مدرسان شریف

فصل اول

«استخراج روباز»

کلیات و تعاریف

کانسار (Deposite): به یک توده ماده معدنی که باعث ایجاد یک ناهنجاری در زمین شده است، کانسار می‌گویند. این توده معدنی به‌صورت طبیعی تجمع یافته و فقط دارای اطلاعات زمین‌شناسی است. نام دیگر کانسار، منبع معدنی است.

ماده معدنی (Mineral): قسمتی از یک کانسار که در مطالعات امکان‌سنجی دارای ارزش اقتصادی بوده و برای استخراج، مناسب تشخیص داده شود. ماده معدنی ممکن است زمانی بدون ارزش اقتصادی باشد.

کانسنگ (Ore): قسمتی از ماده معدنی که با توجه به عوامل استخراجی، متالورژیکی، اقتصادی، سیاسی و ... مورد ارزیابی قرار گرفته و حتماً دارای ارزش اقتصادی است.

باطله (Futile): مواد اضافی و مزاحم که در یک کانسار همراه با ماده معدنی است و استخراج آن هزینه‌های زیادی دارد. باطله‌ها عموماً دارای ارزش اقتصادی نیستند و به دو نوع عمده تقسیم می‌شوند:

۱ـ ویست (waste): باطله‌هایی که هیچ ارزش اقتصادی پیدا نخواهند کرد و اصولاً در معادن روباز به‌صورت روباره وجود دارند.

۲ـ گانگ (gangue): باطله‌هایی که ممکن است زمانی ارزش اقتصادی پیدا کنند و فرآوری شوند. این باطله‌ها اصولاً به‌صورت کلوخه همراه با ماده معدنی وجود دارند.

مثال ۱: کدام‌یک از باطله‌های زیر ارزش اقتصادی بیشتری دارد؟

۱) ore ۲) waste ۳) gangue ۴) mineral

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» گزینه‌های ۱ و ۴ به ترتیب دارای ارزش اقتصادی زیادتری هستند، ولی جزء باطله محسوب نمی‌شوند. گانگ، زمانی، می‌تواند ارزش اقتصادی پیدا کند، در صورتی که ویست بدون ارزش باقی خواهد ماند.

نکته ۱: در صورت افزایش قیمت ماده معدنی، پیشرفت تکنولوژی، افزایش قدرت فرآوری و افزایش تقاضا، باطله‌های گانگ ارزش اقتصادی می‌یابند و فرآوری می‌شوند.

برخی از کانسنگ‌های اقتصادی به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

۱ـ فلزی: الف) آهنی: آهن و آلومینیوم ب) پایه: مس و سرب ج) رادیواکتیو: اورانیوم

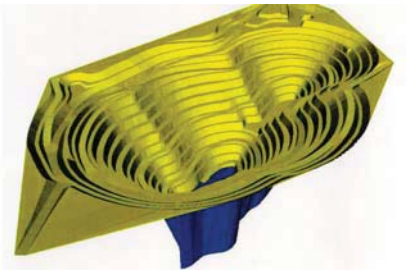
۲ـ غیرفلزی: الف) شن، ماسه، نمک ب) تزئینی: تراورتن، گرانیت ج) صنعتی: پتاس و سیلیس

۳ـ سوخت: زغال‌سنگ

استخراج روباز (Open Pit Mining)

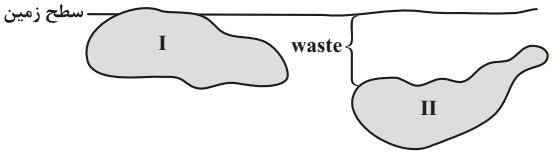
تمامی عملیات معدن‌کاری که در فضای روباز انجام می‌شود، تحت عنوان استخراج روباز است.

کاواک (Pit): حفره ایجادشده به‌منظور دسترسی به ماده معدنی در استخراج روباز کاواک نام دارد.



شماتیکی از یک کاواک

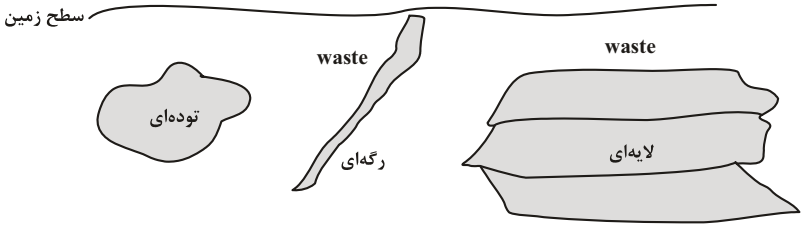
اولویت استخراج روباز:



۱ـ کانسار در سطح زمین رخنمون داشته یا به عبارتی در سطح زمین ماده معدنی بارز باشد.

۲ـ کانسار و مواد معدنی نزدیک به سطح زمین و استخراج آن به روش روباز در نهایت اقتصادی است.

نکته ۲: در روش استخراج روباز، ماده معدنی می‌تواند توده‌ای، رگه‌ای یا لایه‌ای باشد.



مثال ۲: کدام‌یک از عوامل زیر در جهت اقتصادی‌شدن باطله مؤثر نیست؟

۱) افزایش قیمت ماده معدنی ۲) افزایش قدرت فرآوری ۳) افزایش تقاضا ۴) افزایش ذخیره معدنی

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» گزینه‌های ۱، ۲ و ۳ هر سه از عوامل اقتصادی‌شدن باطله‌هایی هستند که حداقل ماده معدنی را همراه خود دارند (گانگ) و این باعث می‌شود تا باطله مورد توجه قرار گیرد. با کشف محدوده‌های جدید معدنی و افزایش ذخیره‌های معدن، کانسنگ مورد توجه قرار می‌گیرد و باطله‌ها از توجه خارج می‌شوند. به همین دلیل افزایش ذخیره‌های معدنی در اقتصادی‌شدن باطله مؤثر نیست.

روند عمر معادن روباز یا زیرزمینی

۱ـ برخی معادن به‌صورت روباز آغاز شده و روباز نیز تمام می‌شوند. ذخایر این معادن دارای گسترش زیاد و در عمق کمی از زمین واقع هستند.

۲ـ برخی از معادن به‌صورت روباز آغاز شده و زیرزمینی تمام می‌شوند. عمدتاً ذخایر این معادن در راستای عمق گسترش یافته‌اند و با افزایش عمق دسترسی به ماده معدنی، به‌صورت استخراج روباز دیگر به صرفه نیست.

۳ـ برخی از معادن به‌صورت زیرزمینی آغاز شده و روباز تمام می‌شوند. به دلیل تحول قیمت، در ابتدا روش روباز از نظر اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و بعدها با افزایش ناگهانی قیمت، مقرون به صرفه خواهد شد.

نکته ۳: طراحی‌های اشتباه در تغییر روش‌های روباز یا زیرزمینی نیز مؤثر است.

۴ـ برخی معادن به صورت زیرزمینی آغاز شده و زیرزمینی هم تمام می‌شوند. در این معادن ماده معدنی در عمق بسیار زیادی از سطح زمین قرار دارد.

مثال ۳: چرا در یک معدن که به صورت روباز آغاز شده، پس از مدتی، عملیات استخراج به روش زیرزمینی تغییر می‌یابد؟

۱) ماده معدنی در عمق بسیار زیادی قرار دارد. ۲) قیمت ماده معدنی به شدت افزایش می‌یابد.

۳) ماده معدنی گسترش عمقی بسیار زیادی دارد. ۴) ماده معدنی در عمق بسیار کمی قرار دارد.

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» ماده معدنی چون نزدیک به سطح زمین بوده، در آغاز عملیات روباز به صرفه است. به تدریج با افزایش عمق و دسترسی به ماده معدنی روش روباز به علت باطله‌برداری‌های زیاد دیگر مقرون به صرفه نبوده و از روش زیرزمینی در عمق‌های بیشتر استفاده می‌شود.

عوامل مؤثر در اقتصادی‌شدن یک کانسار

برخی عوامل در اقتصاد کانسارها تأثیر زیادی دارند و روند استخراج آن را دستخوش تأثیرات خود قرار می‌دهند. این عوامل به دو گروه **درونی** و **بیرونی** تقسیم می‌شوند:

۱ـ عوامل درونی (inner): این عوامل مربوط به ذات ماده معدنی و غیرقابل تغییر است، مانند جنس ماده معدنی، درصد خلوص و شکل توده معدنی.

۲ـ عوامل بیرونی (outer): این عوامل مربوط به محیط و تأثیر انسان‌هاست که قابل تغییر است، مانند بازار مصرف، قیمت کانسنگ، پرسنل، جاده‌های دسترسی، تأمین انرژی، وضعیت سیاسی اجتماعی و غیره.

عمر معدن

معدن‌کاری به صورت مراحل زیر انجام می‌شود:

۱ـ پی‌جویی

پی‌جویی به صورت پیمایش با هدف اثبات ماده معدنی در یک محدوده بسیار وسیع انجام می‌شود. در این مرحله از روش‌های زمین‌شناسی، ژئوشیمی یا زمین‌آمار هم استفاده می‌شود.

۲ـ اکتشاف

مطالعه روی اطلاعات مرحله پی‌جویی و یافتن حداکثر گسترش محدوده در حداقل زمان و هزینه را مرحله اکتشاف می‌گویند. در مرحله اکتشاف، هدف دقیق‌تر بررسی می‌شود و سودآوری آن ارزیابی می‌گردد. از مزایای اکتشاف می‌توان به کاهش هزینه‌ها، انتخاب تجهیزات، ماشین‌آلات و تأسیسات، طراحی‌های اولیه و اقتصادی اشاره کرد. این مرحله خود به سه روش اصلی به صورت زیر تقسیم می‌شود:

الف) اکتشاف مقدماتی: در این مرحله با مطالعات فنی و اقتصادی، امکان‌پذیری معدن بررسی می‌شود.

ب) اکتشاف تفضیلی: در این مرحله پارامترهای طراحی معدن در سطح و عمق بررسی می‌شود. این مرحله نسبت به اکتشاف مقدماتی با دقت بیشتر انجام می‌شود.

ج) اکتشاف تکمیلی: پارامترهای جزئی‌تر و دقیق‌تر مانند عیار و تناژ در این مرحله بررسی می‌شود. در اکتشاف تکمیلی مطالعات فنی و اقتصادی خیلی دقیق‌تر از مراحل قبلی صورت می‌گیرد. همچنین وسعت محدوده مورد مطالعه کاهش می‌یابد.

نکته ۴: در مراحل اکتشافی به ترتیب از مقدماتی تا تکمیلی، دقت مطالعات و هزینه هر مرحله افزایش می‌یابد و وسعت محدوده کم می‌شود تا به طور جزئی‌تر، پارامترها ارزیابی شوند.

نکته ۵: گزارش‌هایی که پس از پایان هر مرحله به صورت جامع نوشته می‌شود تا مجوز مرحله بعد دریافت شود، **امکان‌سنجی** نام دارد.

نکته ۶: محتوای امکان‌سنجی شامل موقعیت جغرافیایی، زمین‌شناسی، زیست محیطی، طراحی، محاسبات، تجهیزات، تأسیسات، امور اداری و بازار است.

محاسبات و تخمین ذخیره

اگر V ، ρ و g به ترتیب حجم، وزن مخصوص و عیار ماده معدنی باشند، وزن کانسار و ضریب بازیابی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{وزن کانسار} = \rho V$$

$$\text{وزن کل ماده معدنی} = \rho V g$$

$$\text{ضریب بازیابی } (C\%) = \frac{\text{وزن ماده معدنی قابل استخراج}}{\text{وزن کل ماده معدنی}} \Rightarrow \text{وزن ماده معدنی قابل استخراج} = \rho V g C$$

نکته ۷: به درصد عنصر یا فلز موجود در سنگ، عیار گفته می‌شود.

مثال ۴: در یک معدن مس پورفیری با عیار ۰/۶% اگر ضریب بازیابی ۱۰% افزایش پیدا کند، وزن کل ماده معدنی چند درصد افزایش می‌یابد؟ (تن ۲۰۰۰۰۰ = وزن کانسار)

۱) ۰ ۲) ۱۰ ۳) ۹۰ ۴) ۵۰

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» وزن کل ماده معدنی مستقل از ضریب بازیابی است. ضریب بازیابی فقط روی ماده معدنی قابل استخراج اثر می‌گذارد.

مدرسان شریف

فصل دوم

«روش‌های استخراج روباز»

مقدمه

سیکل عملیات استخراج روباز به صورت زیر است:

۱ـ آماده‌سازی سطحی ۲ـ حفاری روباره (باطله) ۳ـ انفجار روباره ۴ـ حمل و نقل روباره

۵ـ حفاری کانسنگ ۶ـ انفجار کانسنگ ۷ـ حمل و نقل کانسنگ ۸ـ بازسازی

در منابع متعدد این عملیات به طور کلی به صورت آماده‌سازی، حفاری و آتشباری، بارگیری، باربری و بازسازی ذکر شده است. این عملیات در تمامی معادن روباز با تفاوت‌هایی در کاربرد، ماشین‌آلات و تجهیزات طراحی انجام می‌شود.

روش‌های استخراج روباز براساس وضعیت توپوگرافی سطح زمین، نحوه تمرکز کانسار و وضعیت هندسی آن به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

۱) روش‌های استخراج مکانیکی ۲) روش‌های استخراج آبی

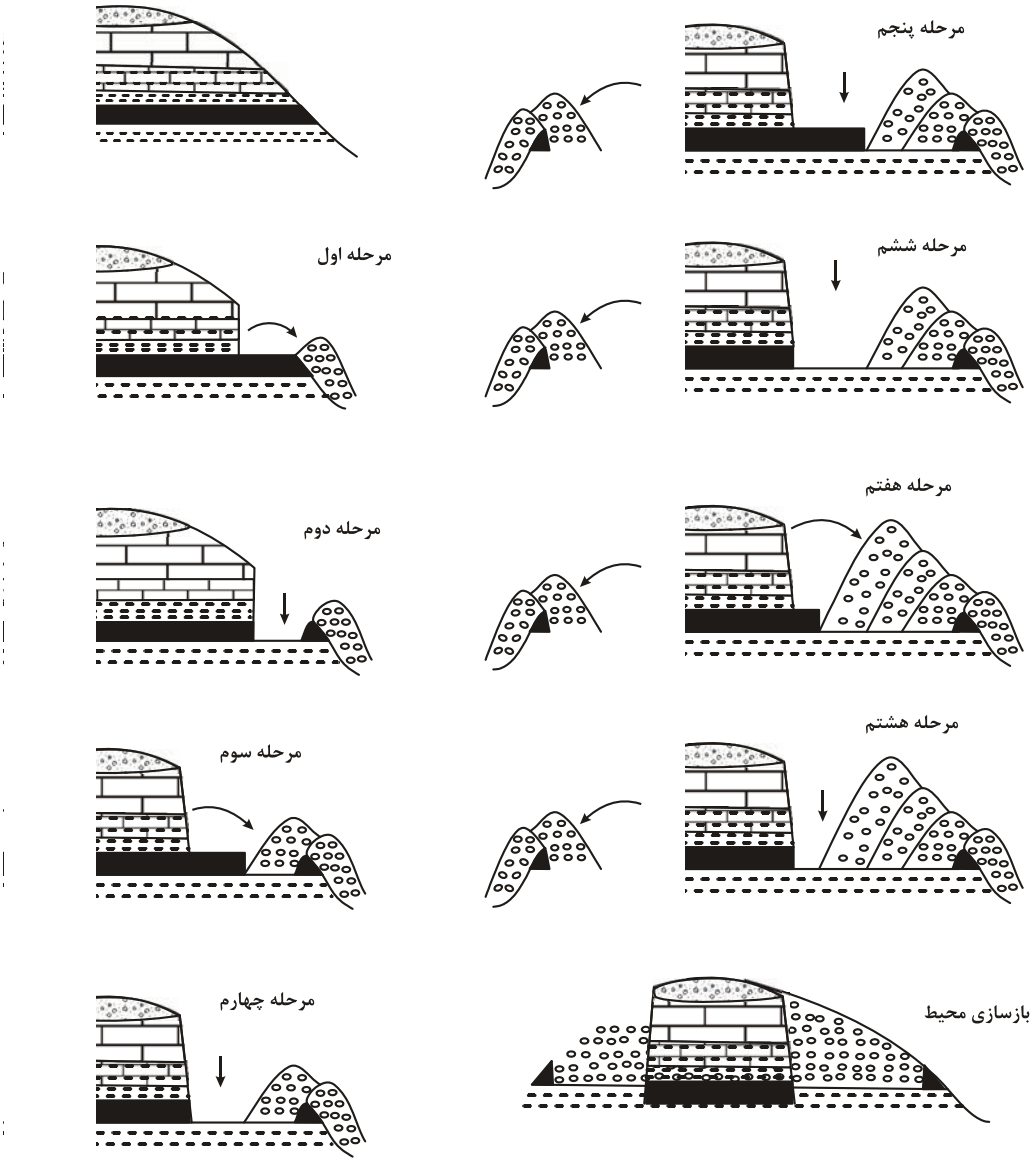
روش‌های استخراج مکانیکی

۱ـ روش استخراج نواری (Strip mining method):

روش استخراج نواری خود شامل سه روش مسطح، کنتوری و دوسر کنتور است که هر یک در ادامه توضیح داده می‌شود:

الف) استخراج کنتوری (Contour mining):

این روش در مناطقی با توپوگرافی شیب‌دار و کوهستانی که ماده معدنی در سطح یا دامنه رخنمون داشته باشد، به‌کار برده می‌شود. در این روش، باطله یا روباره استخراج و در دامنه محل استخراج قبلی ریخته و سپس ماده معدنی استخراج می‌شود. این روند تا جایی که نسبت باطله به ماده معدنی از نظر اقتصادی مقرون به صرفه باشد، ادامه می‌یابد و در صورت باقی‌ماندن ماده معدنی، استخراج به صورت زیرزمینی یا روش ثانویه اوگر (Auger) انجام می‌شود. شکل مراحل استخراج کنتوری برای یک لایه زغالی و مراحل مختلف استخراج کنتوری برای یک لایه زغال را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.



مراحل استخراج کنتوری برای یک لایه زغالی

همان‌طور که در شکل بالا نمایان است، در مرحله اول، باطله روی لایه زغال استخراج شده و به دامنه کوه منتقل می‌شود. در مرحله دوم بخشی از لایه زغال که به سطح آزاد رسیده است، استخراج می‌شود. مرحله سوم، مقدار باطله به ازای پیشروی مجاز، برداشت شده و به جای ماده معدنی استخراج‌شده مرحله قبلی ریخته می‌شود، سپس لایه زغال بازشده استخراج می‌شود. مراحل بعدی تا جایی که نسبت باطله‌برداری مقرون به صرفه باشد، ادامه می‌یابد و اگر ماده معدنی باقی ماند، با روش‌های ثانوی استخراج می‌شود. در نهایت باید محیط به حالت اولیه و طبیعی خود بازگردانده شود.

نکته۱: نسبت باطله‌برداری (Stripping ratio) عبارت است از: میزان باطله برداشت‌شده به ماده معدنی استخراجی.

نکته۲: از مزایای روش استخراج کنتوری می‌توان به کاربرد در لایه‌های زغال کم‌عمق، هزینه استخراجی کم، توان تولید زیاد، سیکل عملیات بارگیری و باربری پیوسته و دمپ و انباشت باطله در خود محدوده اشاره کرد. محدودیت کاربرد در عمق کم با رعایت نسبت $\frac{W}{O}$ (نسبت باطله‌برداری: $\frac{Waste}{Ore}$)، محدودیت ضخامت ماده معدنی و افزایش نسبت باطله‌برداری در مراحل بعدی از جمله معایب این روش هستند.

تذکر۱: برنامه‌ریزی تولید و مدیریت آن در این روش براساس استخراج کانسنگ است. برنامه‌ریزی باید به گونه‌ای باشد که به جز سال اول و آخر، در طی عمر معدن، حجم عملیاتی ثابت باشد. بدین منظور باید نسبت باطله‌برداری در ابتدا محاسبه شود.

مثال۱: کدام‌یک از گزینه‌های زیر در مورد روند استخراج روباز صحیح است؟

۱) حفاری باطله، انفجار باطله، حفاری و انفجار کانسنگ، باربری و بازسازی.

۲) حفاری باطله، آماده‌سازی، بارگیری و باربری، آتشباری ماده معدنی و بازسازی.

۳) آماده‌سازی، آتشباری، حفاری، بارگیری و باربری و بازسازی.

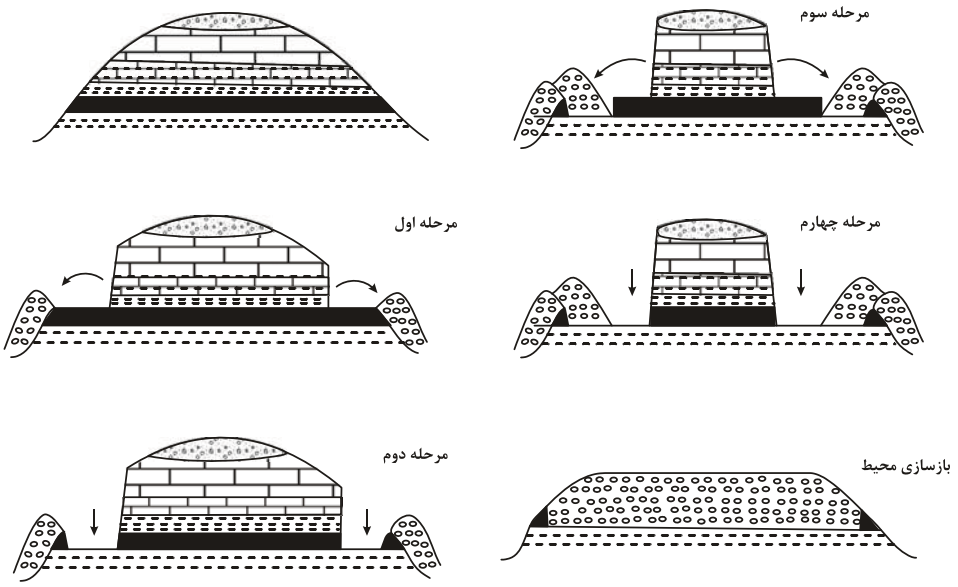
۴) آماده‌سازی، حفاری و انفجار، باربری، بارگیری، بازسازی.

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» مراحل عملیات روباز به صورت آماده‌سازی، حفاری باطله، آتشباری باطله، بارگیری و باربری باطله، حفاری کانسنگ، آتشباری کانسنگ، بارگیری و باربری کانسنگ و بازسازی محیط است. گزینه ۱ بهترین تطبیق از لحاظ ترتیب مراحل استخراج را با سیکل عملیات دارد.

ب) دوسر کنتور یا تعدیل‌یافته (Mountain Top Contour):

چنانچه گستردگی لایه ماده معدنی به صورتی باشد که از دو سمت دامنه رخنمون داشته باشد، از این روش استفاده می‌شود. این روش مشابه روش قبل تا جایی که استخراج اقتصادی باشد، انجام می‌شود.

در صورتی که نسبت باطله‌برداری $(\frac{W}{O})$ از حد اقتصادی فراتر رود، از روش شبه‌زیرزمینی یا اوگر استفاده می‌شود تا کل ماده معدنی استخراج شود. شکل زیر شماتیکی از مراحل استخراج دوسر کنتور را نشان می‌دهد.



مراحل استخراج دوسر کنتور لایه زغال

ج) استخراج سطحی(Area Mining): این روش برای موادی معدنی به‌کار می‌رود که در مناطق با توپوگرافی آرام و کم‌شیب قرار دارند و لایه‌های کم‌ضخامت موازی با سطح دارند. این روش تقریباً مشابه روش کنتوری است و با برش‌های جعبه‌ای استخراج انجام می‌شود. برش‌ها به موازات برش اولیه به ترتیب باطله و ماده معدنی صورت می‌گیرد تا کل ماده معدنی استخراج شود. در استخراج سطحی معمولاً به روش‌های ثانویه یا زیرزمینی نیازی پیدا نمی‌شود و در طول عملیات، نسبت باطله‌برداری و هزینه‌ها ثابت می‌ماند. در شکل، استخراج سطحی یک لایه زغال مقطعی از روش استخراج سطحی یک لایه زغال نشان داده شده است.

مدرسان شریف

فصل سوم

«برنامه‌ریزی معادن روباز»

مقدمه

در این فصل بعضی از فعالیت‌های برنامه‌ریزی در یک معدن روباز، مورد بحث قرار خواهد گرفت، در میان این فعالیت‌ها توجه ویژه به هزینه، درآمد، قیمت کنسانتره، روند قیمت فلزات، عیار حد و نسبت‌های باطله‌برداری معطوف خواهد شد. برنامه‌ریزی به معنای ایجاد طرح و بررسی‌های فنی و اقتصادی است که به منظور تولید و عملی‌کردن آن روی زمین انجام می‌شود و دارای سه هدف اصلی زیر است:

۱ـ حداقل‌کردن هزینه‌ها و تنظیم بر مبنای درآمد و حداکثر سوددهی (Cast)

۲ـ برنامه‌ریزی به منظور رسیدن به عیار مورد نظر (Grade)

۳ـ برنامه‌ریزی به منظور تولید و استحصال ماده معدنی (Production)

برای رسیدن به این اهداف در یک معدن بخش‌های زیر در نظر گرفته می‌شود.

امور اداری: مسئول امور پشتیبانی است.

مهندسی: مسئول طراحی معدن است.

عملیات: اجرای طرح‌های مهندسی را به عهده دارد.

ماشین‌آلات و تجهیزات: تنظیم برنامه تجهیزات و سرویس ماشین‌آلات

نکته۱: تغییر عیار، کمیّت ماده معدنی، قیمت محصول نهایی، شرایط جوّی، دسترسی به ماشین‌آلات و تغییر غیرقابل پیش‌بینی قیمت‌ها از عواملی هستند که ممکن است باعث تغییر برنامه‌ریزی شوند.

برنامه‌ریزی‌ها به طور کلی از نظر زمانی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

ـ بلندمدت: در این برنامه‌ریزی اهداف بلندمدت در نظر گرفته می‌شوند که کمتر به واقعیت نزدیک است و براساس احتمالات پیش‌بینی می‌شوند، به همین دلیل دارای خطای زیاد هستند.

ـ کوتاه‌مدت: در این برنامه‌ریزی از داده‌های روزمره استفاده می‌شود که قابل لمس هستند، به واقعیت نزدیک‌تر و دارای خطای کمتری هستند.

تجزیه و تحلیل اقتصادی

۱ـ هزینه و انواع آن: میزان مخارج مصرفی از ابتدای کار معدن تا انتهای آن هزینه نام دارد. هزینه‌ها با رویکردهای مختلف به‌صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

الف) هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی:

۱ـ هزینه سرمایه‌گذاری: هزینه‌هایی که قبل از تولید صورت می‌گیرد و مستمر نیست، مانند خرید، ماشین‌آلات یا تأسیس کارخانه فرآوری.

۲ـ هزینه عملیاتی یا جاری: هزینه‌هایی که جایگزین ندارند و از بین می‌روند. این هزینه‌ها به طور مستمر تا پایان عمر معدن مصرف می‌شوند، مانند هزینه‌های سوخت، تعمیر و نگهداری، مواد مصرفی آتشکاری و غیره.

نکته۲: محصول هزینه‌های سرمایه‌ای، کالای اسقاطی قابل فروش است در صورتی که هزینه‌های عملیاتی، کالای اسقاطی قابل فروش نیستند.

ب) هزینه‌های ثابت و متغیر:

۱ـ هزینه ثابت: هزینه‌ای که به حجم تولید در طی دوره بهره‌برداری وابسته نیست، مانند هزینه نگهبانی، سرویس رفت‌وآمد، آب و برق و غیره.

۲ـ هزینه متغیر: هزینه‌هایی که ارتباط مستقیمی با میزان تولید دارد، مانند مواد ناریه، تعداد کارگران و غیره.

ج) هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم:

۱ـ هزینه مستقیم: هزینه‌هایی که به حجم تولید وابسته هستند و قابل تغییر نیستند، مانند پرسنل.

۲ـ هزینه غیرمستقیم: هزینه‌هایی که نقش مستقیم در تولید ندارند و دارای منبع درآمد هم نیستند، مانند بازاریابی و حسابداری.

مثال۱: کدام‌یک از هزینه‌های زیر در اقتصادی‌بودن یک معدن نقش مهم‌تری دارند؟

۱) ثابت و غیرمستقیم ۲) مستقیم و عملیاتی ۳) عملیاتی و سرمایه‌گذاری ۴) مستقیم و متغیر

☑ **پاسخ:** گزینه «۱» هزینه‌های ثابت و غیرمستقیم (سربار) نقش مهمی در اقتصادی‌شدن معدن و قیمت تمام‌شده دارند، زیرا منعطف و قابل تنظیم هستند و با مدیریت بهتر می‌توان این امر را عملی کرد.

د) هزینه‌های مشهود و غیرمشهود:

۱ـ هزینه مشهود: هزینه‌هایی که آشکارا پرداخت می‌شوند و قابل لمس هستند. تمامی هزینه‌های عملیاتی از این قبیل هزینه‌ها هستند.

۲ـ هزینه غیرمشهود: هزینه‌هایی که خودبه‌خود مصرف شده و آشکار نیست، مانند استهلاک، زمان و غیره.

۲ـ درآمد

اقتصاد با سه پارامتر هزینه، درآمد و سود معنا می‌یابد. $P = I - C$

که در رابطه فوق: P سود، I درآمد و C هزینه است.

میزان عایدی که از فروش به‌دست می‌آید، درآمد نام دارد و تابع عیار ماده معدنی، قیمت ماده معدنی و راندمان عملیات است. $I = \eta.\bar{g}.P_u$

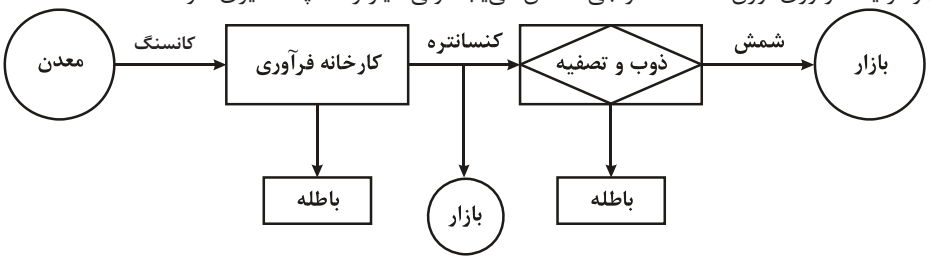
که در رابطه فوق: η راندمان عملیات، $\bar{g}$ عیار متوسط و P_u قیمت ماده معدنی است.

مثال۲: با تغییر کدام‌یک از پارامترهای زیر می‌توانیم درآمد را بیشتر کنیم؟

۱) عیار ۲) قیمت ماده معدنی ۳) راندمان عملیات ۴) هزینه

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» میزان عیار وابسته به طبیعت و تجمع عناصر و غیرقابل تغییر است. قیمت ماده معدنی هم تابع بازار مصرف و میزان عرضه و تقاضا است. بنابراین قابل تغییر نیست. میزان هزینه هم مستقل از درآمد است و تغییر آن، تغییری در درآمد به وجود نمی‌آورد. هرچه راندمان عملیات افزایش یابد، درآمد می‌تواند افزایش یابد. راندمان عملیات بسته به تجهیزات، مدیریت و تکنولوژی است که قابل تغییر هستند.

با پیشرفت در عملیات استحصال و فرآیند فرآوری، وزن ماده استخراجی کاهش می‌یابد، ولی عیار رشد چشمگیری خواهد داشت.



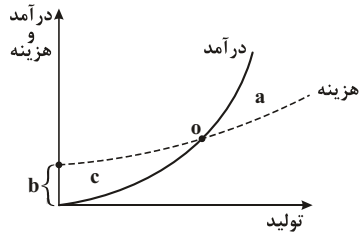
نکته۳: باطله‌های حاصل از کارخانه، دوباره می‌توانند فرآوری شوند. این امر با پیشرفت تکنولوژی، افزایش قیمت ماده معدنی و افزایش تقاضا عملی خواهد شد.

نکته۴: به کانسنگ فرآوری و تغلیظ‌شده که عیار فلز در آن به طور چشمگیری افزایش یافته است، کنسانتره می‌گویند.

تذکر۱: کنسانتره تغلیظ و پرعیار شده است، ولی مانند شمش از عناصر خالص نیست.

نکته۵: زمانی که درآمد و هزینه‌ها با هم برابر می‌شود، نقطه سربه‌سر نام دارد. درآمد کمتر از نقطه سربه‌سر، منجر به ضرردهی و درآمد بیشتر از نقطه سربه‌سر منجر به سوددهی می‌شود.

مثال۳: در نمودار زیر محدوده a و b چه مفاهیمی را در اقتصاد عنوان می‌کنند؟



۱) a هزینه متغیر- b هزینه مشهود

۲) a نقطه سربه‌سر- b هزینه عملیاتی

۳) a سوددهی- b هزینه اولیه

۴) a ضرردهی- b هزینه سرمایه‌گذاری

☑ **پاسخ:** گزینه «۳» هر یک از محدوده‌ها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

a : محدوده‌ای که درآمد از هزینه بیشتر شده، یعنی سوددهی دارد.

c : محدوده‌ای که درآمد از هزینه کمتر بوده و عملیات دارای ضرر است.

o : نقطه سربه‌سری است.

b : عرض از مبدأ هزینه‌ها، یعنی میزان هزینه ثابت را نشان می‌دهد.

مثال۴: کدام‌یک از عوامل زیر باعث کاهش قیمت ماده معدنی می‌شود؟

۱) افزایش کاربرد　　۲) افزایش جایگزینی فلزات　　۳) کاهش عرضه　　۴) پیشرفت تکنولوژی

☑ **پاسخ:** گزینه «۲» با جایگزین‌شدن فلزات به جای هم و کاربردهای مختلف آنها، میزان تقاضا برای آنها کاهش یافته، در نتیجه قیمت آنها نرخ نزولی می‌یابد.

۳ـ تعیین قیمت کنسانتره

فلزات در بورس قیمت مشخص دارند، ولی کنسانتره به دلیل مفهوم متغیر، قیمت خاصی ندارد. لذا این تعیین قیمت در درآمد نقش اساسی ایفا می‌کند.

عوامل مؤثر در قیمت کنسانتره

الف) درصد فلز اصلی موجود در کنسانتره و قیمت آن

ب) میزان ناخالصی‌های مفید موجود در کنسانتره مانند طلا، نقره و پلاتین در کنسانتره روی

ج) میزان ناخالصی‌های مضر موجود در کنسانتره مانند سیلیس، آرسنیک در کنسانتره روی

د) هزینه‌های عملیاتی ذوب و تصفیه (C_s)

محاسبه قیمت کنسانتره و درآمد حاصل از آن به‌صورت زیر است:

$$I_m = R.(g_m - C_۱).P_m$$

I_m : درآمد حاصل از ماده اصلی　　R : ضریب پرداخت　　$C_۱$: درصد کسر از عیار ماده اصلی(برای راندمان که همیشه ۱۰۰% نیست)

P_m : قیمت ماده اصلی　　g_m : عیار ماده اصلی

$$I_b = (g_b - C_۲).P_b$$

I_b : درآمد حاصل از ماده مفید(جایزه)　　g_b : عیار ناخالصی مفید　　P_b : قیمت ناخالصی مفید　　$C_۲$: درصد کسر از عیار برای ناخالصی مفید

$$C_h = C_b(g_h - C_۳)$$

C_h : جریمه ناخالص مضر　　C_b : جریمه واحد　　g_h : عیار ناخالصی مضر　　$C_۳$: درصد مجاز عیار ناخالصی مضر

با توجه به فرمول‌های بالا، میزان خالص دریافتی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$NSR = I_m + I_b - C_h - C_s = \underbrace{(I_m + I_b)}_{\text{درآمد}} - \underbrace{(C_h + C_s)}_{\text{هزینه}}$$

نکته۶: اگر عیار ناخالصی مضر کمتر یا مساوی حد مجاز باشد، در این حالت جریمه ناخالصی مضر، صفر است.

مثال۵: قرارداد فروش کنسانتره یک معدن سرب به یک کارخانه ذوب به شرح زیر است:

۱ـ بهای ۹۵% سرب موجود در کنسانتره پرداخت می‌شود.

۲ـ اگر کنسانتره دارای طلا باشد، ۵% آن (حداقل ۱/۵ گرم در هر تن) کسر شده و بقیه پرداخت می‌شود.

۳ـ اگر کنسانتره دارای نقره باشد، ۵% آن (حداقل ۵۰ گرم در هر تن) کسر شده و بقیه پرداخت می‌شود.

۴ـ جریمه‌های ناخالصی‌های آرسنیک، آنتیموان، بیسموت و جیوه به شرح زیر است:

آرسنیک برای هر ۰/۱%، ۳ دلار و حد مجاز آن ۰/۱%.

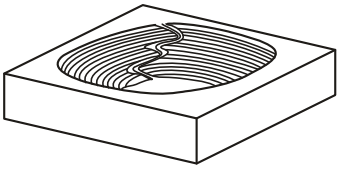
مدرسان شریف

فصل چهارم

«هندسه و حدود کاواک»

مقدمه

کانسارهایی که امروزه به روش روباز استخراج می‌شوند، از نظر شکل، عمق و امتداد تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای باهم دارند. با وجود این تفاوت‌ها، بعضی ملاحظات طراحی و برنامه‌ریزی مبتنی بر هندسه وجود دارد که برای تمام آن‌ها بنیادی است. شکل مقابل شماتیکی از یک معدن روباز را نشان می‌دهد.



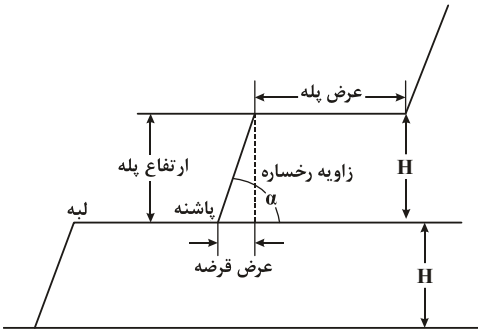
شماتیکی از یک کاواک

کانسار از بالا به پایین با مجموعه‌ای از برش‌های افقی با ضخامت یکسان که پله نام دارد، استخراج می‌شود. برای دسترسی به پله‌های مختلف، **جاده** یا **گذرگاه** احداث می‌شود. عرض و شیب این جاده به نوع تجهیزات و ماشین‌آلات بستگی دارد. زاویه شیب دیواره یک پارامتر هندسی مهم است که عملیات استخراج روباز از لحاظ فنی و اقتصادی به آن بستگی زیادی دارد. هریک از ماشین‌آلات معدن‌کاری علاوه‌بر هندسه فیزیکی خود، برای عملکرد مؤثر نیازمند فضای مناسب است. این فضای مورد نیاز موقع تعیین اندازه پله‌های کاری در نظر گرفته می‌شود.

طراحی در معدن روباز به‌منظور تعیین محدوده نهایی کاواک انجام می‌گیرد. این محدوده باید از لحاظ فنی و اقتصادی توجیه‌پذیر و امکان‌پذیر باشد. در این فصل علاوه‌بر ملاحظات هندسی، برخی از روش‌های تعیین محدوده نهایی کاواک تشریح می‌شوند.

پله (Bench)

ماهیت و اساس استخراج در یک معدن روباز، پله است. قسمت‌های مختلف یک پله در شکل زیر نشان داده شده است.



قسمت‌های مختلف یک پله

مثال ۱: فاکتور اصلی استخراج در یک معدن روباز کدام است؟

۱) جاده ۲) پله ۳) رمپ ۴) ماشین‌آلات بزرگ

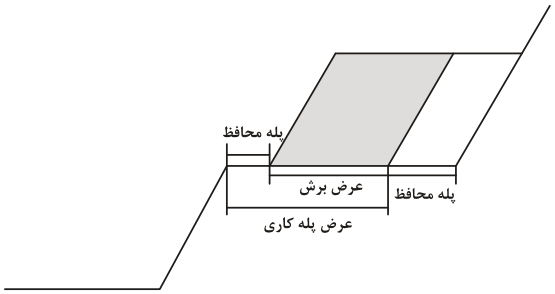
☑ **پاسخ:** گزینه «۲» مهم‌ترین فاکتور در طراحی معدن روباز، طراحی پله‌های آن است، زیرا دسترسی و عملیات استخراج ماده معدنی به‌وسیله پله امکان‌پذیر است.

دلایل استفاده از پله در یک معدن روباز

الف) دسترسی به ماده معدنی با حفظ ایمنی ب) امکان استفاده از ماشین‌آلات و ایجاد فضای مناسب جهت عملکرد آن ج) گسترش آسان معدن

انواع پله در یک معدن روباز

الف) پله کاری: پله‌ای که عملیات معدن‌کاری و استخراج ماده معـدنی روی آن انجام می‌گیرد. بخشی از پله کاری که عملیـات اسـتخراج در آن صـورت می‌گیرد، برش نام دارد. عرض پله کاری همان‌طور که در شکل مقابل نمایان است، برابر فاصله پاشنه برش تا لبه پله است. پله‌های کاری محدودیت عرض و ارتفاع ندارند.



مقطع پله کاری

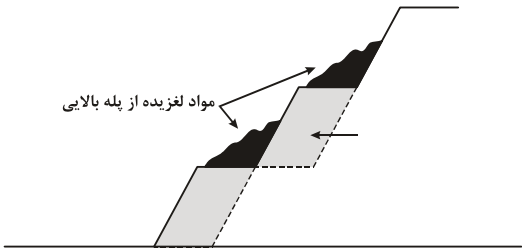
ب) پله‌های محافظ: به پله‌هایی که پس از برداشتن بخش برش به‌منظور افزایش پایداری و ایمنی باقی گذاشته می‌شود، پله محافظ می‌گویند.

هدف از ایجاد پله‌های محافظ عبارت‌اند از:

۱) جمع‌آوری موادی که از پله‌های بالایی به سمت پایین می‌لغزند.

۲) متوقف کردن ادامه حرکت سنگ‌های پرتاب‌شده به طرف پایین.

در شکل مقابل کاربرد پله‌های محافظ به طور شماتیک نشان داده شده است.



عملکرد پله محافظ

عرض پله‌های محافظ به طور معمول $\frac{۲}{۳}$ ارتفاع آن است. در پایـان عمـر معـدن، عرض پله‌های ایمنی گاهی تا $\frac{۱}{۳}$ ارتفاع آن‌ها کاهش می‌یابد.

ج) پله‌های باربری: این پله‌ها به‌منظور حمل‌ونقل یا ارتباط دو پله کاری، موسوم به رمپ ایجاد می‌شوند.

مثال ۲: از دلایل استفاده پله در یک معدن روباز کدام گزینه صحیح نیست؟

۱) دسترسی به ماده معدنی با حفظ ایمنی
۲) امکان استفاده از ماشین‌آلات
۳) ارتباط ترازهای مختلف کاواک
۴) گسترش راحت کاواک

☑ **پاسخ:** گزینه « ۳» در یک معدن امکان ارتباط ترازهای مختلف با رمپ یا جاده توسط پله صورت می‌گیرد.

مثال ۳: کدام گزینه در مورد عرض پله کاری صحیح است؟

۱) عرض پله کاری $\frac{۲}{۳}$ ارتفاع آن و در اواخر عمر معدن $\frac{۱}{۳}$ ارتفاع آن است.

۲) عرض پله کاری $\frac{۱}{۳}$ ارتفاع آن است و در اواخر عمر معدن به حدود $\frac{۲}{۳}$ ارتفاع آن افزایش می‌یابد.

۳) عرض پله کاری برابر عرض یک کامیون در نظر گرفته می‌شود.

۴) پله کاری، محدودیت عرض ندارد.

☑ **پاسخ:** گزینه « ۴» گزینه‌های ۱ و ۳ حدود تقریبی عرض پله‌های ایمنی را بیان می‌کنند. پله‌های کاری، محدودیت عـرض ندارنـد و بسـته بـه بخـش برش محاسبه می‌شوند.

قسمت‌های مختلف پله به صورت زیر تعریف می‌شوند:

الف) رخساره (Face): صفحه‌ای غیرعمود که زاویه شیب پله را نسبت به افق نشان می‌دهد. رخساره با پاشنه، لبه و زاویه شیب پله تعریف می‌شود.

زاویه رخساره در بسیاری از کاواک‌ها در سنگ‌های سخت و با مقاومت بالا حـدود $۸۰^\circ - ۵۵^\circ$ و بـرای سـنگ‌هـای بـا مقاومـت کـم حـدود $۶۰^\circ - ۳۵^\circ$ اسـت. در طراحی‌های اولیه این زاویه را ۶۵° در نظر می‌گیرند. زاویه رخساره تأثیر اساسی بر زاویه شیب نهایی معدن دارد؛ لذا این زاویه باید با دقت انتخاب و اعمال شود.

ب) ارتفاع پله (Bench height): فاصله‌ی قائم بین لبه (Crest) و پاشنه (Toe) یک پله، ارتفاع پله است. ارتفاع پله، مهم‌ترین عامل تعیین ابعاد پله است، زیرا با مشخص‌شدن این پارامتر، بقیه ابعاد به طور مستقیم از آن تبعیت می‌کنند. در حال حاضر ارتفاع معمول پله در معادن روباز بزرگ ۱۵ متر، معادن کوچک‌تر ۱۲ متر و معادن کوچک مانند طلا ۷/۵ متر در نظر گرفته می‌شود. عوامل مؤثر در ارتفاع پله به صورت زیر هستند:

۱ـ جنس سنگ و مشخصات ژئومکانیکی:

مقاومت کم، ارتفاع ۷-۴ متر؛ مقاومت متوسط، ارتفاع ۲۰–۱۰ متر؛ مقاومت زیاد، ارتفاع بیشتر از ۲۰ متر

۲ـ تجهیزات چالزنی:

مقدار اضافه حفاری و ارتفاع پله باید برابر ضریب صحیحی از راد (لوله حفاری) باشد.

۳ـ ماشین‌آلات بارگیری:

ارتفاع پله تابع ماشین‌آلات بارگیری و ارتفاع دسترسی آن است. به طور مثال لودر تا ارتفاع ۸ متر و شاول حدود ۱۵ متر را حفاری می‌کند.

۴ـ قوانین ایمنی و شرایط آب و هوایی:

برای مثال در محیط‌های یخبندان، چسبندگی مواد کاهش یافته و در نتیجه فاکتور ایمنی را کاهش می‌دهد، لذا برای افزایش ایمنی ارتفاع را کاهش می‌دهند.

نکته ۱: زاویه قرار سنگ متأثر از جنس آن است. هرچه سنگ سست‌تر باشد، زاویه قرار آن هم کمتر است، لذا با کاهش زاویه قرار، ارتفاع پله را هم کمتر در نظر می‌گیرند.

کانساری با دو ارتفاع پله متفاوت که در شکل زیر نشان داده شده است، قابل استخراج است:

۱) سه پله با ارتفاع ۲۰ متر و ۲) شش پله با ارتفاع ۱۰ متر

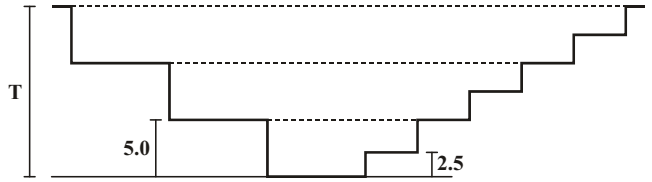
پله‌های بلندتر و عریض‌تر در مقایسه با پله‌های کوچک‌تر نتایج زیر را دربر دارند:

۱) قابلیت استخراج انتخابی کمتر ۲) اختلاط بیشتر ۳) انعطاف‌پذیری کمتر ۴) ماشین‌آلات بزرگ‌تر متناسب با سینه‌کار و نیاز به فضای کاری قابل توجه ۵) احتمال ریزش زیادتر

از طرف دیگر چنین پله‌هایی دارای مزایای زیر هستند:

۱) نصب تجهیزات کمتر و اتلاف زمان کمتر ۲) سرعت استخراج زیاد، تولید و بازدهی بالا ۳) امکان نظارت و سرپرستی راحت‌تر به دلیل پله‌های کمتر

نکته ۲: استانداردهای عرفی و ثابت در هر کشوری برای معادن وجود دارد. مثلاً در ایران به طور معمول از پله‌های با ارتفاع ۶ متر یا ۱۲ متر استفاده می‌شود.



استخراج با دو ارتفاع پله مختلف

ج) عرض پله (Bench width)

فاصله بین پاشنه و لبه در یک سطح از پله، عرض پله نام دارد. برای عرض پله، مهم‌ترین نکته، عرض کامیون است. پله‌ها بسته به ضرورت در زمان‌های مختلف می‌توانند عرض‌های مختلفی داشته باشند. این مشخصه حداقل دوبرابر عرض کامیون و به طور متوسط ۴ برابر عرض کامیون در نظر گرفته می‌شود. در محدوده نهایی کاواک، عرض پله به اندازه عرض یک کامیون برآورد می‌شود.

نکته ۳: با کاهش عرض پله به اندازه یک کامیون در محدوده نهایی، نسبت باطله‌برداری کمتر شده و همچنین هزینه‌ها کاهش می‌یابد.

نکته ۴: عرض بهینه یک کامیون، ۱/۵ برابر عرض بزرگ‌ترین کامیون موجود در معدن است.

نکته ۵: ایجاد قوس در عرض پله، به دلیل زاویه چرخش ماشین‌آلات بارگیری است که در بخش‌های بعدی توضیح داده می‌شود.

در پله عملیاتی، پارامترهای مؤثر در عرض پله به صورت زیر است:

۱ـ ماشین‌آلات بارگیری و باربری

۲ـ سیستم چالزنی و حفاری

۳ـ ضریب تورم سنگ خردشده که به طور معمول ۱/۵ در نظر گرفته می‌شود.

۴ـ زاویه قرار سنگ که در طراحی‌های اولیه حدود ۳۵ درجه در نظر گرفته می‌شود.

مدرسان شریف

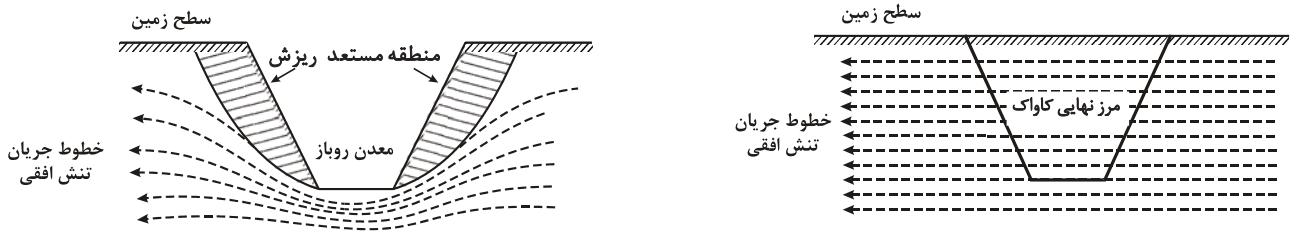
فصل پنجم

«پایداری شیب»

مقدمه

همان‌طور که در مباحث مکانیک سنگ و خاک گفته شد، با حفاری زمین، وضعیت و تعادل تنش‌ها به هم می‌ریزد. با ایجاد کاواک، جریان تنش افقی اطراف آن آشفته می‌شود و بلوک سنگی قرارگرفته در نزدیک مرز کاواک، به شدت تنش‌زدایی می‌شود. تغییر تنش، با کاهش نیروهای چسبندگی و اصطکاک باعث به وجود آمدن درزه و ترک می‌شود و بلوک سنگی را مجدداً تحت تنش قرار می‌دهد (شکل زیر).

با افزایش عمق کاواک یا وجود آب زیرزمینی پتانسیل بازشدن درزه و ایجاد شکست بیشتر شده و پیامدهای ریزش سخت‌تر خواهد شد. چنانچه در فصل‌های قبل گفته شد، برای استخراج مواد معدنی به روش روباز از پله‌های معدنی استفاده می‌شود. لذا باید این پله‌ها از لحاظ اقتصادی و ایمنی مورد طراحی قرار گیرند تا احتمال شکست و ریزش کاهش یابد.



توزیع مجدد تنش در اثر حفر کاواک

برخی از عوامل مؤثر در پایداری شیب یا لغزش و علائم آن به صورت زیر عنوان می‌شوند:

۱ـ عوامل مؤثر در پایداری شیب:

الف) وضعیت ساختاری (لایه‌بندی یا انواع شکستگی و ارتباط آن‌ها با هم) ب) مشخصات ژئومکانیکی (چسبندگی: C و اصطکاک: ϕ) ج) زاویه شیب

د) وجود رطوبت (کاهش چسبندگی) هـ) تأثیر زمان و) نیروهای اعمالی استاتیکی (وزن ماشین‌آلات) و دینامیکی (موج انفجار و ضربه)

۲ـ علائم ناپایداری:

الف) ظاهرشدن ترک‌های کششی در قسمت فوقانی پله

ب) ظاهرشدن آب در رخساره و کف پله

ج) توسعه درزه و شکستگی در رخساره پله

۳ـ پیامدهای ریزش یا لغزش زمین در یک معدن روباز:

الف) از دست دادن ماده معدنی ب) افزایش هزینه باطله‌برداری ج) کاهش بازیابی د) از دست رفتن جاده هـ) خسارات جانی و مالی

۴ـ روش‌های پایدارسازی شیروانی (بلوک ریزشی):

الف) کاهش زاویه شیب با افزایش عرض پله یا کاهش ارتفاع

ب) شناسایی مناطق ضعیف و بهسازی آن (تحکیم)

ج) زهکشی با حفر چاه، گمانه، جوی یا کانال و غیره.

د) تعبیه سیستم نگهداری مانند میل‌مهار، بولت، شاتکریت، توری سیمی(مش) و غیره.

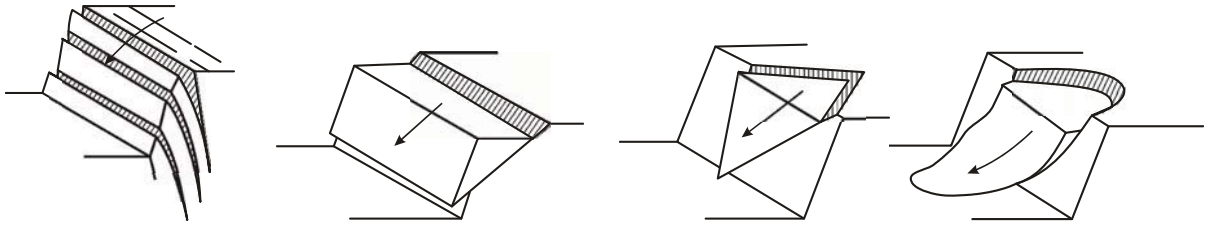
مثال۱: کدام‌یک از موارد زیر از پیامدهای ناشی از زمین‌لغزش در یک معدن روباز نیست؟

۱) افزایش باطله‌برداری ۲) اختلاط ۳) کاهش جاده ۴) کاهش راندمان فرآوری

☑ **پاسخ:** گزینه «۴» کاهش راندمان کارخانه فرآوری، چندان متأثر از ریزش در معدن نیست. اختلاط ماده معدنی و باطله، یکی از مهم‌ترین پیامدهای ممکن این اتفاق است. از دست رفتن جاده، رمپ، پله، خسارات جانی، ماشین‌آلات و ساختمان‌ها هم از جمله پیامدهای مهم زمین‌لغزش است.

انواع ریزش‌های متحمل در معدن روباز

شکل زیر چهار نوع ریزش اصلی که در یک معدن روباز اتفاق می‌افتد را نشان می دهد. در این بخش با توجهی خاص بر ریزش صفحه‌ای، انواع متحمل ریزش در معدن روباز تشریح می‌شود.



انواع ریزش شیب

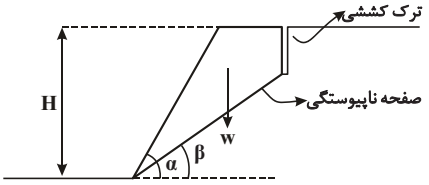
۱ـ ریزش صفحه‌ای(Plane failure):

ریزش صفحه‌ای می‌تواند در انواع مختلف ناپیوستگی‌ها و لایه‌بندی‌ها در مقیاس پله و دیواره کاواک اتفاق بیفتد. زمانی که ناپیوستگی (درزه، لایه‌بندی و غیره) به موازات دامنه پله باشد و زاویه شیب آن کمتر از رخساره و بیشتر از زاویه اصطکاک باشد، ریزش صفحه‌ای اتفاق می‌افتد. رابطه زیر احتمال این شکست و ریزش را نشان می‌دهد:

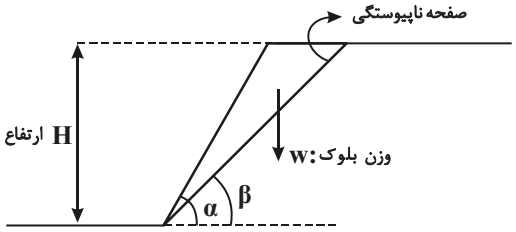
$$\boxed{\phi < \beta < \alpha}$$

که در رابطه فوق: ϕ زاویه اصطکاک، β زاویه شکست (زاویه ناپیوستگی نسبت به افق) و α زاویه شیب پله است. برای این ریزش دو حالت وجود دارد که با توجه به شکل زیر، به صورت زیر عنوان می‌شوند:

الف) ریزش بدون ترک کششی ب) ریزش با وجود یک ترک کششی



الف) احتمال ریزش حاوی ترک کششی



ب) احتمال ریزش بدون ترک کششی

برای محاسبه پایداری بلوک سنگی ایجادشده توسط ناپیوستگی در پله و تحلیل ریزش صفحه‌ای، از روش **آنالیز حدی** استفاده می‌شود. بدین صورت که نیروهای مقاوم در برابر ریزش و محرک ریزش مورد بررسی قرار خواهند گرفت. برای این آنالیز از معیار شکست موهر- کولمب استفاده شده است.

با توجه به نیروهای مقاوم و محرک ریزش، ضریب ایمنی S.F به صورت مقابل تعریف می‌شود:

$$S.F = \frac{\text{کل نیروهای مقاوم در برابر ریزش و لغزش}}{\text{کل نیروهای مقاوم منجر به وقوع و لغزش}}$$

فشار آب حفره‌ای، فشار آب در ترک کششی و وزن بلوک ایجادشده از جمله نیروهای محرک و چسبندگی، اصطکاک و سیستم‌های نگهداری از جمله نیروهای مقاوم در برابر ریزش هستند. با توجه به این موارد و معادله فوق، خواهیم داشت:

$$S.F = \frac{CA + (W\cos\beta - u - V\sin\beta)\tan\phi}{W\sin\beta + V\cos\beta}$$

برای ترک کششی خواهیم داشت:

$$u = \frac{1}{2}\gamma_w . Z_w (H - Z)\cos ec\beta = \frac{1}{2}\gamma_w Z_w . A \quad , \quad A = (H - Z)\,cosec\,\beta$$

$$V = \frac{1}{2}\gamma_w Z_w^2 \quad , \quad W = \frac{1}{2}\gamma H^2 \left[1 - (\frac{Z}{H})^2 \cot\beta(\cot\beta . \tan\alpha - 1)\right]$$

در روابط فوق، پارامترها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

S.F : ضریب ایمنی　　Z : عمق ترک کششی　　Z_w : ارتفاع آب موجود در ترک کششی　　C : چسبندگی

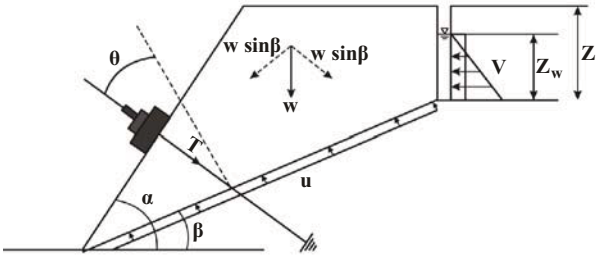
ϕ : زاویه اصطکاک　　α : زاویه شیب نسبت به افق　　β : زاویه ناپیوستگی نسبت به افق　　A : مساحت سطح شکست

W : وزن بلوک ایجاد شده　　u : نیروی آب داخل سطح شکست　　V : نیروی آب داخل ترک کششی　　γ_w : وزن مخصوص آب

γ : وزن مخصوص توده سنگی

تذکر۱: تمامی واحدها برای معادلات باید یکسان در نظر گرفته شود.

برای درک بهتر از نیروها و پارامترهای تاثیرگذار بر شکست صفحه‌ای در شکل زیر نشان داده شده است:



نیروهای تأثیرگذار بر شیب با پتانسیل ریزش صفحه‌ای

اگر در ریزش صفحه‌ای از میل‌مهار به‌عنوان سیستم نگهداری استفاده شود، معادله $S.F = \frac{CA + (W\cos\beta - u - V\sin\beta)\tan\phi}{W\sin\beta + V\cos\beta}$ به‌صورت زیر بازنویسی خواهد شد:

$$S.F = \frac{CA + (W\cos\beta - u - V\sin\beta + T\cos\theta)\tan\phi}{W\sin\beta + V\cos\beta - T\sin\theta}$$

که در رابطه فوق: T نیروی میل‌مهار و θ زاویه نصب میل‌مهار با خط عمود به صفحه شکست است.

مثال۲: در بررسی ریزش صفحه‌ای اگر زاویه اصطکاک برابر زاویه شکست باشد، ضریب ایمنی کدام گزینه خواهد بود؟ (ناپیوستگی زهکشی‌شده و فاقد ترک کششی است. C ، A ، W و B به ترتیب چسبندگی، مساحت شکست، وزن بلوک و زاویه شکست است.)

۱) $\frac{CA}{W\sin\beta} + \tan^2\beta$　　۲) $\frac{CA}{W\sin\beta} + \cot^2\beta$　　۳) $\frac{CA}{W\sin\beta} + 1$　　۴) $\frac{CA}{W\cos\beta} + 1$

پاسخ: گزینه «۳» با توجه به رابطه محاسبه ضریب ایمنی داریم: $S.F = \frac{CA + (W\cos\beta - u - V\sin\beta)\tan\phi}{W\sin\beta + V\cos\beta}$

طبق فرض $\phi = \beta \Rightarrow S.F = \frac{CA + W\cos\beta\tan\phi}{W\sin\beta}$　　ناپیوستگی زهکشی‌شده و فاقد ترک کششی $\Rightarrow u = 0, V = 0$

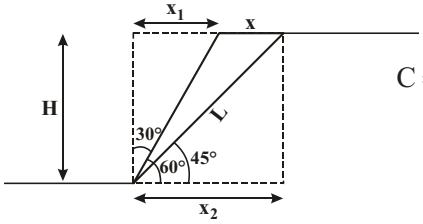
$$S.F = \frac{CA + W\cos\beta\tan\phi}{W\sin\beta} = \frac{CA}{W\sin\beta} + \frac{W\cos\beta\tan\beta}{W\sin\beta} = \frac{CA}{W\sin\beta} + 1$$

تذکر۲: سه حالت ضریب ایمنی به صورت مقابل بیان می‌شود: پایدار $\Rightarrow S.F > 1$　و　ناپایدار $\Rightarrow S.F < 1$　و　مرز تعادل‌حدی $\Rightarrow S.F = 1$

مثال۳: در یک معدن روباز، یکی از پله‌ها در برخورد با ناپیوستگی مستعد ریزش صفحه‌ای است، اگر پارامترها به صورت ذکرشده باشند، برای حداقل پایداری، ارتفاع پله چند متر است؟ (چسبندگی: $۲۰۰۰\frac{kg}{m^2}$، زاویه اصطکاک ۳۰ درجه، وزن بلوک سنگی ۲۵۰ تن، زاویه شیب ۶۰ درجه و زاویه ناپیوستگی ۴۵ درجه است.)

۱) ۳۶　　۲) ۲۸/۵　　۳) ۲۶/۴　　۴) ۲۱/۸

پاسخ: گزینه «۳» در شرایط حداقل پایداری، F برابر ۱ است $(F = 1)$. برای درک بهتر مسئله، شکل زیر رسم می‌شود:



$$C = ۲۰۰۰\frac{kg}{m^2}\ ,\ \beta = ۴۵^\circ\ ,\ \phi = ۳۰^\circ \Rightarrow A = L\times ۱ = (\frac{H}{\sin\beta})\times ۱ = \frac{H}{\frac{\sqrt{۲}}{۲}}\ ,\ W = ۲۵۰\text{ تن}$$