

مقاله پژوهشی

ارزیابی پروژه معادن سنگ آهن سنگان تحت شرایط عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی با در نظر گرفتن اختیار انباشت مواد معدنی

زکریا جلالی^۱، مجید عطایی پور^{۲*}، حسام دهقانی^۳

۱. فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، Zakaria.jalali@aut.ac.ir

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران، Map60@aut.ac.ir

۳. دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران، dehghani@hut.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۹ - پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۱

چکیده

برای ارزش‌گذاری پروژه‌های معدنی به دلیل ماهیت پیچیده کانسار همواره باید منابع عدم قطعیت‌ها شناسایی و تجزیه و تحلیل شوند که در نتیجه منجر به برآورد واقعی‌تر ارزش خالص فعلی آن پروژه می‌شود. بر طبق تحقیقات بسیار زیادی که در ارزیابی پروژه‌های معدنی تحت شرایط عدم قطعیت انجام شده است، بیان شده که استفاده از رویکرد اختیارات حقیقی می‌تواند تأثیر بسیار زیادی بر ارزش‌گذاری یک پروژه معدنی داشته باشد. در این مقاله با استفاده از رویکرد اختیارات حقیقی بر طبق مطالعه موردی که در معدن B پروژه معادن سنگ آهن سنگان انجام شده اختیاری با عنوان انباشت سنگ آهن کم عیار (عیار کمتر از ۳۵ درصد) و انباشت سنگ آهن با درصد $FEO < 10$ (اکسید پایین) تعریف شده است. هدف از تعریف این اختیارات بدست آوردن ارزش خالص فعلی در این پروژه تحت شرایط عدم قطعیت به منظور بررسی زمان مناسب برای فروش سنگ آهن کم عیار و سنگ آهن با درصد اکسید پایین است که در نتیجه با لحاظ کردن انعطاف‌پذیری‌های مدیریتی نتایج آن باعث برآورد واقعی‌تر ارزش خالص فعلی در این پروژه شده است.

کلمات کلیدی

ارزش‌گذاری پروژه‌های معدنی، عدم قطعیت‌ها، روش اختیارات حقیقی، اختیار انباشت، پروژه معدن B سنگ آهن سنگان

۱- مقدمه

آمینا هاکوین^{۱۰} و همکاران [۲۲] در سال ۲۰۱۴ به بررسی یک پروژه معدنی تحت شرایط عدم قطعیت قیمت کالا با استفاده از روش اختیارات حقیقی پرداختند. همچنین تامپسون و بار در سال ۲۰۱۴ [۲۸] با استفاده از روش اختیارات حقیقی، عدم قطعیت قیمت ماده معدنی را با لحاظ کردن عیار حد بهینه در نظر گرفتند که به این منظور برای تعیین یک مدل جدید برای اختیارات حقیقی تحت شرایط احتمالاتی قیمت ماده معدنی را بررسی کردند. ژانگ^{۱۱} و همکاران [۲۹] در سال ۲۰۱۴ نیز با استفاده از روش اختیارات حقیقی، عملیات استخراج را با استفاده از قیمت کالا تحلیل کردند که در این مقاله با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو انعطاف‌پذیری پروژه بررسی شده است. همچنین نتایج این مقاله نشان داد که استفاده از روش اختیارات حقیقی به دلیل بیان انعطاف‌پذیری مدیریتی به عنوان یک استراتژی بسیار مهم در پروژه‌های معادن روباز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد.

راسن^{۱۲} [۳۰] در سال ۲۰۱۵، تغییرات قیمتی چندین فلز منتخب را بررسی کرد با این حال، با توجه به تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها و بسته به نوع تحلیل قیمت فلزات، تغییرات زیادی در نتایج وجود داشت.

آجاک و توپال^{۱۳} (۲۰۱۵) با استفاده از روش اختیارات حقیقی، انعطاف‌پذیری و سازگاری عملیاتی را بررسی کردند و با استفاده از درخت دوجمله‌ای به بررسی نوسانات قیمت کالا در طول یک دوره زمانی مشخص پرداختند که در نتیجه ارزش خالص فعلی پروژه بین ۸ تا ۱۵ درصد افزایش یافته است [۲۳].

با توجه به تحقیقاتی که ساوولاینن^{۱۴} و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۷ انجام دادند به مدلسازی روش اختیارات حقیقی بر طبق روش دینامیک سیستم پرداختند. در این مقاله بیان شد که برای مطالعه اثر انتخاب ساختار مالی پروژه بر سودآوری آن برای نشان دادن این که چگونه می‌توان از یک مدل دینامیک سیستم برای مقایسه نتایج به‌دست‌آمده با استفاده از فرآیندهای مختلف مسیر قیمت تصادفی در مدلسازی استفاده شود. کاربرد عملی این مدل با تحلیل سودآوری یک معدن نیکل با هزینه بالا مورد بررسی قرار گرفته است.

گوچ و چاندرا^{۱۵} [۲۶] در سال ۲۰۱۹ به بررسی و ارزیابی کاربردی یک معدن مس با استفاده از روش اختیارات حقیقی پرداختند. در این مقاله بیان شد که با توجه به پیچیدگی شرایط

امروزه ارزیابی اقتصادی پروژه‌های معدنی با استفاده از روش‌های سنتی مانند گردش مالی تنزیل یافته (DCF)^۱ انجام می‌شود. در روش DCF ارزش خالص فعلی در یک بازه زمانی مشخص شده در نظر گرفته شده است، بنابراین نتایج آن با عدم قطعیت همراه است. از طرفی روش DCF جزو روش‌های ایستا است که در روش‌های ایستا انعطاف‌پذیری مدیریتی در نظر گرفته نشده است [۴]. در مقابل روش‌های ایستا روش‌های پویا قرار دارند که در آن‌ها گردش مالی در آینده متغیر است که در نتیجه باعث برآورد واقعی‌تر ارزش خالص فعلی یک پروژه می‌شود. برای ارزیابی پروژه‌های معدنی تحت شرایط عدم قطعیت و با لحاظ کردن انعطاف‌پذیری‌های مدیریتی، پیشنهاد می‌شود در مرحله اول، عدم قطعیت‌هایی که بر ارزش خالص فعلی آن پروژه تاثیر بسزایی دارند، بررسی و تجزیه و تحلیل شوند.

استفاده از تئوری روش اختیارات حقیقی^۲ اولین بار توسط مرتون^۳ در سال ۱۹۷۱ در دانشگاه MIT ارائه شد [۱۰] و سپس در سال ۱۹۷۳ توسط بلک و شولز به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفت [۸]. تحقیقات بلک و شولز نشان داد که با استفاده از روش اختیارات حقیقی مواردی مانند سرمایه‌گذاری در پروژه‌های معدنی را می‌توان تحلیل کرد.

به همین ترتیب در ارتباط با کاربرد روش اختیارات حقیقی در ارزیابی پروژه‌های معدنی تحقیقاتی توسط مارگارت^۴ و اسلید^۵ در سال ۱۹۹۹، کلینتون وات کینز^۶ و میشل مک آلر^۷ در سال ۲۰۰۴، میشل سیمز^۸ و همکاران در سال ۲۰۰۴ انجام شد [۳ و ۱۸] همچنین در رابطه با ارائه طرح‌های کوتاه‌مدت و برنامه‌ریزی تولید در معادن تحقیقات شو زینگ^۹ و همکارانش در سال ۲۰۰۹ ارائه شد [۲۰]. در سال ۲۰۱۳ دهقانی و عطایی‌پور با استفاده از روش اختیارات حقیقی تاثیر عدم قطعیت‌های اقتصادی به ارزیابی یک پروژه معدنی پرداختند که در نتیجه منجر به افزایش ارزش خالص فعلی آن پروژه به میزان ۴۰ درصد شده است [۲].

¹ Discounted Cash Flow

² Real Options

³ Merton

⁴ Margaret

⁵ Slade

⁶ Clinton Watkins

⁷ Michael McAleer

⁸ Michael Samis

⁹ Shu Xing

¹⁰ Amina Haque

¹¹ Zhang

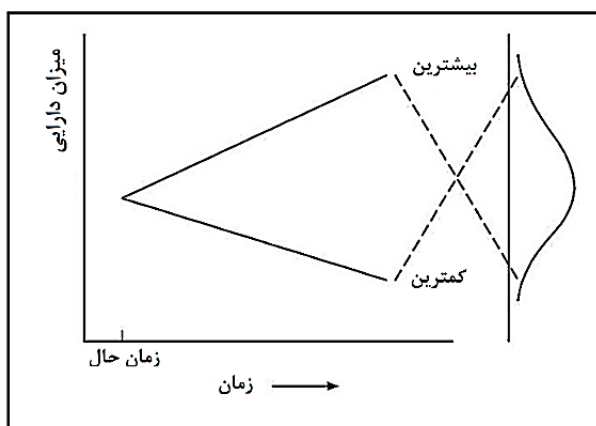
¹² Rossen

¹³ Ajak and Topal

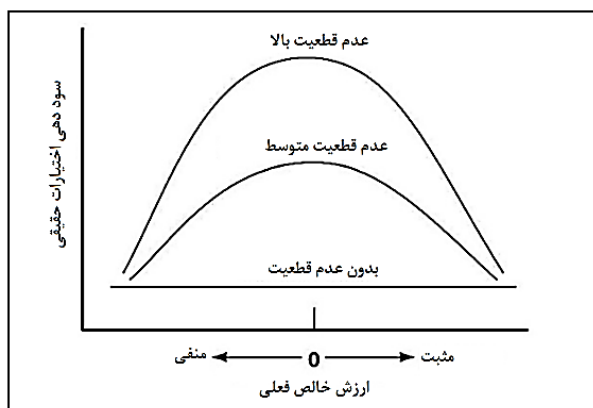
¹⁴ Savolainen

¹⁵ Guj and Chandra

با استفاده از روش اختیارات حقیقی، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند انواع اختیارات را به کار گیرند تا قدرت انتخاب داشته باشند. همین‌طور می‌توانند این اختیارات را به صورت موازی یا متوالی در تصمیم‌گیری استفاده کنند. گسترش، کاهش، پایان و تعویق اختیارات معمول در تصمیم‌گیری‌اند که تصمیم‌گیرنده می‌تواند آن‌ها را اجرا کند [۸]. روش اختیارات حقیقی ارزش دارایی پروژه را در شرایط عدم قطعیت در طول پروژه بررسی می‌کند. به عنوان مثال ساده، مطابق با شکل ۱ ملاحظه می‌شود که عدم قطعیت‌ها به صورت تابعی با افزایش زمان، افزایش می‌یابند و در نتیجه دامنه ارزش دارایی به صورت یک منحنی ایجاد می‌شود [۲۸]. روش اختیارات حقیقی طیف وسیعی از عدم قطعیت‌ها را با استفاده از فرآیندهای تصادفی محاسبه می‌کند [۳۱]. زمانی که در یک پروژه میزان ارزش خالص فعلی افزایش یافته باشد، استفاده از روش اختیارات حقیقی در تصمیم‌گیری در مورد سرمایه‌گذاری در آن پروژه نقش زیادی را ایفا نمی‌کند [۱۸]. بطور مشابه در مورد پروژه‌ای با ارزش خالص فعلی بسیار کم، ارزش‌دهی اضافی آن با استفاده از روش اختیارات حقیقی بسیار ناچیز بدست می‌آید.



شکل ۱- مخروط عدم قطعیت [۷]



شکل ۲- بررسی شرایط سود دهی پروژه با استفاده از روش اختیارات حقیقی تحت شرایط عدم قطعیت [۸]

یک پروژه معدنی به ندرت معامله می‌شوند و دلیل آن این است که انحراف استاندارد سالانه تغییرات قیمت روزانه و یا به عبارتی قیمت کالا و نرخ ارز نوسان‌پذیر است. در این مقاله در ابتدا برای بررسی و ارزیابی پروژه دو سرمایه‌گذاری را با استفاده از روش DCF مورد بررسی قرار داد و سپس با استفاده از روش درخت دوجمله‌ای و روش شبیه‌سازی مونت کارلو (روش GBM) عدم قطعیت‌های مدل را با توجه به داده‌های تاریخی بررسی کرد.

در سال ۲۰۲۱ وی باند^۱ به ارایه چارچوبی بر طبق روش اختیارات حقیقی برای بررسی و ارزیابی رژیم‌های مالیاتی پرداختند. هدف از مقاله وی باند ارایه راهکاری برای ایجاد سیاست‌های مرتبط با سرمایه‌گذاری‌های معدنی با لحاظ کردن رژیم‌های مالیاتی و تحلیل آن بر مبنای روش اختیارات حقیقی است که در نهایت با تعریف کدهای مالیاتی منطبق با شرایط عدم قطعیت در کشورهای مختلف رژیم‌های مالیاتی را برای سرمایه‌گذاری در یک پروژه معدنی کنترل و ارزیابی شده است [۲۷].

با توجه به تحقیقات ارایه شده می‌توان به این نتیجه رسید که روش اختیارات حقیقی به عنوان یکی از مهم‌ترین روش‌ها برای ارزیابی اقتصادی پروژه‌های معدنی تحت شرایط عدم قطعیت‌ها می‌تواند دارای کاربرد باشد [۱]. به این منظور هدف از این مقاله ارزیابی اقتصادی معدن B سنگ آهن سنگان با در نظر گرفتن قیمت و هزینه‌های عملیاتی است. پروژه معادن سنگ آهن سنگان در استان خراسان رضوی واقع شده است و جزو بزرگترین پروژه‌های معدنی در شرق کشور محسوب می‌شود. ارزیابی اقتصادی این پروژه در مرحله اول با استفاده از جدول DCF انجام شده و در مرحله دوم با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی با لحاظ کردن روش اختیارات حقیقی و تعریف درخت دودویی قیمت و هزینه‌های عملیاتی ارزش خالص فعلی پروژه محاسبه شده و اختیاری جدید با عنوان انباشت تعریف شده است.

۲- روش‌شناسی پژوهش

در دهه‌های اخیر با استفاده از رویکرد اختیارات حقیقی به ارایه تفکری در ارتباط با تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری و نیز ارزش‌گذاری طرح‌های اقتصادی پرداخته شده است [۷ و ۸]. با توجه به اهمیت موضوع، اختیارات حقیقی به عنوان یک نقشه راهبردی، مسیرهای مختلفی را بررسی می‌کند و امکان تصمیم‌گیری متناسب با آن شرایط را ارایه می‌دهد. اختیارات حقیقی یک رویکرد نظام‌مند است که در آن با استفاده از نظریه مالی، آمار و مدل‌سازی، اقتصادسنجی در فضای تصمیم‌گیری پویا انجام می‌شود [۳].

¹ Webby Banda

در درخت دودویی ارزش گذاری از زمان صفر که با t_0 نمایش داده شده است، شروع می شود و سپس در یک بازه زمانی که با δt در نظر گرفته شده است ادامه پیدا می کند. u به عنوان نرخ افزایش ارزش هر گره و d به عنوان نرخ کاهش ارزش در نظر گرفته می شود. S_0 به عنوان میزان ارزش اولیه درخت که اگر به احتمال وقوع P_r زیاد شود میزان آن افزایش می یابد و به مقدار uV می رسد در این صورت ($u > 1$) و یا اینکه به احتمال عدم وقوع $q_r = 1 - p_r$ کاهش پیدا کند تا به مقدار dV برسد که در این صورت ($d < 1$) در نظر گرفته می شود [۲]. با در نظر گرفتن مباحث ارایه شده در نتیجه فرض $d < 1 + r_f < u$ مطرح می شود. در این حالت r_f به عنوان نرخ بهره بدون ریسک لحاظ می شود. بر طبق فرضیات مطرح شده روابط ۱ و ۲ ارایه می شوند [۴ و ۵]:

$$u = \exp(\sigma\sqrt{\delta t}) \quad (4)$$

$$d = \left(\frac{1}{u}\right) = \frac{1}{\exp(\sigma\delta t)} \quad (5)$$

همچنین احتمال وقوع با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می شود:

$$p_r = \left(\frac{\exp(\delta t \times r_f) - d}{u - d}\right) \quad (6)$$

که در این روابط:

n : تعداد گام های درخت دو جمله ای

σ : نوسان پذیری که با عنوان انحراف معیار استاندارد تابع توزیع لگاریتم نرمال برگشت پذیری سرمایه در پروژه مطرح می شود.

رابطه اختیار خرید درخت دودویی، ارزش اختیار را در حالت های مختلف تصمیم گیری مدیریت محاسبه می کند [۱۱].

برای محاسبه درخت اختیار بر طبق رابطه های ارایه شده محاسبات از گره انتهایی درخت شروع می شود. در مورد گره انتهایی اولین ردیف با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\text{Max} [S_0 u^n, 0]$$

برای سایر گره ها این ستون درخت ماقبل آخرین ردیف محاسبات به شرح زیر است:

محاسبه گره ستون آخر و دومین ردیف:

$$\text{Max} [S_0 u^{n-1} \times d^1, 0]$$

محاسبه گره ستون آخر و سومین ردیف:

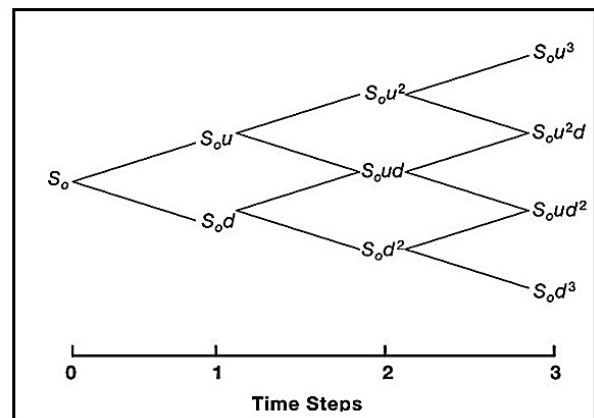
$$\text{Max} [S_0 u^{n-2} \times d^{n+1}, 0]$$

به همین ترتیب برای سایر گره های این ستون محاسبات به

شکل ۲ مخروط عدم قطعیت ها را بیان می کند. با توجه به این شکل ملاحظه می شود زمانی که ارزش خالص فعلی پروژه نزدیک به صفر برسد (از سمت مثبت یا منفی) روش اختیارات حقیقی بیشترین ارزش را برای پروژه بدست می آورد. برای ارزیابی پروژه ها با استفاده از روش اختیارات حقیقی روش های بسیار زیادی وجود دارد که این روش ها از تغییر پذیری ارزش دارایی برای تعیین ارزش اختیار استفاده می کنند [۴، ۵]. روش های ارزیابی تکنیک اختیارات حقیقی در سه گروه مجزا بررسی شده است. اولین روش، روش رابطه دیفرانسیل با مشتقات جزئی است که از جمله مرسوم ترین روش های ارزیابی اختیارات حقیقی است که رابطه بلک-شولز که در سال ۱۹۷۳ توسط فیشر، بلک، مایرون شولز و روبرت مرتون بر پایه اختیارات ساده مانند اختیار خرید و فروش تا تخمین اختیارات پیچیده به کار رفته است [۸]. سپس مدل توزیع دو جمله ای (درخت دودویی) و روش شبیه سازی مونت کارلو ارایه شد که در ادامه با توجه به اینکه در این مقاله از روش درخت دودویی استفاده شده است به شرح این روش به صورت مجزا پرداخته می شود.

۲-۱- روش درخت دودویی

برای مقابله با چندین منبع ریسک همزمان یا ترکیبی از اختیارات، روش های مبتنی بر درخت دودویی و شبیه سازی مونت کارلو برای ارزش گذاری اختیارات توسعه یافته است. کاکس^۱، راس^۲ و رابینستین^۳ در سال ۱۹۷۹ روشی جایگزین برای ارزش گذاری اختیارات با استفاده از دیدگاه درخت دودویی و در هر بازه زمانی مشخص ابداع کردند [۱۰]. در این مدل ارزش دارایی اصلی تحت شرایط عدم قطعیت در بازه های زمانی مختلف و به صورت توزیع دو جمله ای چندگانه مطابق با شکل ۳ محاسبه می شود.



شکل ۳- نمایش شماتیکی درخت دودویی [۱۸]

¹ Cox

² Ross

³ Rubinstein

$$FCF = \{[(P - OC) \times Q] - FC - D\} \times (1 - Tax) + D \quad (7)$$

که در آن:

FCF: گردش مالی پروژه

P: قیمت ماده معدنی

OC: هزینه‌های عملیاتی

Q: میزان تولید

D: استهلاک

FC: هزینه‌های ثابت

Tax: مالیات

پس از محاسبه گردش مالی پروژه، گردش مالی تنزیل یافته با استفاده از رابطه ۸ محاسبه شده است [۶]:

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{FCF}{(1+i)^n} \quad (8)$$

که در آن:

N: کل دوره سرمایه‌گذاری

n: تعداد دوره‌های زمانی برای سرمایه‌گذاری

i: نرخ تنزیل یافته

۳-۲- محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه معدن B سنگ آهن سنگان با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی

در این بخش به بررسی پروژه معدن B سنگ آهن سنگان تحت شرایط عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی با استفاده از رویکرد اختیارات حقیقی پرداخته شده است. در مرحله اول عدم قطعیت قیمت سنگ آهن بررسی شده که به این منظور میزان نوسان‌پذیری قیمت سنگ آهن با توجه به داده‌های تاریخی از وبسایت Indexmundi مطابق با شکل ۴ در بازه زمانی ۲۰ ساله تهیه شده است.

با توجه به نمودار ارایه شده در شکل ۴ که میزان نوسان‌پذیری قیمت سنگ آهن را در بازه زمانی ۲۰ ساله نمایش می‌دهد. در ادامه نیز میزان تغییرات قیمت سنگ آهن با توجه به رابطه ۹ بیان می‌شود:

$$X = \ln \frac{P_{i+1}}{P_i} \quad (9)$$

که در آن:

X: میزان تغییرات قیمت سنگ آهن (درصد)

P: قیمت سنگ آهن (دلار بر تن)

این ترتیب ادامه خواهد داشت. در نهایت برای محاسبه گره ستون آخر و ردیف آخر رابطه زیر ارایه می‌شود:

$$Max [S_0 d^n, 0]$$

در ادامه گره ستون ماقبل آخر محاسبات به شرح رابطه زیر انجام می‌شود:

$$[p_r \times u + (1 - p_r) \times d] \exp[(-r_f) \times \delta t]$$

به همین ترتیب این محاسبات تا اولین گره ادامه پیدا می‌کند.

۳-۲- ارزیابی پروژه معدن B سنگ آهن سنگان تحت شرایط عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی با استفاده از روش اختیارات حقیقی

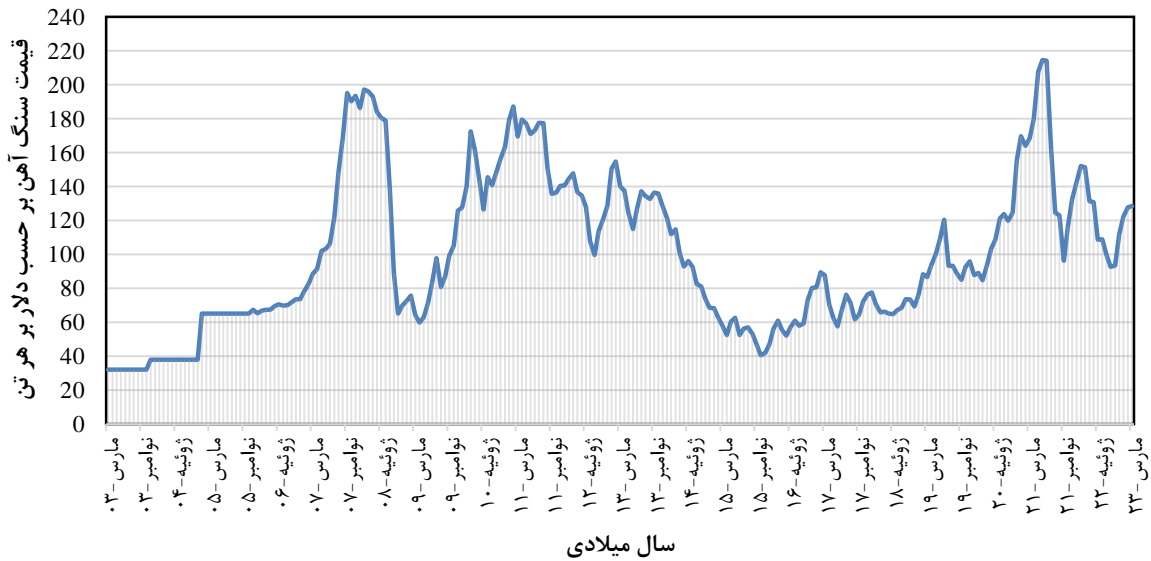
در این بخش برای ارزیابی اقتصادی پروژه معدن B سنگ آهن سنگان به منظور برآورد ارزش خالص فعلی پروژه در گام اول ارزش خالص فعلی پروژه بدون در نظر گرفتن اختیارات و بر اساس جدول DCF محاسبه شده است. در گام دوم ارزش خالص فعلی با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی و استفاده از روش اختیارات حقیقی انجام شده که به این منظور درخت دودویی قیمت و هزینه‌های عملیاتی تشکیل شده و در ادامه درخت گردش مالی و گردش مالی تنزیل یافته ارایه گردیده است.

در مرحله پایانی درخت گردش مالی تنزیل یافته با در نظر گرفتن اختیار انباشت سنگ آهن کم عیار و سنگ آهن با درصد اکسید پایین ($FEO < 10$) درصد محاسبه شده است.

۳-۱- محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه معدن B سنگ آهن سنگان بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

برای محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه و بررسی نتایج بدست آمده با توجه به داده‌های تهیه شده از پروژه معدن B سنگ آهن سنگان، گردش مالی تنزیل یافته این پروژه با در نظر گرفتن قیمت فروش سنگ آهن مطابق با شکل ۴ از سایت Indexmundi تهیه شده است، همچنین میزان تولید سنگ آهن در یک بازه زمانی ۸ ساله مورد بررسی قرار گرفت که در این بازه زمانی میزان درآمد، هزینه‌های عملیاتی، هزینه‌های ثابت و میزان مالیات محاسبه شده است که در نتیجه میزان ارزش خالص فعلی ۱۷۶۶/۶۶ میلیون دلار بدست آمده است.

درآمد مشمول مالیات از کم کردن میزان استهلاک سالیانه از درآمد ناخالص بدست آمده است. گردش مالی پروژه با استفاده از رابطه ۷ محاسبه می‌شود [۲ و ۱۷]:



شکل ۴ - تغییرات قیمت سنگ آهن از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ [۳۲]

همچنین میزان نوسان پذیری (σ) با استفاده از رابطه ۱۰ که در آن: n تعداد P_i و \bar{P} میانگین P_i است.

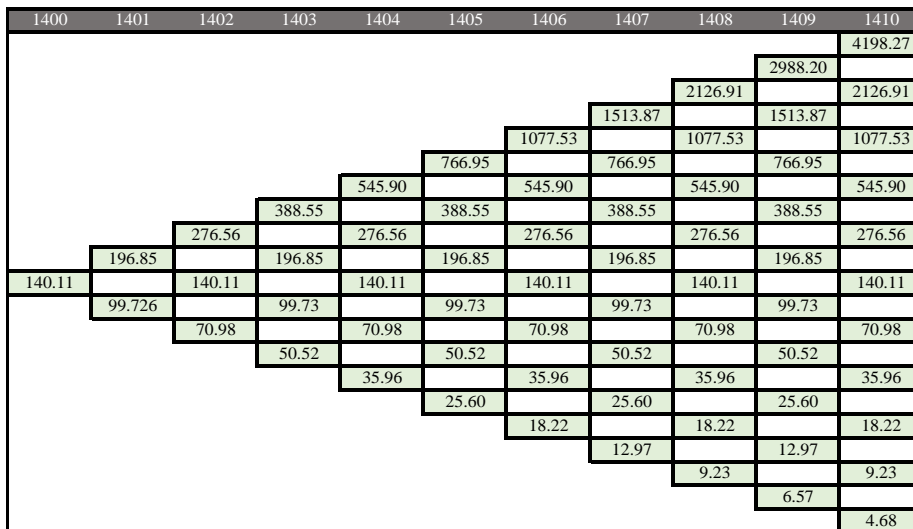
محاسبه می شود:

بعد از انجام این مرحله درخت دودویی برای بررسی عدم قطعیت قیمت سنگ آهن ارایه شده است. در جدول ۱ پارامترهای ورودی و محاسبه شده برای تشکیل درخت قیمت که در شکل ۵ ارایه شده، نمایش داده شده است.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (10)$$

جدول ۱- پارامترهای ورودی و محاسبه شده در درخت قیمت

داده ورودی	مقدار	پارامترها	محاسبه شده
قیمت در سال مبنا	۱۴۰/۱ دلار	ضریب افزایشی	۱/۴۰۴۹
گام زمانی	۱ ساله	ضریب کاهش	۰/۷۱۱۸
میزان نوسان پذیری	۹ درصد	احتمال وقوع	۴۹ درصد
نرخ بهره بدون ریسک	۵ درصد	احتمال عدم وقوع	۵۱ درصد



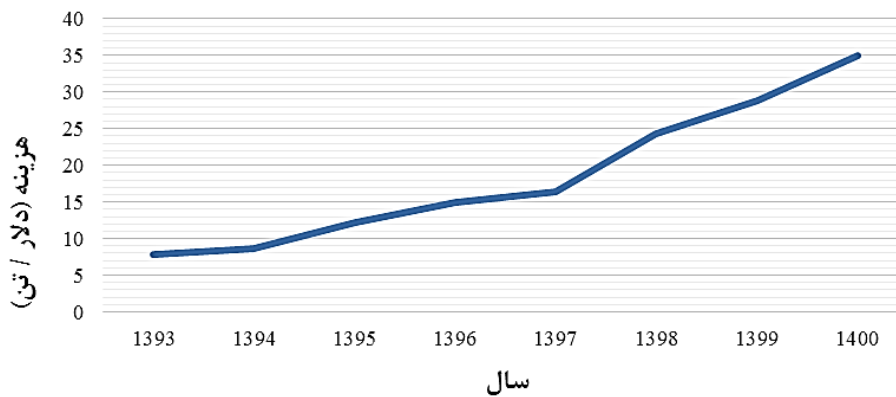
شکل ۵- درخت دودویی تغییرات قیمت سنگ آهن (دلار/ تن)

با در نظر گرفتن نمودار شکل ۶، میزان تغییرپذیری هزینه‌های عملیاتی با استفاده از رابطه ۱۲ محاسبه می‌شود:

$$X = \ln \frac{OC_{i+1}}{OC_i} \quad (12)$$

که در رابطه بالا OC به عنوان هزینه‌های عملیاتی لحاظ شده است.

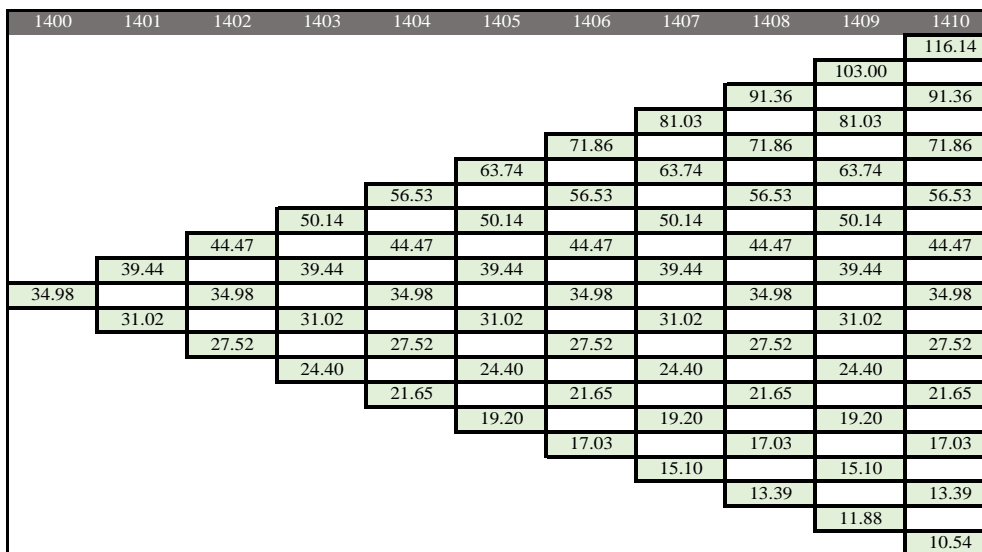
بعد از محاسبه میزان نوسان‌پذیری در مرحله بعد پارامترهای ورودی و محاسبه شده در مورد هزینه‌های عملیاتی در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین درخت دودویی هزینه‌های عملیاتی مطابق با شکل ۷ نمایش داده شده است.



شکل ۶ - نمودار داده‌های تاریخی مربوط به هزینه‌های عملیاتی [۳۲ و ۳۳]

جدول ۲- پارامترهای ورودی و محاسبه شده درخت هزینه‌های عملیاتی

داده ورودی	مقدار	پارامترها	محاسبه شده
هزینه در سال مبنا	۳۴/۹۸ دلار	ضریب افزایشی	۱/۱۲۷۵
گام زمانی	۱ سال	ضریب کاهش	۰/۶۹۸۸
میزان نوسان‌پذیری	۱۲ درصد	احتمال وقوع	۶۸ درصد
نرخ بهره بدون ریسک	۵ درصد	احتمال عدم وقوع	۳۲ درصد



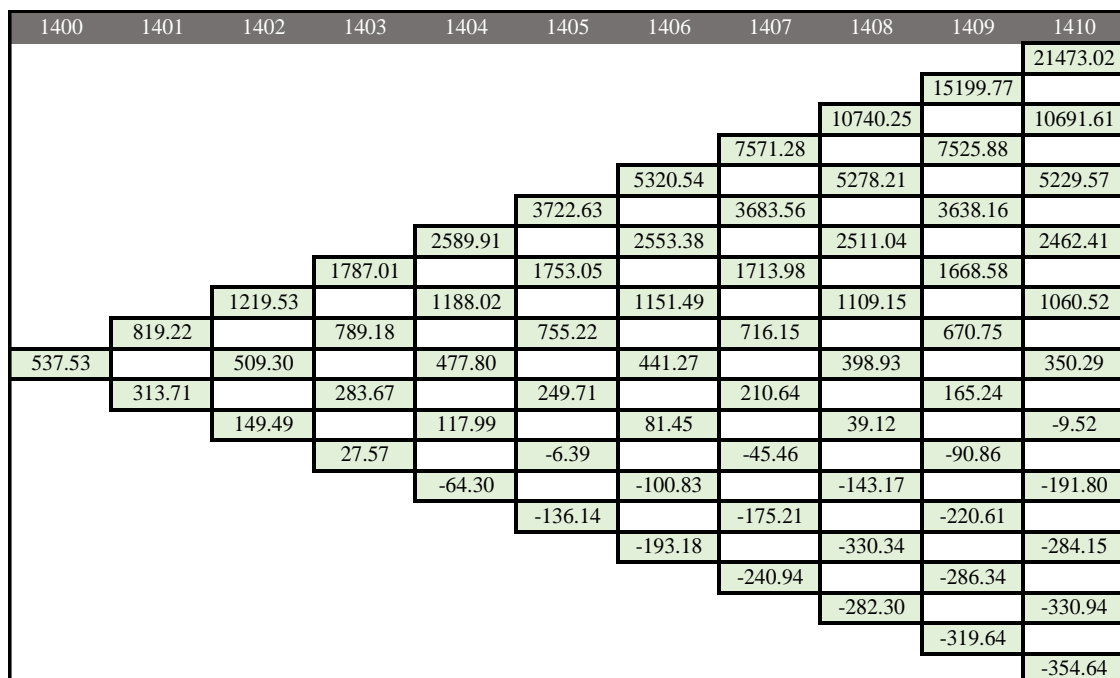
شکل ۷ - درخت دودویی تغییرات هزینه‌های عملیاتی (دلار / تن)

استهلاک ثابت، هزینه‌های ثابت تا پایان سال ۱۴۱۰ به صورت تخمینی مطابق با جدول ۳ نشان داده شده است. برای تخمین هزینه‌های ثابت از رگرسیون خطی استفاده شده است. در رابطه با رگرسیون خطی متغیر وابسته هزینه‌های ثابت و متغیرهای مستقل میزان تولید و استهلاک است. همچنین بین متغیرهای مستقل و وابسته همبستگی وجود دارد. شکل ۸ درخت دودویی گردش مالی پروژه را با لحاظ کردن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی که در ارتباط با تغییرات هزینه‌های ثابت است، نشان می‌دهد.

بعد از تشکیل درخت دودویی هزینه‌های عملیاتی، در این مرحله با استفاده از رابطه ۷، درخت دودویی گردش مالی پروژه که از محاسبه گره‌های درخت دودویی قیمت و هزینه‌های عملیاتی بدست آمده است، محاسبه می‌شود. برای محاسبه گره‌های این درخت اگر ارزش گره بزرگتر از صفر باشد، مالیات در محاسبه آن گره در نظر گرفته می‌شود و اگر ارزش گره صفر و یا کوچکتر از صفر باشد، مالیات در محاسبه آن گره در نظر گرفته نمی‌شود که معمولاً در گره‌های پایین درخت این حالت اتفاق می‌افتد. برای محاسبه درخت گردش مالی و درخت گردش مالی تنزیل‌یافته با در نظر گرفتن میزان تولید و

جدول ۳- تخمین هزینه‌های ثابت در طی بازه ۱۰ ساله

پارامترها	۱۴۰۱	۱۴۰۲	۱۴۰۳	۱۴۰۴	۱۴۰۵	۱۴۰۶	۱۴۰۷	۱۴۰۸	۱۴۰۹	۱۴۱۰
میزان تولید (میلیون تن)	۶,۹۴	۶,۹۴	۶,۹۴	۶,۹۴	۶,۹۴	۶,۹۴	۶,۹۴	۶,۹۴	۶,۹۴	۶,۹۴
هزینه های ثابت (میلیون دلار)	۱۴,۴۵	۱۵,۱۵	۱۶,۷۰	۱۸,۱۰	۱۹,۳۵	۲۱,۵۶	۲۵,۷۰	۲۶,۳۶	۲۸,۹۵	۳۳,۶۴
استهلاک (میلیون دلار)	۱,۸	۱,۸	۱,۸	۱,۸	۱,۸	۱,۸	۱,۸	۱,۸	۱,۸	۱,۸



شکل ۸- درخت دودویی گردش مالی پروژه (میلیون دلار)

مطابق با رابطه ارائه شده برای پیاده‌سازی درخت گردش مالی تنزیل‌یافته پروژه و محاسبه ارزش خالص فعلی محاسبات از گره انتهایی درخت شروع شده و به ترتیب به سمت گره ابتدایی ادامه پیدا می‌کند. گره انتهایی بر طبق تغییرات درخت گردش مالی پروژه با استفاده از عبارت $Max [S_0u^{10}, 0]$ محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن مقدار S_0u^{10} برابر با مقدار ارزش حد بالایی گردش مالی در شاخه ۱۰ است که مقدار آن

درخت دودویی گردش مالی پروژه، هر یک از گره‌های میانی درخت گردش مالی تنزیل یافته با استفاده از رابطه ۱۳ محاسبه می‌شود:

(۱۳)

$$DCF_{n,k} = FCF_{n,k} + \frac{p_r \times DCF_{n+1,k} + (1 - p_r) \times DCF_{n+1,k+1}}{(1 + r_f)}$$

ضرب شده است. احتمال وقوع و عدم وقوع بر اساس پارامترهای ورودی و محاسبه شده درخت قیمت و هزینه‌های عملیاتی در نظر گرفته شده است.

با توجه به درخت تغییرات گردش مالی شکل ۹ بدست می‌آید. مشابه با آن برای سایر گره‌های درخت مقدار آن برابر با تغییرات درخت گردش مالی محاسبه می‌شود. در محاسبه رابطه ۱۳ احتمال وقوع و عدم وقوع در نتایج گره ماقبل درخت

1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410
										19491.19
									27706.37	
								29342.70		9209.36
							27383.25		12852.25	
						23680.50		13284.05		4140.30
					19349.41		11995.35		5575.64	
				15027.79		9907.09		5480.17		1682.27
			11048.48		7563.96		4592.79		2084.84	
		7553.81		5264.97		3355.97		1787.51		523.54
	4571.94		3153.20		2016.46		1131.74		470.25	
2067.45		1277.31		697.62		306.36		82.62		4.61
	-367.16		-550.47		-591.65		-505.04		-303.88	
		-1640.79		-1439.18		-1139.31		-749.14		-273.58
			-2173.78		-1734.51		-1224.71		-647.19	
				-2248.47		-1670.59		-1040.47		-358.81
					-2056.20		-1407.88		-721.46	
						-1726.15		-1054.96		-357.80
							-1342.83		-680.51	
								-957.52		-322.53
									-597.95	
										-277.31

شکل ۹ - درخت دودویی گردش مالی تنزیل یافته (میلیون دلار)

عیار و درصد اکسید آهن به تفکیک سال اهمیت می‌یابد. جدول ۴ تناژ تولید شده سنگ آهن کم عیار و جدول ۵ تناژ سنگ آهن تولید شده با درصد اکسید پایین به انباشتگاه را نشان می‌دهد.

با در نظر گرفتن میزان تناژ ارسالی سنگ آهن کم عیار و سنگ آهن با درصد اکسید پایین با افزایش قیمت سنگ آهن در درخت گردش مالی تنزیل یافته به تناژ سنگ آهن تولید شده میزان ۱/۴۶ میلیون تن برای فروش به کارخانه در سال ۱۳۹۹ لحاظ شده که در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴ - تناژ ارسالی سنگ آهن کم عیار به تفکیک سال از معدن B به انباشتگاه (میلیون تن)

معدن	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰
B	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۰۵	۰/۱۴	۰/۴۲	۰/۶۱	۰/۴۲
تناژ فروش							۱/۴۶	

جدول ۵ - تناژ ارسالی سنگ آهن از نظر درصد اکسید آهن پایین به تفکیک سال از معدن B به انباشتگاه (میلیون تن)

معدن	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰
B	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۴۵	۰/۰۹	۰/۱۶	۰/۶۲	۰/۸۵	۰/۷۳
تناژ فروش					۱/۷۷			۱/۶۳

درصد اکسید پایین نیز مشابه با روند محاسبه درخت سنگ آهن کم عیار انجام می‌شود با این تفاوت که مطابق با جدول ۶ تناژ فروش با توجه به افزایش قیمت سنگ آهن در سال ۱۳۹۷ به میزان ۱،۷۷ میلیون تن و در سال ۱۴۰۰ به میزان ۱،۶۳ میلیون تن رسیده است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب درخت گردش مالی تنزیل‌یافته پروژه را با در نظر گرفتن اختیار انباشت سنگ آهن کم عیار و انباشتگاه سنگ آهن با درصد اکسید پایین را نمایش می‌دهند.

در هر گره از درخت گردش مالی تنزیل‌یافته، میزان تولید سالیانه از کسر تناژ تولید شده سنگ آهن کم عیار و اضافه شدن هزینه انباشتگاه بدست آمده است. برای محاسبه درخت گردش مالی پروژه هزینه‌های مربوط به حمل سنگ آهن به انباشتگاه، ایجاد انباشتگاه، فرصت از دست رفته، تعمیر و نگهداری انباشتگاه و هزینه‌های مربوط به باطله‌برداری با نسب باطله‌برداری ۳ به ۱ در محاسبه درخت گردش مالی پروژه در نظر گرفته شده است. محاسبه درخت گردش مالی تنزیل‌یافته برای سنگ آهن با

1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410
										21212.90
									36827.50	
								43201.11		23232.22
							41401.97		29874.53	
						35330.01		26642.30		23232.22
					27915.68		20952.79		14999.95	
				20759.23		15370.83		10071.20		1682.27
			14537.02		10620.37		6750.40		2084.84	
		9424.05		6775.14		4277.83		1787.51		523.54
	5376.29		3730.49		2304.55		1131.74		470.25	
2197.61		1375.04		697.62		306.36		82.62		4.61
	-367.16		-550.47		-591.65		-505.04		-303.88	
		-1640.79		-1439.18		-1139.31		-749.14		-273.58
			-2173.78		-1734.51		-1224.71		-647.19	
				-2248.47		-1670.59		-1040.47		-358.81
					-2056.20		-1407.88		-721.46	
						-1726.15		-1054.96		-357.80
							-1342.83		-680.51	
								-957.52		-322.53
									-597.95	
										-277.31

شکل ۱۰- درخت گردش مالی تنزیل یافته پروژه با در نظر گرفتن اختیار انباشت سنگ آهن کم عیار (میلیون دلار)

1400	1401	1402	1403	1404	1405	1406	1407	1408	1409	1410
										26885.02
									38037.38	
								40024.19		12542.06
							37014.13		17333.35	
						31597.17		17664.42		5485.95
					25345.81		15621.94		7218.25	
				19184.47		12520.70		6846.67		2076.63
			13609.94		9173.37		5455.34		2410.35	
		8880.62		6028.41		3736.94		1904.25		523.54
	5067.60		3372.03		2046.99		1131.74		470.25	
2146.51		1277.31		697.62		306.36		82.62		4.61
	-367.16		-550.47		-591.65		-505.04		-303.88	
		-1640.79		-1439.18		-1139.31		-749.14		-273.58
			-2173.78		-1734.51		-1224.71		-647.19	
				-2248.47		-1670.59		-1040.47		-358.81
					-2056.20		-1407.88		-721.46	
						-1726.15		-1054.96		-357.80
							-1342.83		-680.51	
								-957.52		-322.53
									-597.95	
										-277.31

شکل ۱۱- درخت گردش مالی تنزیل یافته پروژه با در نظر گرفتن اختیار انباشت سنگ آهن با درصد اکسید پایین (میلیون دلار)

مالی تنزیل یافته و روابط ارایه شده، محاسبه شده است.

• **سناریو ۳:** محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی، در این سناریو ارزش خالص فعلی بر طبق درخت دودویی گردش مالی تنزیل یافته و لحاظ کردن اختیار انباشت سنگ آهن کم عیار (عیار سنگ آهن کمتر از ۳۵ درصد) محاسبه می‌شود.

• **سناریو ۴:** محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی، در این سناریو ارزش خالص فعلی بر طبق درخت دودویی گردش مالی تنزیل یافته و لحاظ کردن اختیار انباشت سنگ آهن با درصد اکسید پایین ($FEO < 10$) محاسبه می‌شود.

با توجه به نتایج جدول ۷ در ارتباط با تحلیل سناریوهای مختلف برای محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه معدن B سنگ آهن سنگان؛ ملاحظه می‌شود که به ترتیب سناریو ۳ در ارتباط با فروش سنگ آهن کم عیار بیشترین تاثیر و پس از آن سناریو ۴ که مربوط به فروش سنگ آهن با درصد اکسید پایین است در مرحله بعد منجر به افزایش ارزش خالص فعلی پروژه شده است. در نهایت با در نظر گرفتن نتایج درخت تنزیل یافته گردش مالی پروژه تحت شرایط عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی با لحاظ کردن اختیار انباشت، سال ۱۴۰۸ بهترین سال (بیشترین ارزش خالص فعلی) برای فروش سنگ آهن موجود در انباشتگاه‌ها پیشنهاد می‌شود.

۴- نتیجه‌گیری

امروزه به دلیل ماهیت پیچیده کانسار، ارزیابی پروژه‌های معدنی تحت شرایط عدم قطعیت اهمیت ویژه‌ای دارد که می‌تواند تاثیرات بسیار زیادی در رابطه با سرمایه‌گذاری در یک پروژه معدنی داشته باشد. استفاده از رویکرد اختیارات حقیقی و تحقیقات بسیار زیادی که تاکنون در این رابطه انجام شده است برای بررسی عدم قطعیت‌ها و ارزیابی یک پروژه می‌تواند بر ارزش خالص فعلی آن پروژه تاثیرگذار باشد. در این پروژه با لحاظ کردن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی با توجه به داده‌های تهیه شده از پروژه معدن B سنگ آهن سنگان، ارزش خالص فعلی پروژه در ابتدا با تشکیل جدول DCF بدست آمده است و سپس با لحاظ کردن عدم قطعیت‌ها با تشکیل درخت دودویی گردش مالی تنزیل یافته لحاظ شده است. در مرحله بعد با تعریف اختیار انباشت سنگ آهن با درصد اکسید پایین و اختیار انباشت سنگ آهن با عیار پایین در پروژه معادن سنگ آهن سنگان، ارزش خالص فعلی پروژه در شرایط عدم

گام‌های محاسباتی در زمینه پیاده‌سازی اختیار انباشت در مورد درخت دودویی گردش مالی تنزیل یافته به شرح زیر است:

گام اول: ارزش‌گذاری از ستون آخر جدول درخت دودویی آغاز شده و مقدار ارزش هر گره در این ستون با مقدار ارزش سرمایه‌گذاری مقایسه شده است و از آنجا که هدف بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی است، مقدار ماکزیمم به عنوان مقدار ارزش جدید در پایین همان گره ثبت می‌شود. این کار برای تمامی گره‌های این ستون انجام می‌شود. ارزش گره‌ها در ستون آخر متناظر با ارزش گره‌ها در ستون آخر درخت گردش مالی است که از مرحله قبل بدست آمده است.

گام دوم: بعد از پایان محاسبات ستون آخر به سمت محاسبات گره‌های ستون ۹ ام حرکت کرده و در این مرحله محاسبات کمی پیچیده‌تر می‌شود. محاسبات هر گره بر طبق رابطه زیر ادامه پیدا می‌کند:

$$[P_r(S'u^9) + (1 - p_r)(S'u^8d)] \times \exp(-r_f \times \delta)$$

روند محاسباتی فوق برای تمامی گره‌ها تا گره اولیه به همین طریق ادامه پیدا می‌کند تا به گره اولیه می‌رسد.

به منظور تحلیل نتایج ارزش خالص فعلی چند سناریو مطابق با نتایج جدول ۶ به شرح زیر تعریف شده است:

جدول ۶- نتایج تحلیل سناریوهای مختلف بر ارزش خالص فعلی در پروژه معدن B سنگ آهن سنگان (میلیون دلار)

سناریو	عدم قطعیت	NPV	درصد افزایش NPV
۱	لحاظ نشده	۱۷۶۶/۶۶	۰
۲	قیمت و هزینه عملیاتی لحاظ شده	۲۰۶۷/۴۵	۱۳
۳	قیمت و هزینه عملیاتی لحاظ شده	۲۱۹۷/۶۱	۲۳
۴	قیمت و هزینه عملیاتی لحاظ شده	۲۱۴۶/۵۱	۲۰

• **سناریو ۱:** محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی، در این سناریو ارزش خالص فعلی پروژه با تشکیل جدول DCF محاسبه می‌شود.

• **سناریو ۲:** محاسبه ارزش خالص فعلی پروژه با در نظر گرفتن عدم قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی، در این سناریو ارزش خالص فعلی بر طبق درخت دودویی گردش

- 2019, pp. 3–21.
9. J. Rogers, "Strategy, Value and Risk — The Real Options Approach," *Strateg. Value Risk — Real Options Approach*, 2002, doi: 10.1057/9780230513051.
 10. R. C. Merton, "Theory of rational option pricing," *Bell Journal Economic Management Science*, pp. 141–183, 1973.
 11. S. C. Myers, "Finance theory and financial strategy," *Interfaces (Providence)*, Vol. 14, No. 1, pp. 126–137, 1984.
 12. J. C. Cox, J. E. Ingersoll Jr, and S. A. Ross, "An intertemporal general equilibrium model of asset prices," *Journal of Economic Social*, pp. 363–384, 1985.
 13. M. A. G. Dias, "Valuation of exploration and production assets: an overview of real options models," *J. Petroleum Science Engineering*, Vol. 44, No. 1–2, pp. 93–114, 2004.
 14. V. T. Datar and S. H. Mathews, "European real options: An intuitive algorithm for the Black-Scholes formula," *Available SSRN 560982*, 2004.
 15. M. E. Slade, "Valuing managerial flexibility: An application of real-option theory to mining investments," *Journal of Environment Economics Management*, Vol. 41, No. 2, pp. 193–233, 2001.
 16. Danialy Engineering Report. Archive in Sangan Iron Ore Complex, Vol 1, No 1, 2008.
 17. H. Dehghani and M. Ataee-Pour, "The role of economic uncertainty on the block economic value—a new valuation approach," *Archive of Mining Science*, Vol. 57, No. 4, 2012.
 18. C. Watkins and M. McAleer, "Econometric modelling of non-ferrous metal prices," *Journal of Economic Survey*, Vol. 18, No. 5, pp. 651–701, 2004.
 19. M. Samis, G. A. Davis, D. Laughton, and R. Poulin, "Valuing uncertain asset cash flows when there are no options: A real options approach," *Resources Policy*, Vol. 30, No. 4, pp. 285–298, 2005.
 20. S. xing LI and P. KNIGHTS, "Integration of real options into short-term mine planning and production scheduling," *Mining. Sciencs. Technology*, Vol. 19, No. 5, pp. 674–678, 2009.
 21. A. D. Ajak and E. Topal, "Real option in action: An example of flexible decision making at a mine operational level," *Resources Policy*, Vol. 45, pp. 109–120, 2015.
 22. M. A. Haque, E. Topal, and E. Lilford, "A numerical study for a mining project using real options valuation under commodity price uncertainty," *Resourecs Policy*, Vol. 39, No. 1, pp. 115–123, 2014.
- قطعیت قیمت و هزینه‌های عملیاتی محاسبه شده است. برای محاسبه اختیارات در ابتدا میزان نوسان‌پذیری قیمت و هزینه‌های عملیاتی محاسبه شده و سپس ارزش خالص فعلی پروژه با در نظر گرفتن اختیار انباشت سنگ آهن با عیار کمتر از ۳۵ و انباشت سنگ آهن با درصد اکسید کمتر از ۱۰ درصد برای دیو و فروش آن‌ها در سال‌های آینده با توجه به بهتر شدن وضعیت فروش سنگ آهن لحاظ شده است. با توجه به نتایج بدست آمده ملاحظه می‌شود که با بهتر شدن وضعیت سنگ آهن مطابق با درخت گردش مالی تنزیل یافته با لحاظ شدن اختیار انباشت بهتر است تا انباشت سنگ آهن در سال‌های اولیه انجام شود تا در سال‌های آتی با قیمت مناسب‌تری به فروش برسد. با توجه به نتایج آرایه شده در این مقاله سال ۱۴۰۸ بهترین سال (دارای بیشترین ارزش خالص فعلی) برای فروش سنگ آهن موجود در انباشتگاه‌ها است که پس از آن ارزش خالص فعلی پروژه کاهش می‌یابد.
- #### منابع
1. J. Savolainen, "Real options in metal mining project valuation: Review of literature," *Resources Policy*, Vol. 50, pp. 49–65, 2016.
 2. H. Dehghani and M. Ataee-Pour, "Determination of the effect of economic uncertainties on mining project evaluation using Real Option Valuation," *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, Vol. 4, No. 4, pp. 265–277, 2013, doi: 10.1504/IJMME.2013.056850.
 3. J. Savolainen, M. Collan, and P. Luukka, "Analyzing operational real options in metal mining investments with a system dynamic model," *Engineering Economic*, Vol. 62, No. 1, pp. 54–72, 2017.
 4. J. Mun, *Real options analysis: Tools and techniques for valuing strategic investments and decisions*, vol. 137. John Wiley & Sons, 2002.
 5. J. Mun, *Real options analysis: Tools and techniques for valuing strategic investments and decisions*, Vol. 320. John Wiley & Sons, 2012.
 6. T. U. Mbolu, P. D. Sornette, M. D. Petraitis, and D. A. Löw, *Project Valuation using Real Options*, Vol. Master of. 2008.
 7. J. Mun, *Modeling risk: Applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques*, Vol. 347. John Wiley & Sons, 2006.
 8. F. Black and M. Scholes, "The pricing of options and corporate liabilities," in *World Scientific Reference on Contingent Claims Analysis in Corporate Finance: Volume 1: Foundations of CCA and Equity Valuation*, World Scientific,

28. Thompson M, Barr D. "Cut-off grade: A real options analysis". *Resources Policy*, Vol 42, p. 83-92, 2014.
29. Zhang K, Nieto A, Kleit AN. "The real option value of mining operations using mean-reverting commodity prices". *Mineral Economics*. Vol 28. pp. 11-22, 2015.
30. Rossen A. "What are metal prices like? Co-movement, price cycles and long-run trends". *Resources Policy*, Vol 45. pp. 255-276, 2015.
۳۱. طاهری مقدر. م، عطایی پور. م، ایران‌نژاد. م، ارزشیابی پروژه‌های معدنی با استفاده از روش اختیار سرمایه‌گذاری، مجله نظام مهندسی معدن ایران؛ شماره ۵، صفحه ۴۴ تا ۵۲، زمستان ۱۳۸۸.
32. *Indxmundi website*, 2022, <<https://www.indxmundi.com/commodities/?commodity=iron-ore>>
23. A. D. Ajak and E. Topal, "Real option in action: An example of flexible decision making at a mine operational level," *Resources Policy*, Vol. 45, pp. 109–120, 2015.
24. A. Rossen, "What are metal prices like? Co-movement, price cycles and long-run trends," *Resources Policy*, Vol. 45, pp. 255–276, 2015.
25. J. Savolainen, M. Collan, and P. Luukka, "Analyzing operational real options in metal mining investments with a system dynamic model," *Engineering. Economoms.*, Vol. 62, No. 1, pp. 54–72, 2017
26. P. Guj and A. Chandra, "Comparing different real option valuation approaches as applied to a copper mine," *Resources Policy*, Vol. 61, pp. 180–189, 2019.
27. W. Banda, "A real options based framework for assessing the international attractiveness of mining taxation regimes," *Resources Policy*, Vol. 74, p. 102414, 2021