دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه مهندسی معدن–استخراج معدن

ارائه یک رویکرد جدید جهت تعیین ارتفاع پله مناسب در معادن روباز

(مطالعه موردی معدن شماره ۲ سنگ آهن گل‌گهر)

دانشجو : مصطفی امیدشفیعی

اساتید راهنما :

دکتر محمد عطایی

دکتر رضا خالوکاکایی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۵

شماره: ۹۵/۱۹۰۱-م
تاریخ: ۹۵/۱۲/۱۷
ویرایش:

باسمه تعالی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۷: صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **مصطفی امیدشفیعی** به شماره دانشجویی **۹۱۰۰۹۱۴** رشته **مهندسی معدن** گرایش **استخراج** تحت عنوان **ارائه رویکردی جدید در تعیین ارتفاع پله مناسب در معادن روباز – مطالعه موردی معدن شماره ۲ سنگ آهن گل‌گهر** که در تاریخ **۱۳۹۵/۱۱/۱۸** با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می‌گردد:

قبول (با درجه : بسیار خوب - امتیاز ۱۸/۱۲) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود ☐

نوع تحقیق: نظری ☑ عملی ☐

۱ـ عالی (۲۰ ـ ۱۹)
۲ـ بسیار خوب (۱۸/۹۹ ـ ۱۸)
۳ـ خوب (۱۷/۹۹ ـ۱۶)
۴ـ قابل قبول (۱۵/۹۹ ـ ۱۴)
۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام ونام خانوادگی	مرتبهٔ علمی	امضاء
۱ـ استادراهنمای اول	دکتر محمد عطائی	استاد	
۲- استادراهنمای دوم	دکتر رضا خالوکاکائی	استاد	
۴- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	دکتر کیومرث سیف‌پناهی	استادیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر فرهنگ سرشکی	دانشیار	
۶ـ استاد ممتحن دوم	دکتر رامین رفیعی	استادیار	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۵/۱۲/۱۶

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

این دو معلم بزرگوار که وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه مهر

توانشان رفت تا به توانایی رسم و مویشان سپید گشت تا رویم سپید ماند

آنان که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان، سرمایه های همیشگی زندگی من است

در برابر وجود گرامی شان، زانوی ادب بر زمین می زنم و با قلبی مملو از عشق و خضوع بر دستان پر مهرشان

بوسه می زنم.

تشکر و قدردانی

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشـــینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشـــه چینی از علم و معرفت را روزیمان ســـاخت و درود بی‌انتها بر مژده‌دهنده و هشداردهنده، چراغ پرفروغ هدایت، پیامبر رحمت و خاندان پاک او.

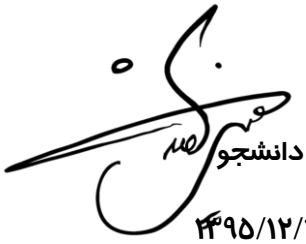
بدون شک جایگاه و منزلت معلم، والاتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی‌شائبه ایشان با زبان قاصر و دست ناتوان چیزی بنگارم. اما از آنجا که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تأمین می‌کند و سلامت امانت‌هایی را که به دستش سپرده‌اند را تضمین، بر حسب وظیفه و از باب « من لم یشـــکر المنعم من المخلوقین لم یشـــکر الله عزّ و جلّ »، از اســـاتید فرهیخته جناب آقایان پروفسور محمد عطایی و پروفسور رضا خالوکاکایی که با وجود مشغله‌های فراوان در کمال ســـعه‌صـــدر و حســـن خلق، راهنمای این حقیر بوده‌اند و از هیچ کمکی در این عرصـــه دریغ ننمودند، سپاسگزاری و در مقابل‌شان خاضعانه تعظیم می‌نمایم و سلامتی و توفیقات روزافزون‌شان را آرزومندم.

از شرکت تهیه و تولید مواد معدنی ایران که پژوهش حاضر با حمایت و مساعدت مستقیم آن‌ها به انجام رسیده است کمال تشکر و تقدیر را دارم. همچنین از جناب آقای رضا آل‌نبی دانشجوی دکترای دانشگاه صنعتی شاهرود، که اجرای این پروژه بدون راهنمایی و مساعدت ایشان میسر نبود صمیمانه ســپاســگزارم. در پایان لازم می‌دانم از دوســت بزرگوارم جناب آقای ســجاد محمدی دانشــجوی دکترای مهندسی معدن دانشگاه صنعتی شاهرود، برای تمام حمایت‌های بی دریغشان در تمامی مراحل اجرای این تحقیق صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم و آرزوی بهروزی و موفقیت‌شان را در تمامی مراحل زندگی خواستارم.

تعهد نامه

اینجانب **مصطفی امید شفیعی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته **مهندسی استخراج معدن** دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **"ارائه یک رویکردی جدید جهت تعیین ارتفاع پله مناسب در معادن روباز"** متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .



امضای دانشجو

تاریخ ۱۳۹۵/۱۲/۱۸

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

بارزترین مشخصه در معادن روباز، پله‌ها هستند. عوامل مختلفی بر فرآیند انتخاب ابعاد پله و در نهایت شکل نهایی پیت روباز تاثیر گذارند. نقش ارتفاع پله بسیار پررنگ‌تر از سایر بُعدهای دیگر پله است؛ زیرا ابعاد سایر مولفه‌های پله (مثل عرض و شیب رخساره پله) بطور مستقیم به تعیین ارتفاع پله وابسته است و از آن تبعیت می‌کنند. عوامل بسیاری در معدن به ارتفاع پله وابسته هستند که شامل شیب نهایی معدن، اندازه ماشین‌آلات استخراجی، ترقیق و افت استخراجی و میزان انتخابی شدن استخراج است. همچنین معادن با توجه به اهدافی که دارند، از ارتفاع پله‌های مختلفی استفاده می‌کنند.

در این تحقیق رویکردی جدید به منظور انتخاب مناسب‌ترین ارتفاع پله اقتصادی ارائه شده است. جهت بررسی این رویکرد از داده‌های اکتشافی معدن ۲ گل‌گهر استفاده شده است و چهار سناریوی قابل اجرای ارتفاع پله (ارتفاع ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ متر) مورد بررسی قرار داده شده است. تاثیر سناریوهای مختلف ارتفاع پله در میزان تناژ ماده‌معدنی، عیار متوسط، میزان محتوای فلزی، الگوی انفجار و انتخاب ماشین‌آلات چالزنی، بارگیری و باربری بررسی شد. ابتدا توسط نرم‌افزار GEOVIA GEMS مدل زمین‌شناسی کانسار ساخته شد. همچنین با طراحی پیت، میزان تناژ باطله و ماده‌معدنی در هر سناریو تخمین زده شد. از اطلاعات پروژه‌های مشابه و قیمت‌های ارائه شده توسط شرکت‌های پیمانکاری و همچنین بررسی و انتخاب مناسب‌ترین دستگاه بارگیری از نظر انتخابی شدن استخراج در هر سناریو، میزان هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای برای هر سناریو برآورد گردید. با توجه به این هزینه‌ها، جدول نقدیگی تنزیل‌یافته برای هر سناریو محاسبه شد و ارزش خالص فعلی سناریوها مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین میزان بازیابی ماده‌معدنی در ارتفاع پله ۱۵ متر بدست می‌آید ولی بیشینه ارزش خالص فعلی مربوط به ارتفاع پله ۱۲ متر برای دستگاه بارگیری شاول هیدرولیکی است.

کلمات کلیدی: معادن روباز، ارتفاع پله، استخراج انتخابی، ارزش خالص فعلی، معدن شماره ۲ گل‌گهر

فهرست مطالب

۱- فصل اول : مقدمه وکلیّات ۱

۱-۱- مقدمه..... ۲

۱-۲- بیان مسأله..... ۵

۱-۳- ضرورت تحقیق..... ۷

۱-۴- اهداف تحقیق..... ۸

۱-۵- روش تحقیق..... ۹

۱-۶- ساختار تحقیق..... ۱۰

۲- فصل دوم : عوامل مرتبط با ارتفاع پله و پیشینه تحقیق ۱۳

۲-۱- مقدمه..... ۱۴

۲-۲- شیب نهایی معدن و میزان باطله‌برداری..... ۱۴

۲-۳- ترقیق (اختلاط باطله با ماده‌معدنی)..... ۲۰

۲-۴- میزان بازیابی و افت استخراجی..... ۲۸

۲-۵- انتخابی شدن استخراج..... ۳۰

۲-۶- سابقه علمی موضوع..... ۳۳

۲-۷- جمع‌بندی..... ۴۲

۳- فصل سوم : نقش ارتفاع پله در انتخاب تجهیزات بارگیری و طراحی الگوی انفجار ۴۵

۳-۱- مقدمه..... ۴۶

۳-۲- نقش ارتفاع پله در انتخاب تجهیزات بارگیری..... ۴۷

۳-۳- انتخاب تجهیزات بارگیری و انتخابی شدن استخراج..... ۵۲

۳-۳-۱- شاول‌های کابلی ۵۴
۳-۳-۱-۱- ویژگی‌های طراحی ۵۵
۳-۳-۱-۲- ویژگی‌های عملیاتی ۵۸
۳-۳-۲- شاول هیدرولیکی ۶۰
۳-۳-۲-۱- ویژگی‌های طراحی ۶۲
۳-۳-۲-۲- ویژگی‌های عملیاتی ۶۴
۳-۳-۳- اکسکاواتور هیدرولیکی (کج بیل) ۶۶
۳-۳-۳-۱- ویژگی‌های طراحی ۶۷
۳-۳-۳-۲- ویژگی‌های عملیاتی ۶۷
۳-۳-۴- لودرهای چرخ‌لاستیکی ۶۸
۳-۳-۴-۱- ویژگی‌های طراحی ۶۹
۳-۳-۴-۲- ویژگی‌های عملیاتی ۷۲
۳-۴- ارتفاع پله و انتخابی شدن استخراج ۷۴
۳-۴-۱- محدوده کاربری موثر تجهیزات از نظر ارتفاع پله ۷۶
۳-۴-۲- قابلیت استخراج انتخابی ماشین‌آلات بارگیری ۷۷
۳-۵- طراحی الگوی چالزنی و انفجار ۸۳
۴- فصل چهارم : معرفی رویکرد پیشنهادی و تخمین میزان منبع معدنی در هر سناریو ۸۷
۴-۱- مقدمه ۸۸
۴-۲- معرفی رویکرد پیشنهادی ۸۹
۴-۲-۱- تعیین اهداف پروژه ۹۰
۴-۲-۲- تعیین سناریوهای قابل اجرای ارتفاع پله ۹۰

۴-۲-۳- ساخت مدل بلوکی و تخمین منبع معدنی ۹۴
۴-۲-۴- رسم منحنی‌های عیار-تناژ ۹۴
۴-۲-۵- ساخت مدل اقتصادی ۹۵
۴-۳- معرفی کانسار شماره ۲ گل‌گهر ۹۶
۴-۴- زمین‌شناسی عمومی ناحیه گل‌گهر ۹۹
۴-۵- داده‌های گمانه‌های اکتشافی ۱۰۰
۴-۶- ساخت مقاطع زمین‌شناسی و فضای تخمین ۱۰۲
۴-۶-۱- انتخاب ابعاد بلوک‌ها و تهیه مدل بلوکی از فضای تخمین ۱۰۹
۴-۷- تعیین جوامع آماری ۱۱۳
۴-۷-۱- تشخیص و جایگزینی مقادیر خارج از ردیف ۱۱۶
۴-۷-۲- بررسی وجود روند ۱۱۹
۴-۷-۳- کامپوزیت‌سازی (ساختن نمونه‌های ترکیبی) ۱۲۱
۴-۷-۴- نرمال‌سازی داده‌های کامپوزیت شده ۱۲۴
۴-۷-۵- واریوگرافی و رسم واریوگرام (تغییرنما) ۱۲۷
۴-۷-۶- تعیین وزن مخصوص ماده‌معدنی و باطله ۱۲۹
۴-۷-۷- تخمین عیاری ۱۳۰
۴-۷-۸- رسم منحنی‌های عیار-تناژ ۱۳۱
۴-۸- طراحی پیت ۱۳۶
۴-۹- جمع‌بندی ۱۳۶
۵- فصل پنجم : ارزیابی اقتصادی و معرفی بهترین سناریوی ارتفاع پله ۱۳۹

۵-۱- مقدمه ۱۴۰
۵-۲- ارزیابی اقتصادی ۱۴۰
۵-۲-۱- پیش‌بینی بازار فروش ۱۴۲
۵-۲-۲- برنامه‌های فیزیکی به عنوان مبنایی جهت جریان نقدینگی ۱۴۲
۵-۳- هزینه سرمایه‌گذاری ۱۴۳
۵-۴- هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ۱۴۸
۵-۵- درآمد ۱۵۳
۵-۶- نتایج حاصل از ارزیابی ۱۵۳
۵-۶-۱- تغییرات هزینه تولید ۱۵۳
۵-۶-۲- تغییرات ارزش خالص فعلی ۱۵۴
۵-۷- جمع‌بندی ۱۵۷
۶- فصل ششم : جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات ۱۵۹
۶-۱- جمع‌بندی ۱۶۰
۶-۲- پیشنهادات ۱۶۲
مراجع ۱۶۴
پیوست ۱ ..... ۱۷۱
پیوست ۲ ..... ۱۷۳
پیوست ۳ ..... ۱۸۵

فهرست شکل‌ها

شکل ۱-۱ : بخش‌های مختلف پله در یک پیت روباز ۳

شکل ۲-۱ : تاثیر اندازه تجهیزات روی شیب نهایی معدن.....۱۸

شکل ۲-۲ : هندسه تعریض جاده باربری در نتیجه گسترش عرض رمپ.....۱۹

شکل ۲-۳ : نمای شماتیک از یک بلوک استخراجی در معدن روباز با انواع مختلف ترقیق در آن ۲۴

شکل ۲-۴ : عوامل موثر بر ترقیق در معادن روباز.....۲۵

شکل ۲-۵ : انتخاب مناسب‌ترین راستای استخراج با توجه به شکل ماده‌معدنی جهت کاهش ترقیق ۲۶

شکل ۲-۶ : انتخاب را ستای منا سب برای ا ستخراج - خط قرمز نشان دهنده مرز بین ماده‌معدنی ا ست و کمر بالا در سمت جنوب قرار دارد.....۲۶

شکل ۲-۷ : تاثیر عوامل مرتبط با استخراج (کاهش ارتفاع پله) بر میزان ترقیق ۲۷

شکل ۲-۸ : رابطه ترقیق با ارتفاع پله ۲۸

شکل ۲-۹ : تاثیر ابعاد ماشین‌آلات و تجهیزات در میزان ترقیق ۲۸

شکل ۲-۱۰ : ابر پراکندگی (همبستگی) عیار تخمینی و عیار واقعی ۳۲

شکل ۲-۱۱ : تغییرات هزینه واحد حفاری با تغییر قطر چال و ارتفاع پله ۳۵

شکل ۲-۱۲ : تغییرات هزینه واحد انفجار با تغییرات قطر چال و ارتفاع پله ۳۶

شکل ۲-۱۳ : نتایج هزینه واحد بارگیری و حمل برای حالت تپه‌ای با شیب جاده‌های ۱۰ درصد ۳۶

شکل ۲-۱۴ : نتایج هزینه واحد بارگیری و حمل برای حالت پیت با شیب جاده‌های ۱۰ درصد ۳۷

شکل ۲-۱۵ : هزینه واحد کلی برای حالت تپه‌ای با شیب جاده ۱۰ درصد ۳۸

شکل ۲-۱۶ : هزینه واحد کلی برای حالت پیت با شیب جاده ۱۰ درصد ۳۸

شکل ۲-۱۷ : هزینه واحد کلی برای حالت تپه‌ای با شیب جاده ۸ درصد ۳۸

شکل ۲-۱۸ : هزینه واحد کلی برای حالت پیت با شیب جاده ۸ درصد ۳۹

شکل ۲-۱۹ : ساختار سلسله مراتبی پیشنهادی برای معیارهای بهینه‌سازی ارتفاع پله ۴۰

شکل ۳-۱ : ارتفاع پله در مقابل قدرت تولید (بهره‌وری) دستگاه بارگیری Liebherr 994 ..... ۵۱

شکل ۳-۲ : یک شاول کابلی الکتریکی P&H 2300XPC ۵۵

شکل ۳-۳ : پروفیل حفاری در یک شاول کابلی ۵۶

شکل ۳-۴ : نیروهای بارگیری در یک شاول کابلی ۵۶

شکل ۳-۵ : پروفایلی از کمترین و بیشترین ارتفاع قابل برداشت در شاول کابلی P&H 2300 ..... ۵۹

شکل ۳-۶ : یک شاول هیدرولیکی مدل EX2500 ..... ۶۱

شکل ۳-۷ : نمونه‌ای تیپیک از ساختمان یک شاول هیدرولیکی ۶۱

شکل ۳-۸ : نیروهای بکار رونده در بارگیری ۶۳

شکل ۳-۹ : انواع برداشت‌ها از جبهه‌کار در شاول هیدرولیکی ۶۵

شکل ۳-۱۰ : ساختمان یک کج‌بیل مدل EX2500 ..... ۶۶

شکل ۳-۱۱ : لودر چرخ‌لاستیکی مدل CAT 994 ..... ۶۹

شکل ۳-۱۲ : نیروهای بارگیری در یک لور چرخ‌لاستیکی ۷۰

شکل ۳-۱۳ : نحوه انجام بارگیری در لودر چرخ‌لاستیکی ۷۰

شکل ۳-۱۴ : تاثیر زاویه شیب پیکره‌معدنی بر روی عمل بارگیری ۷۵

شکل ۳-۱۵ : محدود کارآمد ارتفاع پله در ماشین‌آلات مختلف ۷۶

شکل ۳-۱۶ : نتایج حاصل از شبیه‌سازی بهره‌وری در ارتفاع پله‌های مختلف ۷۷

شکل ۳-۱۷ : نماش گرافیکی از قابلیت استخراج انتخابی ماشین‌آلات مختلف بارگیری در ارتفاع پله‌های متفاوت ۸۲

شکل ۳-۱۸ : رابطه پیشنهادی برای ارتفاع پله و قطر مناسب چال ۸۵

شکل ۳-۱۹ : نمایی شماتیک از آرایش چال‌های انفجاری در یک معدن روباز ۸۶

شکل ۴-۱ : رویکرد پیشنهاد شده جهت تعیین مناسب‌ترین ارتفاع پله در معادن روباز ۸۹

شکل ۴-۲ : فراوانی‌نمای طول‌های عیارسنجی شده در معدن ۲ گل‌گهر ۹۱

شکل ۴-۳ : توزیع فراوانی داده‌های اولیه طول پیوسته مادهمعدنی در معدن ۲ گل‌گهر ۹۲

شکل ۴-۴ : توزیع فراوانی داده‌های تبدیل یافته طول پیوسته ماده‌معدنی در معدن ۲ گل‌گهر ۹۳

شکل ۴-۵ : موقعیت معدن از روی نقشه هوایی ۹۷

شکل ۴-۶ : راه‌های دسترسی به معدن ۲ گل‌گهر ۹۷

شکل ۴-۷ : موقعیت ناحیه معدنی گل‌گهر در زون ساختاری سنندج-سیرجان ۹۸

شکل ۴-۸ : طراحی شبکه حفاری اکتشافی تفصیلی در معدن شماره ۲ گل‌گهر با توجه به نقشه‌های مگنتومتری ۱۰۱

شکل ۴-۹ : نمونه‌ای از مقاطع قائم زمین‌شناسی جهت مدل‌سازی پیکره‌معدنی ۱۰۳

شکل ۴-۱۰ : موقعیت مقاطع قائم زمین‌شناسی ترسیم شده در معدن ۲ گل‌گهر.....۱۰۴

شکل ۴-۱۱ : پلیگون‌های رسم شده بر روی یکی از مقاطع قائم زمین‌شناسی در معدن ۲ گل‌گهر.....۱۰۵

شکل ۴-۱۲ : نمایی از پلیگون‌های زمین‌شناسی رسم شده روی مقاطع عرضی و طولی در معدن ۲ گل‌گهر ۱۰۶

شکل ۴-۱۳ : الف) نمونه‌ای تراورس رسم شده توسط مقاطع افقی با ارتفاع ۱۵ متر در راستای عمق ب) نحوه رسم نقشه‌های زمین‌شناسی افقی با استفاده از خطوط تراورس ۱۰۸

شکل ۴-۱۴ : نمونه‌ای از پلیگون‌های زمین‌شناسی رسم شده در ارتفاع پله ۶ متری در تراز ارتفاعی ۱۷۰۹ .....۱۰۹

شکل ۴-۱۵ : تعیین حداقل درصد برای اختصاص دادن جنس سنگ به یک بلوک و نیز تعیین دقت آن ۱۱۲

شکل ۴-۱۶ : مدل بلوکی و فضای تخمین رسم شده بر اساس جنس سنگ در ارتفاع پله ۶ متری ۱۱۳

شکل ۴-۱۷: فراوانی‌نمای عیار داده‌های خام Fe، FeO، S و P در معدن شماره ۲ گل‌گهر.....۱۱۵

شکل ۴-۱۸ : نتایج آزمون Grubbs جهت بررسی داده‌های خارج از ردیف در نرم‌افزار Minitab.....۱۱۷

شکل ۴-۱۹ : حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف (g) به عنوان تابعی از تعداد داده‌ها (n) و سطح اعتماد ۱۱۸

شکل ۴-۲۰ : توزیع عیار آهن در راستای شرقی-غربی محلی برای کد سنگ ۱۰۱.....۱۱۹

شکل ۴-۲۱ : توزیع عیار آهن در راستای شمالی-جنوبی محلی برای کد سنگ ۱۰۱.....۱۲۰

شکل ۴-۲۲ : توزیع عیار آهن در امتداد عمق برای کد سنگ ۱۰۱ ..... ۱۲۰

شکل ۴-۲۳ : توزیع عیار آهن در راستای شرقی-غربی محلی برای کد سنگ ۴۰۲ ..... ۱۲۰

شکل ۴-۲۴ : توزیع عیار آهن در راستای شمالی-جنوبی محلی برای کد سنگ ۴۰۲ ..... ۱۲۱

شکل ۴-۲۵ : توزیع عیار آهن در امتداد عمق برای کد سنگ ۴۰۲ ..... ۱۲۱

شکل ۴-۲۶ : فراوانی‌نمای داده‌های کامپوزیت شده ۱۵ متری عیار آهن در پیکره‌معدنی ۲ گلگهر ۱۲۴

شکل ۴-۲۷ : نمودار توزیع تجمعی داده‌های کامپوزیت شده ۱۵ متری عیار آهن در پیکرهمعدنی ۲ گل‌گهر..... ۱۲۵

شکل ۴-۲۸ : فراوانی‌نمای داده‌های تبدیل یافته کامپوزیت‌های ۱۵ متری به روش لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر..... ۱۲۶

شـــکل ۴-۲۹ : نمودار توزیع تجمعی داده‌های تبدیل یافته کامپوزیت‌های ۱۵ متری به روش لگاریتمی ســـه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر ۱۲۶

شکل ۴-۳۰ : وریوگرافی جهتی برای متغیر ناحیه‌ای Fe در را ستای آزیموت ۱۰۳/۰۵ و شیب ۲ درجه در سناریو ارتفاع پله ۶ متری ۱۲۸

شکل ۴-۳۱ : نمونه‌ای از بیضوی جستجو در سناریوی ارتفاع پله (بلوک) ۶ متری ۱۲۹

شکل ۴-۳۲ : مدل بلوکی عیاری برای سناریوی ارتفاع پله ۱۵ متری ۱۳۰

شکل ۴-۳۳ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده برای سناریوی ارتفاع پله ۶ متری ۱۳۲

شکل ۴-۳۴ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده برای سناریوی ارتفاع پله ۹ متری..... ۱۳۲

شکل ۴-۳۵ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده برای سناریوی ارتفاع پله ۱۲ متری ۱۳۳

شکل ۴-۳۶ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده آهن برای سناریوی ارتفاع پله ۱۵ متری ۱۳۳

شکل ۴-۳۷ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده آهن در تمام سناریوهای ارتفاع پله با طول کامپوزیت برابر با ارتفاع پله ۱۳۴

شکل ۴-۳۸ : منحنی عیار-محتوای فلز آهن در تمام سناریوهای ارتفاع پله با طول کامپوزیت برابر با ارتفاع پله ۱۳۴

شکل ۵-۱ : سناریوهای انتخاب شده جهت ارزیابی اقتصادی..... ۱۴۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ : عرض تقریبی جاده باربری برای اندازه های مختلف کامیون‌ها ۱۷

جدول ۲-۲ : خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته در زمینه ارتفاع پله معادن روباز ۴۲

جدول ۳-۱ : خلاصه‌ای از مهمترین عوامل در نظر گرفته شده در انتخاب ماشین‌آلات ۴۸

جدول ۳-۲ : رابطه بین ارتفاع پله و اندازه جام بارکننده ۴۹

جدول ۳-۳ : هزینه‌های مرتبط با تولید در ارتفاع پله‌های مختلف ۴۹

جدول ۳-۴ : تاثیرات ویژگی‌های طراحی و عملیاتی روی انتخابی شدن استخراج بارکننده ۵۳

جدول ۳-۵ : خصوصیات ماشین‌آلات بارگیری انتخاب شده جهت ارزیابی رویکرد پیشنهادی ۵۴

جدول ۳-۶ : قابلیت بارگیری انتخابی بیان شده در یک نسبت مساحت جبهه‌کار ۷۸

جدول ۳-۷ : مقایسه‌ای بین عمل بارگیری و انتخابی شدن استخراج در ماشین‌آلات مختلف ۷۹

جدول ۳-۸ : اجزای طراحی انفجار در معادن روباز ۸۴

جدول ۴-۱ : مشخصات آماری داده‌های اولیه طول پیوسته ماده‌معدنی ۹۲

جدول ۴-۲ : مشخصات آماری داده‌های لاگ‌نرمال طول پیوسته کانسنگ ۹۳

جدول ۴-۳ : هزینه‌های عملیاتی محاسبه شده برای سناریوهای ارتفاع پله ۹۶

جدول ۴-۴ : رایج‌ترین کانی‌های آهن‌دار در طبیعت ۱۰۰

جدول ۴-۵ : خلاصه‌ای از حفاری‌های انجام شده طی مراحل مختلف اکتشاف توده معدنی ۲ گل‌گهر ۱۰۱

جدول ۴-۶ : کد سنگ‌های تخصیص داده شده در نرم افزار ۱۰۴

جدول ۴-۷ : پارامترهای آماری داده‌های کامپوزیت شده ۱۵ متری عیار آهن در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر ۱۲۶

جدول ۴-۸ : اطلاعات وریوگرافی جهتی متغیر ناحیه آهن در سناریو ارتفاع پله ۶ متری ۱۲۹

جدول ۴-۹ : نتایج حاصـــل از تخمین ذخیره در ارتفاع پله‌های مختلف و عیارحدهای مختلف و با طول کامپوزیت برابر با ارتفاع پله ۱۳۵

جدول ۴-۱۰ : مشـــخصـــات پیت‌های طراحی شـــده در هر یک از ســـناریوهای ارتفاع پله به منظور برآورد تناژ باطله و ماده‌معدنی ۱۳۶

جدول ۴-۱۱ : میزان تناژ ماده‌معدنی و باطله در هر یک از سناریوهای ارتفاع پله با فرض عیارحد صفر ۱۳۶

جدول ۵-۱ : عمر متصور شده برای معدن در سناریوهای مختلف ۱۴۲

جدول ۵-۲ : قیمت هر قلم از ماشین‌آلات حفاری، بارگیری و باربری ۱۴۴

جدول ۵-۳ : محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز در هر سناریو برای شاول کابلی با توجه به نرخ تولید کامیون ۱۴۴

جدول ۵-۴ : محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز در هر سناریو برای کج‌بیل هیدرولیکی با توجه به نرخ تولید کامیون ۱۴۵

جدول ۵-۵ : محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز در هر سناریو برای شاول هیدرولیکی با توجه به نرخ تولید کامیون..... ۱۴۵

جدول ۵-۶ : محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز در هر سناریو برای لودر چرخ‌لاستیکی با توجه به نرخ تولید کامیون..... ۱۴۵

جدول ۵-۷ : تعداد دســتگاه (دکل) چالزنی و حفاری مورد نیاز در هر ســناریوی ارتفاع پله بر اســاس نتایج طراحی الگوی انفجار ۱۴۶

جدول ۵-۸ : هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر اساس انتخاب شاول کابلی در سناریوهای ارتفاع پله ۱۴۶

جدول ۵-۹ : هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر اساس انتخاب کج‌بیل هیدرولیکی در سناریوهای ارتفاع پله ۱۴۷

جدول ۵-۱۰ : هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر اساس انتخاب شاول هیدرولیکی در سناریوهای ارتفاع پله ۱۴۷

جدول ۵-۱۱ : هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر اساس انتخاب لودر چرخ‌لاستیکی در سناریوهای ارتفاع پله ۱۴۷

جدول ۵-۱۲ : نحوه محاسبه هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ۱۴۸

جدول ۵-۱۳ : هزینه‌های عملیاتی و نگهداری واحد حفاری و چالزنی ۱۴۹

جدول ۵-۱۴ : هزینه‌های عملیاتی و نگهداری واحد انفجار ۱۴۹

جدول ۵-۱۵ : هزینه‌های سایر تجهیزات ثانویه ۱۵۰

جدول ۵-۱۶ : هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ماشین‌آلات باربری ۱۵۰

جدول ۵-۱۷ : سایر هزینه‌ها بخش باربری ۱۵۱

جدول ۵-۱۸ : خلاصه‌ای از مجموعه هزینه‌های عملیاتی در هر ارتفاع پله بجز هزینه‌های عملیاتی بارگیری ۱۵۱

جدول ۵-۱۹ : هزینه‌های عملیاتی و تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات بارگیری ۱۵۱

جدول ۵-۲۰ : هزینه عملیاتی در هر ارتفاع پله با توجه به بهترین دستگاه بارگیری انتخاب شده ۱۵۴

جدول ۵-۲۱ : جدول جریان نقدینگی در ارتفاع پله ۶ متر برای بارکننده کج‌بیل هیدرولیکی ۱۵۵

جدول ۵-۲۲ : نتایج حاصل از ارزش خالص فعلی سناریوهای ارتفاع پله ۱۵۶

جدول ۷-۱ : چارچوب طراحی الگوی چالزنی و انفجار در هر سناریوی ارتفاع پله به منظور محاسبه هزینه‌های واحد حفاری و انفجار ۱۷۵

جدول ۷-۲ : مقایسه پارامترهای آماری داده‌های کامپوزیت شده ۶ متری آهن با توزیع طبیعی و لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر ۱۷۹

جدول ۷-۳ : مقایسه پارامترهای آماری داده‌های کامپوزیت شده ۹متری آهن با توزیع طبیعی و لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر ۱۸۱

جدول ۷-۴ : مقایسه پارامترهای آماری داده‌های کامپوزیت شده ۱۲ متری آهن با توزیع طبیعی و لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر ۱۸۳

جدول ۹-۱ : برنامه‌ریزی سالیانه با توجه مقدار بازیابی در هر سناریو با فرض تولید سالیانه ثابت ۱۸۶

جدول ۷-۶ : تعداد نیروی کار برای هر یک از سناریوها و به ازای هر یک از تجهیزات بارگیری ۱۸۷

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

بسیاری از ذخایر معدنی کم‌عمق در ایران و جهان به روش روباز[۱] استخراج می شود. معادن روباز معمولا از نرخ تولید[۲] بالایی برخوردارند و بیشتر معادن بزرگ جهان را شامل می‌شوند. پله بارزترین مشخصه یک معدن روباز است و به همین دلیل است که گاهی به روش استخراج روباز، روش پله‌ای[۳] نیز گفته می‌شود (عطایی، ۱۳۹۰). در واقع پله سطح افقی در بالای یک جبهه‌کار قایم یا نزدیک به قایم است که برای دسترسی به ماده‌معدنی طراحی می‌شوند و عملیات معدنکاری (اعم از چالزنی، انفجار و بارگیری) روی این سطح انجام می‌گیرد و معمولا استخراج تا عمقی ادامه دارد که فعالیت استخراجی در آن اقتصادی باشد که به این عمق را در اصطلاح محدوده بهینه معدن می‌نامند.

انتخاب هندسه پیت روباز که شامل انتخاب ابعاد پله (ارتفاع پله، عرض پله و شیب رخساره پله) است، جزو اولویت‌های اصلی در هنگام طراحی معادن روباز است. عوامل مختلف و متنوعی بر فرآیند انتخاب ابعاد پله و در نهایت شکل نهایی پیت روباز تاثیر گذارند. از اینرو در هنگام طراحی معادن روباز، یکی از اولین و اصلی‌ترین نگرانی‌های پیش روی یک مهندس معدن، تعیین بهترین هندسه و ابعاد

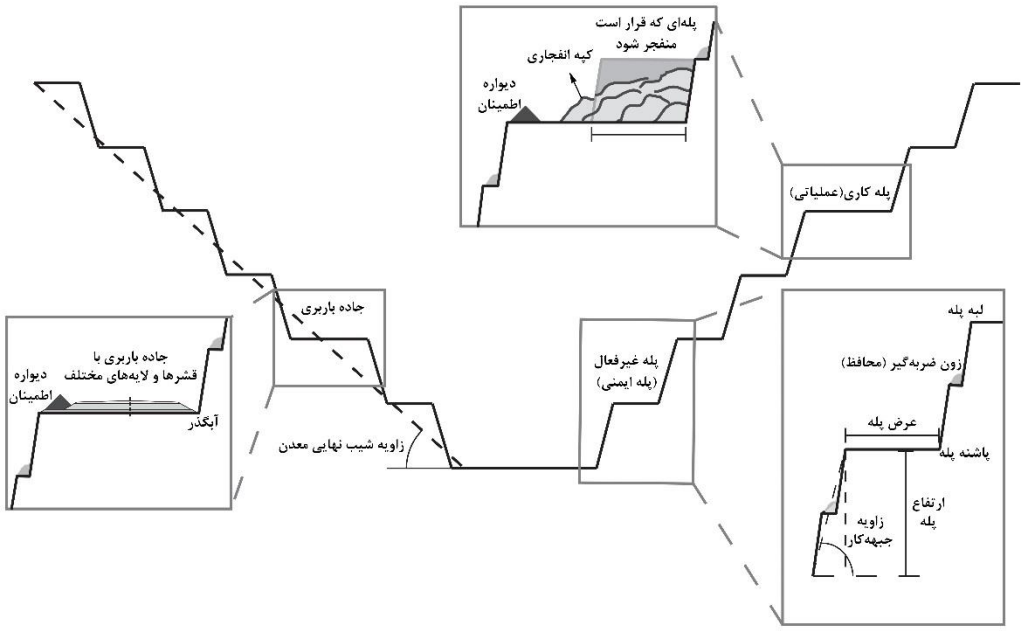
---

[۱] Open Pit

[۲] Production Rate (میزان تولید در واحد زمان)

[۳] Benching method

پله‌ها (بلوک‌ها) است. شکل ۱-۱ انواع پله‌ها و اجزای مهم یک پیت روباز نشان داده شده است.



شکل ۱-۱ : بخش‌های مختلف پله در یک پیت روباز

هنگام طراحی و تعیین هندسه پله‌ها، نقش ارتفاع پله[۱] بسیار پررنگ‌تر از سایر مولفه‌های پله است؛ زیرا ابعاد سایر مولفه‌های پله (مثل عرض و شیب رخساره پله) بطور مستقیم به تعیین این بُعد (ارتفاع پله) وابسته است و از آن تبعیت می‌کنند. ارتفاع پله، فاصله عمودی بین سطح بالایی و سطح پایینی پله (فاصله عمودی بین لبه پله تا پاشنه پله تحتانی) تعریف می‌شود.

اهمیت ارتفاع پله به این دلیل است که بطور مستقیم بر میزان بازیابی ماده‌معدنی[۲] و تعیین شیب نهایی دیواره معدن تاثیر دارد و به عنوان یک عامل کنترل‌کننده در بحث ایمنی معادن مطرح است. کیفیت عملیات انفجار نیز تا حدود زیادی به ارتفاع پله مرتبط است و با مشخص شدن ارتفاع و به دنبال آن هند سه پله، می‌توان الگوی منا سب چالزنی و انفجار مورد نیاز جهت ا ستخراج، از قبیل قطر چال، ضخامت بارسنگ، فاصله جناحی چال‌ها، ارتفاع ستون ماده‌منفجره و ... را بدست آورد.

[۱] Bench Height or Height of Bench

[۲] Ore Recovery

جهت مدل‌سازی پیکره‌معدنی و سپس محاسبه میزان ذخیره و عیار یک معدن، از یک مدل بلوکی[۱] استفاده می‌شود. ابعاد بلوک‌های بکار رفته در این مدل بلوکی به حجم کارهای اکتشافی صورت گرفته، روش تخمین و اندازه تجهیزات و دستگاه‌های مورد استفاده بستگی دارد. در بسیاری از معادن روباز، ارتفاع این بلوک‌ها را برابر یا مضربی از ارتفاع پله استخراجی در نظر می‌گیرند. بنابراین در این تحقیق هر جا اشاره به ارتفاع بلوک شد، منظور همان ارتفاع پله استخراجی است. ابعاد این مدل بلوکی، بخصوص ارتفاع بلوک‌ها، باید بگونه‌ای انتخاب شود تا اهداف مورد انتظار شرکت یا معدن را تحقق بخشد. در نتیجه لازم است تا ابتدا تمامی عواملی که با ارتفاع پله در معادن روباز در ارتباط هستند و جز اهداف شرکت‌های معدنی قرار دارند، شناسایی شوند و تاثیرات متقابل آن‌ها مورد ارزیابی قرار گیرند. برخی از مهمترین عواملی که با ارتفاع پله در ارتباط هستند شامل میزان تولید مورد انتظار معدن (نرخ تولید)، هندسه پیکره‌معدنی، میزان ترقیق[۲] و بازیابی، میزان انتخابی شدن استخراج[۳]، اندازه و نوع ماشین‌آلات استخراجی و پارامترهای ژئومکانیکی پیکره‌معدنی و سنگ در برگیرنده آن است. این عوامل با یکدیگر در ارتباط هستند و تغییر هر کدام بر سایرین تاثیرگذار است. در فصل بعد در مورد نقش هر یک از این عوامل و ارتباط آن با سایر عوامل بیشتر بحث خواهد شد.

در این تحقیق سعی شده است تا در مورد پارامترهای وابسته به ارتفاع پله و تاثیر نقش ارتفاع پله روی هر یک از این پارامترها در مرحله طراحی پیت صحبت شود و از طریق استفاده از داده‌های اکتشافی یک معدن سنگ آهن واقعی، رویکردی متناسب با اهداف معدن و به منظور تعیین مناسب‌ترین ارتفاع پله معرفی شود. بنابراین در ادامه به بیان کلیاتی پیرامون مساله پرداخته شده است و پس از آن ضرورت انجام این تحقیق و همچنین اهداف مورد انتظار در این تحقیق ارائه شده است.

---

[۱] Block Model
[۲] Dilution
[۳] Selective Mining

۱-۲- بیان مسأله

هنگامیکه صحبت از تعیین بهترین ارتفاع پله در یک معدن خاص می‌شود، باید توجه داشت این ارتفاع پله از چه منظری بهترین است. این جمله به این معناست که باید قبل از هر اقدامی، اهداف و استراتژی پروژه را تعیین کرد. این اهداف می‌تواند شامل بیشینه کردن بازیابی ماده‌معدنی و کاهش ترقیق از طریق استخراج انتخابی (مثلا در معادن استراتژیک و خاص مانند طلا و اورانیوم)، افزایش طول عمر معدن برای ایجاد اشتغال در یک منطقه، بیشینه شدن ارزش فعلی و نرخ بازگشت داخلی سرمایه و یا تلفیقی از همه حالات باشد. اینجاست که تعیین اهداف و سیاست‌های یک معدن اولین گام اصلی برای انتخاب ارتفاع پله مناسب می شود. می‌توان گفت هر معدنی شرایط ویژه و مختص به خود را دارد و بنابراین با توجه به اهداف آن معدن و تمام فاکتورهای دخیل در آن چه از نظر فنی و چه از نظر اقتصادی، تنها یک ارتفاع پله بهینه برای آن معدن وجود دارد که ممکن است برای معادن دیگر مناسب نباشد. بنابراین به منظور تعیین بهترین ارتفاع پله نباید به دنبال یک فرمول خاص که در تمامی حالات عمومیت و قابل کاربرد باشد بود؛ بلکه بجای آن می‌توان با توجه به اهداف هر معدن و میزان اهمیت هر کدام از فاکتورهای موثر (چه عوامل اثرگذار و چه عوامل تاثیرپذیر) در تعیین ارتفاع پله، یک رویکرد کلی برای انتخاب مطلوب‌ترین حالت پیشنهاد کرد. بطور مثال، معادن با نرخ‌های تولید بالاتر به دنبال کاهش هزینه‌های واحد[۱] به منظور مقابله با هزینه‌های تولید هستند. این افزایش تولید، به معنای افزایش ارتفاع پله و انتخاب تجهیزات استخراجی با ابعاد و ظرفیت بیشتر به منظور تولید در هزینه واحد کمتر است. پیامد نگاه این چنینی به انتخاب ارتفاع پله و به دنبال آن تجهیزات، به احتمال زیاد سبب کاهش میزان بازیابی ماده‌معدنی، افزایش نسبت باطله‌برداری نهایی و به دنبال آن افزایش هزینه نهایی تولید می شود. اما اگر هدف در یک معدن بیشینه شدن میزان بازیابی باشد، آنگاه لازم است تا ارتفاع پله کاهش یابد که در نتیجه احتمالا باعث افزایش هزینه تولید می‌شود.

[۱] Unit costs

برخی از پیامدهای افزایش ارتفاع پله‌ها به شرح زیر است (عطایی، ۱۳۹۰؛ اصانلو، ۱۳۸۹) :

- امکان استفاده از تعداد ماشین‌آلات کمتر اما با ابعاد بزرگتر و ظرفیت بیشتر را فراهم می‌کند که این ماشین‌آلات بزرگتر و با ظرفیت بیشتر، دارای بازدهی (بهره‌وری) و نرخ تولید بالاتر خواهد بود. در نتیجه معمولاً منجر به کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌شود. همچنین باعث صرفه‌جویی در زمان بارگیری و نظارت بهتر و دقیق‌تر و ترافیک کمتر در معدن می شود. اما با بزرگتر شدن ابعاد ماشین‌آلات به عرض پله و فضای کاری بزرگتری نیاز است.
- به دلیل صرفه‌جویی در طول کل حفاری و زمان جابجایی تجهیزات، معمولاً موجب کاهش هزینه عملیاتی واحد چالزنی می‌شود. همچنین عملیات انفجار بزرگتر در این پله‌ها باعث می‌شود تا مواد بیشتری در یک بازه زمانی مشخص، آماده حمل به کارخانه شود و تعداد دفعات چالزنی و انفجار کمتر شود. اما ارتفاع پله انفجاری بلند معمولاً سبب افزایش ترقیق ناخواسته (اختلاط ماده‌معدنی با باطله) و نیز افزایش نسبت باطله‌برداری، خصوصاً در کانسارهای ناهمگن می‌شود و امکان (قابلیت) انتخابی شدن استخراج و انعطاف‌پذیری عملیات استخراج را کاهش می دهد.
- افزایش ارتفاع پله سبب بوجود آمدن مشکلات جدی ایمنی و پایداری می‌شود.

برخی پیامدهای کاهش ارتفاع پله به شرح زیر است (عطایی، ۱۳۹۰؛ اصانلو، ۱۳۸۹):

- ارتفاع پله کوتاه‌تر باعث افزایش میزان بازیابی ماده‌معدنی شده و در نتیجه افت ماده‌معدنی کاهش می‌یابد. همچنین معمولاً موجب حذف باطله از بلوک ماده‌معدنی شده و در نتیجه عیار معدن را افزایش می‌دهد.
- امکان استخراج انتخابی و انعطاف‌پذیری عملیات افزایش می‌یابد.
- ابعاد و ظرفیت ماشین‌آلات بارگیری و باربری کاهش می‌یابد و به دنبال آن میزان تولید ماده‌معدنی و نرخ تولید کاهش یافته و در نتیجه سود کسب شده، کمتر می‌شود و هزینه تولید به ازای هر واحد ماده‌معدنی افزایش یابد.

با توجه به مطالب گفته شده در بالا، اکنون این سوال مطرح می‌شود که در هنگام طراحی ارتفاع پله این ارتفاع چند متر در نظر گرفته شود و چگونه تعیین شود؟

۱-۳- ضرورت تحقیق

تصمیم‌گیری و تعیین مناسب‌ترین ارتفاع پله، جزو نخستین گام‌ها در هنگام طراحی معادن روباز است که مستقیماً روی سودآوری پروژه‌های معدنی تاثیرگذار است. از یک سو، انتخاب ارتفاع پله نقش مهمی بر انتخاب نوع تجهیزات بارگیری و به دنبال آن تجهیزات باربری دارد. این گفته به این معناست که مجموعه ماشین‌آلات در حال کار در یک معدن روباز هندسه بهینه‌ای لازم دارند که می‌تواند پس از تعیین ارتفاع پله انتخاب شود. از سوی دیگر با مشخص بودن نوع تجهیزات و ماشین‌آلات یک معدن و به منظور بهره‌وری بیشتر از این تجهیزات، باید ارتفاع پله‌ای انتخاب شود که با این تجهیزات سازگاری داشته باشند. بنابراین می‌توان گفت که ارتفاع پله و نوع تجهیزات در تعامل با یکدیگر قرار دارند و انتخاب هر یک به انتخاب دیگری وابسته است. همچنین هر قلم از ماشین‌آلات نیز به نوبه خود هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی ویژه‌ای لازم دارند که این عامل در طراحی ارتفاع پله اقتصادی تاثیرگذار است. واضح است که تعیین ارتفاع پله اقتصادی با توجه به نوع ماشین‌آلات و تجهیزات مورد استفاده، توپوگرافی و هندسه ماده‌معدنی، شرایط محیطی و کاری، برنامه‌های استخراجی و ... می‌تواند در هر معدن متفاوت باشد. اما بطور کلی می‌توان گفت ارتفاع پله رابطه نزدیکی با هزینه واحد تولید[۱] (مقدار هزینه مصرفی برای تولید یک واحد از محصول) دارد. از دیگر عواملی که اندازه ارتفاع پله بر آن تاثیرگذار است، میزان بازیابی و ترقیق استخراجی است که مستقیما بر هزینه‌ها و درآمد کسب شده در ارتباط است.

با توجه به پیامدهای افزایش و کاهش ارتفاع پله، برخی از نیازها و اهداف مورد انتظار در یک

[۱] Product unit cost

پروژه معدنی با یکدیگر غیرهمسو بوده و بعضاً حتی در تضاد با یکدیگر قرار دارند. اینجاست که نقش ارتفاع پله به عنوان یک عامل واسطه و کلیدی که هم می‌تواند در بهبود هزینه تولید[1] و هم در بهبود بهره‌برداری از منبع معدنی[2] کمک کند، برجسته می‌شود. به همین دلیل لازم است تا با توجه به اهداف مورد انتظار شرکت‌های معدنی و درجه اهمیت هریک از این فاکتورها، مطلوب‌ترین ارتفاع پله تعیین شود. عمده تلاش‌ها و کارهای صورت گرفته پیشین، تعیین ارتفاع پله با توجه به ظرفیت و ابعاد تجهیزات و ماشین‌آلات معدنی (به عنوان اصلی‌ترین فاکتور موثر بر ارتفاع پله) بوده است. هرچند در این کارها تا حد زیادی به تاثیر اندازه تجهیزات در رسیدن به میزان تولید مورد نیاز از طریق تعیین ارتفاع پله (ارتفاع بلوک استخراجی) توجه شده است ولی به سایر فاکتورهای موثر مثل میزان بازیابی، ترقیق، انتخابی شدن استخراج و بیشینه کردن ارزش منبع معدنی که از جمله مهمترین اهداف در تعیین ارتفاع پله هستند، کمتر بها داده شده است. بنابراین لازم است تا تمامی عوامل مؤثر در تعیین ارتفاع پله در یک مطالعه کامل مورد توجه قرار گیرند تا بررسی جامعی که منجر به انتخاب بهترین ارتفاع پله می‌شود، صورت پذیرد.

۱-۴- اهداف تحقیق

از آنجا که معادن بیشتر بصورت بنگاه‌های مالی در نظام اقتصادی هر کشوری مطرح هستند، بنابراین اولویت اصلی در این تحقیق آن است که با ارائه یک رویکرد هدفمند و مرحله به مرحله و با توجه به فاکتورهای فنی و اقتصادی موثر در تعیین ارتفاع پله، ارتفاع پله‌ای که در نهایت منجر به بیشینه شدن ارزش خالص فعلی منبع معدنی می‌شود (به عنوان هدف اصلی یک بنگاه اقتصادی) را به عنوان مناسب‌ترین ارتفاع پله معرفی کند. پس در اینجا منظور از ارتفاع پله مناسب، بهترین ارتفاع پله اقتصادی است که سبب بیشینه شدن ارزش خالص فعلی پروژه می‌شود.

---

[1] Production Cost

[2] Mineral Resource Utilization

۱-۵- روش تحقیق

این تحقیق یک مدل نظام‌مند و هدف‌دار است که از آن می‌توان در ارزیابی طیف گسترده‌ای از منابع معدنی در فاز اولیه برنامه‌ریزی، به منظور تعیین اقتصادی‌ترین ارتفاع پله قابل اجرا استفاده کرد. در این تحقیق بیشتر توجهات به ترکیبی از ارتفاع پله، میزان ترقیق و بازیابی، انتخابی شدن استخراج، انتخاب تجهیزات و ماشین‌آلات مناسب در راستای به حداکثر رساندن ارزش خالص فعلی پروژه از طریق بهره‌برداری هرچه موثرتر از منابع معدنی معطوف شده است. برای این منظور از ۴ سناریو ممکن برای اندازه ارتفاع پله که قابلیت اجرا داشت، استفاده شد که این سناریوها شامل ارتفاع پله‌های ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ متری است و تمام ارزیابی‌ها روی این سناریوها صورت می‌گیرد.

در واقع هدف از این تحقیق حساس کردن صنایع معدنی به پیامدهای اقتصادی ناشی از کاربرد ارتفاع پله‌های مختلف در یک معدن معین است و می‌کوشد تا با نشان دادن تاثیر عواملی که در کارهای قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند، مثل اثر ترقیق و میزان بازیابی، توجهات را به سمت شدت تغییرات ارزش منابع معدنی در اثر انتخاب ارتفاع پله‌های مختلف معطوف کند. باید توجه داشت که مقصود اصلی در این تحقیق امکان‌سنجی پروژه‌ها و تخمین ذخیره نیست بلکه بیشتر تمایل دارد تا با انجام یک آنالیز مقایسه‌ای[۱] برای حالات و سناریوهای مختلف در نظر گرفته شده، تصمیم‌گیری را جهت انتخاب مناسب‌ترین ارتفاع پله آسان کند. در ادامه، پس از تبیین و نحوه انجام رویکرد ارائه شده، برای درک بهتر و بررسی نتایج در این رویکرد، از داده‌های گمانه‌های اکتشافی معدن سنگ آهن شماره ۲ گل‌گهر استفاده شده است و ارتفاع مناسب پله در این معدن با توجه به رویکرد بیان شده، پیشنهاد می شود. اگرچه این مطالعه بطور خاص در مورد یک معدن روباز سنگ آهن بکار رفته است، اما رویه بیان شده در آن می‌تواند بصورت یک رویکرد عمومی و قابل کاربرد برای سایر منابع معدنی که در مراحل اولیه برنامه‌ریزی و یا حتی استخراج قرار دارد، بکار رود.

---

[۱] Comparative Analysis

۱-۶- ساختار تحقیق

این پایان‌نامه در ۶ فصل تدوین شده است:

فصل اول : با بیان مقدمه‌ای در مورد نقش ارتفاع پله در معادن روباز به اهمیت موضوع تحقیق پرداخته شده است و سپس عوامل و اهداف مرتبط با آن تشریح شده است و ضرورت و اهداف تحقیق بیان شده است.

فصل دوم : به معرفی مهمترین عوامل مرتبط با ارتفاع پله و نقش هر یک از این عوامل در معادن روباز پرداخته شده است و نگاهی اجمالی به کارهای صورت گرفته نویسندگان قبلی در این زمینه دارد.

فصل سوم : این فصل به بررسی یکی از مهمترین عوامل مرتبط با ارتفاع پله، یعنی انتخاب ماشین‌آلات و تجهیزات بارگیری پرداخته است. یک ارزیابی جامع روی انتخاب تجهیزات و ارتباط آن با ارتفاع پله (بلوک) صورت می‌پذیرد و تاثیرات آن را بر روی سایر عوامل مرتبط با ارتفاع پله نظیر میزان انتخابی شدن استخراج و کنترل ترقیق استخراجی بررسی می‌کند؛ برای این منظور ۴ نوع از رایج‌ترین و پرکاربردترین ماشین‌آلات بارگیری که در بسیاری از معادن از آن‌ها استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای معنی‌دار بودن این مقایسه و با فرض نرخ تولید و نیاز بازار ثابت، انتخاب نوع و مدل این تجهیزات بر اساس ظرفیت جام شان، مشابه و یکسان در نظر گرفته شد. از آنجا که انتخاب بهینه تجهیزات بارگیری تنها از طریق تطابق[۱] داشتن ویژگی‌های پیکره‌معدنی با توانایی‌های خاص دستگاه بارگیری قابل دستیابی است، بنابراین برای هر یک از ارتفاع پله‌ها با توجه به نیازهای استخراج انتخابی، مناسب‌ترین دستگاه بارگیری معرفی می‌شود. سپس در ادامه، مناسب‌ترین ماشین‌آلات بارگیری انتخابی در هر سناریو، برای بررسی مالی و اقتصادی در نظر گرفته خواهد شد.

[۱] Matching

فصل چهارم : در ابتدا به بیان رویکرد ارائه شده به منظور تعیین ارتفاع پله مناسب در معادن روباز می‌پردازد. سپس برای درک بهتر این رویکرد، از داده‌های بدست آمده یک معدن سنگ آهن برای شرح مراحل رویکرد پیشنهادی استفاده شده است. در ابتدا با توجه به داده‌های اکتشافی بدست آمده از پیکره‌معدنی مورد مطالعه، تحلیل آماری روی این داده‌ها صورت می‌پذیرد و سپس پیکره‌معدنی در هر یک از سناریوهای ارتفاع پله به صورت یک مدل سه‌بعدی مدل‌سازی می شود. سپس با استفاده از روش‌های زمین‌آماری، مدل بلوکی زمین‌شناسی در هر یک از این سناریوهای ارتفاع پله ساخته می‌شود (ارتفاع بلوک ها برابر با ارتفاع پله مورد نظر در هر سناریو است). در نهایت با توجه به عیارحدهای مختلف منحنی‌های عیار-تناژ[1] در هر سناریو ارتفاع پله برای منبع معدنی ترسیم شده و میزان بازیابی استخراج در هر سناریو بدست آمده و نتایج در هر سناریو مورد مقایسه قرار می‌گیرند.

فصل پنجم : به مطالعه روی پارامترهای اقتصادی هر سناریوی ارتفاع پله می‌پردازد. با توجه به تعیین مناسب‌ترین ماشین‌آلات و تجهیزات جهت انتخابی شدن استخراج که در فصل سوم صورت گرفت، میزان هزینه معدنکاری (هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی) و پارامترهای دیگر (نظیر ترقیق و افت استخراجی) در هر سناریو تغییر می‌کند که باید این هزینه‌ها تعیین شود. سناریویی که بیشترین ارزش را از نظر ارزش خالص فعلی داراست (نه به تنهایی از نظر هزینه عملیاتی یا میزان بازیابی که خود جزیی از ارزیابی اقتصادی هستند)، به عنوان بهترین ارتفاع پله قابل اجرا پیشنهاد می‌شود. مزیت این‌گونه انتخاب ارتفاع پله به این است که هم به نیازهای استخراج انتخابی (مثل افزایش بازیابی و جلوگیری از ترقیق بیش از حد) توجه شده است و هم مناسب‌ترین دستگاه بارگیری جهت دستیابی به این اهداف معرفی شده است.

فصل ششم : با توجه به نتایج بدست آمده در هر سناریو، به مقایسه نتایج نهایی بدست آمده پرداخته است. در انتها پیشنهاداتی جهت بهبود رویکرد ارئه شده و تحقیقات آتی عنوان گردیده است.

---

[1] Grade-Tonnage Curves

فصل دوم

عوامل مرتبط با ارتفاع پله

و پیشینه تحقیق

۲-۱- مقدمه

در معادن روباز عوامل و پارامترهای زیادی وجود دارند که رابطه نزدیک و تنگاتنگی با ارتفاع پله دارند. این عوامل هم می‌توانند روی ارتفاع پله تاثیرگذار باشـــند و یا از آن تاثیر بپذیرند. از مهمترین عوامل مرتبط با ارتفاع پله می‌توان به شـــیب نهایی و میزان باطله‌برداری، میزان ترقیق و بازیابی اســتخراجی، میزان انتخابی شــدن اســتخراج، نوع ماشــین‌آلات و تجهیزات بارگیری و الگوی حفاری و انفجار را نام برد. البته شــایان ذکر اســت که نقش هر یک از این عوامل، جدا از ســایر عوامل نیســت و تاثیر متقابل آن‌ها بر یکدیگر بخوبی مشـــخص و قابل درک اســـت. بنابراین لازم اســـت تا قبل از هر اقدامی، به تبیین این عوامل و ارتباط آن‌ها با ارتفاع پله (بلوک) پرداخته شود. نقش انتخاب تجهیزات و ماشین‌آلات به عنوان مهمترین عامل مرتبط با ارتفاع پله (بلوک) و نیز طراحی چالزنی و انفجار با توجه به ارتفاع پله به طور مفصل در فصل بعد بررسی می‌شود.

۲-۲- شیب نهایی معدن و میزان باطله‌برداری

شیب‌های متعددی وجود دارند که در طراحی پیت روباز مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شیب‌ها به دلیل اهمیت و تاثیری که روی نتایج طراحی معدن دارند، باید به دقت محاســـبه و تعیین شـــوند. زاویه‌ای که خط واصــل پایین‌ترین پاشــنه و بالاترین لبه با افق می‌ســازد، به عنوان زاویه شــیب نهایی

(سراسری) معدن تعریف می‌شود.

زاویه شیب سراسری معدن متاثر از ارتفاع پله، عرض پله‌ها بویژه عرض پله ایمنی است که خود آن نیز باز هم تابعی از ارتفاع پله است. شیب دیواره پیت از جمله مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار در ابعاد و شکل نهایی پیت است. شیب پیت بر تعیین حجم مواد موجود درون آن و بطور خاص بر میزان باطله‌ای که باید برداشت شود (نسبت باطله‌برداری)، تاثیر مستقیم دارد و گاهاً تغییراتی جزیی در این شیب می‌تواند سبب تفاوت چند میلیون تنی در برداشت باطله از پیت شود. از سویی برداشتن باطله[۱] (باطله‌برداری) درصد قابل توجهی از هزینه تولید کل[۲] در یک عملیات استخراج از معادن سطحی را به خود اختصاص می‌دهد. بهره‌گیری از بهترین تکنولوژی موجود، جهت کمینه‌سازی این هزینه بسیار مهم است. یکی از راه‌های کاهش این هزینه، کاستن از حجم فعالیت‌های مورد نیاز از طریق کاهش نسبت باطله‌برداری[۳] است. کاهش در نسبت باطله‌برداری را می‌توان از راه‌های مختلفی بدست آورد؛ مثلا استفاده از یک زاویه شیب[۴] تندتر (پر شیب‌تر)، تفاوت قابل توجه‌ای را در نسبت باطله‌برداری ایجاد می‌کند. همچنین بکارگیری تجهیزات کوچکتر نیز به این دلیل که هم بازیابی ماده‌معدنی[۵] را بهبود می‌بخشد و هم سبب استفاده از پارامترهای طراحی کاربردی‌تر برای این‌دست ماشین‌آلات، همچون عرض باریک‌تر جاده‌ها[۶] و شیب تندتر جاده حمل و نقل[۷] می‌شود، می‌تواند باعث کاهش نسبت باطله‌برداری شود (Swanepoel, 2003).

زاویه شیب نهایی یا سراسری پیت بر دیواره‌ای شامل پله‌ها و رمپ از رابطه (۲-۱) بدست می‌آید (Kennedy, 1990 ; Hustrulid and Kuchta, 2013):

---

[۱] Waste Stripping
[۲] Total Production Cost
[۳] Stripping Rate
[۴] Slope Angle
[۵] Ore Recovery
[۶] Narrower Road Widths
[۷] Haul Road

$$\theta = \tan^{-1}\frac{n\,h}{(n-1)w + \frac{n\,h}{\tan\beta} + w_R} \qquad (۱-۲)$$

که در آن، θ زاویه شیب نهایی (سراسری) معدن بر حسب درجه، n تعداد پله‌ها، β شیب رخساره هر پله، h ارتفاع پله، W_R عرض رمپ و یا پله کاری و w عرض پله ایمنی است.

با افزایش ارتفاع پله، ماشـــین‌آلات بارگیری بزرگتر مطابق با آن و در نتیجه ماشـــین‌آلات باربری بزرگ‌تر و با عرض بیشـــتر انتخاب می‌شـــوند. این به معنای افزایش عرض پله و همچنین عرض جاده اســـت که باعث تغییر در میزان باطله‌برداری و شـــیب نهایی معدن گردد. در نتیجه برای دســـتیابی به شیب نهایی پیت و محدوده نهایی معدن، باید بهترین ارتفاع پله و به دنبال آن عرض پله انتخاب شود (Bozorgebrahimi, 2004).

پس از تعیین محدوده نهایی معدن، یکی از مهمترین جنبه‌های طراحی در معادن روباز تعیین تعداد و شـــکل جاده‌های باربری (رمپ‌ها) اســـت. رمپ‌ها باید از ابتدا در فرآیند طراحی در نظر گرفته شود، چراکه می‌توانند تاثیر تعیین‌کننده‌ای بر زاویه شیب‌ها بگذارند و زوایای شیب‌های انتخاب شده نیز تاثیر بسزایی بر میزان حجم ذخیره قابل برداشت[۱] و مقیاس عملیات دارند. اضافه کردن یک رمپ به یک پیت روباز موجب می شود که یا حجم زیادی از مواد اضافی برداشته شود یا حجم مشابهی از مواد اســـتخراج نشـــده در پیت باقی بماند. بنابراین، هرچند داشـــتن چندین جاده دســـترســـی می‌تواند انعطاف‌پذیری تولید را بهبود بخشـــد و به صـــرفه‌جویی‌های دیگری از جمله شـــیب‌های گذرگاهی تندتر منجر شود، ولی جاده‌های باربری اضافی هزینه‌های قابل توجهی را به پروژه تحمیل می‌کند. سوالات و تصمیمات مهمی در هنگام اجرای جاده‌های باربری وجود دارد که باید به آن‌ها پاسخ داد (Hustrulid and Kuchta, 2013):

[۱] Recoverable Reserve

- اولین تصمیم تعیین محل خروجی‌های جاده از دیواره پیت روباز است. این تصمیم به موقعیت سنگ‌شکنی و نقاط تخلیه بستگی دارد.
- آیا بیش از یک راه د ستر سی لازم ا ست وجود دا شته با شد؟ این امر انعطاف‌پذیری خوبی را برای عملیات فراهم می‌کند، ولی هزینه باطله‌برداری بیشتری را موجب می‌شود.

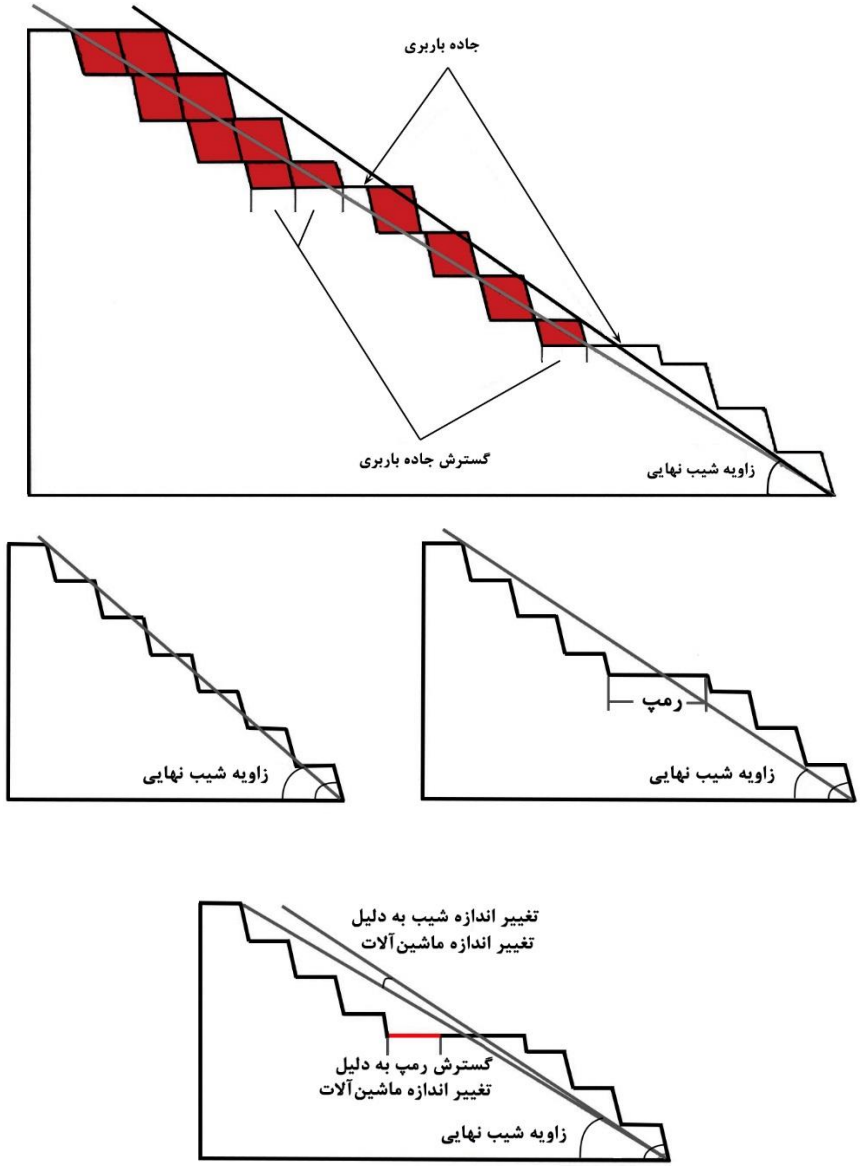
در جدول ۲-۱ عرض کامیون و همچنین عرض مورد نیاز برای جاده‌های دو بانده و ســـه بانده بر اساس اطلاعات جزوات و راهنماهای شرکت کاترپیلار[۱] آورده شده است (Bozorgebrahimi, 2004).

جدول ۲-۱ : عرض تقریبی جاده باربری برای اندازه های مختلف کامیون‌ها (Bozorgebrahimi, 2004)

اندازه کامیون (تن)	عرض تقریبی (m)	عرض جاده دو بانده (m)	عرض جاده سه بانده (m)
۳۷	۵/۰۱	۲۰/۰۴	۲۵/۰۵
۴۰	۵/۰۱	۲۰/۰۴	۲۵/۰۵
۵۳	۵/۰۸	۲۰/۳۲	۲۵/۴
۶۳	۵/۲۱	۲۰/۸۴	۲۶/۰۵
۹۶	۶/۱	۲۴/۴	۳۰/۵
۱۵۳	۶/۶۴	۲۶/۵۶	۳۳/۲
۱۹۶	۷/۶۷	۳۰/۶۸	۳۸/۳۵
۲۳۲	۷/۴۱	۲۹/۶۴	۳۷/۰۵
۳۲۶	۹/۱۵	۳۶/.۶	۴۵/۷۵

بکارگیری کامیون های بزرگتر ایجاب می‌کند که دیواره های پیت روباز به عقب رفته تا رمپ های عریض تری جانمایی شوند. این امر در شیب نهایی معدن و میزان مواد بردا شته شده همانطور که در شکل ۲-۱ آمده، تغییراتی ایجاد می‌کند (Bozorgebrahimi, 2004). هر چه عرض جاده بیشتر شود، مقدار تناژ باطله‌ای که باید برداشته شود بیشتر می‌شود.

[۱] Caterpillar



شکل ۲-۱ : تاثیر اندازه تجهیزات روی شیب نهایی معدن (after Bozorgebrahimi, 2004)

تغییرات زاویه شـــیب ناشـــی از ابعاد بزرگتر کامیون و افزایش عرض رمپ از رابطه (۲-۲) محاســـبه می‌شود (Bozorgebrahimi, 2004):

$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left[\frac{W_R \cdot \sin(\theta)}{H}\right] \qquad (۲-۲)$$

وقتی رمپ بیش از یک بار دیواره معدن را قطع کند باید از رابطه (۲-۳) استفاده کرد :

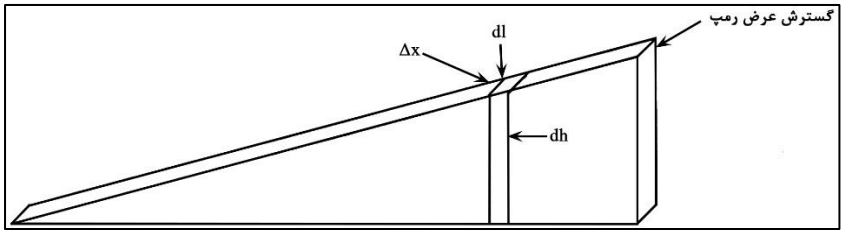
$$\Delta\theta = \tan^{-1}\left[\sum_{1}^{n}\left(\frac{W_R \cdot \sin(\theta)}{H}\right)\right] \qquad (۲-۳)$$

که در آن n از رابطه (۲-۴) بدست می‌آید :

$$n = \text{int}\left(\frac{H}{g \times l}\right) \qquad (۴-۲)$$

n تعداد دفعاتی است که رمپ دیواره را قطع می‌کند، g شیب رمپ (بر حسب درصد)، l تصویر طول رمپ بر دیواره پیت، W_R افزایش عرض جاده در اثر افزایش ابعاد کامیون، $\Delta\theta$ افزایش شیب نهایی معدن بر اساس افزایش ابعاد کامیون، θ شیب نهایی قبل از افزایش ابعاد کامیون و H عمق پیت روباز (متر) است.

با توجه به شکل ۲-۲ جهت گسترش رمپ باربری در اثر افزایش عرض کامیون، می‌توان با داشتن میزان تعریض جاده، عمق معدن و طول رمپ، میزان مواد اضافی (مازاد) که به دلیل افزایش عرض کامیون باید جابجا گردند را بدست آورد.



شکل ۲-۲ : هندسه تعریض جاده باربری در نتیجه گسترش عرض رمپ (after Bozorgebrahimi, 2004)

برای این منظور از رابطه (۲-۵) استفاده می‌شود :

$$w = \int_0^{y/g} \left(\frac{1}{2} \times \gamma \times W_R\right) \times dH \times dL \qquad (۵-۲)$$

که W: حجم مواد اضافی که باید جابجا شوند (مترمکعب m^3)، W_R: گسترش عرض رمپ (متر)، γ: وزن مخصوص متوسط موادی است که باید معدنکاری شوند (t/m^3)، dH: نماد عمق پیت روباز (متر)، dH: نماد طول رمپ (متر)، H: عمق پیت روباز (متر) و g: شیب رمپ (بر حسب درصد) است.

حاصـل انتگرال‌گیری رابطه بالا بصـورت رابطه (۲-۶) اسـت که از آن می‌توان برای برآورد میزان تناژ باطله‌ای که در اثر طراحی رمپ به پیت افزوده می‌شود، استفاده کرد (Hustrulid and Kuchta, 2013 ; Bozorgebrahimi, 2004):

$$w = \left[\frac{\left(\frac{1}{2} \times \gamma \times W_R \right) \cdot H^2}{g} \right] \qquad (۲-۶)$$

۲-۳- ترقیق (اختلاط باطله با ماده‌معدنی)[۱]

ترقیق اشـاره به مواد باطله‌ای دارند که در طول عملیات اسـتخراج از ماده‌معدنی جدا نشـده‌اند و همراه با ماده‌معدنی اسـتخراج می‌گردند. این مواد باطله با ماده‌معدنی مخلوط می‌شـوند[۲] و به کارخانه فرآوری ارسـال می‌شـود (Jara, 2006; Sinclair, 2002). بطور کلی، ترقیق سـبب افزایش تناژ ماده‌معدنی می‌شود ولی در عین حال عیار آن را کاهش می‌دهد.

ترقیق‌های مختلفی در هر مرحله از عملیات معدنکاری تا فرآوری نظیر ترقیق اسـتخراجی، ترقیق برنامه‌ریزی شـده و ... وجود دارد. تعیین مقدار کمّی[۳] ترقیق بصـورت دقیق از جدی‌ترین چالش‌های طراحی اسـت (Pakalnis et al., 1995). ترقیق اسـتخراجی را می‌توان به عنوان نسـبت تناژ باطله استخراج شده و ارسال شده به کارخانه فرآوری به کل (مجموع) تناژ باطله و ماده‌معدنی ترکیب شده باهم که به کارخانه فرآوری ارسـال می‌گردد، تعریف کرد. این نسـبت معمولاً برحسـب درصـد بیان می‌شود و به‌صورت رابطه (۲-۷) بیان می‌شود:

$$Dilution = \frac{Waste\ Tonnes}{(Ore\ Tonnes + Waste\ Tonnes)} \times 100 \qquad (۲-۷)$$

---

[۱] Dilution
[۲] Mixed
[۳] Quantification

برای مثال اگر ۱۰ تن از ســـنگ باطله به همراه ۱۰۰ تن ماده‌معدنی اســـتخراج گردد و تمام این تناژ (۱۱۰ تن) به کارخانه آ سیاکنی ار سال شود، ترقیق در این حالت ۹/۱ ٪ محا سبه می شود (Anoush Ebrahimi, 2013).

ترقیق باعث از بین رفتن ماده‌معدنی با عیار بالا از خوراک کارخانه شده، در نتیجه عیارهای مورد انتظار را کاهش می‌دهد و بواســطه افزایش تناژ موادی که باید آســیا شــوند، ســبب افزایش هزینه‌های عملیاتی[۱] در کارخانه آ سیاکنی می شود. علاوه بر این، تاثیر مستقیم آن بر روی درآمدهای کوتاه‌مدت[۲] یک معدن، سبب می شود تا ترقیق تغییرات قابل توجهی بر روی فاکتورهای دیگری بگذارد که در دراز مدت[۳] ارزش کلی پروژه را کاهش می‌دهد. به عنوان مثال، ترقیق به دلیل کاهش گنجایش مفید کارخانه آسیاکنی[۴]، عمر معدن را افزایش می‌دهد و سبب تاخیر در بازگشت سرمایه می‌شود. همچنین باعث کاهش عیار خوراک[۵] و در نتیجه کاهش بازیابی متالوژیکی کارخانه فرآوری می‌شـــود. در اکثر مواقع، کاهش عیار خوراک به معنای کاهش بازیابی و راندمان کارخانه آســـیاکنی[۶] اســـت (Anoush Ebrahimi, 2013).

در برخی موارد، جهت بهره‌مندی از مزیت صرفه‌جویی به مقیاس[۷]، عملیات ا ستخراج تمایل دارد تا برای نرخ تولیدهای بالاتر و بیشتر برنامه‌ریزی شود. حرکت به سمت عملیات بزرگ‌مقیاس‌تر[۸] که با کاهش در انتخابی شدن ا ستخراج همراه ا ست، ترقیق بیشتری را به دنبال خواهد دا شت. این مو ضوع

---

[۱] operating costs

[۲] short term income

[۳] long term

[۴] mill's effective capacity

[۵] feed grade

[۶] mill recovery

[۷] Economies of Scale : که آن را مزیت مقیاس نیز می‌نامند، مفهومی بنیادین در مبحث اقتصـاد خرد اسـت که به کسـب مزیت کاهش هزینه در اثر افزایش حجم تولید اشاره دارد و در مقابل اصطلاح اقتصاد تنوع (economy of scope) قرار دارد. در کارهای استخراجی می‌توان کاهش در هزینه‌ها را از طریق افزایش حجم با استفاده از دستگاه‌های بارگیری بزرگتر با نرخ تولید بیشتر به دست آورد.

[۸] Larger scale

برای همه نوع کانساری صدق می‌کند (Swanepoel, 2003). به ندرت اتفاق می‌افتد که بعد از عملیات معدنکاری، عیار دریافتی کارخانه فرآوری که در حفاری‌های اکتشافی و تخمین کانسار پیش‌بینی شده بود، تحقق یابد. این جمله به این معنا است که احتمالا تناژ ماده‌معدنی بطور مشخصی بالاتر از انتظار و عیار آن پایین‌تر از میزان پیش‌بینی شده است و این میزان بیش از حد و کنترل نشده ترقیق[۱] ممکن است سرانجام هدف افزایش نرخ تولید را در این قبیل معادن با شکست مواجه کند (سرداری، ۱۳۸۸).

تغییرات و تنوع ترقیق در معادن مختلف بر اساس ویژگی‌ها و خصوصیات کانسار، جنبه‌های عملیاتی[۲] و عیارحد اقتصادی است. به عنوان مثال، شکل کانسار، ارتفاع پله، اندازه تجهیزات و شرایط بازار فروش همگی بر روی میزان ترقیق در یک معدن تاثیرگذار خواهد بود. پروژه‌های معدنی که درک بهتری از میزان ترقیق صحیح در ابتدای شروع به کارشان دارند، با موفقیت بیشتری همراه خواهند بود. به منظور ارزیابی هر چه بهتر پروژه‌ها، بررسی ترقیق باید بخش جدایی‌ناپذیری از هر پروژه باشد.

با فرض یک بلوک استخراجی، ترقیق می‌تواند در ۲ ناحیه مختلف رخ دهد (اتفاق افتد). گاهی اوقات درون یک بلوک استخراجی ناخالصی‌های همراه[۳] یا حباب‌های کوچکی از موادمعدنی کم‌عیار[۴] وجود دارد که توسط مواد معدنی عیار بالا احاطه شده‌اند که نمی‌توان آن‌ها را طبق واحد معدنکاری انتخابی در نظر گرفته شده از ماده‌معدنی جدا کرد و به ناچار این بخش‌ها همراه با بلوک استخراجی، استخراج می‌گردد. این حالت از ترقیق را ترقیق داخلی[۵] (درونی) می‌نامند. واضح است که ترقیق داخلی به عیارحد بکار رفته در تعیین مرز ماده‌معدنی و باطله وابسته است. جلوگیری از بروز ترقیق داخلی اگرچه غیرممکن نیست ولی بسیار دشوار است. میزان ترقیق داخلی بسته به تیپ‌های مختلف

---

[۱] High level and uncontrolled
[۲] Operational aspects
[۳] Waste inclusions
[۴] Low grade pockets
[۵] Internal dilution

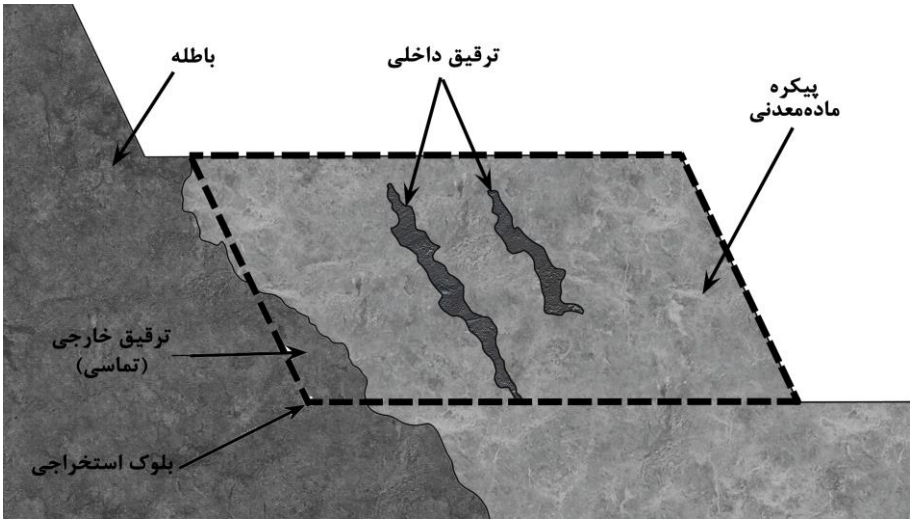
کانسار، متفاوت و متغیر است. لیتولوژی[۱] (سنگ‌شناسی) و نحوه توزیع عیار[۲] فاکتورهای مهمی در ترقیق داخلی هستند. خود ترقیق داخلی را می‌توان به دو زیر مجموعه: (۱) پیکره‌هایی که هندسه‌شان بطور واضح و مشخصی معلوم است (خواص فیزیکی بصری و بارز نظیر رنگ و اندازه دانه‌بندی) و (۲) ترقیق ذاتی و جدایی‌ناپذیر تقسیم کرد. منشا ترقیق داخلی هندسی، پیکره‌هایی از باطله با مرزهایی معلوم و مشخص درون یک زون معدنی است (مثل دایک‌های بی‌ارزشی که زون‌معدنی را قطع کرده‌اند)؛ اما منشا ترقیق داخلی ذاتی به علت کاهش انتخابی شدنی است که در نتیجه افزایش اندازه بلوک (از جمله ارتفاع بلوک) رخ می‌دهد (مثل کاهش قدرت بارگیری انتخابی تجهیزات) و به عنوان ابتدایی‌ترین راهکار جهت جدایش و تمایز قایل شدن بین ماده‌معدنی از باطله بکار می‌رود (Sinclair & Blackwell, 2004 ; Rossi & Deutsch, 2014).

ترقیق خارجی[۳] که اغلب ترقیق تماسی یا لبه‌ای[۴] نیز از آن‌ها یاد می شود، به آن قسمت از باطله اشاره دارد که در خارج از پیکره‌معدنی و در تماس با آن قرار دارد و در اثر ریزش دیواره‌های جانبی[۵]، مشکل در طبقه‌بندی و مرتب سازی[۶] پیت‌های روباز و یا استخراج سهوی یا هدفمند مواد بی‌ارزش و کم‌عیاری (مثل دایک‌های عاری از مواد باارزش[۷]) که در کنار زون‌معدنی قرار دارند، رخ می‌دهد. بطور کلی، چنین ترقیقی در مواقعی که حفظ دیواره های بخش استخراجی به دلیل خصوصیات ژئومکانیکی‌شان دشوار است و یا در جاییکه عرض ماده‌معدنی از حداقل عرض استخراج[۸] کمتر است یا در اثر خردایش بیش از حد[۹] بعد از انفجار، ممکن است رخ دهد. میزان ترقیق خارجی براساس

---

۱ Lithology
۲ Grade distribution
۳ External dilution
۴ Edge or Contact Dilution
۵ Sloughing of walls
۶ Sorting
۷ Barren Dykes
۸ Minimum Mining Width
۹ Overbreaking

زمین‌شناسی، شکل پیکره‌معدنی، تکنیک‌های حفاری و انفجار، مقیاس (بزرگی) عملیات معدنکاری، اندازه و ابعاد تجهیزات استخراجی بکار رفته و راستای معدنکاری بسیار متغیر و متفاوت است. ترقیق خارجی می‌تواند تا حدودی در کانسارهای بزرگی و توده‌ای که دارای مرزهای تدریجی[1] هستند در مقایسه با کانسارهای کوچکتر از اهمیت کمتری برخوردار باشد چراکه دراین کانسارها مواد ترقیق‌یافته اولا ممکن است سهم کوچکی از تناژ استخراج شده را به خود اختصاص دهند و ثانیا بطور کامل عاری از فلز نیستند و شامل مقداری فلز هستند که احتمالا به عیارحد نزدیک است. بطور کلی، مقدار نامشخصی[2] از باطله باید در حین عملیات استخراج همراه با ماده‌معدنی وجود داشته باشد چراکه تخمین قطعی و مطمئن ذخیره قبل از شروع استخراج تقریبا غیرممکن است؛ اما می‌توان بطور تجربی قضاوت خوبی در این مورد داشت. این نوع ترقیق بگونه‌ای است که می‌توان آنرا با استفاده از تجهیزات مناسب و شیوه‌های استخراجی کارآمد کنترل کرد (Sinclair & Blackwell, 2004 ; Rossi & Deutsch, 2014 ; Anoush Ebrahimi, 2013). شکل ۲-۳ یک بلوک استخراجی در یک پله معدن روباز با انواع مختلف ترقیق (داخلی و خارجی) را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۳ : نمای شماتیک از یک بلوک استخراجی در معدن روباز با انواع مختلف ترقیق در آن

[1] Gradational boundaries

[2] Some uncertain proportion

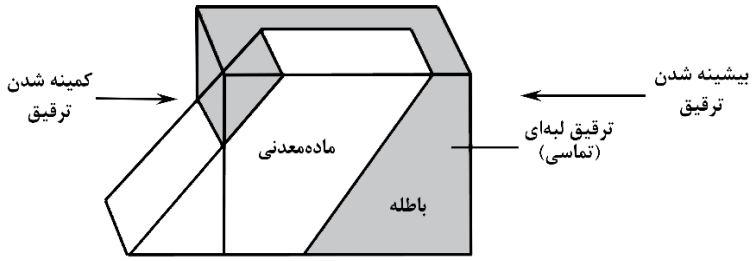
در معادن روباز، ترکیبی از پارامترهای فیزیکی پیکره معدنی، توزیع عیار، شـــرایط معدنکاری و موضوعات عملیاتی باعث ترقیق می‌شود. بطور کلی، عوامل موثر بر ترقیق می‌توانند به دو صورت عوامل مرتبط با کانسار[۱] و عوامل مرتبط با عملیات استخراج[۲] تقسیم گردند (Sinclair & Blackwell, 2004 ; Rossi & Deutsch, 2014). در شکل ۲-۴ این تقسیم‌بندی نشان داده شده است.

شکل ۲-۴ : عوامل موثر بر ترقیق در معادن روباز

عوامل مرتبط با کانســـار، بیانگر ویژگی‌های ذاتی منبع معدنی اســـت که شـــامل نوع ســـنگ و لیتولوژی، زمین شنا سی ساختمانی، توزیع عیار ماده‌معدنی، شیب، ضخامت و هند سه کانسار ا ست. عوامل مرتبط با عملیات اســـتخراج (معدن) شـــامل روش اســـتخراج، هندســـه پیت، جهت (راســـتای) معدنکاری، ابعاد تجهیزات و مهارت متصدیان دستگاه‌ها است. اکنون سوال اصلی این است که با هریک از این عوامل باید به چه طریقی رفتار کرد تا در نهایت به کاهش ترقیق کمک شود؟

[۱] Deposit related
[۲] Mine operation related

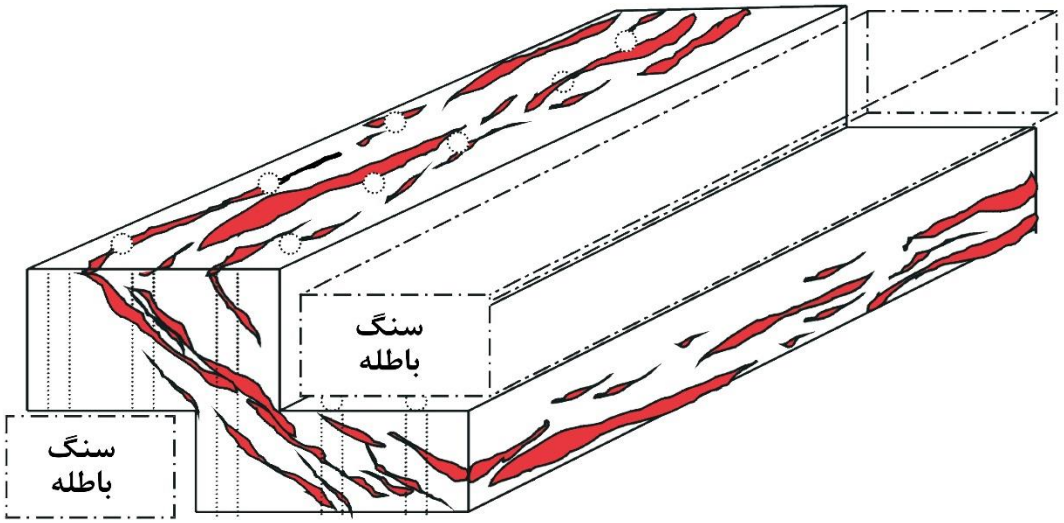
به عنوان مثال در مبحث انتخاب تجهیزات، یک رابطه تنگاتنگ بین ابعاد تجهیزات و هندسه کانسار و پیت وجود دارد. در جایی‌که ابعاد تجهیزات بزرگ است، ابعاد کلیدی پیت نظیر ارتفاع پله (بلوک) تغییر می‌کند و معمولا افزایش میابد. این تغییرات ممکن است منجر به کاهش کنترل روی ترقیق رخ داده شده شود؛ و یا در ارتباط را ستای معدنکاری با شکل و شیب کانسار، همانطور که در شکل ۲-۵ و شکل ۲-۶ ملاحظه می شود، باید جهتی که به حداقل شدن میزان ترقیق کمک می‌کند برای این منظور انتخاب شود.



شکل ۲-۵ : انتخاب مناسب‌ترین راستای استخراج با توجه به شکل ماده‌معدنی جهت کاهش ترقیق (After Oceana Gold، ۲۰۰۷)

شکل ۲-۶ : انتخاب راستای مناسب برای استخراج - خط قرمز نشان دهنده مرز بین ماده‌معدنی است و کمر بالا در سمت جنوب قرار دارد (after Cooksey, 2011)

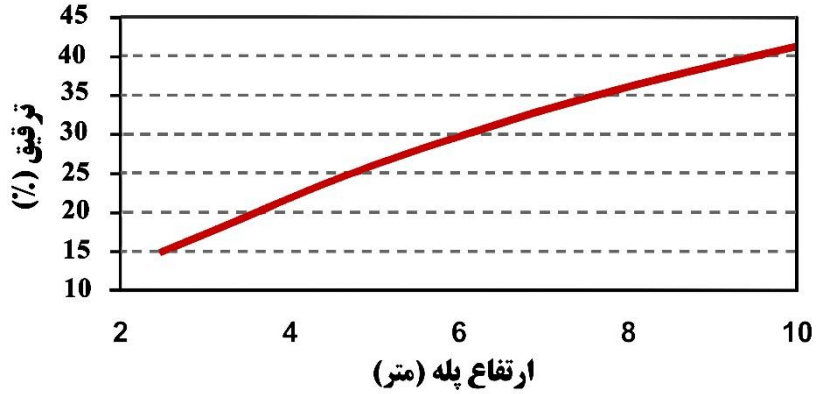
به منظور کمینه کردن ترقیق در مرحله طراحی معدن، نیازمند درک فاکتورهای مدل منبع معدنی و بهینه سازی فاکتورهای استخراجی مطابق با آنها نیاز است. ترقیق را می‌توان از طریق ایجاد توازن و تعادل[1] بین عوامل گروه دوم (یعنی عوامل مرتبط با عملیات استخراج)، با عوامل گروه اول (یعنی عوامل مرتبط با کانسار) کنترل کرد و به کاهش ترقیق کمک نمود. برای مثال در جایی‌که هندسه پیکره‌معدنی بصورتی است که تناوب تبدیل ماده‌معدنی به باطله زیاد است، می‌توان با کاهش ارتفاع پله (بلوک)، استخراج انتخابی را بهبود بخشید و ترقیق را بهتر کنترل کرد. در شکل ۲-۷ مدلی ساده که بیانگر بهره‌گیری مناسب از عوامل مرتبط با استخراج (در اینجا ارتفاع پله مناسب) برای کنترل ترقیق در جاییکه عوامل مرتبط با کانسار (ضخامت و شیب پیکره‌معدنی) سبب بروز ترقیق بیش از حد می‌شوند، را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که چگونه کاهش ارتفاع پله موجب حذف باطله از بلوک استخراجی و افزایش عیار آن و در نتیجه کاهش هزینه‌های فرآوری می‌گردد.



شکل ۲-۷ : تاثیر عوامل مرتبط با استخراج (کاهش ارتفاع پله) بر میزان ترقیق (Bozorgebrahimi, 2004)

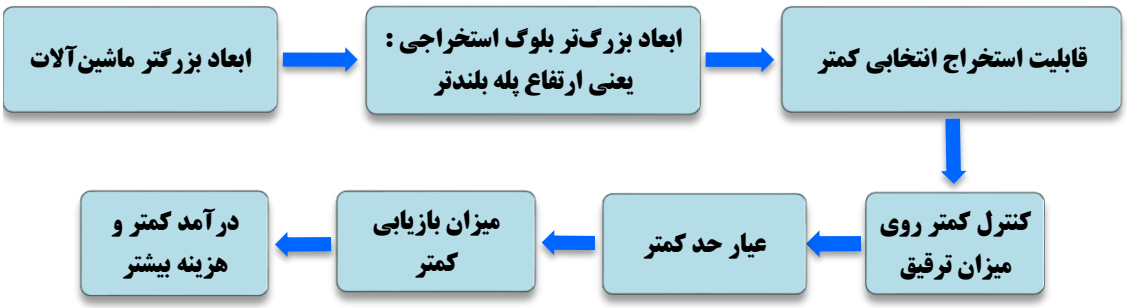
شکل ۲-۸ نشان می‌دهد که برای یک کانسنگ خاص که در آن به غیر از ارتفاع پله، سایر پارامترهای هندسی کانسنگ ثابت فرض شده است با افزایش ارتفاع پله، اختلاط افزایش می‌یابد.

[1] Adjusting



شکل ۲-۸ : رابطه ترقیق با ارتفاع پله (Bozorgebrahimi, 2004)

از آنجا که به عنوان یک اصـــل کلی در معادن روباز، اندازه و ابعاد تجهیزات اســـتخراجی باید با ارتفاع پله (بلوک) سازگاری داشته باشد تا به انتخابی شدن استخراج کمک شود، بنابراین افزایش ابعاد ماشین‌آلات و به دنبال آن ارتفاع پله نیز بر میزان ترقیق رخ داده تاثیرگذار است (شکل ۲-۹):



شکل ۲-۹ : تاثیر ابعاد ماشین‌آلات و تجهیزات در میزان ترقیق (after Bozorgebrahimi, 2004)

بطور کلی نتیجه می شود که با بکار بردن ترکیبی منا سب از هر دو گروه عوامل تاثیرگذار روی ترقیق، می‌توان تا حد زیادی از ترقیق ناخواسته جلوگیری نمود و به انتخابی شدن استخراج کمک کرد.

۲-۴- میزان بازیابی و افت استخراجی

افت استخراجی[۱] (افت ماده‌معدنی) به آن بخش از منابع معدنی که بالاتر از عیارحد اقتصادی قرار دارند و به عنوان ماده‌معدنی برای استخراج در نظر گرفته شده‌اند اما به هر دلیلی به کارخانه آسیا و یا

[۱] Mining loss or ore loss

انباشـــتگاه ماده‌معدنی[۱] ارســـال نمی‌شـــوند و به عبارتی به‌صـــورت باطله از دســـت داده می‌شـــود، گفته می شود (Bertinshaw & Lipton, 2007; Sinclair & Blackwell, 2002; Ribeiro et al., 2009). میزان بازیابی اســـتخراج[۲] با افت اســـتخراجی رابطه دارد و از آن به عنوان ماده‌معدنی بازیابی شـــده در مقابل (خلاف) مواد معدنی از د ست رفته یاد می شود. ماده‌معدنی از د ست رفته معمولا پس از اعمال ترقیق در نظر گرفته می شوند. اگر ا صلاحات[۳] و بهبود رویه‌کاری نظیر تراکم بی شتر نمونه‌برداری‌ها به منظور کاهش ترقیق صورت پذیرد، شناسایی بهتری از پیکره‌معدنی بدست می‌آید و در اینصورت افت ماده‌معدنی نیز کاهش خواهد یافت. با این حال، در اکثر مواقع مرزهای ا ستخراجی ماده‌معدنی که قبلا برنامه‌ریزی گردیده‌اند بطور عمدی تغییر و اصـــلاح داده می‌شـــود تا ترقیق کاهش یابد و این ســـبب افزایش افت ماده‌معدنی (به بهای از دســـت دادن بخشـــی از ماده‌معدنی) می‌شـــود. البته این موضـــوع به هدف مورد نظر پروژه بستگی دارد و در برخی از پروژه‌ها برعکس آن عمل می‌شود.

تاثیر ترقیق و بازیابی دو طرفه است. کاهش میزان بازیابی به این معناست که ماده‌معدنی عمداً یا سهواً به عنوان باطله تلقی شود (ماده‌معدنی شناسایی شده بصورت باطله تلقی شود) و هیچ درآمدی تولید نمی‌کند. نسبت باطله‌برداری که معمولاً هر چه که ا ستخراج به عمق می‌رود، بطور دایم در حال افزایش یافتن اســـت و باعث کاهش درآمد کل[۴] (درآمد نهایی) می‌شـــود. تنها راه جلوگیری از افت ماده‌معدنی[۵] خصوصا در مواقعی که دستگاه‌های بارگیری و باربری از قبل خریداری شده‌اند و با شرایط فعلی پروژه سازگاری ندارند و در محدوده کارایی تعریف شده‌شان قرار ندارند، قبول ترقیق بیشتر است. این گفته به معنای دربرگرفتن بخشی از باطله همراه با ماده‌معدنی برجا[۶] است تا اطمینان حاصل شود که هیچ ماده‌معدنی را از دســـت نمی‌رود. این کار ســـبب افزایش حجم تولید می‌شـــود و هزینه‌های

---

[۱] ore stockpile
[۲] Mining recovery
[۳] procedural improvements
[۴] Total Revenue
[۵] Ore Loss
[۶] Run of mine

غیرضـروری حمل و نقل و پرعیارسـازی[1] را بر پروژه تحمیل می‌کند. پس می‌توان با انتخاب تجهیزاتی که نیازهای ا ستخراج انتخابی را برآورده می سازند، تا حد زیادی از ترقیق و در نتیجه افزایش هزینه‌ها جلوگیری شـــود (Swanepoel, 2003). بنابراین انتخاب تجهیزات یکی از مهمترین و اصـــلی‌ترین پارامترهای مرتبط با ارتفاع پله (بلوک) اســـت که هم با انتخابی شـــدن اســـتخراج و هم بازیابی ارتباط مســـتقیم دارد. بازیابی در یک پیکره‌معدنی را می‌توان با بکارگیری تجهیزات کوچکتری که دارای بیشترین تحرک‌پذیری و قابلیت بارگیری انتخابی هستند، بهبود بخشید.

در مرحله مطالعات امکان‌سنجی یک پیکره‌معدنی، باید میزان ذخیره قابل بازیابی پیش‌بینی شود. به عبارت دیگر لازم اســـت مقدار ماده‌معدنی و محتوای فلز در بلوک‌هایی که عیار آن‌ها از یک حد اقتصـــادی بالاتر اســـت، تخمین زده شـــوند. منحنی‌های عیار-تناژ نســـبت ماده‌معدنی که در بالای یک‌سری از عیارهای حد و همچنین عیار متوسط موادی که در بالاتر از عیار حد قرار دارند را به تصویر می‌کشـــد. این منحنی را می‌توان به عنوان اثر انگشـــت و هویت کانســـار در نظر گرفت که برای تعیین تاثیر فعالیت‌های مختلف به منظور افزایش بازیابی از منابع مورد اســـتفاده قرار گیرد. برآورد (تخمین) منحنی عیار-تناژ یک مســـئله زمین‌آماری پیچیده اســـت و ارزیابی تاثیر ابعاد بلوک (مانند ارتفاع پله) روی نتایج منحنی عیار-تناژ دارای اهمیت فراوان است.

۲-۵- انتخابی شدن استخراج

یکی از مزایای اســـتخراج به روش روباز نســـبت به ســـایر روش‌های اســـتخراجی، قابلیت اســـتخراج کردن بصورت انتخابی یا بطور خلاصه استخراج انتخابی است. انتخابی شدن استخراج به عنوان فرآیند جداســـازی[2] ماده‌معدنی از باطله بیان می‌شـــود. نوبل[3] اســـتخراج انتخابی را به عنوان فرآیندی که بطور

[1] Beneficiation
[2] Separating
[3] Noble

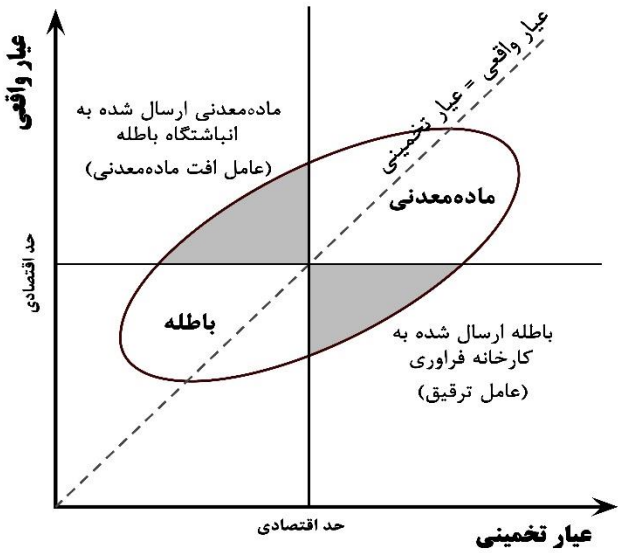
خاص روی ا ستخراج دقیق و کامل بخش سودآور کان سار تمرکز دارد، تعریف می‌کند که در آن تلاش می شود بی شترین میزان بردا شت از یک کان سار معین صورت پذیرد. انتخابی شدن ا ستخراج رابطه نزدیک و محکمی با چهار عامل اصلی دارد که بطور ضمنی سبب افت نتایج عملیات می‌شوند. این عوامل به شرح زیر است (Noble. et al, 2011):

الف) *اثر پایه*[1] - طراحی و برنامه‌ریزی عملیات معدنی بر مبنای مدل‌های بلوکی بنا نهاده شده ا ست. اندازه پایه بلوک‌ها بسیار بزرگتر و حجیم‌تر از اندازه پایه نمونه‌های عیار سنجی شده ا ست (مغزه‌های حفاری). حال اینکه، توزیع آماری عیارها، به ویژه شاخص پراکندگی و انتخابی شدن[2]، به حجمی که عیارها در آن حجم تعیین و مشخص می‌گردند (عیارسنجی می‌شوند) بستگی دارد، که در بحث ارزیابی ذخایر/ منابع معدنی تحت عنوان "اثر پایه" از آنها یاد می‌شود (Matheron, 1984; Chile`s and Delfiner, 1999). این اثر پایه بر روی میزان موادی که عیارشان بیشتر از عیارحد معینی است، تاثیر دارد. بدیهی است که با تغییر ابعاد بلوک (خصوصا ارتفاع بلوک) و تغییر تعداد نمونه‌ها، میزان ذخایر تغییر می‌کند.

ب) *اثر اطلاعات*[3] - در حین انجام عملیات معدنی، کنترل عیار بر مبنای مقادیر عیار تخمینی عنا صر سودآور انجام می‌گیرد، نه بر مبنای عیار واقعی بلوک‌ها (که مجهول ا ست). این مو ضوع باعث می‌شود که ناگریز بعضی از بلوک‌های عیاربالا (بلوک‌های پرعیار) دچار کم‌برآورد[4] شوند و ممکن است با توجه به عیارحد تعیین شده به ا شتباه به سمت دمپ باطله ار سال گردند، درحالیکه برخی دیگر از بلوک‌های عیارپایین (بلوک‌های کم‌عیار) دچار بیش‌برآورد[5] شوند و به اشتباه به کارخانه فرآوری فر ستاده شوند (شکل ۲-۱۰). از این پدیده تحت عنوان "اثر اطلاعات" یاد می شود که در مقایسه با

[1] Support effect
[2] Dispersion and selectivity index
[3] Information effect
[4] Underestimated
[5] Overestimated

حالت ایده‌آل که در آن هیچکدام از بلوک‌ها در فرآیند کنترل عیار بطور ا شتباه و نادر ست طبقه‌بندی نشده ا ست، منجر به افت ماده‌معدنی (از د ست رفتن بخ شی از ماده معدنی) و ترقیق می شود. بدیهی ا ست نوع روش تخمین و مقدار و کیفیت داده‌های موجود روی اثر اطلاعات تاثیرگذار ا ست و با بهبود اثر اطلاعات، بازیابی نیز بهبود می‌یابد.



شکل ۲-۱۰ : ابر پراکندگی (همبستگی) عیار تخمینی و عیار واقعی

ج) *محدودیت‌های هندسی*[1] - در هنگام طراحی معدن به اعمال قیود و محدودیت‌هایی در هندسه حاکم بر استخراج بلوک‌ها درون پیت هستیم، که به عنوان مثال می‌توان از زاویه شیب نهایی پیت، ارتفاع پله، زاویه شیب پله و ... نام برد. یک بلوک پرعیار ممکن ا ست در صورتیکه هزینه‌های لازم برای ر سیدن به این بلوک بسیار زیاد با شد، رها گردد و ا ستخراج نگردد؛ که این کار در مقایسه با حالت ایده‌آل که در آن یک بلوک بطور آزادانه انتخاب می‌شود، باعث افت ماده‌معدنی می‌شود.

د) *ترقیق* - اینگونه ترقیق عمدتا به تجهیزات بکار رفته در عملیات معدنکاری، الگوی چال‌های انفجاری، شـــرایط و نحوه انفجار و عملیات اســـتخراج، و همچنین به چگونگی و نحوه تماس ماده‌معدنی با باطله بســتگی دارد (این مورد آخر به دقتی که در آن عملیات قادر اســت تماس بین

[1] Geometrical constraints

ماده‌معدنی و باطله را از هم "جدا" کند اشاره دارد).

این چهار عامل تاثیرگذار روی انتخابی شدن استخراج را می‌توان بطور کمّی و توسط "منحنی‌های انتخابی شدن"[۱] که در زمینه زمین‌آمار معرفی شده‌اند، تشریح کرد. این قبیل منحنی‌ها، توزیع عیار (هیستوگرام) را توصیف می‌کنند و امکان محاسبه توابع بازیابی (تناژ، محتوای فلز، عیار میانگین، درآمد) مربوط به عیارحدی خاص را می‌دهند (Jara et al., 2006). به عنوان مثال، اگر برای یک تناژ استخراجی یکسان و مشابه از ماده‌معدنی، یک مدل بلوکی (با اندازه خاصی) میزان فلز بیشتری نسبت به یک گزینه دیگر از مدل بلوکی (با اندازه متفاوت) تولید کند، در نتیجه مدل بلوکی اولی نسبت به مدل بلوکی دوم دارای میزان انتخابی شدن بیشتری است.

۲-۶- سابقه علمی موضوع

عمده تلاش‌های صورت گرفته در راستای تعیین مناسب‌ترین ارتفاع پله، در زمینه انتخاب تجهیزات و سازگاری و تطابق ظرفیت و ابعاد ماشین‌آلات بارگیری و باربری با ارتفاع پله استخراجی بوده است. به عنوان یک قاعده سرانگشتی در شاول‌های کابلی، ارتفاع پله نباید بیشتر از ارتفاع قرقره کابل دکل باشد.

لی[۲] در سال ۱۹۹۵ یک تحلیل نهایی[۳] روی اقتصاد باربری کامیون‌ها در معادن روباز با ارتفاع پله‌های بلند ۱۵، ۱۸ و ۲۰ متری انجام داد. او با فرض اینکه دو جاده خروجی برای هر افق از پله‌ها وجود دارد، متوسط مسافت باربری ماده‌معدنی/باطله در یک معدن روباز را بصورت تابعی از ارتفاع پله مدل کرد. این متوسط، هزینه معادل[۴] نامیده شد و بر حسب متر بیان گردید. سپس با توجه به مدل

[۱] Selectivity curves
[۲] Li
[۳] Marginal analysis
[۴] Cost-equivalent

ارائه شده، یک سری تحلیل عددی[۱] برای بررسی تاثیر ارتفاع پله و سایر پارامترهای دیگر مربوط به آن روی مسافت باربری بکار برد. نتایج او نشان داد که برای هر معدن روبازی یک ارتفاع بهینه وجود دارد که در آن هزینه معادل، یعنی متوسط وزنی مسافت باربری به حداقل خود می‌رسد و برخی پارامترها مثل زاویه شیب نهایی پیت و یا زاویه شیب پله‌ها تاثیری روی بهینگی ندارند و برخی پارامترهای دیگر مثل عمق نهایی پیت تاثیر مهمی روی ارتفاع بهینه پله دارند. وی با مقایسه ارتفاع پله‌های مختلف (۱۵، ۱۸ و ۲۰ متر) نتیجه گرفت هنگامیکه ارتفاع پله افزایش می‌یابد، از شدّت کاهش هزینه‌های باربری کاسته می‌شود و در نهایت با افزایش بیش از پیش ارتفاع پله، هزینه باربری روبه فزونی می‌گذارد (Li, 1995).

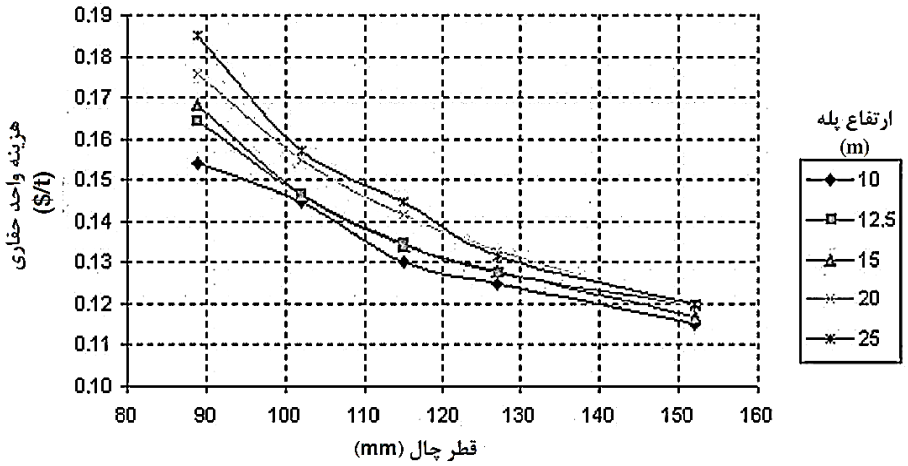
کوزه و همکاران[۲] (۲۰۰۵) به ارزیابی اقتصادی ارتفاع پله بهینه در معادن کواری پرداختند. او مطالعه خود را برای دو حالت رایج در استخراج کواری یعنی بصورت پیت[۳] و بصورت دامنه‌ای[۴] (تپه‌ای) و همچنین با زاویه شیب نهایی ثابت و زاویه متغیر شیب پله و با در نظر گرفتن (لحاظ) نرخ شیب‌های جاده‌ای[۵] ۸٪ و ۱۰٪، مورد مطالعه و بررسی قرار داد. او در ابتدا، نیازها و الزامات فنی معدن را مشخص کرد (مثل تولید سالانه مورد نیاز و ثابت) و سپس تاثیر پارامترهای تولیدی نظیر قطر چال[۶]، نوع معدنکاری کواری (بصورت پیت یا دامنه‌ای) و نرخ شیب جاده بر روی هزینه‌ها به منظور تعیین ارتفاع پله مورد بررسی قرار داد. برای این منظور، در هر دو حالت استخراجی، او تحلیل‌ها و آنالیزهای هزینه واحد برای ارتفاع پله‌های ۱۰، ۱۲/۵، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ متری و برای هر ارتفاع پله‌ای، قطر چال‌هایی به اندازه ۸۹، ۱۰۲، ۱۱۵، ۱۲۷ و ۱۵۲ میلیمتر و همچنین نرخ شیب جاده‌ای ۸ و ۱۰ درصدی انجام داد. این تحلیل هزینه به ۳ بخش تقسیم شد که شامل هزینه‌های: حفاری، انفجار و بارگیری و باربری بود.

---

[۱] Numerical analyses
[۲] Kose et al
[۳] Pit
[۴] Hillside
[۵] Road grades
[۶] Hole diameter

مدلی فرضی که او برای هر دو حالت استخراج کواری در نظر گرفت، در پیوست ۱ آمده است. زاویه شیب نهایی معدن[۱] مدل کواری برای هر ارتفاع پله‌ای 36° درجه ثابت نگه داشته شد و بر این اساس زاویه شیب مناسب برای هر پله‌ای مطابق با ارتفاع آن پله تعیین شد. طول و عرض هر پله استخراجی (ابعاد افقی) به ترتیب ۱۰۰ و ۱۰ متر انتخاب شد. در مدلسازی، تعدادی از پله‌ها دارای ارتفاع پله و زاویه شیب پله متغیر و متفاوت هستند. علاوه بر این، تجهیزات سنگ شکنی (محل تخلیه) در فاصله ۱۰۰ متری (فاصله قائم) از آخرین پله در هردو حالت مطالعاتی کواری قرار داشتند (Kose. et al, 2005).

بر اساس نتایج تحلیل که در شکل ۲-۱۱ نشان داده شده است، مشخص شد که هزینه واحد حفاری با افزایش قطر چال‌ها کاهش می‌یابد و با افزایش ارتفاع پله، افزایش می‌یابد.

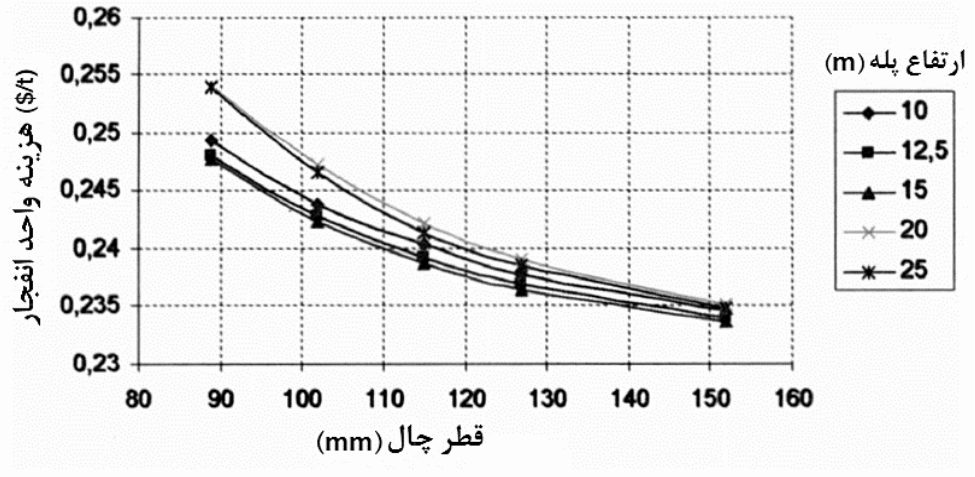


شکل ۲-۱۱ : تغییرات هزینه واحد حفاری با تغییر قطر چال و ارتفاع پله (Kose. et al, 2005)

در تحلیل هزینه واحد انفجار، با توجه به قیمت مواد منفجره، پرایمر، خرج ویژه و چاشنی‌ها، چال‌هایی با قطر ، ۱۰۲، ۱۱۵، ۱۲۷ و ۱۵۲ میلیمتر را بررسی نمود. نتایج حاصل از این بخش نشان داد که ارتفاع پله ۱۵ متری اقتصادی‌ترین حالت است. در همین حال، با توجه به شکل ۲-۱۲، مشاهده می‌شود که هزینه واحد انفجار با افزایش قطر چال‌ها، کاهش می‌یابد. همانطور که ارتفاع پله افزایش

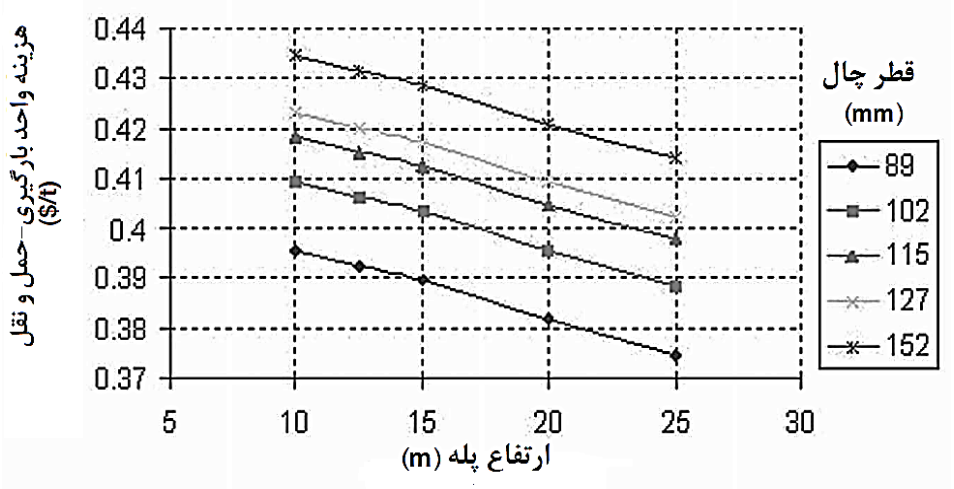
[۱] overall slope angle

می‌یابد، هزینه واحد با کاهش روبه‌رو می‌شـــود؛ با این حال، برای ارتفاع پله ۲۰ متری به دلیل افزایش میزان خرج‌گذاری، هزینه واحد روی به فزونی می‌گذارد.

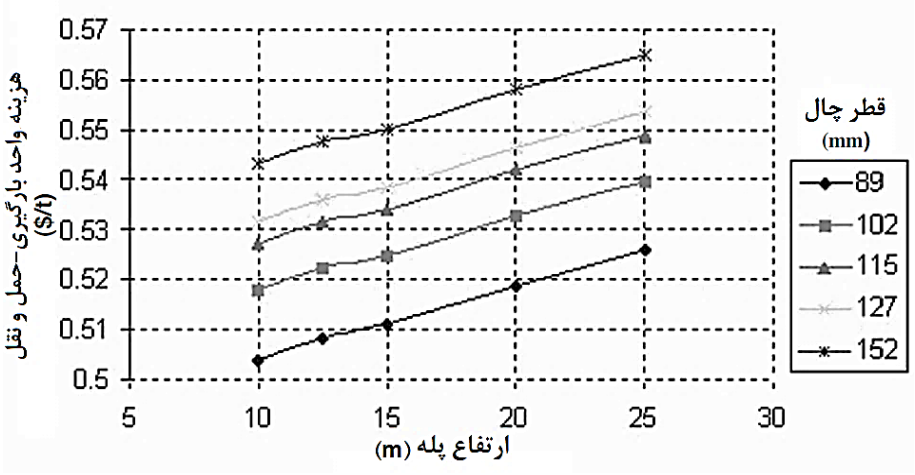


شکل ۲-۱۲ : تغییرات هزینه واحد انفجار با تغییرات قطر چال و ارتفاع پله (Kose. et al, 2005)

در حالت اســتخراج دامنه‌ای، یک روند کاهشــی (نزولی) در هزینه واحد بارگیری-حمل با افزایش ارتفاع پله و قطر چال‌ها و افزایش هزینه واحد با افزایش نرخ شـیب جاده مشـاهده شـد؛ در حالیکه در ا ستخراج بـصورت پیت، نتایج یک روند افزایـشی (صعودی) در هزینه واحد با افزایش ارتفاع پله و قطر چال‌ها نشان داد و هزینه واحد بارگیری- حمل با کاهش نرخ شیب جاده، رو به فزونی گذاشت (شکل ۲-۱۳ و شکل ۲-۱۴).



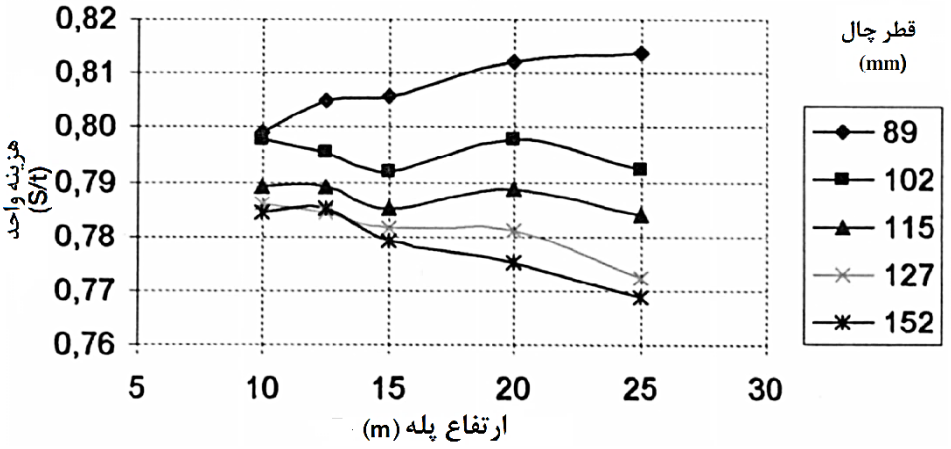
شکل ۲-۱۳ : نتایج هزینه واحد بارگیری و حمل برای حالت تپه‌ای با شیب جاده‌ای ۱۰ درصد (Kose. et al, 2005)



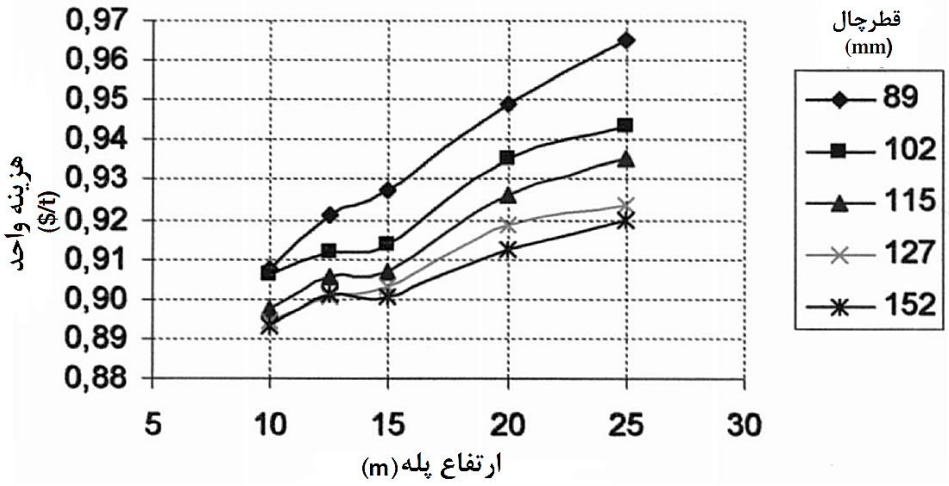
شکل ۲-۱۴ : نتایج هزینه واحد بارگیری و حمل برای حالت پیت با شیب جاده‌ای ۱۰ درصد (Kose. et al, 2005)

شکل ۲-۱۵ تا شکل ۲-۱۸ هزینه واحد کلی که بصورت جداگانه برای بررسی هزینه واحد استخراج یک مدل کواری با تولید سالانه یک میلیون تن را نشان داده است. بر اساس نتایج بدست آمده، قطر چال باید هم در حالت پیت و هم در حالت دامنه‌ای (هردو) تا جاییکه می‌شود بزرگ در نظر گرفته شود تا هزینه واحد حفاری[۱] کاهش یابد. علاوه بر این در مورد استخراج بصورت دامنه‌ای و به منظور بهره‌مندی از نیروی گرانش و کاهش هزینه‌های حمل و نقل، پیشنهاد شد که به منظور حمل مواد آتشباری شده در یک مسافت یا ارتفاع کمتر و صرفه‌جویی در انرژی مصرفی که باعث کاهش هزینه حمل و نقل می‌شود، تا حد امکان ارتفاع پله زیاد (تا ۲۵ متر) و نرخ شیب جاده کم در نظر گرفته شود (به دلیل حرکت به سمت پایین[۲] در موقع حمل مواد)؛ درحالیکه در مورد استخراج بصورت پیت (به دلیل حرکت به سمت بالا[۳] در موقع حمل مواد) تا حد امکان باید ارتفاع پله کم (حداکثر ۱۰ متر) و نرخ شیب جاده زیاد در نظر گرفته شود.

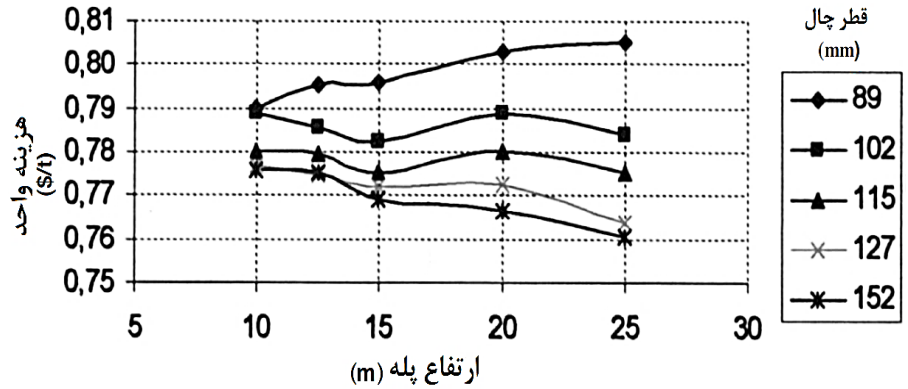
[۱] drilling unit cost
[۲] downhill transportation
[۳] uphill transportation



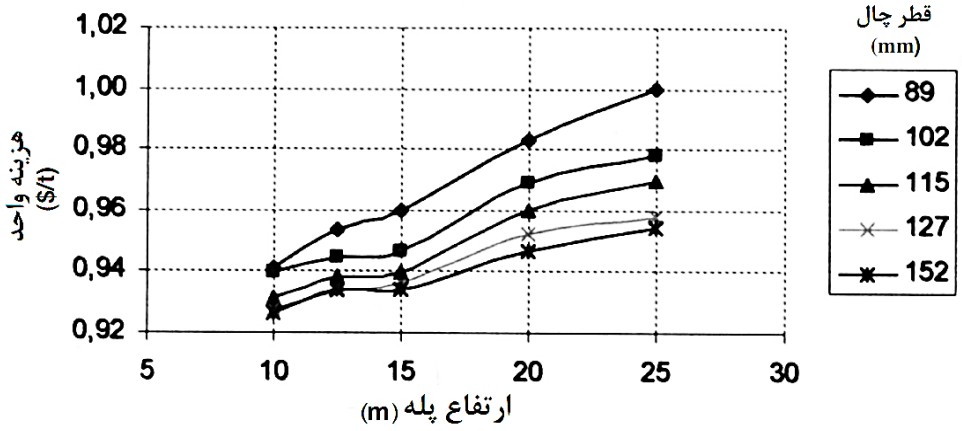
شکل ۲-۱۵ : هزینه واحد کلی برای حالت تپه‌ای با شیب جاده ۱۰ درصد (Kose. et al, 2005)



شکل ۲-۱۶ : هزینه واحد کلی برای حالت پیت با شیب جاده ۱۰ درصد (Kose. et al, 2005)



شکل ۲-۱۷ : هزینه واحد کلی برای حالت تپه‌ای با شیب جاده ۸ درصد (Kose. et al, 2005)

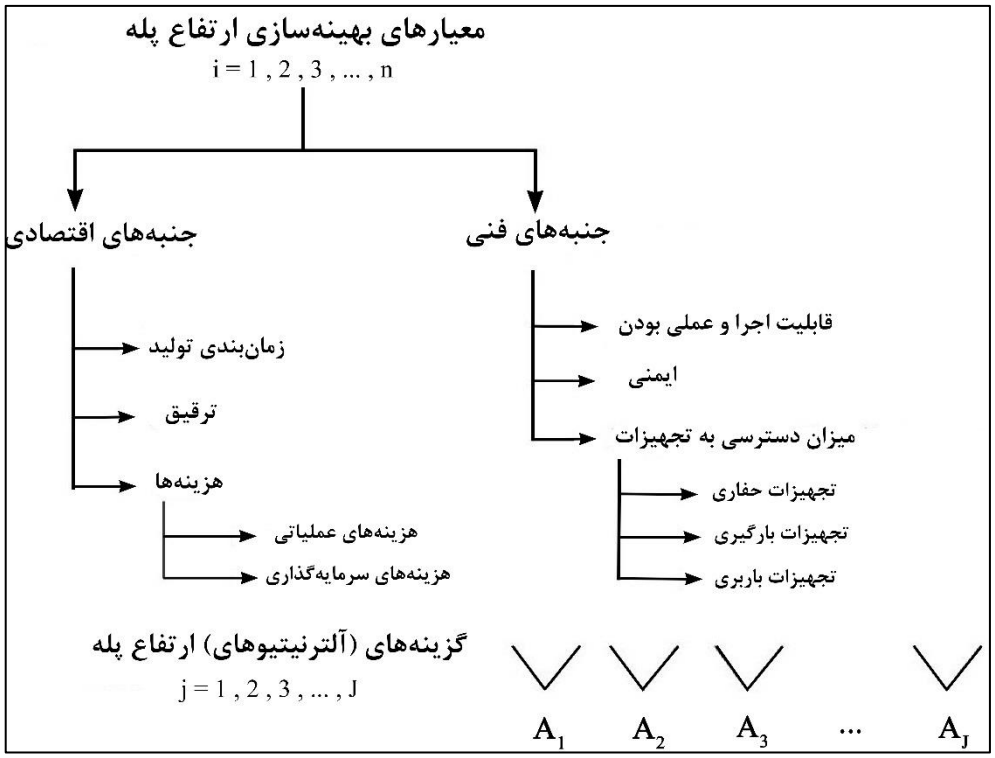


شکل ۲-۱۸ : هزینه واحد کلی برای حالت پیت با شیب جاده ۸ درصد (Kose. et al, 2005)

در تحقیقی دیگر جهت انتخاب مناسب‌ترین ارتفاع پله در معادن روباز، سلطان‌محمدی[۱] و همکارانش (۲۰۱۰) با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره به تعیین کارآمدترین ارتفاع پله در معادن روباز پرداختند. همانطور که قبلا نیز ا شاره شد، عوامل دخیل در تعیین ارتفاع پله گاهی اوقات در تضاد با یکدیگرند. بنابراین آنها از روش چندمعیاره VIKOR که روشی در تصمیم‌گیری گسسته و انتخاب گزینه برتر، بر مبنای توافق جمعی (رتبه‌بندی ساز شی) و با دا شتن معیارهای مت ضاد ا ست، استفاده کردند. در این روش، آنها ابتدا با فرض رسیدن به تولید سالیانه ثابت، ارتفاع پله‌های مختلف را از نظر تنوع مهم‌ترین معیار های دخیل در تعیین آن مانند برنامه‌ریزی و زمان‌بندی تولید[۲]، میزان ترقیق، هزینه‌ها ، قابلیت اجرا و عملی بودن[۳]، ایمنی[۴] و میزان دسترسی به تجهیزات[۵] مورد تحلیل قرار دادند و این معیارها را به دو زیرگروه فنی و اقتصادی تقسیم کردند (شکل ۲-۱۹). سپس به این معیارها طبق مشاهدات کمّی میدانی و دریافت نظر و قضاوت کار شنا سان در پر سشنامه‌های ار سالی (نمونه‌ای پر سش‌نامه و نحوه امتیازدهی آن در پیو ست ۱ آمده ا ست)، وزن داده شد و امتیاز (نمرات) عملکرد بد ست آمده به مدل چندمعیاره VIKOR منتقل شد تا طبق ا صول این روش، بهترین گزینه

[۱] Soltanmohammadi et al
[۲] Production scheduling
[۳] Practicability
[۴] Safety
[۵] Equipment availability

برای ارتفاع پله معرفی شـــود. آنها در این روش از دو گزینه ارتفاع پله ۱۰ متری و ۱۲/۵ متری در یک معدن ســـنگ آهن اســـتفاده نمودند و در نهایت بهترین گزینه را که ارتفاع پله ۱۲/۵ متر بود، معرفی کردند (Soltanmohammadi et al, 2010).



شکل ۲-۱۹ : ساختار سلسله مراتبی پیشنهادی برای معیارهای بهینه‌سازی ارتفاع پله (Soltanmohammadi و همکاران، ۲۰۱۰)

حکمت[۱] و همکارانش (۲۰۱۱) به بررســـی تاثیر ابعاد بلوک های مختلف بر روی عمر معدن پرداختند. آن‌ها ابراز داشـــتند که عمر معدن بر اســـاس اندازه و هندســـه ذخیره قابل اســـتخراج و نیز پارامترهای مالی و نرخ تولید تعیین می شود. آن‌ها ابتدا با ا ستفاده از روش تخمین‌گر هزینه اوهارا[۲] به محاسبه هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری مرتبط با آن پرداختند. رابطه بین قطر چال و ارتفاع پله و نیز ظرفیت جام بارکننده با ارتفاع پله (بلوک) امکان تبیین میزان هزینه‌های ســـرمایه‌ای و عملیاتی بر مبنای ارتفاع بلوک را فراهم نمود. آنها با اســـتفاده از پایگاه داده‌های اکتشـــافی معدن ســـنگ آهن

[۱] Hekmat et al

[۲] O'hara cost estimator

چادرملو، بازه‌ای از میزان ذخیره اقتصـادی با اسـتفاده از تغییر اندازه بلوک‌ها تعیین نمودند. در نهایت آن ها نتیجه گرفتند که ارتفاع بلوک (پله) اسـتخراجی موثرترین پارامتر روی عمر معدن اسـت (Hekmat et al, 2011).

شـارما[1] و همکارانش (۲۰۱۳) به ارزیابی نحوه انتخاب پله در یک معدن کواری سـنگ آهک پرداختند. آنها ابتدا با توجه به ارتفاع پله های قابل اجرا برای اسـتخراج، سـه ارتفاع پله ۹، ۱۰ و ۱۲ انتخاب کردند. سپس مدل بلوکی بر اساس ساخت نمونه‌های ترکیبی[2] برابر با هر یک از ارتفاع پله‌های پیشـنهادی صـورت گرفت. سـپس به مقایسـه تاثیر مدل‌های ارتفاع پله‌های بدسـت آمده برای تعیین محدوده بهینه پیت نهایی پرداختند. بر اساس نتایج بدست آمده، آنها مشاهده کردند که ارتفاع پله ۱۲ متری محدوده پیت نهایی اقتصادی‌تری را تولید می‌کند. همچنین مشاهده کردند که در ارتفاع پله ۱۲ متری از منظر ترقیق و جدایش، وضعیت مطلوب‌تری هم در بخش پرعیار و کم‌عیار سنگ آهک وجود دارد و در این ارتفاع پله منحنی‌های عیار و تناژ افزایش بیشتر در ذخیره را نشان می‌دهند.

در جدول ۲-۲ ق سمت اعظم تلاش‌های صورت گرفته که م ستقیماً در زمینه ارتفاع پله صورت گرفته به ترتیب سال آورده شده است.

[1] Sharma et al

[2] Compositing

جدول ۲-۲ : خلاصه‌ای از کارهای صورت گرفته در زمینه ارتفاع پله معادن روباز

مؤلف	سال انتشار	موضوع
Arnold et al.	۱۹۹۱	بهینه‌سازی استخراج انتخابی با تاکید ویژه بر ارتفاع پله – مطالعه موردی در معدن طلای Telfer استرالیا
Li	۱۹۹۶	تحلیل نهایی (کرانی) اقتصاد باربری در معادن روباز با ارتفاع پله بلند
Adhikari	۱۹۹۹	انتخاب قطر چال انفجاری برای یک ارتفاع پله معلوم در معادن سطحی
Glacken et al.	۲۰۰۰	ارزیابی و برآورد ارتفاع پله استخراجی برای منبع معدنی Wallaby- شبیه‌سازی شرطی یک مورد مطالعاتی
Swanepoel	۲۰۰۳	بررسی تأثیر ارتفاع پله و ابعاد ماشین‌آلات در بهره‌وری ماده-معدنی در معادن روباز
Kose et al.	۲۰۰۵	ارزیابی اقتصادی ارتفاع پله بهینه در معادن کواری
Jara et al.	۲۰۰۶	انتخاب اندازه بلوک و تاثیر آن بر طراحی پیت روباز و برنامه‌ریزی معدن
سلطان‌محمدی و همکارن	۲۰۱۰	انتخاب یک ارتفاع پله کاربردی در معادن روباز با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره
حکمت و همکاران	۲۰۱۱	بررسی تاثیر ابعاد مختلف بلوک روی عمر اقتصادی معادن روباز
Sharma	۲۰۱۳	بررسی انتخاب ارتفاع پله جهت بهینه‌سازی منبع سنگ آهک-یک مطالعه موردی

۲-۷- جمع‌بندی

در این فصل به برخی از مهمترین عوامل موثر بر ارتفاع پله اشاره شد. یکی دیگر از مهمترین عوامل موثر بر ارتفاع پله، رابطه بین انتخاب تجهیزات با ارتفاع پله استخراجی است. در فصل بعد بطور خلاصه به بررسی سابقه علمی این موضوع پرداخته می‌شود و رابطه بین تجهیزات بارگیری و ارتفاع پله برر سی می شود. در این بخش اهداف و عوامل دیگری که به ارتفاع پله وابسته‌اند مثل ترقیق و بازیابی که از طریق انتخابی شدن استخراج بهبود می‌یابد، به مرحله انتخاب تجهیزات و ماشین‌آلات ورود پیدا می‌کنند و با در نظر گرفتن تجمیعی از این عوامل، مناسب‌ترین دستگاه بارگیری در هر سناریوی ارتفاع پله پیشنهاد می‌شود. اما این پایان کار نیست. از یکسو تغییر ارتفاع پله در هر سناریو باعث تغییر

میزان باز یابی و ترقیق و در نتیجه تغییر میزان ذخیره بر جای معدن می‌شـــود (همانگونه که در منحنی‌های عیار و تناژ منعکس می‌شـود) و از سـوی دیگر با تعیین تجهیزات مناسـب برای هر ارتفاع پله، هزینه‌های معدنکاری (سـرمایه‌ای و عملیاتی) نیز تغییر خواهند کرد. بنابراین لازم اسـت تا تحلیل اقتصادی روی هر سناریو انجام شود تا بهترین حالت از نظر اقتصادی تعیین شود.

فصل سوم

نقش ارتفاع پله در انتخاب تجهیزات بارگیری

و طراحی الگوی انفجار

۳-۱- مقدمه

از آنجا که یکی از مهمترین عوامل مرتبط با انتخاب ارتفاع پله، انتخاب نوع تجهیزاتی بارگیری باربری و حفاری سازگار با آن به منظور د ستیابی به کمترین میزان ترقیق و انتخابی شدن ا ستخراج اســت، لذا در این فصــل یک بررســی جامع روی چگونگی انتخاب تجهیزات بارگیری در ارتفاع پله‌های استخراجی مختلف صورت گرفت و عوامل موثر بر انتخاب تجهیزات طبق کارهای نویسندگان قبلی و با نگرش ویژه به ارتفاع پله برر سی شده ا ست. برخی از این اهداف مورد انتظار شامل ر سیدن به تولید سالیانه ثابت، انتخابی شدن استخراج، کنترل ترقیق، بیشترین بازیابی، کاهش هزینه‌ها و غیره می‌باشد. سپس برای سهولت در مدل سازی، فر ضیاتی در انتخاب پارامترهای چالزنی و انفجار با توجه به ارتفاع پله‌های مختلف در هر ســناریو در نظر گرفته شــد و هزینه عملیاتی این قســمت به عنوان ورودی در بخش آنالیز اقتصادی در هر یک از سناریوها محاسبه شده است.

اگرچه مطالعات معتبر و مستدلی در انتخاب تجهیزات برای عملیات ا ستخراج در معادن سطحی وجود دارد، اما به یک ارزیابی زنجیره ارزش کلی[۱] از نظر هزینه تولید (که توســط ارتفاع پله و انتخاب تجهیزات تعیین و دیکته شــده اســت) در مقابل بهره‌وری از منابع نیاز اســت و باید مورد بررســی قرار گیرد. این د ست مطالعات نمی‌بایست فقط به انتخاب یک ارتفاع پله و شاول منا سب آن توجه نماید،

۱ total value chain : برای اولین بار توسط مایکل پورتر پیشنهاد شد و به مجموعه فعالیت و عملیاتی گویند که در یک صنعت به صورت زنجیرگونه انجام می‌گیرد تا به خلق ارزش منجر شود. با عبور محصول از هر حلقه زنجیره، ارزشی به آن افزوده می‌شود.

بلکه علاوه بر آن باید پیامدهای هزینه تولید نهایی و بازدهی سرمایه‌گذاری و شاخص‌های مالی را که احتمالا توسط میزان بازیابی ماده‌معدنی دیکته می شود را نیز در نظر بگیرد. بنابراین ارزیابی اقتصادی باید در سراسر زنجیره ارزش کل، با محاسبه میزان بازیابی و هزینه مربوط به هر سناریو و ارزیابی ارزش خالص فعلی (NPV) صورت پذیرد.

۳-۲- نقش ارتفاع پله در انتخاب تجهیزات بارگیری

رویه امروزی در انتخاب تجهیزات به دلیل وجود طیف گسترده‌ای از تجهیزات و ادوات موجود و نیز الزامات تخصصی در هر یک از تجهیزات، پیچیده‌تر از گذشته شده است. از یک سو افزایش فشار روی سودآوری عملیات معدنکاری، سبب توسعه و تمایل به سمت تجهیزات بزرگ‌تر به منظور کاستن از هزینه‌های تولید از طریق بکارگیری اصول صرفه‌جویی مقیاس شده است و از طرف دیگر به دلیل اینکه هیچ عملیاتی نمی‌تواند بطور صددر صد از بازه (دامنه) موثر کاربری ماشین‌آلات بهره ببرد باعث توسعه ماشین‌آلات تخصصی‌تر شده است. با بررسی پیشنهادات نویسندگان مختلف برخی از بازه‌های مناسب کاربری تجهیزات بطور کلی تعیین گردیده است. با این حال، این معیارها و ضوابط در محل‌های خاصی بدست آمده و در همه زمینه‌ها و حالات ممکن کاربرد ندارند. جدول ۳-۱ مهمترین عوامل و فاکتورهایی که توسط تعدادی از نویسندگان مختلف در انتخاب تجهیزات بارگیری در نظر گرفته شده، نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۳-۱ واضح است که ویژگی‌های مواد بارگیری شده، نرخ تولید مورد نیاز و هزینه‌های عملیاتی به یک اندازه در همه نظریه‌ها جهت انتخاب تجهیزات مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه استخراج انتخابی مفهوم جدیدی در صنعت معدنکاری نیست ولی تاثیرات بازیابی و ترقیق جز در کارهای Crone (۱۹۹۲) و Singhal (۱۹۸۶)، در سایر کارهای دیگر در نظر نگرفته شده است. همچنین به ارتفاع پله به عنوان یکی از مهمترین عوامل در انتخاب تجهیزات کمتر توجه شده است.

جدول ۳-۱ : خلاصه‌ای از مهمترین عوامل در نظر گرفته شده در انتخاب ماشین‌آلات

عوامل در نظر گرفته شده	Ercelbi & Kirmanli	Crone	Hrebar	Singhal	Lizotte	Sullivan	Dahlstrand & Hendricks
عمر معدن	♦	♦	♦				♦
ارتفاع پله	♦		♦				
وضعیت کف	♦		♦		♦		
مسافت حمل و نقل و میزان ترابری	♦			♦	♦		♦
خصوصیات مواد بارگیری شده	♦	♦	♦	♦	♦		♦
نرخ تولید مورد نیاز	♦		♦	♦	♦		♦
هزینه عملیاتی	♦		♦	♦	♦		♦
نیاز به معدنکاری انتخابی		♦		♦	♦	♦	
بازیابی، ترقیق		♦		♦			
ارزش مواد		♦					
آب و هوا				♦		♦	♦
نیازهای فرآوری				♦			
محیط زیست				♦	♦		
زیر ساخت ها و انرژی مورد نیاز			♦			♦	

فاکتور ارتفاع پله نقش اساسی در فرآیند انتخاب تجهیزات ایفا می‌کند که می‌توان آن را به عنوان پل ارتباطی موثر هم بر انتخاب تجهیزات و هم بر میزان ترقیق و بازیابی بیان کرد. معمولا فاکتور ارتفاع پله خود از سایر تصمیم‌گیری‌ها نتیجه[۱] نشده است بلکه بیشتر به عنوان یک فاکتور ورودی و آغازکننده در فرآیند برنامه‌ریزی معدن بحساب می‌آید. این فاکتور شاخص مهمی است که می‌تواند هم به کاهش هزینه تولید و هم به بهبود بهره‌برداری از منابع کمک کند. یک واقعیت آشکار این است که ارتفاع پله بلندتر، بطور معمول منجر به کمتر شدن هزینه‌های عملیاتی می شود (Lizotte, 1988)؛ اما به همان اندازه در هنگام انفجار و بارگیری باعث افزایش ترقیق می‌شود.

یک قاعده سرانگشتی این است که ارتفاع پله نباید بزرگتر از ارتفاع قرقره دکل شاول باشد. انجام

[۱] derivative

عملیات در پله‌هایی با ارتفاع های بزرگتر از این مقدار گاهی منجر به خالی شـــدن زیر لبه پله و معلق شدن آن می شود که بارگیری و سایر عملیات را با خطر مواجه می سازد. در یکی از روش‌های انتخاب د ستگاه بارگیری، بیلجین و همکارانش[۱] (۱۹۸۸) رابطه بین ارتفاع پله و ظرفیت جام را پیشنهاد دادند که در جدول ۳-۲ آمده ا ست. این رابطه ن شان داد که ظرفیت جام د ستگاه بارگیری با افزایش ارتفاع پله، افزایش می‌یابد، و در یک چرخه کامل عملیاتی باعث کمتر شدن هزینه‌های عملیاتی می‌شود.

جدول ۳-۲ : رابطه بین ارتفاع پله و اندازه جام بارکننده (Bilgin. et al, 1988)

ارتفاع پله (m)	۹	۱۲	۱۴	۱۶	۱۸
ابعاد جام (m^3)	<۵	۵/۱–۸	۸/۱–۲۰	۲۰/۱–۳۰	>۳۰

در مطالعه دیگری که توسط هندریکس[۲] (۱۹۸۸) روی قابلیت حفر[۳] یک شاول الکتریکی صورت گرفت، مشـــخص شـــد که کنترل ارتفاع پله بر زمان ســـیکل حفاری ارجحیت دارد. دوماچنز[۴] (۲۰۰۱) نشـــان داد که ارتفاع پله بیشـــترین تاثیر را روی کارایی و عملکرد دســـتگاه بارگیری دارد. همچنین در تلا شی جهت بهینه سازی انتخابی شدن اســـتخراج در معدن طلای تلفر[۵]، آرنولد و همکارش[۶] (۱۹۹۱) نشان دادند که ارتفاع پله به عنوان متغیر اصلی (اولیه) بطور مستقیم و به یک اندازه با هزینه‌ها، میزان بازیابی، ترقیق، بهره‌وری (قدرت تولید) و میزان تاثیر هزینه گزینه‌های مختلف تجهیزات استخراجی در ارتباط ا ست. تاثیر ارتفاع پله بر هزینه ا ستخراج در معدن تلفر در جدول ۳-۳ ن شان داده شده ا ست. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش ارتفاع پله، هزینه‌ها بطور چشمگیری افزایش می‌یابد.

جدول ۳-۳ : هزینه‌های مرتبط با تولید در ارتفاع پله‌های مختلف (Arnold. et al, 1991)

ارتفاع پله	۳متر	۴متر	۵متر	۶متر	۸متر	۱۰متر
هزینه	٪۱۰۰	٪۹۳	٪۹۱	٪۸۸	٪۸۰	٪۷۳
درآمد	٪۱۰۰	٪۹۹	٪۹۵	٪۹۳	٪۹۰	٪۸۲

[۱] Bilgin et al
[۲] Hendricks
[۳] diggability
[۴] Domaschenz
[۵] Telfer
[۶] Arnold et al

هندریکس و دالســـتراند[1] (۱۹۷۹) تاثیرات متقابل ارتفاع پله و انتخاب تجهیزات را مورد بررســـی قرار دادند. آن‌ها اظهار داشت که ارتفاع پله قادر است نوع و اندازه تجهیزات را تعیین کند و یا برعکس اندازه تجهیزات موجود بر اندازه ارتفاع پله انتخابی موثر اســـت. بنابراین دو راهکار مختلف جهت تعیین ارتفاع پله پیشنهاد کردند:

- توزیع قائم[2] ماده‌معدنی : در مواردی که شکل کانسار نامنظم است (چه حالت افقی و چه پرشیب)، ارتفاع پله‌های مختلفی می‌توانند وجود داشته باشند که باعث بهینه شدن میزان بازیابی ماده‌معدنی یا کاهش ترقیق شود.
- نرخ تولید مورد نیاز : میزان تولید برنامه‌ریزی شده، اندازه و تعداد ماشین‌آلات مورد استفاده در یک پروژه معدنی را تعیین می‌کند. ارتفاع پله مطلوب را می‌توان از روی محدودیت‌های ایجاد شـــده با توجه به اندازه و نوع تجهیزات تعیین کرد. بطور کلی از نظر مالی، می‌توان با هم‌اندازه قرار دادن ارتفاع پله اســـتخراجی با ماکزیمم ارتفاع قائم قابل دســـترســـی تجهیزات بارگیری، صرفه‌جویی قابل توجه‌ای در هزینه‌ها کرد.

بدیهی است که این ملاحظات در تعارض با یکدیگر قرار دارند، و بنابراین به یک آنالیز هزینه‌یابی دقیق از زنجیره ارزش نیاز خواهد بود تا بهترین ترکیب مطلوب از انتخابی بودن و هزینه‌های عملیاتی در طول عمر پروژه که سبب بیشینه شدن ارزش پروژه می‌گردد، تعیین گردد.

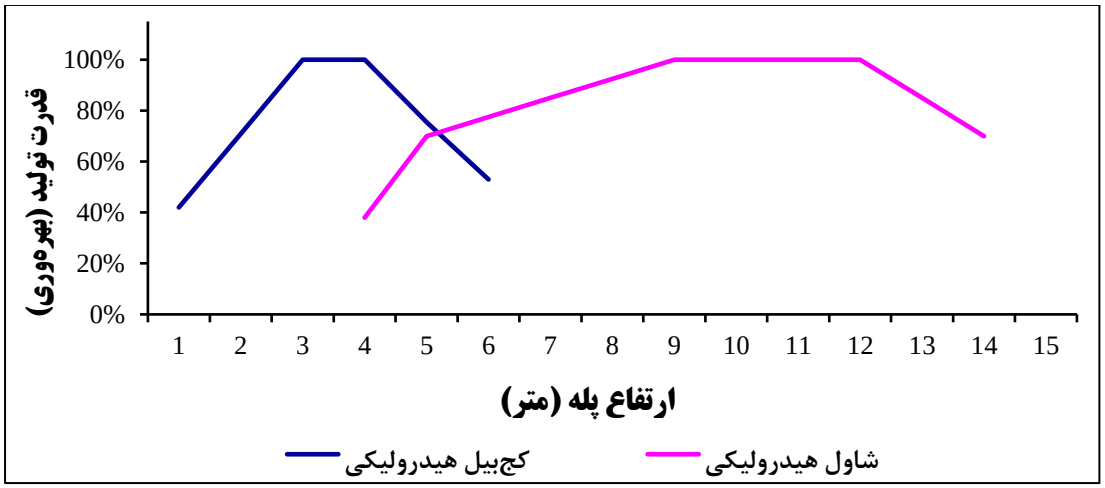
از آنجا که ارتفاع پله نقش محوری در بهره‌برداری کارآمد (موثر) از منابع معدنی دارد، باید آن را در هنگام طراحی پیت روباز گنجاند. دالســـتراند پیشـــنهاد کرد که به منظور تعیین ارتفاع بهینه از نظر بهره‌برداری از ذخایر، باید از یک مدل کامپیوتری (مدل سه‌بعدی) جهت شبیه‌سازی استخراج از معدن در ارتفاع پله‌های مختلف استفاده شود. ابعاد بلوک استفاده شده در طراحی کامپیوتری پیت، انتخابی از یک نوع خاص از تجهیزات (بهترین دســـتگاه) در بلوک‌ها فرض شـــده اســـت که تابعی از ظرفیت

[1] Hendricks and Dhalstrand

[2] Vertical distribution

تجهیزات بارگیری[۱] و ایمنی عملیات است (Lizotte, 1988). بنابراین روشن است که اندازه بلوک‌ها توسط انتخاب تجهیزات و نیازهای انتخابی شدن دیکته می‌گردد و در ابتدای هرگونه طراحی روباز باید تعیین شود. این نقطه نظرات بیانگر اینست که در هنگام انتخاب تجهیزات باید تاثیر انتخابی شدن استخراج مدنظر قرار داده شود.

دوماچنز (۲۰۰۱) به بررسی تاثیر ارتفاع پله بر روی کارایی[۲] تجهیزات مختلف بارگیری پرداخت. طبق نظر او، هر نوعی از تجهیزات دارای یک محدوده حداکثر بازدهی موثر است که بصورت ترکیبی از انتخابی بودن، در دسترس بودن، تحرک[۳] یا نرخ تولید مورد نیاز بیان می‌شود. شکل ۳-۱ بیانگر این است که انتخاب ارتفاع پله تاثیر به سزایی روی قدرت تولید و بهره‌وری[۴] اکسکاواتورهای هیدرولیکی و شاول‌های هیدرولیکی دارد (Domaschenz, 2001).



شکل ۳-۱ : ارتفاع پله در مقابل قدرت تولید (بهره‌وری) دستگاه بارگیری Liebherr 994 (Domaschenz, 2001)

از مبحث کنترل عیار جهت بیشینه‌سازی ارزش فعلی ماده‌معدنی تولیدی از طریق به حداقل رساندن افت و ترقیق ماده‌معدنی در تمامی مراحل برنامه‌ریزی استفاده می شود. بنابراین لازم است تا مدل سه‌بعدی از پیکره ماده‌معدنی جهت ارزیابی تاثیر ارتفاع پله‌های مختلف بر روی میزان انتخابی

[۱] Digging Equipment
[۲] Efficiency
[۳] Mobility
[۴] Productivity

شـــدن اســـتخراج، افت ماده‌معدنی، ترقیق اســـتخراجی و در نتیجه میزان عیار و تناژ پیش‌بینی شـــده استفاده شود. انجام این کار بطور مستقیم بر بهره‌وری از منابع معدنی تاثیرگذار است. مزیت استفاده از مدل ســـه‌بعدی این اســـت که بجای ارزیابی‌های ذهنی و فرضـــی از میزان ترقیق و افت ماده‌معدنی، می‌توان نحوه تغییرات این فاکتورها در هر ســـناریو را مدل کرد. این مدل باید با نوع تجهیزات انتخاب شده سازگاری داشته باشد تا صرفه‌جویی مالی در هر سناریو عملیاتی و حداقل شدن هزینه‌های تولید مشخص شود (Swanepoel, 2003).

۳-۳- انتخاب تجهیزات بارگیری و انتخابی شدن استخراج

قبل از هرگونه مقایســـه، ارزیابی و یا انتخاب تجهیزات لازم اســـت که به مجموعه‌ای از توانایی و قابلیت‌ها و همچنین محدودیت‌های مرتبط با هر شاول/اکسکاواتور نگاهی داشته باشیم. برای بیشترین نرخ تولید تحت شرایط سخت بارگیری، در بیشتر موارد شاول کابلی متداول‌ترین ابزار بارگیری است. برای عملیات‌های کوچک‌تر لودرهای چرخ‌لاستیکی به‌صورت گسترده‌ای استفاده می شوند و به ندرت می‌توان معدنی یافت که از آنها اســـتفاده نکند. تحت بازه‌ای از کاربردهای بارگیری، شـــاول هیدرولیکی ابزار بهتری جهت بارگیری در معادنی اســـت که به دنبال بهره‌وری بیشـــتر، انتخابی بودن و تحرک ماشین‌آلات است.

هدف از انتخاب تجهیزات جهت انتخابی شـــدن اســـتخراج، ســـازگاری و تطبیق توانایی بارگیری تجهیزات و با نیازها و الزامات کانسار معدنی است. سازگاری و تطابق بهینه[۱] بین تجهیزات و هندسه کانســـار هنگامی بدســـت می‌آید که حداکثر انتخابی بودن در بلندترین ارتفاع پله بدســـت آید. این کار باعث جلوگیری از ترقیق ناخواســـته در حین عملیات اســـتخراج می‌شـــود و بازیابی را بهبود می‌بخشـــد (Swanepoel, 2003). به همین منظور، در ادامه این تحقیق در مورد ویژگی‌های طراحی و عملیاتی

[۱] optimum match

تجهیزات بارگیری که روی توانایی حفظ و ادامه[۱] انتخابی بودن در نتیجه افزایش ارتفاع پله‌ها تاثیر گذار است، بحث خواهد شد و بطور کیفی مدلی برای میزان انتخابی شدن در ارتفاع پله‌های مختلف و با توجه به انواع ماشین‌آلات بارگیری ارائه می‌شود. ویژگی‌های طراحی[۲] به ساختار طراحی شاول مانند بوم، بارکننده و دسته بارکننده به اضافه نوع منبع انرژی الکتریکی یا دیزلی اشاره دارد. ویژگی‌های عملیاتی[۳] به شرایط ترجیحی محل‌کار و عملیات و محدودیت‌های موجود اشاره دارد. همانطور که در جدول ۳-۴ نشان داده شده است، تمام این ویژگی‌ها بر روی توانایی بارگیری انتخابی تاثیرگذار نیستند. تنها زمانی که درکی کامل از نقاط قوت و ضعف هر یک از تجهیزات بارگیری وجود داشته باشد، انتخاب درست و صحیح میسر می‌شود.

جدول ۳-۴ : تاثیرات ویژگی‌های طراحی و عملیاتی روی انتخابی شدن استخراج بارکننده (Swanepoel, 2003)

ویژگی‌های طراحی		**ویژگی‌های عملیاتی**	
تاثیر روی انتخابی شدن	**بله/خیر**	**تاثیر روی انتخابی شدن**	**بله/خیر**
منبع قدرت	خیر	وضعیت بارگیری	خیر
بوم و دسته جام	بله	ظرفیت تولید	خیر
بارکننده (جام)	بله	شرایط حفاری (بارگیری)	بله
وزن تجهیزات	خیر	ارتفاع جبهه‌کار	بله
		تحرک	بله
		وضعیت کف معدن	خیر
		عمر معدن	خیر

در این تحقیق، فقط پرکاربردترین انواع تجهیزات بارگیری مثل شاول کابلی[۴]، اکسکاواتورهای هیدرولیکی به فرم کج‌بیل[۵] و به فرم شاول هیدرولیکی[۶] و نیز لودر چرخ‌لاستیکی که در بسیاری از

[۱] ability to maintain
[۲] Design characteristics
[۳] Operating characteristics
[۴] rope shovel
[۵] backhoe
[۶] face shovel

معادن روباز مورد استفاده قرار می‌گیرند، ارزیابی خواهند شد. به منظور فراهم نمودن یک ارزیابی قابل مقایسه اندازه تجهیزات براساس اندازه جام بارکننده آن‌ها، مشابه و یکسان انتخاب شدند. البته حجم مشابه جام این تجهیزات، بر اساس نیازهای استخراجی و میزان تولید سالیانه معدن تعیین می‌گردد که در این تحقیق بازه‌ای ۱۵ الی ۱۹ مترمکعبی برای تمام انواع ماشین‌آلات بارگیری تعیین شد و این بازه به عنوان مناسب‌ترین اندازه جام بارکننده انتخاب گردید. جدول ۳-۵ خصوصیات مربوط به تجهیزات انتخاب شده را بطور خلاصه نشان می‌دهد. این مقادیر از روی برشورهای مربوط به این تجهیزات و بانک اطلاعاتی نرم‌افزار TALPAC تهیه شده است. استفاده از نام برندهای تجاری خاص نشان‌دهنده برتری سازندگان این تجهیزات نیست و تنها ویژگی‌های این تجهیزات خاص برای معرفی کلاس تجهیزات و کاربرد آن‌ها در مطالعات بعدی را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان از سایر تجهیزات کمپانی‌های دیگر نیز برای این بررسی استفاده کرد.

جدول ۳-۵ : خصوصیات ماشین‌آلات بارگیری انتخاب شده جهت ارزیابی رویکرد پیشنهادی

معیارهای اصلی*	شاول کابلی	لودر چرخ‌لاستیکی	شاول هیدرولیکی	اکسکاواتور هیدرولیکی
شرکت سازنده	P&H	CAT	Hitachi	Hitachi
مدل	2300XPC	994D	EX2500	EX2500
ظرفیت جام	۱۹m^3	۱۶m^3	۱۶m^3	۱۵m^3
بیشینه ارتفاع برداشت	۱۷/۲m	۸/۳۲m	۱۵/۰m	۱۶/۱۶m
عرض جام	۳۴۰۰m	۵۶۰۰m	۳۸۰۰m	۳۵۰۰m

*بدست آمده از اطلاعات دستگاه‌ها و بانک اطلاعاتی موجود در نرم‌افزار TALPAC

۳-۳-۱- شاول‌های کابلی

شاول‌های کابلی جهت بارگیری مواد در تمام عملیات‌های استخراج از اواخر سده ۱۸ تا به امروز استفاده می‌شوند. هیچ تغییر خاصی در طراحی اصلی ماشین جز انواع مدرن آن در طول سالیان بوجود نیامده است. تنها کابل‌ها جایگزین زنجیرها و موتورهای الکتریکی و دیزلی جایگزین موتور بخار شده است. محبوبیت شاول‌های کابلی به دلیل سادگی آنهاست. شکل ۳-۲ یک شاول کابلی رایج مدل

P&H 2300XPC را نشان می‌دهد. مهمترین ویژگی‌های طراحی شاول‌های کابلی، بوم (دکل) و دسته بارکننده (دسته جام) و خود بارکننده (جام) آن است.

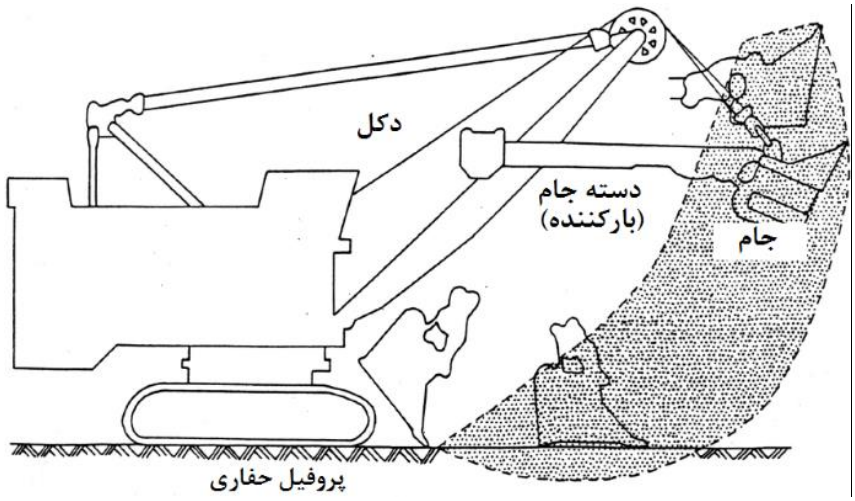
شکل ۳-۲ : یک شاول کابلی الکتریکی P&H 2300XPC

۳-۳-۱-۱- ویژگی‌های طراحی

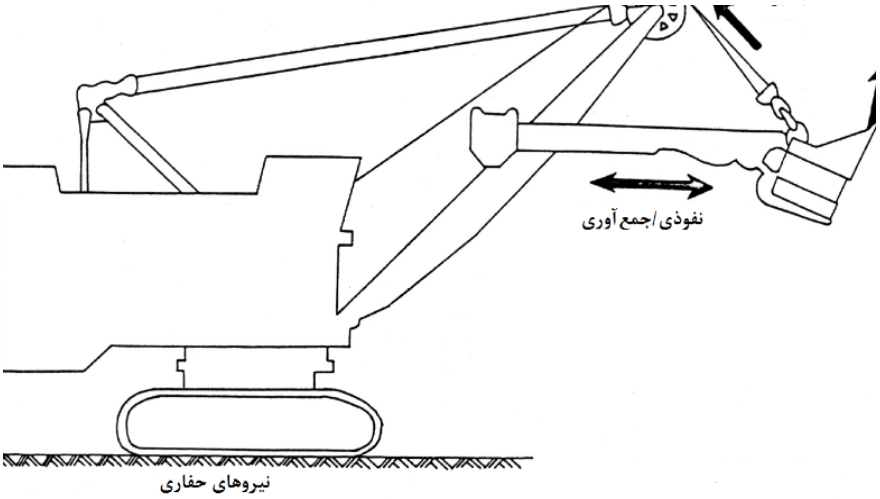
الف : بوم[۱] (دکل) و دسته بارکننده (دسته جام) شاول

کار اصلی شاول کابلی کشیدن جام از سینه‌کار و بارگیری مواد در داخل جام است و اساساً از یک ساختار ساده تخلیه از جلو[۲] استفاده می‌کند و از یک نیروی بسیار قوی جهت حفر همانند آنچه که در پروفیل حفاری این دستگاه در شکل ۳-۳ نشان داده شده، بهره می‌برد. دکل یا بوم یک عضو ساختاری است که تیکه‌گاه و نگهدارنده دسته جام و درنهایت خود جام است. طول بوم (طول دکل) تعیین کننده ارتفاعی است که جام می‌تواند تا آن ارتفاع بالا بیاید و در نتیجه تعیین‌کننده بیشینه ارتفاع پله است.

[۱] Boom
[۲] front-end



شکل ۳-۳ : پروفیل حفاری در یک شاول کابلی(Ford, 1986)



شکل ۳-۴ : نیروهای بارگیری در یک شاول کابلی (Ford, 1986)

دو نوع نیروی اولیه و اصـــلی در ســـیکل بارگیری وجود دارد که بنام‌های نیروی نفوذی[۱] و نیروی بالابرنده[۲] شناخته می‌شوند (شکل ۳-۴). مکانیسم نفوذ دسته جام می‌تواند در هر دو جهت (حرکت به جلو و عقب) نیرومند و پرقدرت باشد و در طول مرحله پرکردن، جام را وادار به نفوذ به داخل جبهه‌کار کند و پس از آن از سینه‌کار جدا شود و تا بالای کامیون جهت تخلیه حرکت دهد. نیروی بالابرنده تنها می‌تواند به سمت بالا اعمال شود و یا دسته جام را تحت نیروی ثقل پایین بیاورد (حرکت به سمت بالا

[۱] Crowd Force
[۲] Hoist Force

و پایین). متاسفانه نیروی کششی و بالابرنده قویی که توسط کابل‌ها قادر است جهت حمل وارد شود به دلیل شکل هندسی خود اتصالات و کابل‌ها بطور کامل به بارکننده منتقل نمی‌شود. در شاول کابلی بر خلاف شاول هیدرولیکی، نیروی کندن[1] وجود ندارد چراکه جام بصورت صلب و بدون انعطاف به دسته جام[2] متصل شده است. در عوض این ماشین از برآیند نیروهای نفوذی و نیروی بالابرنده استفاده می‌کند که در $\frac{۲}{۳}$ ارتفاع جبهه‌کار به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این عمل نیازمند جبهه‌کار نسبتا مرتفعی است تا اطمینان حاصل شود که جام در مسیرش به سمت بالا کاملا پر شود. این طرز بارگیری محدودیت‌هایی را در شاول ایجاد می‌کند:

- از آنجا که جام هنگامیکه در جبهه‌کار نفوذ کرده تنها می‌تواند یک نیروی روبه بالا اعمال کند، در حرکت آن به سمت بالا ترقیق بیش از حد ممکن است اتفاق بیفتد.
- هنگامی که بخش بالاتری از جبهه‌کار شروع به حفاری شود، تیغه جام برای نفوذ در آن قسمت دچار مشکل می شود (و به سختی نفوذ صورت می‌گیرد) و این بدین معناست که بارگیری انتخابی در این بخش از جبهه‌کار امکان‌پذیر نیست.
- از آنجا که ماکزیمم نیروی دندانه‌ها[3] در ماکزیمم نیروی موجود و حرکت روبه سمت بالا بدست می‌آید، ماشین نیازمند وزن فوق‌العاده زیادی در پشت لبه تیغ است (هرزگرد محوری یا روبه‌رویی) تا از کج شدن جام اجتناب کند. این مسئله وزن سنگین شاول‌های کابلی را توجیه می‌کند که در مبحث هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تحرک‌پذیری بعدا مورد بحث قرار می‌گیرد.

ب : جام شاول

جام شاول در قسمت انتهایی کار شاول است و طوری طراحی شده که به آسانی پر شود و از ساییدگی و فرسایش آن در خلال حفاری جلوگیری شود و تخلیه آسانی از طریق درب‌های لولایی

[1] Breakout Force
[2] stick
[3] Tooth Force

عقب دا شته با شد. پی‌شرفت در طراحی جام شاول و متالوژی در طول دهه‌ی گذ شته قابل توجه بوده است و در حال حاضر امکان استفاده از جام با نسبت ابعاد مختلف را مهیا کرده است. یکی از بزرگترین تغییرات در نسبت عرض به ارتفاع جام ا ست که قبلا این نسبت $\frac{۱/۲}{۱}$ بوده و اکنون $\frac{۱/۵}{۱}$ تا $\frac{۱/۷}{۱}$ ا ست. بنابراین جام‌ها درحال حاضر عریض‌تر و سبک‌تر هستند. این تغییرات سبب بیشتر شدن فاکتور پرشوندگی[۱] در ارتفاع جبهه‌کار کوتاه‌تر گردیده و باعث می‌شود تا بازه‌ی بزرگتری از ارتفاع پله‌ها که در آن شاول‌های کابلی اثربخش است، مهیا شود. هر چند که یک جام عریض‌تر برای نرخ تولید بالاتر مفید و مناسب‌تر است، اما سبب بهبود قابلیت بارگیری بصورت انتخابی نمی‌شود.

در نهایت هر مدل شاول با جام مناسب آن برای کار در شرایط و محدودیت‌ها متداول در یک محل‌کار مشخص فروخته خواهد شد. پتر سون[۲] (۲۰۰۱) سوالاتی درمورد اینکه آیا جام باید برا ساس اندازه بار معلق[۳] شاول رده‌بندی شود یا اندازه کامیون می‌پرسد. آنچه که در کار او لحاظ نگردیده است تاثیر ابعاد جام روی قابلیت بارگیری انتخابی به عنوان عاملی جهت بهبود بازیابی و کنترل ترقیق ا ست (Paterson, 2001).

۳-۳-۱-۲- ویژگی‌های عملیاتی

ویژگی‌های عملیاتی برای بررسی چگونگی تاثیر شرایط حفاری، ارتفاع جبهه‌کار و تحرک‌پذیری بر روی تداوم قابلیت بارگیری انتخابی شاول در یک ارتفاع پله است که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

الف : شرایط حفاری

شاول‌های کابلی برای اکثر شرایط کاری مناسب‌اند. در حالی‌که آنها به عنوان بهترین وسیله جهت بهره‌وری بالا در شرایط سخت و مشکل شناخته می‌شوند، به مراتب در شرایط نرم و مطلوب‌تر و

---

[۱] Fill Factors

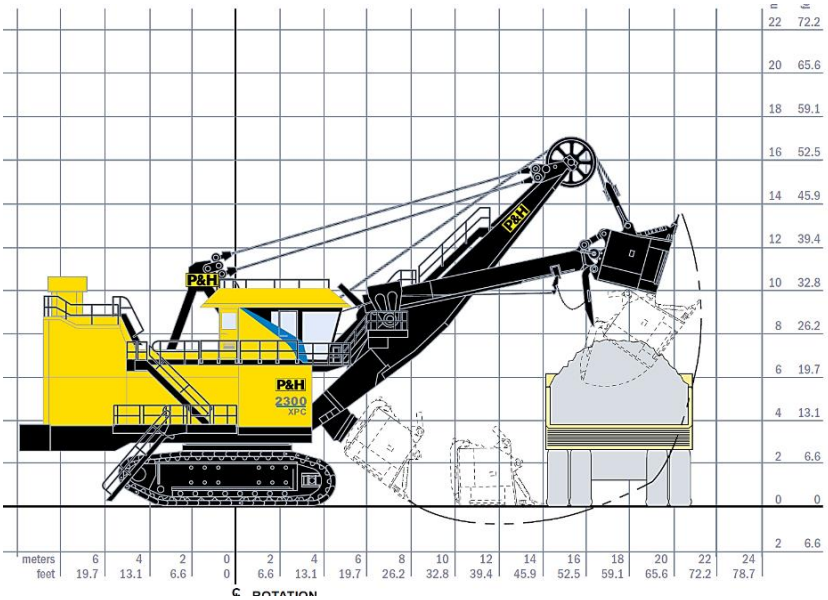
[۲] Paterson

[۳] suspended load

در جایی که جبهه‌کار بطور معقولی پایدار است نیز به خوبی عمل برداشت را انجام خواهند داد. این امر نشان‌دهنده شرایط مطلوب بارگیری انتخابی است. موادی که آزادانه حرکت می‌کنند و روان‌اند به علت مشکلات پاکسازی برای شاول‌های کابلی مناسب نیستند.

ب : ارتفاع جبهه‌کار

اگر ارتفاع جبهه کار ناکافی باشـــد عمل جمع‌آوری جهت پر کردن جام (رســـیدن به فاکتور پر شوندگی مطلوب) در یک حرکت م شکل می شود. طبق یک قاعده سرانگ شتی، ارتفاع پله (بلوک) اســتخراجی باید معادل ارتفاع کف تا بالای چرخ قرقره در دکل شــاول طراحی شــود. زمانی که مواد به خوبی منفجر نشده باشند، این مقدار باید ۱۰ الی ۲۰ درصد کاهش یابد. حداقل ارتفاع جبهه‌کار وابسته به نوع موادی ا ست که قرار ا ست بارگیری شوند، اما بطور کلی سیکل حفاری از ۱۵ثانیه نباید تجاوز کند. براســاس شــکل هندســی یک شــاول P&H 2300 و آزمایشــات متعدد میدانی، ارتفاع مینیمم و ماکزیمم جبهه‌کار تولیدی می‌تواند بین ۸ تا ۱۷ متر اســـت. کاهش ارتفاع جبهه‌کار تا اندازه حداقلی ۴ متر نیز امکان‌پذیر اســـت که این معادل ارتفاع جام آن اســـت. این امر تاثیر منفی روی بهره‌وری تولید دارد. این محدودیت‌ها روی قابلیت بارگیری انتخابی تاثیرگذار اســـت چراکه ارتفاع پله‌های کمتر از این عملا نمی‌تواند درنظر گرفته شود (شکل ۳-۵).



شکل ۳-۵ : پروفایلی از کمترین و بیشترین ارتفاع قابل برداشت در شاول کابلی P&H 2300

ج : تحرک

شـــاول‌های کابلی به خاطر وزن زیادشـــان و محدودیت‌های کابل‌های الکتریکی، تحرک محدود و اندکی دارند. معقول ا ست که بگوییم ماکزیمم م سافتی که شاول کابلی باید در یک شیفت تولید طی کند، نباید از ۵۰۰ متر بیشـــتر باشـــد (چه رو به جلو، چه رو به عقب). هرچند این مســـئله تاثیری روی قابلیت بارگیری انتخابی ندارد، اما می‌تواند محدودیت‌هایی بر روی توانایی ترکیب انواع مختلف مواد که اغلب هنگام انتخابی بودن نیاز اســـت اعمال کند. این موضـــوع همچنین بدلیل پیشـــرفت‌های جانبی سریع‌تر مورد نیاز در پله‌های کوتاهتر باعث کاهش بازدهی و بهره‌وری در ارتفاع پله کمتر می‌شود.

۳-۳-۲- شاول هیدرولیکی

باتوجه به کاربرد موفقیت‌آمیز نیروی هیدرولیک در کج‌بیل‌ها (بیل مکانیکی) و لودرهای تخلیه از جلو[۱] در پروژه‌های عمرانی این مبانی و اصـــول در اوایل ســـال ۱۹۵۰ در اروپا به شـــاول‌هایی با ظرفیت کمتر نیز منتقل شد. از زمان معرفی آن، اکسکاواتورهای هیدرولیکی دستخوش پیشرفت و توسعه‌های شـــگرفی در مقولات مختلف شـــده‌اند. از منظر فنی، ماشـــین‌های دچار تحول و پیچیدگی‌های زیادی شده‌اند که نیاز به مهارتهای بالایی جهت کاربرد دارند و از منظر کاربردی ت صور شرایط بارگیری که شاول‌ها یا اکسکاواتورهای هیدرولیکی قادر نباشند در آن شرایط بکار روند، بعید است.

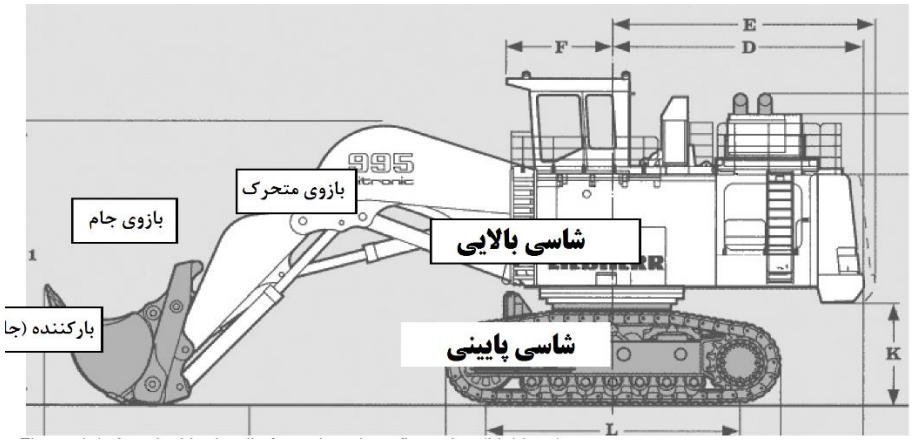
شاول/اکسکاواتورهای هیدرولیکی در بخش‌هایی توسعه یافتند که جبرانی برای نواقص شاول‌های کابلی با شند. درنتیجه یکی از مزیت‌های عمده آن ن سبت به شاول‌های کابلی این ا ست که با طراحی دقیق، نیروهای تولید شـــده توســـط ســـیلندرهای هیدرولیک می‌توانند با بیشـــترین تاثیر بکار روند. شـــاول/اکســـکاواتورهای هیدرولیکی از نیروهای نفوذی و کندن برای انجام حفاری اســـتفاده می‌کنند و کمتر از عمل بلند کردن (برخلاف شـــاول‌های کابلی) در عملیات حفاری اســـتفاده می‌کنند. موفقیت شاول/اکسکاواتور هیدرولیکی به دلیل سازگاری مناسب آن با کارهای مختلف است (شکل ۳-۶).

---

[۱] Front-End

شکل ۳-۶ : یک شاول هیدرولیکی مدل EX2500

اجزای اصلی شاول/اکسکاواتور هیدرولیکی شامل شاسی‌زیرین[۱]، شاسی‌بالایی[۲] و ملحقات دیگر که شامل بوم، بازوی جام یا ا ستیک[۳] و جام شاول ا ست که در شکل ۳-۷ ن شان داده شده ا ست. برای افزایش کاربرد موثرتر اکسکاواتور هیدرولیکی ساختار بوم و بازوی آن می‌تواند در شاول‌های هیدرولیکی و اک سکاواتورهای کج‌بیل تغییر کند (جابجا شود). نوع کج‌بیل در ابتدا برای حفاری از سطوح پایین‌تر طراحی شد و نوع شاول آن برای بارگیری همتراز یا از سطوح بالاتر بکار برده شد. در ادامه هر یک بطور مجزا توضیح داده خواهد شد. ابتدا شاول هیدرولیکی بررسی می‌گردد.



شکل ۳-۷ : نمونه‌ای تیپیک از ساختمان یک شاول هیدرولیکی (Liebherr)

[۱] undercarriage
[۲] uppercarriage
[۳] Stick

۳-۳-۲-۱- ویژگی‌های طراحی

الف : بوم و دسته شاول (Stick)

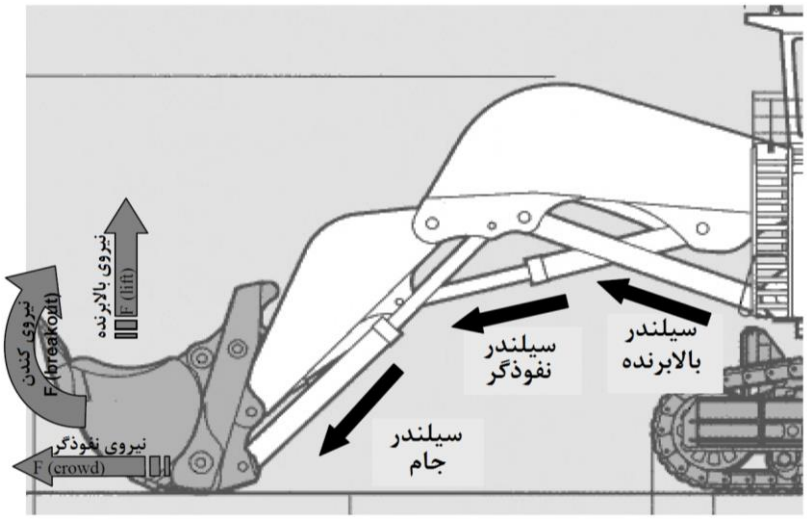
شاسی‌زیرین و بالایی ساختار اصلی ماشین را تشکیل می‌دهد که می‌تواند به یک بیل‌مکانیکی[۱] یا بیل تخلیه از جلو[۲] مجهز شود. اکسکاواتورهای هیدرولیکی با استفاده از دو بازوی مفصلی که بوم (دکل) و استیک (بازو) نامیده می‌شوند، به جام وصل می‌گردد. دو سیلندر بالابرنده حرکت بوم را برعهده دارند و دو سیلندر نفوذی که از بوم به بازو متصل شده، حرکت بازو را برعهده دارند. جام نیز بوسیله دو سیلندر جام[۳] کنترل می شود. هر دوی این نیروها برای نفوذ در مواد انباشته شده ضروری است. شاول هیدرولیکی از سه نیروی مجزا در سیکل حفاری به نام‌های نیروی فشاری (نفوذی)، کندن و بالابرنده که در شکل ۳-۸ نشان داده شده است، استفاده می‌کنند. روش عادی برای پرکردن جام، نفوذ به مواد توسط نیروی فشاری و سپس برداشت آن از سینه‌کار است که بوسیله پیچشی که از طریق نیروی کندن به جام اعمال می‌گردد صورت می‌پذیرد. سیلندرهای بازو یا نفوذگر، نیروی فشاری در لبه‌های دندانه ایجاد می‌کند. این حرکت می‌تواند در جهت پایین یا به سمت بالا و یا در امتداد مسیری با کمترین مقاومت برای پر شدن سریع و کامل جام اعمال شود. اگر از نیروی نفوذگر بالاتری استفاده شود، سبب نیروی عکس‌العمل بیشتری خواهد شد که این نیروی عکس‌العمل به خود ماشین وارد می‌شود و آن را به کف زمین هل می‌دهد و از حرکت به سمت عقب نگه می‌دارد.

---

[۱] Bachhoe

[۲] Front shovel

[۳] Bucket-Cylinders



شکل ۳-۸ : نیروهای بکار رونده در بارگیری (Liebherr)

هنگامی که نیروی نفوذگر، جام را به داخل مواد می‌راند و عملیات نفوذ بدلیل مقاومت مواد متوقف می‌شود، نیروی کندن جام، مواد را جدا می‌سازد و جام را پر می‌کند. این نیروی کندن از نیروی سیلندرهای جام که به خود جام وارد می شود و حول محور خود و در انتهای استیک چرخش می‌یابد، نا شی می شود. از طریق طراحی دقیق نیروی مورد نیاز چرخش شروع یک سیکل بارگیری امکان‌پذیر اســـت. این حقیقت که نیروی فشـــاری می‌تواند تقریبا در هر ارتفاعی از جبهه‌کار مورد اســـتفاده قرار بگیرد، کلید اصلی برای توانایی این ماشین جهت حفاری بصورت انتخابی است.

نیروی بالابرنده بکار رفته تو سط سیلندرهای بالابر به اندازه نیروی نفوذی و نیروی چرخش موثر نیست. از این بحث روشن است که از نیروی بالابرنده برای پرکردن جام استفاده نمی‌شود بلکه بیشتر جهت تغییر موقعیت جام در جبهه‌کار بکار برده می‌شود.

ب : جام شاول

در هندســـه جام (بارکننده) یک شـــاول تخلیه از جلو، توازن و تعادل دقیقی بین عرض، عمق و ارتفاع آن وجود دارد. جام‌هایی که بســـیار عریض‌اند ممکن اســـت ســـبب ایجاد ناپایداری و نیروهای نامتقارن[۱] در طول بارگیری شـــوند که باید از آن اجتناب کرد. برای یک ظرفیت معین، جام‌ها باریک،

[۱] asymmetrical force

عمیق‌تر یا بلندتر می‌شوند.

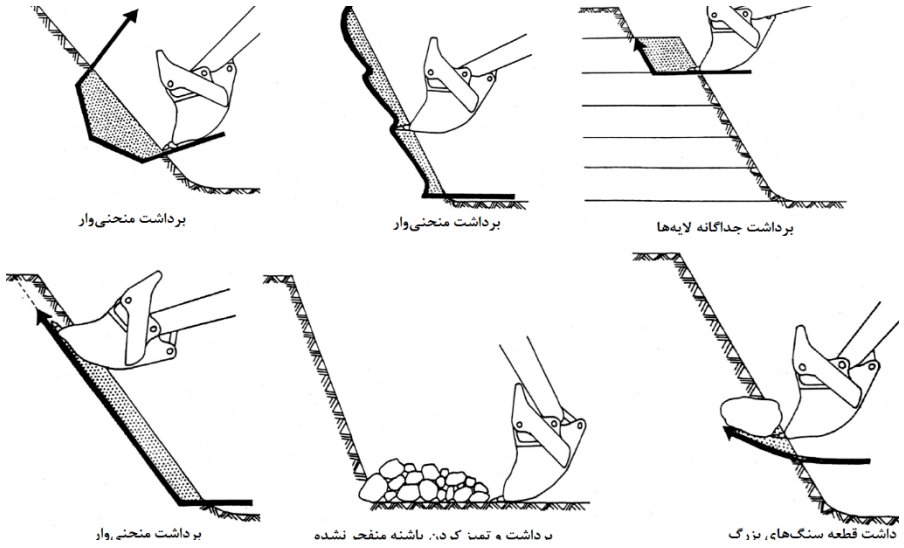
در مقایسه جام تخلیه از جلو یک لودر چرخدار، این جام دارای فواید قابل ملاحظه‌ای است که بزرگترین آنها افزایش ارتفاع دمپ (تخلیه) است. این امر بخاطر این واقعیت است که جلوی جام بصورت هیدرولیکی کنترل شده و به سمت بالا، کشیده می‌شود. این حاکی از آن است که می‌توان از کامیون‌های بزرگ در مسافت‌های طولانی حمل و نقل استفاده کرد.

۳-۳-۲-۲- ویژگی‌های عملیاتی

الف : شرایط حفاری

شاول‌های هیدرولیکی برای اغلب شرایط حفاری مناسب‌اند. حالات مختلفی از حفاری‌ها جهت حفر جبهه‌کار می‌تواند مانند آنچه در شکل ۳-۹ آمده بکار رود. به علت کارآیی موثر نیروهای بارگیری، شاول‌های هیدرولیکی قادرند جبهه‌کارهای مستحکم و یا سست و خرد شده را بارگیری کنند. اغلب از نیروی کندن زیادی برای اجرای حفاری آزاد[۱]، که در آن هیچگونه چالزنی و انفجاری را نیاز ندارد، بکار می‌رود. این شرایط در طول ارتفاع پله‌های مختلف از بارگیری انتخابی حمایت می‌کند مثل انتخابی شدن ۳متری بارگیری وقتی که استخراج در ارتفاع پله ۱۲ متری صورت می‌گیرد. با این حال تنها زمانی این امر ممکن است که زاویه مواد منفجر شده (منظور برجا ماندن مواد پس از انفجار و عدم پخش شدن آن‌ها) جبهه‌کار اجازه دهد که شاول بقدر کافی به جبهه‌کار نزدیک شود تا بتواند جام را پر کند. اگر این چنین نباشد، شاول باید از قسمت پاشنه پله بارگیری را انجام دهد که در این صورت امکان بروز ترقیق کلی وجود دارد و امکان بارگیری بصورت انتخابی را از بین می‌برد.

[۱] Free Digging



شکل ۳-۹ : انواع برداشت‌ها از جبهه‌کار در شاول هیدرولیکی (Ford, 1986)

ب : ارتفاع جبهه‌کار

شـــاول هیدرولیکی بصـــورت مناســـب و موثری در هر ارتفاع جبهه‌کاری تا ۱۵متر، بکار می‌رود. هرچند نوع مواد خواه مثلا مواد سست و روان[۱]، مستحکم و یا غیره تعیین کننده ارتفاع موثر پله است، اما شایان ذکر است که ارتفاع پله آنقدر برای شاول هیدرولیکی (برعکس شاول کابلی) پارامتر بحرانی و حایز اهمیتی نیســـت و دلیل آن هم مکانیزم متفاوت بارگیری در شـــاول هیدرولیکی اســـت. شـــاول هیدرولیکی یک ابزار بارگیری هو شمند ا ست که با ا ستفاده از نیروی نفوذی، کندن و بالا بردن جام را پر می‌کند و به نیروی ا ضافی در طول ارتفاع جبهه‌کار وابسته نی ست. دفترچه م شخ صات که تو سط Liebherr برای شـــاول هیدرولیکی مدل R994 ($16m^3$) فراهم گردید نشـــان داد که ۸۰٪ بهره‌وری در ارتفاع پله بین ۴/۵ تا ۱۲متر می‌تواند بدست می‌آید.

ج : تحرک

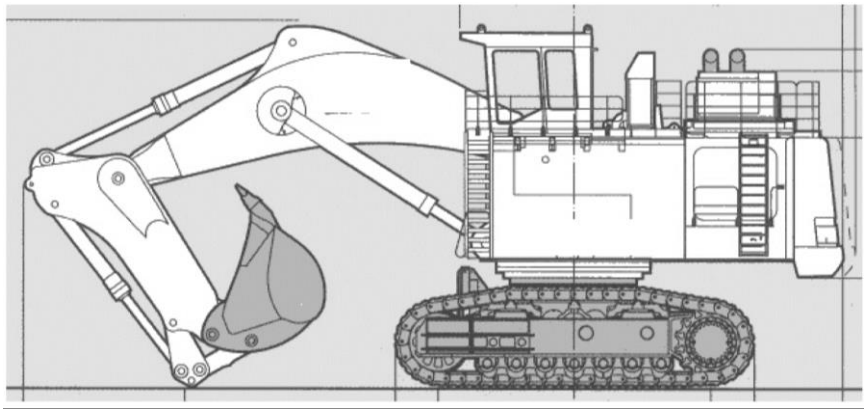
هنگامیکه تحرک یک شاول مورد بررسی قرار می‌گیرد، لازم است بین دستگاه‌های چرخ زنجیری[۲] و چرخ لاســـتیکی[۳] تمایز برقرار کنیم. دســـتگاه‌های چرخ لاســـتیکی مانند لودرهای چرخدار بســـیار

[۱] Free Flowing
[۲] Crawler
[۳] rubber wheeled

تحرک‌پذیر هستند. همه شاول‌های هیدرولیکی بصورت چرخ زنجیری هستند. آن‌ها در مقایسه با شاول‌های کابلی به دلیل وزن کمتر و افزایش نیروی کمکی[۱] موتور دارای تحرک بیشتری هستند. نیروی کمکی (کششی) به ماشین این اجازه را می‌دهد که بتواند تا شیب°۴۵ حرکت داشته باشد و آن را قادر می‌سازد که خودش را از شرایط سخت محیطی مثل شکاف‌هایی که با مواد نرم و رسی پوشیده شده، بیرون بکشد. تحرک‌پذیری خصوصا در جایی که نیاز به مخلوط کردن موادمعدنی با مواد دیگر از سایر جبهه‌کارها در طول یک شیفت با شد (مانند ا ستوک‌پایل‌ها)، مهم ا ست. این کار تنها در بازه‌ای چند صدمتری و ترجیحا روی پله خاص، عملی ا ست. ارتفاع کمتر پله به دلیل تغییر موقعیت مکرر که نیازمند به تحرک است، پیشرفت در جوانب جبهه‌کار را میسر می‌کند.

۳-۳-۳- اکسکاواتور هیدرولیکی (کج بیل)

برای هرشاسی زیرین[۲] و شاسی بالایی[۳] داده شده‌ای، این امکان وجود دارد که بدون نیاز به تلاش زیاد، اکسکاواتور هیدرولیکی به فرم کج‌بیل را به شاول هیدرولیکی و یا برعکس تبدیل کرد. بزرگترین تفاوت این دو در ساختمان بوم و بازو جام است که بر روی ابعاد جام، آماده‌سازی بارگیری[۴]، ظرفیت تولید و ارتفاع جبهه‌کار تاثیر می‌گذارد. شکل ۳-۱۰ ساختمان یک نوع رایج کج‌بیل را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۰ : ساختمان یک کج‌بیل مدل EX2500 (Hitachi)

[۱] Drawbar pull
[۲] underCarriage
[۳] upperstructure
[۴] Loading setup

۳-۳-۳-۱- ویژگی‌های طراحی

الف : بوم و دسته جام شاول (بازو)

تفاوت عمده بین شاول‌های هیدرولیکی و کج‌بیل، ساختار بوم و دسته جام آنهاست. این به معنای تفاوت آن‌ها در عمل بارگیری و پروفیل برش است. در ساختمان کج‌بیل، بوم (دکل) بلندتر است و امکان دسترسی بیشتری دارد ولی در عوض جام آن کوچکتر است. همانند شاول‌های هیدرولیکی (سطحی)، نیروهای هیدرولیکی در کج‌بیل برای نفوذ و کندن موثر در سینه‌کار تنظیم گردیده است و نیروی بالابرنده کمتر اهمیت دارد.

ب : بارکننده و جام شاول

برای کج‌بیل‌ها (بیل مکانیکی)، هندسه جام تفاوت زیادی با شاول‌های پیشکاو دارد. جام‌ها در آن‌ها باریک‌تر و گودتر (عمیق‌تر) است و راحت‌تر کنترل می‌شود. بطور کلی در مقایسه با یک اکسکاواتور هیدرولیکی مشابه و یکسان، جام روی کج‌بیل کوچکتر از جام در شاول است. این تفاوت سایز به دلیل ارتفاع بلندتر دسترسی و برای اینکه جام کج‌بیل به یک فاکتور پرشوندگی بالاتر برسد، است. اغلب جام‌های کوچکتر باعث افزایش قابلیت بارگیری انتخابی می‌شود.

جام‌های باریک و شعاع کوتاه لبه آن باعث افزایش بیشتر نیروی حفر و کندن (نیروی چرخش) می‌شود. درحالیکه جام‌های کوچکتر برای ظرفیت تولیدهای بالا مناسب نیستند ولی درعوض باعث افزایش قابل توجهی در قابلیت بارگیری بصورت انتخابی می‌شود.

۳-۳-۳-۲- ویژگی‌های عملیاتی

الف : شرایط حفاری

اکسکاواتورهای هیدرولیکی تناسب زیادی با بیشتر شرایط حفاری دارند. رگه‌های نواری افقی یک کاربرد خوب برای کج‌بیل هیدرولیکی است زیرا بسیار سریع و راحت می‌تواند بطور انتخابی بین نوارها

حفاری کند. آن‌ها توانایی کار از بالای جبهه‌کار به پایین آن را دارند و قادرند در و ضعیت‌هایی که هیچ راه دیگری برای کار وجود ندارد، حفاری کنند. با این حال در جاییکه مواد منفجر نشـــده‌اند و یا خیلی بد انفجار شـــده‌اند، کج‌بیل در مقایســـه با شـــاول جهت بارگیری دارای نقطات ضـــعفی اســـت. برای یک اپراتور شاول، جبهه‌کار بهتر دیده می شود و او را قادر می سازد تا شکاف‌هایی در مواد را که با نیروی کندن زیادی می‌توان به آن‌ها نفوذ کرد، تشـــخیص دهد. قطعات بزرگ ســـنگ[1] برای اپراتور شـــاول راحت‌تر دیده می‌شود. کج‌بیل در شرایطی که حفاری در جای تنگ و محدود صورت می‌پذیرد و ارتفاع پله با طول دسته جام تناسب دارد به خوبی بکار می‌آیند.

ب : ارتفاع جبهه‌کار

از آنجایی که کج‌بیل روی پله بالایی قرار می‌گیرد، ارتفاع پله نباید از دســـته جام کج‌بیل بلندتر باشد. اگر ارتفاع پله بیش از دسته جام باشد (بطور معمول ۶-۵ متر) ماشین در بهره‌وری بهینه خودش دچار مشکل می‌شود. درحالیکه شاول هیدرولیکی و یا شاول کابلی قصد دارند فاکتور پرشوندگی جام را از طریق افزایش ارتفاع پله بهبود دهند، کج‌بیل‌ها دچار مشکلات بیشتری برای رسیدن به قسمت پایین پله (به دلیل افزایش ارتفاع پله) جهت تمیز نگه‌داشـــتن منطقه بارگیری کامیون‌ها، خواهند داشـــت. از آنجا که طول دســـته جام (اســـتیک) و ابعاد جام دارای رابطه معکوس باهم هســـتند، افزایش طول دسته جام باعث کاهش ابعاد جام تا جاییکه می‌شود که ادامه تولید مقرون به صرفه نیست.

۳-۳-۴- لودرهای چرخ‌لاستیکی

لودرهای چرخ‌لاســـتیکی معمولی یا به عبارتی لودرهای تخلیه از جلو (FEL's) اولین بار در ســـال ۱۹۴۰ و مدت‌ها قبل از شاول‌های هیدرولیکی تولید شدند. این ماشین‌ها شبیه شاول‌های کابلی بودند، اما با پیشـــرفت در تکنولوژی تایر و نیروی هیدرولیکی، این ماشـــین‌ها به نوع با قدرت و تحرک‌پذیر امروزی تبدیل شدند. در سال‌های اولیه، آن‌ها به شکل یک قاب صلب و فرمان محوری بودند، اما در

[1] Boulder

اواسط سال ۱۹۶۰ توسعه در لودرهای چرخدار از طریق فرمان مرکزی و محور مجهز صلب، دیده شد. شکل ۳-۱۱ یک لودر چرخ‌لاستیکی نشان می‌دهد.

شکل ۳-۱۱ : لودر چرخ‌لاستیکی مدل CAT 994

لودرهای چرخ‌لاستیکی به عنوان ابزاری تنها جهت بارگیری توسعه یافتند نه ابزاری برای حفاری، و بیشتر برای جابجا کردن مواد سست و ذخیره شده بکار می‌روند. اما در نسل‌های بعدی، به اندازه کافی پیشرفت کرد تا بتواند موادی را که به خوبی آتشباری شده‌اند، بارگیری کند. ویژگی‌های اصلی طراحی لودرهای چرخ‌لاستیکی شامل بوم تخلیه از جلو[۱] و جام آن است.

۳-۳-۴-۱- ویژگی‌های طراحی

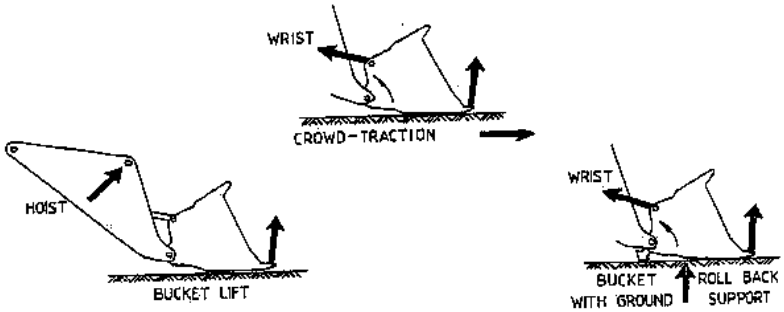
الف : نحوه قرارگیری بوم تخلیه از جلو

لودرهای معمولی (تخلیه از جلو) بطور کلی جام را روی یک تکه بازوی مفصلی در جلوی لودر نگه می‌دارد. این بازو توسط بازوی هیدرولیکی بالا یا پایین می‌رود و کج کردن جام[۲] توسط مجموعه هیدرولیک‌ها و مکانیسم‌های ارتباطی ثانویه که در بخش جلویی لودر قرار می‌گیرد، کنترل می‌شود. دو

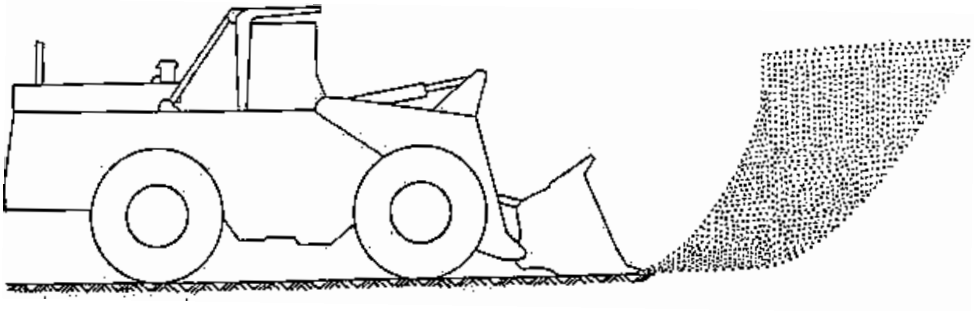
[۱] front-end boom
[۲] Tilt of Bucket

گزینه ترکیب ساختاری تخلیه از جلو معمولا ارائه می‌شود: یکی آرایش استاندارد[1] و دیگر آرایش بالابرنده[2] است. آرایش بالابرنده به جام کوچکتری مجهز است اما راحت‌تر می‌تواند در کامیون‌های بزرگ بارگیری نماید.

ماشین از طریق ترکیبی از نیروهای نفوذی مثل کشش، میزان کمی نیروی کندن (چرخش) از طریق نیروی پیچش (تاباندن) و نیروی بالابرنده از طریق یک حرکت روبه بالا عملیات برداشت را انجام می‌دهد. در شکل ۳-۱۲ نیروهای بارگیری در لودر نشان داده شده است. نحوه بارگیری لودر در جبهه کار از کف به سمت بالا ست. به منظور محافظت از تایرها در هنگام عملیات ضروری ست که کف محل کار تمیز با شد. ثانیا نیروی نفوذی فقط در قسمت کف پله می‌تواند ا ستفاده شود. این حاکی از آن است که جام همانند شاول کابلی از پایین‌ترین قسمت جبهه‌کار پر می‌شود، و مجال بارگیری انتخابی نیز کاهش می‌یابد (شکل ۳-۱۳).



شکل ۳-۱۲ : نیروهای بارگیری در یک لور چرخ‌لاستیکی (Ford, 1986)



شکل ۳-۱۳ : نحوه انجام بارگیری در لودر چرخ‌لاستیکی (Ford, 1986)

[1] Standard Arrangement

[2] High-Lift Arrangement

مکانیزم بارگیری در لودر نسبت به شاول کابلی و شاول هیدرولیکی که عمل بارگیری را با حرکت جام و دکل انجام می‌دهد و خود ماشین ثابت است، فرق دارد (در لودر چرخدار عمل بارگیری با حرکت ماشین صورت می‌گیرد). در جبهه‌کار نیروی نفوذگر از طریق تحرک خود ماشین به سمت مواد انباشته شده تامین می‌گردد، میزان نیروی کششی (یدکی)، وضعیت کف و جرم ماشین بر میزان نفوذ که در آغاز سیکل بارگیری بکار می‌رود، تاثیرگذار است. به دلیل عرض زیاد جام به منظور حمایت از تایرها، میزان نیروی نفوذی بطور کلی ضعیف است و بطور خطی و کم به لبه جام وارد می‌گردد.

ب : جام لودر

انتخاب جام، بخش جدایی ناپذیر در کارآمدی لودرهای چرخی است و تحت تاثیر نوع مواد و کامیونی که قرار ا ست بارگیری شود و همچنین نرخ تولید مورد نیاز و دیگر هزینه‌ها قرار دارد. قابلیت بارگیری جام لودر[۱] تابعی از عرض، ارتفاع، عمق، انحنا، ضخامت مواد، شکل لبه برش (مستقیم در مقابل v شکل) و ابزار درگیر با زمین[۲] یا (GET) است. ترکیب بهینه‌ای از این خواص به جام اجازه نفوذ در مواد، پر شدن و تخلیه مواد را می‌دهد. توانایی نفوذ در مواد توسط ضخامت، شکل و عرض لبه برش[۳] جام تعیین می‌شود. یک لبه نازک جهت نفوذ بهتر است، اما به اندازه لبه‌های ضخیم‌تر و v شکل کاربرد ندارند. عرض جام توسط محدود تحت پوشش تایرها و نیز هدف تخلیه تعیین می‌گردد.

تسهیل حرکت مواد به درون یا بیرون جام بستگی به عمق، ارتفاع و انحناهای جام دارد. مواد مختلف نیازمند نسبت‌های مختلف عمق به ارتفاع به انحنا دارند. برای موادی که امکان نفوذ در آنها آ سان ا ست، جام عریض‌تر و عمیق‌تر (گودتر) بهتر ا ست. در موادی که نفوذ مشکل ا ست نیاز به جامی باریکتر و کم عمق‌تر داریم. در مواد چ سبنده (مثل مواد خیس) به جامی با انحنای بی شتر و کم‌عمق‌تر نیاز است.

---

[۱] Bucket loadability

[۲] Ground Engagement tools

[۳] Cutting Edge Thickness

روشـن اسـت که انتخاب جام تحت تاثیر عوامل زیادی از جمله انتخابی بودن قرار دارد که به این دلیل است که جام به ندرت قابلیت معدنکاری انتخابی لودرهای چرخدار را افزایش و بهبود می‌بخشد.

۳-۳-۴-۲- ویژگی‌های عملیاتی

الف : شرایط حفاری

لودرهای تخلیه از جلو بهترین وسیله برای موادیست که به خوبی منفجر شده‌اند و نیز مواد روان هستند که برای شرایط حفاری آسان و غیرسخت بکار می‌روند. بکارگیری نیروهای مختلف بارگیری در جاییکه جبهه‌کار دچار مشـکل اسـت، به محدوده کاربری لودر محدود می‌شـود. این به معنای درنظر گرفتن ترقیق بخاطر عمل خردشدن بیشتر سنگ‌هایی است که از طریق افزایش مواد ریز و روان ایجاد می‌شود. وضعیت حفاری همواره منجر به استخراج انتخابی نخواهد شد.

ب : ارتفاع جبهه‌کار

لودرهای چرخدار بیشـترین نیروی نفوذی را در کف پله ایجاد می‌کنند. این بدان معنا اسـت که کمترین ارتفاع پله موثر باید معادل ارتفاع جام باشـد. ماکزیمم ارتفاع پله نباید از ارتفاع محور لولایی[۱] هنگامی که در بالاتربن قسمت است، بلندتر باشد. افزایش این ارتفاع سبب تحلیل و تضعیف جبهه‌کار و ایجاد شرایط کاری خطرناک می‌شود. لودرهای چرخدار می‌توانند تا ارتفاع جبهه‌کار ۱۰ متر، به شرط خردایش خوب و روان بودن مواد، بطور کارآمدی عمل کنند. اما به ندرت برای اینچنین عملیات اسـتخراجی بکار می‌رود و عمدتا از لودرهای تخلیه از جلو در ارتفاع پله‌های کوتاه‌تر اسـتفاده می‌شـود. مزیت اصـلی کاربرد این نوع لودر در ارتفاع پله‌های کمتر به دلیل قابلیت تحرک آنها در اطراف و کناره جبهه‌کار است. یک قاعده سرانگشتی بیان می‌کند که ارتفاع موثر پله نباید از ارتفاع محور لولای پین شـده در حالتی که در بالاترین ارتفاع قرار دارد، بیشـتر شـود. برای لودر مدل CAT 994D مشـخص

[۱] hinge pin

گردید که ارتفاع موثر پله بین ۴ تا ۸/۳ متر قرار دارد. اگرچه لودرهای چرخدار از لحاظ انتخابی بودن در ارتفاع پله کوتاهتر مفیدتر اســـت، اما آن‌ها نمی‌توانند بطور همزمان از جنبه هزینه تولید در ارتفاع پله‌های بلندتر، مفید واقع شوند.

ج : تحرک

یک لودر چرخدار برای حمل ۲۱-۱۸ درصـــد وزن عملیاتی خود به عنوان جام بار مفید[۱] طراحی گردیده ا ست و به این ترتیب یک ن سبت بار به وزن عملیاتی ب سیار مطلوب دارد که به معنای تحرک بسیار زیاد ا ست. تلفیق قاب مفصلی (کمر شکن) و تایر لا ستیکی منجر به قابلیت مانور و تحرک عالی لودرهای چرخ‌لاستیکی می‌شود. متاسفانه یکی از اشکالات جدی تحرک این ماشین‌آلات نیاز به حرکت خود د ستگاه در سیکل بارگیری ا ست. تحرک بالای لودرهای چرخ‌لا ستیکی مهمترین ویژگی و مزیت آن در یک محیط معدنی اســـت. چرا که از آن می‌توان برای بارگیری چند جبهه‌کار همزمان در یک شیفت و همچنین پ شتیبانی از شاول‌های دیگر ا ستفاده کرد. تحرک بیش از اندازه دو م شکل عمده دارد. اول اینکه تعداد زیادی از حالات حرکت نیاز به مهارت و تمرکز زیاد اپراتور آن دارد و دوم اینکه لودر چرخ‌لا ستیکی اغلب برای کاربردهای ثانویه بکار می‌روند که این سبب کاهش خروجی تولید کلی آن‌ها می‌شود.

با شـــناخت ویژگی‌های طراحی و عملیاتی ماشـــین‌آلات بارگیری در معادن و نحوه عمل بارگیری، لازم اســـت تا ارتباط ارتفاع پله و انتخابی شـــدن اســـتخراج جهت کاهش ترقیق در هر دســـتگاه مورد مقایسه قرار گیرد.

[۱] payload

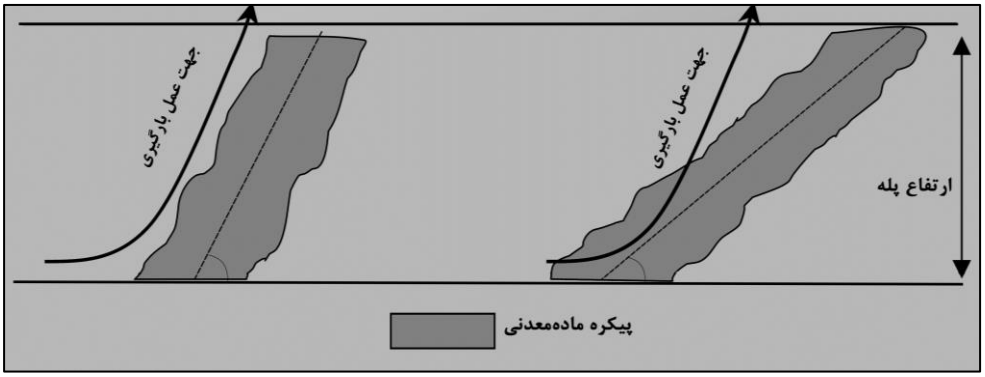
۳-۴- ارتفاع پله و انتخابی شدن استخراج

همانطور که در بخش‌های قبل به آن اشاره شد، هر شاول دارای ویژگی‌های منحصر بفردی است که در رقابت به سایر تجهیزات به آنها برتری می‌دهد. این موضوع در بردارنده اهمیت تطبیق بین اجزا است که به این نتیجه می‌رسد که در فرآیند استخراج خاص باید از ابزار کاوش مناسب استفاده شود. اما سوال مهمی که باید پرسیده شود این است که انتخابی بودن واقعا چیست و چگونه اندازه‌گیری می‌شود و چگونه کاربر نهایی گزینه‌های مختلف را مقایسه کند؟

استخراج انتخابی عملی است که برای کمینه سازی میزان ترقیق و بیشینه سازی میزان بازیابی ماده‌معدنی صورت می‌گیرد. در واقع، این اولین گام پرعیارسازی بکار رفته در چرخه بارگیری است. میزان انتخابی شدن استخراج به شرایط محل کار وابسته است و از محلی به محل دیگر فرق می‌کند. هنگامی که قرار است ماده‌معدنی در یک مسافت طولانی حمل گردد، کاهش میزان باطله در کامیون باربری بسیار مهم است چراکه در غیر اینصورت باعث تحمیل هزینه‌های غیرضروری و اضافی حمل و نقل می شود. همچنین بسته به نوع پرعیار سازی، صرفه‌جویی اقتصادی قابل توجهی در صورت ایجاد توازن در فرآیند تولید از طریق کاهش ترقیق خوراک کارخانه فرآوری بوجود می‌آید.

شدت و میزان انتخابی شدنی که می‌تواند بکار رود می‌تواند تحت تاثیر عوامل مختلفی با شد که مهمترین آن‌ها هندسه و پیچیدگی‌های زمین‌شناسی کانسار معدنی است. در تمامی اشکال یک پیکره‌معدنی، صرف تلاش و هزینه بیش از حد برای افزایش بازیابی و یا کاهش ترقیق قابل توجیه نیست. باطله‌برداری و مقدار روباره می‌تواند نقش مهمی در انتخابی شدن و اندازه تجهیزات داشته باشد. میزان روباره و در نتیجه نسبت باطله‌برداری باعث پیچیده‌تر شدن فرآیند انتخاب تجهیزات هنگامی که استخراج انتخابی مدنظر باشد، می‌شود. نسبت باطله‌برداری بالا نیازمند ماشین‌آلاتی با حجم تولیدی بالا است که این نوع ماشین‌آلات (با حجم تولید بالا و در نتیجه ابعاد بزرگ) معمولا نیازهای استخراج انتخابی را برآورده نمی‌کنند. بهترین پیشنهاد در این حالت این است که ترکیبی از

ماشـــین‌آلات مختلف برای بخش باطله و ماده‌معدنی بهتر اســـت بکار رود. با این حال مهم‌ترین عامل، شکل پیکره ماده‌معدنی و کانسار است. در یک ماده‌معدنی با زاویه شیب تندتر، جدایش ماده‌معدنی از باطله در طول فعالیت بارگیری به مراتب آسان‌تر است. بسته به نوع تجهیزات و ماشین‌آلات بکار رفته، ارتفاع پله نباید تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر توانایی اجرای بارگیری انتخابی در پیکره‌معدنی پر شیب داشته باشد. با این حال، اگر پیکره ماده‌معدنی دارای شیبداری بصورت مسطح و تخت باشـــد، عمل بارگیری انتخابی بســـیار پیچیده‌تر می‌شـــود و ارتفاع پله و انتخاب تجهیزات تاثیر قابل‌توجهی بر بازیابی اســـتخراج و درنتیجه تبدیل منابع به ذخایر خواهند داشـــت (شـــکل ۳-۱۴). هر پیکره ماده‌معدنی با ســـایر پیکره‌های معدنی دیگر متفاوت اســـت. تهیه منحنی عیار-تناژ و ارزیابی بلوک‌ها در ارتفاع پله‌های مختلف، نقطه شروع منا سبی در تعیین اینکه آیا تغییرات تناژ مواد می‌تواند بر روی ارزیابی اقتصادی ذخایر تاثیرگذار باشد است.



شکل ۳-۱۴ : تاثیر زاویه شیب پیکره‌معدنی بر روی عمل بارگیری

هندســـه پیت[1] نیز در انتخابی شـــدن اســـتخراج نقش دارد. در این رابطه ارتفاع پله و راســـتای استخراج، دارای بیشترین اهمیت است. این جمله بدان معناست که پیت باید قادر به تغییر برنامه‌ریزی در راستای استخراج باشد که خود به هندسه پیکره‌معدنی وابسته است. بنابراین طبیعی است که ابعاد بلوک‌هایی که برای اســـتخراج و تولید درآمد طراحی شـــده‌اند (خصـــوصـــا ارتفاع) باید با قابلیت انتخابی

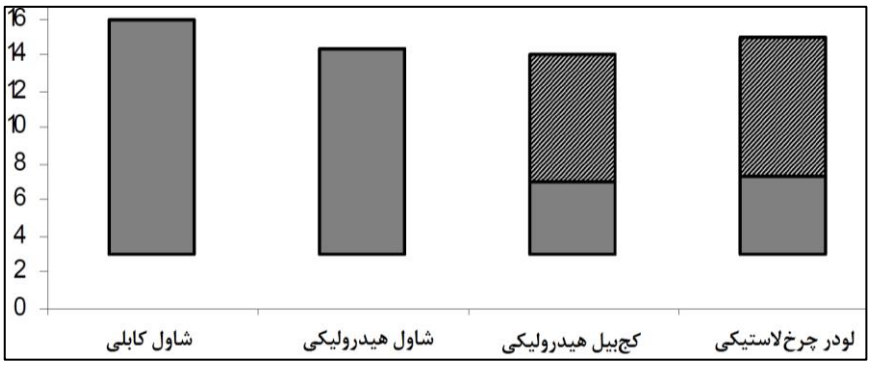
[1] Pit Geometry

تجهیزات مرتبط[1] باشد و هندسه پله و هزینه‌های تولید باید در انتخاب تجهیزات بازتاب پیدا کنند.

انتخاب ارتفاع پله بهینه از طریق تطابق و سازگاری بین الزامات پیکره‌معدنی با توانایی تجهیزات استخراجی قابل دستیابی است. نتایج منحنی عیار-تناژ که نشان‌دهنده میزان بازیابی در ارتفاع پله‌های مختلف است، باید اختلاط قائم[2] را در عمل بارگیری در نظر گیرد. بعد از آن مهندسی انتخاب تجهیزات جهت تفسیر توانایی‌های تجهیزات و تعیین اقتصادی‌ترین ارتفاع پله که در آن بازیابی مورد نیاز، می‌تواند بدست آید. استفاده از منحنی عیار-تناژ نشان خواهد داد که آیا پتانسیلی برای افزایش میزان بازیابی از طریق استخراج انتخابی وجود دارد یا نه.

۳-۴-۱- محدوده کاربری موثر تجهیزات از نظر ارتفاع پله

قبلا نشان داده شد که بیشتر تجهیزات بارگیری می‌توان در یک محدوده وسیع از ارتفاع‌های پله بکار روند با این حال در همه حالات کارایی مشابه‌ای ندارد. کمترین و بیشترین اندازه ارتفاع پله‌ها از نظر فیزیکی محدود به بازه‌ای است که در آن تجهیزات بتواند هم بطور کارآمد و هم ایمن کار کنند. شکل ۳-۱۵ یک نمایش گرافیکی از ارتفاع پله‌های ممکن برای رایج‌ترین د ستگاه‌های بارگیری ن شان می‌دهد. بخش هاشور خورده در کج‌بیل و لودر چرخ‌لاستیکی بیانگر اینست که از نظر فیزیکی بارگیری در این بازه امکان‌پذیر است هرچند که باعث از بین رفتن کامل امکان بارگیری انتخابی می‌شود.

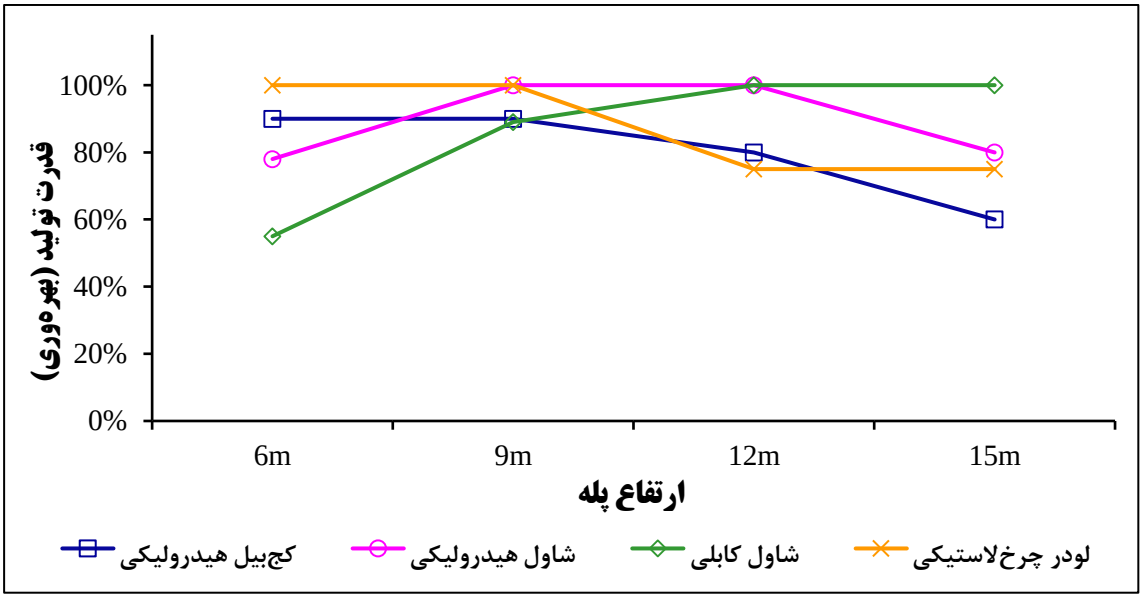


شکل ۳-۱۵ : محدود کارآمد ارتفاع پله در ماشین‌آلات مختلف (Swanepoel, 2003)

[1] Correlate

[2] vertical blending

شـــکل ۳-۱۶ نشـــان دهنده بازدهی و قدرت تولید هر یک از ماشـــین‌آلات انتخاب شـــده در این تحقیق در ارتفاع پله‌های متفاوت ا ست. این نمودارها از شبیه سازی بارگیری این تجهیزات در نرم‌افزار TALPAC، که برنامه‌ای جهت تعیین قدرت تولید و بهره‌وری در سیستم اقتصادی بارگیری و باربری است، بدست آمده است (Runge Minning). با توجه به معدن مورد مطالعه، اطلاعاتی از نظر نوع مواد، انتخاب کامیون ترابری، فهر ستی از کارهای مدنظر، بخش باربری و انتخاب شاول تهیه گردید. ورودی نرم‌افزار شـــامل ابعاد جام با توجه به میزان تولید مدنظر، فاکتور پرشـــوندگی، زمان چرخه عملیات و آماده سازی بارگیری ا ست. فاکتورهای پر شوندگی جام و زمان‌های چرخه (سیکل) عملیات به منظور شـــبیه‌ســـازی نرخ تولید در ارتفاع پله‌های مختلف، با یکدیگر تعدیل و تنظیم شـــدند. فرضـــیاتی از نظر متوسط مسافت حمل و نقل مواد (با دو مقصد کارخانه و انباشتگاه باطله)، متوسط چگالی مواد، مقدار فاکتور پرشوندگی جام و آماده‌سازی بارگیری درنظر گرفته شده است (به پیوست ۲ مراجعه شود).



شکل ۳-۱۶ : نتایج حاصل از شبیه‌سازی بهره‌وری در ارتفاع پله‌های مختلف

۳-۴-۲- قابلیت استخراج انتخابی ماشین‌آلات بارگیری

در ادامه با توجه به عوامل موثر بر انتخابی شدن استخراج، شاول انتخاب شده از لحاظ ساختمان جام (شکل صندوقه)، عمل بارگیری و خردایش ارزیابی و بررسی خواهد شد.

ساختمان جام :

به منظور بهبود انتخابی شدن، اندازه جام باید دارای ابعادی با شد تا "بردا شت"[1] مواد از جبهه‌کار در طول بارگیری صـــورت بگیرد. این به معنای کاهش ارتفاع و یا عرض جام اســـت. جهت مقایســـه ساختمان جام از نظر انتخابی بودن استخراج، می‌توان نسبتی از حجم جام[2] به مساحت جبهه‌کار[3] (که با توجه به ارتفاع و عرض شاول تعیین می شود) را محا سبه کرد (Singhal. et al, 1986). هرچه این نسبت بالاتر با شد، برای بارگیری بصورت انتخابی منا سب‌تر ا ست. در جدول ۳-۶ خلا صه‌ای از ابعاد برای هر یک از انواع ما شین‌آلات بارگیری دراین تحقیق آورده شده ا ست که از آن نتیجه می شود که لودر چرخ‌لاستیکی از شایستگی کمتری جهت بارگیری انتخابی مواد برخوردار است.

جدول ۳-۶ : قابلیت بارگیری انتخابی بیان شده در یک نسبت مساحت جبهه‌کار

نوع شاول	ظرفیت	ارتفاع	عرض	نسبت $m^3/face\ area$
شاول کابلی	۱۹m^3	۳۵۰۰mm	۳۴۰۰mm	۱/۶۰
کج‌بیل هیدرولیکی	۱۵m^3	۳۴۰۰mm	۳۵۰۰mm	۱/۲۶
شاول هیدرولیکی	۱۶m^3	۳۵۰۰mm	۳۸۰۰mm	۱/۲۰
لودر چرخ‌لاستیکی	۱۶m^3	۲۵۰۰mm	۵۶۰۰mm	۱/۱۴

عمل بارگیری :

این عامل یکی از مهمترین ویژگی‌های تعیین کننده قابلیت بارگیری انتخابی تجهیزات ا ست. این اندازه‌گیری از طریق بررسی قابلیتی ا ست که د ستگاه بتواند جبهه‌کار را به ارتفاع پله‌های موثر کوتاه‌تر در طول بارگیری تقسیم کند، بد ست می‌آید و بصورت کیفی تو صیف می شود. تجهیزات می‌توانند از منظر تمایزی که می‌توانند بطور قائم (در راســـتای ارتفاع پله) بین بخش‌های مختلف مواد جبهه‌کار

[1] picked
[2] dipper volume
[3] face area

ایجاد کنند، بررسی می شوند. بر اساس ویژگی‌های عملیاتی بیان شده هر نوع شاول، همانطور که در جدول ۳-۷ آمده، نقطه نظرات زیر را می‌توان از منظر عمل بارگیری بیان کرد.

جدول ۳-۷ : مقایسه‌ای بین عمل بارگیری و انتخابی شدن استخراج در ماشین‌آلات مختلف

نوع ماشین بارگیری	توضیحات
شاول کابلی	این شاول نمی‌تواند در حین عملیات بارگیری بین انواع مواد تمایز قایل شود. قابلیت انتخابی شدن آن محدود به کل ارتفاع جبهه‌کار و برابر با ارتفاع پله انتخابی است.
شاول هیدرولیکی	این شاول قادر است که بین انواع مواد مختلف در هنگام بارگیری، تمایز ایجاد کند. وقتی جبهه‌کار مقاوم است، انتخابی شدن محدود به ارتفاع جام دستگاه است و از آن تاثیر می‌پذیرد نه از ارتفاع پله که برای بیشینه محدودیت برداشت بکار می‌رود.
اکسکاواتور هیدرولیکی (کج بیل)	کج‌بیل‌ها قادرند که بین انواع مواد مختلف در هنگام بارگیری، تمایز ایجاد کند. انتخابی بودن به اندازه جامی که در یک حرکت می‌تواند پر شود، محدود می‌شود. به محض تقسیم پله، آلایش مواد رخ خواهد داد. توانایی انتخابی شدن به منظور ارزیابی این دستگاه، برابر با ارتفاع پله در نظر گرفته می‌شود.
لودر چرخ‌لاستیکی	انتخابی شدن این دستگاه به ارتفاع جامش محدود می‌شود. در مواقعی از آن استفاده می‌شود که ارتفاع پله بیشتر از محور لولایی پین شده آن نباشد. به مجرد بیشتر شدن ارتفاع از این حالت، نیاز به حرکت و جریان روان و آزاد مواد است و تمام قابلیت انتخابی شدن از بین می‌رود.

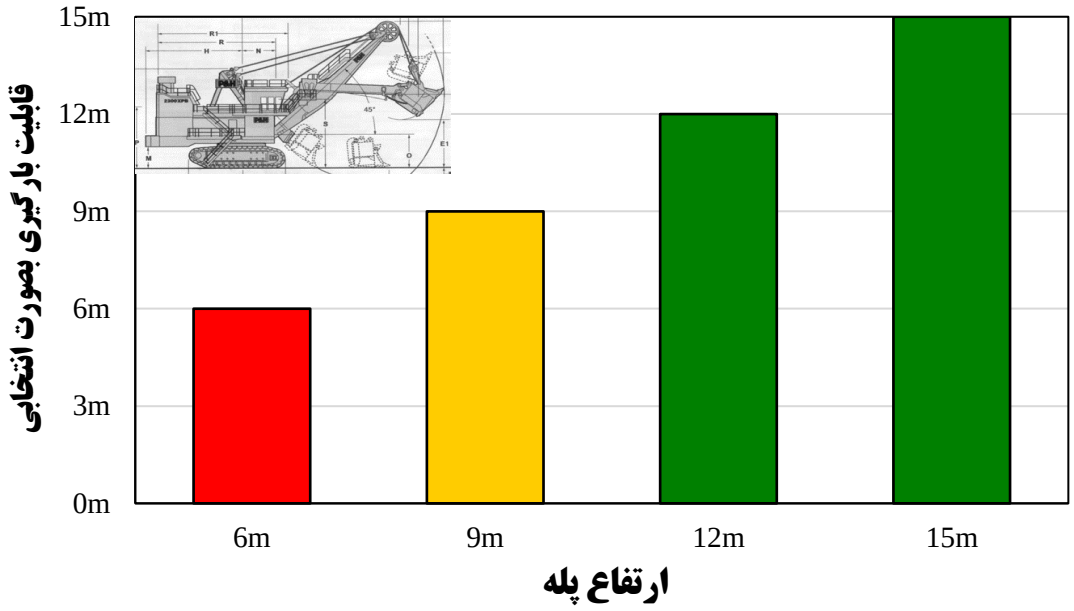
خردایش[۱] :

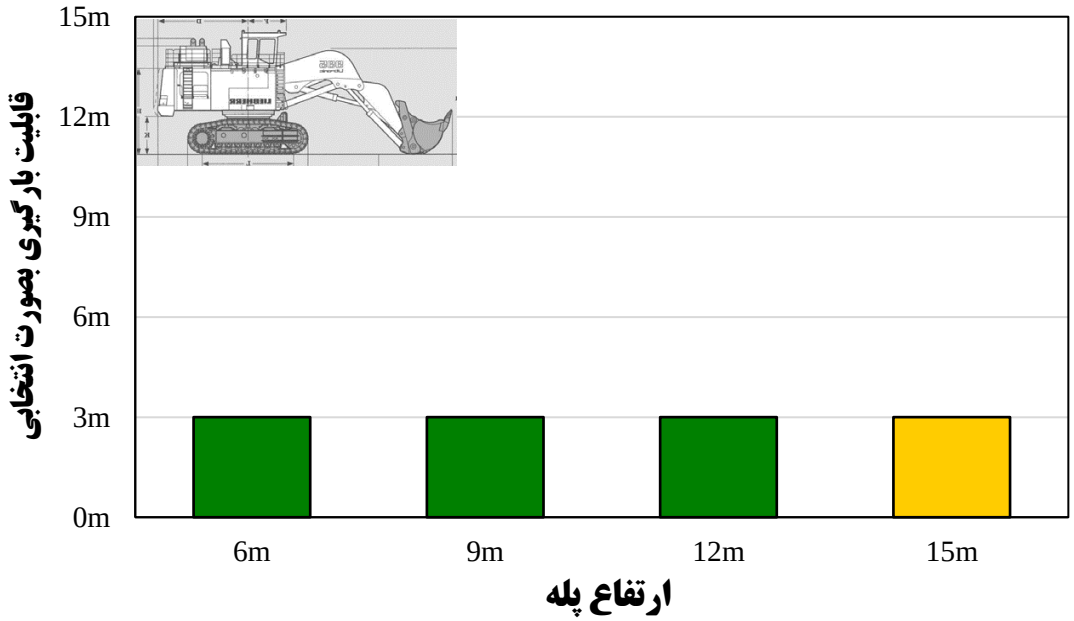
هنگامیکه در مورد قابلیت برداشت[۲] مواد بحث می‌کنیم، باید بین موادی که می‌توانند آزادانه برداشت شوند[۳] و موادی که منفجر شده‌اند تمایز ایجاد کرد. به میزان خردشدگی مواد از طریق انفجار، خردایش می‌گویند. خردایش به عنوان توزیع و دانه‌بندی ابعاد مواد بارگیری شده توصیف شود و می‌تواند شامل بازه‌ای از مواد بسیار ریز و روان[۴] تا موادی که بوسیله تکنیک آتشباری شکافی[۵] (تکنیکی که در آن مواد تقریبا بدون جابجایی و سالم در جای خود باقی مانده است اما به میزانی

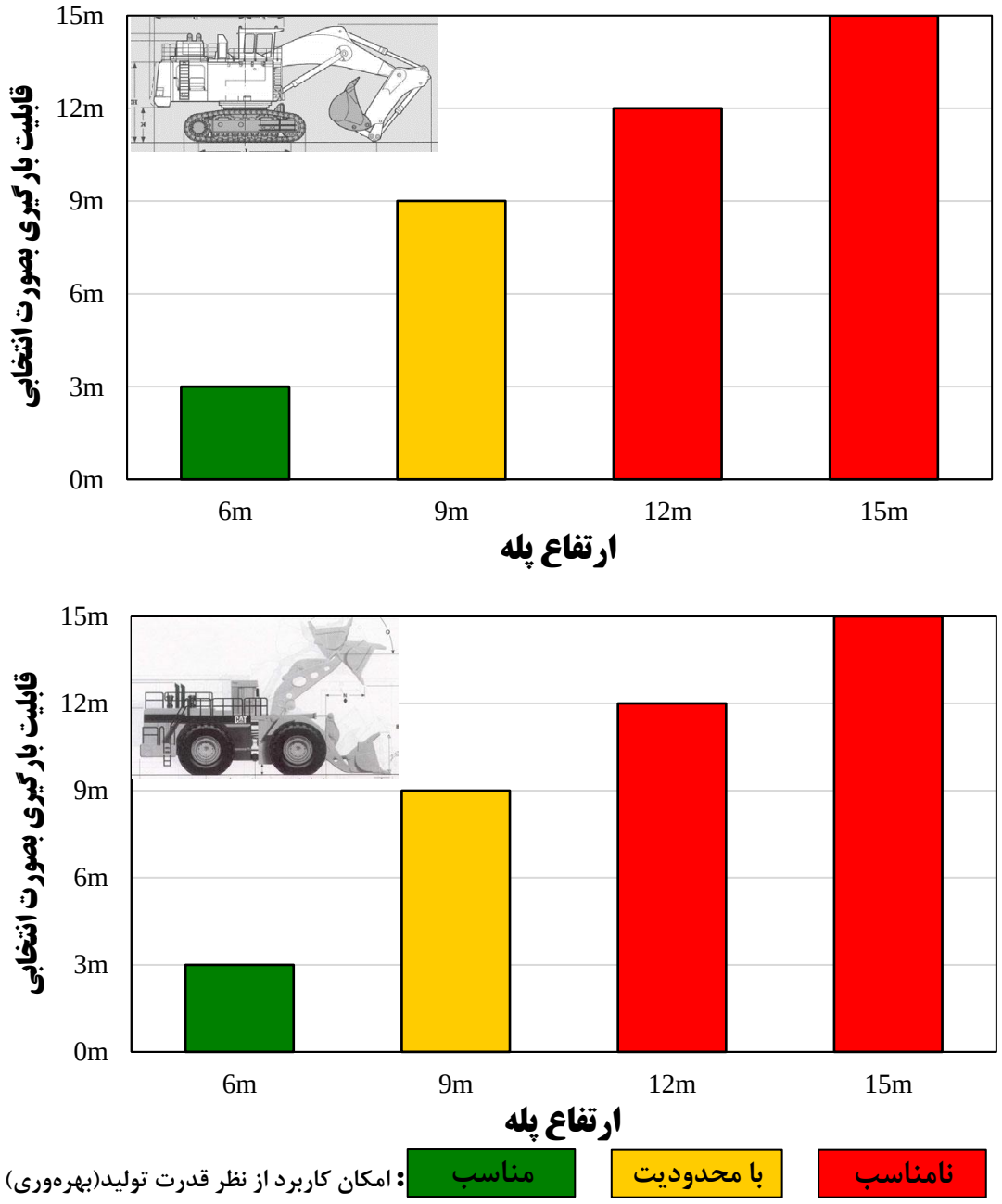
[۱] Fragmentation
[۲] digability
[۳] dug freely
[۴] very fine
[۵] crack blasting

شکسته شده که بارگیری بتواند صورت گیرد) باشد. خردایش مورد نیاز می‌تواند تاثیر بسزایی روی فرصت بارگیری بصورت انتخابی داشته باشد. خردایش و جابجایی بیش از حد نیاز مواد پس از انفجار، باعث اختلاط بیشتر مواد با هم و در نتیجه ترقیق در بخش تماسی ماده‌معدنی با باطله خواهد شد. خردایش مورد نیاز برای بارگیری کارامد و موثر بوسیله تجهیزات، از طریق نیروهای موجود بکار رفته در حین بارگیری و نحوه بکارگیری این نیروها تعیین می شود. شاول هیدرولیکی در جاییکه خردایش بسیار ضعیف و نامطلوب است به دلیل کاربرد موثر و هوشمندانه از نیروهای حفاری مختلف که در ساختارش وجود دارد، می‌تواند بهترین گزینه باشد و لودر چرخ‌لاستیکی در جاییکه خردایش بسیار خوب و مطلوب است می‌تواند بکار می‌رود. شاول کابلی نیز می‌تواند در شرایط بسیار دشوار برداشت بکار رود. همچنین راستای استخراج با توجه به هندسه پیکره‌معدنی جهت کاهش ترقیق مواد پس از انفجار باید بهبود و اصلاح گردد.

از بحث‌های قبلی، بدیهی است که محدوده ارتفاع پله‌ها و توانایی انتخابی شدن که همان توانایی بارگیری بصورت انتخابی است، بصورت کمّی قابل محاسبه کردن نیست و نسبتا یک دید از ارزیابی ویژگی‌های طراحی و عملیاتی هر یک از تجهیزات بارگیری که با پارامترهای هندسی پیکره‌معدنی مرتبط است، بدست می‌دهد و باعث قضاوت می شود. بر اساس نتایج بدست آمده، توانایی استخراج انتخابی مورد انتظار در ارتفاع پله‌های مختلف برای هر نوع شاول را می‌توان بطور تقریبی محاسبه نمود. این قابلیت برای ۴ سناریو ارتفاع پله در شکل ۳-۱۷ نشان داده شده است.


15m
12m
9m
6m
3m
0m
قابلیت بارگیری بصورت انتخابی
6m
9m
12m
15m
ارتفاع پله


15m
12m
9m
6m
3m
0m
قابلیت بارگیری بصورت انتخابی
6m
9m
12m
15m
ارتفاع پله



شکل ۳-۱۷ : نماش گرافیکی از قابلیت استخراج انتخابی ماشین‌آلات مختلف بارگیری در ارتفاع پله‌های متفاوت

اکنون توانایی انتخابی شدن استخراج ماشین‌آلات بارگیری در ارتفاع پله‌های مختلف بطور کیفی تخمین زده شد. بهتر است ارزیابی اقتصادی را در هر سناریوی ارتفاع پله برای همه دستگاه‌ها انجام داد؛ اما به دلیل تعداد زیاد و وقت‌گیر بودن این ارزیابی‌ها، در این تحقیق تصمیم گرفته شد برای هر سناریو ارتفاع پله تنها بهترین دستگاه (در هر سناریو دو دستگاه) از منظر انتخابی بودن مرتبط با آن

معرفی انتخاب شود و ارزیابی اقتصادی با توجه به آن صورت گیرد. پیشنهاد می‌شود که این ارزیابی در کارهای بعدی برای تمامی دستگاه‌ها در هر سناریوی ارتفاع پله صورت پذیرد. بدیهی است هر یک از این تجهیزات هزینه سرمایه‌ای و عملیاتی متفاوتی دارد و همچنین هر سناریو میزان ذخیره متفاوتی با سایر سناریوها دارد (طبق منحنی‌های تناژ عیار در هر حالت و بدلیل تغییر ارتفاع پله استخراجی)؛ بنابراین ارزش اقتصادی در هر سناریو متفاوت خواهد شد و سناریوی که بالاترین ارزش خالص فعلی و نرخ بازگشت را دارد به عنوان مناسب‌ترین ارتفاع پله پیشنهاد خواهد شد.

۳-۵- طراحی الگوی چالزنی و انفجار

طراحی الگوی چالزنی و انفجار شامل تعیین قطر چال، مقدار بارسنگ، فاصله ردیفی چال‌ها، میزان ماده منفجره مورد نیاز در هر چال است. در این بخش به بررسی تاثیر ارتفاع پله در تعیین این عوامل پرداخته شده است. در گذشته گاهی ارتفاع پله به عمق دستگاه چالزنی محدود می‌شد، اما دستگاه‌های چالزنی کنونی تا حد زیادی این محدودیت را برطرف کرده‌اند. به هر حال، در معادن روباز مطلوب آنست که تمامی ارتفاع پله در یک مرحله چالزنی شوند که به این معناست که ارتفاع دکل دستگاه چالزنی باید با ارتفاع پله به اضافه ته‌چالی[۱] مورد نیاز، سازگار باشد. در این تحقیق، انتخاب دستگاه‌های حفاری خاصی منظور نیست، بلکه تبعات و پیامدهای هزینه تولید و طراحی بهینه انفجار در هر سناریو در بخش ارزیابی اقتصادی جایگزین می شود تا هزینه‌ها و تاثیرات مالی این بخش روی ارزیابی اقتصادی ارتفاع پله منعکس گردد.

بطور معمول هزینه‌های چالزنی و انفجار بین ۲۵ تا ۴۰ درصد هزینه‌های تولید را در معادن روباز شامل می‌شوند، بنابراین لازم است تا مناسب‌ترین طراحی الگوی حفاری و انفجار بکار رود تا حد امکان این هزینه‌ها کاهش یابد. بطور کلی در طراحی الگوی انفجار، پارامترهای موثر در طراحی را می‌توان به دو دسته پارامترهای غیرقابل کنترل و پارامترهای قابل کنترل تقسیم کرد. پارامترهای غیرقابل کنترل

[۱] subgrade drilling

بیشتر اشاره به خصوصیات ذاتی پیکره‌معدنی مثل هندسه و شکل کانسار، مقاوت سنگ، ناپیوستگی سنگ و ... دارد که امکان تغییر آن‌ها وجود ندارد. اما پارامترهای قابل کنترل اشاره به عواملی دارد که قابلیت تغییر آن‌ها وجود دارد. مهمترین عوامل قابل کنترل در طراحی انفجار ارتفاع پله، قطر چال، ضخامت بارسنگ، فاصله جناحی چال‌ها، طول گل‌گذاری، اضافه حفاری و نوع مواد منفجره بکار رفته و ... است (عطایی، ۱۳۹۰).

جدول ۳-۸ : اجزای طراحی انفجار در معادن روباز

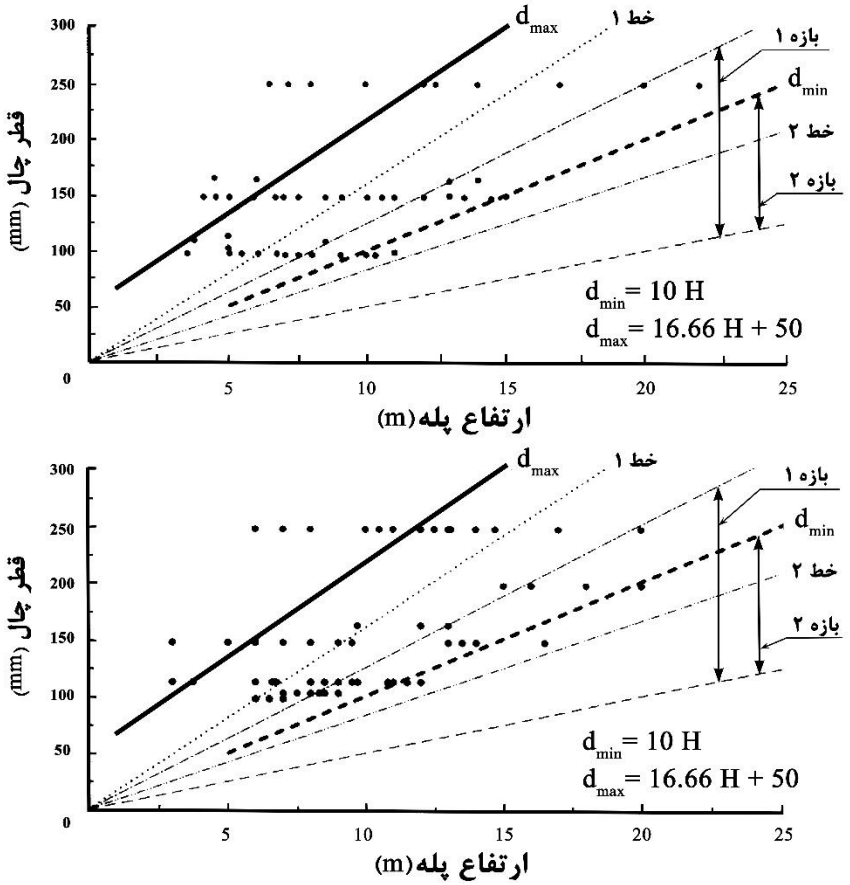
اجزای طراحی		واحدهای رایج	اجزای طراحی		واحدهای رایج
نشانه	جزء	سنجش	نشانه	جزء	سنجش
φ_h	قطر چال	mm, m, in	I_c	تراکم خرج میان چال	Kg/m , pn/ft
B	ضخامت بارسنگ	m, ft	h_c	طول خرج میان چال	m, ft
S	فاصله جناحی چال‌ها	m, ft	I_b	تراکم خرج ته چال	Kg/m pn/ft
H	طول چال	m, ft	h_b	طول خرج ته چال	m, ft
u	اضافه حفاری چال	m, ft	α	شیب چال	درجه
K	ارتفاع پله	m, ft	q	خرج ویژه	Kg/m^3 ،pn/yd^3
S_T	طول گِل‌گذاری	m, ft	h	حفاری ویژه	ft/m^3 ، ft/t

هنگامیکه ارتفاع پله انتخاب گردید، مهمترین عامل در هنگام طراحی الگوی انفجار، انتخاب مناسب‌ترین قطر چال انفجاری برای دستیابی به بهترین میزان خردایش سنگ است. رابطه بین ارتفاع پله و قطر چال انفجاری در بسیاری از منابع آورده شده است (Atlas Powder Company, 2000; Adhikari, 1999; Naapuri, 1987; Konya, 1990). طبق کار آدیکاری[1] (۱۹۹۹) و بر اساس مشاهدات صحرایی و بررسی‌هایی که او انجام داد، محدوده‌ای برای انتخاب قطر چال انفجاری با توجه به ارتفاع پله استخراجی در پروژه‌های معدنی مختلف پیشنهاد شد. این بازه حداکثر و حداقل قطر چال انفجاری را با توجه به ارتفاع پله پیشنهاد می‌کند (رابطه (۳-۱).

[1] Adhikari

$$\begin{cases} d_{min} = 10H \\ d_{max} = 16.66H + 50 \end{cases} \quad (۳-۱)$$

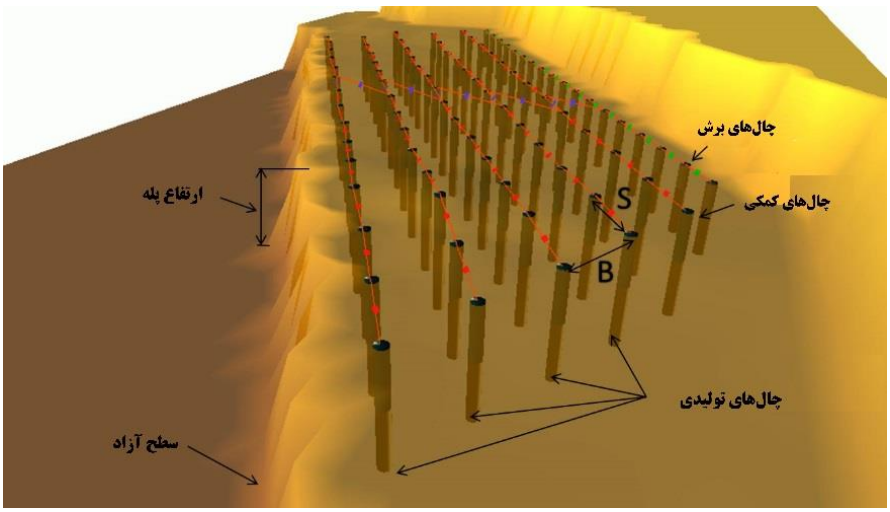
که در آن d_{min} و d_{max} به ترتیب کمینه و بیشینه قطر چال انفجاری برحسب میلیمتر (mm) و H معرف ارتفاع پله بر حسب متر (m) است. بازه بین d_{min} و d_{max} به عنوان بازه سازگار بین قطر چال و ارتفاع پله تعریف می‌شود. هر یک از خطوط ما بین d_{min} و d_{max} از رابطه‌های پیشنهادی نویسندگان مختلف، که در بالا به برخی از اسامی آن‌ها اشاره شده است، بدست آمده و بنابراین این بازه بهترین حالت برای معرفی رابطه بین قطر چال انفجاری با ارتفاع پله است (شکل ۳-۱۸).



شکل ۳-۱۸ : رابطه پیشنهادی برای ارتفاع پله و قطر مناسب چال (Adhikari, 1999)

طبق رابطه (۳-۱) برای یک ارتفاع پله ۶ متری، حداقل و حداکثر قطر چال باید بین ۶۰ تا ۱۵۰ میلیمتر با شد. پس از تعیین منا سب‌ترین قطر چال در هر سناریوی ارتفاع پله، ضخامت بار سنگ بر

اساس قطر چال بدست آمده و سپس فاصله جناحی بر اساس ضخامت بارسنگ متناسب با آن تعیین می‌شـــود. بنابراین جهت تعیین فاکتورهای چالزنی و انفجار در هر ســـناریو ارتفاع پله از رابطه (۳-۱) استفاده شده است. سایر پارامترهای موجود در طراحی الگوی انفجاری نیز با توجه به فرضیاتی که در اکثر معادن روباز نیز بکار می‌رود و با بررسی میدانی پروژه‌های مشابه محاسبه گردیدند. این طراحی‌ها بگونه‌ای صـــورت پذیرفت تا علاوه بر انتخاب مناســـب هر پارامتر طراحی، هزینه تولید تا حد امکان کاهش یابد و سناریوها قابل مقایسه شوند. جزییات این پارامترهای طراحی در هر یک از سناریوهای ارتفاع پله در فایل پیوست آمده است. شکل ۳-۱۹ بطور شماتیک نحوه آرایش چال‌ها انفجاری در یک معدن روباز را نشان می‌دهد. انتخاب دستگاه مناسب چالزنی و مقدار مصرف مواد منفجره در هر سناریو بر اساس این طراحی صورت خواهد گرفت. با توجه به تعداد و قیمت مختلف هر دستگاه چالزنی در هر ســـناریو، هزینه‌های عملیاتی و ســـرمایه‌گذاری مربوط به آن در هر ســـناریو فرق خواهد کرد. جدول طراحی پارامترهای انفجار در پیوست ۲ آورده شده است.



شکل ۳-۱۹ : نمایی شماتیک از آرایش چال‌های انفجاری در یک معدن روباز

فصل چهارم

معرفی رویکرد پیشنهادی و معدن شماره ۲ گل گهر

و تخمین میزان منبع معدنی در هر سناریو

۴-۱- مقدمه

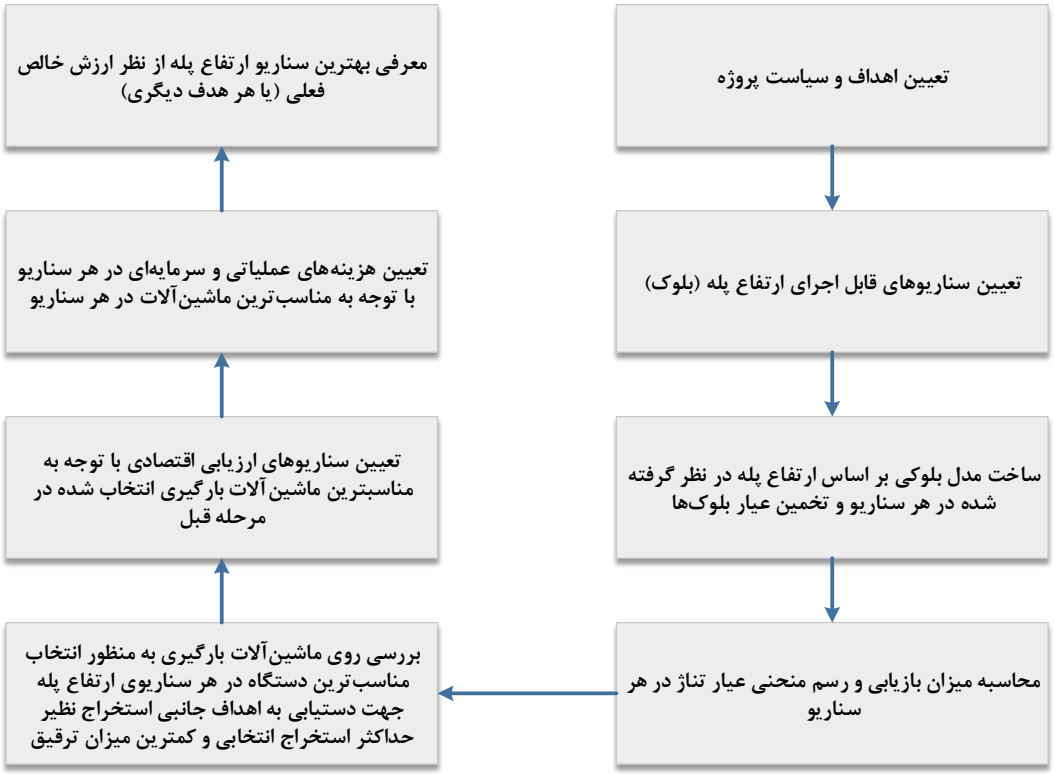
این فصل ابتدا به معرفی رویکرد پیشنهاد شده جهت انتخاب مناسب‌ترین ارتفاع پله در معادن روباز می‌پردازد. مراحل مختلف برای این منظور شرح داده شده است. سپس از داده‌های اکتشافی معدن ۲ گل‌گهر به منظور بررسی رویکرد پیشنهاد شده در این تحقیق استفاده می‌شود. بنابراین قبل از هر اقدامی، شرح مختصری درباره معدن ۲ گل‌گهر بیان می‌شود.

در ادامه این فصل نحوه ایجاد فضای تخمین و نتایج حاصل از تخمین معدن ۲ گل‌گهر در سناریوهای مختلف ارتفاع پله بررسی می شود و نتایج بدست آمده در منحنی‌های عیار-تناژ منعکس می‌شود. بررسی آماری داده‌های اکتشافی که در تخمین شرکت می‌کنند و شناخت ویژگی‌های آماری جامعه داده‌های خام به خصوص ماهیت تابع توزیع آن‌ها کمک زیادی به نحوه صحیح بکار بردن آن‌ها و تجزیه و تحلیل مناسب‌تر نتایج حاصل از تخمین می‌کند. برای این منظور شناخت پارامترهای آماری جامعه، شامل میانگین، واریانس، ضریب تغییرات و به خصوص چولگی که دلالت بر نرمال یا غیرنرمال بودن تابع توزیع داده ها دارد، مفید خواهد بود. در بین همه این عوامل، شکل تابع توزیع و میزان انحراف آن از توزیع نرمال و امکان تبدیل داده‌ها به توزیع نرمال در فرآیند تخمین اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. زیرا اگر تابع توزیع داده‌ها نرمال نباشد (مثلا لاگ‌نرمال باشد) به دلیل آنکه واریانس تابعی از

میانگین است، فرضیات پایایی برقرار نخواهد بود. پیامد این رخداد این است که امکان بروز خطای سیستماتیک در فرآیند تخمین افزایش می‌یابد و تخمین‌ها از اعتبار لازم ساقط می‌کند. از همین رو پس از ساخت فضای تخمین و قبل از انجام تخمین، به تحلیل این داده‌ها پرداخته شده و خصوصیات پیکره‌معدنی و نحوه توزیع عیار آن مشخص می‌شود.

۴-۲- معرفی رویکرد پیشنهادی

این تحقیق سعی دارد تا بهترین ارتفاع پله اقتصادی را از بین سناریوهای پیشنهاد شده برای ارتفاع پله که قابلیت اجرا دارند، معرفی نماید. برای این منظور باید تمام عواملی که با ارتفاع پله در ارتباطاند (که در فصول قبل به آن‌ها اشاره شد) جهت یک ارزیابی جامع روی یک زنجیره ارزش معدنکاری به حساب آورده شوند و تلاش شود به ارزش پروژه در هر مرحله اضافه شود. اقدامات و رویه در نظر گرفته شده برای این رویکرد پیشنهادی در شکل ۴-۱ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ : رویکرد پیشنهاد شده جهت تعیین مناسب‌ترین ارتفاع پله در معادن روباز

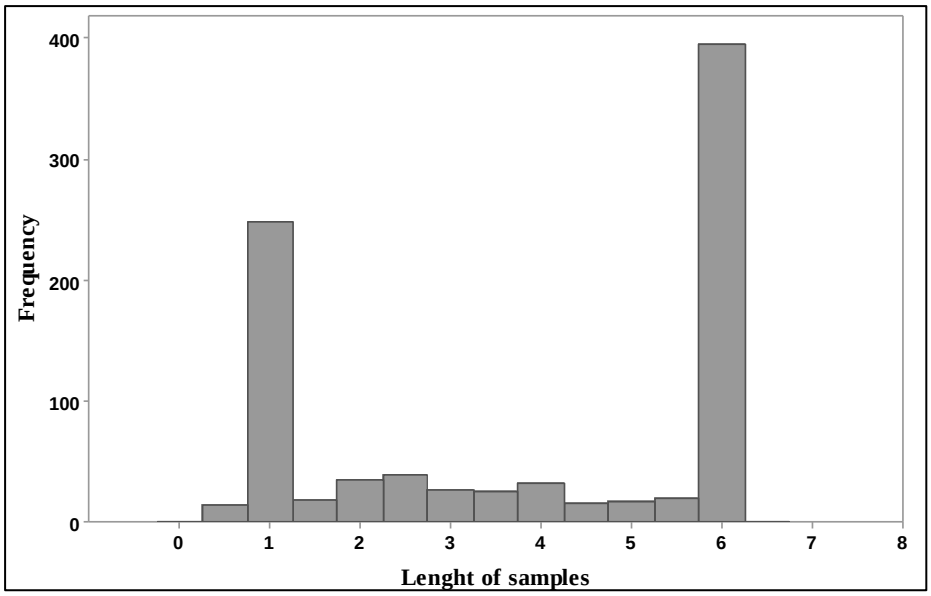
برای درک بهتر رویکرد ارائه شده در این تحقیق، ابتدا بطور ضمنی شرحی از برخی مراحل ارائه شده صورت می‌پذیرد و سپس برای درک بهتر رویکرد پیشنهادی، با استفاده از داده‌های بدست آمده از معدن شماره ۲ گل‌گهر تمامی مراحل قدم به قدم تبیین می‌شوند.

۴-۲-۱- تعیین اهداف پروژه

همانطور که قبلا اشاره، هر پروژه معدنی اهداف و خط مشی خاصی را دنبال می‌کنند. از آنجا که هدف بیشتر معادن افزایش ارزش پروژه‌های معدنی است، بنابراین در این تحقیق، ارتفاع پله‌ای که منجر به بیشترین ارزش خالص فعلی (NPV) پروژه در بلندمدت می‌گردد و اقتصادی‌ترین سناریو ارتفاع پله در بین گزینه‌های مختلف است به عنوان ارتفاع پله مطلوب انتخاب شده است. در این تحقیق، اهداف جانبی دیگری مثل بیشترین انتخابی شدن استخراج از طریق انتخاب تجهیزات مناسب در هر سناریو، بیشترین بازیابی و کمترین ترقیق و افت ماده‌معدنی (با توجه به نمودار تناژ-عیار در هر سناریوی ارتفاع پله) نیز به مراحل انتخاب ارتفاع پله ورود پیدا می‌کنند و مورد بررسی قرار می‌گیرند.

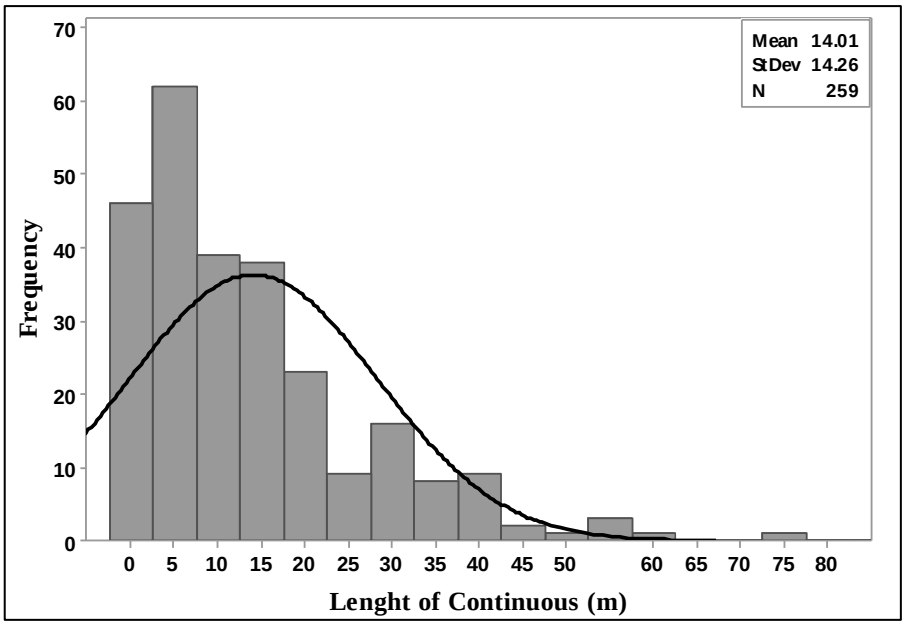
۴-۲-۲- تعیین سناریوهای قابل اجرای ارتفاع پله

جهت تعیین مناسب‌ترین ارتفاع پله (بلوک) در این تحقیق، ابتدا باید بازه‌ای از ارتفاع پله‌هایی که قابلیت اجرا در معدن را دارا هستند، مشخص نمود. کمترین ارتفاع پله قابل اجرا در معدن۲ سنگ آهن گل‌گهر از طریق بررسی طول نمونه‌های عیارسنجی شده تعیین گردید. برای این منظور ابتدا فراوانی‌نمای طول مغزه‌های عیارسنجی شده رسم گردید. همانطور که در شکل ۴-۲ ملاحظه می‌شود، طول ۶ متر به عنوان طولی که بیشترین فراوانی را دارد، به عنوان کمترین طول ارتفاع پله در این معدن تعیین گردید. انتخاب طول کوتاه‌تر از ۶ متر به دلیل اینکه در زمان ساخت نمونه‌های ترکیبی سبب شکسته شدن طول‌های بزرگتر به طول‌های کوچکتر می‌شود، مقداری اثر قطعه‌ای وارد محاسبات می‌کند. بنابراین بهتر است هر نمونه به طول‌های بزرگتر ترکیب شود و برای این منظور حداقل طول ارتفاع پله برابر ۶ متر انتخاب شده است.



شکل ۴-۲ : فراوانی‌نمای طول‌های عیارسنجی شده در معدن ۲ گل‌گهر

مبحث پیوســـتگی عیار و تعیین ضـــخامت ماده‌معدنی نقش مهمی در تخمین ذخایر دارد. درجه پیوستگی عیار در کانسارهای مختلف تابعی از تیپ کانی‌زایی آنها است. برای بیشتر کانسارها (خصوصا کانسارهای لایه‌ای) این پیوستگی در جهات X و Y نسبت به جهت Z از درجه بالاتری برخودار است؛ لذا لازم اســت برای تعیین بیشــترین مقدار ارتفاع پله (بلوک)، درجه پیوســتگی کانســار در جهت قائم (جهت Z) مورد بررسی قرار گیرد و رفتار کانسنگ در جهت ضخامت آن مشخص شود. برای اینکار در هر گمانه با وصل مغزه‌هایی که بطور پیوسته ماده‌معدنی هستند (با توجه به جنس سنگ یا عیارحد از قبل داده شده)، فراوانی‌نمای توزیع این ضخامت‌ها رسم می‌گردد. متوسط ضخامت پیوسته ماده‌معدنی بدست آمده در این حالت، نشان‌دهنده میانگین تناوب تبدیل ماده‌معدنی به باطله است. حداکثر ارتفاع بلوک‌ها (پله‌ها) نباید بیشتر از این مقدار میانگین باشد، چرا که در اینصورت تناوب تبدیل ماده‌معدنی به باطله افزایش یافته و ترقیق بیش از حد رخ می‌دهد. انجام این کار سبب محدود شدن کران بالایی بازه ارتفاع پله‌ها می‌شـــود. بنابراین، حداکثر ارتفاع پله‌ها (بلوک‌ها) نباید از این مقدار فراتر رود زیرا احتمال افزایش تغییرپذیری ماده‌معدنی و باطله را افزایش می‌دهد. همانطور که در شـــکل ۴-۳ و نیز جدول ۴-۱ مشاهده می‌شود، مقدار متوسط ضخامت پیوسته ماده‌معدنی در جهت قایم برای گمانه‌های معدن ۲ گل‌گهر برابر با ۱۴ متر بدست آمده است.



شکل ۴-۳ : توزیع فراوانی داده‌های اولیه طول پیوسته ماده‌معدنی در معدن ۲ گل‌گهر

جدول ۴-۱ : مشخصات آماری داده‌های اولیه طول پیوسته ماده‌معدنی

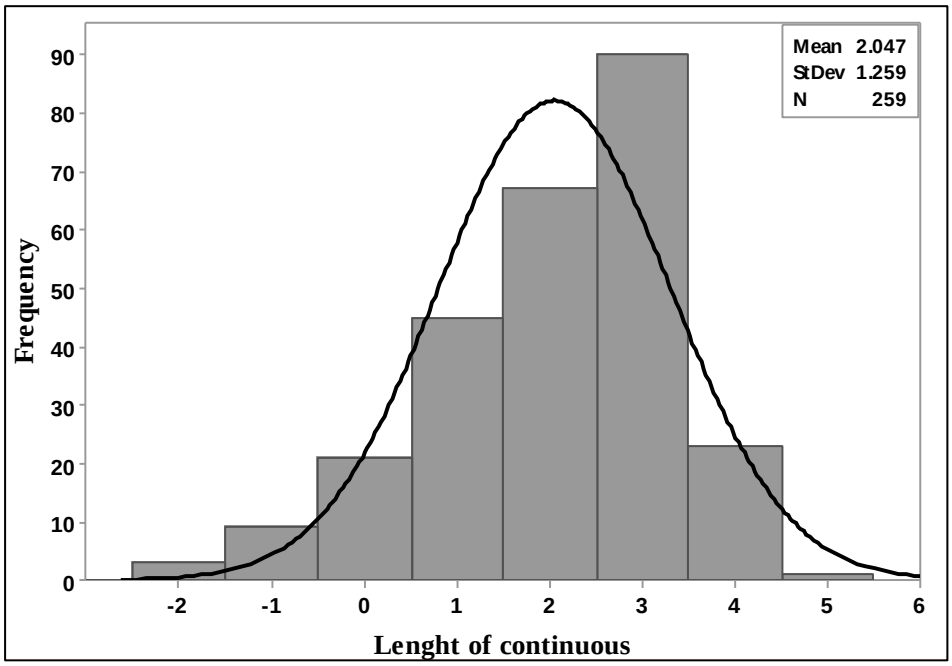
تعداد داده‌ها	میانگین	انحراف معیار	چولگی
۲۵۹	۱۴/۰۱	۱۴/۲۶	۲/۱۵

با توجه به غیر نرمال بودن توزیع طول پیوسته ماده‌معدنی، با استفاده از یک تابع تبدیل لگاریتمی، توزیع داده‌های تبدیل یافته متقارن شده و به توزیع نرمال نزدیک می‌شود. توزیع اینگونه داده ها را توزیع لاگ‌نرمال می نامند. این توزیع با پارامترهای میانگین مقادیر تبدیل یافته (α) و انحراف معیار مقادیر تبدیل یافته (β) مشخص می‌شوند. طبق محاسبات مقدار پارامترهای α و β به ترتیب ۲/۰۴ و ۱/۲۵ بدست می‌آید. اکنون می‌توان مقدار میانگین برای داده‌های اولیه را محاسبه نمود. برای این منظور زمانیکه تعداد داده‌ها زیاد باشد (بیش از ۳۰ داده) از رابطه (۴-۱) استفاده می‌شود:

$$\overline{x} = e^{\alpha + \frac{\beta^2}{2}} \qquad (۴-۱)$$

با توجه به رابطه (۴-۱) ، متوسط طول پیوسته ماده‌معدنی ۱۶/۸ متر بدست می‌آید (شکل ۴-۴).

یعنی به‌طور متوسط هر ۱۶ متر ماده‌معدنی از نوعی پایایی برخودار است ولی با افزایش این رقم احتمال تغییر کانسنگ به باطله افزایش می‌یابد. هر چقدر این عدد بزرگتر باشد، بدان معناست که ماده‌معدنی دارای پیوستگی بیشتری در جهت قائم است. با کمی اغماض، بیشترین مقدار مجاز ارتفاع پله در این معدن ۱۵ متر تعیین می‌شود. تا آنجا که به فرآیند تخمین مربوط می‌شود می‌توان گفت که در چنین شرایطی که پیوستگی در جهت قائم کم است، انتخاب فواصل زیاد در جهت قائم موجب افزایش خطای تخمین می‌شود و ارتفاع بلوک‌های مورد تخمین را نباید از ۱۵ متر بیشتر انتخاب کرد.



شکل ۴-۴ : توزیع فراوانی داده‌های تبدیل یافته طول پیوسته ماده‌معدنی در معدن ۲ گل‌گهر

جدول ۴-۲ : مشخصات آماری داده‌های لاگ‌نرمال طول پیوسته کانسنگ

تعداد داده‌ها	میانگین	انحراف معیار	چولگی
۲۵۹	۲/۰۴	۱/۲۵	-۰/۶

با تعیین کرانه پایینی و بالایی قابل اجرا برای ارتفاع پله در معدن ۲ گل‌گهر، این بازه با طول گام‌های ۳متری تقسیم‌بندی شد و سناریوهای مختلف قابل اجرای ارتفاع پله در این معدن ایجاد گردید.

۴-۲-۳- ساخت مدل بلوکی و تخمین منبع معدنی

فرآیند تخمین منابع معدنی شامل چهار فعالیت و مرحله اصلی است که شامل جمع‌آوری داده‌های علمی زمین‌شناسی[۱]، تهیه (بدست آوردن) مدل، تخمین منبع معدنی و طبقه‌بندی آن است. خروجی بدست آمده باید یک مدل بلوکی سه‌بعدی را تشکیل دهد که در آن الگوی توزیع عیار و مقدار حجم ماده‌معدنی، مشخص شده باشد. به این مدل، مدل بلوکی زمین‌شناسی[۲] گفته می‌شود. ابعاد این بلوک‌ها بر اساس نوع تجهیزات و همچنین حجم فعالیت‌های اکتشافی و فاصله نقاط داده‌ها تعیین می‌گردد (خالوکاکایی، ۱۳۹۱). با فرض چهار سناریو قابل اجرا برای ارتفاع پله (ارتفاع پله‌های ۶، ۹، ۱۲ و ۱۵ متری)، مدل زمین شناسی برای هر سناریو طبق اطلاعات اکتشافی و زمین شناسی بدست آمده از پیکره‌معدنی ایجاد می‌گردد. از ارتفاع پله‌های در نظر گرفته شده در هر سناریو برای ساخت نمونه‌های ترکیبی (کامپوزیت شده) و تخمین استفاده گردید.

۴-۲-۴- رسم منحنی‌های عیار-تناژ

جهت بررسی و شبیه سازی میزان بازیابی، ترقیق و افت استخراجی که در طول مرحله بارگیری در هر سناریو ممکن است رخ دهد، به کمک نرم‌افزار کامپیوتری، مدل بلوکی زمین‌شناسی بدست آمده از هر سناریو بلوک‌بندی مجدد می‌شود و توزیع عیار و سایر مشخصات دیگر در ابعاد جدید منظم می‌گردند. مدل بدست آمده در این مرحله را اصطلاحا مدل استخراجی[۳] می‌نامند. مدل استخراجی شامل بلوک‌های همگن شده‌ای[۴] است که هر یک نماینده واحد استخراج انتخابی[۵] (SMU) است. یک واحد استخراج انتخابی، حجمی از مواد است که تصمیم‌گیری می شود آیا باید باطله بحساب آید یا ماده‌معدنی. در این تحقیق ابعاد SMU در هر سناریو فقط با توجه به ارتفاع پله تغییر می‌کنند و برای

---

[۱] geo-scientific data collection
[۲] geological model
[۳] Mining model
[۴] homogenized blocks
[۵] Selective Mining Unit (SMU)

هر سناریوی ارتفاع پله از مدل بلوکی ایجاد شده در آن ارتفاع پله (با طول کامپوزیت برابر آن ارتفاع پله) استفاده می شود. منحنی‌های عیار و تناژ بدست آمده در هر سناریو بیانگر میزان منبع معدنی و میزان بازیابی قابل دستیابی استخراج است.

۴-۲-۵- ساخت مدل اقتصادی

یک پروژه معدنی نیاز به هزینه‌های سرمایه‌گذاری گسترده از جمله تجهیزات، زیرساخت‌ها، خدمات، کارخانه تغلیظ و فرآوری و ... دارد. با این حال در این تحقیق، ارزیابی اقتصادی در سناریوهای مختلف فقط شامل سرمایه موردنیاز برای خرید ناوگان حفاری، باربری و بارگیری است. دوباره تاکید می‌شود که هدف از این تحقیق امکان‌سنجی اقتصادی کامل پروژه نیست بلکه قصد مقایسه سناریوهای مختلف ارتفاع پله و مزایای ناشی از انتخاب درست تجهیزات با توجه به اهداف مدنظر را دارد. با توجه به اینکه برای دستیابی به حداکثر انتخابی شدن استخراج در هر سناریو، باید از مناسب‌ترین ماشین‌آلات استفاده کرد، بنابراین هزینه سرمایه‌ای لازم جهت خرید تجهیزات بارگیری و باربری و چالزنی در هر سناریو متفاوت خواهد بود. البته فرض شده که مابقی هزینه‌های سرمایه‌گذاری‌های دیگر با توجه به ثابت بودن تولید سالیانه برای تمام سناریوها یکسان و یک اندازه باشد؛ در نتیجه این سرمایه‌گذاری‌ها تاثیری در مقایسه ندارند. استهلاک دارایی‌های سرمایه‌گذاری شده با توجه به عمر آن در طول مدت بهره‌برداری مربوط به هر سناریو محاسبه می‌شود. تعویض تجهیزات بدون هیچ سودی ناشی از فروش آن‌ها انجام می‌شود و ارزش بازماند صفر فرض می‌شود.

هزینه‌های عملیاتی و نگهداری[1] طبق اصول ابتدایی و با توجه به اطلاعات پروژه‌های مشابه و قیمت‌های شرکت‌های پیمانکاری محاسبه شده است که در جدول ۴-۳ نشان داده شده است. این هزینه‌های عملیاتی شامل هزینه‌های بارگیری، باربری، حفاری، انفجار و هزینه‌های ثانویه است و برای هر ارتفاع پله‌ای بطور جداگانه محاسبه خواهد شد. به خاطر استفاده از اندازه جام‌های یکسان (مشابه)

[1] Operating and maintenance costs

برای هر یک از انواع ماشین‌آلات بارگیری، فرض شد که از کامیون‌های باربری مشابه و یکسانی در تمامی سناریوها استفاده خواهد شد که فقط در تعداد تفاوت دارند. در عمل انتخاب دستگاه بارگیری و هزینه‌های عملیاتی رابطه بسیار نزدیکی با یکدیگر دارند. نیروی انسانی[1] مورد نیاز با توجه به تعداد کامیون باربری، شاول و دکل حفاری مورد نیاز در هر سناریو محاسبه و برآورد گردید.

جدول ۴-۳ : هزینه‌های عملیاتی محاسبه شده برای سناریوهای ارتفاع پله

هزینه‌های عملیاتی	توضیحات
هزینه‌های بارگیری	
سایر هزینه‌ها	
باربری	بر اساس نرخ تولید شاول
ثانویه	بر اساس ارتفاع پله‌ها
حفاری و انفجار	بر اساس طراحی و الگوی انفجار*

*طراحی انفجار برای هر ارتفاع پله صورت گرفت که در پیوست آورده شده است

سپس با ایجاد جدول جریان نقدینگی تنزیل‌یافته، ارزش فعلی خالص (NPV) برای هر یک از سناریوهای ارتفاع پله بدست می‌آید و می‌توان این سناریوها را با یکدیگر مقایسه کرد و اقتصادی‌ترین ارتفاع پله را پیشنهاد کرد.

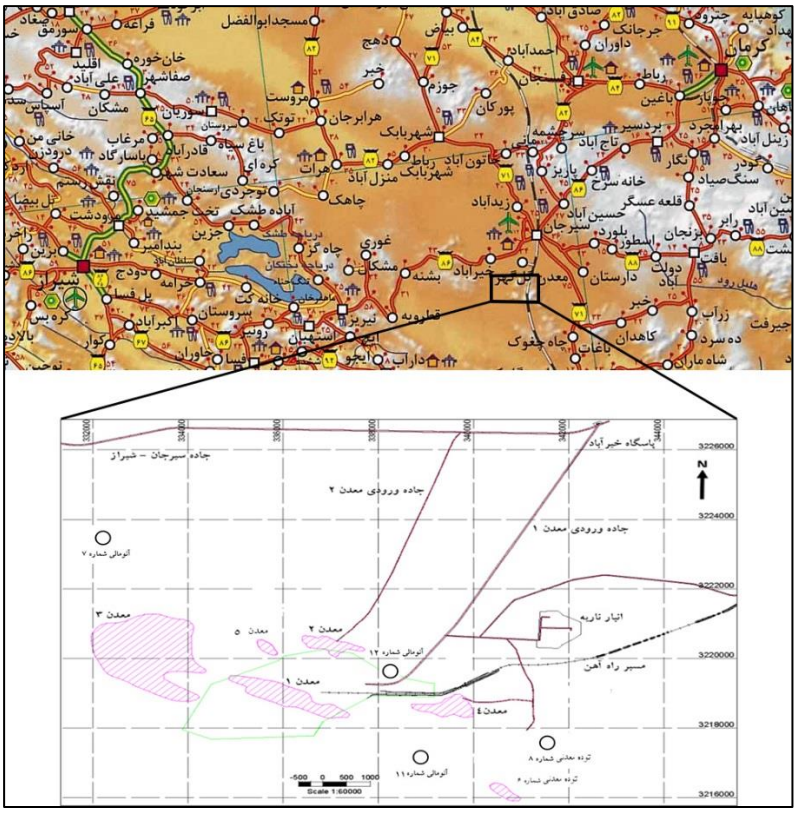
۴-۳- معرفی کانسار شماره ۲ گل‌گهر

در این تحقیق به منظور بررسی رویکرد ارایه شده در انتخاب اقتصادی‌ترین ارتفاع پله در معادن روباز از داده‌های اکتشافی معدن ۲ سنگ آهن گل‌گهر استفاده شده است. مجموعه معادن سنگ‌آهن گل‌گهر یکی از ذخایر عمده سنگ‌آهن ایران است که در فاصله ۵۰ کیلومتری جنوب غرب شهر سیرجان دراستان کرمان واقع شده است. این مجموعه شامل ۶ معدن مجزای سنگ‌آهن است که به استثناء معدن ۶، فعالیت استخراج در سایر معادن در حال انجام می‌باشد. معدن ۲ سنگ آهن گل‌گهر یکی از شش معدن سنگ‌آهن این ناحیه بوده که تقریبا در فاصله ۱/۲ کیلومتری شمال معدن ۱ قرار

[1] Manpower

دارد. این معدن در طول جغرافیائی ″۵۵ ′۲۴ ۵۵ و عرض جغرافیائی ″۲۹ ′۲۹۰۷ واقع شـــده اســـت. این مجموعه از دیدگاه زمین ساختی در جنوب شرق زون سنندج - سیرجان قرار گرفته است. شکل ۴-۵ موقعیت معدن ۲ گل‌گهر را بر روی عکس ماهواره‌ای نشان می‌دهد (کوشا معدن، ۱۳۹۴).

شکل ۴-۵ : موقعیت معدن از روی نقشه هوایی



شکل ۴-۶ : راه‌های دسترسی به معدن ۲ گل‌گهر

راه ارتباطی معدن شماره ۲ گل گهر، جاده آسفالته سیرجان– شیراز است که بعد از طی ۴۴ کیلومتر در جاده آسفالته بعد از پاسگاه خیرآباد یک راه فرعی آسفالته درجه ۲ به طرف جنوب تا معدن شماره ۲ ادامه می یابد (شکل ۴-۶). ارتفاع متو سط توپوگرافی معدن از سطح دریا ۱۷۴۰ متر است. نزولات بارانی کم (میانگین سالیانه ۱۲۰ میلیمتر) و تبخیر سالیانه زیاد (در حدود ۲۰۰۰ میلیمتر) بیانگر آب و هوای کویری این ناحیه است که تأمین آب تأسیسات معدنی موجود را با مشکل مواجه ساخته است. (کوشا معدن، ۱۳۹۴).

از دیدگاه زمین شناسی، ناحیه معدنی گل‌گهر به طور کامل در بخش جنوب شرقی پهنه سنندج - سیرجان قرار گرفته ا ست (شکل ۴-۷). روند عمومی این زون شمال غرب – جنوب شرق می‌با شد. زون سنندج – سیرجان باریکه‌ای از جنوب غرب ایران مرکزی است که در بلافصل شمال شرق راندگی اصلی زاگرس قرار دارد. در این زون پدیدهای دگرگونی، ماگماتیسم و فرآیندهای تکتونیکی بسیار زیاد است، از اینرو این زون را ناآرامترین پهنه زمین ساختاری ایران می‌دانند (کوشا معدن، ۱۳۹۴).

شکل ۴-۷ : موقعیت ناحیه معدنی گل‌گهر در زون ساختاری سنندج-سیرجان

۴-۴- زمین‌شناسی عمومی ناحیه گل‌گهر

ناحیه معدنی گل‌گهر عموما از آبرفت‌های عهد حاضر پوشیده شده است و ارتفاعات معدودی که رخنمون دارند، شامل سنگ‌های دگرگونی پالئوزوئیک در جنوب و جنوب غرب و سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک و سنوزوئیک در شرق ناحیه می‌باشد.

سنگ‌های پالئوزوئیک که شامل کمپلکس گل‌گهر می‌با شد، قدیمی‌ترین مجموعه دگرگونی این ناحیه را تشکیل می‌دهد. در محدوده گل‌گهر تنها بخشی از سنگ‌های کمپلکس دگرگونی گل‌گهر رخنمون دارد. بخش تحتانی این کمپلکس شامل تناوبی از گنایس، میکاشیست، آمفیبولیت و کوارتزشیست می‌باشد و بر روی این بخش تناوبی از مرمرهای دولومیتی، میکاشیست، شیست سبز و گرافیت شیست، بدون دگرشیبی قرار گرفته‌اند. این مجموعه به یک واحد مرمری دولومیتی یا کلسیتی ختم می‌شود که در تمام کمربند سنندج- سیرجان بنام کر سفید شناخته می‌شود. قدیمی‌ترین واحد سنگی مجموعه دگرگونی گل‌گهر در منطقه، واحد گرانیت-گنایسی با افق‌های فرعی از شیست و آمفیبولیت است (کوشا معدن، ۱۳۹۴).

با جرم متوسط ۵٪ در پوسته زمین، آهن یکی از فراون‌ترین عناصر پوسته زمین است و می‌توان با سهولت نسبی بیشتری در مقایسه با دیگر فلزات، جدا شود. البته آهن هرگز بصورت یک فلز خالص در طبیعت یافت نمی شود و غالبا بصورت ترکیبات اکسید آهن، کربنات آهن و سولفور آهن مشاهده می‌گردد. غالب ذخایر سنگ آهن دنیا از کانی‌های اکسیدی مثل مگنتیت، هماتیت و اولیژیست، گوتیت و لیمونیت تشکیل شده که در بین آن‌ها ذخایر مگنتیتی، هماتیتی و اولیژیستی به لحاظ اقتصادی جزو کانی‌های صنعتی آهن هستند. رایج‌ترین کانی‌های آهن‌دار[۱] به همراه ترکیب آنها و محتوای آهن هر یک، در جدول ۴-۴ آمده است.

[۱] iron-bearing

جدول ۴-۴ : رایج‌ترین کانی‌های آهن‌دار در طبیعت

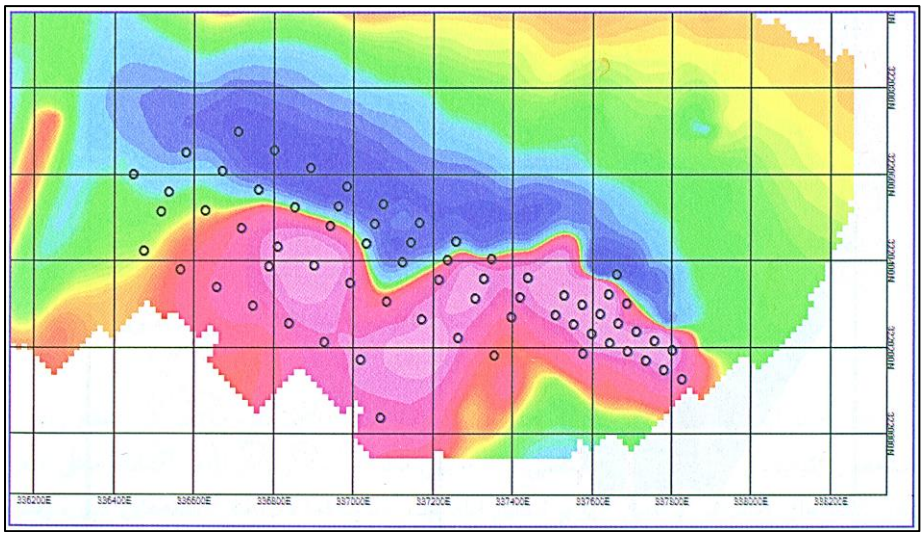
نوع ماده‌معدنی	ترکیب شیمیایی	محتوای فلزی Fe ٪
مگنتیت	$FeO.Fe_2O_3$	٪ ۷۲ Fe
هماتیت	Fe_2O_3	٪ ۷۰ Fe
گوتیت	$FeO.OH$	٪ ۶۱ Fe
لیمونیت	$Fe_2O_3.nH_2O$	٪ ۶۱ Fe
لپیدوکروسیت	$FeO.OH$	٪ ۶۱ Fe
سیدریت	$FeO.CO_2$	٪ ۴۸ Fe
شاموزیت	$3FeO.Al_2O_3.2SiO_2.6H_2O$	٪ ۳۵ Fe

در معدن شماره ۲ گل‌گهر دو نوع ماده‌معدنی شامل مگنتیت با میزان سولفور بالا (کد سنگ ۴۰۲) و مگنتیت با میزان سولفور پایین (کد سنگ ۱۰۱) وجود دارد.

۴-۵- داده‌های گمانه‌های اکتشافی

داده‌های گمانه‌های اکتشافی بدست آمده از معدن شماره ۲ گل‌گهر شامل بانک اطلاعاتی حاصل از نمونه‌گیری‌های مغزه‌ای و پودری است که در ۴ جدول اصلی دسته‌بندی شده است. جدول اول (Header) شامل نام گمانه‌ها، موقعیت دهانه گمانه‌ها و طول گمانه‌هاست. جدول دوم (Survey) شامل اطلاعات آزیموت و شیب گمانه‌ها برای گمانه‌های شیبدار است. جدول سوم (Assay) شامل اطلاعات عیارسنجی میزان کل آهن (Fe٪)، میزان آهن اکسیدی (FeO٪)، گوگرد (S٪) و فسفر (P٪) است. اطلاعات جدول چهارم (Lithology) نیز شامل جنس سنگ‌ها و کد سنگ‌ها در فواصل گمانه‌هاست. در مجموع این اطلاعات برای ۱۵۱ حلقه گمانه اکتشافی ثبت شده است.

طراحی شبکه حفاری بر مبنای نقشه‌های مگنتومتری صورت گرفت. این داده‌ها در مراحل و سال‌های مختلف جمع‌آوری شده است. به عنوان مثال، در مرحله اول حفاری اکتشافی که توسط شرکت گرانگز در دهه پنجاه شمسی انجام شد، حفاری‌ها بر روی یک شبکه منظم به طول ۱۴۰۰ متر و عرض ۵۵۰ متر و با حفر ۴۱ حلقه چاه اکتشافی در فواصل ۱۰۰متری (و گاهی تا ۲۰۰*۱۵۰ متر) انجام گرفته است و در مجموع ۷۴۴۵/۲ متر حفاری انجام شده است (کوشا معدن، ۱۳۹۴).



شکل ۴-۸ : طراحی شبکه حفاری اکتشافی تفصیلی در معدن شماره ۲ گل‌گهر با توجه به نقشه‌های مگنتومتری

با انجام مراحل بعدی اکتشاف در سال‌های بعد، نتایج کل حفاری‌های صورت گرفته در تمام مراحل اکتشاف به صورت خلاصه در جدول ۴-۵ ارائه شده است.

جدول ۴-۵ : خلاصه‌ای از حفاری‌های انجام شده طی مراحل مختلف اکتشاف توده معدنی ۲ گل‌گهر

مرحله حفاری	تعداد گمانه	متراژ کل گمانه	متراژ آبرفت	متراژ باطله	متراژ سنگ آهن
مرحله اول	۴۱	۷۴۴۵/۸	۴۵۵۶/۹	۱۸۵۱/۶	۱۰۳۷/۳
مرحله دوم	۲۳	۳۱۴۸/۱۲	۹۳۷/۹	۱۶۰۶/۷۲	۶۰۳/۵
مرحله سوم	۱۲	۱۴۲۱	۷۶۰	۴۶۸	۱۹۳
مرحله چهارم	۷۵	۱۱۸۱۶/۹۲	۵۷۷۳/۸	۴۵۳۵/۹۶	۱۵۰۷/۱۶
مجموع	**۱۵۱**	**۲۳۸۳۱/۸۴**	**۱۲۰۲۸/۶**	**۸۴۶۲/۲۸**	**۳۳۴۰/۹۶**

از این تعداد گمانه، تنها ۱۱۲ گمانه حاوی ماده‌معدنی ا ست و مابقی گمانه‌ها در باطله حفر شده است. در ادامه از نرم‌افزار Geovia Gemcom برای ورود اطلاعات و ساخت مدل بلوکی کانسار و انجام مراحل تخمین استفاده شده است. لازم به ذکر است متغیر ناحیه‌ای در نظر گرفته شده در این تحقیق فقط میزان کل آهن (Fe٪) است.

۴-۶- ساخت مقاطع زمین‌شناسی و فضای تخمین

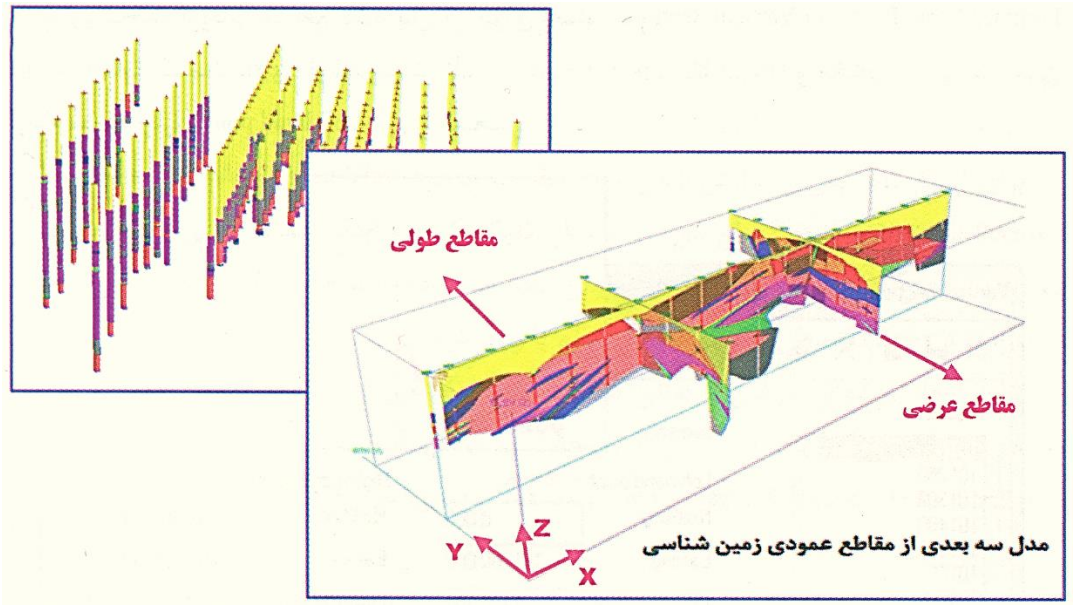
قبل از ساخت مدل بلوکی زمین شناسی و به منظور کنترل فرآیند تخمین، لازم است فضایی به نام فضای تخمین[۱] تعیین شود. یک ویژگی ذاتی تخمین کریجینگ، مساله هموارسازی تغییرات است؛ یعنی اگر تمامی داده‌ها چه داده‌های ماده‌معدنی و چه باطله، برای تخمین فضای کلی پیکره‌معدنی بکار رود، به دلیل همین خاصیت هموارسازی کریجینگ، داده‌های باطله باعث کاهش عیار بلوک‌های ماده‌معدنی و داده‌های ماده‌معدنی منجر به افزایش عیار بلوک‌های باطله می‌شود. پیامد این امر ممکن است به تخمین حداکثر تناژ و تخمین حداقل عیار بیانجامد و روابط عیار-تناژ را از حالت واقعی آن دور سازد. لذا برای مقابله با این مشکل قبل از مرحله تخمین عیار و ساخت مدل زمین شناسی، لازم است تا محدوده‌ای در فضا که تخمین باید در آن صورت بپذیرد، مشخص شود. این فضا باید بگونه‌ای انتخاب شود که بخش عمده آن در برگیرنده ماده‌معدنی با شد (حسنی پاک، ۱۳۸۰). از منظر فرآیند تخمین بهترین محدوده برای فضای تخمین، محدوده‌ای است که در آن باطله به حداقل مقدار ممکن رسیده باشد. ساخت فضای تخمین معمولا به دو روش صورت می‌گیرد. روش اول ساخت فضای تخمین با استفاده از اطلاعات فایل عیارسنجی داده‌های اکتشافی است. روش دوم ساخت فضای تخمین با استفاده از داده‌های زمین شناسی (لیتولوژی) نظیر جنس سنگ است. روش دوم از دقت بیشتری برخودار است زیرا به عیارحد بکار رفته حساس نیست. البته در اینجا لازم است که به این نکته اشاره شود که فضای تخمین را نباید با قسمتی از پیکره‌معدنی که عیار آن بیشتر از عیارحد است اشتباه گرفت، بلکه این فضا نه تنها شامل بخش اقتصادی ذخیره است بلکه شامل قسمت‌هایی از عیارهای نزدیک به حداقتصادی و نیز قسمت‌های کم عیارتر است و همچنین ممکن است شامل دایک‌های بی‌ارزش که در بین زون کانی‌زایی واقع شده‌اند نیز باشد. در این تحقیق از روش دوم برای ساخت فضای تخمین و مدل بلوکی زمین‌شناسی استفاده شده است.

---

[۱] Estimation Space

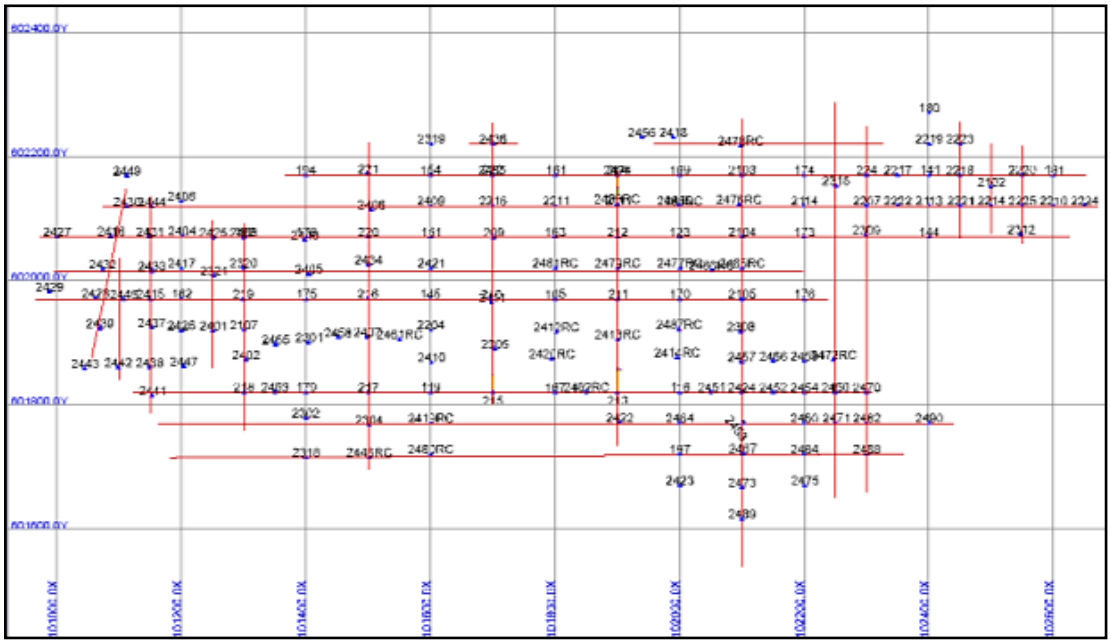
برای مدل سازی سه بعدی یک کانسار، ابتدا باید مقاطع زمین شناسی با استفاده از گمانه‌های اکتشافی ترسیم شوند. ساخت این مقاطع یک فرآیند کاملا تخصصی و زمان‌بر است. نداشتن تجربه کافی و یا عدم دقت در زمان رسم مقاطع زمین شناسی به دلیل نداشتن دید کافی نسبت به وضعیت نواحی زمین‌شناسی و تکتونیک منطقه، نحوه تشکیل و ژنز کانسار، در نظر نگرفتن اثر گسل‌های موجود در منطقه و... علاوه بر ایجاد خطا در تعیین میزان ذخیره ماده‌معدنی، می‌تواند منجر به خطا در شکل سه‌بعدی پیکره‌معدنی شود.

در شبکه‌های حفاری اکتشافی منظم، مقاطع عرضی و طولی در جهت قایم و به موازات یکدیگر و در امتداد هر ردیف از گمانه‌ها ایجاد می‌شود. اما در شبکه‌های حفاری نامنظم که به دلیل وضعیت توپوگرافی منطقه یا دلایل دیگر امکان حفر گمانه‌ها در یک راستا وجود نداشته، مقاطع قایم به صورت نامنظم و به نحوی تعریف می‌شوند که هر مقطع بتواند بیشترین تعداد ممکن از گمانه‌ها را پوشش دهد. هر چه تعداد مقاطع قایم زمین‌شناسی بیشتر و نزدیکتر به یکدیگر باشند، تفسیر بهتری از مدل سه‌بعدی کانسار ساخته خواهد شد و به شکل واقعی آن نزدیک‌تر است. شکل ۴-۹ نمونه‌ای از مقاطع قائم زمین‌شناسی رسم شده در یک کانسار را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۹ : نمونه‌ای از مقاطع قائم زمین‌شناسی جهت مدلسازی پیکره‌معدنی (مجیدزاده، ۱۳۹۴)

در شکل ۴-۱۰ موقعیت مقاطع قائم ترسیم شده برای معدن شماره ۲ گل‌گهر نشان داده شده است. فضای تخمین با استفاده از یک سری پلیگون‌های زمین‌شناسی بر مبنای جنس سنگ‌ها ایجاد شده است.



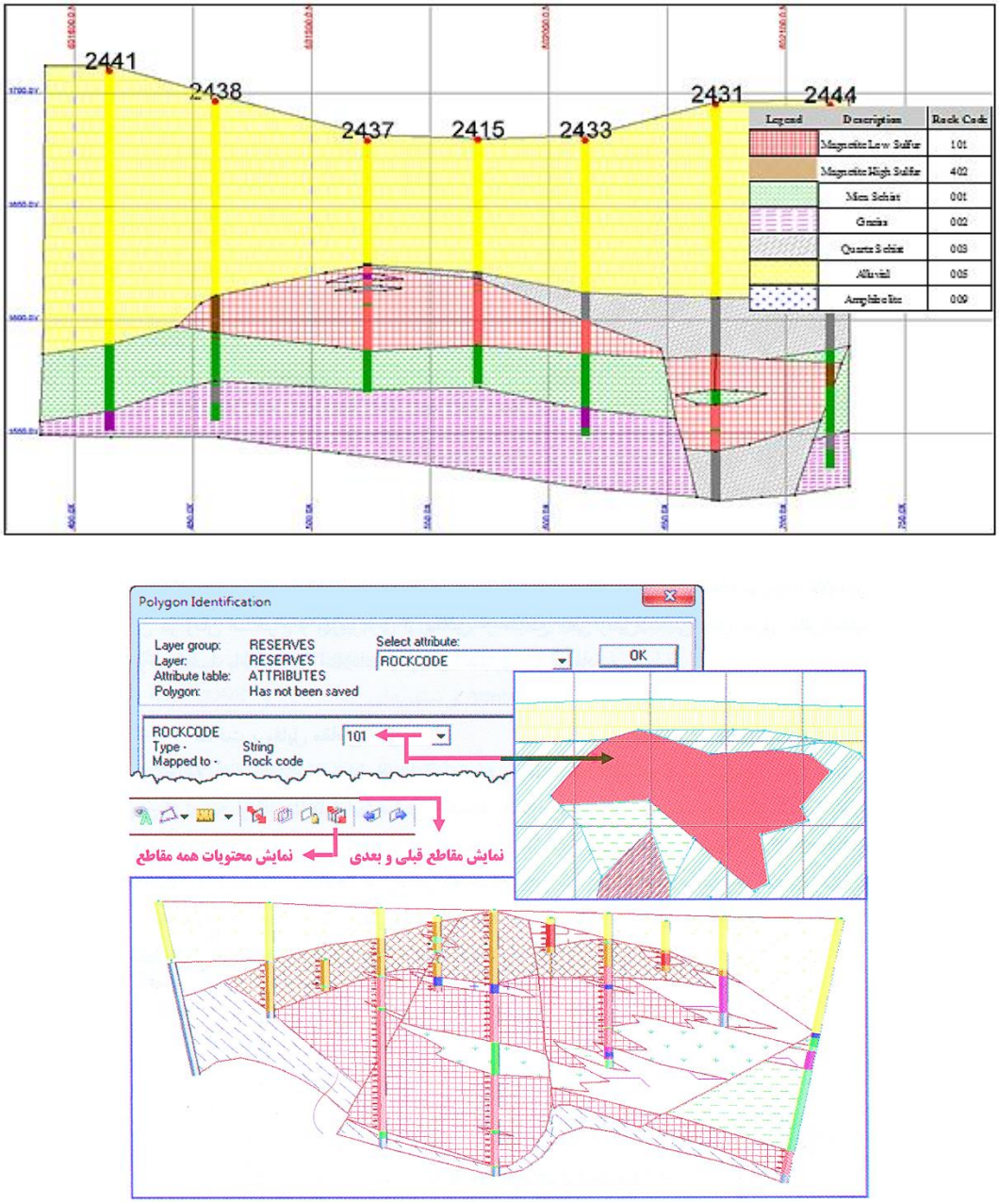
شکل ۴-۱۰ : موقعیت مقاطع قائم زمین‌شناسی ترسیم شده در معدن ۲ گل‌گهر

به هر جنس سنگ در نرم‌افزار یک کد سنگی اختصاص داده شده است. جدول ۴-۶ کدهای سنگی برای جنس سنگ‌های مختلف در معدن ۲ گل‌گهر را نشان می‌دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، ماده‌معدنی شامل دو جنس سنگ با کدهای ۱۰۱ و ۴۰۲ است و سایر کدهای سنگی مربوط به باطله است.

جدول ۴-۶ : کد سنگ‌های تخصیص داده شده در نرم افزار

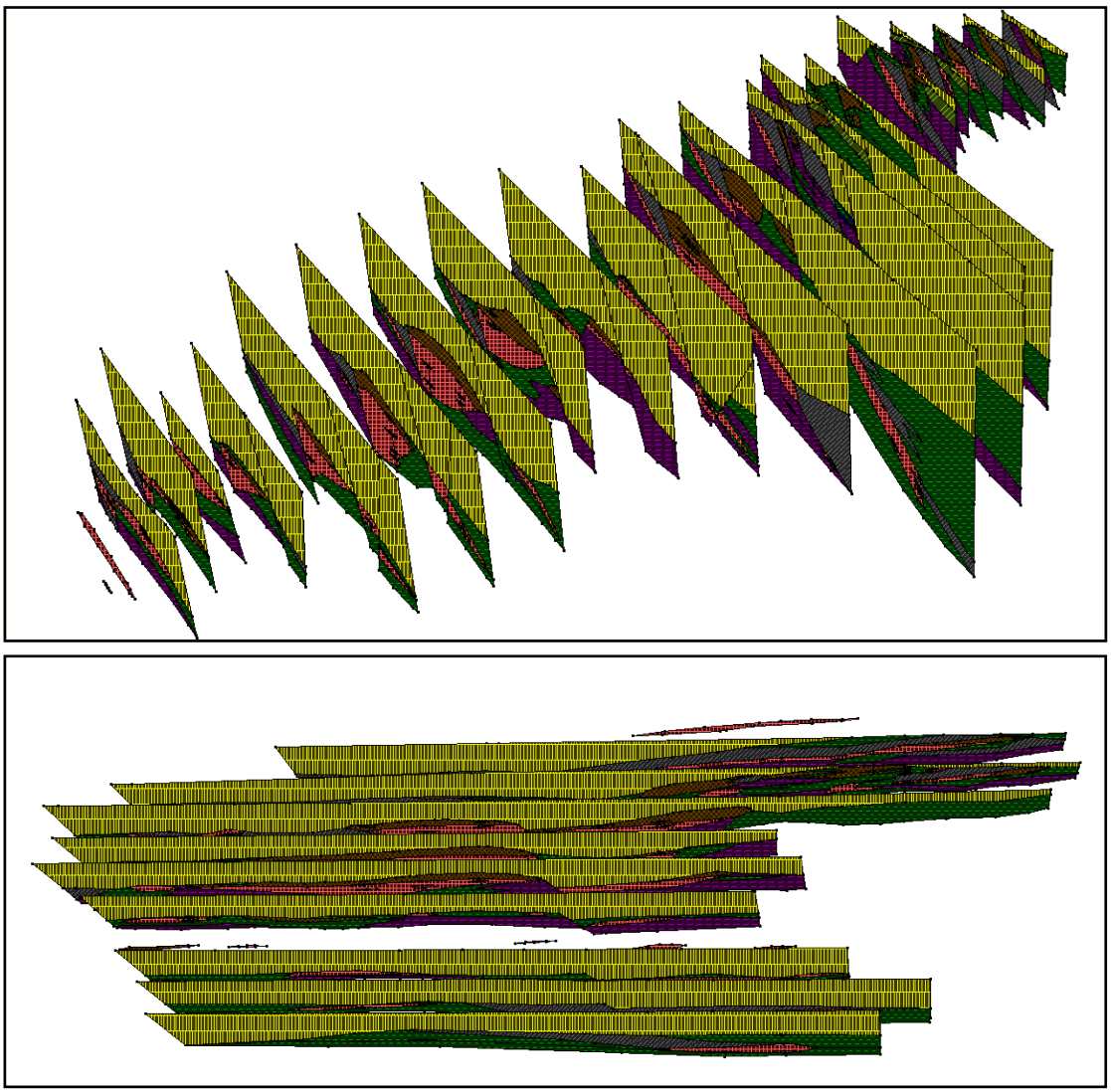
کد سنگ	توصیف جنس سنگ	نوع نمایش
101	Magnetite Low Sulfur	
402	Magnetite High Sulfur	
001	Mica Schist	
002	Gneiss	
003	Quartz Schist	
005	Alluvial	
009	Amphibolite	

در ادامه با ساخت پلیگون‌های زمین‌شناسی از روی هر جنس سنگ در مقاطع قایم، مقاطعی مانند شکل ۴-۱۱ تولید می‌شود.



شکل ۴-۱۱ : پلیگون‌های رسم شده بر روی یکی از مقاطع قائم زمین‌شناسی در معدن ۲ گل‌گهر (مجیدزاده، ۱۳۹۴)

در نهایت پس از رسم پلیگون‌های زمین‌شناسی برای تمامی مقاطع (چه عرضی و چه طولی)، شکل نهایی این مقاطع به‌صورت شکل ۴-۱۲ در می‌آیند. برای پیکره‌معدنی معدن ۲ گل‌گهر ۲۱ مقطع عرضی و ۱۰ مقطع طولی ساخته شده است.



شکل ۴-۱۲ : نمایی از پلیگون‌های زمین‌شناسی رسم شده روی مقاطع عرضی و طولی در معدن ۲ گل‌گهر

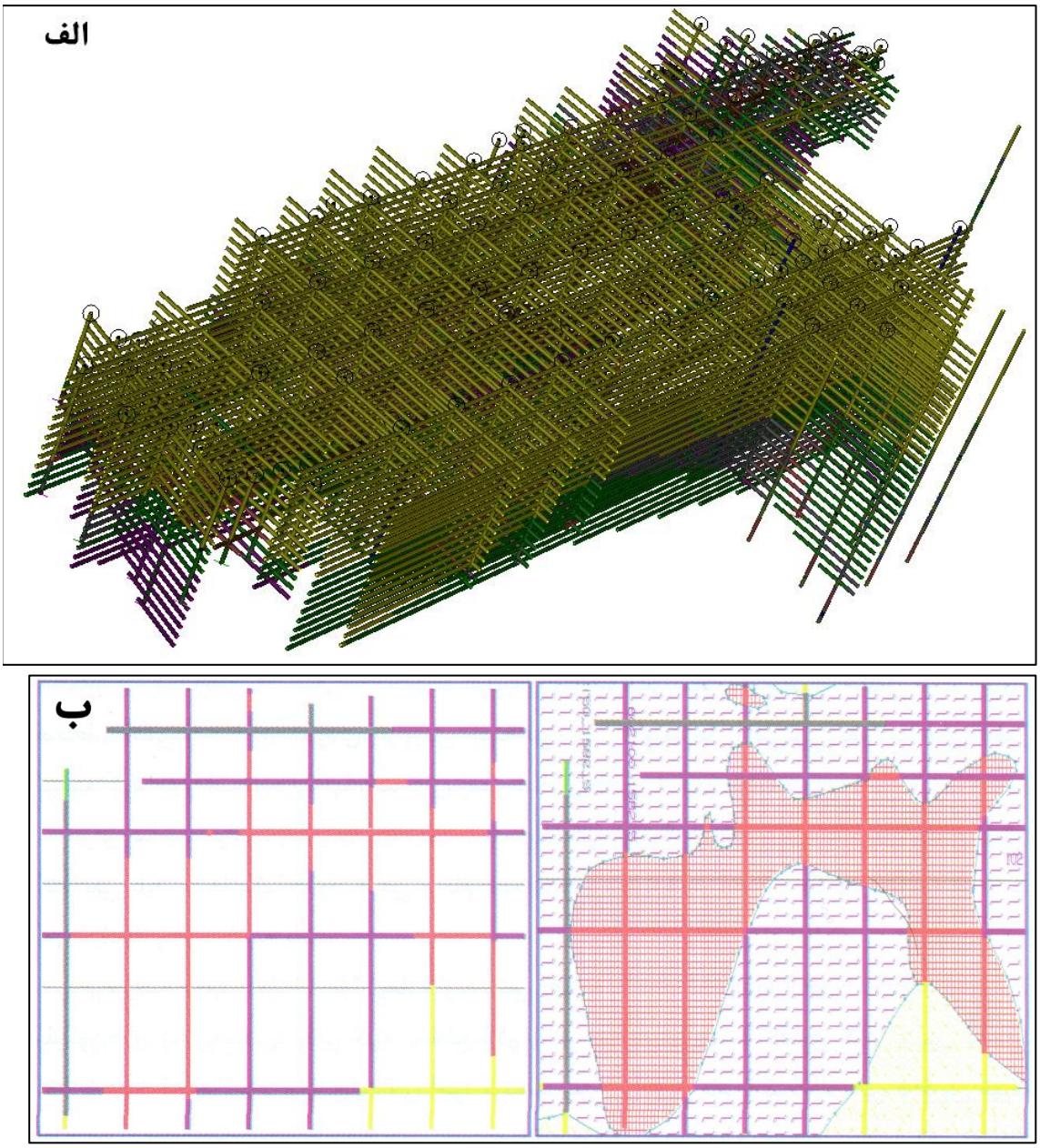
هنگامی‌که پلیگون‌های زمین شنا سی برای تمامی مقاطع قایم (هم طولی و هم عر ضی) ساخته شد، نوبت به ساخت مدل سه‌بعدی و حجیم از پیکره‌معدنی می‌رسد. از این مرحله به بعد دو روش قابل اجراست. اولین روش آن است که با اتصال پلیگون‌های زمین‌شناسی در تمامی مقاطع قائم به یکدیگر توسط خطوط بسته Tie lines، یک مدل تور سیمی از پیکره‌معدنی ساخته شود و سپس از روی آن مدل سه‌بعدی و حجیم پیکره‌معدنی ایجاد گردد. اگر به دلیل پیچیدگی های زمین‌شناسی (نظیر چین‌خوردگی، گسل‌های فراوان، نفوذ دایک‌های زیاد و...) امکان ساخت مدل تورسیمی وجود نداشته باشد و یا ساخت آن بسیار وقت گیر و کم‌دقت باشد، روش دوم جهت ساخت مدل سه‌بعدی

پیکره‌معدنی آن است که از مقاطع افقی[1] زمین‌شناسی استفاده شود و به کمک این مقاطع، مدل بلوکی سه‌بعدی پیکره‌معدنی ساخته شود. نحوه انجام این کار به این صورت است که با توجه به ارتفاع پله انتخاب شده اقدام به ساخت یک مقطع افقی در هر تراز استخراجی می‌شود. برای اینکار ابتدا یک ارتفاع به عنوان ارتفاع مبنا در نظر گرفته می‌شود و از آنجا به سمت پایین به ازای ارتفاع پله استخراجی در نظر گرفته شده یک مقطع افقی تعریف می‌شود. مرکز هر پله به عنوان حد وسط مقطع افقی و لبه پله و پای پله نیز به ترتیب به عنوان حد بالا و پایین مقطع افقی در نظر گرفته می‌شوند. ارتفاع مبنا در این تحقیق برای معدن ۲ گل‌گهر ۱۸۰۰ متر در نظر گرفته شده است. به عنوان مثال برای ارتفاع پله‌ها ۱۵ متری، تعداد ۲۸ مقطع افقی ترسیم شد. اولین مقطع در ارتفاع ۱۳۲۷/۵ و آخرین در ارتفاع ۱۷۳۲/۵ متری با ماده معدنی برخورد کرده است.

برای رسم مقاطع افقی، همانند رسم مقاطع قائم زمین‌شناسی عمل می‌شود با این تفاوت که بجای استفاده از گمانه‌های اکتشافی، از خطوط تراورس[2] استفاده می‌شود. این خطوط از برخورد دادن مقاطع افقی با مقاطع قائم (طولی و عرضی) ساخته می شود. تراورس‌ها را می‌توان به گمانه‌های افقی تشبیه کرد که با استفاده از آن‌ها نقشه‌های زمین شناسی افقی را ترسیم می‌شود. مزیت استفاده از خطوط تراورس این است که می‌توان خطاهای احتمالی موجود در مقاطع قائم را اصلاح کند (خطاهایی مانند تغییر جنس سنگ و یا گسل‌ها) و معمولا از دقت بالاتری برخوردارند و در زمانیکه پیکره‌معدنی دارای پیچیدگی‌های زمین شناسی زیادی باشند، نتایج بدست آمده از آن‌ها به واقعیت نزدیک‌تر است. شکل ۴-۱۳ نمونه‌ای از خطوط تراورس (الف) و نحوه ترسیم پلیگون‌های زمین شناسی افقی روی هر مقطع افقی (ب) در ارتفاع پله ۱۵ متری را نشان می‌دهد.

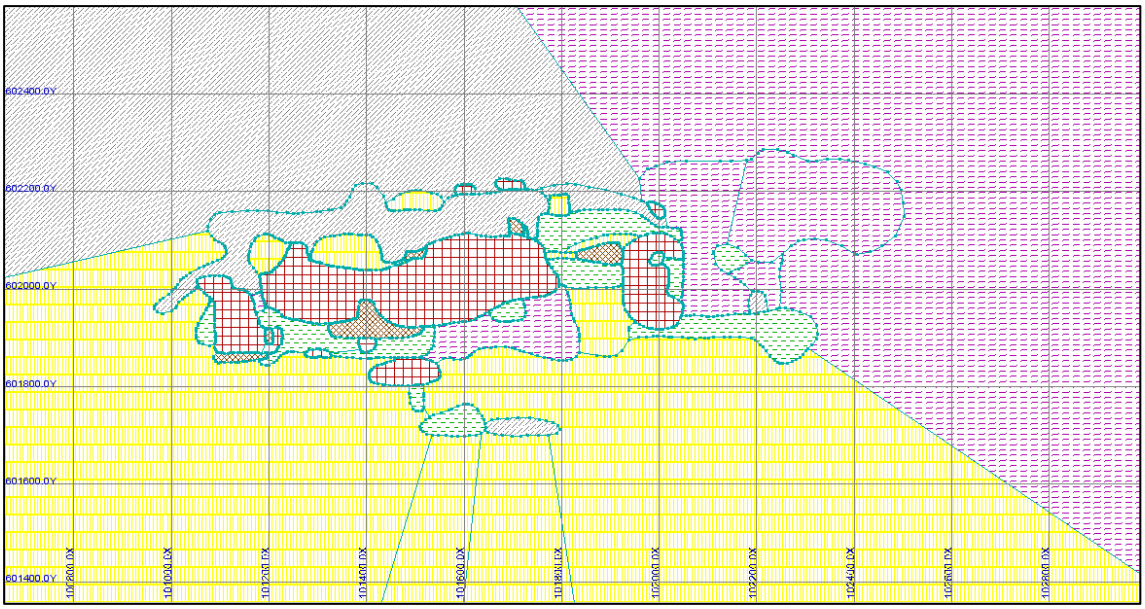
[1] Plan section

[2] Traverse



شکل ۴-۱۳ : الف) نمونه‌ای تراورس رسم شده توسط مقاطع افقی با ارتفاع ۱۵ متر در راستای عمق
ب) نحوه رسم نقشه‌های زمین‌شناسی افقی با استفاده از خطوط تراورس

پس از ساخت پلیگون‌های زمین شنا سی در تمامی مقاطع افقی (پلان‌ها)، در گام بعدی نوبت به ساخت مدل بلوکی و فضای تخمین با استفاده از پلیگون‌های ایجاد شده می‌رسد. شکل ۴-۱۴ نمونه‌ای از پلیگون‌های رسم شده در یک مقطع افقی در تراز ارتفاعی ۱۷۰۹ متر از سطح دریا و در سناریو ارتفاع پله ۶ متری جهت به‌روزرسانی جنس سنگ در مدل بلوکی را نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۴ : نمونه‌ای از پلیگون‌های زمین‌شناسی رسم شده در ارتفاع پله ۶ متری در تراز ارتفاعی ۱۷۰۹

۴-۶-۱- انتخاب ابعاد بلوک‌ها و تهیه مدل بلوکی از فضای تخمین

هرچند مطالعات زیادی درباره انتخاب اندازه بلوک صورت گرفته است (Cai, 1992; Hulse, 1992; Jara et al, 2006; Krige, 2007; Hekmat, Osanloo and Asi, 2008)، اما امروزه انتخاب یک اندازه بلوک برای مدلسازی سه‌بعدی و کامپیوتری از پیکره‌معدنی به عنوان یک روش مقبول پذیرفته شده است. از یک سو هر چه ابعاد بلوک‌های اصلی را کوچکتر در نظر گرفته شود، می‌توان قدرت تفکیک[۱] و تعریف دقیق‌تری از مرزهای ماده‌معدنی و باطله داشت و در نتیجه عیار و میزان ترقیق رخ داده بهتر کنترل می‌گردد و امکان بهبود انتخابی شدن استخراج وجود دارد؛ ولی با کوچکتر شدن ابعاد بلوک‌ها، معمولا واریانس و خطای تخمین عیار (خصوصا در بلوک‌های منفرد) افزایش می‌یابد و قابلیت اعتماد به مدل بلوکی اقتصادی در هنگام بهینه‌سازی پیت کاهش می‌یابد. از سوی دیگر تجربه نشان داده که بطور کلی بلوک‌های بزرگتر، هزینه استخراج کمتری را به دنبال دارند و مدت زمان محاسبات و واریانس تخمین این بلوک‌ها کمتر است، ولی کنترل عیار و ترقیق در آن‌ها دشوارتر است و معمولا سبب از بین رفتن قابلیت استخراج بصورت انتخابی می‌شوند. بنابراین

[۱] Resolution

محدودیت‌هایی در انتخاب ابعاد بلوک‌های اصـــلی وجود دارد. مثلا انتخاب ابعاد افقی بلوک‌ها به حجم کارهای اکتشـــافی صـــورت گرفته و روش تخمین بکار رفته بســـتگی دارد و طبق یک قاعده کلی (Journel and Huijbregts, 1978)، ابعاد افقی بلوک‌ها نباید از $\frac{1}{4}$ فاصـــله متوســـط بین گمانه‌های اکتشـافی کمتر باشـد. البته این قاعده در روش تخمین کریجینگ زمانی صـحت دارد که شـعاع تاثیر واریوگرام کلی تقریبا ۸ تا ۱۰ برابر ابعاد افقی بلوک‌ها باشـد. منطق و دلیلی که پشـت این قاعده وجود دارد این اسـت که اندازه بلوک‌های کوچکتر از این مقدار، سـبب هموارسـازی تصـنعی مدل می‌گردد. بلوک‌های بسیار کوچک که کنار یکدیگر قرار دارند، عیارهای مشابه‌ای را به خود تخصیص می‌دهند که به علت ا ستفاده از نقاط داده‌های م شابه در هنگام تخمین عیار در اطراف این بلوک‌ها ست. اگر شعاع تاثیر واریوگرام کمتر از ۵ برابر ابعاد افقی بلوک‌ها باشد، بهتر است ابعاد بلوک‌ها را نصف متوسط فاصله گمانه‌های اکتشـــافی انتخاب کرد. همچنین اندازه بلوک‌های بســـیار بزرگ نســـبت به شـــبکه داده‌های گمانه‌ای نخواهد توانســـت بطور کامل از دقت تفکیک ناشـــی از داده‌های گمانه‌ای بهره ببرد. با توجه به مطالب گفته شد، بطور کلی می‌توان ابعاد بلوک‌های اصلی را با توجه به شرایط زیر انتخاب کرد :

۱- نحوه گسترش ماده‌معدنی در بخش‌های مختلف : که بر اساس ساختار ذخیره مشخص شده است و چنانچه ماده‌معدنی بصورت هم‌بعد گسترش داشته باشد (ایزومتریک باشد)، می‌توان ابعاد افقی بلوک‌ها را مربعی در نظر گرفت. اما توصـــیه می‌شـــود با وجود ناهمســـانگردی در کانسار (که با ر سم وریوگرام جهتی و یا بیضوی ناهم سانگردی بد ست می‌آید) باز هم ابعاد افقی بلوک‌ها در سطحی مربعی انتخاب گردند.

۲- پیوستگی ماده‌معدنی و ضخامت آن : با توجه به اینکه ضخامت قائم (ارتفاع) بلوک‌ها معمولا زیاد اســـت، لذا تبدیل ماده‌معدنی به باطله و یا باطله به ماده‌معدنی نباید در راســـتای قایم بلوک‌ها وجود داشته باشد و یا باید حداقل باشد. بنابراین مقدار متوسط از ضخامت پیوستگی قائم ماده‌معدنی در تعیین ارتفاع بلوک‌ها موثر است.

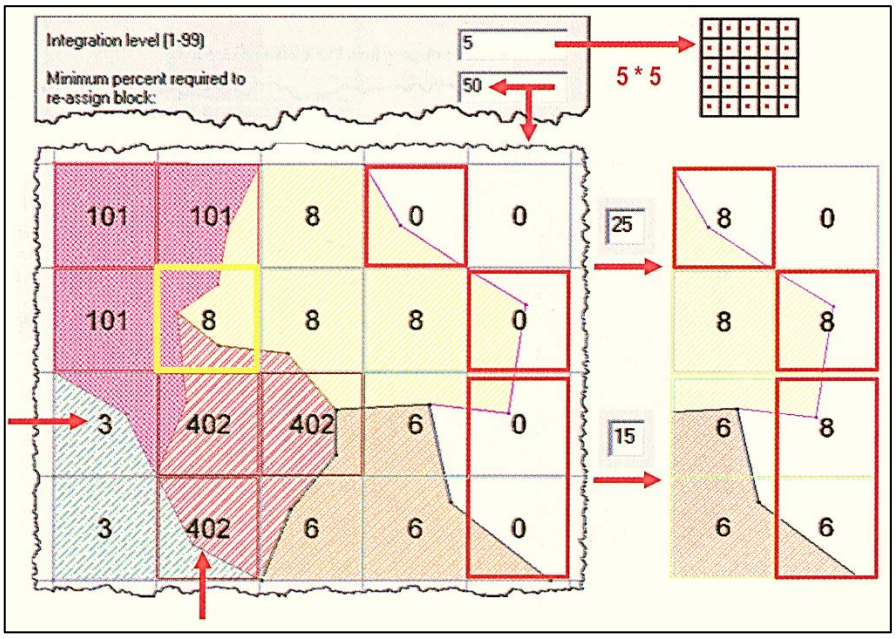
۳- شرایط طراحی معدن و پله‌های ا ستخراجی : که در مرحله طراحی و با توجه به نوع و اندازه تجهیزات و تطابق بین آن‌ها مشخص می شود. ابعاد افقی هم طوری انتخاب می شود تا زاویه شیب رعایت شود.

۴- حجم عملیات اکت شافی و متو سط فا صله گمانه‌ها : در صورت نامنظم بودن آرایش گمانه‌ها، جهت تعیین متوسط فاصله بین گمانه‌ها ابتدا باید فراوانی‌نمای فاصله بین آنها رسم می‌شود. در این تحقیق با توجه به شعاع تاثیر بدست آمده از مدل وریوگرام که در بخش‌های بعدی به آن اشاره شده است و قاعده کلی گفته شده در بالا و نیز از آنجایی که آرایش شبکه حفاری تقریبا منظم بوده و فا صله گمانه‌ها از یکدیگر نزدیک به ۵۰ متر ا ست، بنابراین ابعاد افقی بلوک‌های اصلی در معدن ۲ گل‌گهر برابر با ۱۰m×۱۰m در نظر گرفته شده است.

پس از آماده کردن ساختار اولیه مدل بلوکی (اندازه بلوک‌ها و تعداد در هر جهت و ...)، دومین قدم در مدلسازی فضای تخمین یا ساخت مدل بلوکی جنس سنگ است. هدف از ساخت مدل بلوکی بر اساس جنس سنگ، تعیین محدوده گسترش پیکره‌معدنی، تعیین نحوه تداخل و مرز بین باطله و ماده‌معدنی، تعیین جنس سنگ هر یک از بلوک‌ها و مشخص کردن شکل سه‌بعدی پیکره‌معدنی است. با تعیین جنس سنگ هر بلوک، سایر پارامترهای مدل سازی نظیر مدل سازی توزیع عیاری، مدل سازی وزن مخصوص و مدلسازی اقتصادی بر ا ساس این اطلاعات نوع جنس سنگ بلوک‌ها تعیین می شود. فضای تخمین عیاری در اینجا فقط شامل بلوک‌های ماده‌معدنی است که جنس سنگ آن‌ها از نوع ماده‌معدنی است.

در نرم‌افزار Gems ساخت ف ضای تخمین و مدل سازی جنس سنگ‌ها با ا ستفاده از پلیگون‌های زمین‌شناسی رسم شده در مقاطع افقی انجام می‌گیرد. فواصل مقاطع افقی در هر سناریوی ارتفاع پله، متناظر با ارتفاع پله در نظر گرفته شده در آن سناریو ترسیم گردیده است. سپس مدل بلوکی اولیه در هر سناریو، تو سط پلیگون‌های زمین شنا سی ر سم شده در مقاطع افقی به روزر سانی می شود و مدل بلوکی بر اساس جنس سنگ که همان فضای تخمین مورد نظر است، ایجاد می‌شود. رویه بکار رفته در

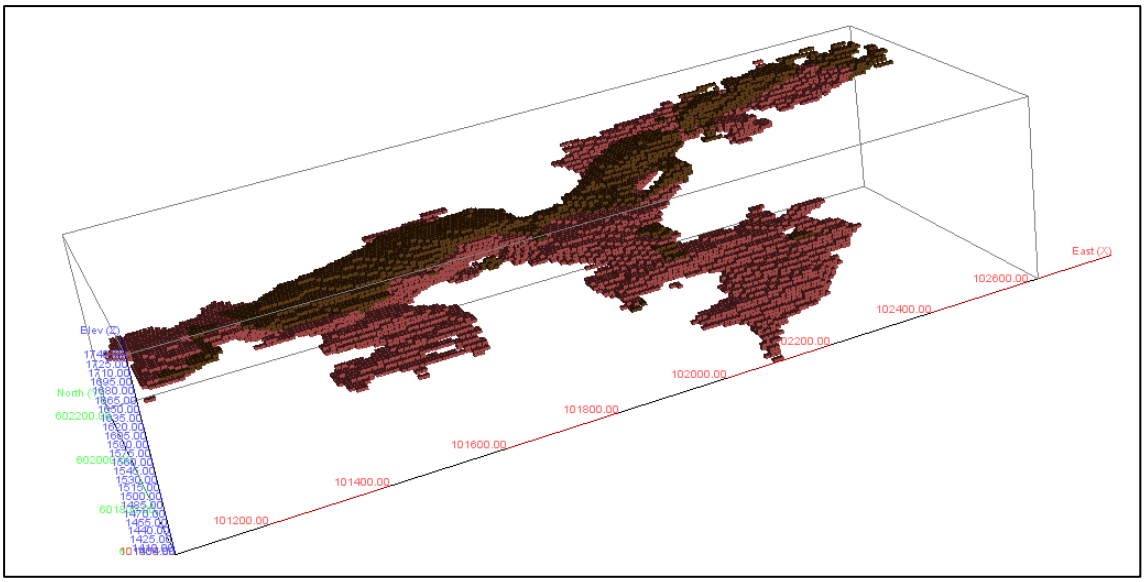
بروزرسانی مدل بلوکی بر اساس جنس سنگ آن است که در نرم‌افزار هر یک از بلوک‌ها با توجه به تعداد مد نظر کاربر به تعداد زیادی بلوک کوچک فرضی تقسیم می‌شود و با قرار گرفتن یک سوزن قائم تعیین جنس سنگ[1] در مرکز هر یک از بلوک‌های کوچک، جنس تک تک آن‌ها را بر اساس حداقل درصد تعیین شده توسط کاربر مشخص می‌کند (شکل ۴-۱۵). تعداد بهینه این بلوک‌های کوچک بر اساس ابعاد بلوک‌ها، میزان پیوستگی توده‌معدنی، نحوه اختلاط ماده‌معدنی با باطله و به شکل تجربی تعیین می‌شود.



شکل ۴-۱۵ : تعیین حداقل درصد برای تخصیص جنس سنگ به یک بلوک و نیز تعیین دقت آن (مجیدزاده، ۱۳۹۴)

در نهایت پس از به‌روزرسانی مدل بلوکی با استفاده از پلیگون‌های زمین‌شناسی رسم شده در هر افق، مدل بلوکی جنس سنگ یا همان فضای تخمین ایجاد می‌شود. در شکل ۴-۱۶ مدل بلوکی ساخته شده برای هر دو جنس سنگ ماده‌معدنی در معدن ۲ گل‌گهر و ارتفاع پله ۶ متری و با ابعاد افقی ۱۰m×۱۰m نشان داده شده است. در ادامه برای مدلسازی عیاری، به بررسی داده‌های اکتشافی و آماده‌سازی داده‌های عیاری پرداخته می‌شود.

[1] Needles



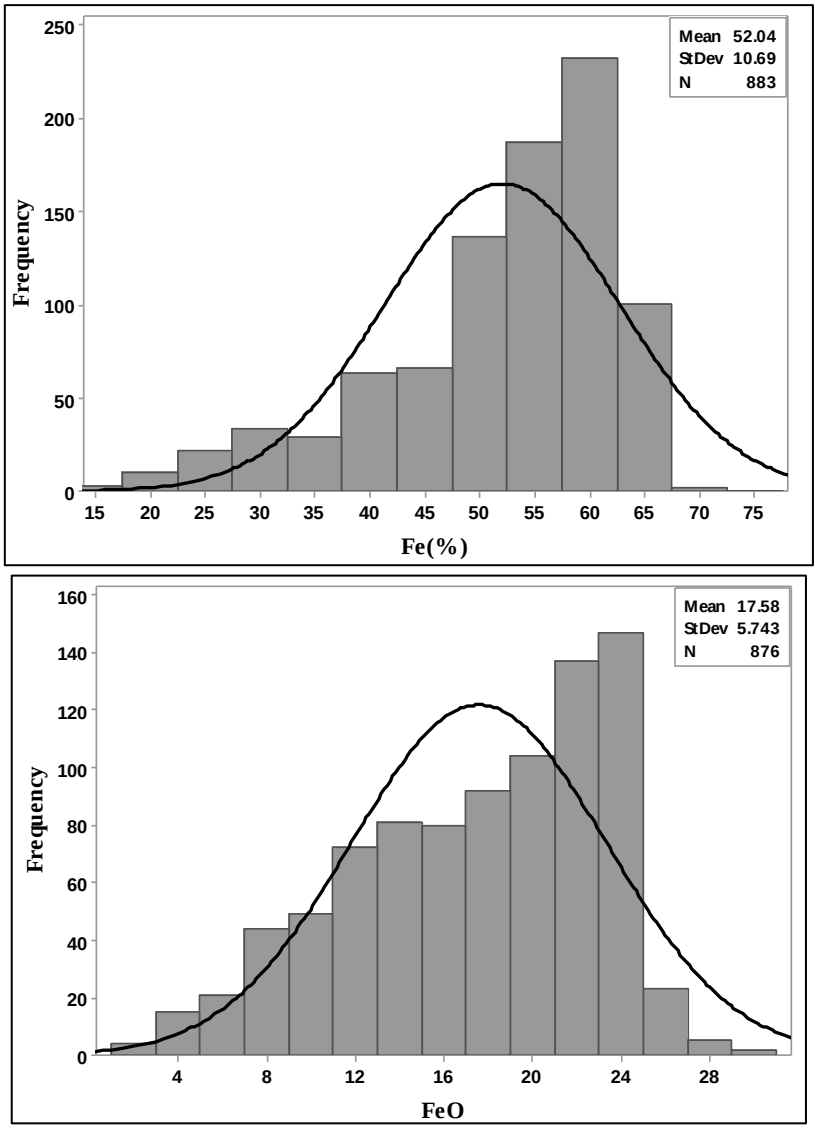
شکل ۴-۱۶ : مدل بلوکی و فضای تخمین رسم شده بر اساس جنس سنگ در ارتفاع پله ۶ متری

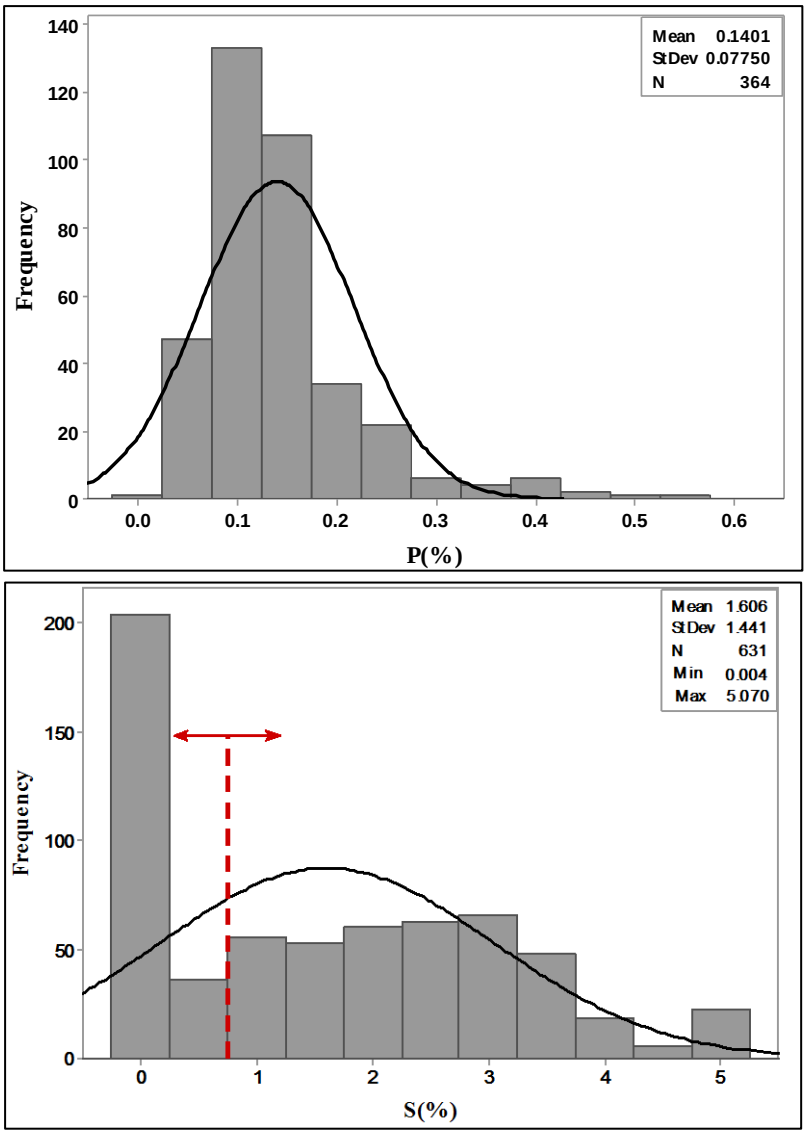
۴-۷- تعیین جوامع آماری

از جمله مسایل مهمی که در مرحله مطالعات آماری داده‌ها باید انجام گیرد، بررسی خصلت تک جامعه‌ای و یا چند جامعه‌ای بودن داده‌های خام است. متغیر ناحیه‌ای در برخی از منابع معدنی به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی زمان تشکیل و یا بعد از تشکیل آن‌ها به چند جامعه مختلف تقسیم می‌شوند که دارای ماهیت فیزیکی و شیمیایی متفاوتی هستند. به عنوان مثال می‌توان به نواحی اکسیدی و سولفوری در برخی از معادن سرب و روی و یا زون‌های سوپرژن و هیپوژن در معادن بزرگ مس یا زون کم‌گوگرد یا پرگوگرد در معادن سنگ آهن مگنتیتی اشاره کرد. در زمان رسم فراوانی‌نمای برخی از متغیرهای این نوع از ذخایر معدنی، چند مد یا چند جامعه آماری ظاهر می‌شود و یا نمودار فراوانی تجمعی آن‌ها بصورت خط راست ظاهر نمی‌شود بلکه بصورت منحنی با یک یا چند نقطه عطف یا تغییر در شیب خواهد بود. در این شرایط بهتر است برای کاهش خطای تخمین، این جوامع را از یکدیگر جدا نموده و سپس واریوگرافی و تخمین بطور جداگانه در هریک صورت گیرد. اگر اختلاطی از دو یا چند جامعه وجود داشته باشد، بدیهی است تفکیک جامعه کلی به جوامع کوچکتر در صورتی امکان‌پذیر است که اولا بتوان مرز مشخصی بین جوامع مختلف تعریف کرد و دوما این تفکیک، از نظر

زمین‌شناسی معنی‌دار باشد (حسنی پاک، ۱۳۸۰).

در مورد پیکره‌معدنی شـــماره ۲ گل‌گهر، ابتدا فراوانی‌نمای داده‌های خام متغیرهای ناحیه‌ای Fe، FeO، S و P رسم گردید (شکل ۴-۱۷).





شکل ۴-۱۷: فراوانی‌نمای عیار داده‌های خام Fe، FeO، S و P در معدن شماره ۲ گل‌گهر

همانطور که در شـــکل ۴-۱۷ ملاحظه می‌شـــود نمودار فراوانی‌نمای گوگرد از دو جامعه آماری تشکیل شده است که شامل عیارهای کمتر از ۰/۷۵ درصد و عیارهای بیشتر از ۰/۷۵ درصد است. بنابراین عیار متغیر ناحیه‌ای آهن (Fe) به دو جامعه آهن با میزان گوگرد کم (کد ســـنگ ۴۰۲) و آهن با میزان گوگرد بالا (کد سنگ ۱۰۱) تقسیم‌بندی شد. بهتر است تخمین در این دو جنس سنگ بطور جداگانه صـورت پذیرد. اما به دلیل کاهش تعداد نمونه‌ها پس از کامپوزیت‌ســازی به اندازه ارتفاع پله و خطر کمبود داده، هر دو جنس ســـنگ همزمان مورد تخمین قرار گرفتند. در پیوســـت ۲ فراوانی‌نمای آهن (Fe) در هر دو جنس سنگ (۱۰۱ و ۴۰۲) آورده شده است.

۴-۷-۱- تشخیص و جایگزینی مقادیر خارج از ردیف

در مباحث آماری به مقادیری که در یک سطح معینی، دارای اختلاف معنی‌داری نسبت به سایر مقادیر داشته باشند، مقادیر خارج از ردیف[۱] می‌گویند. این مقادیر گاهی به دلیل وجود خطاهای تجربی مانند خطای آنالیز یا خطای آماده‌سازی نمونه، و گاهی هم به دلیل ناهمگنی‌های موجود در جامعه داده‌های اکتشافی مثل وجود یک ناحیه زمین شناسی با ماهیت فیزیکی و شیمیایی متفاوت با سایر بخش‌های پیکره‌معدنی بروز می‌کنند.

شناسایی مقادیر خارج از ردیف قبل از هرگونه تخمینی و تصمیم‌گیری در مورد نحوه بکارگیری آنها بسیار مهم است؛ چراکه وجود این مقادیر خارج از ردیف در داده‌ها باعث افزایش شدید خطای تخمین می‌شود (حسنی پاک، ۱۳۸۰).

روش‌های زیادی جهت شناسایی و تشخیص این مقادیر و نیز اصلاح آنها ارایه شده است. معمولا اثرات نامطلوب ناشی از وجود این مقادیر را می‌توان به دو صورت اصلاح نمود :

۱- حذف مقادیر خارج از ردیف از داده‌ها : اگر تعداد مقادیر خارج از ردیف زیاد نباشند و حذف آنها موجب کمبود داده در نقاط خاص نگردد، می‌توان این مقادیر را بطور کلی از داده‌ها حذف کرد. ولی در صورتیکه تعداد این مقادیر زیاد باشند، حذف آنها موجب فقدان داده در نقاط خاص می شود. بنابراین از یک سو ممکن است بلوک‌هایی به دلیل نبود داده کافی در شعاع جستجو تخمین زده نشوند و از سوی دیگر به دلیل استفاده از نقاط دورتر جهت تخمین یک بلوک، خطای تخمین بالا رود.

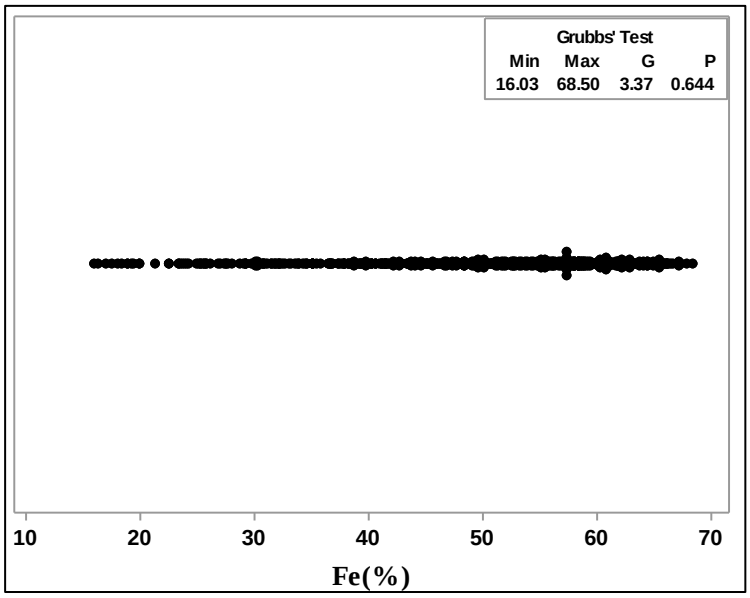
۲- جایگزین کردن مقادیر خارج از ردیف با مقادیر متعارف : روش‌های متعددی برای این کار وجود دارد. یکی از این روش‌ها، اصلاح مقادیر خارج از ردیف با استفاده از نمودار احتمال است. روش دیگر، کاهش دادن مقدارهای خارج از ردیف به مقدار آستانه (مقدار قبل از آن)

---

[۱] Outliers

است که خود راه‌های مختلفی دارد. یک روش تجربی ساده برای این منظور، رسم مقادیر داده‌ها بر حسب فراوانی تجمعی آنها است. لازم به یادآوری است که یک متغیر ممکن است هم از کرانه بالا و هم از کرانه پایین دارای مقادیر خارج از ردیف باشد.

در این تحقیق از دو روش برای تشخیص و جایگزین کردن مقادیر خارج از ردیف استفاده شده است و نتایج مقایسه شده است. روش اول بر اساس آزمون گرابز[1] در سطح معنی‌داری[2] ۵ درصد در نرم‌افزار Minitab و روش دوم استفاده از نمودار دورفل برای تشخیص و جایگزینی مقادیر خارج از ردیف است. نتایج بدست آمده از آزمون گرابز در شکل ۴-۱۸ آورده شده است. طبق این آزمون هیچگونه داده خارج از ردیفی در کرانه بالایی و پایینی داده‌ها ملاحظه نمی‌شود.



شکل ۴-۱۸ : نتایج آزمون Grubbs جهت بررسی داده‌های خارج از ردیف در نرم‌افزار Minitab

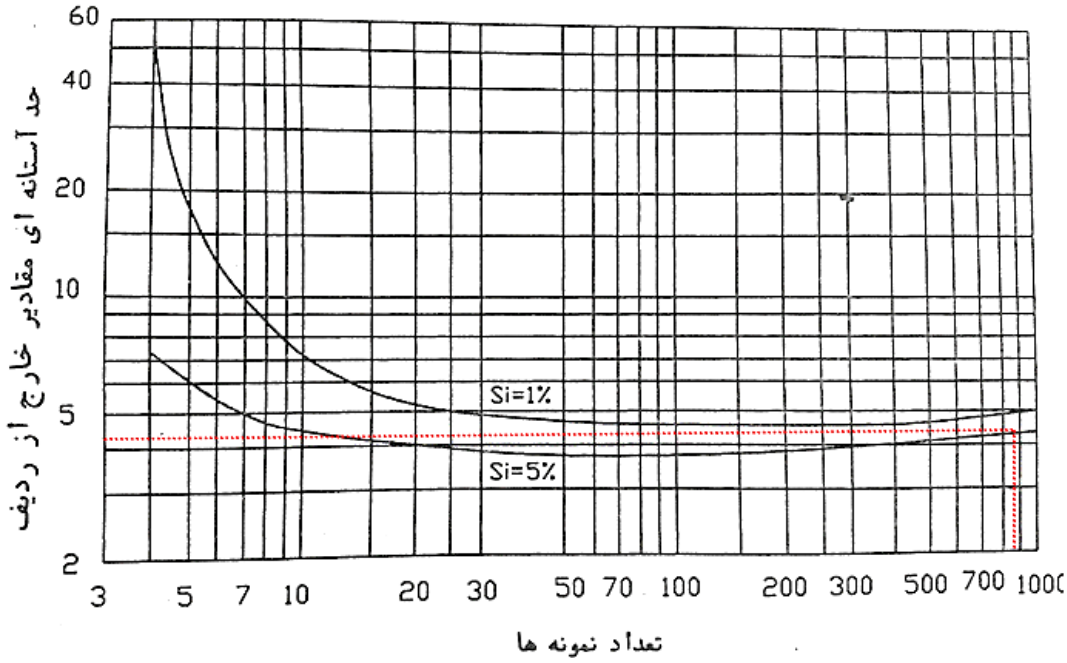
همچنین نمودار دورفل در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. این نمودار برای دو سطح معنی‌دار بودن پنج درصد و یک درصد تهیه شده است. برای انجام آزمون مقادیر خارج از ردیف، میانگین ($\overline{X}$) و انحراف معیار داده‌ها (S) بدون در نظر گرفتن بزرگترین مقدار داده‌ها محاسبه می‌شود. سپس

[1] Grubbs
[2] Significance level

بزرگترین مقدار داده‌ها (x_A) در صورتیکه در رابطه (۴-۲ صدق کند، به عنوان یک مقدار خارج از ردیف شناخته می‌شود :

$$x_A \geq \bar{x} + s.g \qquad (۴-۲)$$

که در آن g حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف است که از نمودار شکل ۴-۱۹ بدست می‌آید.



شکل ۴-۱۹ : حد آستانه‌ای مقادیر خارج از ردیف (g) به عنوان تابعی از تعداد داده‌ها (n) و سطح اعتماد

از آنجا که تعداد داده‌های خام در این کانسار ۸۸۳ نمونه است، در سطح اعتماد ۹۵ درصد (سطح معنی‌داری ۵ درصد)، طبق نمودار مقدار تقریبی g برابر با ۴/۲ است. پس از حذف بزرگترین داده (یعنی ۶۸/۵۰)، میانگین ($\bar{x}$) و انحراف معیار (S) داده‌ها به ترتیب برابر با ۵۲/۰۲ و ۱۰/۶۸ درصد محاسبه شد. بنابراین با توجه به رابطه بالا و استفاده از نمودار دورفل، حد مقادیر خارج از ردیف به شرح زیر حاصل شد :

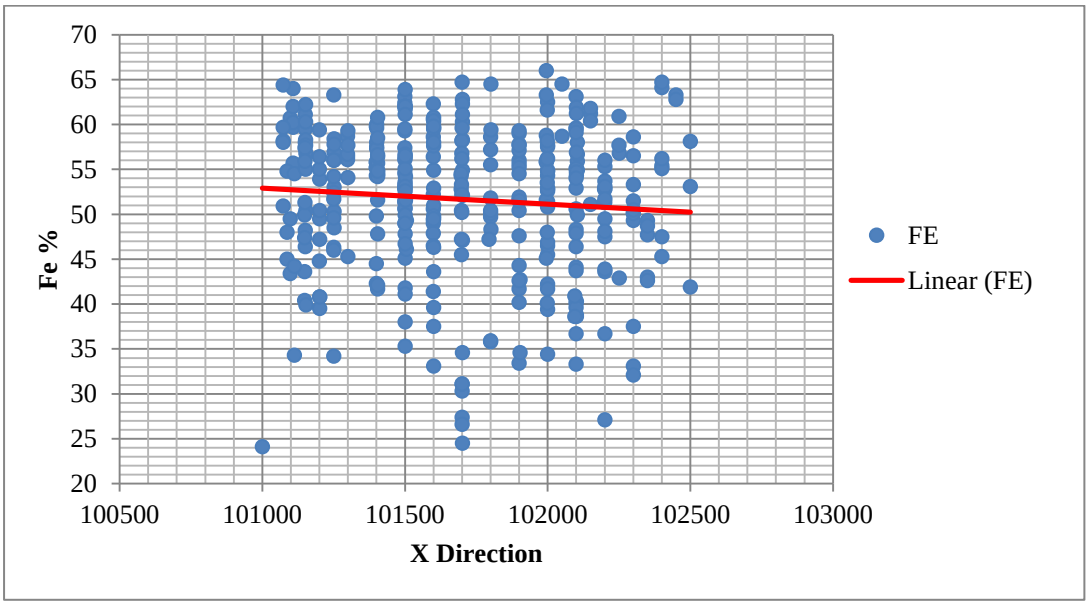
حد مقادیر خارج از ردیف $\geq \bar{x} + s.g = 52.02 + (10.68 \times 4.2) = 96.87$

از آنجا که بزرگترین داده موجود یعنی ۶۸/۵۰ درصد از این حد کمتر است، لذا در بین داده‌های موجود هیچ مقدار خارج از ردیفی وجود ندارد.

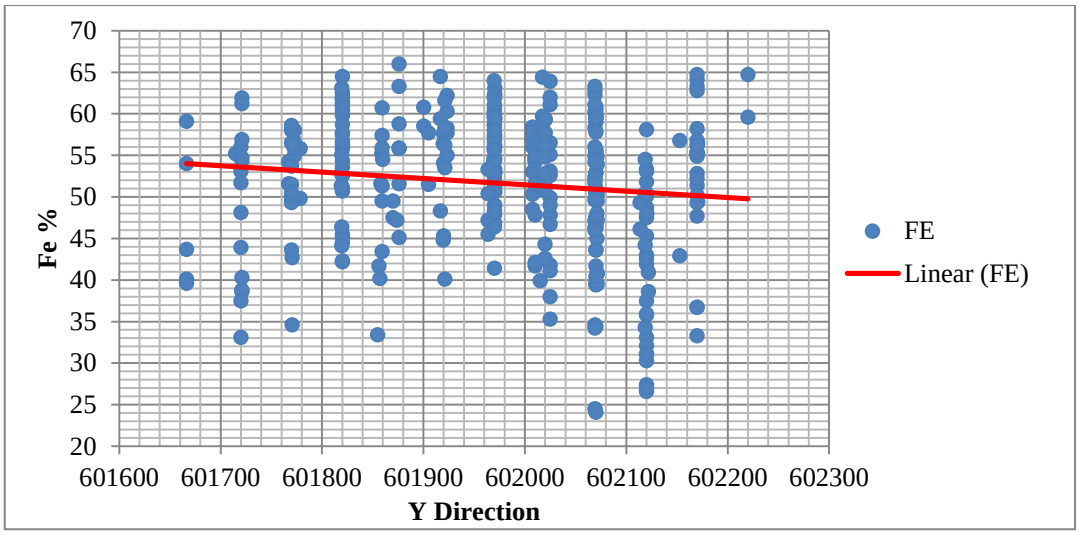
۴-۷-۲- بررسی وجود روند

آگاهی از وجود روند احتمالی در پیکره‌معدنی از جمله مسایل مهم در تخمین‌های زمین‌آماری است زیرا در صورت وجود روند نمی‌توان از روش زمین‌آماری کریجینگ معمولی استفاده کرد و باید از سایر روش‌های کریجینگ (مثلا کریجینگ عمومی) استفاده نمود. به افزایش یا کاهش مقادیر یک متغیر ناحیه‌ای با حرکت در جهات مختلف، روند گفته می‌شود.

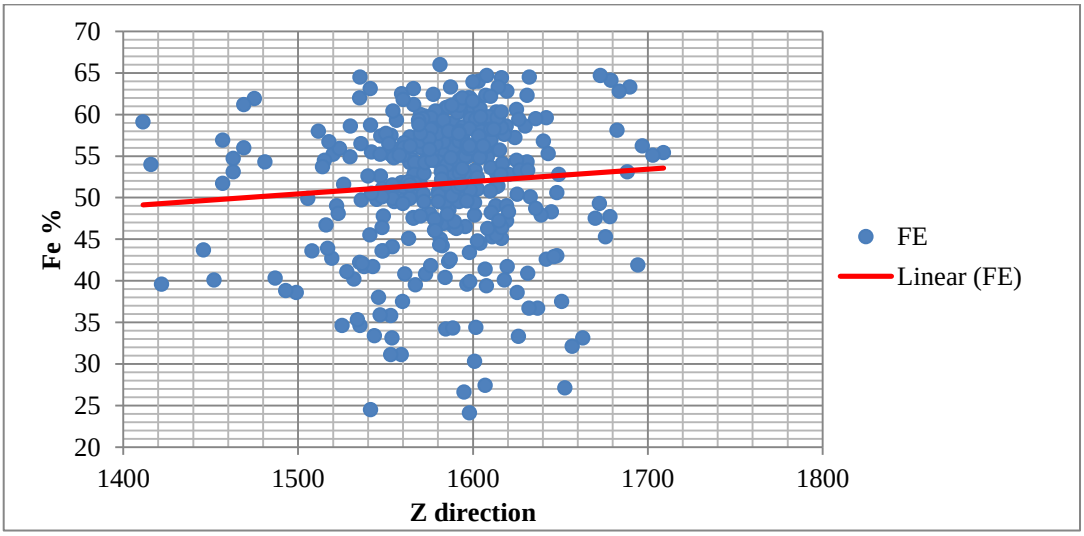
به منظور شناسایی روند احتمالی، نمودار پراکندگی عیار آهن بطور جداگانه برای دو جنس سنگ ماده‌معدنی (۱۰۱ و ۴۰۲) در سه امتداد شمالی-جنوبی، شرقی-غربی و عمق رسم می‌گردد. اگر روندی در هر یک از این امتدادها وجود دا شته با شد، نتیجه آن در منحنی تغییرات یاد شده منعکس خواهد شد. شکل ۴-۲۰ تا شکل ۴-۲۵ منحنی تغییرات عیار آهن (Fe) در سه را ستای یاد شده برای هر دو جنس سنگ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، روند بارزی در عیار آهن ملاحظه نمی‌شود.



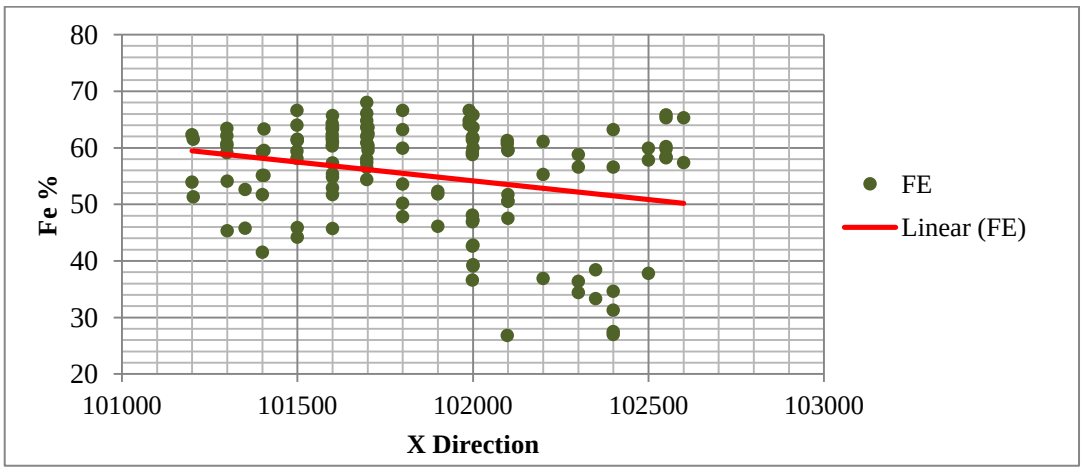
شکل ۴-۲۰ : توزیع عیار آهن در راستای شرقی-غربی محلی برای کد سنگ ۱۰۱



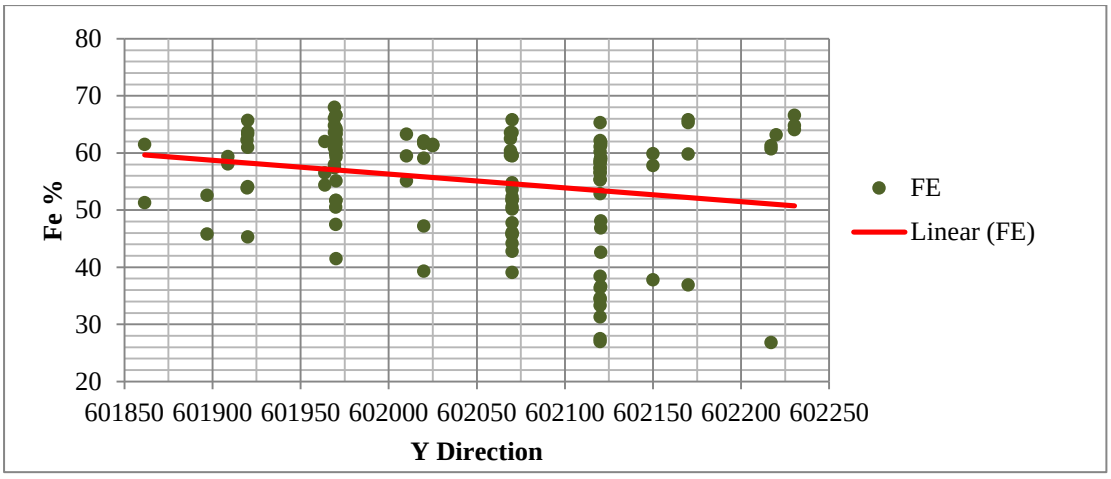
شکل ۴-۲۱ : توزیع عیار آهن در راستای شمالی-جنوبی محلی برای کد سنگ ۱۰۱



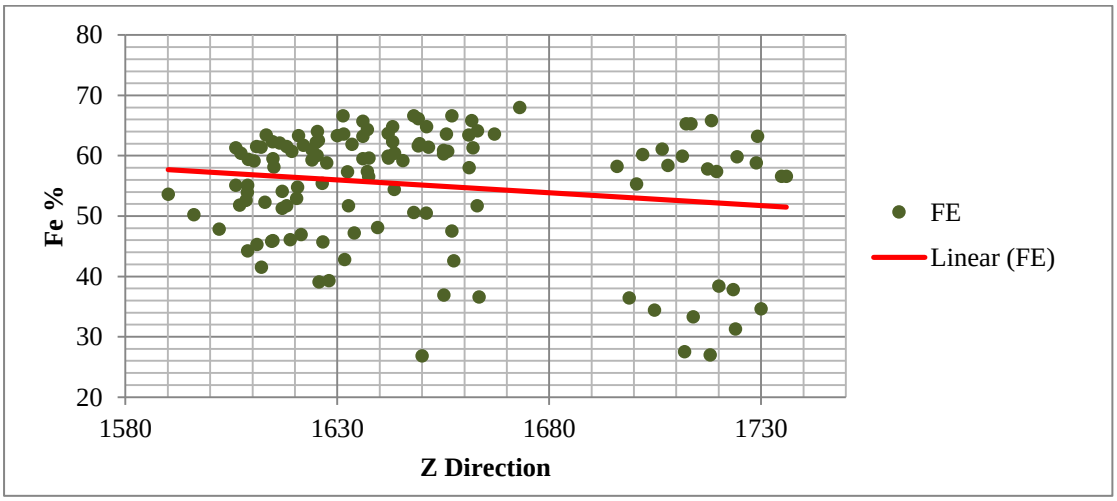
شکل ۴-۲۲ : توزیع عیار آهن در امتداد عمق برای کد سنگ ۱۰۱



شکل ۴-۲۳ : توزیع عیار آهن در راستای شرقی-غربی محلی برای کد سنگ ۴۰۲



شکل ۴-۲۴ : توزیع عیار آهن در راستای شمالی-جنوبی محلی برای کد سنگ ۴۰۲



شکل ۴-۲۵ : توزیع عیار آهن در امتداد عمق برای کد سنگ ۴۰۲

۴-۷-۳- کامپوزیت‌سازی (ساختن نمونه‌های ترکیبی)

بعد از بدست آمدن مغزه‌های حفاری، این مغزه‌های توسط مهندس معدن پیمایش شده و نمونه‌های معرف جهت عیار سنجی فرستاده می‌شود. معمولاً این نمونه‌ها استوانه‌ای شکل و دارای قطر چند سانتی‌متری هستند. پس از دریافت نتایج تجزیه و آنالیز، عیارها به سایر اطلاعات زمین شناسی اضافه می‌شود. این داده‌های عیاری می‌توانند به مغزه‌هایی با طول چند سانتی‌متر تا چند متر تعلق داشته باشند. داده‌هایی که در مطالعات زمین‌آماری قرار است بکار برده شوند باید سه ویژگی مهم شامل اندازه، شکل و جهت‌یافتگی را دارا باشند که این سه ویژگی را تحت عنوان "پایه" نامگذاری

کرده‌اند. اگر داده‌های متعلق به طول‌های متفاوتی از مغزه باشند، قبل از هر کاری باید پایه‌ها را یکسان نمود تا فضای هم‌احتمال بین داده‌ها ایجاد شود و در ادامه تخمین از اصالت برخودار شود. برای این منظور، لازم است این طول‌ها را مساوی کرد تا داده‌ها دارای ارزش یکسانی باشند. به این تکنیک جهت منظم‌سازی و یکسان کردن طول‌ها یا عمق‌های مساوی، کامپوزیت‌سازی یا ساخت نمونه‌های ترکیبی گفته می‌شود. در ساختن نمونه های ترکیبی، داده های عیاری بصورت میانگین وزن‌دار می شوند. با این کار، برای هر نمونه ترکیبی مقدار متوسط عیار و مختصات نقطه وسط آن (طول آن) در فایل داده‌ها ثبت می‌شود.

انتظار می‌رود که عملیات استخراج در یک اندازه از قبل مشخص شده از میزان انتخابی شدن به پیش رود که اغلب مقدار آن از داده‌های عیارسنجی شده بزرگتر است. بنابراین انتخاب طول کامپوزیت‌سازی معمولا تابعی از میزان انتخابی شدن پیش‌بینی شده برای معدن است. در معادن روبازی که کانسار از بزرگ و یکنواختی برخودار است و تبدیل کانسنگ به باطله بصورت تدریجی رخ می‌دهد، طول کامپوزیت‌سازی (طول نمونه‌های ترکیبی) برابر با ارتفاع پله بوده و از ارتفاع‌های ثابت استفاده می‌شود. برخی از دلایل و مزایای کامپوزیت‌سازی به شرح زیر است (عطایی،۱۳۹۰) :

- در کارهای آماری جهت عیارسنجی و برای تهیه یک داده معرف، باید پایه نمونه‌های مورد تحلیل با هم برابر باشد. به همین منظور باید نمونه‌های ترکیبی ساخته شود.
- کامپوزیت‌سازی، اختلاط ماده‌معدنی با باطله (ترقیق) را مشابه آن‌چه که در استخراج پله‌های با ارتفاع ثابت در معادن روباز اتفاق می‌افتد، لحاظ می‌کند که اشاره به ترقیق داخلی دارد.
- کامپوزیت‌سازی، تغییرات نامنظم ناشی از عیارهای بسیار بالا یا پایین را کاهش می‌دهد (هموارسازی داده‌های اصلی و کاهش تغییرپذیری آنها) و تحلیل‌های زمین‌آماری متناظر با آن مثل وریوگرافی بهتر و قوی‌تر انجام می‌شود.

- به دلیل اینکه کامپوزیت سازی در فواصی طولانی‌تر نسبت به طولی از مغزه که عیار آن اندازه‌گیری شده (داده‌های اصلی) صورت می‌پذیرد، تعداد داده‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه زمان لازم برای محاسبات کاهش می‌یابد.

از طول های کامپوزیت‌سازی کوتاه‌تر می‌توان برای افزایش تعداد داده های موجود بمنظور وریوگرافی و تخمین استفاده کرد. با این حال، وریوگرام‌های نهایی باید بر مبنای کامپوزیت‌هایی که در تخمین مشارکت دارند، ایجاد شوند. کامپوزیت‌های کوتاه‌تر امکان نمایش دقیق‌تر محل تماس‌های زمین‌شناسی و مرز بین ماده‌معدنی و باطله را می‌دهند.

بطور ویژه، کامپوزیت‌سازی تاثیر بسیار چشمگیری روی اثر قطعه‌ای[1]، که مولفه تصادفی تغییرپذیری است، دارد. کاهش واریانس قطعه‌ای رابطه معکوسی با میزان کامپوزیت‌سازی دارد. بنابراین در ساخت نمونه‌های ترکیبی نباید نمونه‌ای با طول زیاد به نمونه‌های کوچکتر تفکیک شود، زیرا در نتیجه این کار، مقداری اثر قطعه‌ای وارد محاسبات می شود و بهتر است هر نمونه به طول‌های بزرگتر کامپوزیت گردد. یک بررسی آماری روی داده‌های خام معدن شماره ۲ گل‌گهر نشان داد که حداقل طول مناسب جهت ساخت نمونه‌های ترکیبی نباید از ۶ متر کمتر باشد و نهایتا کامپوزیت‌های ۶ متری در تخمین بکار برده شده‌اند (شکل ۴-۲).

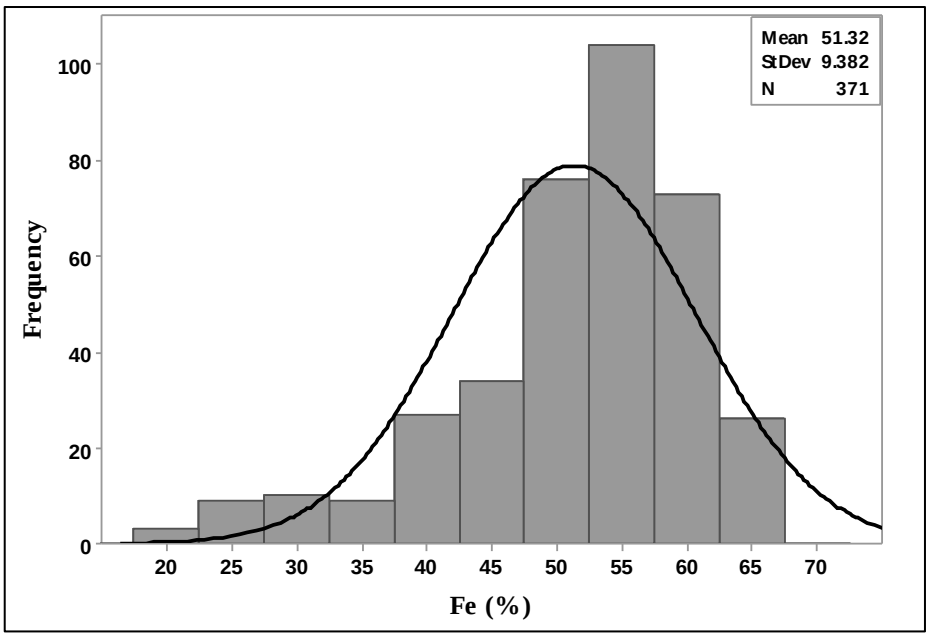
کامپوزیت‌سازی می‌تواند بطور کلی به دو روش مورد استفاده قرار گیرد : الف) کامپوزیت‌سازی رو به پایین گمانه[2] یا ب) کامپوزیت سازی پله‌ای[3]. استفاده از کامپوزیت سازی پله‌ای در معادن روبازی که دارای حفاری‌های تقریبا عمودی هستند، رایج است. این روش شامل مشخص کردن بالا و پایین ارتفاع هر پله و سپس کامپوزیت کردن تمامی فواصل نمونه‌هایی است که در این ارتفاع قرار می‌گیرند. وسط ارتفاع پله به عنوان مرکز ثقل کامپوزیت، که قایم فرض می‌گردد، در نظر گرفته می‌شود. بدلیل قائم

[1] nugget effect
[2] down-the-hole composites
[3] bench composites

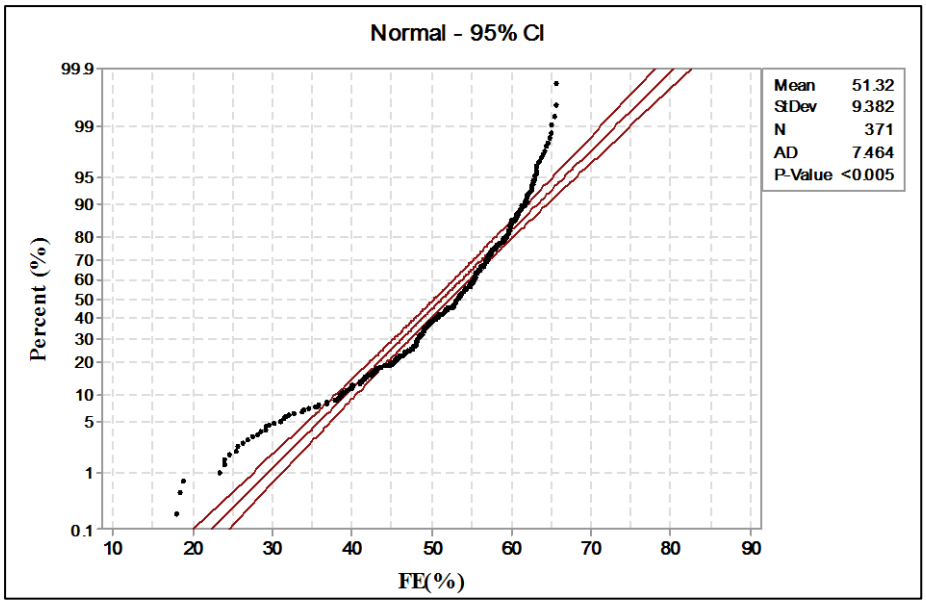
بودن اکثر گمانه‌های حفر شده در معدن ۲ گل‌گهر، از روش کامپوزیت‌سازی پله‌ای استفاده شده است و با توجه به رویکرد بیان شده، طول کامپوزیت سازی در هر سناریو برابر با ارتفاع پله ا ستخراجی در نظر گرفته شده است.

۴-۷-۴- نرمال‌سازی داده‌های کامپوزیت شده

به منظور بررســی نرمال بودن داده‌ها و پس از تصــحیح و جایگزینی مقادیر خارج از ردیف، ابتدا فراوانی‌نمای داده‌های کامپوزیت شده متغیر ناحیه‌ای آهن (Fe) رسم شد. در شکل ۴-۲۶ فراوانی‌نمای داده‌های کامپوزیت شده ۱۵ متری آهن نشان داده شده است. با رسم نمودار فراوانی تجمعی داده‌ها روی کاغذ احتمال، نرمال بودن توزیع بررسی می شود (شکل ۴-۲۷). اگر نمودار توزیع تجمعی آن در بازه ۱۶ تا ۸۴ درصــد فراوانی تجمعی نزدیک به خط راســت باشــد، می‌توان توزیع را نرمال فرض کرد. توزیع فراوانی آهن (Fe) برای کامپوزیت ۱۵ متری نرمال نیست و باید نرمال گردد. همچنین این توزیع فراوانی برای سایر سناریوها رسم گردید که نشانگر عدم نرمال بودن داده‌ها در سایر سناریوهای ارتفاع پله بود (جهت مشاهده این اطلاعات به پیوست ۲ مراجعه شود).



شکل ۴-۲۶ : فراوانی‌نمای داده‌های کامپوزیت شده ۱۵ متری عیار آهن در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

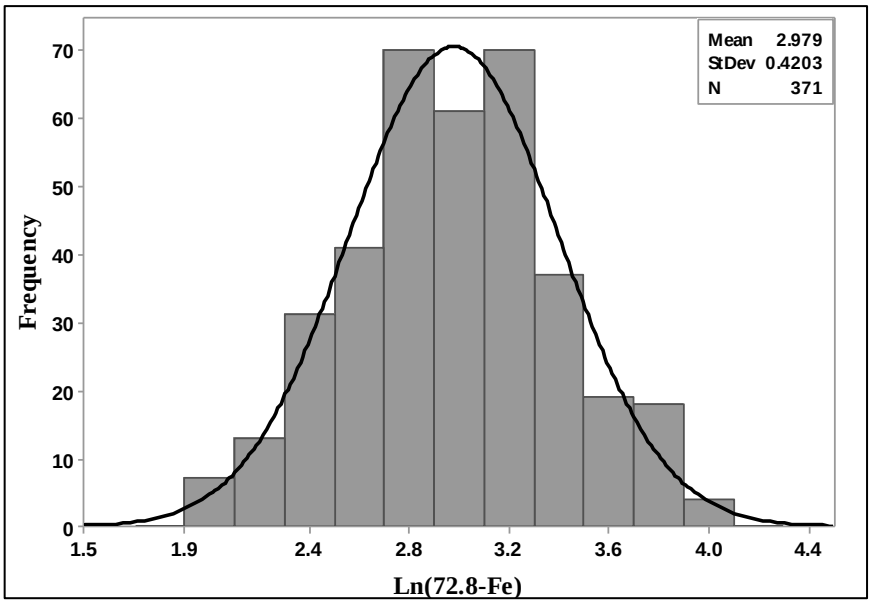


شکل ۴-۲۷ : نمودار توزیع تجمعی داده‌های کامپوزیت شده ۱۵ متری عیار آهن در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

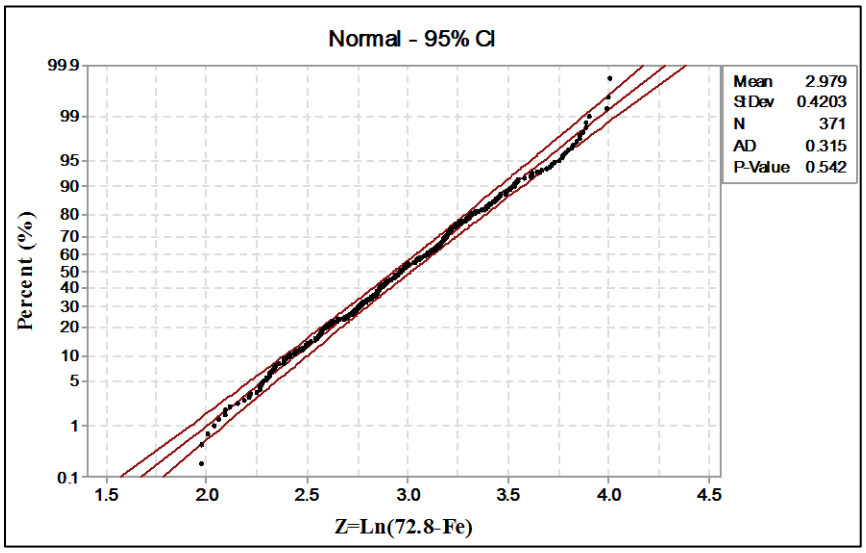
روش‌های مختلفی جهت نرمال کردن داده‌های کامپوزیت شـــده وجود دارد که می‌توان به روش تبدیل لگاریتم‌گیری، لگاریتمی ســه متغیره، تبدیل کاکس-باکس[۱] و روش امتیازهای نرمال و ... اشـاره کرد. در این تحقیق ابتدا با اســتفاده از تبدیل لگاریتمی داده‌ها (Ln) نمودار فراوانی‌نما و توزیع تجمعی آهن رســـم شـــد که حاکی از عدم نرمالســـازی آن داشـــت. لذا از روش لگاریتمی ســـه متغیره برای نرمال‌سازی داده‌ها استفاده شد. در این روش هنگامیکه چولگی منفی باشد از فرمول $Z = \mathrm{Ln}(c - Fe)$ به منظور تبدیل داده‌ها به نرمال استفاده می‌شود. به عنوان مثال در کامپوزیت ۱۵ متری، پس از سعی و خطای فراوان مقدار ثابت افزودنی $c = 72.8$ در نظر گرفته شـد (مقدار ثابت افزودنی در هر ســناریو ممکن ا ست به دلیل کامپوزیت سازی و تغییر عیارهای نمونه‌ها، متفاوت با شد). شکل ۴-۲۸ و شکل ۴-۲۹ به ترتیب فراوانی‌نما و نمودار توزیع تجمعی مقادیر تبدیل یافته آهن به روش لگاریتمی ســـه متغیره برای کامپوزیت‌های ۱۵ متری را نشـــان می‌دهد (نمودار توزیع تجمعی و فراوانی‌نمای ســـایر ســناریوهای ارتفاع پله در پیوســت ۲ آمده اســت). همچنین نتایج بدســت آمده از جدول ۴-۷، نشـان می‌دهد که مقادیر تبدیل یافته به روش لگاریتمی ســه متغیرها دارای چولگی نزدیک به صـفر اسـت و

[۱] Cox & Box

تقریبا بر منحنی نرمال مماس است و می‌توان آن را نرمال فرض کرد.



شکل ۴-۲۸ : فراوانی‌نمای داده‌های تبدیل یافته کامپوزیت‌های ۱۵ متری به روش لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر



شکل ۴-۲۹ : نمودار توزیع تجمعی داده‌های تبدیل یافته کامپوزیت‌های ۱۵ متری به روش لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

جدول ۴-۷ : پارامترهای آماری داده‌های کامپوزیت شده ۱۵ متری عیار آهن در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

مدل توزیع	میانگین (٪)	میانه (٪)	واریانس (٪^{2})	انحراف معیار (٪)	چولگی	کشیدگی
طبیعی	۵۱/۳۲	۵۳/۳۵	۸۸/۰۲	۹/۳۸	-۱/۱۳	۱/۲۵
تبدیل یافته	۲/۹۸	۲/۹۷	۰/۱۸	۰/۴۲	۰/۰۶	-۰/۳۲

پس از انجام تخمین مقادیر مقیاس داده‌ها تبدیل یافته باید به مقیاس مقادیر اصـــلی بازگردانده شوند. البته تنها ا ستفاده از آنتی‌لگاریتم کافی نی ست و باید مقدار جمله نااریب‌کننده نیز به این مقدار اضافه شود که توضیح روش اعمال آن در چارچوب این تحقیق نمی‌گنجد.

۴-۷-۵- واریوگرافی و رسم واریوگرام (تغییرنما)[۱]

دومین مرحله در مدلسازی عیاری و اساس کلیه روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری، انجام مطالعات واریوگرافی و تعیین پارامترهای تخمین است. اساس مطالعات زمین‌آماری، بر وجود ساختار فضایی در بین داده‌ها بوده و واریوگرام (تغییرنما) مهمترین ابزار نمایش همب ستگی ف ضایی بین داده‌ها ا ست. در صـورت وجود همبسـتگی فضـایی و پیوسـته بودن مقادیر یک متغیر ناحیه‌ای درون یک پیکره‌معدنی، می توان با اســـتفاده از مقادیر نقاط معلوم، مقادیر نقاط مجهول پیرامون آن‌ها را تخمین زد. در واقع واریوگرام ابزاری است که میزان شباهت عیار دو نمونه (دو نقطه در فضا) را برحسب فاصله بین آن‌ها بیان می‌کند و از رابطه (۴-۳) بدست می‌آید:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2\,N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[z(x_i) - z(x_i + h)\right]^2 \qquad (۳-۴)$$

که در آن $\gamma(h)$ را ســـمی‌واریوگرام[۲] و $2\gamma(h)$ را واریوگرام می‌نامند. ولی چون در عمل بیشـــتر از $\gamma(h)$ ا ستفاده می شود، بنابراین در اکثر مراجع از $\gamma(h)$ به عنوان واریوگرام نام برده می شود. $z(x_i)$ و $z(x_i + h)$ به ترتیب میزان متغیر اندازه‌گیری شده (مثلا عیار) در نقطه x_i و x_i+h است و $N(h)$ تعداد جفت نمونه‌هایی اســـت که به فاصـــله h از یکدیگر قرار دارند که این فاصـــله h را در اصـــطلاح گام[۳] واریوگرام می‌گویند.

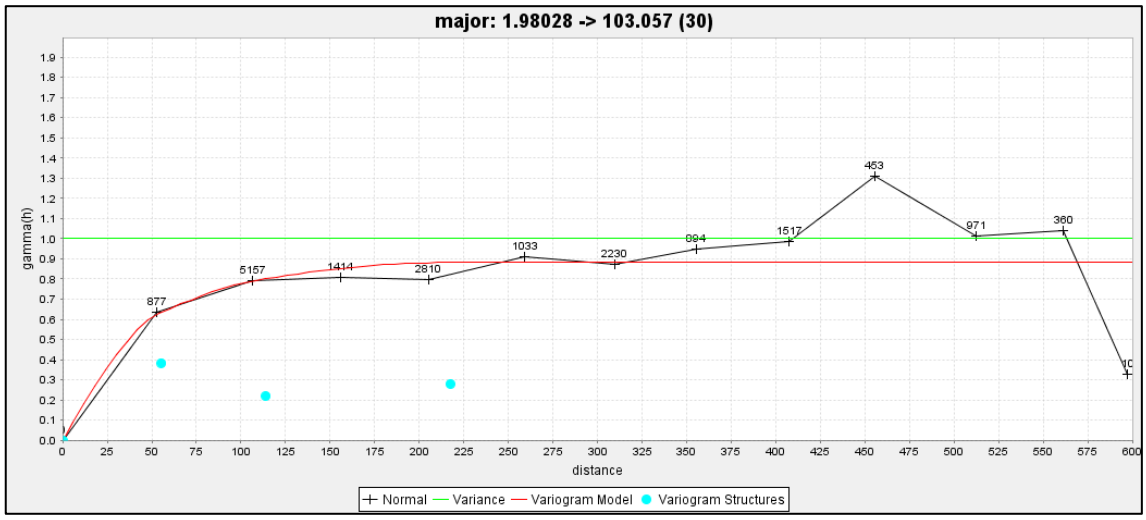
---

[۱] Variogram

[۲] Semi-variogram

[۳] Lag

اگر مدل تغییرپذیری فضایی یک متغیر (مثلا عیار) در جهات مختلف یک پیکره‌معدنی یکسان نباشد، گفته می‌شود که آن پیکره‌معدنی ناهمسانگرد است. جهت تشخیص ناهمسانگردی[۱] پیکره‌معدنی در جهت‌های مختلف واریوگرام‌هایی رسم می شود. اگر مشخصات این واریوگرام‌ها مشابه با شد، می‌توان گفت که پیکره‌معدنی هم سانگرد ا ست و در غیر این صورت وجود ناهم سانگردی محرز می شود. نکته مهم در هنگام ا ستفاده از واریوگرام این ا ست که داده‌ها حتما باید نرمال با شند. بارها و بارها وایروگرام جهتی در جهات مختلف و با طول گام‌های مختلف ساخته شد تا مناسب‌ترین آن انتخاب شود. به عنوان مثال، در شکل ۴-۳۰ وریوگرام جهتی در آزیموت ۱۰۳ و شیب ۲ درجه برای سناریو ارتفاع پله ۶ متری نشان داده شده است.



شکل ۴-۳۰ : وریوگرافی جهتی برای متغیر ناحیه‌ای Fe در راستای آزیموت ۱۰۳/۰۵ و شیب ۲ درجه در سناریو ارتفاع پله ۶ متری

واریوگرام‌های بدست آمده در هر جهت دارای شعاع تاثیر[۲] متفاوت و حد آستانه[۳] یکسان هستند و بنابراین نتیجه‌گیری می‌شود که کانسار دارای ناهمسانگردی هندسی دارد. در جدول ۴-۸ مشخصات آماری این واریوگرام‌های جهتی رسم شده است. واریوگرام‌های رسم شده برای سایر سناریوهای دیگر

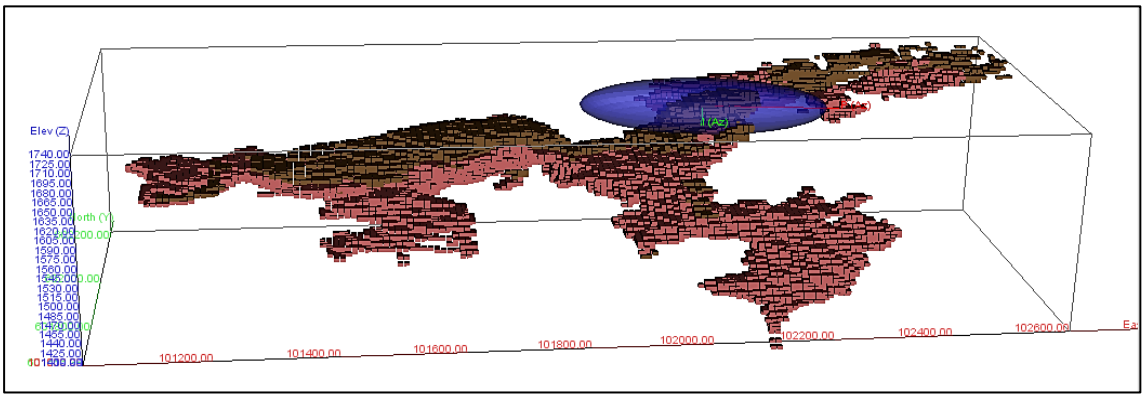
[۱] Anisotropy
[۲] Range
[۳] Sill

در پیوست ۲ آمده است.

جدول ۴-۸ : اطلاعات واریوگرافی جهتی متغیر ناحیه آهن در سناریو ارتفاع پله ۶ متری

	Azimuthe	Dip	Range	Sill	Nuget
Major	103	1.98	55.38	0.089	0.001
			114	0.051	
			217.45	0.065	
Semi- Major	192.7	-5	**Anisotropy Factors**		
			Major/ Semi-Major = 3.32		
Minor	27.38	-81.63	Major/ Minor = 5.02		

برای تعیین نحوه وزن‌دهی به داده‌های عیاری از کامپوزیت‌سازی و برای تعیین تعداد و نوع داده‌های مورد استفاده در تخمین مقادیر نقاط مجهول، از بیضوی جستجو (فضای سه‌بعدی) استفاده می‌شود. از تقسیم شعاع بزرگ بیضوی جستجو به شعاع کوچک آن، ضریب ناهمسانگردی (K) بدست می‌آید. برای تخمین عیارهر نقطه، مرکز بیضوی بدست آمده روی آن نقطه قرار می‌گیرد و تمامی داده‌هایی که در داخل آن قرار می‌گیرند برحسب فاصله شان در تخمین شرکت داده می شوند. شکل ۴-۳۱ مثالی از بیضوی جستجو در سناریو ارتفاع پله ۶ متری را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۱ : نمونه‌ای از بیضوی جستجو در سناریوی ارتفاع پله (بلوک) ۶ متری

۴-۷-۶- تعیین وزن مخصوص ماده‌معدنی و باطله

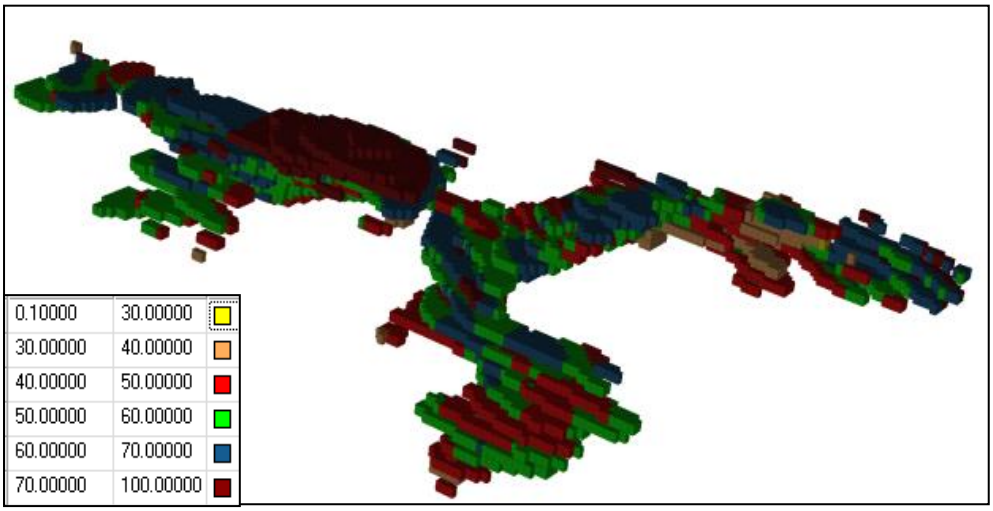
در هنگام تخمین منابع، وزن مخصوص برجای مواد باید مدلسازی گردند. پیش‌بینی تناژ ماده‌معدنی و باطله بطور مستقیم به ضرایب تناژ و وزن مخصوص بکار رفته برای مدل حجمی بستگی دارد. برای مدلسازی وزن مخصوص ذخایر معدنی پرعیار فلزی که بیشتر عیارهای اندازه‌گیری شده

آن‌ها بالاست و فراوانی‌نمای عیار آن‌ها بدون چولگی یا چولگی منفی است، مثل ذخایر سنگ آهن (۴۰ تا ۶۸ در صد)، در صد عیار ماده‌معدنی تاثیر قابل توجهی روی وزن مخ صوص ماده‌معدنی دارد. در این حالت، اســتفاده از یک عدد ثابت برای وزن مخصــوص (آن چیزی که در ذخایر معدنی با عیار بســیار پایین مثل ذخایر مس وجود دارد) ســبب بروز خطای زیادی در میزان تناژ تخمینی ماده‌معدنی دارد. برای رفع این مشــکل بهترین ایده می‌تواند تعیین رابطه بین میزان عیار و وزن مخصــوص ماده‌معدنی باشــد، بطوریکه وزن مخصــوص هر یک از بلوک‌های ماده‌معدنی بر اســاس میزان عیار تخمینی آن‌ها تعیین گردد. طبق بررســی‌های صــورت گرفته در معدن، رابطه بین وزن مخصــوص و عیار ماده‌معدنی بصورت زیر است :

$$\text{Specific Gravity} = \left(0.025 \times \text{Fe}(\%)\right) + 2.62 \qquad (۴-۴)$$

۴-۷-۷- تخمین عیاری

پس از مشخص کردن کلیه اطلاعات لازم جهت تخمین در فضای تخمین مورد نظر، مدل بلوکی عیاری برای متغیر ناحیه‌ای آهن بر ا ساس پارامترهای تخمین و با ا ستفاده از روش کریجینگ معمولی محاسبه شده و در هر یک از سناریوهای ارتفاع پله رسم گردید. به عنوان مثال شکل ۴-۳۲ بلوک‌های ماده‌معدنی تخمین خورده برای سناریوی ارتفاع پله ۱۵ متری را نشان می‌دهد.

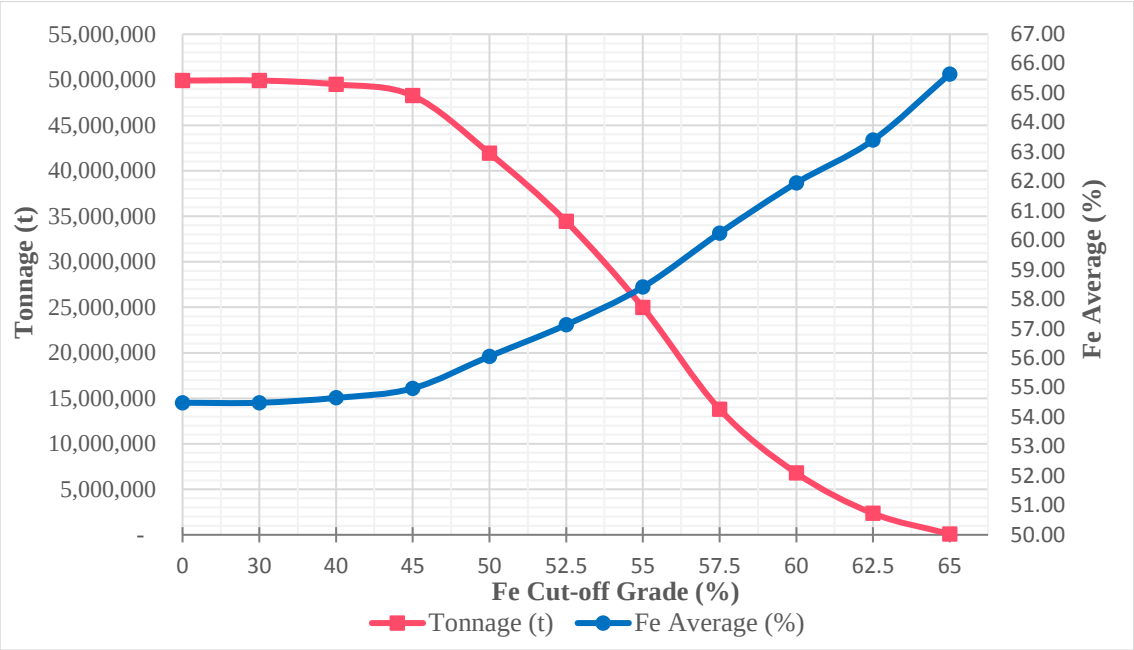


شکل ۴-۳۲ : مدل بلوکی عیاری برای سناریوی ارتفاع پله ۱۵ متری

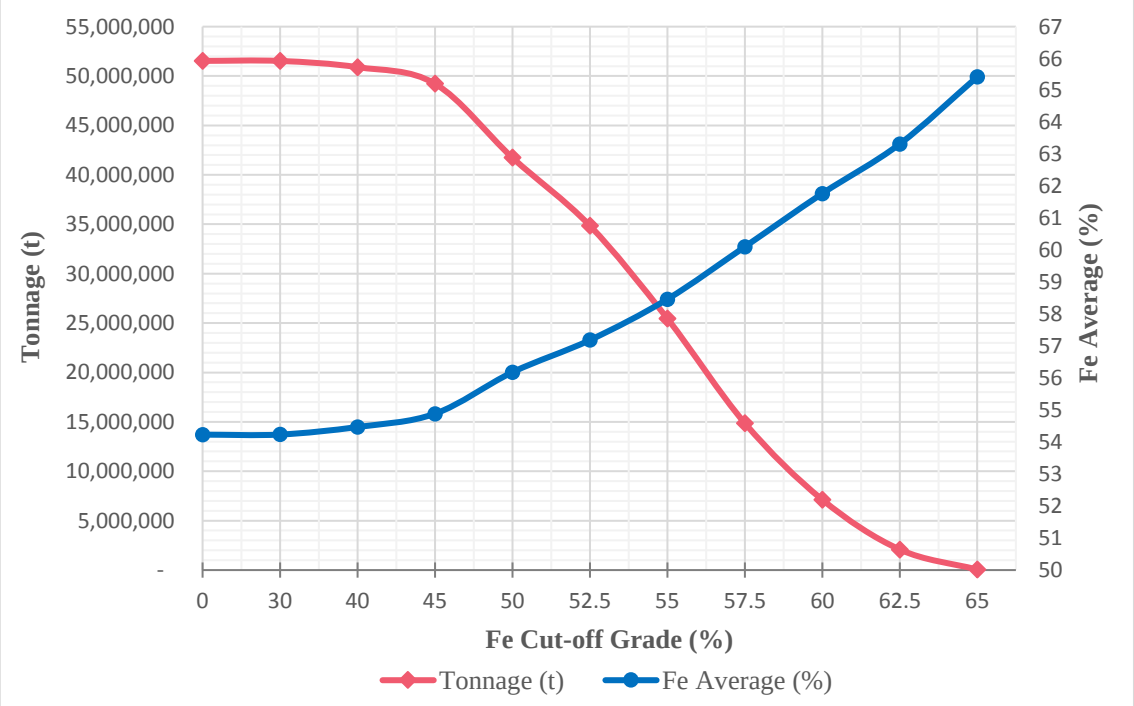
۴-۷-۸- رسم منحنی‌های عیار-تناژ

منحنی‌های عیار-تناژ کانسار از جمله ابزارهایی است که برنامه‌ریزان معدن را قادر به تعیین پارامترهای صحیح‌تر جهت برنامه‌ریزی‌های استخراج می‌کند. رسم منحنی عیار-تناژ یک کانسار نیازمند محاسبه تناژ و عیار متوسط کانسار در عیارحدهای مختلف است. بسته به عیارحد انتخابی، میزان ذخایری که برای یک پیکره‌معدنی خاص بدست می‌آید در مقیاس وسیعی متفاوت خواهد بود. بدیهی است هر چه عیارحد افزایش یابد، مقدار ذخیره کانسار (تناژ) کاهش ولی عیار متوسط آن افزایش می‌یابد.

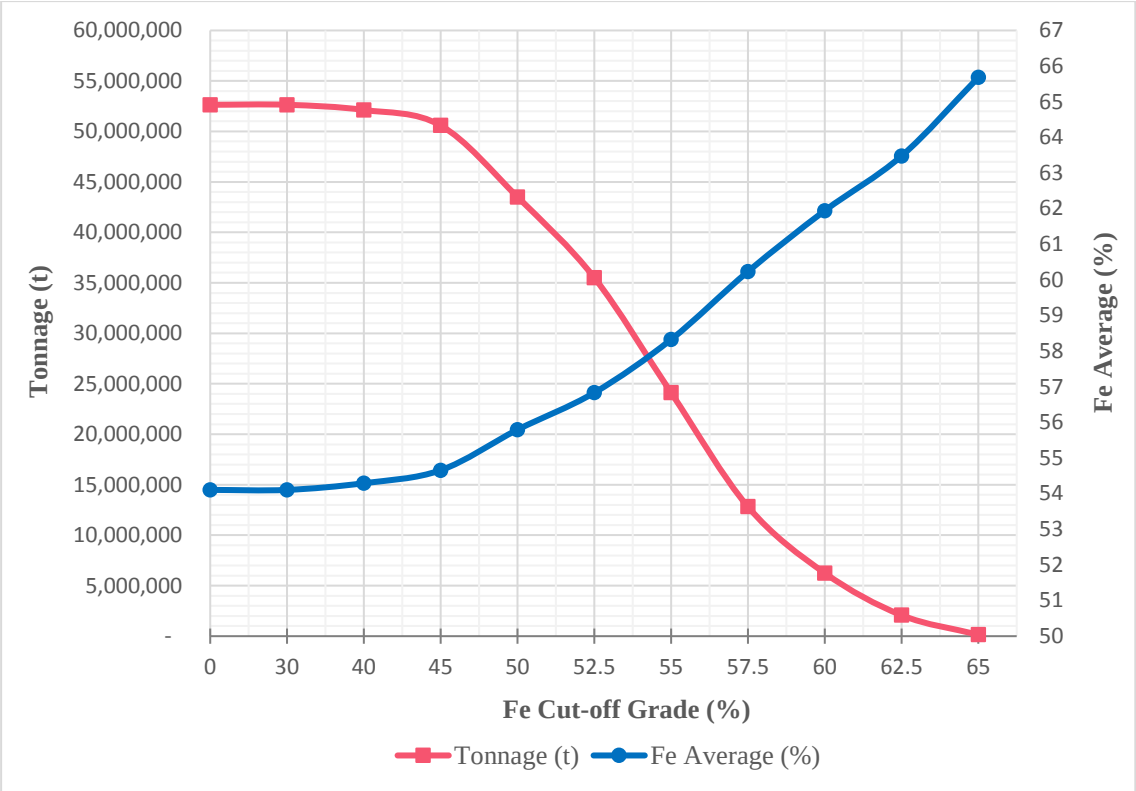
در شکل ۴-۳۳ تاشکل ۴-۳۸ منحنی‌های عیار-تناژ و نیز عیار-محتوای فلز کانسار در سناریوهای مختلف ارتفاع پله آورده شده است. همچنین جدول اطلاعات این نمودارها در پیوست آمده است. همانطور که مشاهده می‌شود در یک ارتفاع پله ثابت، با افزایش عیارحد از میزان تناژ ماده‌معدنی کاسته می‌شود. این روند نزولی در تمامی ارتفاع پله‌ها صادق است. از طرفی در یک عیار حد ثابت، هر چه ارتفاع پله بیشتر می‌شود، تناژ افزایش ولی عیار متوسط متناظر با آن کاهش می‌یابد. میزان تناژ و عیار متوسط به عیارحدهای پایین‌تر از حساسیت بیشتری نسبت به عیارحدهای بالاتر دارد. همچنین در یک ارتفاع پله ثابت با افزایش عیارحد، میزان محتوای فلز کاهش می‌یابد. همچنین در یک عیارحد ثابت بطور کلی میزان تغییرات ارتفاع پله تاثیر چندانی بر محتوای فلز بدست آمده ندارد. بطور کلی می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع پله ۱۵ متری میزان بازیابی بیشتری را نسبت به سایر سناریوها تولید می‌کند. انتظار می‌رفت که در ارتفاع پله ۶ متری میزان محتوای فلزی به دلیل جدایش بهتر ماده‌معدنی از باطله و همچنین کاهش میزان ترقیق رخ داده، بیشتر شود. اما به دلیل پیچیده بودن شکل کانسار و نیز خطای موجود در مدلسازی کانسار، این انتظار برآورده نشده است. اگرچه ارتفاع پله ۱۵ متری میزان بازیابی بیشتری دارد اما الزاما به معنا سودآوری بیشتر این ارتفاع نیست و سناریوها باید از نظر اقتصادی نیز مورد تحلیل قرار گیرند تا بهترین سناریو از نظر اقتصادی انتخاب شود.



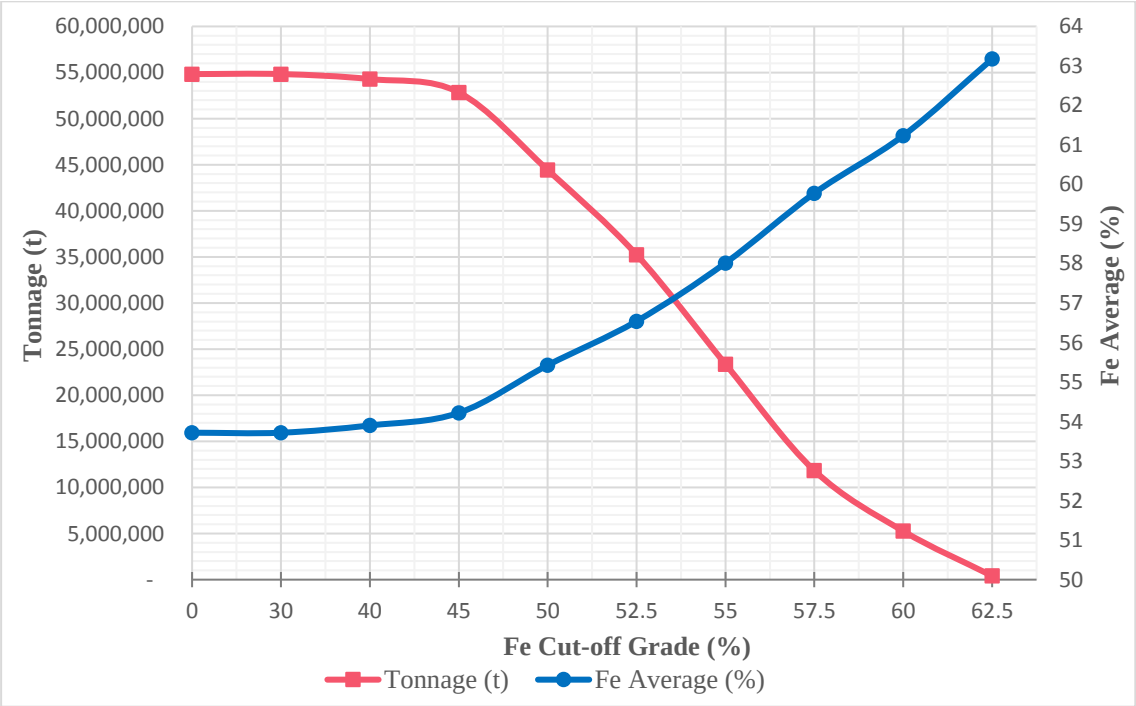
شکل ۴-۳۳ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده برای سناریوی ارتفاع پله ۶ متری



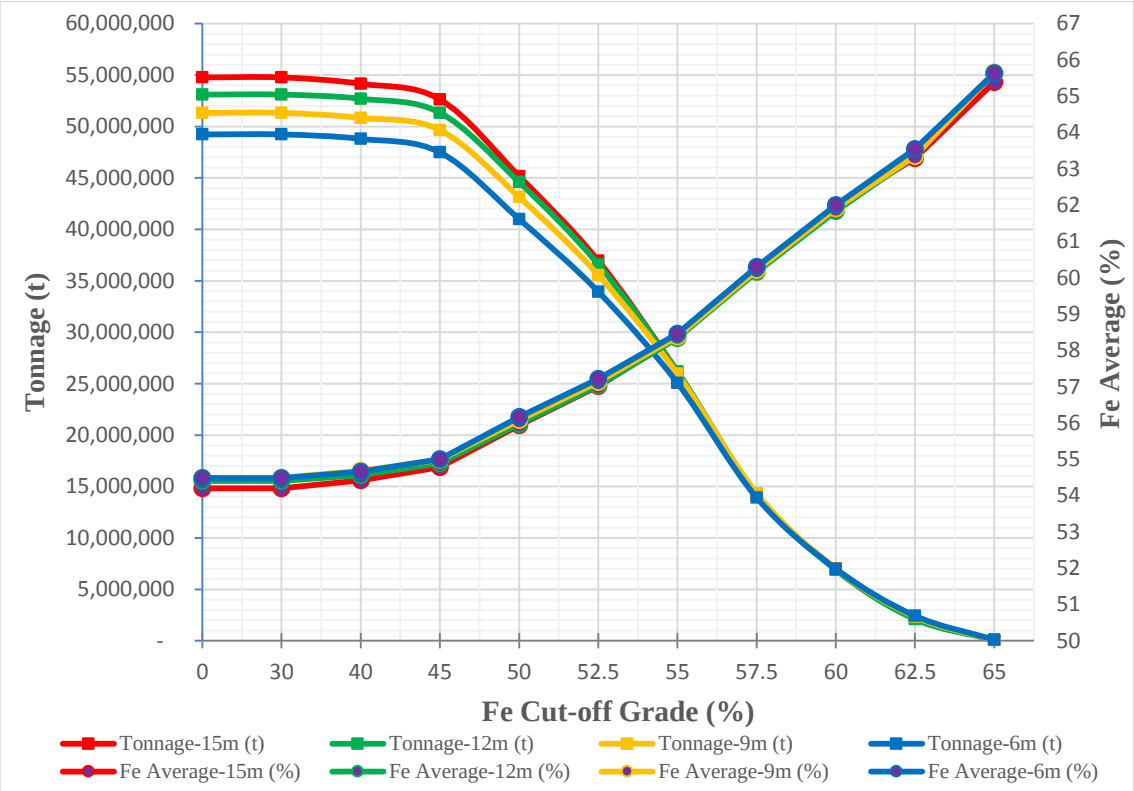
شکل ۴-۳۴ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده برای سناریوی ارتفاع پله ۹ متری



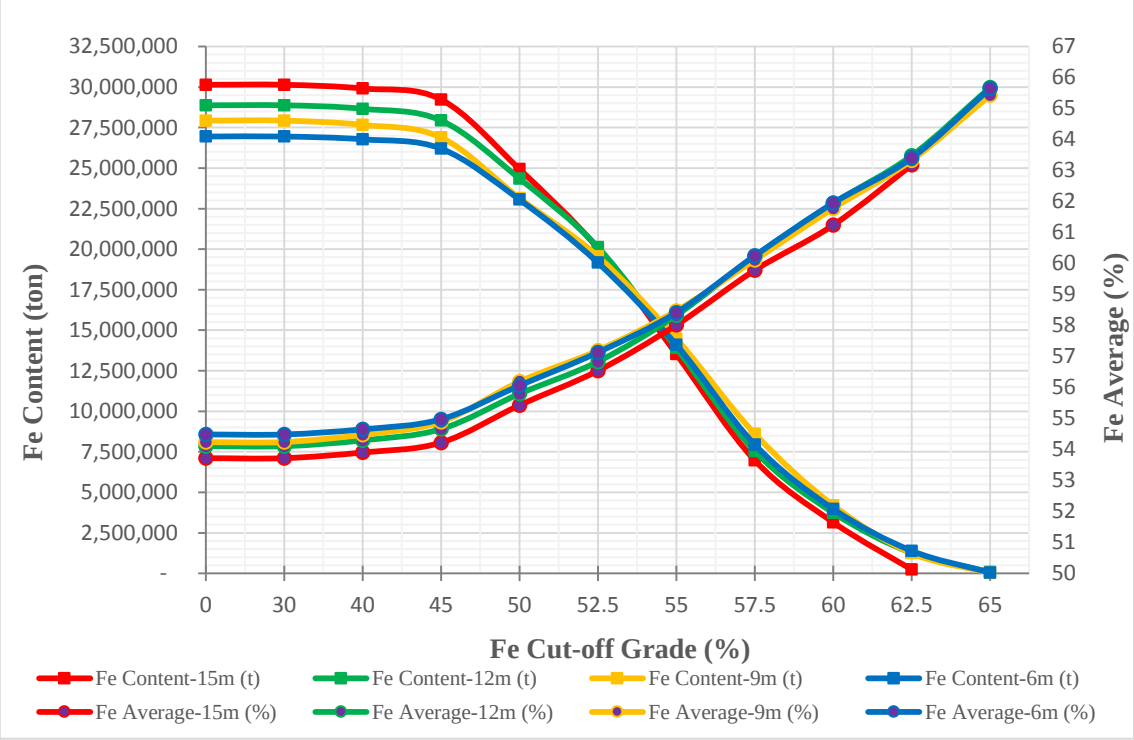
شکل ۴-۳۵ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده برای سناریوی ارتفاع پله ۱۲ متری



شکل ۴-۳۶ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده آهن برای سناریوی ارتفاع پله ۱۵ متری



شکل ۴-۳۷ : منحنی عیار-تناژ بدست آمده آهن در تمام سناریوهای ارتفاع پله با طول کامپوزیت برابر با ارتفاع پله



شکل ۴-۳۸ : منحنی عیار-محتوای فلز آهن در تمام سناریوهای ارتفاع پله با طول کامپوزیت برابر با ارتفاع پله

جدول ۴-۹ : نتایج حاصل از تخمین ذخیره در ارتفاع پله‌های مختلف و عیارحدهای مختلف و با طول کامپوزیت برابر با ارتفاع پله

عیارحد		۰	۳۰	۴۰	۴۵	۵۰	۵۲/۵	۵۵	۵۷/۵	۶۰	۶۲/۵	۶۵
ارتفاع پله ۶ متری	عیار متوسط (٪)	۵۴/۴۸	۵۴/۴۸	۵۴/۶۵	۵۴/۹۷	۵۶/۰۶	۵۷/۱۳	۵۸/۴۱	۶۰/۲۵	۶۱/۹۵	۶۳/۴۰	۶۵/۶۵
	تناژ ماده‌معدنی (تن)	۴۹,۴۵۶,۸۰۰	۴۹,۴۵۶,۸۰۰	۴۸,۹۹۱,۲۰۰	۴۷,۶۵۶,۸۰۰	۴۱,۱۲۴,۰۰۰	۳۳,۵۴۴,۸۰۰	۲۴,۱۳۹,۲۰۰	۱۳,۱۸۸,۰۰۰	۶,۴۱۷,۶۰۰	۲,۲۰۳,۲۰۰	۷۶,۸۰۰
	محتوای فلز (تن)	۲۶,۹۴۶,۰۲۰	۲۶,۹۴۶,۰۲۰	۲۶,۷۷۳,۳۷۹	۲۶,۱۹۸,۳۰۲	۲۳,۰۵۴,۳۵۴	۱۹,۱۶۴,۴۲۶	۱۴,۱۰۰,۲۵۰	۷,۹۴۵,۳۸۸	۳,۹۷۵,۶۱۶	۱,۳۹۶,۸۶۵	۵۰,۴۱۸
ارتفاع پله ۹ متری	عیار متوسط (٪)	۵۴/۲۴	۵۴/۲۴	۵۴/۴۸	۵۴/۸۹	۵۶/۱۹	۵۷/۱۹	۵۸/۴۷	۶۰/۱۱	۶۱/۷۸	۶۳/۳۳	۶۵/۴۳
	تناژ ماده‌معدنی (تن)	۵۱,۴۹۴,۴۰۰	۵۱,۴۹۴,۴۰۰	۵۰,۷۸۱,۶۰۰	۴۸,۹۸۵,۲۰۰	۴۱,۱۹۴,۸۰۰	۳۴,۱۸۲,۰۰۰	۲۴,۷۷۱,۶۰۰	۱۴,۳۲۸,۰۰۰	۶,۷۹۶,۸۰۰	۱,۹۶۹,۲۰۰	۵۰,۴۰۰
	محتوای فلز (تن)	۲۷,۹۲۸,۵۶۵	۲۷,۹۲۶,۴۳۶	۲۷,۶۶۳,۵۱۹	۲۶,۸۸۷,۹۹۲	۲۳,۱۴۶,۶۴۵	۱۹,۵۵۰,۱۳۲	۱۴,۴۸۴,۷۴۸	۸,۶۱۳,۱۳۶	۴,۱۹۸,۹۵۶	۱,۲۴۷,۰۴۸	۳۲,۹۷۵
ارتفاع پله ۱۲ متری	عیار متوسط (٪)	۵۴/۱۱	۵۴/۱۱	۵۴/۲۹	۵۴/۶۶	۵۵/۷۹	۵۶/۸۳	۵۸/۳۳	۶۰/۲۳	۶۱/۹۴	۶۳/۴۸	۶۵/۶۸
	تناژ ماده‌معدنی (تن)	۵۳,۳۶۱,۶۰۰	۵۳,۳۶۱,۶۰۰	۵۲,۷۸۰,۸۰۰	۵۱,۱۱۰,۴۰۰	۴۳,۶۵۱,۲۰۰	۳۵,۴۰۴,۸۰۰	۲۳,۸۲۷,۲۰۰	۱۲,۵۳۲,۸۰۰	۶,۰۴۸,۰۰۰	۱,۹۹۲,۰۰۰	۱۳۴,۴۰۰
	محتوای فلز (تن)	۲۸,۸۷۱,۵۳۰	۲۸,۸۷۱,۵۳۰	۲۸,۶۵۶,۳۱۵	۲۷,۹۳۵,۳۲۲	۲۴,۳۵۴,۷۹۷	۲۰,۱۲۱,۵۰۰	۱۳,۸۹۷,۴۳۵	۷,۵۴۸,۶۶۲	۳,۷۴۶,۱۲۸	۱,۲۶۴,۴۲۶	۸۸,۲۷۴
ارتفاع پله ۱۵ متری	عیار متوسط (٪)	۵۳/۷۲	۵۳/۷۲	۵۳/۹۰	۵۴/۲۲	۵۵/۴۳	۵۶/۵۴	۵۸/۰۱	۵۹/۷۸	۶۱/۲۴	۶۳/۱۸	-
	تناژ ماده‌معدنی (تن)	۵۶,۱۰۶,۰۰۰	۵۶,۱۰۶,۰۰۰	۵۵,۴۸۸,۰۰۰	۵۳,۹۱۰,۰۰۰	۴۴,۹۸۸,۰۰۰	۳۵,۴۴۸,۰۰۰	۲۳,۳۱۰,۰۰۰	۱۱,۶۷۰,۰۰۰	۵,۱۴۸,۰۰۰	۳۹۰,۰۰۰	-
	محتوای فلز (تن)	۳۰,۱۳۹,۲۵۰	۳۰,۱۳۹,۲۵۰	۲۹,۹۰۹,۲۳۰	۲۹,۲۳۰,۱۳۰	۲۴,۹۳۵,۱۷۴	۲۰,۰۴۲,۳۸۳	۱۳,۵۲۲,۸۰۷	۶,۹۷۶,۴۶۲	۳,۱۵۲,۴۳۶	۲۴۶,۳۸۶	-

۴-۸- طراحی پیت

با استفاده از نرم‌افزار GEMS پیت‌هایی با مشخصات جدول ۴-۱۰ در هر یک از سناریوهای ارتفاع پله و بدون رمپ (جاده دسترسی) طراحی شد. در این طراحی، مدل بلوکی دارای ارتفاعی برابر با طول پله (و نیز طول کامپوزیت‌سازی) است. این طراحی جهت محاسبه اولیه میزان تناژ باطله و ماده‌معدنی در هر ارتفاع پله تنها به منظور برآورد تعداد ماشین‌آلات مورد نیاز انجام گرفته است و به عنوان پیت نهایی یا بهینه مطرح نیست. مقدار تناژ ماده‌معدنی و باطله بر اساس بیشترین مقدار ماده‌معدنی در عیارحد صفر محاسبه گردید. جدول ۴-۱۱ نتایج بدست آمده از این طراحی در ارتفاع پله‌های مختلف را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که مقدار باطله بدون در نظر گرفتن رمپ محاسبه شده است. برای اعمال میزان تناژ باطله اضافی که به دلیل احداث رمپ اعمال می‌شود، با فرض عرض جاده‌باربری ۲۵ متر، مقدار حجم باطله مازاد طبق رابطه (۲-۶ محاسبه شد و به میزان باطله اضافه شد.

جدول ۴-۱۰ : مشخصات پیت‌های طراحی شده در هر یک از سناریوهای ارتفاع پله جهت برآورد تناژ باطله و ماده‌معدنی

عمق معدن (متر)	شیب رخساره پله (درجه)	عرض پله ایمنی (متر)	شیب نهایی (سراسری) معدن در ارتفاع پله‌های مختلف (درجه)			
			۶	۹	۱۲	۱۵
۳۶۰	۴۵	$\frac{2}{3}$ ارتفاع پله	۳۱/۱۴	۳۱/۲۲	۳۱/۳۰	۳۱/۳۹

جدول ۴-۱۱ : میزان تناژ ماده‌معدنی و باطله در هر یک از سناریوهای ارتفاع پله با فرض عیارحد صفر

ارتفاع پله	۶ متر		۹ متر		۱۲ متر		۱۵ متر	
	ماده‌معدنی	باطله	ماده‌معدنی	باطله	ماده‌معدنی	باطله	ماده‌معدنی	باطله
(برحسب هزارتن)	۴۹,۴۵۰	۱۸۹,۹۶۵	۵۱,۴۹۵	۲۰۰,۳۵۰	۵۳,۳۶۰	۲۰۷,۶۲۵	۵۶,۱۰۵	۲۳۰,۷۸۰
نسبت باطله‌برداری	۳/۸۴		۳/۸۹		۳/۸۹		۴/۱۲	

۴-۹- جمع‌بندی

در این فصل ابتدا با توجه به اصول ارزیابی منابع معدنی، مدل بلوکی زمین‌شناسی توسط نرم‌افزار GEMS و بر اساس رویکرد ارائه شده برای تمامی سناریوها ساخته شد. سپس منحنی عیار و تناژ هر یک از سناریوها به منظور برآورد میزان بازیابی و ذخیره در عیارحدهای مختلف رسم شد. نتایج نشان

داد که ارتفاع پله ۱۵ در عیارحدهای پایین، میزان بازیابی بیشتری را دارا است. همچنین در عیارحدها بالاتر، ارتفاع پله ۶ متری به دلیل جدایش بهتر بین باطله و ماده‌معدنی میزان محتوای فلزی را شـــامل می‌شود. هدف این تحقیق انتخاب بهترین ارتفاع پله اقتصادی است لذا لازم است در فصل بعد با توجه نتایج حا صل از بازیابی و طراحی پیت به ارزیابی اقت صادی سناریوها پرداخته شود تا بهترین سناریو انتخاب شود.

فصل پنجم

ارزیابی اقتصادی و

معرفی بهترین سناریوی ارتفاع پله

۵-۱- مقدمه

در این فصل به بحث در مورد ارزیابی اقتصادی سناریوهای مختلفی که برای ارتفاع پله در نظر گرفته شده است، پرداخته می‌شود. هدف از این ارزیابی، تعیین ارتفاع پله‌ای است که با توجه به مناسب‌ترین دستگاه بارگیری به منظور دستیابی به حداکثر انتخابی شدن استخراج باعث بیشینه شدن ارزش خالص فعلی پروژه از طریق بازیابی ماده‌معدنی می شود. شایان ذکر ا ست که ق صد این تحقیق بررسی امکانسنجی کامل پروژه نیست، بلکه سعی دارد تبعات بکارگیری ارتفاع پله‌های مختلف را نشان دهد. اطلاعات ورودی برای مقایسه بین سناریوها شامل هزینه‌های معدنکاری در هر سناریو است.

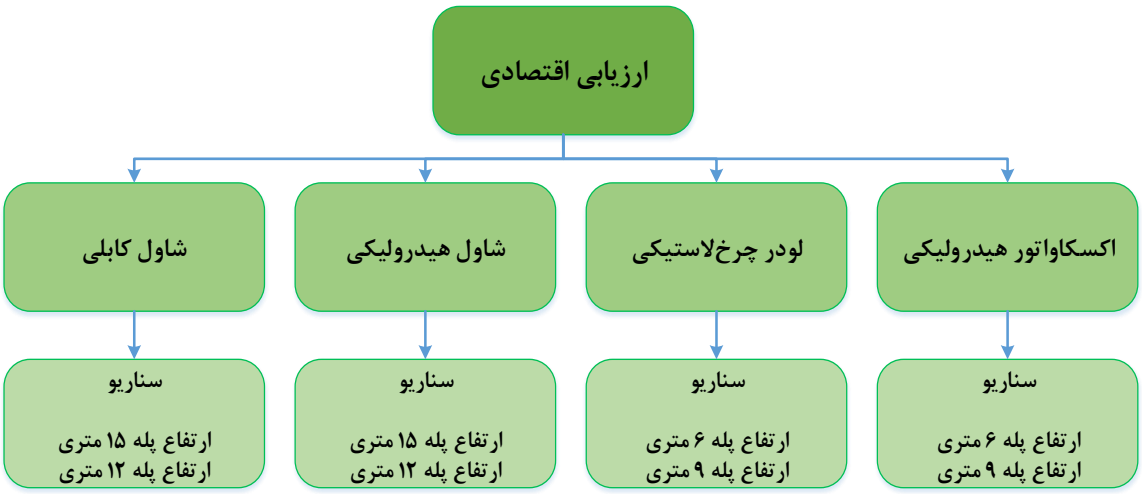
۵-۲- ارزیابی اقتصادی

سناریوها با استفاده از روش جریان نقدینگی تنزیل شده[۱] ارزیابی می‌شوند؛ یعنی هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری در هر سناریو در مقابل درآمد بدست آمده آن که ناشی از فروش سنگ آهن در بازار است، تنزیل داده شده است. سودآوری پروژه در هر سناریو از نظر ارزش خالص فعلی (NPV)

[۱] Discounted cash flow

محاسبه شد.

گزینه های مختلفی جهت ارزیابی اقتصادی پروژه، مشخص شد که شامل ترکیبی از یک شاول مناسب با توجه به اهداف استخراج انتخابی در بازه‌ای از ارتفاع پله‌های ۶ تا ۱۵ متری با فاصله‌های ۳متر از هم (گام ۳متری) بود. به منظور دستیابی به حداقل ترقیق و بیشترین بازیابی ممکن در هر سناریو، دو عدد از بهترین دستگاه بارگیری از نظر انتخابی بودن استخراج در هر ارتفاع پله انتخاب شد که در شکل ۵-۱ آمده است. البته این ارزیابی می‌تواند برای هر ۴ نوع شاول در هر یک از ارتفاع پله‌ها نیز بکار رود، ولی از آنجا که هدف این تحقیق دستیابی به میزان بازیابی بیشتر و کمترین ترقیق مرزی به عنوان معیارهایی برای انتخابی شدن استخراج است تنها در هر ارتفاع پله مناسب‌ترین دستگاه بارگیری از نظر انتخابی شدن استخراج مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که با انتخاب هر نوع از تجهیزات بارگیری، هزینه‌ها متفاوت خواهد بود، در نتیجه ارزش اقتصادی در هر سناریو نیز تغییر می‌کند. سپس آنالیز اقتصادی برای هر یک حالات انتخاب شده انجام می‌شود.



شکل ۵-۱ : سناریوهای انتخاب شده جهت ارزیابی اقتصادی

زمان اجرای برای فعالیت استخراجی ابتدای سال ۱۳۹۴ در نظر گرفته شد که به این معناست که این پروژه در فروردین سال ۱۳۹۴ با تمام سرمایه مربوطه که در یک سال مالی خرج می‌کند، آغاز بکار می‌کند. در هر سناریوی ارتفاع پله با فرض عیارحد ۱۵ در صد و منحنی‌های عیار و تناژ بدست آمده،

میزان منبع و بازیابی ماده‌معدنی تغییر می‌کند. بنابراین با فرض اســـتخراج ســـالانه ثابت (۳ میلیوتن ماده‌معدنی)، عمر معدن در هر سناریو متفاوت خواهد بود. برای تعیین برنامه‌ریزی سالیانه ا ستخراج و محاســبه دوره اســتهلاک و ســرمایه‌گذاری مجدد، عمر معدن در هر ســناریو محاســبه شــد. با توجه به میزان بازیابی ماده‌معدنی، مدت زمان اجرای پروژه در سناریوها بین ۱۶ تا ۱۹ سال خواهد بود (جدول ۵-۱). با توجه به عمر هر یک از دســتگاه‌ها، میزان اســتهلاک آن برآورد گردید و هزینه‌های ناشــی از خرید دستگاه جدید بطور ضمنی در هزینه‌های عملیاتی منعکس گردید. در ادامه ارزیابی‌های اقتصادی صورت گرفته بر اساس شرایط مالی سال ۱۳۹۴ بیان شده است.

جدول ۵-۱ : عمر متصور شده برای معدن در سناریوهای مختلف

سناریو	منبع معدنی (تن)	استخراج سالانه (تن)	عمر معدن (سال)
ارتفاع پله ۶ متر	۴۹,۴۵۶,۸۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۱۶/۴۸
ارتفاع پله ۹ متر	۵۱,۴۸۷,۲۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۱۷/۱۶
ارتفاع پله ۱۲ متر	۵۳,۳۶۱,۶۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۱۷/۷۸
ارتفاع پله ۱۵ متر	۵۶,۱۰۶,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۱۸/۷۰

۵-۲-۱- پیش‌بینی بازار فروش

تولیدات این معدن بطور ثابت تو سط کارخانجات فولاد محلی به فروش می‌ر سد. فرض شده که تقاضــای بازار ۲/۵ میلیون تن محصــول در ســال باشــد، که به معنای اســتخراج ســالیانه ۳ میلیون تن ماده‌معدنی با راندمان ۸۵٪ کارخانه فرآوری ا ست. بنابراین تناژ سالیانه قابل فروش برابر با ۲/۵ میلیون تن در سال است.

۵-۲-۲- برنامه‌های فیزیکی[۱] به عنوان مبنایی جهت جریان نقدینگی

برنامه فیزیکی تولید بر روی تقاضای ثابت بازار ۲/۵ میلیون تن در سال است. نسبت باطله‌برداری

[۱] Physical Plans

در هر سناریو با توجه به میزان بازیابی ماده‌معدنی بدست آمده، متغیر خواهد بود. برای رفع نیاز به جزییات برنامه‌ریزی تولید، از نسبت باطله‌برداری در هر سناریو استفاده شده است و فرض شد که میزان تقاضای بازار فروش ثابت است و امکان فروش بیشتر نیست. در نتیجه میزان تناژ ماده‌معدنی و باطله تولیدی در سال ثابت فرض شده است. نتایج حاصل از این برنامه‌ریزی در پیوست ۳ آمده است.

۵-۳- هزینه سرمایه‌گذاری

یک پروژه معدنی نیاز به هزینه‌های سرمایه‌ای گسترده‌ای[۱] از جمله خرید تجهیزات، تسطیح اراضی و احداث ساختمان[۲]، تاسیسات[۳]، کارخانه تغلیظ و فرآوری و ... دارد. هدف ارزیابی اقتصادی در این تحقیق، تعیین امکان‌سنجی تفصیلی و کامل پروژه نیست و تنها قصد دارد تا مزیت بکارگیری درست تجهیزات در هر سناریو را نشان دهد. بنابراین فقط از هزینه‌های سرمایه‌ای مورد نیاز جهت خرید ماشین‌آلات حفاری، بارگیری و باربری استفاده شده است و فرض گردید که سایر هزینه‌ها سرمایه‌گذاری برای تمام سناریوها یکسان و مشابه باشد (مثل هزینه تسطیح اراضی، احداث کارخانه و ....) و در نتیجه این هزینه‌ها تاثیری در مقایسه سناریوها ندارند. جدول جدول ۵-۲ قیمت هر قلم از تجهیزات خریداری شده را نشان می‌دهد (Mine and Mill Equipment Cost Estimator, InfoMine.com). این قیمت‌ها برحسب دلار و مربوط به سال ۲۰۱۱ هستند و توسط بررسی شاخص قیمت تولیدکننده (PPI) به روزرسانی شده‌اند.

[۱] extensive capital outlay
[۲] infrastructure
[۳] services

جدول ۵-۲ : قیمت هر قلم از ماشین‌آلات حفاری، بارگیری و باربری

نام دستگاه	قیمت ($)*
کامیون باربری	۱,۱۲۰,۰۰۰
شاول کابلی	۶,۱۵۰,۰۰۰
شاول هیدرولیکی	۳,۱۶۰,۰۰۰
اکسکاواتور هیدرولیکی (کج‌بیل)	۳,۱۶۰,۰۰۰
لودر چرخ‌لاستیکی	۱,۵۲۰,۰۰۰
دکل چالزنی ۲۵۱میلیمتری	۶۸۰,۰۰۰
دکل چالزنی ۱۶۵میلیمتری	۱۵۵,۰۰۰
دکل چالزنی ۱۱۴میلیمتری	۱۵۵,۰۰۰

*قیمت‌ها بطور تقریبی و از مقایسه پروژه‌های مشابه و نیز استفاده از منبع (Mine and Mill Equipment Costs 2006 (InfoMine.com و استفاده از شاخص قیمت‌ها (PPI) به‌روزرسانی شده‌اند

تعداد ماشـــین‌آلات مورد نیاز با توجه به دســـتگاه بارگیری و میزان تناژ ماده‌معدنی و باطله در هر سال برای هر سناریو محاسبه شد که در جداولجدول ۵-۳ تاجدول ۵-۷ ارائه گردیده است. با توجه به ســـناریوهای انتخاب شـــده به ازای هر یک از ماشـــین‌آلات بارگیری، بهترین گزینه‌ها در هر ارتفاع پله مشخص گردیده است.

جدول ۵-۳ : محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز در هر سناریو برای شاول کابلی با توجه به نرخ تولید کامیون

شاول کابلی				
ارتفاع پله	**۶ متر**	**۹ متر**	**۱۲ متر**	**۱۵ متر**
تناژ سالیانه باطله (ton/annum)	۱۱,۵۲۰,۰۰۰	۱۱,۶۷۰,۰۰۰	۱۱,۶۷۰,۰۰۰	۱۲,۳۶۰,۰۰۰
تناژ سالیانه ماده‌معدنی (ton/annum)	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
نرخ تولید (ton/hour)	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
ساعات کاری در ماه (hour/month)	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
تعداد شاول	۴	۳	۳	۳
تعداد کامیون به ازای هر شاول	۲	۳	۳	۳
تعداد کل کامیون باربری	**۹**	**۱۰**	**۱۰**	**۱۰**

جدول ۵-۴ : محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز در هر سناریو برای کج‌بیل هیدرولیکی با توجه به نرخ تولید کامیون

کج‌بیل هیدرولیکی				
ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
تناژ سالیانه باطله (ton/annum)	۱۱,۵۲۰,۰۰۰	۱۱,۶۷۰,۰۰۰	۱۱,۶۷۰,۰۰۰	۱۲,۳۶۰,۰۰۰
تناژ سالیانه ماده‌معدنی (ton/annum)	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
نرخ تولید (ton/hour)	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
ساعات کاری در ماه (hour/month)	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
تعداد شاول	۲	۳	۳	۴
تعداد کامیون به ازای هر شاول	۳	۳	۳	۲
تعداد کل کامیون باربری	**۷**	**۱۰**	**۱۰**	**۹**

جدول ۵-۵ : محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز در هر سناریو برای شاول هیدرولیکی با توجه به نرخ تولید کامیون

شاول هیدرولیکی				
ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
تناژ سالیانه باطله (ton/annum)	۱۱,۵۲۰,۰۰۰	۱۱,۶۷۰,۰۰۰	۱۱,۶۷۰,۰۰۰	۱۲,۳۶۰,۰۰۰
تناژ سالیانه ماده‌معدنی (ton/annum)	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
نرخ تولید (ton/hour)	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
ساعات کاری در ماه (hour/month)	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
تعداد شاول	۳	۲	۲	۳
تعداد کامیون به ازای هر شاول	۳	۴	۴	۳
تعداد کل کامیون باربری	**۱۰**	**۹**	**۹**	**۱۰**

جدول ۵-۶ : محاسبه تعداد کامیون مورد نیاز در هر سناریو برای لودر چرخ‌لاستیکی با توجه به نرخ تولید کامیون

لودر چرخ‌لاستیکی				
ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
تناژ سالیانه باطله (ton/annum)	۱۱,۵۲۰,۰۰۰	۱۱,۶۷۰,۰۰۰	۱۱,۶۷۰,۰۰۰	۱۲,۳۶۰,۰۰۰
تناژ سالیانه ماده‌معدنی (ton/annum)	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
نرخ تولید (ton/hour)	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰	۵۰۰
ساعات کاری در ماه (hour/month)	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
تعداد شاول (لودر)	۳	۳	۴	۵
تعداد کامیون به ازای هر شاول	۳	۳	۲	۲
تعداد کل کامیون باربری	**۱۰**	**۱۰**	**۹**	**۱۱**

جدول ۵-۷ : تعداد دکل چالزنی و حفاری مورد نیاز در هر سناریوی ارتفاع پله بر اساس نتایج طراحی الگوی انفجار

ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
قطر چال	۱۱۴mm	۱۶۵mm	۲۵۱mm	۲۵۱mm
تن بر متر چالزنی شده (t/m)	۳۰	۵۳	۱۱۴	۱۳۱
تناژ باطله و ماده معدنی (تن بر سال)	۱۴,۵۰۰,۰۰۰	۱۴,۷۰۰,۰۰۰	۱۵,۲۰۰,۰۰۰	۱۵,۸۰۰,۰۰۰
نیاز سالیانه (meters/years)	۴۸۳,۳۳۳	۲۷۷,۳۵۹	۱۳۳,۳۳۳	۱۲۰,۶۱۰
نیاز ماهیانه (meters/month)	۴۰,۲۷۷	۲۳,۱۱۳	۱۱,۱۱۱	۱۰,۰۵۰
متراژ حفاری در هر ساعت* (m/hour)	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
ساعات کاری مورد نیاز حفاری ماهانه (hours)	۲۵۱۷	۱۴۴۴	۶۹۵	۶۲۸
ساعات کاری هر دستگاه در ماه* (hour per drill)	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰	۳۳۰
تعداد دکل حفاری مورد نیاز	**۸**	**۵**	**۳**	**۲**

*این مقدار بر اساس پروژه‌های مشابه بدست آمده و فرض شده برای تمامی دستگاه‌های حفاری یکسان باشد

عمر اقتصادی پیش‌بینی شده برای کارخانه فرآوری بیش از ۱۹ سال است و بنابراین هیچ کارخانه جایگزین دیگری در این دوره ارزیابی نیاز نخواهد بود. جداولجدول ۵-۸ تاجدول ۵-۱۱ هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر اساس نوع ماشین بارگیری و تعداد مورد نیاز هر دستگاه در هر سناریو را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۸ : هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر اساس انتخاب شاول کابلی در سناریوهای ارتفاع پله

شاول کابلی				
ارتفاع پله	۶ متری	۹ متری	۱۲ متری	۱۵ متری
کامیون باربری	۱۰,۰۸۰,۰۰۰	۱۱,۲۰۰,۰۰۰	۱۱,۲۰۰,۰۰۰	۱۱,۲۰۰,۰۰۰
دکل چالزنی	۱,۲۴۰,۰۰۰	۷۷۵,۰۰۰	۲,۰۴۰,۰۰۰	۱,۳۶۰,۰۰۰
شاول	۲۴,۶۰۰,۰۰۰	۱۸,۴۵۰,۰۰۰	۱۸,۴۵۰,۰۰۰	۱۸,۴۵۰,۰۰۰
کل هزینه سرمایه‌گذاری	**۳۵,۹۲۰,۰۰۰**	**۳۰,۴۲۵,۰۰۰**	**۳۱,۶۹۰,۰۰۰**	**۳۱,۰۱۰,۰۰۰**

جدول ۵-۹ : هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر اساس انتخاب کج‌بیل هیدرولیکی در سناریوهای ارتفاع پله

اکسکاواتور هیدرولیکی (کج بیل)				
ارتفاع پله	۶ متری	۹ متری	۱۲ متری	۱۵ متری
کامیون باربری	۷,۸۴۰,۰۰۰	۱۱,۲۰۰,۰۰۰	۱۱,۲۰۰,۰۰۰	۱۱,۲۰۰,۰۰۰
دکل چالزنی	۱,۲۴۰,۰۰۰	۷۷۵,۰۰۰	۲,۰۴۰,۰۰۰	۱,۳۶۰,۰۰۰
شاول	۶,۳۲۰,۰۰۰	۹,۴۸۰,۰۰۰	۹,۴۸۰,۰۰۰	۱۲,۶۴۰,۰۰۰
کل هزینه سرمایه‌گذاری	**۱۵,۴۰۰,۰۰۰**	**۲۱,۴۵۵,۰۰۰**	**۲۲,۷۲۰,۰۰۰**	**۲۵,۲۰۰,۰۰۰**

جدول ۵-۱۰ : هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر اساس انتخاب شاول هیدرولیکی در سناریوهای ارتفاع پله

شاول هیدرولیکی				
ارتفاع پله	۶ متری	۹ متری	۱۲ متری	۱۵ متری
کامیون باربری	۱۱,۲۰۰,۰۰۰	۱۰,۰۸۰,۰۰۰	۱۰,۰۸۰,۰۰۰	۱۱,۲۰۰,۰۰۰
دکل چالزنی	۱,۲۴۰,۰۰۰	۷۷۵,۰۰۰	۲,۰۴۰,۰۰۰	۱,۳۶۰,۰۰۰
شاول	۹,۴۸۰,۰۰۰	۶,۳۲۰,۰۰۰	۶,۳۲۰,۰۰۰	۹,۴۸۰,۰۰۰
کل هزینه سرمایه‌گذاری	**۲۱,۹۲۰,۰۰۰**	**۱۷,۱۷۵,۰۰۰**	**۱۸,۴۴۰,۰۰۰**	**۲۲,۰۴۰,۰۰۰**

جدول ۵-۱۱ : هزینه‌های سرمایه‌گذاری بر اساس انتخاب لودر چرخ‌لاستیکی در سناریوهای ارتفاع پله

لودر چرخ‌لاستیکی				
ارتفاع پله	۶ متری	۹ متری	۱۲ متری	۱۵ متری
کامیون باربری	۱۱,۲۰۰,۰۰۰	۱۱,۲۰۰,۰۰۰	۱۰,۰۸۰,۰۰۰	۱۲,۳۲۰,۰۰۰
دکل چالزنی	۱,۲۴۰,۰۰۰	۷۷۵,۰۰۰	۲,۰۴۰,۰۰۰	۱,۳۶۰,۰۰۰
شاول	۴,۵۶۰,۰۰۰	۴,۵۶۰,۰۰۰	۶,۰۸۰,۰۰۰	۷,۶۰۰,۰۰۰
کل هزینه سرمایه‌گذاری	**۱۷,۰۰۰,۰۰۰**	**۱۶,۵۳۵,۰۰۰**	**۱۸,۲۰۰,۰۰۰**	**۲۱,۲۸۰,۰۰۰**

۵-۴- هزینه‌های عملیاتی و نگهداری[۱]

هزینه‌های عملیاتی و نگهداری طبق اصول اولیه نشان داده شده در جدول ۵-۱۲ محاسبه شد. این هزینه‌ها به ازای هر تن است. بین هزینه‌های بارگیری با سایر هزینه‌های استخراجی تمایزی ایجاد شد. این تمایز به این علت است که هزینه‌های بارگیری با انتخاب تجهیزات بارگیری و همچنین در هر ارتفاع پله‌ای متفاوت خواهد بود. سایر هزینه‌ها شامل هزینه‌های حفاری، انفجار، باربری و هزینه‌های ثانویه است و برای هر ارتفاع پله‌ای این هزینه‌ها محاسبه خواهد شد. با توجه به این نکته که تجهیزات بارگیری دارای ظرفیت جام مشابه با یکدیگرند (دستگاه‌های انتخاب شده در این تحقیق)، فرض شد که از کامیون های باربری مشابه و یکسانی در هر سناریو استفاده خواهد شد. در عمل انتخاب شاول و هزینه‌های باربری رابطه بسیار نزدیکی با همدیگر دارند. این امر به دلیل اصل تطبیق و سازگاری بین تجهیزات[۲] است که در آن اندازه کامیون باربری، بر اساس پارامترهای شاول تعیین می‌کند. تعداد نیروی کار[۳] مورد نیاز برای معدن با توجه به تعداد مورد نیاز کامیون باربری، شاول و دکل حفاری در هر سناریو محاسبه و برآورد گردید. هزینه نهایی تولید به طراحی انفجار و هزینه‌های بارگیری بسیار حساس است که آن‌ها نیز به نوبه خود به نرخ‌های (میزان) تولید در ارتفاع پله‌های مختلف حساس‌اند.

جدول ۵-۱۲ : نحوه محاسبه هزینه‌های عملیاتی و نگهداری

هزینه‌های عملیاتی و نگهداری	توضیحات
هزینه‌های بارگیری*	
سایر هزینه‌ها	
هزینه‌های باربری	بر اساس نرخ تولید شاول
هزینه‌های ثانویه	بر اساس ارتفاع پله‌ها
هزینه‌های چالزنی و انفجار	بر اساس طراحی و الگوی انفجار**

*هزینه‌های تولید برای هر یک از انواع شاول محاسبه شد و سپس بر اساس نرخ تولید در هر سناریوی ارتفاع پله تعدیل گشت

**طراحی انفجار برای هر ارتفاع پله صورت گرفت که در پیوست آورده شده است

[۱] Operating and maintenance costs

[۲] equipment matching

[۳] Manpower

نتایج بد ست آمده از برر سی هزینه‌های عملیاتی بر ا ساس پروژه‌های م شابه (Mine and Mill Equipment Costs 2006) و نیز قیمت‌های ارائه شـده توسـط شـرکت‌های پیمانکاری پس از اعمال شـاخص هزینه‌های تولیدی و بروزرسـانی قیمت‌ها، در جداولجدول ۵-۱۳ تاجدول ۵-۱۸ آورده شـده است. همچنین جدول ۵-۱۹ بطور جداگانه هزینه‌های عملیاتی هر دستگاه بارگیری را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۱۳ : هزینه‌های عملیاتی و نگهداری واحد حفاری و چالزنی

ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
قطر چال	۱۱۴mm	۱۶۵mm	۲۵۱mm	۲۵۱mm
تن بر متر چالزنی شده* (t/m)	۳۰	۵۳	۱۱۴	۱۳۱
هزینه‌ها در هر متر ($/meter)				
هزینه مواد مصرفی**	۱/۱۰	۱/۳۰	۳/۱۸	۳/۱۸
انرژی**	۰/۷۰	۰/۷۰	۰/۱۰	۰/۱۰
دستمزدها**	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳
تامین بودجه**	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۷	۰/۵۷
تعمیر و نگهداری**	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۶	۰/۳۶
مجموع هزینه هر متر ($/meter)	۳/۱۶	۳/۳۶	۴/۶۴	۴/۶۴
هزینه هر تن حفاری شده ($/ton)	۰/۱۰۵	۰/۰۶۴	۰/۰۴۱	۰/۰۳۵

* این ارقام از روی الگوی طراحی انفجار که در جدول قبلی آمده، بدست آورده شد

** این قیمت‌ها یا از قیمت‌های پیشنهادی شرکت‌های پیمانکاری بدست آمده یا از روی هزینه‌های واقعی در پروژه‌های مشابه

جدول ۵-۱۴ : هزینه‌های عملیاتی و نگهداری واحد انفجار

ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
قطر چال	۱۱۴mm	۱۶۵mm	۲۵۱mm	۲۵۱mm
تن بر متر چالزنی شده* (t/m)	۳۰	۵۴	۱۱۸	۱۳۴
وزن مواد منفجر شده* (t/hole)	۲۰۰	۵۳۰	۱۵۴۲	۲۱۷۶
ضریب فنی مواد منفجره* (ton/kg)	۴/۰۰	۳/۴۰	۳/۲۶	۳/۶۴
هزینه ماده منفجره** (@$0.4/kg)	۰/۱۰۰	۰/۱۱۸	۰/۱۲۳	۰/۱۰۱
لوازم جانبی** (@$2.6/hole)	۰/۰۱۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۰/۰۰۱
هزینه هر تن منفجر شده ($/ton)	۰/۱۱۳	۰/۱۲۳	۰/۱۲۵	۰/۱۰۲

*بدست آمده از الگوی طراحی انفجار، جدول ضمیمه

**قیمت از روی قیمت پروژه‌های مشابه واقعی بدست آمده که شامل قیمت خرج اصلی، بوستر، چاشنی و ... است

جدول ۵-۱۵ : هزینه‌های سایر تجهیزات ثانویه

ارتفاع پله				۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
	Hours/month	Rial/hour	Rial/m2				
نگهداری کامیون آبپاش	۲۰۰	۳۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰	۳۳۸	۲۲۶	۱۷۰	۱۳۵
کار کامیون آبپاش	۲۰۰	۱۲۵۰۰۰	۱۳۰۰	۴۳	۲۸	۲۰	۱۸
نگهداری بلدوزر	۳۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۱۸۰۰۰	۶۴۳	۴۳۰	۳۲۳	۲۵۷
کار بلدوزر	۳۰۰	۲۵۰۰۰۰	۴۰۰۰	۱۶۰	۱۰۷	۸۲	۶۴
هزینه کلی هر تن (Rial/ton)				**۱۱۸۴**	**۷۹۱**	**۳۰۵**	**۴۷۴**
هزینه کلی هر تن ($/ton)				**۰/۰۳۴**	**۰/۰۲۳**	**۰/۰۰۹**	**۰/۰۱۴**

جدول ۵-۱۶ : هزینه‌های عملیاتی و نگهداری ماشین‌آلات باربری

هزینه‌های تملک	قیمت هر دستگاه	$۱,۱۲۰,۰۰۰
	عمر دستگاه (ساعت)	۸۰۰۰۰
هزینه‌های کلی تملک دستگاه	**$/hour**	**۴۲**
تعمیر و نگهداری	هزینه سرویس	۴/۴
	هزینه تعمیر	۲۰
مواد مصرفی	گازوییل/برق	۲۵
	فرسودگی قطعات	۲/۵
	روغن و گریس‌کاری	
	تایر و لاستیک چرخ	۱۲
هزینه کلی عملیاتی	**$/hour**	**۶۳/۹**
هزینه کلی در هر ساعت	**$/hour**	**۱۰۵/۹**
میزان تولید*	۵۰۰	
هزینه کلی به ازای هر تن	**$/t**	**۰/۲۱۱**

* بر اساس شبیه‌سازی در نرم افزار Talpac با فرض مسافت حمل ۲۰۰۰ متر

جدول ۵-۱۷ : سایر هزینه‌ها بخش باربری

ارتفاع پله		۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
نیروی کارگر	$/t	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۱	۰/۱۱
هزینه‌های ثابت		۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲	۰/۱۲
هزینه کلی ($/t)		**۰/۲۳**	**۰/۲۳**	**۰/۲۳**	**۰/۲۳**

جدول ۵-۱۸ : خلاصه‌ای از مجموعه هزینه‌های عملیاتی در هر ارتفاع پله بجز هزینه‌های عملیاتی بارگیری

ارتفاع پله		۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
هزینه هر تن چالزنی ($/ton)		**۰/۱۰۵**	**۰/۰۶۴**	**۰/۰۴۱**	**۰/۰۳۵**
هزینه هر تن منفجر شده ($/ton)		**۰/۱۱۳**	**۰/۱۲۳**	**۰/۱۲۵**	**۰/۱۰۲**
هزینه ثانویه هرتن ($/ton)		**۰/۰۳۴**	**۰/۰۲۳**	**۰/۰۰۹**	**۰/۰۱۴**
هزینه باربری ($/ton)		**۰/۲۱۱**	**۰/۲۱۱**	**۰/۲۱۱**	**۰/۲۱۱**
سایر هرینه‌ها ($/ton)		**۰/۲۳**	**۰/۲۳**	**۰/۲۳**	**۰/۲۳**
مجموع		**۰/۶۹۳**	**۰/۶۵۱**	**۰/۶۱۶**	**۰/۵۹۲**

جدول ۵-۱۹ : هزینه‌های عملیاتی و تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات بارگیری

		شاول هیدرولیکی	لودر چرخ‌لاستیکی	شاول کابلی
		Hitachi EX2500	CAT 994D	P&H 2300
هزینه اختصاصی	قیمت دستگاه	۳,۱۶۰,۰۰۰	۱,۵۲۰,۰۰۰	۶,۱۵۰,۰۰۰
	عمر دستگاه	۵۰,۰۰۰	۴۵,۰۰۰	۱۱۰,۰۰۰
هزینه کلی خود دستگاه	**$/hour**	**۱۲۶/۴**	**۴۳/۹**	**۱۲۹**
تعمیر و نگهداری	هزینه سرویس	۶/۵	۴/۲	۶۵
	هزینه تعمیر	۶۰	۲۸	
مواد مصرفی	گازوییل/برق	۳۲	۲۶	۲
	GET and other	۲۵	۲۳	۲۳
	روغن و گریس‌کاری		۴	۱
	چرخ و تایر	۰	۵/۲	۰
هزینه کلی عملیاتی	**$/hour**	**۱۲۳/۵**	**۹۰/۴**	**۹۱**
هزینه کلی در هر ساعت		**۲۴۹/۹**	**۱۳۴/۳**	**۲۲۰**

شاول کابلی				
ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
تناژ سالیانه باطله (ton/annum)	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰
تناژ سالیانه ماده‌معدنی (ton/annum)	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
نرخ تولید (ton/hour)	۱,۲۴۵	۲,۰۱۸	۲,۲۶۷	۲,۲۶۷
ساعات کاری در ماه (hour/month)	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
تعداد شاول	۴	۳	۳	۳
تعداد کامیون به ازای هر شاول	۲	۳	۳	۳
هزینه بارگیری هر تن حمل شده	۰/۱۷۸	۰/۱۰۹	۰/۰۹۷	۰/۰۹۷

کج‌بیل هیدرولیکی				
ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
تناژ سالیانه باطله (ton/annum)	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰
تناژ سالیانه ماده‌معدنی (ton/annum)	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
نرخ تولید (ton/hour)	۲,۱۲۲	۲,۱۲۲	۱,۹۴۸	۱,۵۶۰
ساعات کاری در ماه (hour/month)	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
تعداد شاول	۲	۳	۳	۴
تعداد کامیون به ازای هر شاول	۳	۳	۳	۲
هزینه بارگیری هر تن حمل شده	۰/۱۱۸	۰/۱۱۸	۰/۱۲۸	۰/۱۶۰

شاول هیدرولیکی				
ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
تناژ سالیانه باطله (ton/annum)	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰
تناژ سالیانه ماده‌معدنی (ton/annum)	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
نرخ تولید (ton/hour)	۲,۰۵۵	۲,۶۳۵	۲,۶۳۵	۲,۱۰۸
ساعات کاری در ماه (hour/month)	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
تعداد شاول	۳	۲	۲	۳
تعداد کامیون به ازای هر شاول	۳	۴	۴	۳
هزینه بارگیری هر تن حمل شده	۰/۱۲۲	۰/۰۹۵	۰/۰۹۵	۰/۱۱۹

لودر چرخ‌لاستیکی				
ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
تناژ سالیانه باطله (ton/annum)	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰
تناژ سالیانه ماده‌معدنی (ton/annum)	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
نرخ تولید (ton/hour)	۱,۷۱۲	۱,۷۱۲	۱,۲۸۴	۱,۲۸۴
ساعات کاری در ماه (hour/month)	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰	۳۷۰
تعداد شاول	۳	۳	۴	۵
تعداد کامیون به ازای هر شاول	۳	۳	۲	۲
هزینه بارگیری هر تن حمل شده	۰/۰۷۸	۰/۰۷۸	۰/۱۰۵	۰/۱۰۵

۵-۵- درآمد

قیمت‌ها بر مبنای دلار آمریکا ($US) محاسبه شده است. فرض شد قیمت هر تن محصول قابل فروش برابر با ۲۳ دلار باشد (بر اساس مقایسه قیمت داخلی و بازار بورس لندن). بنابراین با ثابت بودن تولید سالیانه، مقدار درآمد سالیانه برابر با ۵۸/۶۵ میلیون دلار در سال است.

۵-۶- نتایج حاصل از ارزیابی

در فصول قبل مشخص شد که هر نوع شاول، برای محیط تولیدی خاصی مناسب است. سوال مهمی که مطرح می‌شود اینست که کدام ارتفاع پله منجر به بیشتر شدن ارزش پروژه معدنی می‌شود. نتایج حاصل از ارزیابی اقتصادی سبب اطلاع از این موضوع می‌شود. خلاصه نتایج در زیر آمده است.

۵-۶-۱- تغییرات هزینه تولید

با کاهش ارتفاع پله، هزینه‌های عملیاتی ($/t) افزایش می‌یابد و این ناشی از کاهش شدید بازدهی و راندمان[۱] حفاری و انفجار و همچنین کاهش نرخ‌های تولید در هر ارتفاع پله است. حجم کار ثانویه از

[۱] efficiency

نظر تمیز کردن کف پله[1]، آماده‌سازی پله و ... با کاهش مواد موجود در هر سطح (هر ارتفاع پله)، اغلب افزایش می‌یابد. نتایج بدست آمده از این باور کلی که با ارتفاع پله بلندتر سبب نرخ تولید بیشتر می شود و هزینه‌های عملیاتی را کاهش می‌دهد، حمایت می‌کند. جدول ۵-۲۰ هزینه‌های عملیاتی هر تن (برحسب دلار) را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۲۰ : هزینه عملیاتی در هر ارتفاع پله با توجه به بهترین دستگاه بارگیری انتخاب شده

ارتفاع پله	نوع دستگاه بارگیری	هزینه عملیاتی سالیانه
۶ متری	کج‌بیل هیدرولیکی	۱۱,۷۵۹,۵۰۰
	لودر چرخ‌لاستیکی	۱۱,۱۷۹,۵۰۰
۹ متری	کج‌بیل هیدرولیکی	۱۱,۳۰۴,۳۰۰
	لودر چرخ‌لاستیکی	۱۰,۷۱۶,۳۰۰
۱۲ متری	شاول کابلی	۱۰,۸۳۷,۶۰۰
	شاول هیدرولیکی	۱۰,۸۰۷,۲۰۰
۱۵ متری	شاول کابلی	۱۰,۸۲۳,۲۰۰
	شاول هیدرولیکی	۱۰,۷۶۰,۳۰۰

۵-۶-۲- تغییرات ارزش خالص فعلی

ارزش خالص فعلی هر سناریو از طریق کم کردن (تفریق) سرمایه‌گذاری اولیه از نقد رسیده تجمعی[2] که در یک نرخ بهره تنزیل داده شده، بدست می‌آید. این بدین معناست که هزینه سرمایه‌گذاری در آغاز و مقدار ماده‌معدنی استخراج شده برای تولید نقد رسیده، فاکتورهای تعیین‌کننده‌ای در محا سبه NPV ه ستند. نمونه‌ای از نتایج جدول نقدینگی تنزیل یافته (DCF) برای یک د ستگاه بارگیری در ارتفاع پله ۶ متر و برای د ستگاه بارگیری از نوع کج‌بیل هیدرولیکی در جدول ۵-۲۱ بصورت مشروح آورده شده است.

[1] floor cleanup

[2] cumulative cash inflow

جدول ۵-۲۱ : جدول جریان نقدینگی در ارتفاع پله ۶ متر برای بارکننده کج‌بیل هیدرولیکی

شرح	سال صفر	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
درآمد سالیانه		۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۵۸۶۵۰۰۰۰	۲۸۳۴۷۵۰۰	
هزینه‌های سرمایه‌گذاری																			
هزینه‌های سرمایه‌ای به ازای کج‌بیل در ارتفاع پله ۶ متر	۱۵۴۰۰۰۰۰																		
هزینه‌های عملیاتی																			
مجموع هزینه‌های عملیاتی چالزنی، انفجار و باربری ارتفاع پله ۶ متر		۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۱۰۰۴۸۵۰۰	۵۱۳۸۵۹۵	
هزینه‌های عملیاتی بارگیری کج‌بیل در ارتفاع پله ۶ متر		۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۱۷۱۱۰۰۰	۸۷۴۹۷۰	
مجموع هزینه‌های عملیاتی		۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۱۱۷۵۹۵۰۰	۶۰۱۳۵۶۵	
نقدینگی جریان	-۱۵۴۰۰۰۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۴۶۸۹۰۵۰۰	۲۲۳۳۳۹۳۵	
نقدینگی تنزیل یافته	-۱۵.۴۰۰.۰۰۰	۳۹۷۳۷۷۱۲	۳۳۶۷۶۰۲۷	۲۸۵۳۹۰۰۵	۲۴۱۸۵۵۹۸	۲۰۴۹۶۲۷۰	۱۷۳۶۹۷۲۰	۱۴۷۲۰۱۰۲	۱۲۴۷۴۶۶۲	۱۰۵۷۱۷۴۷	۸۹۵۹۱۰۸	۷۵۹۲۴۶۵	۶۴۳۴۲۹۲	۵۴۵۲۷۹۰	۴۶۲۱۰۰۸	۳۹۱۶۱۰۹	۳۳۱۸۷۳۶	۱۳۳۹۵۸۸	
NPV (برحسب دلار)	۲۲۸.۰۰۴.۹۴۱ $																		

نمودار هزینه عملیاتی بدســـت آمده در جدول ۵-۲۰ نشـــان داد که ارتفاع پله‌های بلندتر، هزینه عملیاتی کمتر را در کوتاه‌مدت دارا می‌با شد و این مو ضوع ممکن ا ست این ت صور را ایجاد کند که هر چه ارتفاع پله بلندتر باشد، بهتر است. اما هنگامیکه به NPV بدست آمده برای سناریوها نگاه می‌شود، نتایج ارزش خالص فعلی پروژه چیز دیگری را نشـــان می‌دهد. جدول ۵-۲۲ نشـــان می‌دهد بیشـــترین NPV مربوط به ارتفاع پله ۹ متر و ۱۲ متر اســـت و الزاما با افزایش ارتفاع پله، NPV افزایش نمی‌یابد. بنابراین مقایسه ارتفاع پله‌ها از منظر هزینه عملیاتی اقدامی نادر ست ا ست و باید مقایسه‌ها بر ا ساس ارزش خالص فعلی هر سناریو صورت پذیرد. با این کار در درازمدت به ارزش افزوده می‌شود، درحالیکه در کوتاه‌مدت به مبحث هزینه‌های تولید توجه شـــده اســـت. بنابراین اگرچه ارتفاع پله بلندتر در کوتاه‌مدت از نظر هزینه‌های تولید بهتر است، اما الزاما به بیشینه شدن ارزش خالص فعلی پروژه منجر نمی‌شـــود. ارتفاع پله ۱۲ متری با دســـتگاه بارگیری شـــاول هیدرولیکی به عنوان بهترین ارتفاع پله اقتصادی انتخاب می‌شود.

جدول ۵-۲۲ : نتایج حاصل از ارزش خالص فعلی سناریوهای ارتفاع پله

ارتفاع پله	نوع دستگاه بارگیری	NPV (دلار)
۶ متری	کج‌بیل هیدرولیکی	۲۲۸,۰۰۴,۹۴۱
	لودر چرخ‌لاستیکی	۲۲۹,۴۱۶,۸۹۷
۹ متری	کج‌بیل هیدرولیکی	۲۲۶,۲۱۵,۹۲۰
	لودر چرخ‌لاستیکی	۲۳۲,۲۱۰,۶۰۷
۱۲ متری	شاول کابلی	۲۲۰,۲۵۳,۸۴۱
	شاول هیدرولیکی	۲۳۳,۶۶۲,۸۶۲
۱۵ متری	شاول کابلی	۲۲۲,۵۵۵,۳۲۹
	شاول هیدرولیکی	۲۲۹,۶۹۰,۰۲۲

۵-۷- جمع‌بندی

در این فصل با توجه به هزینه‌های تخمین زده شده برای هر یک از سناریوهای ارتفاع پله و نیز انتخاب مناسب‌ترین دستگاه بارگیری با توجه به اهداف انتخابی شدن استخراج، هزینه‌های معدنکاری شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی محاسبه شد. از نظر هزینه‌های عملیاتی، نتایج از این باور کلی که با افزایش ارتفاع پله هزینه‌های تولید کاهش می‌یابد، حمایت کرد. اما از آنجا که هدف این تحقیق تعیین مناسب‌ترین ارتفاع پله اقتصادی است، بار رسم جدول جریان نقدیگی تنزیل‌یافته و محاسبه NPV برای هر سناریو، مشخص شد که ارتفاع پله ۱۲ متری با دستگاه بارگیری شاول هیدرولیکی دارای بالاترین ارزش خالص فعلی در بین تمام سناریوها است و به عنوان ارتفاع پله بهینه انتخاب می‌شود.

فصل ششم

جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات

۶-۱- جمع‌بندی

در این تحقیق عوامل مرتبط با ارتفاع پله در معادن روباز بیان شـد. هر یک از این عوامل تاثیرات مختلفی بر ارتفاع پله می‌گذارند. بنابراین انتخاب بهترین ارتفاع پله در یک معدن با توجه به این عوامل کار بسیار سخت و پیچیده‌ای است. رویکرد پیشنهاد شده در این تحقیق، به منظور بررسی سناریوهای قابل اجرای ارتفاع پله در معدن و انتخاب بهترین ارتفاع پله اقتصـادی ارائه گردیده اسـت. برای این منظور گام‌هایی در جهت انتخاب ارتفاع پله مناسـب در نظر گرفته شـد. گام نخسـت، مدلسـازی پیکره‌معدنی در ارتفاع پله‌های مختلف اسـت. گام دوم، سـاخت مدل بلوکی و انتخاب ابعاد مناسـب بلوک‌ها در هر سـناریوی ارتفاع پله اسـت. در ادامه با تخمین عیار بلوک‌ها در هر سـناریو، می‌توان منحنی عیار و تناژ ماده معدنی را ر سم کرد و محتوای فلز آن را بد ست آورد. ر سم منحنی عیار و تناژ ابزار مناسـبی جهت محاسـبه میزان بازیابی ماده‌معدنی در هر سـناریو اسـت. نتایج بدسـت آمده از منحنی‌های عیار و تناژ نشـان داد که با افزایش عیارحد، تناژ ماده‌معدنی و محتوای فلز معدن کاهش می‌یابد اما عیار متوسـط افزایش می‌یابد. این روند برای تمامی سـناریوهای ارتفاع پله صـادق اسـت. از طرفی در یک عیارحد ثابت، با افزایش ارتفاع پله میزان تناژ ماده‌معدنی ابتدا افزایش و سـپس کاهش می‌یابد. البته این تغییرات شدید نیست و بیشتر در عیارحدهای پایین دیده می‌شود.

به منظور برآورد تعداد ما شین‌آلات مورد نیاز در را ستای تامین میزان تولید مدنظر، پیت‌هایی در هر یک از سناریوهای ارتفاع پله تر سیم گردید. این پیت‌ها تنها جهت یک ارزیابی ذهنی از میزان تناژ ماده‌معدنی و باطله‌ای که می‌بایست حمل گردد رسم شده‌اند. سپس میزان تناژ باطله و ماده‌معدنی در هر ارتفاع پله و با در نظر گرفتن عیارحد صفر (که شامل تمام ماده‌معدنی است) محاسبه شد. لازم بود تا میزان تناژ باطله‌ای که در اثر ایجاد رمپ به مدل افزوده می‌شود، محاسبه شود. لذا از روابط بیان شده در فصل دوم جهت محاسبه تناژ ناشی از احداث جاده باربری استفاده شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع پله، نسبت باطله‌برداری نیز افزایش یافته است.

بحث جامع و کاملی در مورد انتخابی شدن استخراج با توجه به پرکاربردترین ماشین‌آلات بارگیری موجود انجام شد. میزان انتخابی شدن هر یک ماشین‌آلات بارگیری در ارتفاع پله‌های مختلف تخمین زده شد. از نتایج بدست آمده جهت انتخاب مناسب‌ترین دستگاه بارگیری که نیازهای استخراج انتخابی را در نظر می‌گیرد، استفاده شد. بنابراین جهت ارزیابی اقتصادی سناریوهای ارتفاع پله، مناسب‌ترین ماشین‌آلات بارگیری انتخاب و تحلیل‌های مالی روی آن صورت گرفت. همچنین جهت ارزیابی اقتصادی واحد چالزنی و انفجار در مراحل بعدی، نیاز به طراحی مناسب‌ترین الگوی چالزنی و انفجار در هر سناریو ارتفاع پله بود. بنابراین رابطه بین ارتفاع پله و فاکتورهای طراحی انفجار بررسی شد و طراحی در هر ارتفاع پله صورت گرفت.

با در نظر گرفتن میزان تولید ۳ میلیون ماده‌معدنی در سال، عمر معدن در هر سناریو ارزیابی گردید. برنامه‌ریزی سالیانه بر اساس تولید سالیانه ثابت صورت گرفت. با توجه به پروژه‌های مشابه و نیز قیمت‌های ارائه شده توسط پیمانکاران، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی در هر سناریوی ارتفاع پله و با توجه به دستگاه بارگیری مناسب آن، محاسبه گردید. این هزینه‌ها فقط شامل خرید ماشین‌آلات و نیز هزینه‌های واحد چالزنی، انفجار، بارگیری و باربری بود و فرض شد سایر هزینه‌ها در تمام سناریو مشابه و یکسان است و لذا در مقایسه‌ها تاثیری ندارند. مقایسه نتایج بدست آمده از هزینه‌های تولید از

این باور کلی که با افزایش ارتفاع پله هزینه‌های عملیاتی کاهش می‌یابد، حمایت کرد. در ادامه لازم بود تا با ر سم جدول جریان نقدینگی تنزیل‌یافته در هر سناریو، منا سب‌ترین ارتفاع پله که بی شترین ارزش خالص فعلی را دارد انتخاب گردد. نتایج بدست آمده نشان داد که ارتفاع پله ۱۲ متری و دستگاه بارگیری شاول هیدرولیکی به عنوان منا سب‌ترین ارتفاع پله از نظر بی شینه سازی ارزش خالص فعلی است.

۶-۲- پیشنهادات

رویکرد بیان شـده در این تحقیق قابلیت کاربرد در تمامی معادن و در فازهای مختلف عملیاتی را دارد. لذا پیشنهاد می شود از این رویکرد برای سایر معادن نیز ا ستفاده شود و نتایج مورد مقایسه قرار گیرند. همچنین به عامل ترقیق و بازیابی به شکل جدی‌تر نگاه شود و اثرات آن بر ارزیابی‌های مالی در نظر گرفته شود. می‌توان از رویکرد پی شنهاد شده فارغ از منا سب‌ترین د ستگاه بارگیری هر ارتفاع پله، برای تمامی ما شین‌آلات بارگیری ا ستفاده کرد و ارزیابی اقت صادی دقیق‌تری از اثرات تغییر ارتفاع پله بیان کرد.

مراجع

Adhikari, G.R. 1999. *Selection of Blasthole Diameter for a Given Bench Height at Surface Mines*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36. Pp 843-847

Anoush Ebrahimi, P. 2013. *An Attempt to Standardize the Estimation Of Dilution Factor for Open Pit Mining Projects*. World Mining Congress. Montreal, Canada.

Arnold, C. Whitham, M. 1991. *Optimising Mining Selectivity with Particular Emphasis on Bench Height: A Case Study at the Telfer Gold Mine, Western Australia*. Mining Industry Optimisation Conference. Sydney, Australia, pp 89-97.

Atkinson, T. 1992. *Selection and sizing of excavating equipment*. SME Mining Engineering Handbook, 2nd Edition. Vol.2, Hartman, H.L. (ed.): 1311-1333.

Bertinshaw, R. and Lipton, I. 2007. *Estimating Mining Factors (Dilution and Ore Loss) in Open Pit Mines*. Large Open Pit Mining Conference.pp 13-17

Bilgin, A. Celebi,N. Pasamehmetoglu, A.G. 1988. *A model for drilling machine selection.Mine Planning and Equipment Selection*. Ed Singhal. Balkema, Rotterdam, pp 383-388.

Bozorgebrahimi, A. Hall, R.A. Morin, M.A. 2005. *Equipment size effects on open pit mining performance*, International Journal of Surface Mining. Reclamation and Environment, Vol, 19. Issue 1. Pp 41-56.

Bozorgebrahimi, A. 2004. *The evaluation of haulage truck size effects on open pit mining*. The University of British Columbia.

Bozorgebrahimi, A. Hall, R.A. Scoble, M. 2003. *Economies of Scale in Surface Mining Equipment, Dimensions and Impact Analysis*. 12th International Symposium on Mine Planing and Equipment Selection. Pp 323-329

Çebi, Y. Köse, H. Yalçin, E. 1994. *A computer program for the selection of open pit mining equipment and economical evaluation of open pit methods*. Mine Planning and Equipemnt Selection. Ed Pasamehmetoglu. Et al. Balkema, Rotterdam, pp 417-421

Chen, G and Liu, Q. 1993. *The relation of bench height to transport work content of ore and rock*, China Mining Magazine, 2(1): pp 41-44 (China Mining Association, in Chinese).

Chile`s, J.P. and Delfiner, P. 1999. *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. New York, Wiley. 695 pages.

Clarke, M.P. Denby, B. Schofield, D. 1990. *Decision making tools for surface mine equipment selection*. Mining Sciece and Technology. 10:323-335.

Cooksey, R. and McIntosh, C.L. 2011. *The Challenges of Selective Mining within the Globe Progress Gold Mine, Reefton, South Island, New Zealand*. Eighth International Mining Geology Conference, QUEENSTOWN, NEW ZEALAND. pp 75-83

Crawford, G.D. 2004. *Dilution and ore Recovery*. Pincock Allen and Holt, Pincock perspectives. Issue No. 60.

Crone, J.G.D. 1992. *Fundamentals of Openpit Planning and Scheduling*. Third Large Open Pit Mining Conference. Mackay, Queensland, Australia.

Domaschenz, D. (dion.domaschenz@lfr.liebherr.com) 2001. Liebherr Mining International. *Pers. Comm.*

Elbrond, J. 1994. *Economic effects of ore losses and rock dilution*. Can, Inst, Min, Metall, Bull. Vol 87, no. 978, pp 131–134

Emery, X and Soro Torres, J.F. 2005. *Models for support and information effects : a comparative study*. Math, Geology. Vol 37. No. 1. Pp 49-68

Erçelebi, S.G. Kirmanli, C. 2000. *Review of surface mining equipment selection technigues*. Mine Planning and Equipemnt Selection. Ed Pasamehmetoglu. Et al. Balkema, Rotterdam, pp 547-553.

Ford, E. 1986. *The Rope Shovel/Wheel Loader/Hydraulic Shovel Decision in opencast coal mining – Arnot Colliery.* The South African Institute of Mining and Metallurgy, Lecture 3.

Gilewicz, P. 2001. *Who Owns What: Ownership of Major Surface Mines and Mobile Equipment.* The Parker Bay Company, Erie, USA.

Gitman, L.J 2000. *Principles of managerial finance*, 9th edition, Addison Wesley publishing.

Glacken, I.M. Noppé, M. Titley, M. 2000. *Mining Bench Height Evaluation for the Wallaby Resource-A Conditional Simulation Case Study*, 4th International Mining Geology Conference, Coolum, Qld.

Goovaerts, p. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford University Press Inc: New York. 483 pp.

Hartman, H.L. 1992. *Mining Engineering Handbook*, (2nd Edition). Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc, (SME). Littleton, Colorado.

Hekmat, A. Osanloo, M. Moarefvand, P. 2011. *Investigating the Effect of Different Block Dimensions on the Economic Life of Open Pit Mines*. 35TH APCOM Symposium, Wollongong, NSW. Pp 287-295

Hendricks, C. Davidson, J. Scoble, M. 1988. *Electric mining shovel diggability studies.* Mine Planning and Equipment Selection. Ed Singhal. Balkema, Rotterdam, pp 327-333

Hendricks, D. Dhalstrand, A. 1979. *Selected Aspects of Production Planning Berkley Pit. Open Pit Mine Planning and Design*. Ed Crawford. Hustrulid. New York, pp 209-216.

Hrebar, M.J. 1997. *Large wheel loaders vs. cable shovels*. Mining Engineering, pp 58-64. SME Annual Meeting, March 1996.

Hustrulid, W. Kuchta, M. 2013. *Open Pit Mine Planning and Design (vol.1)*. Fundamentals. Balkema. Rotterdam p. 1003.

Isaaks, E H and Srivastava, R M, 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics* (Oxford University Press).

Jara, R.M. Couble, A. Emery, X. Magri, E.J and Ortiz, J.M. 2006. *Block size selection and its impact on open pit design and mine planning*. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. Vol 106. Pp 205-211

Kennedy, B.A. 1990. *Surface Mining*, (2nd .ed.), Society for Mining, Metallurgy, and Exploration Inc.(SME), Littleton, Colorado.

Khosrowshahi, S and Shaw, W.J. 2001. Conditional simulation for resource 166haracterization and grade control – Principles and practice, in *Mineral Resource and Ore Reserve Estimation – The AusIMM Guide to Good Practice* (ed: A C Edwards), pp 285-292 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Kose, H. Aksoy, C.O. Gönen, A. Kun, M. Malli, T. 2005. *Economic evaluation of optimum bench height in quarries*. The Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy (JSAIMM). Vol, 105. Pp 127- 135.

Lerch, H. Grossmann, I.F. 1965. *Optimum design of Open Pit Mines*. CIM Bulletin, Canadian Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 58.

Li, Z. 1990. *A methodlogy for the optimum control of shovel and truck operations in open-pit mining*. Mining Science and technology. 10:337-340.

Li, Z. 1995. *Truck-haulage economics of mining open pits by high bench*, CIM bull, 88(993): 50-52.

Lizotte, Y. 1988. *Economic and Technical relations between open-pit design and equipment selection*. Mine Planning and Equipment Selection. Ed Singhal. Balkema, Rotterdam, pp 3-12

Macfarlane, A.S. 2000, *a Mineral Resource Management, Value Chain and EVA*.

Maehlmann, H. 1998. *Application of large hydraulic excavators in open-pit mines and basic parameters for the selection of excavator and truck size*. Liebherr-France S.A. Colmar, France.

Matheron, G. 1984. *The selectivity of the distributions and the second principle of geostatistics*. Geostatistics for Natural Resources Characterization. Vol, 1. Pp 421-433

Noble, A. 2011. Society of Mining and Metallurgy and Exploration (SME) Mining Engineering Handbook, 6(6):380–383 (Society of Mining and Metallurgy and Exploration: Colorado).

Oceana Gold. 2007. *Mine geology department overview of Globe gold mine*, unpublished Oceana Gold (New Zealand) technical document.

Pakalnis, R. Poulin, R. & Hadjieorgiou, J. 1995. *Quantifying the Cost of Dilution in Underground Mines*. SME Annual Metallurgy and Exploration, Denver.

Parrish, I.S. 1993. *Tonnage factor- a matter of some gravity*. Minning Engneering Vol.45 (10), pp 1268–1271

Paterson, L. 2001. *Performance of bigger, faster and smarter new generation electric mining shovels*. P&H MinePro Services, Milwaukee, Wisconsin, U.S.A.

Reyhl, D. 2001. Materiality Definition. Internet: http://home.earthlink.net/~reyhl/peer_review/materiality.html#context. Access: January 2003.

Ribeiro, D.T. Costa, J.C. Vidigal, M and Roldão, D. 2009. *Predicting Iron Ore Losses and Dilution Factors Using Conditional Simulations*. Iron Ore Conference. Perth, WA. Pp 309-315

Rossi, M.E. Deutsch, C.V. 2014. *Mineral Resource Estimation*. Dordrecht: Springer. New York. 332 pages.

Scoble, M.J. Muftuoglo, Y. 1984. *Derivation of a diggability index for surface mine equipment selection*. Mining science and technology, Elsevier, 1, pp.305-322.

Scoble, M. J., & Moss, A. 1994. *Dilution in underground bulk mining: implications for production management; in Whateley*, M. K. G., and P. K.

Sharma, N.K., Mazumder, R., Panda, D.K. and Dubey, A.K. 2013. *Evaluation of Bench Height Selection for Limestone Resource Optimization – A Case Study.* National Council for Cement and Building Materials, New Delhi, India

Shaw, W.J. Khosrowshahi, S. 1992. *Optimsing Grade Control Procedures in Large and Small Open Pit Mines*. Third Large Open Pit Mining Conference. Mackay, Queensland, pp 251-254.

Shaw, W J and Khosrowshahi, S, 2004. New techniques in mining grade control: Optimal ore block design, in *Proceedings Orebody Modelling and Strategic Mine Planning*, pp 145-151 (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne).

Sinclair, A., & Blackwell, G. 2004. *Applied Mineral Inventory Estimation*. Cambridge University Press. 381 pp.

Singhal, R.K. Fytas, K. Collins, J.L. 1986. Optimizing Loading and Hauling Equipment Productivity in Surface Mining. SME Fall Meeting, St. Louis, Missouri, Preprint pp.86-350

Sullivan, T.W. 1990. *New technology and economies of scale in shovel–truck sizing*, Mine Planning and Equipment Selection. Ed Singhal. Vavra, Balkema, Rotterdam p 3-6

Swanepoel, W. 2003. *The influence of bench height and equipment selection on effective mineral resource utilization*. Master of Engineering. Mining Engineering, University of Pretoria.

Wiebmer, J. 1993. *Different Horses for Different Courses*. Caterpillar Inc. Peoria, Illinois, USA.

اصانلو، مرتضی. (۱۳۸۹). "روش‌های استخراج معادن سطحی". انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر. چاپ اول، تهران، ۴۸۱ صفحه.

حسنی‌پاک، علی‌اصغر و شرف‌الدین، محمد. (۱۳۸۰). "تحلیل داده‌های اکتشافی". موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران

حسنی‌پاک، علی‌اصغر. (۱۳۸۹). "زمین‌آمار (ژئوا ستاتیستیک)". موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران. چاپ سوم، ۳۱۴ صفحه.

خالوکاکایی، رضا. (۱۳۹۲). "جزوه درسی زمین‌آمار". دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

خالوکاکایی، رضا. (۱۳۹۱). "جزوه درسی معادن روباز پیشرفته". دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

رفیع زاده, احمد. حسین اکبری جور و اردشیر عسگری. (۱۳۸۴). طراحی بهینه محدوده نهایی و برنامه ریزی تولید معدن سنگ آهن گل گهر با استفاده از نرم‌افزار Whittle 4D، دومین کنفرانس معادن روباز ایران، کرمان، مجتمع مس سرچشمه.

سرداری، سمیرا. (۱۳۸۸). "بررسی تاثیر ارتفاع پله و ابعاد ماشین‌آلات در بهره‌وری ماده‌معدنی در معادن روباز". پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تهران، دانشکده فنی.

شادمان خاکستر، مرضیه. (۱۳۸۸). "مدلسازی عیار، مطالعات زمین‌آماری و ارزیابی ذخیره آنومالی آهن شماره ۱۲A، ایران مرکزی". پایان‌نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

عطایی، محمد و حسینی، سید محمدعلی. (۱۳۹۰). "طراحی محدوده و برنامه‌ریزی تولید در معادن روباز". انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر. ۳۳۰ صفحه.

عطایی، محمد و حسینی، سید محمدعلی. (۱۳۹۰). "عملیات و تحلیل‌های اقتصادی در معادن روباز". انتشارات جهاد دانشگاهی، واحد صنعتی امیرکبیر. ۳۲۶ صفحه.

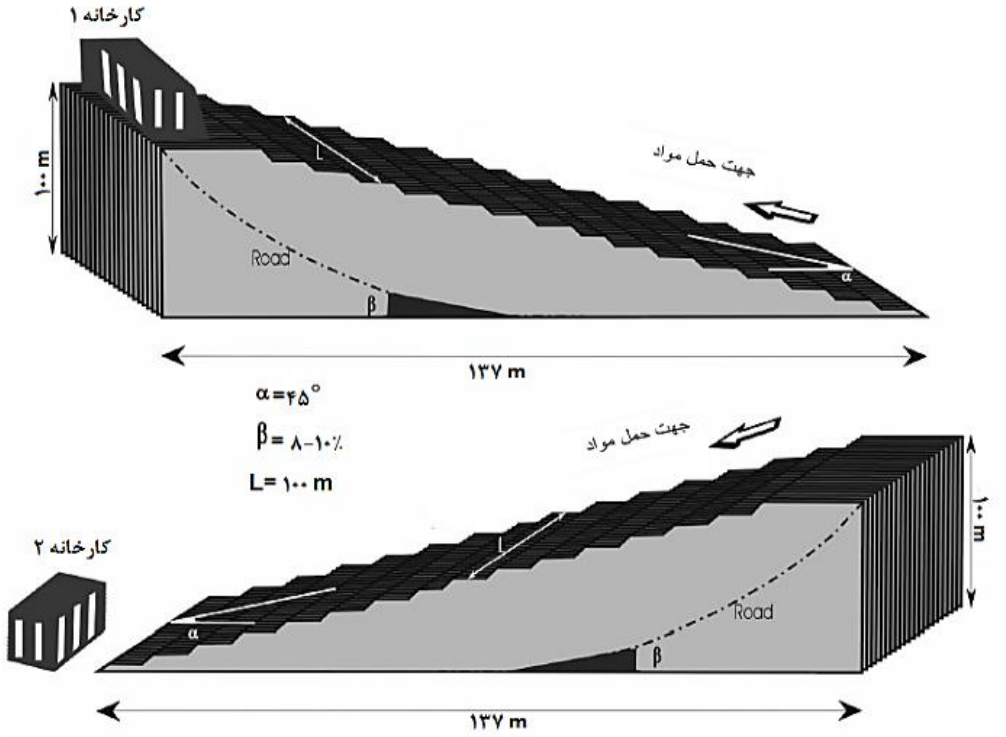
علی‌آبادی، محمدعلی و خدامی، مهناز و کرمی، مریم. (۱۳۹۰)، "مطالعات مقدماتی زمین‌شناسی و کانی‌شناسی معدن آهن سرویان". چهارمین همایش ملی زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان.

مجیدزاده، وحید و نجف‌آبادی، محسن. (۱۳۹۴). "اکتشاف، طراحی و استخراج معادن روباز با رویکرد استفاده از نرم‌افزار GEMCOM GEMS 6.5 در معادن سنگ آهن ". سازمان انتشارات جهاد دانشگاهی. ۳۸۱ صفحه.

هوسترولید، ویلیام و کوچتا، مارک. (۱۳۸۳). "طراحی و برنامه‌ریزی معادن روباز". ترجمه علی‌اصغر خدایاری و مهدی یاوری شهرضا. انتشارات دانشگاه صنایع و معادن ایران. چاپ اول، ۷۴۶ صفحه.

پیوست ۱

مدل‌های در نظر گرفته شده در کارهای گذشته



شکل ۸-۱ : مدلی فرضی که در نظر گرفته شده برای هر دو حالت استخراج کواری پیت و تپه‌ای (Kose et al, 2005)

شکل ۸-۲ : نمونه‌ای پرسش‌نامه و نحوه امتیازدهی آن توسط کارشناس (Soltanmohammadi et al, 2010)

پیوست ۲

نتایج شبیه‌سازی تولید در نرم‌افزار TALPAC

نتایج طراحی الگوی چالزنی و انفجار

نتایج بررسی داده‌های خام و کامپوزیت شده

وریوگرام‌های رسم شده در هر سناریو

نتایج حاصل از شبیه‌سازی قدرت تولید (بهره‌وری) در نرم افزار TALPAC

شاول هیدرولیکی	ظرفیت ($16m^3$)	ارتفاع پله			
		۶ متری	۹ متری	۱۲ متری	۱۵ متری
قدرت تولید ٪		٪۷۸	٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۸۰
نرخ تولید		۲۰۵۵	۲۶۳۵	۲۶۳۵	۲۱۰۸
زمان سیکل		۳۸	۳۰	۳۰	۳۷/۵
پرشوندگی جام		۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
تعداد کامیون بر شاول		۳	۴	۴	۳

شاول کابلی	ظرفیت ($18m^3$)	ارتفاع پله			
		۶ متری	۹ متری	۱۲ متری	۱۵ متری
قدرت تولید ٪		٪۵۵	٪۸۹	٪۱۰۰	٪۱۰۰
نرخ تولید		۱۲۴۵	۲۰۱۸	۲۲۶۷	۲۲۶۷
زمان سیکل		۸۵	۵۵	۴۵	۴۵
پرشوندگی جام		۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
تعداد کامیون بر شاول		۲	۳	۳	۳

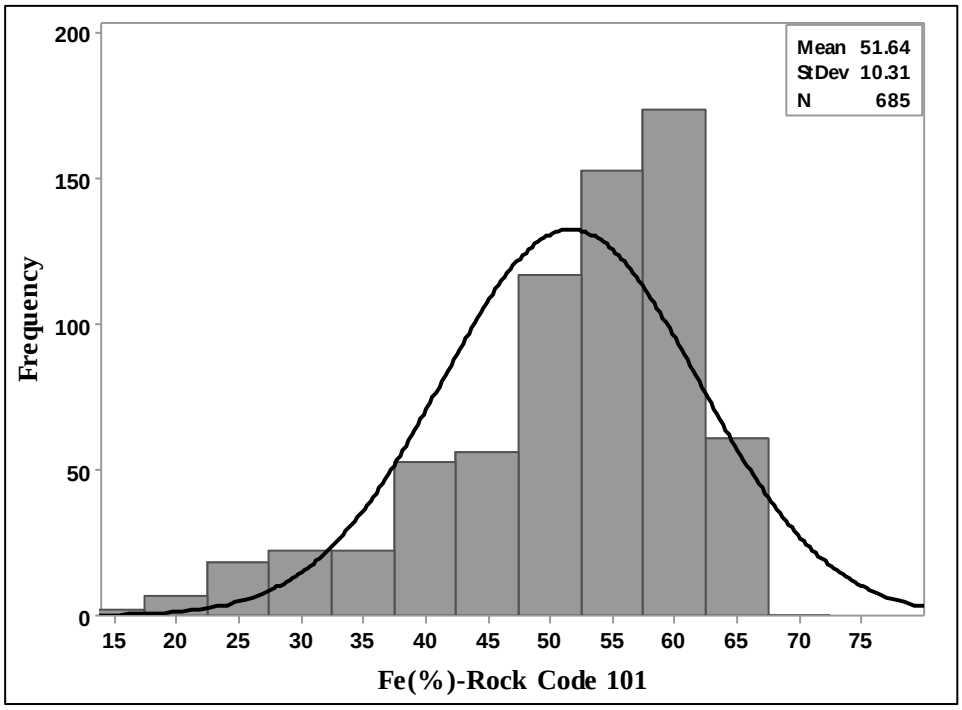
اکسکاواتور هیدرولیکی	ظرفیت ($15m^3$)	ارتفاع پله			
		۶ متری	۹ متری	۱۲ متری	۱۵ متری
قدرت تولید ٪		٪۹۰	٪۹۰	٪۸۰	٪۶۰
نرخ تولید		۲۱۲۲	۲۱۲۲	۱۹۴۸	۱۵۶۰
زمان سیکل		۳۳	۳۳	۳۷/۵	۵۰
پرشوندگی جام		۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
تعداد کامیون بر شاول		۳	۳	۳	۲

لودر چرخ‌لاستیکی	ظرفیت ($16m^3$)	ارتفاع پله			
		۶ متری	۹ متری	۱۲ متری	۱۵ متری
قدرت تولید ٪		٪۱۰۰	٪۱۰۰	٪۷۵	٪۷۵
نرخ تولید		۱۷۱۲	۱۷۱۲	۱۲۸۴	۱۲۸۴
زمان سیکل		۴۵	۴۵	۵۰	۵۰
پرشوندگی جام		۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
تعداد کامیون بر شاول		۳	۳	۲	۲

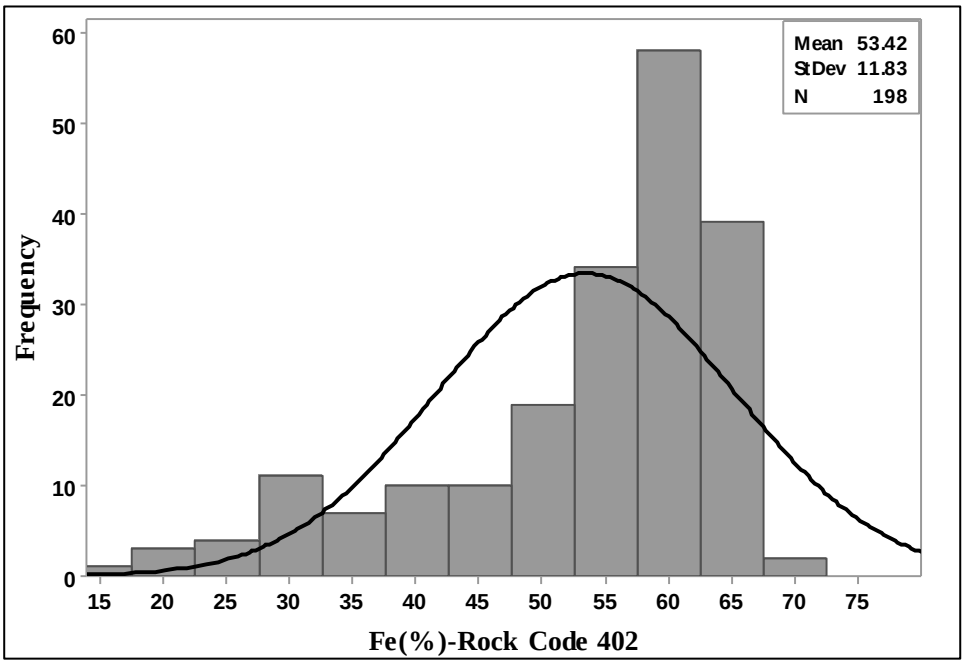
جدول ۹-۱ : چارچوب طراحی الگوی چالزنی و انفجار در هر سناریوی ارتفاع پله به منظور محاسبه هزینه‌های واحد حفاری و انفجار

فاکتورهای چالزنی و انفجار	پارامترهای طراحی	ارتفاع پله		ارتفاع پله		ارتفاع پله		ارتفاع پله	
		۶ متر	مقدار پارامتر	۹ متر	مقدار پارامتر	۱۲ متر	مقدار پارامتر	۱۵ متر	مقدار پارامتر
قطر چال انفجاری (mm)		۱۱۴		۱۶۵		۲۵۱		۲۵۱	
ضخامت بار سنگ (m)	۲۰-۳۰D	۲/۸۵	۲۵	۳/۸۰	۲۳	۵/۰۲	۲۰	۵/۵۲	۲۲
فاصله جناحی (m)	۱-۱/۵ B	۳/۴۲	۱/۲۰	۴/۵۶	۱/۲۰	۷/۵۳	۱/۵۰	۷/۷۳	۱/۴۰
ارتفاع پله (m)	۳ B	۶	۲/۱۰	۹	۲/۳۷	۱۲	۲/۴۰	۱۵	۲/۷۲
اضافه حفاری (m)	۰/۳-۰/۳۵ B	۰/۸۵	۰/۳۰	۱/۱۵	۰/۳۰	۱/۵۰	۰/۳۰	۱/۶۵	۰/۳۰
طول کلی هر چال (m)		۶/۸۵		۱۰/۱۵		۱۳/۵۰		۱۶/۶۵	
طول گل‌گذاری (m)	۰/۵-۱ B	۱/۸۵	۰/۶۵	۲/۸۵	۰/۷۵	۴/۰۲	۰/۸۰	۴/۹۵	۰/۹۰
طول خرج از کف پله تا بالا (m) = ارتفاع پله- طول گل‌گذاری	۱-۲ B	۴/۱۵	۱/۴۶	۶/۱۵	۱/۶۲	۷/۹۸	۱/۵۹	۱۰/۰۵	۱/۸۲
طول کلی خرج (m) = طول خرج از کف پله+اضافه حفاری		۵/۰۰		۷/۳۰		۹/۴۸		۱۱/۷۰	
متوسط چگالی خرج‌گذاری (t/m^3)	۱/۲	۱/۲۰		۱/۲۰		۱/۲۰		۱/۲۰	
وزن ماده‌منفجره در هر متر (Kg/m)		۱۲/۲۵		۲۵/۶۵		۵۹/۳۵		۵۹/۳۵	
وزن ماده منفجره بالاتر از کف پله در هر چال (kg) = طول خرج از کف × وزن ماده‌منفجره در هر متر		۵۰		۱۵۶		۴۷۳		۵۹۶	
وزن کلی ماده‌منفجره در هر چال (kg) = طول کلی خرج × وزن ماده‌منفجره در هر متر		۶۱		۱۸۷		۵۶۲		۶۹۴	
وزن موادی که منفجر شده‌اند ($t/hole$) = وزن مخصوص سنگ×حجم منفجر شده توسط هرچال (ضخامت بارسنگ×فاصله جناحی×ارتفاع پله)		۲۰۰		۵۳۰		۱۵۴۲		۲۱۷۶	
مصرف خرج ویژه kg/ton = وزن ماده‌منفجره از کف بر وزن موادی که منفجر شده‌اند		۰/۲۵		۰/۲۹		۰/۳۰		۰/۲۷	

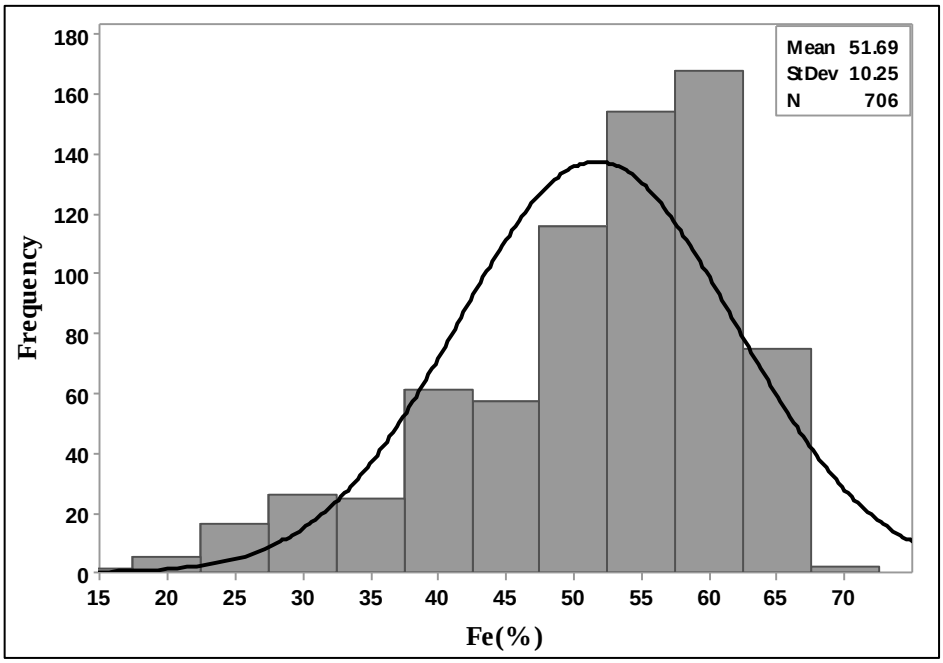
ضریب خرج ویژه ton/kg = $\frac{1}{\text{مصرف خرج ویژه}}$		۴/۰۰		۳/۴۰		۳/۲۶		۳/۶۴
ضریب خرج ویژه g/m^3 **(k) = مصرف خرج ویژه×وزن مخصوص سنگ**	۶۰۰–۹۰۰	۸۵۰		۹۸۶		۱۰۲۰		۹۱۸
مصرف خرج ویژه کلی kg/ton = $\frac{\text{وزن کل ماده‌منفجره در هر چال}}{\text{وزن موادی که منفجر شده‌اند}}$		۰/۳۱		۰/۳۵		۰/۳۶		۰/۳۲
تن بر متر (ton/m) = $\frac{\text{وزن موادی که منفجر شده‌اند}}{\text{طول کلی هر چال}}$		۳۰		۵۳		۱۱۴		۱۳۱
ضریب نسبی چالزنی		۲۶٪		۴۶٪		۱۰۰٪		۱۱۵٪



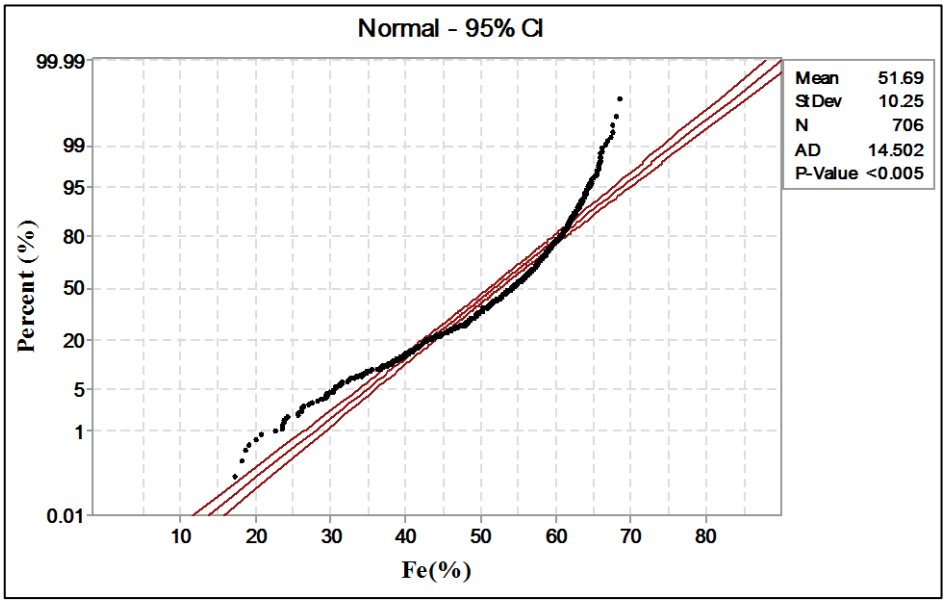
شکل ۹-۱ : فراوانی‌نمای داده‌های خام آهن (Fe) در جنس سنگ ۱۰۱



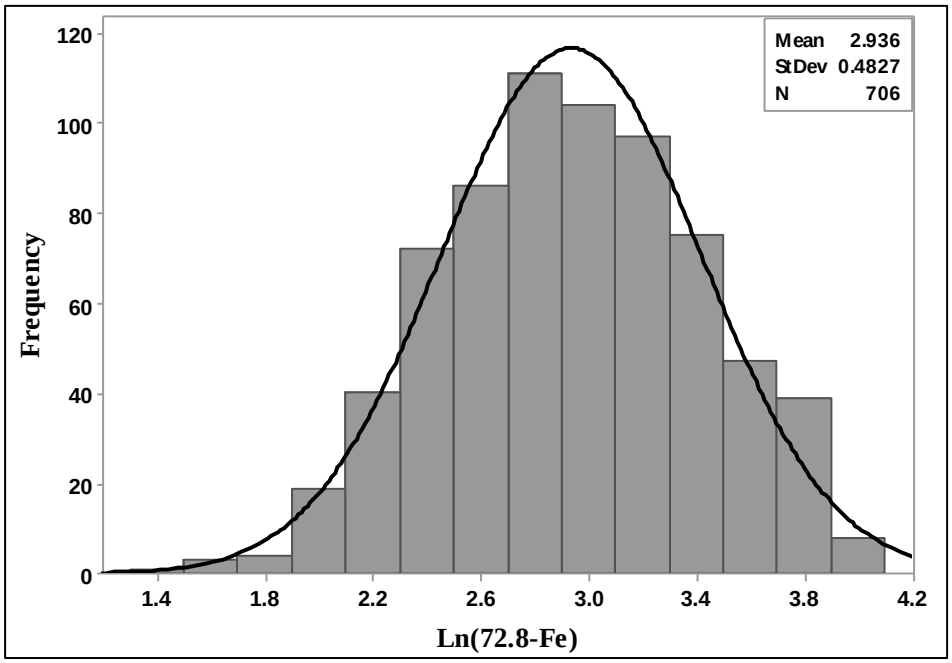
شکل ۹-۲ : فراوانی‌نمای داده‌های خام آهن (Fe) در جنس سنگ ۴۰۲



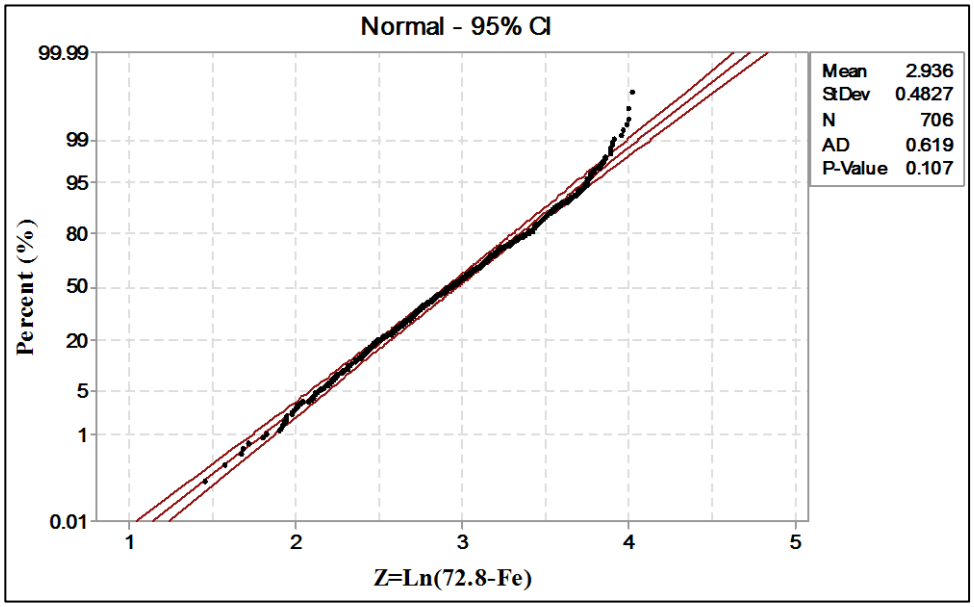
شکل ۹-۳ : فراوانی‌نمای کامپوزیت‌های ۶ متری در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر



شکل ۹-۴ : نمودار فراوانی تجمعی کامپوزیت‌های ۶ متری آهن در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر



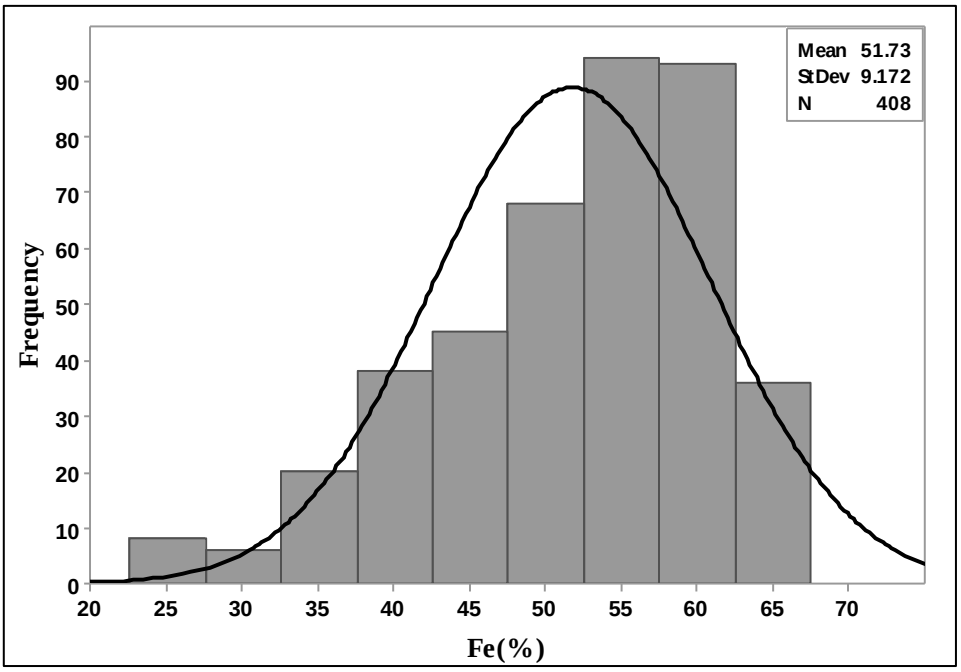
شکل ۹-۵ : فراوانی‌نمای مقادیر تبدیل یافته آهن در کامپوزیت‌های ۶ متری به روش لگاریتمی سه متغیره



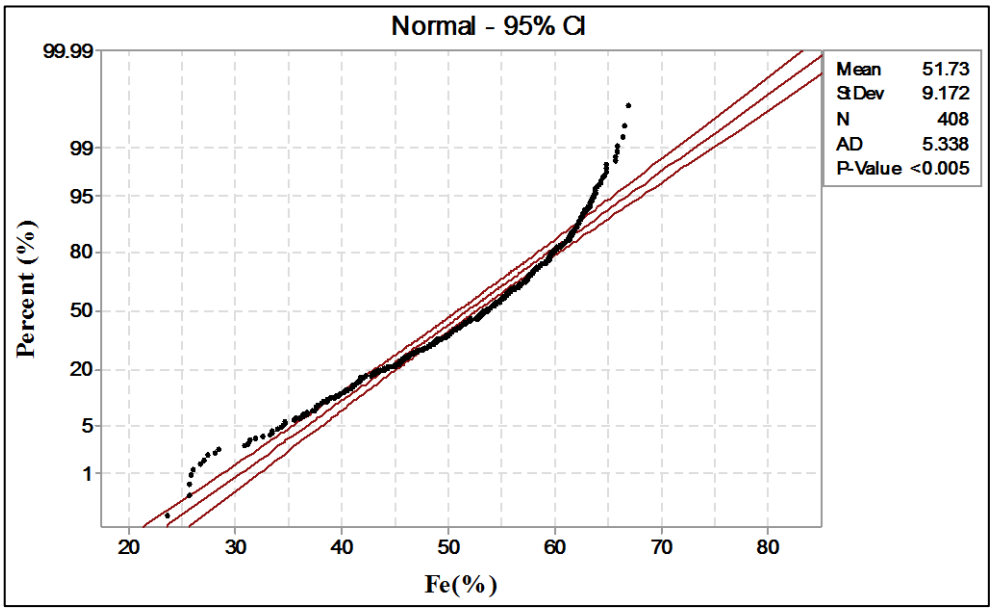
شکل ۹-۶ : نمودار فراوانی تجمعی مقادیر تبدیل یافته کامپوزیت‌های ۶ متری آهن به روش لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

جدول ۹-۲ : مقایسه پارامترهای آماری داده‌های کامپوزیت شده ۶ متری آهن با توزیع طبیعی و لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

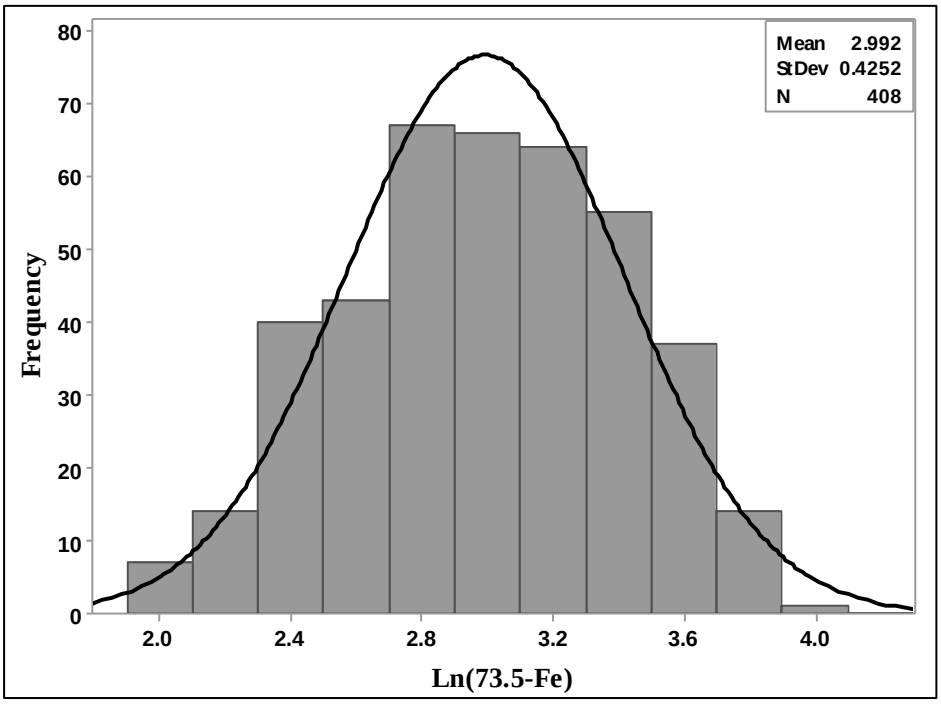
مدل توزیع	میانگین (٪)	میانه (٪)	واریانس (٪^{۲})	انحراف معیار (٪)	چولگی	کشیدگی
طبیعی	۵۱/۶۹	۵۴/۰۷	۱۰۵/۰۴	۱۰/۲۵	-۰/۹۶	۰/۴۸
لگاریتمی سه متغیره	۲/۹۴	۲/۹۳	۰/۲۳	۰/۰۱۸	-۰/۰۷	-۰/۴۳



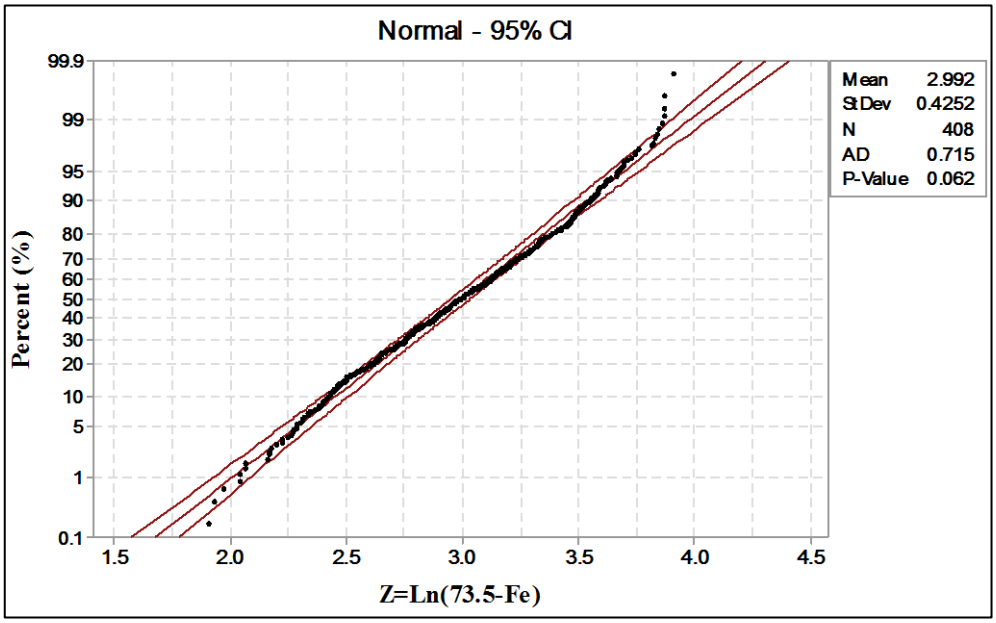
شکل ۹-۷ : فراوانی‌نمای کامپوزیت‌های ۹متری در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر



شکل ۹-۸ : نمودار فراوانی تجمعی کامپوزیت‌های ۹ متری آهن در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر



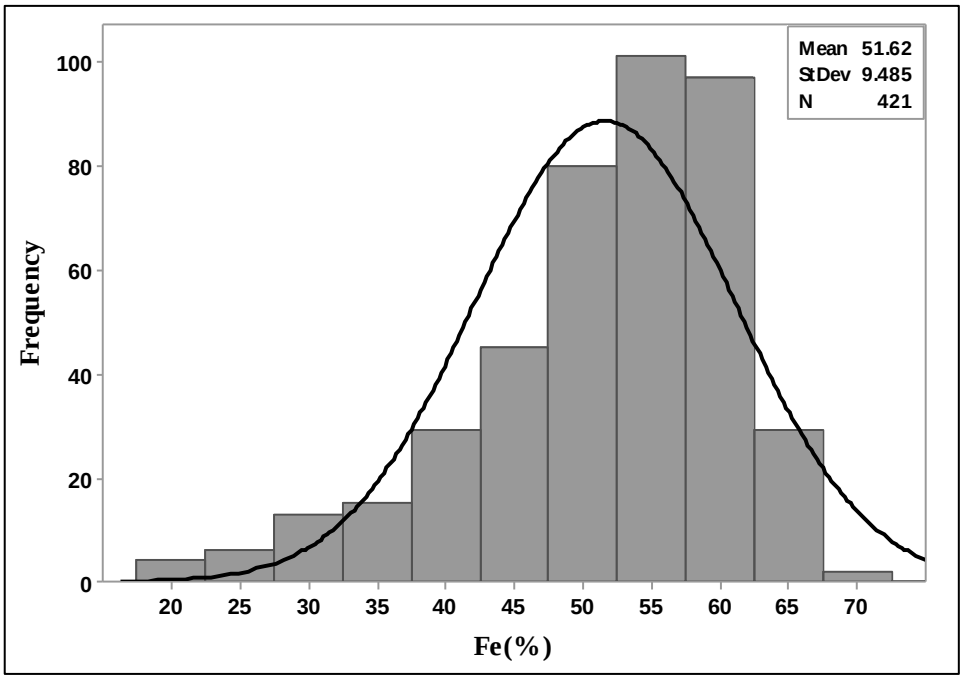
شکل ۹-۹ : فراوانی‌نمای مقادیر تبدیل یافته آهن در کامپوزیت‌های ۹ متری به روش لگاریتمی سه متغیره



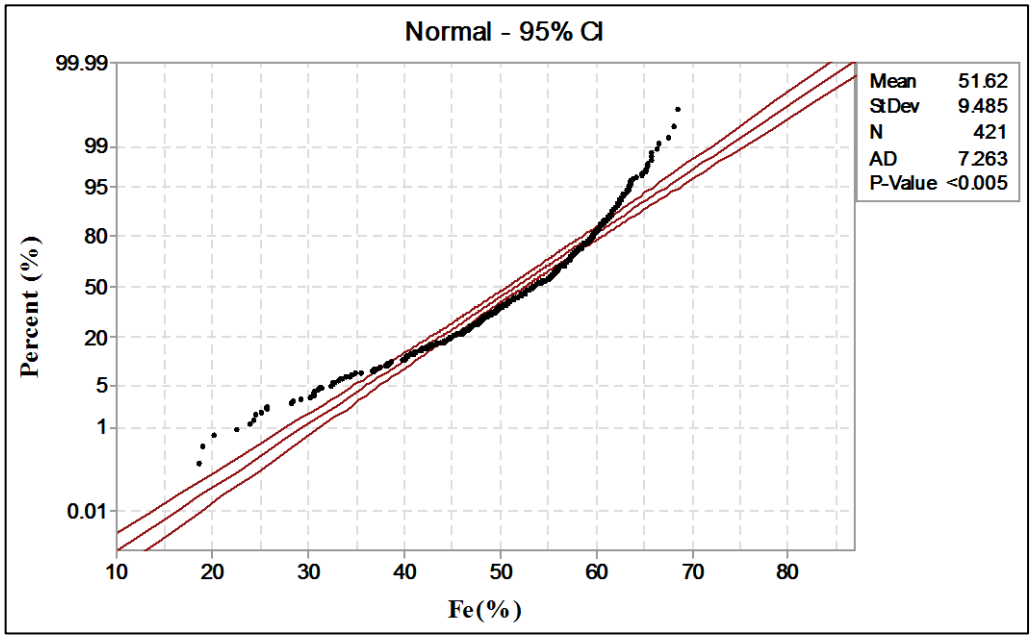
شکل ۹-۱۰ : نمودار فراوانی تجمعی مقادیر تبدیل یافته کامپوزیت‌های ۹ متری آهن به روش لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

جدول ۹-۳ : مقایسه پارامترهای آماری داده‌های کامپوزیت شده ۹متری آهن با توزیع طبیعی و لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

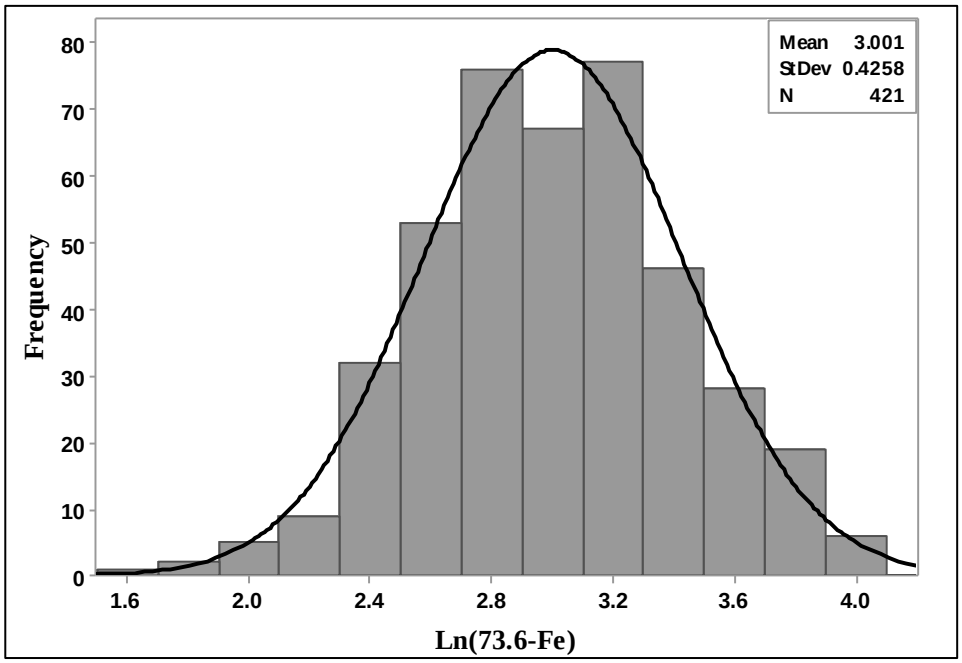
مدل توزیع	میانگین (٪)	میانه (٪)	واریانس (٪^{۲})	انحراف معیار (٪)	چولگی	کشیدگی
طبیعی	۵۱/۷۳	۵۳/۴۹	۸۴/۱۶	۹/۱۷	-۰/۷۶	۰/۰۶
لگاریتمی سه متغیره	۲/۹۹	۳/۰۰	۰/۱۸	۰/۴۳	-۰/۰۹	-۰/۶۱



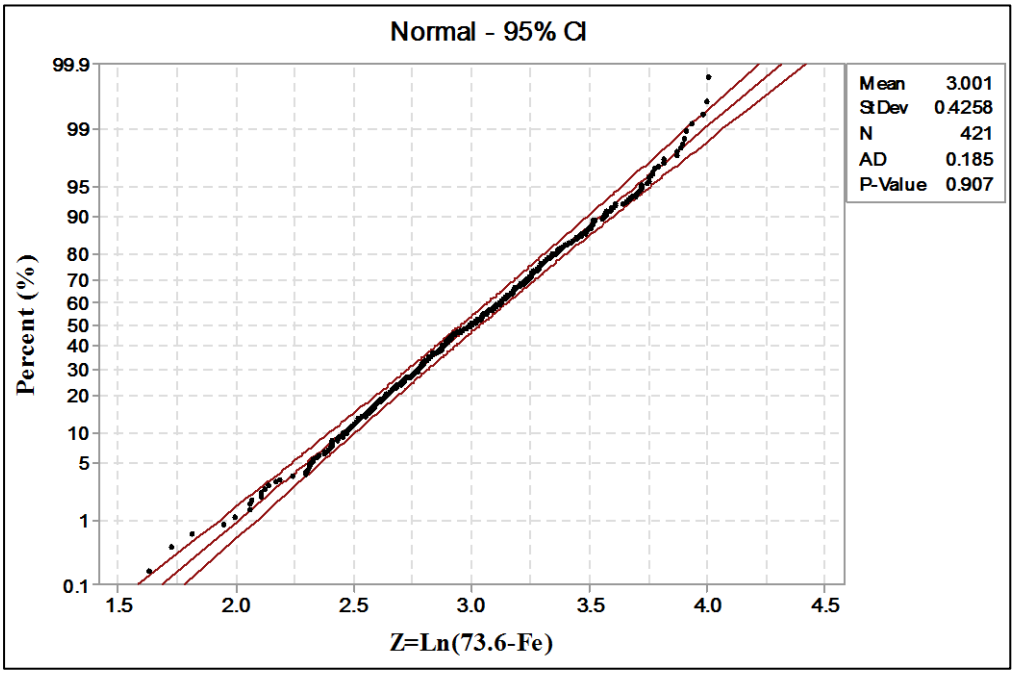
شکل ۹-۱۱ : فراوانی‌نمای کامپوزیت‌های ۱۲ متری در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر



شکل ۹-۱۲ : نمودار فراوانی تجمعی کامپوزیت‌های ۱۲ متری آهن در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر



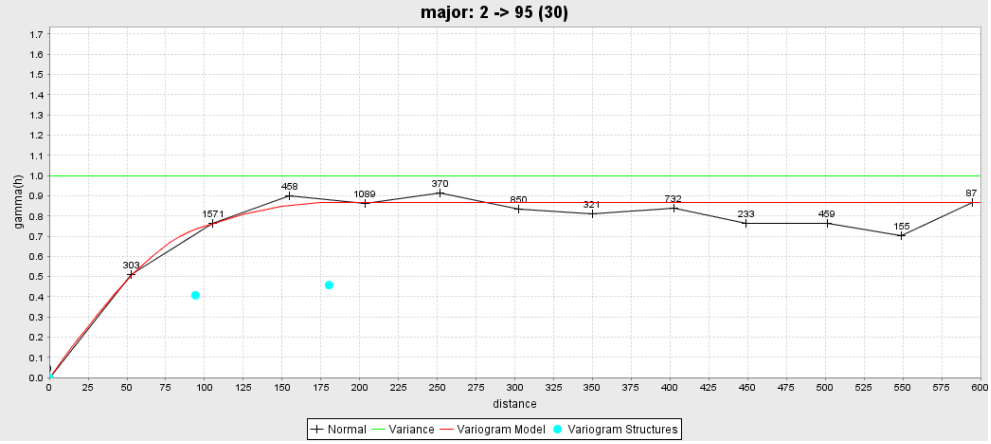
شکل ۹-۱۳ : فراوانی‌نمای مقادیر تبدیل یافته آهن در کامپوزیت‌های ۱۲ متری به روش لگاریتمی سه متغیره



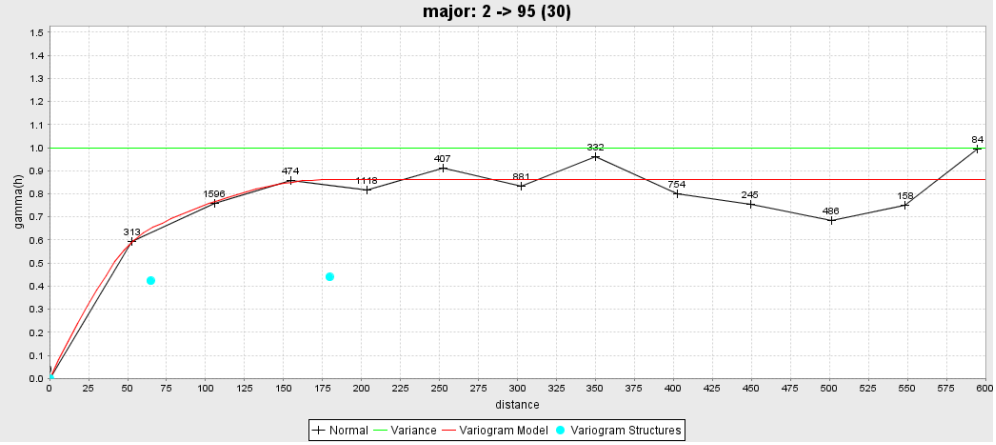
شکل ۹-۱۴ : نمودار فراوانی تجمعی مقادیر تبدیل یافته کامپوزیت‌های ۱۲ متری آهن به روش لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

جدول ۹-۴ : مقایسه پارامترهای آماری داده‌های کامپوزیت شده ۱۲ متری آهن با توزیع طبیعی و لگاریتمی سه متغیره در پیکره‌معدنی ۲ گل‌گهر

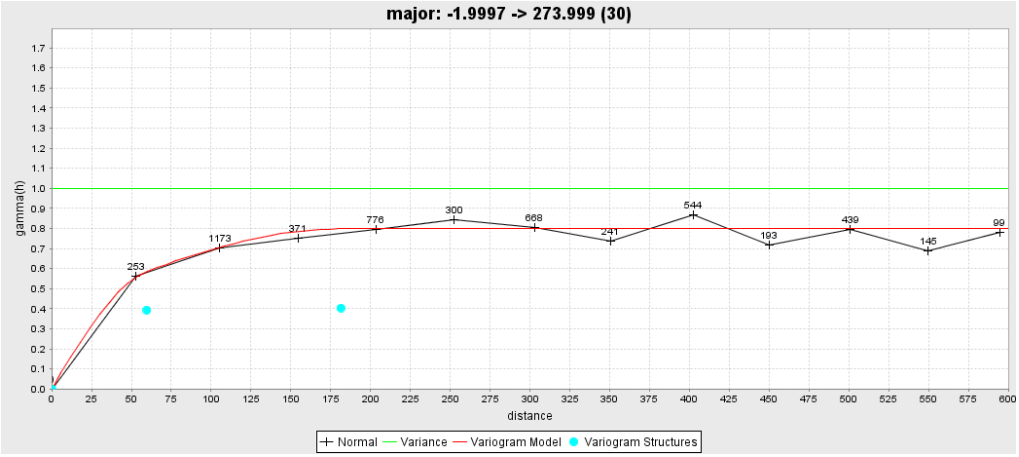
مدل توزیع	میانگین (٪)	میانه (٪)	واریانس (٪^{۲})	انحراف معیار (٪)	چولگی	کشیدگی
طبیعی	۵۱/۶۲	۵۳/۴۲	۸۹/۹۷	۹/۴۸	-۱/۰۱	۰/۹۱
لگاریتمی سه متغیره	۳/۰۰	۳/۰۰	۰/۱۸	۰/۴۲	-۰/۰۹	-۰/۰۸



شکل ۹-۱۵ : وریوگرافی جهتی برای متغیر ناحیه‌ای Fe در راستای آزیموت ۹۵ و شیب ۲ درجه در سناریو ارتفاع پله ۹ متری



شکل ۹-۱۶ : وریوگرافی جهتی برای متغیر ناحیه‌ای Fe در راستای آزیموت ۹۵ و شیب ۲ درجه در سناریو ارتفاع پله ۱۲ متری



شکل ۹-۱۷ : وریوگرافی جهتی برای متغیر ناحیه‌ای Fe در راستای آزیموت ۲۳۸ و شیب ۲ درجه در سناریو ارتفاع پله ۱۵ متری

پیوست ۳

برنامه تولید فرض شده جهت برآورد هزینه‌ها

جدول ۱۰-۱ : برنامه‌ریزی سالیانه در نظر گرفته شده با توجه مقدار بازیابی در هر سناریو با فرض تولید سالیانه ثابت

ارتفاع پله	هدف	۳,۰۰۰,۰۰۰	سال ۱	سال ۲	سال۳	سال۴	سال۵	سال۶	سال ۷	سال ۸	سال ۹	سال ۱۰
۶ متر	باطله	۱۸۹,۹۶۵,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰
	ماده‌معدنی	۴۹,۴۵۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
۹ متر	باطله	۲۰۰,۳۵۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰
	ماده‌معدنی	۵۱,۴۹۵,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
۱۲ متر	باطله	۲۰۷,۶۲۵,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰
	ماده‌معدنی	۵۳,۳۶۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰
۱۵ متر	باطله	۲۳۰,۷۸۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰
	ماده‌معدنی	۵۶,۱۰۵,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰

ارتفاع پله	هدف	۳,۰۰۰,۰۰۰	سال۱۱	سال۱۲	سال۱۳	سال۱۴	سال۱۵	سال۱۶	سال۱۷	سال۱۸	سال۱۹
۶ متر	باطله	۱۸۹,۹۶۵,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۱۱,۵۰۰,۰۰۰	۵,۹۶۵,۰۰۰	-	-
	ماده‌معدنی	۴۹,۴۵۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۱,۴۵۰,۰۰۰	-	-
۹ متر	باطله	۲۰۰,۳۵۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱۱,۷۰۰,۰۰۰	۱,۴۵۰,۰۰۰	-
	ماده‌معدنی	۵۱,۴۹۵,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۴۹۵,۰۰۰	-
۱۲ متر	باطله	۲۰۷,۶۲۵,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۱۲,۲۰۰,۰۰۰	۲۲۵,۰۰۰	-
	ماده‌معدنی	۵۳,۳۶۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۲,۳۶۰,۰۰۰	-
۱۵ متر	باطله	۲۳۰,۷۸۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۱۲,۸۰۰,۰۰۰	۳۸۰,۰۰۰
	ماده‌معدنی	۵۶,۱۰۵,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۳,۰۰۰,۰۰۰	۲,۱۰۵,۰۰۰

جدول ۱۰-۲ : تعداد نیروی کار برای هر یک از سناریوها و به ازای هر یک از تجهیزات بارگیری

شاول کابلی				
ارتفاع پله	**۶ متر**	**۹ متر**	**۱۲ متر**	**۱۵ متر**
تعداد راننده کامیون	۹	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد اپراتور دکل چالزنی	۸	۵	۳	۲
تعداد اپراتور تجهیزات ثانویه	۸	۶	۶	۶
تعداد کارگر معمولی	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد راننده شاول	۴	۳	۳	۳
تعداد نفرات هر شیفت	**۳۹**	**۳۴**	**۳۲**	**۳۱**
تعداد کل نفرات	**۱۱۷**	**۱۰۲**	**۹۶**	**۹۳**

لودر چرخ‌لاستیکی				
ارتفاع پله	**۶ متر**	**۹ متر**	**۱۲ متر**	**۱۵ متر**
تعداد راننده کامیون	۱۰	۱۰	۹	۱۱
تعداد اپراتور دکل چالزنی	۸	۵	۳	۲
تعداد اپراتور تجهیزات ثانویه	۶	۶	۸	۱۰
تعداد کارگر معمولی	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد راننده شاول	۳	۳	۴	۵
تعداد نفرات هر شیفت	**۳۷**	**۳۴**	**۳۴**	**۳۸**
تعداد کل نفرات	**۱۱۱**	**۱۰۲**	**۱۰۲**	**۱۱۴**

اکسکاواتور هیدرولیکی (کج‌بیل)				
ارتفاع پله	**۶ متر**	**۹ متر**	**۱۲ متر**	**۱۵ متر**
تعداد راننده کامیون	۷	۱۰	۱۰	۹
تعداد اپراتور دکل چالزنی	۸	۵	۳	۲
تعداد اپراتور تجهیزات ثانویه	۴	۶	۶	۸
تعداد کارگر معمولی	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد راننده شاول	۲	۳	۳	۴
تعداد نفرات هر شیفت	**۳۱**	**۳۴**	**۳۲**	**۳۳**
تعداد کل نفرات	**۹۳**	**۱۰۲**	**۹۶**	**۹۹**

شاول هیدرولیکی				
ارتفاع پله	۶ متر	۹ متر	۱۲ متر	۱۵ متر
تعداد راننده کامیون	۱۰	۹	۹	۱۰
تعداد اپراتور دکل چالزنی	۸	۵	۳	۲
تعداد اپراتور تجهیزات ثانویه	۶	۴	۴	۶
تعداد کارگر معمولی	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
تعداد راننده شاول	۳	۲	۲	۳
تعداد نفرات هر شیفت	**۳۷**	**۳۰**	**۲۸**	**۳۱**
تعداد کل نفرات	**۱۱۱**	**۹۰**	**۸۴**	**۹۳**

Abstract

Benches are one of most important parameters in geometry of open pit mines. Various factors affect to selecting the dimensions of the benches and finally the final shape of the open pit mines. The role of bench height is more highlight and important than other dimensions of the benches, Because the dimensions of other bench components (such as bench width and face angle) directly depend on the bench height and follow it. Many factors such as overall pit slope angle, the size of extraction equipment, dilution and ore lose, and the mining selectivity, are dependent on the bench height. The mines, depending on their goals, use different bench height.

In this research, a new approach is proposed in order to select the most suitable economical bench height. For this purpose, exploration data of iron ore mine #2 Gol-e-Gohar has been used and Four scenarios of bench height (6, 9, 12 and 15 m) have been investigated. Effect of various scenarios on the bench height in the amount of ore tonnage, average grade, metal content, blasting pattern and select of drilling, loading and hauling equipment were checked. Firstly, GEOVIA GEMS software was developed for geological model of the deposit. Also, for each scenario, pit design were done and the amount of waste and ore tonnage in each scenario were estimated. Then, the amount of operating and capital costs for each scenario were estimated. Regarding these costs, the discounted cash flow table were calculated and net persent value (NPV) for scenarios were compared. The results showed that the highest amount of ore recovery was obtained for the bench with 15-meter height, but the maximum net present value is related to the 12-meter bench height for a hydraulic shovel.

Keywords: open pit mines, bench height, selective mining, net present value, mine No. 2 Gol-e-Gohar

University of Shahrood

Faculty of Mining Engineering, Petroleum and Geophysics

Development a new approach to determine a suitable bench height in open pit mines (Case study : iron ore mine #2 Gol-e-Gohar)

By: Mostafa Omid Shafiee

Supervisors:

Prof. Mohammad Ataei

Prof. Reza Khalokakaie

February 2016