نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن "
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره دهم، شماره ۲۸، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۴۳ تا ۵۱
Vol. 10, No. 28, 2015, pp.43-51

ارائه مدلی برای تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها در استخراج زیرزمینی

طلا طاهرنیا[1]، مجید عطایی پور[2*]

۱-دانشجوی ارشد دانشگاه صنعتی امیرکبیر talataher@gmail.com

۲-دانشیار دانشکده معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیرmap60@aut.ac.ir

(دریافت۱۶ بهمن ۱۳۹۲،پذیرش ۱۷ شهریور ۱۳۹۴)

چکیده

امروزه برای تعیین محدوده نهایی و بهینه استخراج روش‌های کامپیوتری استفاده می‌شود. در حالی که استفاده از روش‌های کامپیوتری مستلزم بلوک‌بندی کانسار و محاسبه‌ی ارزش اقتصادی بلوک‌ها است. با توجه به اینکه تعیین ارزش اقتصادی بلوک در روش‌های استخراج زیرزمینی پیچیده است، تاکنون کمتر به توسعه الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای روش‌های زیرزمینی پرداخته شده است. تأثیرگذارترین عوامل بر ارزش اقتصادی بلوک‌ها در روش‌های زیرزمینی، روش استخراج و مکان قرار گیری بلوک‌ها است. در این مقاله مدل بلوکی به گونه‌ای ساخته شده است که ارزش اقتصادی بلوک‌های آن وابسته به جانمایی طبقه یا کارگاهی است که در آن قرار گرفته است یا به عبارتی بلوک‌ها با توجه به عمق و موقعیت شان به گونه‌ای دسته‌بندی شده‌اند که هزینه‌های استخراج آن‌ها برابر باشد. بدین منظور هزینه‌ها به دو دسته هزینه‌های وابسته به موقعیت و هزینه‌های مستقل از موقعیت دسته‌بندی شده‌اند. هزینه‌های وابسته به موقعیت در برگیرنده هزینه‌های باربری و بالابری است. در حالی که سایر هزینه‌های استخراجی جزو هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک هستند و بیشتر به روش استخراجی انتخاب شده بستگی دارند. با استفاده از روابط ارائه شده در این تحقیق برنامه ای بوسیله نرم افزار MATLAB نوشته شده است و بوسیله آن می‌توان ارزش اقتصادی بلوک را برای کانسارهای مختلف تعیین کرد.

کلمات کلیدی

ارزش اقتصادی بلوک، روش استخراج زیرزمینی، موقعیت بلوک، هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک، مدل بلوکی اقتصادی

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

بهینه‌سازی معادن با هدف تعیین محدوده نهایی بهینه، عمر بهینه معدن و برنامه ریزی تولید انجام می‌شود. منظور از محدوده نهایی بهینه، فضایی است که با اعمال شرایط فنی روش استخراج، پس از پایان عملیات استخراجی ایجاد خواهد شد. داده‌های ورودی مورد نیاز برای بهینه‌سازی مجموعه مقادیری از ارزش خالص بلوک‌ها هستند که مدل بلوکی اقتصادی را می‌سازند. مدل بلوکی اقتصادی خود بر اساس مدل بلوکی زمین شناسی ساخته می‌شود. مدل بلوکی زمین‌شناسی شامل اطلاعاتی نظیر عیار ماده معدنی اصلی، عیار مواد معدنی همراه، وزن مخصوص هر بلوک و نوع بلوک (ماده معدنی یا باطله) است. در نهایت با استفاده از یکی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده ی استخراج و اجرای آن بر روی مدل بلوکی اقتصادی بخش‌هایی از کانسار با بیشترین مطلوبیت اقتصادی برای استخراج مشخص می‌شوند[۱].

الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری زیرزمینی در مقایسه با الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده معدن‌کاری روباز گسترش کمتری داشته‌اند، به همین دلیل طراحان معادن زیرزمینی از الگوریتم‌های بهینه‌سازی به ندرت استفاده می‌کنند. یکی از مهم‌ترین دلایل عدم پیشرفت الگوریتم‌های بهینه‌سازی محدوده زیرزمینی پیچیدگی‌های فنی و اقتصادی در تعیین ارزش‌های اقتصادی بلوک‌ها است. تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها در روش‌های استخراج زیرزمینی تابع عواملی چون روش استخراجی انتخاب شده، جانمایی پهنه و یا طبقه-ای که بلوک در آن قرار گرفته است و غیره وابسته است. هم چنین تغییرات هزینه‌ها در ارزش اقتصادی بلوک در معدن‌کاری روباز نسبت به عمق پیوسته است در حالی که در معدن‌کاری زیرزمینی چنین نیست. از طرف دیگر تغییر در ابعاد کارگاه بر ارزش اقتصادی بلوک را در معدن‌کاری زیرزمینی تأثیرگذار است زیرا با کاهش یا افزایش یکی از ابعاد کارگاه در روش‌های زیرزمینی بلوک از یک کارگاه به کارگاه دیگر منتقل می‌شود. در چنین شرایطی ارزش اقتصادی می‌تواند تغییرات قابل توجهی داشته باشد[۲].

با توجه به توضیحات ذکر شده ملاحظه می‌شود که تعیین ارزش اقتصادی بلوک در روش‌های زیرزمینی به مراتب دشوارتر از تعیین ارزش اقتصادی بلوک در روش استخراج روباز است. با وجود این که ارزش اقتصادی بلوک در روش‌های زیرزمینی مقدار ثابتی نیست، این مقدار در تمام الگوریتم‌های موجود به صورت یک مقدار ثابت در نظر گرفته شده است. برای محاسبه ارزش اقتصادی بلوک روابطی ارائه شده است که در ادامه به اختصار به آن‌ها پرداخته شده است.

ویتل[۱] فرمول خود را در سال ۱۹۹۰ ارائه کرد. او برای محاسبه ارزش اقتصادی بلوک قوانین ساده ایی را به کار گرفت که این سه قانون به صورت زیر هستند[۳]:

۱) هنگام محاسبه ارزش اقتصادی یک بلوک فرض می‌شود که باطله‌های پوشاننده‌ی آن بلوک قبلاً برداشته شده‌اند.

۲) ارزش بلوک با فرض این که بلوک استخراج خواهد شد، محاسبه می‌شود. بلوکی که دارای ماده معدنی کمتری نسبت به باطله است، در مراحل اولیه، استخراج نمی‌شود.

۳) در محاسبه هزینه‌های استخراج و هزینه‌های فرآوری، فقط هزینه‌هایی در نظر گرفته می‌شوند که با توقف استخراج، قطع می‌شوند. زیرا با افزوده شدن یک بلوک به محدوده‌ی نهایی، هزینه‌های ناشی از آن، در طول عمر اضافه شده‌ی معدن در نظر گرفته شود.

کاموس[۲] در سال ۱۹۹۲ برای محاسبه‌ی ارزش اقتصادی بلوک در معادن روباز و معادن زیرزمینی روابطی را ارائه کرد. کاموس (۱۹۹۲) بر اساس ارزش اقتصادی بلوک‌ها، راه حلی ابتکاری برای تعیین عمق تغییر روش روباز به زیرزمینی ارائه کرد. در این روش، نخست هزینه‌های استخراج روباز و زیرزمینی برای هر بلوک محاسبه شده و سپس با به کارگیری رابطه‌های ارزش خالص اقتصادی روباز و زیرزمینی، ارزش بلوک‌ها و در نتیجه میزان سود حاصل از هر دو روش (با توجه به محدوده ی استخراجی هر روش و بلوک‌های قرار گرفته در محدوده‌های مذکور) محاسبه می‌شود. در مرحله ی آخر، با استفاده از رابطه‌ی "سود روباز هر بلوک منهای سود زیرزمینی همان بلوک"، بلوک‌های قابل استخراج به هر دو روش و عمق تغییر روش روباز به زیرزمینی و هم چنین سود کلی حاصل از استخراج ترکیبی به‌دست می‌آید[۴].

رابطه دیگری توسط عطایی پور (۲۰۰۵) ارائه شده است. در این روش از ثابت هزینه ی استخراج بلوک[۳] (BMC) و ضریب متغیر نسبت درآمد بلوک[۴] (BRR) استفاده شده است. BMC برای محدوده مشخصی از عمق و برای یک روش استخراجی خاص ثابت است. هزینه‌ها در این روش به دو دسته تقسیم شده‌اند، هزینه‌های مبتنی بر ماده معدنی و هزینه‌های مبتنی بر فلز[۵].

*نویسنده مسئول مکاتبات

مدل دیگری توسط جلالی در سال ۲۰۰۶ ارائه شده است. این مدل که برای اجرای الگوریتم فراگیر محدوده معدن‌کاری زیر زمینی تدارک دیده شده، یک نوع ویژه از مدل‌های اقتصادی بلوکی بنام مدل اقتصادی با ارزش متغیر[۵] (VVEM) است که در آن ارزش اقتصادی هر بلوک با توجه به مشخصات هندسی و جانمایی طبقه‌ای که بلوک مورد نظر در آن قرار می‌گیرد، تغییر می‌کند. برای ساخت مدل VVEM، سه مدل اقتصادی با مشخصات هندسی یکسان ولی با ماهیت متفاوت به‌نام‌های مدل در آمدی برجا[۶] (IIM)، مدل هزینه موقعیت[۷] (PCM) و مدل هزینه معدن‌کاری[۸] (MCM) ساخته می‌شود. در این روش جدید برای مدل‌سازی اقتصادی محدوده معدنی، ارزش اقتصادی بلوک‌ها برخلاف مدل‌های پیشین متغیر است[۲].

با توجه به اینکه ارزش اقتصادی بلوک‌ها به مکان قرارگیری آن‌ها نیز بستگی دارد، در این تحقیق سعی شده است مدل بلوکی به گونه‌ای ساخته شود که ارزش اقتصادی بلوک‌های آن وابسته به جانمایی طبقه یا کارگاهی باشد که در آن قرار گرفته است یا به عبارتی بلوک‌ها با توجه به عمق و موقعیت‌شان به گونه‌ای دسته‌بندی شده‌اند که هزینه‌های استخراج آن‌ها برابر باشد.

بدین منظور هزینه‌ها به دو دسته هزینه‌های وابسته به موقعیت و هزینه‌های مستقل از موقعیت دسته‌بندی شده‌اند. هزینه‌های وابسته به موقعیت در برگیرنده هزینه‌های باربری و بالابری است. در حالی که سایر هزینه‌های استخراجی جزو هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک هستند و بیشتر به روش استخراجی انتخاب شده بستگی دارند.

با استفاده از روابط ارائه شده در این تحقیق برنامه‌ای توسط نرم افزار MATLAB نوشته شده است و به‌وسیله آن ارزش اقتصادی برای معدن Lucky Friday واقع در آمریکا تعیین شده است.

۳- مدل بلوکی با ارزش متغیر اصلاح شده

مدل بلوکی با ارزش متغیر از تلفیق مدل‌های درآمد، هزینه‌های موقعیت و هزینه‌های معدن‌کاری به‌دست می‌آید. قابل ذکر است که مدل‌ها دارای ابعاد و مشخصات هندسی یکسان هستند.

۳-۱ فرض‌های مدل

با توجه به این‌که ارزش اقتصادی بلوک برای ذخایر معدنی فلزی قابل محاسبه است، مدل ارائه شده برای ذخایر مذکور کاربرد دارد. با در نظر گرفتن این نکته، مدل ارائه شده برای روش‌های استخراجی نظیر کند و آکند، انباره ای، استخراج در طبقات فرعی، تخریب در طبقات فرعی و تخریب بلوکی قابل استفاده خواهد بود.

به‌منظور ساده‌تر شدن محاسبات، ساخت مدل بلوکی اقتصادی برای کانسارهای دو بعدی انجام گرفته است. به عبارتی ارزش اقتصادی بلوک با استفاده از روش ذکر شده فقط برای کانسارهای رگه‌ای و لایه‌ای کاربرد دارد.

محاسبات برای معادنی کاربرد دارد که به‌وسیله چاه باز شده‌اند و باربری افقی در داخل تونل‌ها و بالابری در داخل چاه‌ها انجام می‌گیرد. هم چنین در محاسبات فرض شده است که کانسار و چاه در یک صفحه قرار گرفته‌اند و تونل باربری اصلی به طور مستقیم و بدون میانبر به چاه متصل شده است.

ابعاد کلیه کارگاه‌های استخراجی یکسان در نظر گرفته شده است.

۳-۲ مدل بلوکی درآمد

مدل بلوکی درآمد، مدلی با ارزش مثبت و متغیر با توجه به عیار هر بلوک است. برای محاسبه درآمد حاصل از بلوک از رابطه ۱ استفاده می‌شود.

$$I = g \times \mathrm{M} \times y \times (P - C_P) \qquad (۱)$$

که در آن، I درآمد حاصل از بلوک بر حسب دلار، g عیار ماده معدنی در بلوک مورد نظر بر حسب درصد، M تناژ ماده معدنی موجود در بلوک بر حسب تن، y بازیابی بر حسب درصد، P قیمت ماده معدنی بر حسب دلار بر تن و C_pهزینه فرآوری بر حسب دلار بر تن ماده معدنی است.

۳-۳ مدل بلوکی هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک

مدل بلوکی هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک در برگیرنده هزینه‌هایی هست که به روش استخراج زیرزمینی، جنس سنگ، تجهیزات به کار گرفته شده بستگی دارند. همان‌طور که از اسم این مدل بر می‌آید هزینه‌های این مدل به موقعیت و جانمایی بلوک‌ها بستگی ندارند. به عبارتی می‌توان گفت، در صورتی که از روش استخراجی و تجهیزات یکسانی در سرتاسر کانسار استفاده می‌شود، هزینه‌های مستقل از

موقعیت بلوک برابر با مقدار ثابتی خواهد بود و برای کلیه بلوک‌ها برابر است. واحد متداول برای بیان هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک دلار بر تن می باشد. هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک در جدول ۱ نشان داده شده‌اند.

جدول ۱ : هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک

ردیف	هزینه	عامل تاثیر گذار
۱	هزینه آماده‌سازی کارگاه	روش استخراج
۲	هزینه چالزنی	جنس سنگ، تجهیزات به کار رفته
۳	هزینه انفجار	جنس سنگ، تجهیزات به کار رفته
۴	هزینه بارگیری و حمل در داخل کارگاه	روش استخراج، تجهیزات به کار رفته
۵	هزینه پر کردن	روش استخراج
۶	هزینه‌های عمومی	روش استخراج

برای محاسبه مقادیر در مدل بلوکی هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک از رابطه ۲ استفاده می‌شود.

$$C_f = (C_d + C_{dr} + C_B + C_{LS} + C_F + C_g) \times \mathrm{M} \quad (۲)$$

که در آن، C_d هزینه آماده‌سازی کارگاه، C_{dr}هزینه چالزنی بر حسب دلار بر تن، C_B هزینه انفجار بر حسب دلار بر تن، C_{LS} هزینه بارگیری و باربری در داخل کارگاه بر حسب دلار بر تن، C_Fهزینه پرکردن بر حسب دلار بر تن، C_gهزینه‌های عمومی بر حسب دلار بر تن و M تناژ بلوک بر حسب تن است.

۳-۴مدل بلوکی هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک

مدل بلوکی هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک دارای ارزش متغیر و منفی است. این مدل شامل هزینه‌هایی است که بسته به موقعیت بلوک و کارگاهی که بلوک در آن قرار می‌گیرد، می‌تواند کاهش یا افزایش یابد. با در نظر گرفتن دو بلوک با مشخصات هندسی یکسان می‌توان مشاهده کرد که بلوکی که در عمق بیشتری قرار گرفته است دارای هزینه‌های بیشتری است. این هزینه‌ها در مدل بلوکی هزینه‌های وابسته به موقعیت در نظر گرفته شده‌اند.

هزینه‌های باربری در تونل اصلی و هزینه بالابری در چاه جزو هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک محسوب می‌شوند. با عمیق‌تر شدن مکان قرارگیری بلوک و هم چنین دور شدن بلوک از چاه بالابری اصلی هزینه‌های بالابری و باربری افزایش می‌یابند.

مدل‌های بلوکی اقتصادی که تاکنون ارائه شده‌اند دارای ارزش ثابتی بوده‌اند و هزینه‌های وابسته به موقعیت در آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شدند. در واقع محاسبه ارزش اقتصادی بلوک با در نظر گرفتن هزینه‌های وابسته به موقعیت مساله ای تجربه نشده است که در این تحقیق بدان پرداخته شده است.

برای ساختن مدل هزینه‌های وابسته به موقعیت لازم است بلوک‌ها شماره گذاری شوند. برای شماره‌گذاری از روش شماره‌گذاری مسلسل استفاده می‌شوند و با داشتن شماره-گذاری مسلسل می‌توان شماره‌گذاری دوبعدی بلوک‌ها را به-دست آورد و حتی مختصات نقاط دلخواه بلوک‌ها را محاسبه کرد.

برای تبدیل شماره مسلسل بلوک‌ها به شماره دوبعدی و هم چنین محاسبه مختصات مرکز ثقل بلوک‌ها می‌توان به ترتیب از روابط ۳ تا ۶ استفاده کرد[۶].

$$i = ID - n_{blx}(j-1) \quad (۳)$$

$$j = \left[\frac{ID-1}{n_{blx}}\right] + 1 \quad (۴)$$

$$x_{bl} = x_1 + (i-0.5) \times L_{bl} \quad (۵)$$

$$z_{bl} = z_1 + (j-0.5) \times \mathrm{H}_{bl} \quad (۶)$$

که در آن‌ها،i و j شماره بلوک به ترتیب در راستای x و z، ID شماره مسلسل بلوک، n_{blz} تعداد بلوک‌ها در راستای x، x_{bl} و z_{bl} مختصات مرکز ثقل بلوک، x_1 و z_1 فاصله اولین بلوک از دهانه چاه در راستاهای x و z، L_{bl} طول بلوک بر حسب متر و H_{bl} ارتفاع بلوک بر حسب متر است.

به‌منظور محاسبه هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک، ابتدا بایستی تعیین شود هر بلوک در کدام کارگاه قرار می‌گیرد. بدین منظور پارامترهای (i',j') تعریف شده‌اند که در واقع

نشان‌دهنده شماره کارگاه مورد نظر هستند و تعیین می‌کنند هر بلوک در کدام کارگاه قرار گرفته است. روابط ۷ و ۸ برای محاسبه (i',j') ارائه شده‌اند.

$$i' = \left[\frac{x_{block} - x_{ore} - 1}{l}\right] + 1 \qquad (۷)$$

$$j' = \left[\frac{z_{block} - z_{ore} - 1}{h}\right] + 1 \qquad (۸)$$

پس از تعیین اینکه هر بلوک در کدام کارگاه قرار می‌گیرد، می‌توان فواصل باربری و بالابری را محاسبه کرد. به منظور محاسبه فاصله باربری و عمق بالابری به ترتیب از روابط (۹) و (۱۰) استفاده می‌شود.

$$L_{bl} = \left| x_{ore} - \left[x_{shaft} - (i' - 0.5)\left(\frac{L_{ore}}{N_{stope}}\right) \right] \right| \qquad (۹)$$

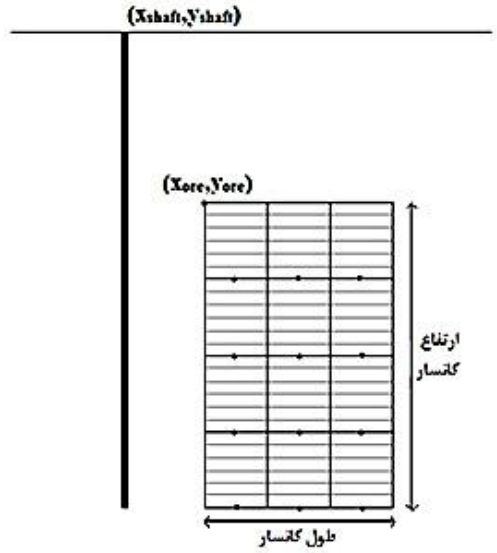
$$H_{bl} = z_{ore} + j'\left(\frac{H_{ore}}{N_{Level}}\right) \qquad (۱۰)$$

با معین شدن مکان بلوک‌ها می‌توان مدل هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک را با استفاده از رابطه (۱۱) ساخت. قابل ذکر است که هزینه‌های باربری و بالابری بایستی بر حسب دلار بر تن کیلومتر باشند.

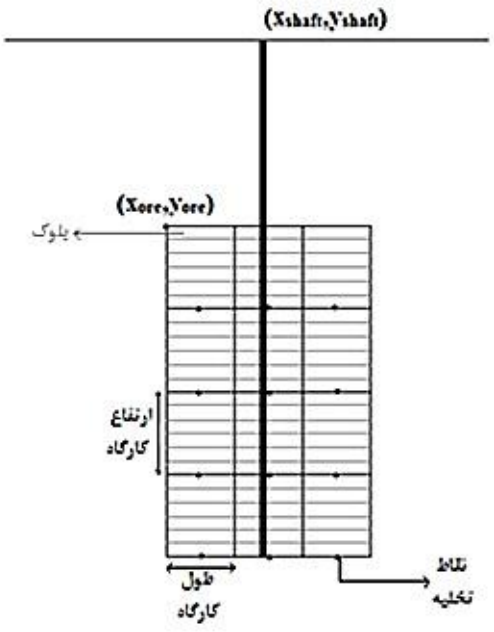
$$C_y = M \times [(C_{haul} \times L_{bl}) + (C_{hoist} \times H_{bl})] \qquad (۱۱)$$

که در رابطه‌های ۷ تا ۱۱، C_v هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک، C_{haul} هزینه‌های باربری بر حسب دلاربر تن کیلومتر، C_{hoist} هزینه‌های بالابری بر حسب دلار بر تن کیلومتر، L_{bl} فاصله حمل باربری بر حسب متر، x_{ore} و y_{ore} مختصات دو بعدی نقطه آغازین کارگاه، y_{shaft} و x_{shaft} مختصات دهانه چاه، i شماره بلوک مورد نظر در راستای افق، L_{ore} طول کانسار در راستای افق، N_{stope} تعداد کارگاه‌ها در هر طبقه، H_{bl} عمق حمل بالابری بر حسب متر، i' شماره دوبعدی (در راستای افق) کارگاهی که بلوک مورد نظر در آن قرار گرفته، j' شماره دوبعدی (در راستای قائم) کارگاهی است که بلوک مورد نظر در آن قرار گرفته، H_{ore} ارتفاع محدوده، N_{level} تعداد طبقات، y_{block} و x_{block} مختصات مرکز ثقل بلوک مورد نظر، l طول کارگاه و h ارتفاع طبقه یا کارگاه است.

در شکل‌های ۱ و ۲ موقعیت‌های مختلف ممکن برای موقعیت چاه نمایش داده شده است. چاه ممکن است داخل کانسار و یا در باطله حفر شود.



شکل ۱: بازکننده حفر شده در خارج از محدوده کانسار



شکل ۲: بازکننده حفر شده داخل کانسار

۳-۵ مدل بلوکی با ارزش متغیر اصلاح شده

ارزش اقتصادی بلوک از سه مدل بلوکی درآمد، مدل بلوکی هزینه مستقل از موقعیت، مدل بلوکی هزینه وابسته به موقعیت تشکیل شده است. ارزش اقتصادی بلوک را برای کانسارهای دو بعدی می‌توان از طریق رابطه‌های ۱۲ و ۱۳ محاسبه کرد.

$$BEV = I - (C_f + C_V) \qquad (۱۲)$$

$$BEV = [g \times \mathrm{M} \times y \times (P - C_P)] - M[(C_d + C_{dr} + C_B + C_{LS} + C_F + C_g) + (C_{haul} \times L_{bl}) + (C_{hoist} \times \mathrm{H}_{bl})] \qquad (۱۳)$$

به‌منظور روشن تر شدن نحوه محاسبات، مثالی ارائه شده است. داده‌های مورد نیاز برای محاسبه هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک در جدول ۲ آورده شده است. در این مثال تعداد کلیه بلوک‌ها با توجه به ابعاد کانسار و ابعاد بلوک‌ها ۶۴ عدد بدست آمده است. هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک برای بلوک با شماره مسلسل ۳۹ انجام گرفته است.

جدول ۲: داده‌های مورد نیاز برای محاسبات عددی

ردیف	توضیحات	مقدار
۱	طول کانسار (متر)	۸۰
۲	ارتفاع کانسار (متر)	۴۸
۳	طول بلوک (متر)	۲۰
۴	ارتفاع بلوک (متر)	۳
۵	طول کارگاه (متر)	۲۰
۶	ارتفاع کارگاه (متر)	۱۲

. برای تبدیل شماره‌گذاری مسلسل به شماره گذاری دوبعدی از رابطه‌های ۳ و ۴ استفاده شده است.

$$i = ID - n_{blx}(j-1) = 39 - 4(10-1) = 3$$

$$j = \left[\frac{ID-1}{n_{blx}}\right] + 1 = \left[\frac{39-1}{4}\right] + 1 = 10$$

سپس مختصات مرکز ثقل بلوک با استفاده از روابط ۵ و ۶ به‌دست آمده است.

$$x_{block} = x_{ore} + (i - 0.5) \times L_{bl}$$
$$= 25 + (3 - 0.5) \times 20 = 75$$

$$z_{block} = z_{ore} + (j - 0.5) \times \mathrm{H}_{bl}$$
$$= 50 + (10 - 0.5) \times 3 = 78.5$$

با جاگذاری مختصات بدست آمده در روابط ۷ و ۸ می‌توان تعیین کرد بلوک مورد نظر در کدام کارگاه قرار گرفته است.

$$i' = \left[\frac{x_{block} - x_{ore} - 1}{l}\right] + 1 = \left[\frac{75 - 25 - 1}{20}\right] + 1 = 3$$

$$j' = \left[\frac{z_{block} - z_{ore} - 1}{h}\right] + 1 = \left[\frac{78.5 - 50 - 1}{12}\right] + 1 = 3$$

با توجه به محاسبات ملاحظه می‌گردد که بلوک مورد نظر در کارگاه با نشانی (۳و۳) قرار گرفته است. پس از این‌که موقعیت بلوک در کارگاه مشخص شد، می‌توان فاصله باربری و عمق بالابری را با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ محاسبه کرد.

$$L_{bl} = \left| x_{ore} - \left[x_{shaft} - (i' - 0.5)\left(\frac{L_{ore}}{N_{stope}}\right) \right] \right|$$
$$= \left| 25 - [0 - (3 - 0.5)(\frac{80}{4})] \right| = 75$$

$$H_{bl} = y_{ore} + j'\left(\frac{H_{ore}}{N_{Level}}\right)$$
$$= 50 + 3(\frac{48}{4}) = 86$$

در نهایت پس از به‌دست آمدن فاصله باربری و عمق بالابری می‌توان هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک را با استفاده از رابطه ۱۱ به‌دست آورد. با داشتن سایر داده‌ها نظیر عیار، قیمت و غیره می‌توان ارزش اقتصادی بلوک را نیز تعیین کرد.

۴-۵ ساخت مدل بلوکی با ارزش متغیر اصلاح شده با استفاده از MATLAB

داده‌های ورودی مورد نیاز برای نرم افزار به سه دسته تقسیم بندی شده‌اند، که به صورت زیر هستند:

۱) پارامترهای‌های مکانی: این پارامترها شامل مختصات چهار نقطه کانسار، عرض کانسار، مختصات دهانه چاه و عمق آن است.

۲) پارامترهای اقتصادی: این پارامترها را می‌توان به سه دسته تقسیم بندی کرد.

۲-۱) هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک‌ها

۲-۲) هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک‌ها

۲-۳) داده‌های مربوط به محاسبات درآمد

۳) ابعاد کارگاه‌ها و بلوک‌ها: ابعاد کارگاه‌ها به روش استخراج انتخاب شده و ابعاد بلوک‌ها به ابعاد کارگاه‌ها بستگی دارند. با توجه به این که در هنگام تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها ابعاد کارگاه‌ها نامعلوم است، این مقادیر چندین بار تغییر داده می‌شود. بدین ترتیب می‌توان مقدار بهینه ابعاد کارگاه را نیز انتخاب کرد.

پس از وارد کردن داده‌های ورودی، برنامه کارگاه‌ها و بلوک‌هایی با ابعاد داده شده ساخته می‌شود. به هر یک از بلوک‌ها شماره‌ای اختصاص داده می‌شود که بدان وسیله می‌توان موقعیت آن را نشان داد. برای نشانی‌دهی بلوک‌ها و کارگاه در این برنامه از روش مسلسل استفاده شده است که با استفاده از روابط ذکر شده در فصل پیشین می‌توان آن را به نشانی‌دهی دو بعدی تبدیل کرد. هم چنین می‌توان مختصات هر نقطه دلخواه از بلوک را نیز به‌دست آورد. پس از آن مشخص می‌شود هر بلوک در کدام کارگاه قرار می‌گیرد. پس از این مرحله امکان محاسبه عمق بالابری و فاصله باربری با استفاده از روابط ۹ و ۱۰ وجود دارد. با داشتن فواصل بالابری و باربری و همچنین هزینه‌های استخراجی مدل بلوکی هزینه‌ها ساخته می‌شود.

پس از انجام محاسبات ذکر شده، خروجی‌های برنامه نمایش داده می‌شوند. خروجی‌ها شامل درآمد، هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک، هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک و ارزش اقتصادی بلوک‌های شماره‌گذاری شده دوبعدی، است. خروجی‌ها در یک فایل excel ذخیره می‌شوند. به‌دلیل عدم دسترسی به داده‌های عیاری معدن Lucky Friday محاسبه درآمد امکان‌پذیر نبود.

علاوه بر این که خروجی‌ها بوسیله excel نمایش داده می‌شوند، هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک‌ها بر اساس مکان قرار گیری شان بوسیله نموداری نشان داده می‌شوند.

۴- تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها در معدن Lucky Friday

معدن Lucky Friday یک معدن عمیق زیرزمینی نقره، سرب و روی است که در حدود یک کیلومتری شرق مولان، در ایالت آیداهو قرار گرفته است. رگه Lucky Friday در مجاورت چاه سیلور[۹] قرار گرفته است. روش اصلی استخراج در این معدن کند و آکند است[۷].

طول کانسار به طور متوسط ۴۷۵ متر، ارتفاع آن ۱۴۳۰ متر و عرض متوسط آن ۲/۳ می باشد. شیب کانسار تقریبا قائم است.دسترسی از سطح زمین به کانسار بوسیله چاه سیلور انجام می‌گیرد. چاه سیلور با قطر ۵/۵ متر، عمق ۱۸۹۰ متر و در فاصله ۳۴ متری کانسار حفاری شده و دارای آستر بتنی است. طول کارگاه‌ها در این معدن ۱۱۵ متر و ارتفاع کارگاه‌ها ۶۵ متر است[۸].

هزینه آماده‌سازی در برگیرنده هزینه آماده‌سازی بلوک بعدی ماده معدنی است که قرار است استخراج شود. در واقع شامل هزینه دسترسی به یک بلوک بعد از پر کردن بلوک قبلی است. هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک و هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک در معدن Lucky Friday که با روش کند و آکند استخراج شده است، به ترتیب در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده است. هزینه‌های باربری و بالابری که در ستون دوم جدول ۴ آورده شده‌اند و هم‌چنین فواصل بالابری و باربری که ستون سوم بیان شده‌اند، به‌طور مستقیم از منبع گرفته شده‌اند. اما هزینه‌های موجود در ستون چهارم جدول ۴ که بر حسب دلار بر تن کیلومتر می‌باشند حاصل تقسیم داده‌های ستون دوم بر ستون سوم همین جدول می‌باشند. هزینه‌ها مربوط به سال ۱۹۷۹ می‌باشد. سایر داده‌های مورد نیاز برای محاسبات در جدول ۵ آورده شده است.[۹].

ارزش اقتصادی بلوک با استفاده از روش‌های ذکر شده، برای معدن Lucky Friday با در نظر گرفتن حالات مختلف برای ابعاد کارگاه‌ها و جانمایی‌های کارگاه‌ها محاسبه خواهد شد.

در شکل ۳ قسمتی از مدل بلوکی هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک در کارگاه‌های ۱۱۸×۸۵ متری نشان داده شده است.

۵- بحث

بدیهی است که با عمیق‌تر شدن موقعیت بلوک و هم چنین فاصله گرفتن آن از بازکننده اصلی هزینه‌های استخراجی افزایش پیدا می کنند. ولی تنها برخی از هزینه‌ها وابسته به موقعیت بلوک هستند. این هزینه‌ها که هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک نامیده می‌شوند، شامل هزینه‌های باربری و هزینه‌های بالابری می‌باشند. در واقع با عمیق تر شدن موقعیت بلوک‌ها هزینه‌های بالابری و با فاصله گرفتن بلوک از بازکننده اصلی (چاه) هزینه‌های باربری افزایش پیدا می‌کنند.

جدول ۳: هزینه‌های مستقل از موقعیت بلوک در معدن Lucky Friday [۹]

اقلام هزینه	مقدار (دلار بر تن)
آماده‌سازی کارگاه	۵/۸۷
چالزنی	۱/۱۲
آتشباری	۱/۰۹
بارگیری داخل کارگاه	۱/۰۸
پر کردن	۱۹/۹۴
هزینه‌های عمومی	۱/۴۱

جدول ۴: هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک در معدن Lucky Friday

اقلام هزینه	هزینه (دلار بر تن) [۹]	فواصل متوسط باربری/بالابری (متر)[۹]	مقدار (دلار بر تن/ متر)
باربری	۲/۳۴	۲۴۵	۰/۰۰۹۵
بالابری	۳/۶۴	۹۱۵	۰/۰۰۴

جدول ۵ : داده‌های مورد نیاز برای محاسبه درآمد [۹]

توضیحات	واحد	مقدار
چگالی سنگ	تن بر متر مکعب	۶
بازیابی	درصد	۹۵
قیمت روی	دلار بر تن	۲۱۱
هزینه فرآوری	دلار بر تن	۱۰

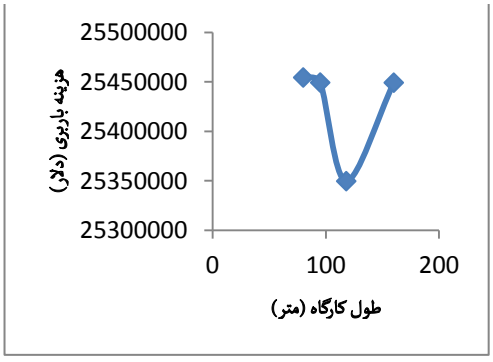
هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک به ابعاد کارگاه‌ها بستگی دارد. از طرفی دیگر در روش‌هایی مثل روش کند و آکند کلیه مواد معدنی خرد شده در داخل کارگاه از یک مکان تخلیه می‌شوند. در نتیجه کلیه بلوک‌هایی که در داخل یک کارگاه کند و آکند قرار می گیرند دارای هزینه‌های وابسته به موقعیت یکسانی هستند. بنابرین در این روش‌ها جانمایی طبقات و کارگاه‌ها نیز از اهمیت زیادی دارد.

به منظور بررسی تاثیر ابعاد کارگاه‌ها و هم چنین جانمایی کارگاه‌ها و طبقات حالات مختلفی از ابعاد کارگاه و جانمایی کارگاه‌ها و طبقات در نظر گرفته شد.

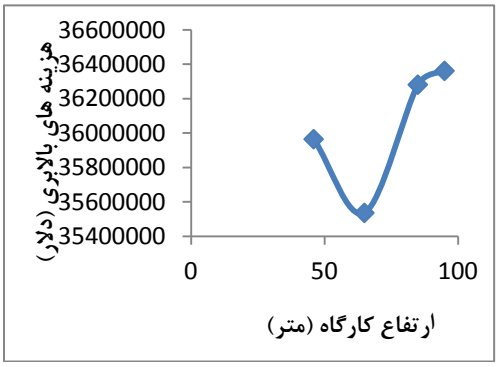
	۱	۲
۴۰	۱۰۷۹۴۱	۱۱۱۸۳۳
۴۱	۱۰۷۹۴۱	۱۱۱۸۳۳
۴۲	۱۰۷۹۴۱	۱۱۱۸۳۳
۴۳	۱۰۷۹۴۱	۱۱۱۸۳۳
۴۴	۱۰۸۹۲۷	۱۱۲۸۱۹
۴۵	۱۰۸۹۲۷	۱۱۲۸۱۹
۴۶	۱۰۸۹۲۷	۱۱۲۸۱۹
۴۷	۱۰۸۹۲۷	۱۱۲۸۱۹

شکل ۳: قسمتی از مدل بلوکی هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک در کارگاه‌هایی با ابعاد ۸۵×۱۱۸ متر

مشاهده می‌شود که با افزایش ابعاد کارگاه‌ها و کاهش تعداد کارگاه‌ها، تعداد بلوک‌ها کاهش می‌یابد. نمودارهای هزینه‌های باربری بر حسب طول کارگاه و هزینه‌های بالابری بر حسب ارتفاع بلوک به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است، با افزایش ابعاد کارگاه‌ها ابتدا هزینه‌های باربری و بالابری کاهش یافته و پس از رسیدن به یک مقدار بهینه دوباره افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۴: هزینه‌های باربری بر حسب طول کارگاه



شکل۵: هزینه‌های بالابری بر حسب ارتفاع کارگاه

در ادامه تحقیق حاضر، می‌توان به بررسی تاثیر موقعیت بلوک بر ارزش اقتصادی بلوک در کانسارهای سه بعدی و تعیین مقدار آن با در نظر گرفتن هزینه‌های وابسته به موقعیت بلوک پرداخت. با توجه به این که در تحقیق حاضر کانسار به صورت دو بعدی فرض شده و محاسبات برای کانسارهای دو بعدی انجام گرفته است، جا دارد محاسبات مشابه در کانسارهای سه بعدی نیز انجام گیرد.

۶- اعتبارسنجی

با مشاهده شکل‌های ۳ و ۴ می‌توان طول بهینه کارگاه و ارتفاع بهینه آن را مشخص کرد. از طریق مقایسه نتایج این نمودارها با طول و ارتفاع واقعی کارگاه که در معدن به کار گرفته شده است، می‌توان دریافت که این دو مقدار مطابقت دارند.

۷- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر تعیین ارزش اقتصادی بلوک‌ها در طراحی معادن زیرزمینی مورد بررسی قرار گرفته شد. ارزش اقتصادی بلوک‌ها در معادن زیرزمینی بر خلاف این مقدار در معادن سطحی تابع موقعیت بلوک‌ها است. در این تحقیق موقعیت بلوک‌ها بر روی ارزش اقتصادی بلوک دخالت داده شده است. با توجه به نتایج، موقعیت بلوک‌ها در معادن زیرزمینی را در محاسبات مربوط به ارزش اقتصاذی بلوک نمی‌توان نادیده گرفت.

مراجع

[1]. Hustrulid, W.A. and M. Kuchta," *Open pit mine planning and design*". Vol. 1., Taylor & Francis, 2006.

[2]. Jalali, M.A., 2009," *Optimization of Underground Mines Limits in Vein Type Deposits*". Phd Theses, Mining and Metallurgy Faculty of Amirkabir University, Tehran.

[3]. Whittle, J., 1990," *Open pit optimization*". SME, & B. Kennedy, Surface Mining, p. 470-475.

[4]. Camus, J., 1992," *Open pit optimization considering an underground alternative*". in *Proceedings of 23th International APCOM Symposium*.

[5]. Ataee-pour, M., 2005," *A Linear Model for Determination of Block Economic Values*, in *The 19th International Mining Congress and Fair of Turkey*."

[6]. Ataee-Pour, M., 2012," *Principles of 2D Orebody Modelling*, Amirkabir University: Tehran. 160-171

[7]. *www.hecla_mining.com*.

[8]. Hustrulid, W.A., W. Hustrulid, and L. Richard, 2001, "*Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies*". SME.

[9]. Hustrulid, W.A., 1982", *Underground mining methods handbook*".

[1] Whittle
[2] Camus
[3] Block Mining Cost
[4] Block Revenue Rate
[5] Variable Value Economic Model

[6] Insitu Income Model
[7] Position Cost Model

[8] Mining Cost Model
[9] Silver