخت سد باطله در سطح زمین است و در نتیجه هزینه‌های ساخت و مدیریت این سدهای باطله و همچنین خطرات مرتبط با شکست این سدهای باطله وجود ندارد. اصلی‌ترین ریسک همراه با این روش، آلودگی آب‌های زیرزمینی بواسطه ورود فلزت انحلال یافته از باطله به داخل آن است (۲۲). این خطر برای معادنی روبازی که جریان آب‌های زیرزمینی به سمت پیت معدن است یا هنگامی‌که در زیر پیت معدن یک‌لایه سنگ بستر غیرقابل نفوذ وجود داشته باشد، به حداقل می‌رسد. برای اطمینان یافتن از این‌که پس از دفن باطله به این روش کیفیت آب‌های زیرزمینی نیز حفظ می‌شود باید مطالعات هیدروژئولوژیکی حوزه پیت معدن انجام شود (۱۱).

دفن باطله زیردریا

هنگامی‌که عملیات معدن‌کاری نزدیک به دریا باشد این روش دفن باطله جایگزین مناسب نسبت به روش‌های فوق‌الذکر است منوط به این‌که قوانین اجازه دفن باطله به این روش را بدهد. شکل ۴-ب نمایی از این روش را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اجزای اصلی این روش شامل یک‌سری لوله برای انتقال باطله به محفظه‌های هواگیری/اختلاط، شبکه لوله برای خارج کردن آب دریا و شبکه لوله برای انتقال باطله از محفظه اختلاط به عمق دریا می‌شود. در این روش، انتقال باطله به محل نهشته شدن نهایی معمولاً به‌صورت ثقلی انجام می‌شود و باطله معدن وارد عمق‌هایی از سطح دریا می‌شود که بر طبق مقررات زیست‌محیطی به لحاظ کدورت آب جزو مناطق حفاظت شده نیستند. این روش دفن باطله، حساسیت گروه‌های دوست‌دار محیط‌زیست را برانگیخته است زیرا دفن نهایی باطله‌ها در سدهای غیرقابل‌کنترل انجام شده و بواسطه افزایش کدورت آب در اعماق دریا، اکوسیستم این نواحی شدیداً تحت تاثیر قرار می‌گیرد. صنایع معدنی در منطقه آسیا و اقیانوس آرام استدلال کرده که دفن باطله‌های معدن‌کاری در زیردریا برای مردم و محیط‌زیست امن‌تر است زیرا شرایط سطح زمین به دلیل توپوگرافی طبیعی، زلزله‌خیز بودن بالای این مناطق و بارش شدید باران برای ساخت سد باطله نامناسب است. از این رو، دفن باطله در این مناطق به‌طور رایج به روش دفن زیردریا انجام می‌شود (۱۱، ۲۳).

1-Cemented paste backfill
2-Binder



شکل ۴- الف) دفن باطله فرآوری به روش الف) پر کردن مجدد (۱۱)، ب) سیستم دفن باطله زیردریا (۲۳)

تکنولوژی دفن هم‌زمان باطله‌ها

سنگ‌های باطله بخش استخراج عمدتاً دانه درشت بوده و حفره‌های بزرگی بین آن‌ها پس از قرار گرفتن در دمپ ایجاد می‌شود. این حفرات می‌توانند فضای مناسبی برای دفن باطله‌های فرآوری باشند. دفن هم‌زمان باطله‌ها یک تکنولوژی جدید است که از حفرات موجود در لابه‌لای سنگ باطله بخش استخراج برای دفن باطله‌های دانه‌ریزتر بخش فرآوری استفاده می‌نماید. درصورتی‌که سنگ‌های باطله بخش استخراج در حد ابعادی رس و ماسه باشند به واسطه کم بودن نسبت منافذ در دسترس آن‌ها نمی‌توان این روش دفن را استفاده کرد (۲۴).

مهم‌ترین مزیت روش دفن هم‌زمان باطله‌ها، حذف سد باطله باشد. با توجه به مشکلات فراوان مشاهده شده برای سیستم‌های نگهداری سد باطله و وقوع حوادث بی‌شمار در خصوص شکستن سد باطله (۲۵)، مزایای قابل‌توجهی برای حذف سدهای باطله از پروژه‌های جدید معدنی وجود دارد. به‌احتمال زیاد در آینده نزدیک بسیاری از سازمان‌های نظارتی و همچنین سهامداران شرکت‌های بزرگ معدنی، روش دفن هم‌زمان را نسبت به سیستم‌های متداول مدیریت باطله ترجیح خواهند داد (۲۴).

مزیت دیگر تکنولوژی دفن هم‌زمان، کاهش تولید زهاب اسیدی است. دلیل آن این است که در این روش، می‌توان مواد قلیایی را در قالب مواد متصل‌کننده مانند آهک، سیمان و یا خاکستر به باطله‌ها اضافه نمود که از طریق آن، محصورسازی مؤثری از مواد معدنی سولفیدی ایجاد شده و یا سلول‌های مهار داخلی برای جداسازی سنگ با پتانسیل زهاب اسیدی بالاتر به وجود می‌آید (۲۴).

در مناطق خشک با وزش باد فراوان، این روش می‌تواند انتشار گردوغبار را کاهش دهد. صرف‌نظر از نوع روش اختلاط، سطح کم‌تری از باطله‌های فرآوری در معرض وزش باد قرار می‌گیرند. بنابراین، کاهش گردوغبار در طول عملیات و بعد از اتمام آن وجود دارد. علاوه بر این، اگر از مواد اتصال‌دهنده استفاده شود، باطله‌های در معرض باد نیز اصلاً منبع انتشار گردوغبار نمی‌شوند.

مزیت دیگر آن در فرآیندهایی است که پساب‌های خطرناک تولید می‌کنند. از جمله این فرآیندها می‌توان کارخانه‌های فرآوری کانسنگ طلادار را نام برد که باطله‌های آن‌ها آلوده به سیانور است. در صورت استفاده از روش دفن هم‌زمان باطله در این کارخانه‌ها، پروژه تبدیل به یک پروژه بدون تخلیه پساب

می‌شود و از این طریق صرفه‌جویی قابل‌توجهی در هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی و همین‌طور بهبود سازگاری پروژه با مقررات زیست‌محیطی قانونی خواهد شد (۲۶).

جدول ۱ خلاصه‌ای از مقدار هزینه‌های تجربی به دست آمده برای دفن باطله به چند روش را نشان می‌دهد. علاوه بر این‌که هزینه‌های روش دفن هم‌زمان با سایر روش‌های دفن باطله در رقابت است، کاهش هزینه‌های مدیریت سد باطله حین و پس از اتمام عملیات معدن‌کاری نیز وجود دارد (۲۶). جدول ۲ برخی از مزایای استفاده از این روش دفن باطله را به اختصار نشان می‌دهد.

جدول ۱- هزینه‌های دفن باطله‌های معدنی به چند روش مختلف (۲۶)

روش‌های دفن باطله	هزینه (برحسب دلار آمریکا بر هر تن)
باطله‌های سیانیدی طلا: ساخت دیواره سد باطله، ساخت تجهیزات پایین‌دستی، نفوذناپذیر ساختن کف سد باطله از طریق کشیدن لاینر	۰/۵ تا ۱/۲۰ دلار آمریکا
باطله‌های سولفیدی مس: افزایش دیواره سد باطله با بخش دانه‌درشت باطله‌های فرآوری پس از جدایش با هیدروسیکلون بخش دانه‌ریز باطله‌ها، بدون ساخت لاینر	۰/۲ تا ۰/۵ دلار آمریکا
دفن هم‌زمان با سنگ باطله بخش استخراج	۰/۱۵ تا ۰/۵ دلار آمریکا

جدول ۲- برخی از مزایای روش دفن هم‌زمان (۲۴)

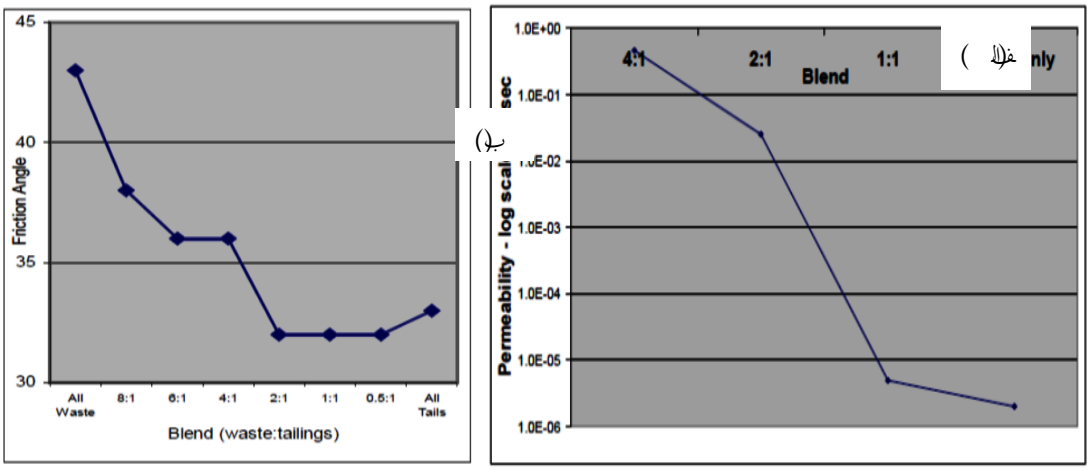
موارد	مزایا
برهم‌خوردگی زمین	تأثیر کم‌تر بر زیستگاه‌های حیات‌وحش و کاربری‌های کشاورزی زمین / اغتشاش کم‌تر حوزه‌های آبریز / تأثیر کم‌تر بر آبراهه‌های محلی
آب	کاهش مصرف آب / کاهش نشت توسط تلنبار سنگ باطله، بنابراین کاهش خطرات افت کیفیت آب کاهش در معرض آب‌وهوا قرار گرفتن باطله‌ها و بنابراین کاهش خطر تولید زهاب اسیدی
خطرات بلندمدت	پایداری بیشتر تلنبار باطله / شکافی در سد باطله رخ نداده و اقدامات حفظ پایداری کم‌تری نیاز است / خطرات شکست‌های فاجعه‌بار سد باطله کاهش می‌یابد
پس از بستن شدن معدن	منطقه کم‌تری اشغال می‌شود / بستر خوبی برای پوشش گیاهی است / مشکلات گردوغبار کم‌تر است / نفوذپذیری بسیار کم به‌آسانی از طریق اختلاط باطله‌ها ایجاد می‌شود / حفظ پایداری باطله پس از اتمام کار راحت‌تر است

روش‌های زیادی برای اختلاط باطله‌های بخش فرآوری با سنگ‌های باطله بخش استخراج وجود دارد که در بخش بعد به آن پرداخته خواهد شد. به منظور انتخاب روش مناسب ابتدا باید ارزیابی باطله‌های فرآوری و سنگ باطله انجام گیرد. این ارزیابی شامل یک برنامه دقیق از تست‌ها و آنالیزهای ژئوتکنیکی است تا ابتدا گزینه‌های محتمل اجرایی تعیین شود و سپس این گزینه‌ها به لحاظ هزینه و عملکرد بهینه‌سازی شود. مهم‌ترین معیارهای ژئوتکنیکی مقاومت و نفوذپذیری است زیرا مقاومت، پایداری کوتاه‌مدت و بلندمدت را کنترل نموده و نفوذپذیری بر مواردی هم‌چون انتقال آلودگی و زهاب تأثیر می‌گذارد (۲۴).

معمولاً مقاومت وابسته به نسبت سنگ باطله بخش استخراج به باطله فرآوری است و زاویه اصطکاک داخلی درصورتی‌که این نسبت خیلی کوچک باشد تقریباً معادل جایی است که باطله فرآوری به‌تنهایی وجود داشته باشد. شکل ۵-الف تغییر در زاویه اصطکاک داخلی را با نسبت‌های اختلاط مختلف نشان می‌دهد. مشخص است که بین نسبت‌های ۴ به ۱ و ۲ به ۱ (سنگ باطله بخش استخراج به باطله فرآوری)، ویژگی‌های

مقاومتی مخلوط از حالتی که رفتار شبیه به سنگ باطله بخش استخراج داشته باشد به حالتی که شبیه به باطله بخش فرآوری رفتار نماید تغییر می‌کند (۲۴).

نفوذپذیری نیز رفتاری مشابه با مقاومت دارد، بنحوی‌که نفوذپذیری با کاهش در نسبت سنگ باطله بخش استخراج به باطله فرآوری کاهش می‌یابد و در نسبت‌های اختلاط بسیار کم مشابه باطله فرآوری رفتار می‌نماید. رابطه نفوذپذیری با نسبت سنگ باطله بخش استخراج به باطله فرآوری در شکل ۵-ب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود ۵ برابر افت در مقدار نفوذپذیری با کاهش در نسبت سنگ باطله بخش استخراج به باطله فرآوری از ۴ به ۱ به ۱ به ۱ وجود دارد. با توجه به مطالب فوق، نسبت مناسب سنگ باطله بخش استخراج به باطله فرآوری در روش دفن همزمان در جدول ۳ آمده است (۲۴).



شکل ۵- الف)تغییر زاویه اصطکاک داخلی و

ب) تغییر نفوذپذیری با نسبت سنگ باطله بخش استخراج به باطله فرآوری (۲۴)

جدول ۳- پایداری روش دفن همزمان بر اساس نسبت سنگ باطله به باطله (۲۶)

نسبت سنگ باطله به باطله	پایداری روش دفن همزمان
بیش‌تر از ۸: ۱	احتمالاً برای این روش مناسب است
بین ۴: ۱ و ۸: ۱	نیاز به آزمایش قابل‌توجه و تجزیه‌وتحلیل دقیق برای تعیین مناسب بودن این روش
کم‌تر از ۴: ۱	احتمالاً برای این روش مناسب نیست

روش‌هایی برای دفن همزمان باطله‌ها

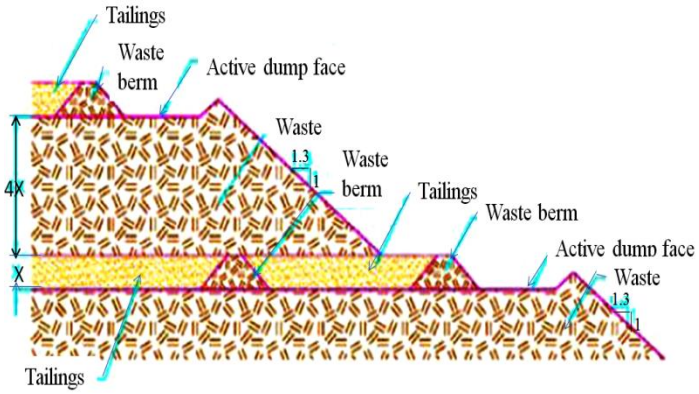
چهار روش مختلف برای اختلاط سنگ‌های باطله بخش استخراج با باطله‌های فرآوری وجود دارد که در ادامه هر روش معرفی شده و مزایا و معایب آن‌ها بیان می‌شود.

- باطله‌های قرار گرفته در حوضچه‌هایی در داخل دمپ سنگ باطله

یک روش برای ایجاد این شکل‌بندی آن است تا با ایجاد خاک-ریزهایی از سنگ باطله، حوضچه‌های جداگانه‌ای شکل گیرد و باطله‌های فرآوری در آن قرار داده شود. هنگامی‌که یک حوضچه پر شد سلول دیگر ساخته می‌شود و به همین ترتیب کار ادامه می‌یابد. خاک‌ریزها هرچند ساختارهای مجزایی تشکیل می‌دهند ولی آب در این حوضچه محصور نشده و به داخل سنگ باطله‌ای که در زیر آن قرار دارد نفوذ می‌کند. پس از یک بازه زمانی، پشته باطله دیگر بر روی باطله‌های فرآوری قرار خواهد گرفت و این سیکل تکرار خواهد شد.

سطح مقطع‌های عرضی این شکل‌بندی در شکل ۶ نشان داده شده است (۲۴).

این روش مزایای زیادی به دنبال خواهد داشت ولی یکی از مزیت‌های اصلی آن این است که در این روش ماشین‌آلات راه‌سازی برای حمل و توزیع باطله‌ها مورد نیاز نیست. با این وجود، عیب عمده این روش آن است که لایه سنگ باطله به سرعت بر روی آن قرار گرفته و فشار منفذی در باطله محصور خواهد شد و لایه باطله می‌تواند در معرض شکست ناگهانی قرار گیرد و نه تنها ناحیه در حال کار دمپ بلکه همچنین تجهیزات نزدیک به خاک‌ریز را در معرض ریسک قرار دهد. برای غلبه بر این نگرانی می‌توان سیمان پرتلند یا برخی از واکنش‌گرهای اتصال دهنده را اضافه نمود تا چسبندگی بین مواد را افزایش داده و مقاومت کلی مواد بهبود یابد. این مثال را توجه نمایید: در یک مورد بدون سیمان و نرخ پیشرفت قابل قبول، ۲۰ متر سنگ باطله بر روی ۵ متر باطله فرآوری قرار می‌گیرد و فاکتور ایمنی منتج ممکن است کم‌تر از ۱ باشد. برای نرخ پیشرفت مشابه ولی افزودن ۱ و ۳٪ سیمان درصورتی‌که ما فرض کنیم بهبود در مقاومت صرفاً به دلیل افزودن سیمان باشد، فاکتور ایمنی به ترتیب به ۱/۴ و ۲/۴ افزایش می‌یابد (۲۴).

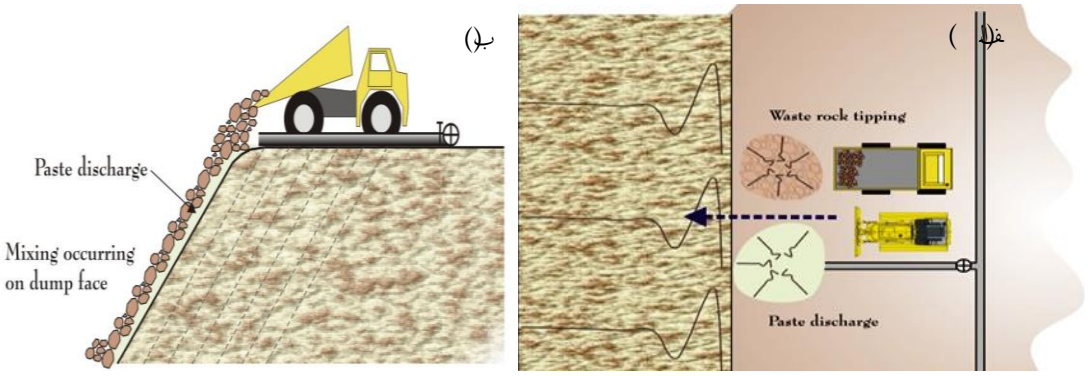


شکل ۶- نمایی از قرار دادن باطله‌های فرآوری به صورت حوضچه‌هایی در بین سنگ‌های باطله بخش استخراج (۲۴)

- اختلاط باطله فرآوری با سنگ باطله در سطح

در این روش اختلاط باطله‌های فرآوری با سنگ باطله بخش استخراج به‌صورت ترکیبی تقریباً هموژن انجام می‌گیرد. اختلاط این دو نوع باطله می‌تواند به‌طور خودبه‌خودی در قسمت تاج دمپ باطله از طریق پمپاژ باطله فرآوری و ریختن سنگ باطله بخش استخراج بوسیله کامیون انجام گیرد (شکل ۷-الف) و یا این‌که اختلاط دو نوع باطله به‌صورت ترکیبی تقریباً هموژن می‌تواند توسط بولدوزر در سطح دمپ باطله به انجام رسد (شکل ۷-ب). مزیت اصلی این روش آن است که هموژن کردن مخلوط، خواص یکنواخت‌تر و بنابراین قابل اتکاتری در سرتاسر دمپ فراهم می‌آورد. همچنین احتمال احتیاج به یک واکنش‌گر اتصال دهنده[1] را کاهش داده و ممکن است منجر به افزایش نسبت مجاز باطله فرآوری به سنگ باطله استخراج در مخلوط نهایی شود. عیب عمده این روش مربوط به هزینه‌های عملیاتی و در تماس مستقیم بودن ماشین‌آلات با باطله باشد که نگرانی‌هایی در مورد سلامت افرادی که بر روی آن‌ها کار می‌کنند ایجاد می‌نماید.

1-Binding agent



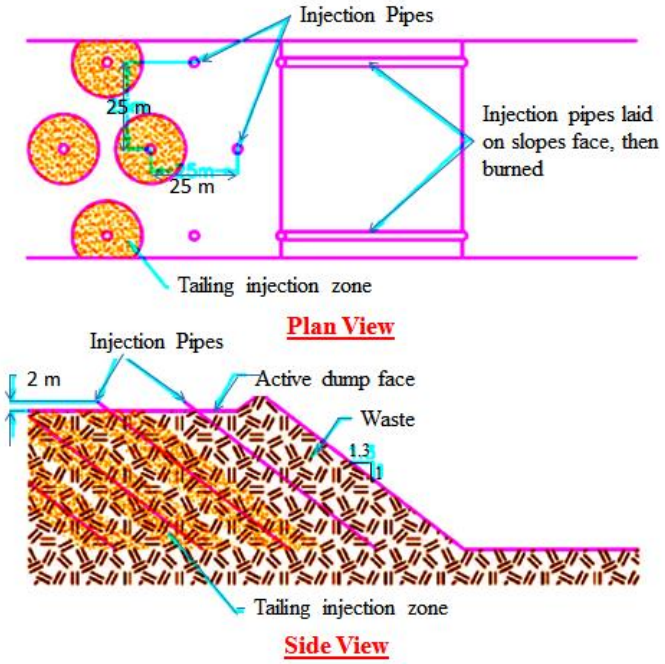
شکل ۷-(الف) اختلاط خودبه‌خودی دو نوع باطله به‌وسیله پمپاژ باطله بخش فرآوری و تخلیه سنگ باطله بخش استخراج توسط کامیون در تاج دمپ باطله، ب) اختلاط دو نوع باطله با استفاده از بولدوزر در سطح دمپ باطله (۲۷)

- تزریق به دمپ سنگ باطله

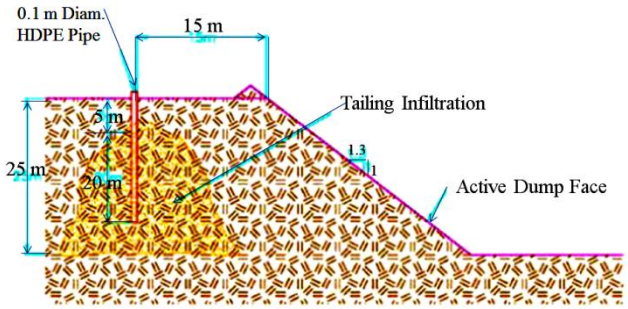
سومین روش شامل تزریق باطله فرآوری به داخل دمپ سنگ باطله است. اعتقاد بر آن است که روش بهینه برای دست‌یابی به این هدف قرار دادن لوله‌هایی بر سطح دمپ و سپس پوشاندن آن بوسیله سنگ‌های باطله است. هنگامی‌که جبهه دمپ به میزان کافی پیش رفت، لوله‌ها در دمپ به سیستم توزیع باطله فرآوری متصل خواهد شد و باطله‌ها به توده دمپ تزریق خواهد گشت. این روش در شکل ۸ نشان داده شده است. اگر روش خواباندن لوله‌ها در جبهه دمپ امکان‌پذیر نباشد می‌توان گمانه‌های قائم را حفاری نمود و سپس لوله‌های سوراخ‌دار را در گمانه قرار داد که این روش در شکل ۹ نشان داده شده است. گزینه حفاری گمانه همچنین این اجازه را می-دهد تا دمپ‌های سنگ باطله قدیمی برای دفن باطله‌های فرآوری مورد استفاده قرار بگیرد (۲۴).

تزریق باطله فرآوری به داخل سنگ باطله در سایت معدنی Esquel در آرژانتین نشان داده است که باطله‌ها در شعاعی به میزان ۳۰ متر در توده دمپ نفوذ می‌کند. در معادن زیرزمینی در کانادا که باطله‌های فرآوری به داخل سنگ باطله تزریق شد، نفوذ باطله به میزان ۱۰ متر دست‌یابی گشت. این مورد برمبنای خصوصیات رئولوژی باطله فرآوری و توزیع ابعادی و شرایط منفذی دمپ سنگ باطله تعیین می‌شود (۲۴).

تزریق باطله فرآوری به داخل دمپ دارای این مزیت است که مخلوط باطله فرآوری و سنگ باطله هنگامی تشکیل می‌شود که شکل نهایی دمپ حاصل شده باشد. همچنین در این روش تماس تجهیزات با باطله حداقل می‌شود. همچنین ممکن است در این روش نسبت‌های بالاتر باطله فرآوری به سنگ باطله دست‌یابی شود و احتیاج به ماده اتصال دهنده را کاهش دهد. تزریق همچنین این اجازه را می‌دهد تا روش دفن هم‌زمان در دمپ‌های قدیمی سنگ باطله انجام شود. با این وجود، هزینه‌ها این روش نسبت به سایر روش‌ها در بیش‌ترین مقدار قرار دارد (۲۴).



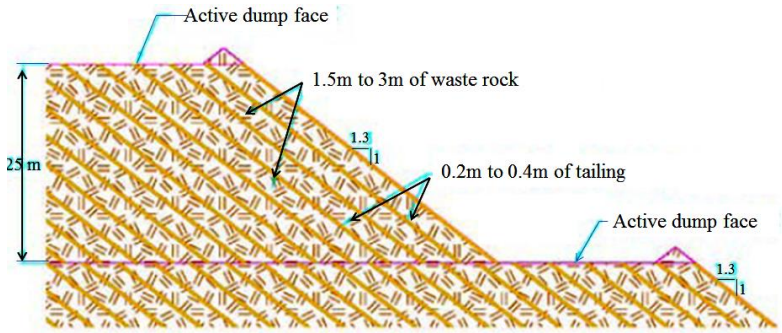
شکل ۸- تزریق بوسیله شبکه لوله در ابتدا قرار گرفته بر جبهه پیش رونده دمپ (۲۴)



شکل ۹- تزریق باطله فرآوری به داخل سنگ‌های باطله بخش استخراج از طریق گمانه‌ی حفر شده در داخل آن (۲۴)

- قرار دادن یک لایه نازک از باطله فرآوری بر روی سطح سنگ باطله

چهارمین روش شامل قرار دادن یک لایه نازک باطله فرآوری بر روی سطح سنگ باطله و سپس زمان دادن تا آب باطله فرآوری به داخل سنگ باطله نفوذ نموده و خشک شود. پس از یک بازه زمانی کوتاه، یک لایه سنگ باطله دیگر بر روی این لایه باطله فرآوری خشک شده قرار داده می‌شود. شکل ۱۰ سطح مقطع عرضی این روش را نشان می‌دهد. لایه باطله می‌تواند دارای ضخامت ۲۰ تا ۴۰ سانتی‌متر بوده و سنگ باطله دارای ضخامت ۱/۵ تا ۳ متر باشد. به منظور قرار دادن لایه نازک باطله در سطح سنگ باطله، یک لوله سوراخ‌دار در قسمت بالای شیب سنگ باطله قرار گرفته و اجازه داده می‌شود تا باطله به آرامی در سطح سنگ باطله توزیع شود. عرض ناحیه در حال کار بستگی به ارتفاع جبهه دمپ و نرخ تولید باطله داشته ولی ناحیه در حال کار به‌طور روزانه جابه‌جا خواهد شد (۲۴).



شکل ۱۰-لایه نازک از باطله قرار گرفته بر سطح دمپ (۲۴)

به دلیل اینکه لایه‌های باطله فرآوری بسیار نازک است، نگرانی‌ها در مورد فشار آب منفذی که در روش اول وجود داشت کاهش می‌یابد. همچنین، انتظار می‌رود آبگیری باطله فرآوری به میزان قابل توجهی انجام گیرد. علاوه‌براین، به دلیل این‌که سنگ‌های باطله نسبت به باطله فرآوری بسیار زیاد هستند، مقدار قابل توجهی سنگ باطله در لابه‌لای لایه باطله فرآوری قرار خواهد گرفت. مزایای این روش شامل هزینه کم و رصد کردن آسان نتایج با چشم است. این سیستم نیازمند قضاوت‌های زیاد اپراتورها بویژه در طی فصول مرطوب برای اجتناب از تخلیه رسوبات و فرسایش است. نگرانی‌های مربوط به ناهمگنی در مخلوط احتمال دارد منجر به طراحی‌های محافظه‌کارانه‌تر شود (۲۴).

مثالی از روش دفن هم‌زمان در Cerro de Maimon جمهوری دومنیکن

- مقدمه

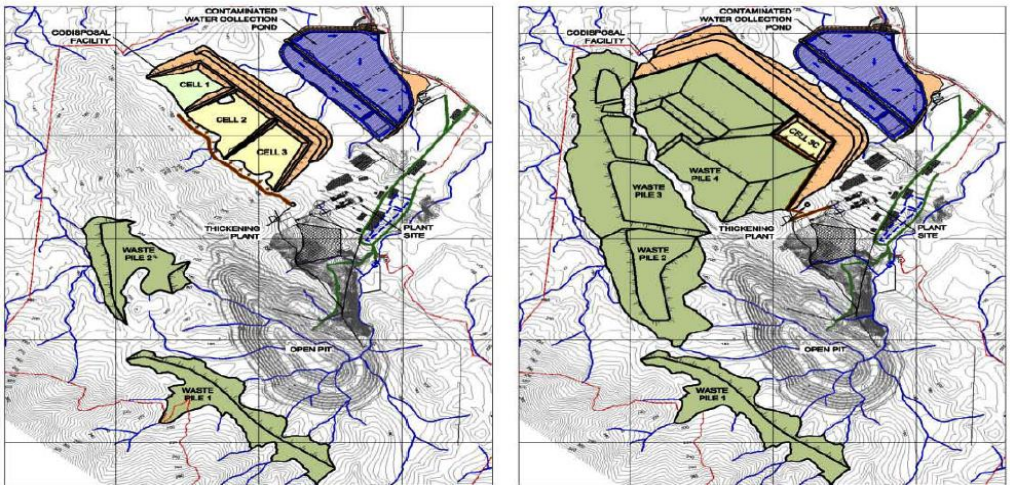
معدن Cerro de Maimon یک معدن روباز قرار گرفته در ۷۵ کیلومتری شمال غربی Santo Domingo در جمهوری دومنیکن است. این معدن کنسانتره‌های طلا و مس تولید می‌کند. نرخ اسمی فرآوری معدن ۲۵۰۰ تن در روز است. معدن تولید ۱۴ میلیون تن سنگ روباره خنثی، ۴/۸ میلیون تن سنگ باطله مستعد تولید زهاب اسیدی[1](PAG)، ۲۷/۲ میلیون تن سنگ باطله خنثی، و ۵/۲ میلیون تن باطله‌های فرآوری مستعد تولید اسید می‌نماید. واحدهای سنگ‌شناسی اصلی در این معدن شامل کلریت شیست، کوارتز-کلریت شیست، سولفید توده‌ای[2](کانسنگ)، توف و سنگ آهک می‌شود. ضخامت زون هوازده در ناحیه معدن روباز از ۱۰ تا ۴۰ متر متغیر است. در نهایت معدن روباز دارای عمق تقریبی ۱۳۷ متر خواهد بود (۲۸). محلی که معدن در آن واقع شده، به لحاظ لرزه‌ای فعال است. میانگین بارندگی و تبخیر در سایت معدن به ترتیب برابر با ۲۰۱۲ میلی‌متر و ۱۷۱۰ میلی‌متر است. دمای متوسط سالیانه برابر با 26^oC و دمای تابستان از ۲۱ تا 35^oC و دما زمستان از ۱۷ تا 32^oC متغیر است (۲۸).

- مدیریت باطله فرآوری و سنگ باطله در این سایت

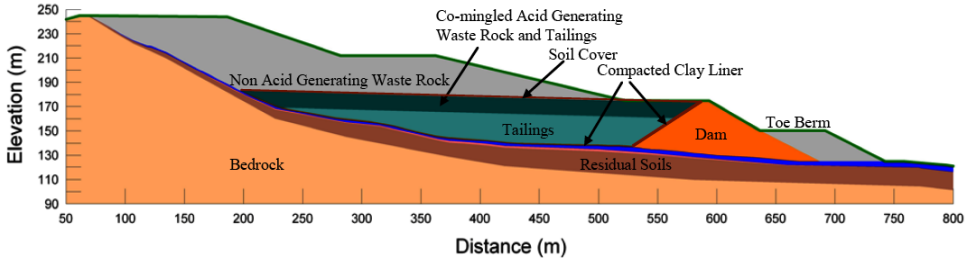
سنگ‌های باطله و روباره خنثی به لحاظ تولید زهاب اسیدی به صورت جداگانه دپو می‌شوند. این طرح وجود دارد تا سنگ باطله و باطله‌های فرآوری PAG به طور هم‌زمان دفن شوند و سپس مقداری از سنگ باطله خنثی بر روی آن قرار داده شود (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). دفن هم‌زمان باطله‌های فرآوری و سنگ باطله PAG به این دلیل انتخاب شده است تا تشکیل زهاب اسیدی معدن را از سنگ باطله PAG حداقل نماید. هم‌چنین این سایت دارای فضای محدود برای دفن جداگانه این دو جریان باطله است.

1-Potentially acid generating (PAG)

2-Massive sulphide



شکل ۱۱- طرح کلی قرارگیری تاسیسات دفن هم‌زمان سایت Cerro de Maimon در دو مرحله (۲۸)

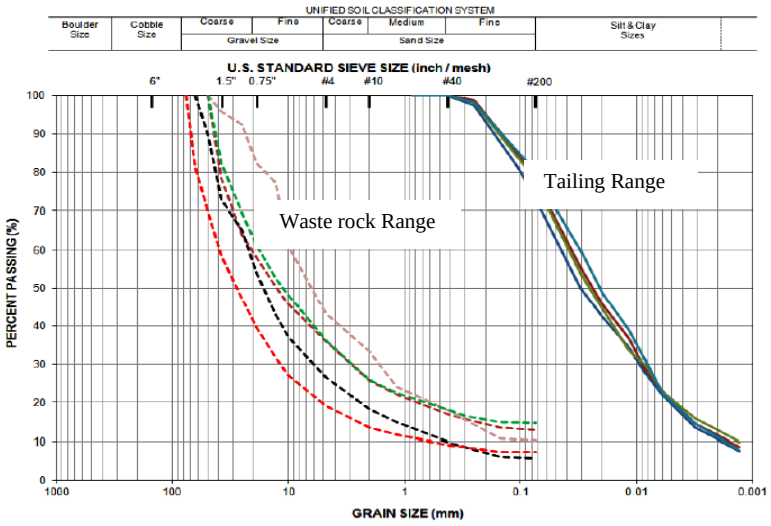


شکل ۱۲- سطح مقطع عرضی تاسیسات نهایی دفن هم‌زمان سایت Cerro de Maimon (۲۸)

- خصوصیات باطله‌های تیکنر شده و سنگ باطله PAG

باطله‌های فرآوری، تیکنر شده تا درصد جامد آن به ۵۵ تا ۶۰٪ قبل از ارسال برای دفن برسد. توزیع ابعادی نمونه‌های گرفته شده از باطله تیکنر شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد باطله‌ها محتوی ۲۰ تا ۳۰٪ ذرات ماسه‌ای کوچک و ۷۰ تا ۸۰٪ ذرات در حد سیلت و رس است. حد مایع شوندگی متوسط[1] حد پلاستیک شوندگی[2] و اندیس پلاستیک شوندگی[3] به ترتیب برابر با ۲۵٪، ۱۹٪ و ۷ است. وزن مخصوص متوسط باطله‌ها ۳/۱۳ است. نسبت منفذی متوسط باطله‌های تیکنر شده برابر با ۱/۱ است. پیک مقاومت برشی زهکش نشده باطله‌های خشک شده (پس از دو هفته نهشته کردن) تقریباً برابر با ۵ کیلوپاسکال است. سنگ باطله PAG دارای ۷ تا ۱۶٪ ذرات دانه‌ریز است که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. همچنین تست‌های انجام شده بر روی دو نمونه سنگ باطله PAG نشان داد که نسبت منفذی از ۰/۲۹ تا ۰/۴۱ متفاوت است (۲۸).

1-The average liquid limit
2- Plastic limit
3- Plasticity index



شکل ۱۳- توزیع ابعادی منفذی سنگ باطله PAG و باطله فرآوری تیکنر شده سایت Cerro de Maimon (۲۸)

- آزمایشات ارزیابی روش دفن‌همزمان در محل

آزمایشاتی در محل در دو مرحله انجام شد تا استراتژی بهینه دفن همزمان باطله‌های تیکنر شده و سنگ باطله PAG تعیین شود. مرحله نخست شامل تست‌های بررسی کارایی استراتژی‌های مختلف دفن همزمان با هدف شناسایی استراتژی بهینه است و مرحله دوم شامل تست‌های تفصیلی به منظور بررسی عملکرد استراتژی بهینه دفن همزمان بود (۲۸).

استراتژی نخست دفن همزمان شامل حمل سنگ باطله PAG به حاشیه باطله تیکنر شده خشک شده با استفاده از تراک و سپس پخش کردن آن به صورت یک لایه نازک بر روی باطله فرآوری خشک شده توسط یک بولدوزر CAT D6 است (شکل ۱۴-الف). در استراتژی دوم دفن‌همزمان ابتدا حوضچه‌ای توسط خاک‌ریزهایی از سنگ باطله ایجاد می‌شود و باطله فرآوری تیکنر شده در آن ریخته می‌شود. سپس بلافاصله یک لایه سنگ باطله با ضخامت تقریبی ۱ متر بر روی آن توسط بولدوزر پخش می‌شود (شکل ۱۴-ب). دفن همزمان نوع ۳ در سلول مشابهی با سلول محصور ساخته شده برای دفن همزمان نوع دوم تست شد. این تست شامل ریختن سنگ باطله PAG توسط بیل مکانیکی از ارتفاع بالا بر روی باطله‌های فرآوری تازه نهشته شده می‌شود (شکل ۱۴-ج).

شکل ۱۴- دفن همزمان سنگ باطله و باطله فرآوری در استراتژی الف) اول، ب) دوم و ج) سوم (۲۸)

اشکال ۱۵ الف تا ج سطح مشترک باطله فرآوری و سنگ باطله را به ترتیب در استراتژی‌های اول تا سوم نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود اختلاط باطله در هیچ کدام از سه استراتژی دفن همزمان رخ نمی‌دهد. این مورد برای استراتژی اول قابل قبول است زیرا سنگ باطله بر روی باطله فرآوری خشک شده ریخته می‌شود و قاعدتاً اختلاطی نیز رخ

نمی‌دهد. در استراتژی‌های دوم و سوم با توجه به این‌که باطله فرآوری تازه نهشته شده است انتظار می‌رود که پس از قراردادن سنگ باطله بر روی آن مقداری اختلاط صورت گیرد ولی بر خلاف انتظار این امر به‌وقوع نمی‌پیوندد. دلیل این امر آن است که پس از ریختن سنگ باطله، باطله فرآوری پس زده می‌شود و عملاً اختلاطی رخ نمی‌دهد. همچنین گودال‌هایی در لایه سنگ باطله حفر شد تا به سطح لایه باطله فرآوری برسد. شکل‌های ۱۶ الف تا ج گودال‌های حفر شده در سنگ باطله به ترتیب استراتژی اول تا سوم نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در گودال آزمایشی استراتژی اول آب دیده می‌شود (شکل ۱۶-الف) ولی در گودال‌های استراتژی دوم و سوم آبی دیده نمی‌شود (شکل ۱۶-ب و ج). این امر می‌تواند نشانه‌ای از متراکم‌شدگی قابل توجه باطله فرآوری در نتیجه وزن سنگ باطله قرار گرفته بر روی آن در استراتژی اول باشد. براساس این نتایج، استراتژی اول دفن هم‌زمان که در آن لایه‌ای از سنگ باطله PAG بر روی باطله فرآوری خشک شده قرار داده می‌شود به عنوان استراتژی بهینه تشخیص داده شد.

شکل ۱۵- سطح مشترک سنگ باطله و باطله فرآوری در استراتژی‌های الف) اول، ب) دوم و ج) سوم (۲۸)

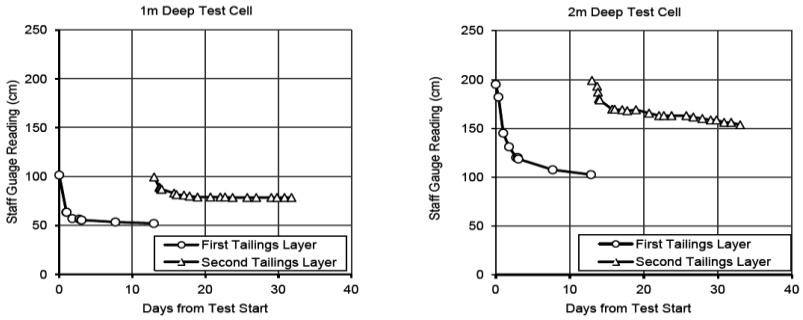
شکل۱۶- الف) گودال‌های حفر شده در سنگ باطله تا رسیدن به سطح باطله در استراتژی الف)اول، ب) دوم و ج) سوم (۲۸)

مرحله دوم تحقیق صرفاً بر روی طرح دفن هم‌زمان ترجیح داده شده در مرحله اول آزمایشات انجام گرفت. هدف این تحقیق آن بود تا جزئیات استراتژی دفن هم‌زمان لایه‌ای بکار گرفته شده تعیین شود. برای این منظور، دو سلول نهشته‌سازی به ابعاد ۹ متر در ۹ متر ساخته شد و یک سلول توسط یک متر و سلول دیگر توسط ۲ متر باطله فرآوری پر شد. سلول‌های تست، مجهز به سنسورهای اندازه‌گیری رطوبت متصل به ثبت کننده داده[1]، شاخص اندازه‌گیری ارتفاع[2] و یک صفحه تهنشینی[3] گردید. شکل ۱۷-الف چیدمان آزمایش را نشان می‌دهد. پس از ریختن باطله فرآوری به داخل سلول‌ها (شکل ۱۷-ب)، اجازه داده شد تا باطله‌ها تهنشین شوند و پیرامون سلول باز شد تا آب زلال شده سرریز شود. در طی فاز خشک شدن که به مدت ۱۳ روز طول کشید، باطله‌ها به طور روزانه رصد شدند و توسعه مقاومت برشی، مکش[4] محتوی رطوبت و عقب نشینی ساحل اندازه‌گیری شد.

1-Moisture sensors connected to a data logger
2-Staff gauge
3-Settlement palte
4-Suction

شکل ۱۷- سلول‌های آزمایش الف)قبل از ریختن باطله فرآوری ب) بعد از ریختن باطله فرآوری (۲۸)

شکل ۱۸ ته‌نشینی مشاهده شده در سطح سلول یک و دو بعد از ریختن باطله فرآوری را نشان می‌دهد. در هر دو سلول تست، عمده کاهش ارتفاع در طی ۴ روز نخست ته‌نشینی اتفاق می‌افتد. باطله‌ها سپس اجازه داده شد تا برای ۱۰ تا ۱۵ روز خشک شوند که پس از آن هیچ‌گونه کاهش ارتفاع مهم سطح باطله اندازه‌گیری نشد (۲۸). پس از خشک شدن نسبی باطله‌های فرآوری، هر دو سلول توسط لایه‌هایی از سنگ باطله PAG به ضخامت ۱ متر توسط بیل مکانیکی پوشانده شدند (شکل ۱۹ الف و ب) (۲۸).

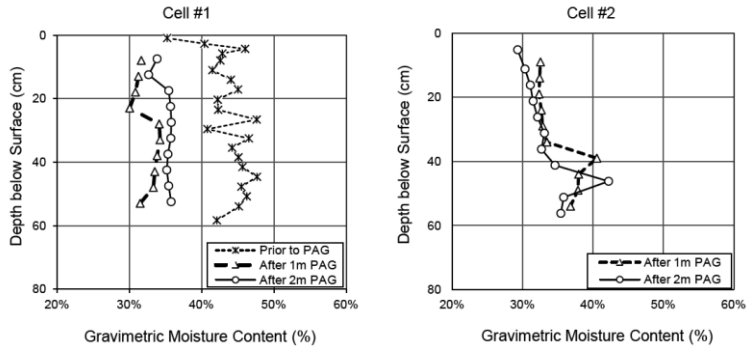


شکل ۱۸-ته‌نشینی سطح باطله قبل از قرار دادن سنگ باطله PAG (۲۸)

شکل ۱۹- قرار دادن لایه سنگ باطله PAG در سلول الف) با عمق یک متر باطله فرآوری ب) با عمق دو متر باطله فرآوری (۲۸)

ته‌نشینی تحت فشار باطله های فرآوری به دلیل قرارگیری سنگ باطله PAG بر روی آن با استفاده از ارزیابی داده‌های صفحات ته‌نشینی نصب شده در بالا و پایین لایه‌های باطله فرآوری تخمین زده شد. متراکم‌شدگی قابل توجه باطله‌های فرآوری ناشی از قرار دادن سنگ باطله PAG در طی یک روز پس از قرارگیری آن مشاهده شد. قرار دادن اولین لایه از سنگ باطله PAG منجر به ۵/۷cm و ۱۴/۶ cm ته‌نشینی به ترتیب برای سلول‌های ۱ و ۲ شد. متراکم‌سازی پس از اولین روز ناچیز بود. این امر نشان می‌دهد که متراکم‌سازی باطله‌ها سریع اتفاق می‌افتد. ته‌نشینی کلی تقریباً ۷/۴cm و ۱۶/۶cm (به عبارتی تقریباً ۱۰٪ کرنش) به ترتیب برای سلول‌های ۱ و ۲ بود (۲۸).

پروفیل محتوی رطوبت لایه باطله فرآوری بر روی نمونه‌های گرفته شده از هر سلول تست در طی مراحل زیر تعیین شد: قبل از قرار دادن اولین لایه سنگ باطله PAG، قبل از قرار دادن دومین لایه سنگ باطله PAG و نمونه‌گیری نهایی در انتهای آزمایش. شکل ۲۰ پروفیل محتوی رطوبت اندازه‌گیری شده لایه باطله فرآوری را نشان می‌دهد. قبل از نهشتن سنگ باطله PAG، پروفیل محتوی رطوبت یک روند کاهشی را در زون بالایی به دلیل خشک شدگی نشان می‌دهد. در زون میانی محتوی رطوبت با افزایش عمق زیاد شده و در زون پایینی به دلیل متراکم‌شدگی ناشی از وزن خودش کاهش می‌یابد. پس از قرار دادن اولین لایه سنگ باطله PAG، باطله‌های سلول یک متحمل کاهش محتوی رطوبت به میزان تقریبی ۱۱٪ و کاهش متناظر در نسبت منفذی به میزان تقریبی ۰/۳۵ می‌شود. پروفیل محتوی رطوبت در سلول ۲ روندهای مشابهی را نشان می‌دهد. قرار دادن یک لایه یک متری از سنگ باطله PAG بر روی باطله فرآوری به ارتفاع ۲ متر منجر به کاهش در محتوی رطوبت به میزان ۷/۵٪ و کاهش متناظر در نسبت منفذی به میزان تقریبی ۰/۲۳ می‌شود. کاهش بیش‌تر در محتوی رطوبت بواسطه قرار دادن دومین لایه از سنگ باطله PAG ناچیز است. نتایج پروفیل محتوی رطوبت پیشنهاد می‌کند که نهشتن لایه‌ای سنگ باطله PAG به میزان قابل توجهی نسبت منفذی باطله‌ها را کاهش می‌دهد. همان‌طور که انتظار می‌رود باطله‌های فرآوری به ضخامت ۱ متر، کاهش بیش‌تری در محتوی رطوبت را نسبت به باطله‌های فرآوری به ضخامت ۲ متر نشان می‌دهد. دانسیته خشک باطله‌ها از مقدار تقریبی ۱/۳ t/m^3 به ۱/۵ t/m^3 برای باطله‌های در سلول‌های تست افزایش می‌یابد (۲۸).



شکل ۲۰- پروفیل‌های محتوی رطوبت (۲۸)

مقاومت برشی باطله‌ها در سلول‌های تست، قبل و بعد از قرار دادن لایه‌های سنگ باطله PAG اندازه‌گیری شد. براساس آن مشخص گردید که قرار دادن سنگ باطله PAG منجر به افزایش قابل توجه در مقاومت برشی زهکش نشده باطله فرآوری می‌شود. قرار دادن لایه‌ای به ضخامت یک متر منجر به افزایش در مقاومت به میزان ۶۲ تا ۲۱۰٪ از سطح

تا عمق می‌شود. قرار دادن دومین لایه سنگ باطله PAG منجر به افزایش خالص در مقاومت به میزان ۲۵ تا ۴۲٪ از سطح تا عمق می‌شود (۲۸).

نتیجه‌گیری

یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی مرتبط با فعالیت‌های معدن‌کاری، دفن پسماندهای جامد آن‌ها است. در آینده نیز حجم این پسماندهای جامد به‌واسطه کاهش عیار ذخایر معدنی و نیاز بیشتر بشر به فلزات و مواد معدنی مختلف افزایش بیش‌تری خواهد یافت. در حال حاضر روش دفن متداول برای باطله‌های فرآوری، دفن در سدهای باطله است. ساخت این سدهای باطله می‌تواند به روش‌های بالارو، پایین‌رو و یا مرکزی انجام گیرد. سدهای باطله ساخته‌شده به روش پایین‌رو پایداری بسیار بیشتری نسبت به سدهای باطله ساخته‌شده به روش بالارو دارند ولی بزرگ‌ترین اشکال این روش لزوم دسترسی به مقدار زیادی ماسه برای بالا بردن دیواره سد است. تهیه ماسه به میزان کافی از مواد باطله ورودی به سد برای بالا بردن دیواره آن در ارتفاعی بالاتر از سطح آبگیری، به‌خصوص در مراحل اولیه کار ممکن است غیرعملی باشد. دفن باطله‌های فرآوری در گودال‌های ایجادشده پس از استخراج ماده معدنی می‌تواند راهکاری مناسب باشد که مهم‌ترین مزیت آن کاهش دست‌خوردگی زمین به‌واسطه فعالیت‌های معدن‌کاری است. هم‌چنین این نوع روش دفن، پایداری بیشتری نسبت به دفن باطله‌ها در سدهای باطله احداث‌شده در سطح زمین دارد. دفن باطله‌ها در زیردریا نیز می‌تواند راهکار مناسبی برای دفن باطله‌ها در مناطقی باشد که نزدیک به دریا بوده و زمین در دسترس برای فعالیت‌های معدن‌کاری کم باشد.

فناوری دفن هم‌زمان باطله‌های بخش استخراج و فرآوری جدیداً مورد توجه قرارگرفته است که در آن باطله‌های فرآوری در منافذ موجود در سنگ‌های باطله بخش استخراج دفن می‌شوند. این روش دفن باطله دارای مزایای بی‌شماری ازجمله کاهش دست‌خوردگی زمین به‌واسطه فعالیت‌های معدن‌کاری به‌واسطه ادغام مکان‌های دفن این دو نوع باطله، کاهش هزینه‌های مدیریت سد باطله، پایداری بیشتر مکان دفن باطله، کاهش تولید زهاب اسیدی و نشت زهاب‌های آلوده از سدهای باطله و کاهش خطرات مربوط به شکستن سد باطله است. نسبت اختلاط باطله‌های فرآوری و استخراج پارامتری کلیدی در عملیاتی بودن این روش است که معمولاً باید میزان باطله‌های بخش استخراج ۴ برابر باطله‌های فرآوری باشد. اختلاط این دو نوع باطله درروش دفن هم‌زمان می‌تواند به ۴ روش مختلف به انجام رسد که انتخاب روش اختلاط بستگی به شرایط محلی معدن دارد. این روش با توجه به مزایای بی‌شمار آن می‌تواند به‌عنوان روشی جدید در معادن ایران نیز مورد توجه قرار گیرد.

نتایج تست‌های انجام گرفته در سایت معدن Cerro de Maimon نشان داد که دفن هم‌زمان باطله‌های فرآوری و سنگ باطله به روش لایه‌ای در این سایت معدنی امکان‌پذیر است به این صورت که ابتدا باطله فرآوری قرار گیرد و پس از متراکم و خشک شدن متوسط آن، لایه‌ای از سنگ باطله به ضخامت ۱/۵ تا ۲ متر بر روی آن قرار داده شود.

منابع

1. Jones, H., Boger, D.V., 2012. Sustainability and Waste Management in the Resource Industries. Industrial and Engineering Chemistry Research, Vol. 51, pp. 10057-10065.
2. Lua, Z., Caib, M., 2012. Disposal methods on solid wastes from mines in transition from open-pit to underground mining, Procedia Environmental Sciences, Vol. 16, pp. 715 – 721.
3. El-Salam, A. R. A., Mining tailing and managements, B.Sc. Thesis, Tanta University, 2012.
4. Gowan, M., Lee, M., Williams, D. J., Co-disposal techniques that may mitigate risks associated with storage and management of potentially acid

generating wastes. In: Andy Fourie and Richard Jewell, Proceedings of the First International Seminar on the Reduction of Risk in the Management of Tailings and Mine Waste (MINE WASTE 2010), 29 September - 1 October 2010, Perth, Australia.

5. Myers, T.,2016. Acid mine drainage risks – A modeling approach to siting mine facilities in Northern Minnesota USA, Journal of Hydrology, Vol. 533, pp. 277–290.
6. Erguler, Z.A.E., Erguler, G.K., 2015. The effect of particle size on acid mine drainage generation: Kinetic column tests, Minerals Engineering, Volume 76, p.p. 154–167
7. Benzaazoua, M., Kongolo, M., 2003. Physico-chemical properties of tailing slurries during environmental desulphurization by froth flotation, International Journal of Mineral Processing, Volume 69, Issues 1–4, pp. 221–234.
8. Magdalinovic1, N., Trumic1, M., Petkovic, Z., Rajic, V., 2004. Cyanide elimination from lead-zinc flotation, The European Journal of Mineral Processing and Environmental Protection, Vol. 4, No. 1, pp. 30-35.
9. Lottermoser, B., Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts, 2nd edition, Springer, Netherland, 2007.
10. Leduc, M., Bachens, M., Smith, M. E., 1995. Design of the Lohan tailings dam, Mamut Copper Mining Sdn. Bhd., Malaysia. Minerals Engineering, Vol. 8, No. 6, pp. 705-712.
11. Wills, B. A., Finch, J. A., Tailing Disposal, Chapter 16, In: Will's mineral processing technology, Elsevier, Amsterdam, 2016.
12. Blowes, D.W., Ptacek, C.J., J. Jurjovec, 2003. Mill Tailings: Hydrogeology and Geochemistry. In: J.L. Jambor, D.W. Blowes, and A.I.M. Ritchie (Eds.), Environmental Aspects of Mine Wastes, Short Course Series Vol. 31, Mineralogical Association of Canada, pp. 95-116.
13. van Zyl, D., 2014. A perspective of innovations in tailings management. In: Anderson, C., et al., (Eds.), Mineral Processing and Extractive Metallurgy: 100 years of Innovation. SME, Englewood, CO, USA, pp. 629637.
14. Julien, M., Kissiova, M., 2011. Benefits and challenges of using tailings as foundation and construction material to increase capacity of tailings storage facilities. Proc. Symposium 2011 sur l'Environnement et les Mines, Rouyn-Noranda, Canada.
15. Belem, T., Benzaazoua, M., 2008. Design and application of underground mine paste backfill technology. Geotechnical and Geological Engineering, Vol. 26 (2), 147174.
16. Peyronnard, O., Benzaazoua, M., 2011. Estimation of the cementitious properties of various industrial by-products for applications requiring low mechanical strength. Resources, Conservation and Recycling, Vol. 56, No. 1, pp. 22-33.
17. Li, W., Fall, M., 2016. Sulphate effect on the early age strength and self-desiccation of cemented paste backfill, Construction and Building Materials, Vol. 106, pp. 296–304.
18. Aldhafeeri, Z., Fall, M., 2016. Time and damage induced changes in the

chemical reactivity of cemented paste backfill, Journal of Environmental Chemical Engineering, Vol. 4, pp. 4038–4049

19. Haiqiang, J., Fall, M., Cui, L., 2016. Yield stress of cemented paste backfill in sub-zero environments: Experimental results, Minerals Engineering, Vol. 92, pp. 141–150.
20. Breitenbach, A.J., Vector Engineering Inc. Golden, Colorado USA, Backfilling Depleted Open Pit Mines with Lined Landfills, Tailings Impoundments, and Ore Heap Leach Pads for Reduced Closure Costs, GeoAmericas 2008 Conference in Cancun, Mexico "Geosynthetics in Mining Applications".
21. SRK Consulting, In-pit tailings disposal at Langer Heinrich – tailings storage facilities in a unique hydrogeological setting C Hore and D Luppnow, Tailings and Mine Waste Management for the 21st Century, 27–28 July 2015, Sydney, NSW.
22. Park, J. H., Edraki, M., Baumgartl, T., 2016. A practical testing approach to predict the geochemical hazards of in-pit coal mine tailings and rejects, Catena, Article in press, DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.10.027
23. IIED, mining for the Future, Appendix A: Large Volume Waste Working Paper, Mining, Minerals and Sustainable Development, International Institute for Environment and Development (IIED), 2002.
24. Leduc, M., Bachens, M., Smith, M.E., Tailings Co-disposal™ & sustainable development, Special Symposium on Environmental Sustainability, 2004, SME Annual Meeting, Denver, Co.
25. Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A. R., Diez-Herrero, A., Pereira, H.G., 2008. Reported tailings dam failures: A review of the European incidents in the worldwide context, Journal of Hazardous Materials, Vol. 152, pp. 846–852.
26. Leduc, M., Smith, M. E., Tailings Co - Disposal™ Innovations for Cost Savings and Liability Reduction, The Latin America Mining Record, July/Aug. 2003.
27. Gowan, M., Codisposal, Golder Associates, See information in: http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&frm=1&source=web&cd=6&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjqzPuVhunPAhUjEpoKHSCwDc4QFgg8MAU&url=http%3A%2F%2Fwww.infomine.com%2Flibrary%2Fpublications%2Fdocs%2FCodisposalPresentation.ppt&usg=AFQjCNFprPqKKJxkQZ8P1jQ8lHO9algYlg
28. Habte, K., Bocking, K., Codisposal practices in mine waste management, Golder Associates, Project No. 09-1373-1004, Technical Memorandum, Feb 2012.