

مقاله "علمی-پژوهشی"

مدل سازی کنترل فعالیت دهانه های تخلیه در برنامه ریزی تولید معادن تخریب بلوکی

محمد باقر فتحي^۱، سجاد چهره قانی^۲، فرشاد نژاد شاه محمد^{۳*}

۱- استادیار دانشگاه ارومیه- گروه مهندسی معدن، fathi.bagher@gmail.com

۲- استادیار دانشگاه ارومیه- گروه مهندسی معدن، s.chehreghani@urmia.ac.ir

۳- استادیار دانشگاه ارومیه- گروه مهندسی معدن، f.shahmohammadi@urmia.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۱/۲۲ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱)

چکیده

توسعه صنایع و نیاز به مواد معدنی باعث شده است تا واحدهای معدنی ظرفیت های تولید سالیانه بالاتری را در برنامه تولید خود قرار دهند. تولید در سطوح بزرگ مقیاس نیازمند مدل های برنامه ریزی تولیدی است که اهداف و محدودیت های عملیاتی واقعی و کارآمدی را در ترکیب خود قرار دهند. وجود پارامترهای مختلف مؤثر در طراحی و ارتباط تنگاتنگ آنها در موفقیت عملیات استخراج معادن تخریب بلوکی، مسائل زمان بندی تولید این معادن را پیچیده کرده است. در این تحقیق با معرفی محدودیت طول مدت فعالیت دهانه تخلیه و تعداد دهانه تخلیه فعال در هر دوره از عمر معدن به کنترل مناسب از چگونگی شروع و گسترش استخراج از دهانه های تخلیه در محدوده معدن تخریب بلوکی پرداخته شد و نتایج آن در زمان بندی تولید بررسی شد. بدین منظور مدل های MILP با استفاده از نرم افزار MATLAB توسعه و در ادامه در محیط نرم افزار CPLEX مدل های مربوطه حل شد. اجرای مدل ها بر روی ۱۰۹ دهانه تخلیه که در طی ۱۳ سال وارد مدل زمان بندی تولید شدند نشان داد مدل های MILP پیشنهادی ضمن کنترل فعالیت دهانه های تخلیه، سعی در افزایش حداکثر بهره وری اقتصادی طرح دارند به نحوی که حداکثر اختلاف در NPV محاسبه شده در راستاهای مختلف پیشروی تخریب ۱۶٪ است که خود این عامل نشان می دهد مدل به خوبی تابع هدف مساله را رعایت می کند. همچنین نتایج زمان بندی تولید برای دهانه تخلیه ۶۵ نشان داد که در راستای SN این دهانه تخلیه در دوره ۱ و با عمر ۳ سال وارد زمان بندی تولید شده و بنابراین در هر سال ۳۳٪ از تناژ آن استخراج می شود. این در حالی است که در راستای NS این دهانه تخلیه در دوره ۸ و به صورت کامل در ۱ دوره استخراج شده است. بنابراین طول عمر دهانه های تخلیه نیز تابعی از تناژ و عیار آن دهانه تخلیه و راستای پیشروی استخراج است.

کلمات کلیدی

مدت زمان فعالیت دهانه تخلیه، تعداد دهانه تخلیه فعال، زمان بندی تولید، روش تخریب بلوکی

۱- مقدمه

مستقیم با راستای پیشروی استخراج در معادن تخریب بلوکی است.

مدیریت راستای پیشروی استخراج به منظور جلوگیری از آسیب‌های ناشی از عدم کنترل مناسب تنش در فرایند استخراج از معادن تخریب بلوکی از اجزا مهم در طراحی و اجرا است. یکی از ملاحظات اولیه و اصلی در طراحی تخریب بلوکی به تغییرات ناشی از تنش و تأثیر آن در افق تولید مربوط می‌شود [۶]. به‌طور کلی در انتخاب راستای پیشروی تخریب، معیارهای مختلفی وجود دارد. بر اساس طرح استخراج اگر هدف حداکثرسازی NPV^2 باشد بنابراین شروع تخریب از مناطق پر عیار است. در برخی موارد توجه به راستای تنش‌های اصلی، تعیین‌کننده راستای پیشروی استخراج است. در چنین حالاتی طراح معدن باید بتواند بر اساس مدلی مناسب این راستای تخریب را قبل از انجام زمان‌بندی تولید در معدن پیاده کند. در این حالت بلوک‌های استخراجی که قرار است در راستای موردنظر به ترتیب و بر اساس تقدم‌بندی استخراج^۳ وارد فرایند می‌بایست تخریب و مشخص شود، یا به بیان ساده‌تر، برای هر بلوک باید بلوک‌های مقدم بر تولید آن تعیین شوند [۷].

زمان‌بندی تولید واقعی معادن باید بتواند طرحی مناسبی ارائه کند تا اهداف اصلی استخراج معادن برآورده شود همچنین چنین زمان‌بندی تولید باید به‌اندازه کافی انعطاف‌پذیری داشته باشد تا در مواقع موردنیاز بتوان پارامترهای مؤثر در عملیات استخراج را تغییر داد؛ بنابراین برنامه‌ریزی بلندمدت به‌عنوان هدف راهبردی طراحی، باید یکسری از محدودیت‌های عملیاتی، فنی، زمین‌شناسی، زیست‌محیطی و اقتصادی را به‌منظور کنترل تابع هدف و عملیات استخراج در مدل‌ها وارد کند [۸].

فعالیت دهانه‌های تخلیه در معادن تخریب بلوکی تابعی از راستای پیشروی تخریب، نرخ تخریب، نرخ تخلیه، عوامل ژئوتکنیک، ظرفیت تولید سالیانه، متوسط عیار تولیدی سالیانه و بسیاری از پارامترهای دیگر است. بدون برقراری ارتباط مناسب مابین این پارامترها با نحوه کنترل فعالیت دهانه‌های تخلیه امکان یک عملیات پیوسته و منظم در معادن تخریب بلوکی وجود ندارد. کنترل مناسب و مؤثر از فعالیت دهانه‌های تخلیه، تعیین‌کننده نرخ خروج مواد از دهانه‌های تخلیه، طول عمر هر دهانه تخلیه، فرایند تقدم‌بندی شروع استخراج از دهانه‌های تخلیه بر اساس راستای پیشروی تخریب و تعداد دهانه‌های تخلیه فعال برای رسیدن به اهداف تولید است.

برنامه‌ریزی تولید معادن با استفاده از مدل‌های بلوکی به‌دست‌آمده از مراحل اکتشاف همانند زمین‌آمار، به تعیین نحوه استخراج از بلوک‌های مواد معدنی در افق‌های زمانی مشخص می‌پردازد. در معادن تخریبی و به‌خصوص در روش تخریب بلوکی، ارتفاع بلوک استخراج، نرخ‌های تولید، الگوهای زیربری در ارتباط با تعیین راستای پیشروی تخریب، جانمایی افق‌های تولید، دستگاه‌ها و زیرساخت‌های حمل‌ونقل مواد، پیش‌بینی خردایش، مطالعه جریان ثقلی مواد و فاصله‌داری دهانه‌های تخلیه از پارامترهای بحرانی طراحی و تولید می‌باشند.

نرخ تخلیه در معادن تخلیه بلوکی به‌عنوان یکی از پارامترهای بحرانی در گسترش منطقه تخریب توأم با عوامل ژئوتکنیکی، موفقیت یا عدم موفقیت یک معدن تخریب بلوکی را تعیین می‌کند [۱]. به‌دلیل انتخاب‌ناپذیری روش‌های تخریبی، تعیین طرح کلی و جانمایی انواع زیرساخت‌ها از عامل‌های بسیار مهم در اجرای این روش‌ها است [۲]. فرایند تخریب و توزیع مجدد تنش‌ها، با ایجاد تغییر شکل‌های بزرگ، گسترش برش در طول درزه‌ها و لایه‌بندی‌های موجود، شکستگی بلوک‌های توده سنگ و خردایش توده سنگ بالای افق زیربری همراه است [۳]. در عملیات تخریب، عامل‌های متعددی فرایند تخریب را تحت تأثیر قرار می‌دهند. رفیعی و همکارانش [۴] این عوامل را به‌صورت عامل‌های طبیعی (ساختارهای زمین‌شناسی، آب، مقاومت فشاری تک‌محوری و تنش‌های برجا) و عامل‌های القائی (نرخ تخریب، ارتفاع بلوک، راستای زیربری و شعاع هیدرولیکی) تقسیم‌بندی کرده‌اند. این پارامترها باید به‌صورت مستقیم و یا غیرمستقیم در برنامه‌ریزی تولید وارد شوند تا علاوه بر رسیدن به تولید مطلوب، از آسیب‌های احتمالی ناشی از تضعیف عوامل ژئومکانیک معدن جلوگیری شود. امروزه ثابت‌شده است که کنترل نامناسب امواج لرزه‌ای و تنش‌های القایی ناشی از پیشروی راستای تخریب، عامل اصلی خسارت به زیرساخت‌های تخریب بلوکی است. لابسچر^۱ [۵] حیطه‌ی مطالعاتی که نیاز است تا از بروز آسیب‌های شدید به بخش‌های معدنی و زیرساخت‌ها جلوگیری کند را تعیین کرده است. طبق نظر لابسچر کیفیت و کمیت اطلاعات زمین‌شناسی و ژئومکانیک، درک تنش‌ها و چگونگی توزیع مجدد آن‌ها، پیش‌بینی خردایش و تخریب‌پذیری توده‌سنگ در ارتباط

مؤثر باشد. این مدل در حقیقت تعداد محدودیت‌های کمتری از واقعیت را در نظر گرفته بود. مدل MILP توسط خدایاری و پوررحیمیان [۱۰] برای زمان‌بندی بلندمدت تولید معادن تخریب بلوکی با هدف کنترل رقیق‌شدگی پیشنهاد شده است. آن‌ها با مدل‌سازی ۳ بعدی از وضعیت استخراج از دهانه‌های تخلیه توانستند ضمن زمان‌بندی تولید، به کاهش رقیق‌شدگی در دهانه‌های تخلیه کمک کنند. در مدل آن‌ها عدم توجه به نرخ تخلیه و طول مدت زمان فعالیت دهانه‌های تخلیه ایراد اساسی است. در مدل MILP که نژادشاه محمد و همکاران [۱۸] ارائه کردند کنترل راستای پیشروی تحقیق به‌عنوان یک محدودیت در مسأله زمان‌بندی تولید وجود دارد ولی تعیین فعالیت استخراج از بلوک‌ها که باید قبل از مسأله زمان‌بندی تولید صورت گیرد به‌صورت دستی محاسبه شده است. این در حالی است که در معادنی با بلوک‌های زیاد امکان این تقدم بندی بین بلوک‌ها به‌صورت دستی وجود نداشته و یا با خطای زیادی همراه است.

در روش‌های تخریبی، بلوک‌ها به‌صورت طبیعی بعد از زیربری تخریب‌شده و مواد تخریبی از طریق دهانه‌های تخلیه بازبایی می‌شوند. چگونگی شروع استخراج، حفظ فعال بودن، کنترل عدم فعالیت دهانه‌های تخلیه با توجه به طول عمر هر دهانه تخلیه و کنترل راستای پیشروی تخریب از پارامترهای بحرانی در افزایش بازبایی معادن تخریبی است؛ بنابراین لازم است تا مدلی ارائه شود که تمام این موارد را به‌عنوان اجزا اصلی در برنامه‌ریزی تولید وارد کند. این در صورتی است که در اکثر مدل‌ها و تحقیقات اشاره شده در این تحقیق، کاربرد این پارامترها یا وجود نداشته و یا اینکه به‌صورت یکپارچه نیست. در این تحقیق سعی شده است مدلی بر مبنای برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) توسعه یابد. الگوریتم کلی ارائه شده توسط نژادشاه محمد و همکاران [۱۸] به‌عنوان مبنای زمان‌بندی تولید استفاده شده است. فرمول‌بندی ریاضی برای تابع هدف که حداکثر سازی NPV است و همچنین برای برخی از محدودیت‌های ریاضی مورد استفاده در زمینه‌ی عملیاتی، زمین‌شناسی از معادلات ریاضی آن‌ها استفاده شده است. در این تحقیق به‌منظور کنترل فعالیت دهانه‌های تخلیه با توجه به راستای پیشروی استخراج و بررسی تأثیر آن‌ها در زمان‌بندی تولید معادن دو محدودیت جدید ارائه شده است. اولین محدودیت بنام کنترل حداکثر تعداد دهانه‌های فعال در هر دوره از عمر معدن بوده و دومین محدودیت تعیین‌کننده، طول عمر دهانه‌های تخلیه است؛ بنابراین مدل MILP جدیدی

بنابراین باید تناژها و دوره‌های استخراج از دهانه‌های تخلیه بر اساس اهداف برنامه‌ریزی تولید معادن به نحو مناسب تعیین شود تا نحوه گسترش تخریب در معدن را بر اساس کنترل مؤثر از فعالیت دهانه‌های تخلیه به نحو مناسب انجام داد. بیان چنین مسأله‌ای در برنامه‌ریزی تولید معادن تخریب بلوکی به‌صورت روابط ریاضی و با ساخت و اجرای مدل‌های MILP یکی از اهداف این تحقیق است.

زاراته^۴ و همکاران، خدایاری و پوررحیمیان، رهال^۵ و گاست^۶ محدودیت‌های مختلف موجود در روش تخریب بلوکی را با شکل‌ها و تعاریف گوناگونی بیان کرده‌اند؛ به‌طورکلی در این روش محدودیت‌ها در طبقه‌بندی‌های ژئوتکنیکی، استخراجی، متالورژیکی، اقتصادی و زمین‌شناسی جای می‌گیرند [۹-۱۲]. کوورین^۷ و همکارانش [۱۳] مدل MILP برای تخریب بلوکی با هدف حداکثرسازی NPV ارائه کردند. محدودیت‌های مدل پیشنهادی این محققین شامل ظرفیت استخراج معادن، استخراج پیوسته و عیار تولیدی در هر دوره زمانی بوده و آن‌ها الگویی برای تعیین چگونگی فعالیت دهانه‌های تخلیه، نرخ تخلیه و دیگر محدودیت‌های عملیاتی ارائه نکرده بودند. پارکینسون^۸ [۱۴] توانست سه مدل IP^۹ مختلف، با تابع هدف NPV برای بهینه‌سازی وضعیت استخراج بر اساس محدودیت‌های فیزیکی و کنترل نشست در معادن تخریب بلوکی ارائه کند ولی وی تعریفی از دهانه تخلیه در مدل خود نداشت. رهال و همکارانش [۱۵] یک مدل MIP^{۱۰} برای طراحی عملیات معادن تخریب بلوکی با هدف کم کردن میزان انحراف تولید از میزان تقاضا پیشنهاد نمود به‌طوری‌که محدودیت‌های او در مدل پیشنهادی به حداکثر و حداقل نرخ تخلیه، میزان باطله مجاز موجود در هر دهانه تخلیه، ایجاد سلسله‌مراتب استخراج از دهانه‌های تخلیه محدود می‌شد. روبیو^{۱۱} و همکارانش [۱۶] کنترل پیشروی تخریب را با تمرکز بر سیستم کنترل از دهانه‌های تخلیه در معادن تخریب بلوکی در مدل‌های شبیه‌سازی و ریاضی استفاده کردند. اسمالجنوویک^{۱۲} و همکارانش [۱۷] مدل MILP^{۱۳} برای برنامه‌ریزی معدن تخریب بلوکی ارائه کردند. آن‌ها در مدل ارائه شده به بررسی تأثیر زمان باز و بسته بودن دهانه‌های تخلیه در میزان NPV محاسبه شده پرداختند. محدودیت‌هایی که آن‌ها در نظر گرفتند شامل ظرفیت استخراج، حداکثر تعداد دهانه‌های فعال، ظرفیت دهانه‌های تخلیه، محدودیت هندسی و جابجایی بود. آن‌ها نشان دادند که محدودیت ظرفیت برای بخش‌های گوناگون سیستم جابجایی حداکثر تا ۵ درصد می‌تواند در تغییر NPV

۱-۱-۲- راهکار اول

روابط ۱ تا ۴ برای تعیین حداکثر تعداد دهانه‌های فعال در هر دوره از فعالیت عمر معدن ارائه شده است. در این راهکار در مدل MILP پیشنهادی نیاز به دو متغیر گسسته است به نحوی که اولین متغیر گسسته $(Z_{i,t} \in [0,1])$ نشان‌دهنده شروع استخراج از دهانه تخلیه باشد. نقش این متغیر به نحوی است که اگر دهانه تخلیه‌ای چون i در دوره‌ای چون t شروع به استخراج کند فقط در آن دوره $(Z_{i,t}=1)$ و در مابقی دوره‌ها این متغیر برابر با صفر است چراکه هر دهانه تخلیه جهت حفظ مسیر تخریب، فقط یکبار می‌تواند شروع به استخراج کند و بعد از شروع تخلیه باید تا اتمام ماده مجاز استخراجی از آن فعال باشد. متغیر گسسته دوم $(B_{i,t} \in [0,1])$ نشان‌دهنده دوره‌های فعال بودن دهانه تخلیه در فرایند استخراج است، به نحوی که در هر دوره‌ای که دهانه تخلیه فعال باشد مقدار آن برابر با یک می‌باشد $(B_{i,t}=1)$. همچنین در مدل MILP پیشنهادی نیاز به یک متغیر پیوسته $(X_{i,t} \in \{0,1\})$ است. مقدار این متغیر اگر استخراجی از دهانه تخلیه i انجام شود همواره بزرگ‌تر از صفر بوده و برابر با درصد استخراج از دهانه تخلیه موردنظر است. بنابراین در هر دوره همانند t که مقدار X_i بزرگ‌تر از صفر باشد مقدار B_i برابر با یک و در غیر این صورت مقدار B_i برابر با صفر است که این نشان‌دهنده عدم فعالیت دهانه تخلیه در دوره موردنظر t است. رابطه ۱ این ارتباط را نشان می‌دهد.

$$\frac{B_{i,t}}{MA_u} \leq X_{i,t} \leq B_{i,t} \Rightarrow \begin{cases} \forall X_{i,t} > 0 \Rightarrow B_{i,t} = 1 \\ \forall X_{i,t} = 0 \Rightarrow B_{i,t} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\sum_{t=1}^T Z_{i,t} = 1 \quad (2)$$

$$B_{i,t} - B_{i,(t-1)} \leq Z_{i,t} \quad t = 2, 3, \dots, T \quad (3)$$

$$B_{i,1} - Z_{i,1} < 1 \quad t = 1 \quad (4)$$

در رابطه ۱ MA_u بیانگر حداکثر ظرفیت استخراج سالیانه معدن است. بر اساس رابطه ۲ هر دهانه تخلیه در طول عمر آن فقط یکبار وارد فرایند استخراج می‌شود و فقط در آن دوره مقدار آن برابر با یک است.

رابطه ۳ مدل را وادار می‌کند تا هر دهانه تخلیه، اگر در دوره‌ای چون t شروع به تخلیه کرد نتواند در دوره ماقبل از آن دوره مشخص فعال باشد [۲]. رابطه ۴ این محدودیت را فقط برای دوره ۱ نشان می‌دهد.

$$\sum_{i=1}^I B_{i,t} \leq N_{act,t} \quad (5)$$

توسعه‌یافته و کاربرد آن در برنامه‌ریزی تولید معادن تخریب بلوکی بررسی شد. چنین مدلی با رفع ایرادات مدل‌های قبلی می‌تواند به نحو گسترده‌ای در برنامه‌ریزی تولید معدن استفاده شود.

۲- روش مدل‌سازی

در این تحقیق نرم‌افزار MATLAB به‌عنوان زبان اصلی در ایجاد مدل‌های MILP استفاده شد. این نرم‌افزار به‌عنوان یک‌زبان برنامه‌نویسی با محیط تعاملی با سایر نرم‌افزارها امروزه در مدل‌های مختلف شبیه‌سازی، پردازش و برنامه‌ریزی استفاده می‌شود. همچنین از نرم‌افزار CPLEX به‌عنوان عامل اجراکننده در حل این مدل‌های عددی استفاده شد. CPLEX یک نرم‌افزار توسعه‌یافته برای اجرای انواع برنامه‌ریزی‌های مختلط خطی و غیرخطی می‌باشد که از یک معیار بهینگی (EPGAP) در تعیین دقیق جواب به‌دست‌آمده از مدل استفاده می‌کند.

این مدل‌ها با استفاده از سیستم رایانه‌ای ASUS G501 پردازنده Intel (R) Core i7-2.3GHz و حافظه داخلی ۱۶ GB اجرا شدند.

با توجه به هدف اصلی این تحقیق که ارزیابی فعالیت دهانه‌های تخلیه در برنامه‌ریزی تولید معادن تخریب بلوکی است گام‌های مورد نیاز در انجام این تحقیق به‌صورت زیر انجام شد؛

الف- توسعه محدودیت‌های مرتبط با فعالیت دهانه‌های تخلیه (تعداد دهانه تخلیه فعال در هر دوره و مدت زمان فعالیت هر دهانه تخلیه)

ب- اعمال سایر محدودیت‌های مورد نیاز در برنامه‌ریزی تولید معادن تخریب بلوکی (حداکثر ظرفیت تولید سالیانه، متوسط عیار تولیدی سالیانه، ناسی و راستای پیشروی تخریب یا استخراج)

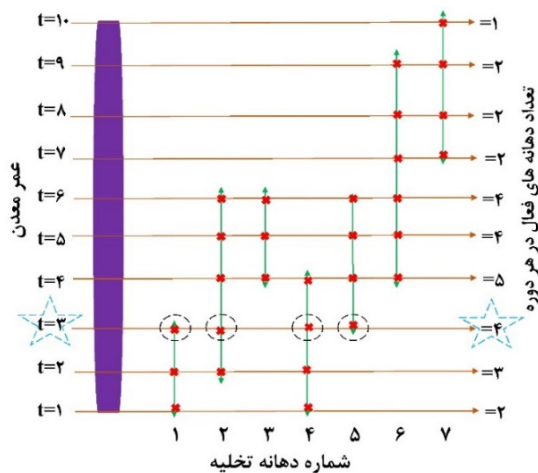
ج- تعیین تابع هدف مدل MILP (در این تحقیق حداکثرسازی NPV است)

د- ساخت ماتریس ضرایب محدودیت و تابع هدف در نرم‌افزار MATLAB و اجرا در CPLEX

ه- بررسی و تفسیر نتایج

لازم به ذکر است که به‌منظور کنترل فعالیت دهانه‌های تخلیه در زمان‌بندی تولید ۲ راهکار ارائه و ارزیابی شد.

۱-۲- تعداد دهانه تخلیه فعال در هر دوره



شکل ۱- تعداد دهانه‌های تخلیه فعال در هر دوره با راهکار اول

۲-۱-۲- راهکار دوم

متغیر گسسته ($Z_{i,t} \in [0,1]$) نشان‌دهنده شروع استخراج از دهانه تخلیه باشد. بعد از شروع استخراج از هر دهانه تخلیه تا آخر عمر معدن مقدار این متغیر برابر با ۱ است. معادله ۷ این فرایند را نشان می‌دهد.

$$Z_{i,t} - Z_{i,t+1} \leq 0 \quad (7)$$

متغیر گسسته سوم ($B_{i,t} \in [0,1]$) نشان‌دهنده دوره‌های فعال بودن دهانه تخلیه در فرایند استخراج است به‌نحوی که در هر دوره‌ای که دهانه تخلیه فعال باشد مقدار آن برابر با یک می‌باشد ($B_{i,t}=1$). معادله ۸ حداکثر تعداد دهانه‌های تخلیه فعال در هر دوره را نشان می‌دهد.

$$B_{i,t} = \sum_{t=1}^T (Z_{i,t} - C_{i,t}) \leq N_{act,t} \quad (8)$$

همان‌طور که در شکل ۲ آمده است فعال بودن یا نبودن دهانه‌های تخلیه را می‌توان از رابطه ($Z_{i,t}-C_{i,t}$) برای دهانه تخلیه در هر دوره تعیین کرد. به‌عنوان مثال در این شکل با فرض عمر ۱۰ سال برای یک معدن، اگر دهانه تخلیه i در دوره ۳ شروع به استخراج کند و در دوره ۷ استخراج از آن تمام‌شده

و بسته شود در آن صورت دوره‌های فعالیت برای این دهانه تخلیه از ۳ تا ۷ خواهد بود، بنابراین دهانه موردنظر در ۴ دوره فعال است. همچنین با دانستن تعداد کل دهانه‌های فعال در هر دوره‌ای چون t و تعداد کل دهانه‌های فعال در دوره ماقبل از آن یعنی $t-1$ ، تعداد دهانه‌های جدید در دوره t از تفاضل تعداد دهانه‌ها فعال دوره‌های t و $t-1$ به‌دست می‌آید.

معادله ۵ به مدل این اجازه را می‌دهد تا در طی هر دوره از عمر معدن به‌اندازه حداکثر تعداد مجاز ($N_{act,t}$) دهانه‌های تخلیه را فعال کند. حداکثر تعداد دهانه‌های تخلیه در هر معدن بر اساس گستردگی و ابعاد آن معدن، زیرساخت‌های موجود، تجهیزات و ماشین‌آلات به دست می‌آید. عملیات استخراج معدن تخریب بلوکی نشان داده است حداکثر تعداد دهانه‌های فعال نباید از ۳۰ تا ۵۰٪ از تعداد کل دهانه‌های موجود در معدن تجاوز کند [۱۱]. این تعداد از دهانه‌های تخلیه فعال باید به‌اندازه کافی زیاد باشد تا بتواند به اهداف تولید برسد. همچنین این تعداد از واحدهای تولید فعال باید به‌اندازه کافی کم باشد تا از تخریب‌های گسترده در بلوک‌های تولیدی و نشست‌های ناگهانی و گسترده در سطح زمین جلوگیری کند. در مدل MILP تعداد کل دهانه‌های تخلیه فعال در هر دوره برابر با مجموع دهانه‌های تخلیه در حال استخراج در آن دوره است. شکل ۱ چگونگی محاسبه تعداد دهانه‌های تخلیه فعال را نشان می‌دهد. در این شکل محل‌های تقاطع محور عمر معدن با شماره دهانه تخلیه نشان‌دهنده تعداد دهانه‌های فعال در آن دوره است. به‌عنوان مثال در این شکل در دوره سوم از عمر معدن دهانه‌های تخلیه ۱، ۲، ۴ و ۵ فعال می‌باشند؛ بنابراین در این دوره ۴ دهانه تخلیه فعال است.

در راهکار دوم برای مدل MILP از سه متغیر باینری و یک متغیر پیوسته استفاده شده است. این تکنیک اولین بار توسط کاکتا [۱۹] برای معدن روباز بکار گرفته شد تا زمان محاسبات در مدل‌سازی کاهش یابد. در این تحقیق از مدل توسعه یافته این روش برای معدن تخریب بلوکی استفاده شد. متغیر پیوسته ($X_{i,t} \in \{0,1\}$) برای تعیین درصد استخراج از دهانه‌های تخلیه در واحدهای زمانی مختلف استفاده می‌شود. متغیر گسسته اول ($C_{i,t} \in [0,1]$) نشان‌دهنده دوره‌ای است که دهانه تخلیه بسته می‌شود و بعد از آن امکان استخراج از آن وجود ندارد؛ بنابراین در هر دوره‌ای که دهانه‌ای بسته شود $C_{i,t}=1$ خواهد بود در این راهکار با استفاده از معادله ۶ بعد از بسته شدن دهانه تخلیه مقدار متغیر آن همواره عدد ۱ خواهد بود.

$$C_{i,t} - C_{i,t+1} \leq 0 \quad (6)$$

شمارش تعداد دوره‌های فعال بودن هر دهانه تخلیه اجازه نمی‌دهد تا مجموع این دوره‌ها از $L.A_{max}$ بیشتر باشد. همچنین در این رابطه اگر مقدار Z در دوره t برای دهانه تخلیه i برابر با ۱ باشد، که معرف شروع به استخراج آن دهانه تخلیه است، تأثیری در فعالیت آن دهانه تخلیه ندارد. بدین معنا که شروع استخراج از دهانه تخلیه لزوماً به معنای فعال بودن نبوده و مدل می‌تواند بر طبق محدودیت عیار تولید، اگر عیار دهانه تخلیه کمتر از حد مجاز باشد، آن را فعال نکند و فقط برای حفظ راستای پیشروی تخریب متغیر Z آن را در دوره t برابر با ۱ قرار دهد. درحالی‌که مقدار متغیر B در آن دوره برای دهانه تخلیه موردنظر می‌تواند صفر باشد، یعنی استخراجی از آن دهانه تخلیه انجام نشود. دهانه‌های تخلیه با این فرایند شروع استخراج از نوع باطله هستند و طبیعتاً در هیچ دوره دیگر از عمر فعال نخواهند شد. در رابطه ۱۰ با داشتن دوره شروع فرایند تخلیه در هر دهانه تخلیه و دوره بسته شدن آن دهانه، تعداد دوره‌های فعال بودن هر دهانه تخلیه مشخص می‌شود. بطوریکه این دوره‌های فعالیت نباید از $L.A_{max}$ بیشتر باشد. شکل ۳ عملکرد معادلات ۹ و ۱۰ در تعیین دوره‌های فعالیت هر دهانه تخلیه در یک معدن فرضی را نشان می‌دهد. در هر دو راهکار، مدل MILP از طریق تجمیع دوره‌های فعال بودن دهانه‌های تخلیه، طول عمر آن‌ها را به دست می‌آورد. به‌عنوان مثال در شکل ۳ برای دهانه تخلیه شماره ۱۰ دوره شروع به استخراج ۵ و دوره بسته شدن ۷ است. بنابراین این دهانه تخلیه در دوره‌های ۵، ۶ و ۷ فعال است پس عمر این دهانه تخلیه ۳ است. در این شکل حداکثر طول مدت فعالیت دهانه‌های تخلیه شماره ۹ و ۶ برابر با ۵ دوره است.

به‌منظور کنترل تقدم‌بندی دهانه‌های تولید در محدودیت تقدم‌بندی استخراج، از مدل ارائه‌شده توسط نژادشاه محمد و فتحی [۷] استفاده شد.

		عمر معدن									
		t=۱	t=۲	t=۳	t=۴	t=۵	t=۶	t=۷	t=۸	t=۹	t=۱۰
Z_i	➔	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
C_i	➔	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Z_i-C_i	➔	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0

دوره فعال بودن

شکل ۲- تعیین دوره‌های فعال بودن دهانه‌های تخلیه با راهکار دوم

۲-۲- طول مدت فعالیت هر دهانه تخلیه

نرخ تخلیه از دهانه‌های تخلیه باید به‌اندازه کافی سریع باشد تا از فشردگی مجدد مواد خرد شده در دهانه‌های تخلیه جلوگیری کند. همچنین این میزان باید به‌اندازه کافی آهسته باشد تا از انفجارهای بزرگ هوا و ریزش قطعات درشت سنگ در دهانه‌های تخریب پرهیز شود. کنترل این نرخ در مدت زمان استخراج از دهانه‌های تخلیه تأثیر دارد [۹]. با توجه به اینکه کنترل راستای پیشروی استخراج تابع زمان باز و بسته شدن دهانه‌های تخلیه است، بنابراین مدل MILP برای تعیین دقیق راستای پیشروی استخراج نیاز دارد تا طول عمر فعالیت دهانه‌های تخلیه را نیز کنترل کند. از این رو دهانه‌های تخلیه باید دارای یک حداکثر عمر مجاز برای فعالیت باشند تا به نرخ تخلیه مناسبی برسند. محدودیت طول مدت فعالیت هر دهانه تخلیه در حقیقت به‌طور غیرمستقیم به کمک سیستم کنترل تخلیه می‌آید. بدین ترتیب اگر دوره فعال بودن واحدهای تولیدی زیاد باشد، واحد تولیدی مورد نظر می‌تواند با نرخ‌های کمتری از نرخ مجاز استخراج شود و اگر این محدودیت، اعداد کمتری به خود اختصاص دهد امکان استخراج کامل واحدهای تولیدی وجود ندارد. برای اینکه بتوان این محدودیت را وارد مدل MILP کرد معادلات ۹ و ۱۰ پیشنهاد شد.

$$\sum_{t=1}^T (B_{i,t} - Z_{i,t}) \leq L.A_{max} + 1 \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T (Z_{i,t} - C_{i,t}) \leq L.A_{max} \quad (10)$$

معادله ۹ برای کنترل طول مدت فعالیت دهانه‌های تخلیه در راهکار اول بوده و معادله ۱۰ برای استفاده در راهکار دوم ارائه شد. در این معادلات $L.A_{max}$ نشان‌دهنده حداکثر طول عمر فعالیت برای هر دهانه تخلیه می‌باشد. در رابطه ۹ از طریق کنترل تعداد دوره‌های فعال بودن دهانه‌های تخلیه مدت زمان استخراج از هر دهانه تخلیه تعیین می‌شود بنابراین مدل با

معادله ۱۳ به‌عنوان محدودیت زمین‌شناسی، مدل را مجبور می‌کند تا در حد امکان بتواند حداکثر ماده معدنی موجود در محدوده معدن را استخراج کند [۲].

$$\sum_{t=1}^T X_{i,t} \leq 1 \quad (13)$$

معادلات ۱۴ و ۱۵ محدودیت عیار تولیدی از دهانه‌های تخلیه است. طبق این رابطه مدل کنترل استخراج از دهانه‌های تخلیه را باید برای رسیدن به اهداف اقتصادی استخراج طبق این معادله انجام دهد [۲].

$$\sum_{i=1}^I (Ton_i \times (LG - G_{i,t})) \times X_{i,t} \leq 0 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I (Ton_i \times (G_{i,t} - UG)) \times X_{i,t} \leq 0 \quad (15)$$

معادله ۱۴ حداقل عیار قابل قبول استخراجی و معادله ۱۵ حداکثر عیار قابل قبول استخراجی در هر دوره از عمر معدن است. در این معادلات LG بیان‌گر حداقل عیار و UG حداکثر عیار استخراجی و G متوسط عیار ماده معدنی در دهانه تخلیه i است.

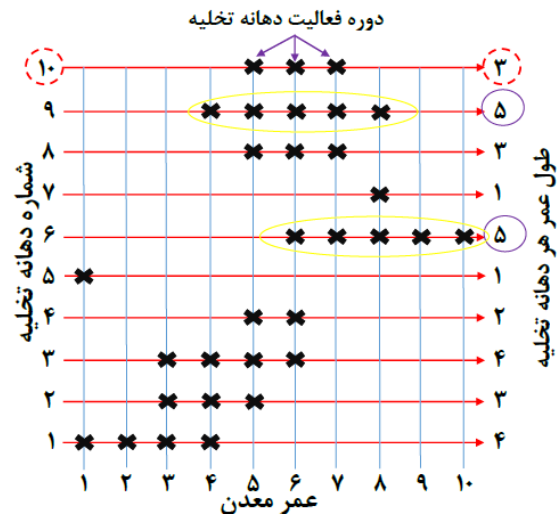
بعد از تعیین محدودیت‌ها و تابع هدف مورد نیاز در مدل MILP، ماتریس ضرایب تابع هدف و تمام محدودیت‌ها همانند شکل ۴ برحسب متغیرهای تصمیم در نرم‌افزار MATLAB ایجاد شد و برای حل، ماتریس این محدودیت‌ها و تابع هدف وارد نرم‌افزار CPLEX شد تا مدل MILP از طریق الگوریتم شاخه و کران اجرا شود. در شکل ۴ در ماتریس ضرایب محدودیت، برای هر محدودیت که متغیر تصمیم در آن محدودیت موجود نباشد مقدار آن برابر با صفر است.



شکل ۴- ماتریس ضرایب محدودیت‌ها

۳- معرفی مورد مطالعاتی

مورد مطالعاتی که برای کنترل فعالیت دهانه‌های تخلیه و همچنین تأثیر آن در برنامه‌ریزی تولید معادن تخریب بلوکی در مدل MILP استفاده شده است شامل ۱۰۹ دهانه تخلیه از معدن ال تنینته^{۱۴} در شیلی است. این



شکل ۳- طول مدت فعالیت هر دهانه تخلیه

۳-۲- تابع هدف و سایر محدودیت‌های عملیاتی

مورد نیاز

با بیان ۲ راهکار اصلی این تحقیق در مدل‌سازی کنترل مدت زمان فعالیت هر دهانه تخلیه و تعداد دهانه تخلیه فعال نیاز است تا سایر محدودیت‌های عملیاتی موجود در برنامه‌ریزی تولید معادن تخریب بلوکی نیز تشریح شود. در این تحقیق در بیان تابع هدف مساله و محدودیت‌های ظرفیت تولید سالیانه، عیار تولید سالیانه و زمین‌شناسی از مدل پیشنهادی نژاد شاه محمد و همکاران [۲] استفاده شد.

معادله ۱۱ تابع هدف برنامه‌ریزی تولید را نشان می‌دهد که حداکثرسازی NPV است [۲].

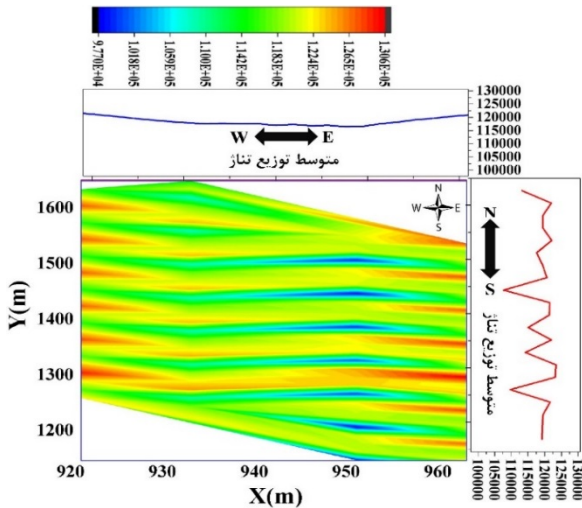
$$\text{Max} \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T \left[\frac{V_i}{(1+d)^t} \right] \times X_{i,t} \quad (11)$$

در این رابطه d معرف نرخ تنزیل، V_i بیانگر ارزش ماده استخراجی از دهانه تخلیه i در هر دوره زمانی t است. محدودیت ظرفیت تولید سالیانه از معادله ۱۲ استفاده می‌شود. این معادله مدل را مجبور می‌سازد در هر سال نتواند بیشتر و کمتر از حداکثر و حداقل ظرفیت تولید سالیانه از دهانه‌های تخلیه تولید داشته باشد.

$$MA_l \leq \sum_{i=1}^I (Ton_i) \times X_{i,t} \leq MA_u \quad (12)$$

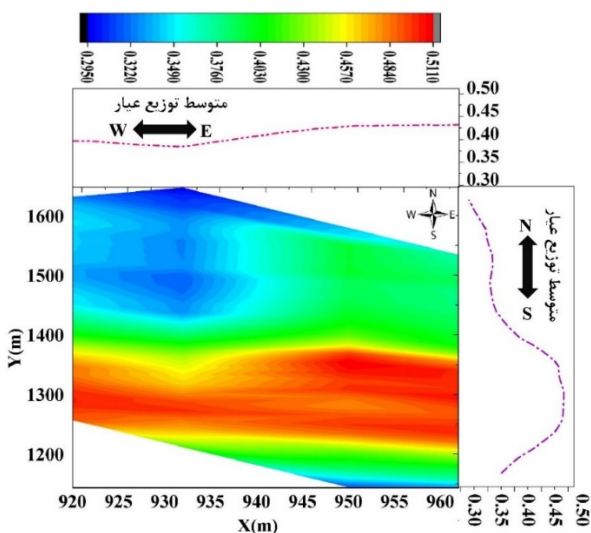
در این رابطه MA_l و MA_u به ترتیب حداکثر و حداقل ظرفیت استخراج سالیانه هستند و Ton_i تناژ ماده معدنی در دهانه تخلیه i است.

محدوده دهانه‌های تخلیه داری تناژهای بالاتری هستند. همچنین این توزیع در بخش‌های جنوب شرق محدوده، تناژهای بالاتری را نشان می‌دهد. شکل ۷ توزیع عیار در محدوده معدن را نشان می‌دهد. حداکثر مقدار عیار در دهانه‌های تخلیه ۰/۵۳٪ و حداقل عیار موجود ۰/۲۹٪ است.



شکل ۶- توزیع تناژ مواد معدنی در محدوده مورد مطالعه

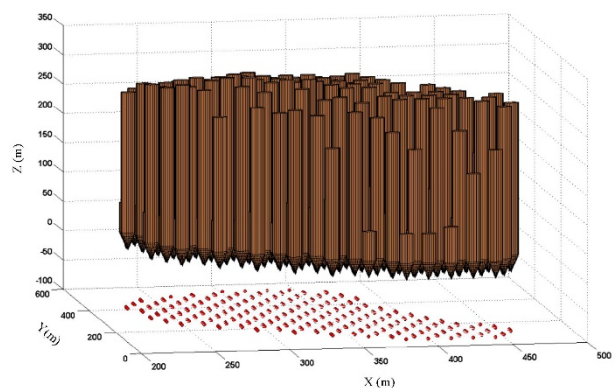
توزیع عیار در محدوده مورد مطالعه به‌نحوی است که حداکثر تجمع عیار در دهانه‌های تخلیه واقع در بخش‌های جنوبی و مخصوصاً در جنوب شرق است. یکنواختی توزیع عیار در امتداد غرب-شرق محدوده بهتر از امتداد شمال-جنوب است.



شکل ۷- توزیع عیار در دهانه‌های تخلیه

۴- بحث و نتایج

معدن یکی از بزرگ‌ترین معادن زیرزمینی مس در دنیا است که از روش تخریب بلوکی با سیستم تخلیه LHD در استخراج بهره می‌گیرد. در شکل ۵ هندسه سه‌بعدی دهانه‌های تخلیه نشان داده شده است. فاصله دهانه‌های تخلیه در راستای X، ۱۵ و در راستای Y، این فاصله حداقل ۱۲ متر و حداکثر ۱۵ متر است. کل تناژ ماده معدنی موجود در این محدوده ۱۳ میلیون تن با متوسط عیار مس ۰/۴۶٪ و متوسط وزن مخصوص $2/2 (t/m^3)$ می‌باشد. مشخصات هر دهانه تخلیه شامل تناژ، عیار، وزن سنگی در بالای هر دهانه تخلیه فرض می‌شود که توأم با استخراج از هر دهانه تخلیه ارتفاع این ستون کاهش می‌یابد. در شکل ۵ ارتفاع ستون تخلیه در هر دهانه در راستای محور Z نشان داده شده است. در حل مدل، حداکثر تعداد مجاز دهانه‌های تخلیه فعال در هر دوره معادل ۳۵، حداکثر عمر فعالیت هر دهانه تخلیه برابر با ۵، حداکثر و حداقل عیار قابل قبول استخراجی ۰/۵۲ و ۰/۳۹٪، حداکثر و حداقل ظرفیت تولید سالیانه معدن ۹۰۰ هزار تن و ۲۰۰ هزار تن و نرخ تنزیل در تابع هدف ۰/۱۸٪ فرض شد. همچنین مقدار بهینگی در مدل MILP برای رسیدن به جواب دقیق معادل ۰/۲ درصد در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که برنامه‌ریزی تولید محدوده موردنظر برای عمر ۱۳ سال در نظر گرفته شد.



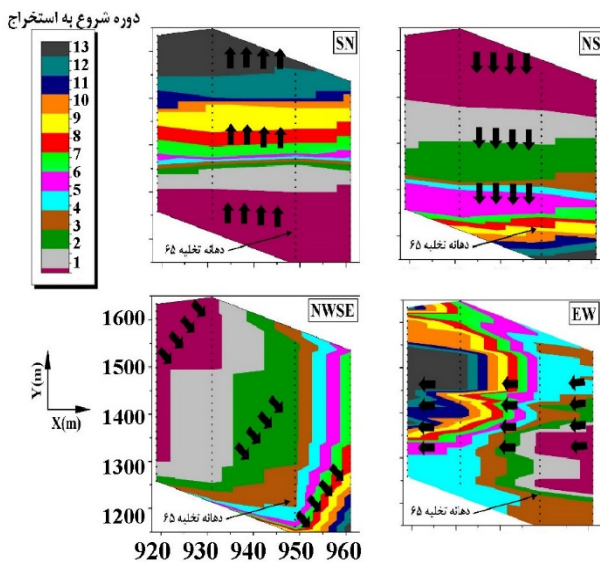
شکل ۵- هندسه سه‌بعدی دهانه‌های تخلیه در معدن ال تینینته

همچنین در این شرایط حداقل تناژ ماده معدنی در دهانه‌های تخلیه ۹۷/۸ هزار تن و حداکثر تناژ ماده معدنی ۱۳۰/۱ هزار تن است. شکل ۶ توزیع تناژ در دهانه‌های تخلیه را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است توزیع تناژ در محدوده معدن به نحوی است که در راستای غرب-شرق توزیع یکنواختی بیشتری دارد و با نزدیک شدن به بخش‌های غرب و یا شرق مرزی

عیارهای پایین همراه است (شکل ۷)، بنابراین مدل با کاهش نرخ تولید در سال‌های اول به رعایت محدودیت حداقل عیار تولیدی می‌پردازد چراکه حداقل عیار قابل قبول استخراجی در این مدل ۰/۳۹٪ در نظر گرفته شده است. بنابراین دهانه‌های تخلیه با عیارهای کمتر از این مقدار امکان تولید ندارند.

جدول ۲- دوره شروع فاز استخراج در دهانه‌های مختلف بر اساس راستای تخریب

دهانه تخلیه	SN	NS	NWSE	EW
۶۵	۱	۸	۴	۳
۳۷	۱۲	۱	۱	۱۳
۸۶	۵	۳	۷	۱



شکل ۸- راستای گسترش تخریب در مدل MILP

مدل MILP در راستای SN سعی بر استخراج سالیانه با حداکثر ظرفیت تولید سالیانه دارد به نحوی که تا سال ۱۱ از عمر معدن استخراج سالیانه ۹۰۰ هزار تن بوده و در ۴ سال آخر به دلیل فعالیت دهانه‌های تخلیه واقع در بخش شمالی محدوده (مناطق کم‌عیار) تناژ تولید کاهش می‌یابد. ولی در سایر مدل‌ها تولید با حداکثر ظرفیت در تعداد دوران کمتری همراه می‌باشد. بدین ترتیب در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل به خوبی توانسته است محدودیت تولید سالیانه را بر اساس راستای پیشروی استخراج و کنترل مؤثر از فعالیت دهانه‌های تخلیه رعایت کند.

در بررسی کارایی مدل پیشنهادی در تعیین کنترل مؤثر از فعالیت دهانه‌های تخلیه و تأثیر آن در نتایج برنامه‌ریزی تولید، مدل پیشنهادی در ۴ راستای پیشروی مختلف شمال به جنوب (NS)، جنوب به شمال (SN)، شمال غرب به جنوب شرق (NWSE) و شرق به غرب (EW) اجرا شد تا ضمن نشان دادن توانایی مدل MILP در اعمال راستاهای مختلف در شروع و کنترل پیشروی استخراج، مقایسه مناسبی از تأثیر این پارامتر در زمان‌بندی تولید بیان شود. با ایجاد مدل‌ها در نرم‌افزار MATLAB و اجرای آن‌ها در نرم‌افزار CPLEX نتایجی همانند جدول ۱ به دست آمد.

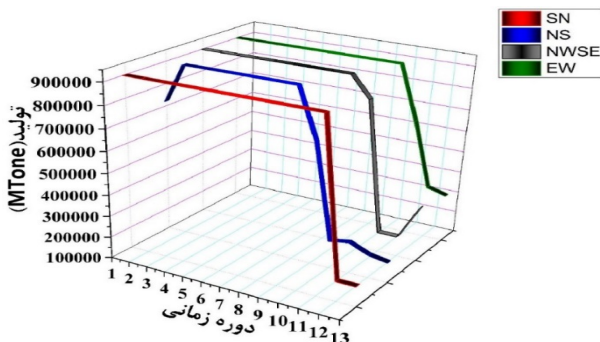
اعمال راستای پیشروی استخراج مختلف باعث شد تا تعداد محدودیت‌های ایجاد شده توسط مدل MILP در راستاهای مختلف متفاوت باشد. تعداد متغیرهای تصمیم در استفاده از راهکار دوم با توجه به وجود متغیر تصمیم بسته شدن ($C_{i,t}$)، بیشتر از حالت اول است. اجرای هر دو راهکار به جواب‌های یکسانی منجر شده ولی زمان اجرا در حالت دوم نسبت به حال اول بیشتر است. موقعیت دهانه‌های تخلیه و فاصله‌داری آن‌ها نسبت به یکدیگر باعث شده است بیشترین زمان و تعداد محدودیت‌ها در راستای NWSE باشد. شکل ۸ زمان شروع استخراج از دهانه‌های تخلیه و راستای پیشروی تخریب را نشان می‌دهد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد مدل MILP به خوبی توانسته است زمان فعالیت دهانه‌های تخلیه را با توجه به راستای و موقعیت دهانه‌های تخلیه کنترل نماید. یکنواختی گسترش در منطقه تخریب در مدل EW نسبت به سایر راستاها کمتر می‌باشد که دلیل این موضوع به توزیع تناژ مواد معدنی در شکل ۶ مربوط می‌شود، چراکه توزیع تناژ در راستای NS از یکنواختی کمتری برخوردار بوده و با توجه به تابع هدف مساله که حداکثر سازی NPV است، مدل سعی در افزایش تولید از دهانه‌های تخلیه با تناژها و عیارهای بالاتر دارد. در جدول ۲ زمان شروع به فعالیت دهانه‌های تخلیه ۳۷،۶۵ و ۸۶ برای بررسی عملکرد راستای پیشروی تخریب ارائه شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است با توجه به موقعیت مکانی دهانه‌های تخلیه، مدل به خوبی توانسته است دهانه‌های تخلیه را وارد فاز استخراج کند. موقعیت قرارگیری این دهانه‌های تخلیه در شکل ۸ مشخص است.

در شکل ۹ ظرفیت تولید سالیانه برای راستاهای مختلف آمده است. همان‌طور که در این شکل مشخص است به جز در مدل NS در بقیه مدل‌ها تولید با حداکثر نرخ سالیانه همراه است. شروع به استخراج در مدل NS از مناطق با توزیع

جدول ۱- نتایج اجرا مدل MILP در چهار راستای مختلف

متوسط عیار (%)	تناژ استخراج (MT)	NPV (M\$)	زمان اجرا (دقیقه)		محدودیت	تعداد متغیر		نقطه شروع (x,y)	مدل
			راهکار اول	راهکار دوم		راهکار اول	راهکار دوم		
۰/۴۲۶	۸/۶	۱۱۹/۱	۶۷	۷۳	۹۹۵۶	۵۶۶۸	۴۲۵۱	(۹۴۰،۱۶۵۰)	NS
۰/۴۳۴	۱۱/۳۳	۱۴۱/۷	۲۶	۲۸	۹۴۹۷			(۹۴۰،۱۱۰۰)	SN
۰/۴۳۲	۱۱/۰۴	۱۳۹/۹	۴۹	۶۲	۱۶۷۹۰			(۹۶۵،۱۴۰۰)	EW
۰/۴۲۸	۹/۶۷	۱۳۴/۶۱	۷۸	۹۵	۱۰۱۸۶			(۹۱۵،۱۶۰۰)	NWSE

حداکثر شدن سود نیاز است تا دهانه‌های بیشتری فعال باشند. با توجه به شکل ۶ بیشتر توزیع تناژ در دهانه‌های تخلیه در بخش‌های شرقی محدوده است. بنابراین در راستای EW مدل با تعداد دهانه‌های تخلیه فعال کمتر نیز به حداکثر تناژ تولید سالیانه در سال‌های اول از عمر معدن می‌رسد. بر اساس جدول ۳ و نحوه توزیع تناژ و عیار، می‌توان نتیجه گرفت که مدل MILP به خوبی توانسته است تأثیر راستای پیشروی استخراج را در تعداد دهانه‌های تخلیه فعال شده رعایت کند. هرچقدر تعداد دهانه‌های فعال در محدوده معدن بیشتر باشد نیاز به نظارت بر عملیات بیشتر و پیچیده‌تر است.



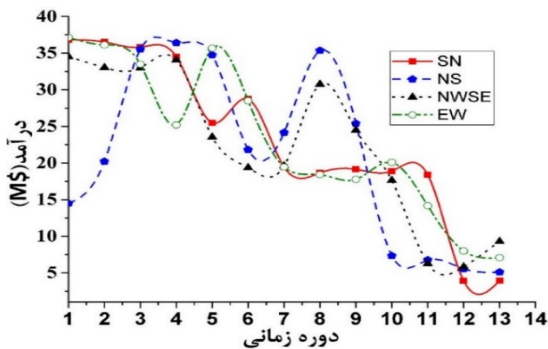
شکل ۹- ظرفیت تولید سالیانه در مدل MILP

با توجه به جدول ۳ با شروع استخراج از مناطق با ارزش بالاتر تعداد دهانه‌های فعال کمتر می‌شود و این بدان معنا است که محدوده تخریب گسترش زیادی نداشته و نظارت بر چگونگی استخراج از دهانه‌های تخلیه راحت است. به عنوان مثال در مدل SN استخراج از بخش‌های جنوبی محدوده آغاز می‌شود که در این بخش‌ها دهانه‌های تخلیه عیارهای و تناژهای بالایی دارند.

مقدار عیار تولیدشده در طی عمر معدن برای تمام راستاها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بر اساس چگونگی توزیع عیار در محدوده معدن در شکل ۷، بخش‌های شمالی، دارای عیارهای بسیار پایین بوده و با رفتن به سمت جنوب محدوده بر عیار دهانه‌های تخلیه افزوده می‌شود. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است در مدل SN و EW با توجه به توزیع عیار، مدل MILP در دوران اول از عمر معدن به دلیل شروع به فعالیت دهانه‌های تخلیه واقع در این بخش‌ها تولید عیارهای بالاتری را نشان داده و با رفتن به اواخر عمر معدن عیارهای تولیدشده کاهش می‌یابند. در مدل NWSE مدل سعی دارد تا با شروع به فعالیت بخش‌های گسترده‌ای از معدن مقادیر عیار تولیدشده را افزایش دهد. در مدل NS نیز از سال ۳ که دهانه‌های بخش مرکزی وارد فرایند استخراج می‌شوند مقادیر عیار تولیدی افزایش از خود نشان می‌دهند. در تمام این راستاها به دلیل توجه به ارزش زمانی پول، مدل تا حد امکان سعی دارد بتواند عیارهای بالاتر را در سال‌های اول استخراج کند. به طور کلی بر اساس جدول ۱ مدل MILP ضمن رعایت تأثیر مناطق با عیارهای بالاتر در مقدار NPV محاسبه شده، سعی دارد تا تولید در عمر معدن با عیارهای بالاتری همراه باشد. بدین ترتیب در تمام راستاها متوسط عیار تولیدی دارای مقادیر تقریباً یکسانی است. مدل MILP با کنترل تناژ تولید از دهانه‌های مختلف، متوسط عیار تولید سالیانه را در محدوده قابل قبولی قرار می‌دهد.

جدول ۳ تعداد دهانه‌های فعال در هر دوره از عمر معدن برای ۴ راستای اجرا شده را نشان می‌دهد. در مدل‌های NS و NWSE تعداد دهانه‌های تخلیه فعال بیشتر از سایر راستاها می‌باشد چراکه در این دو راستا به دلیل تناژهای کم و عیارهای پایین دهانه‌های تخلیه در شروع فاز استخراج، برای رسیدن به

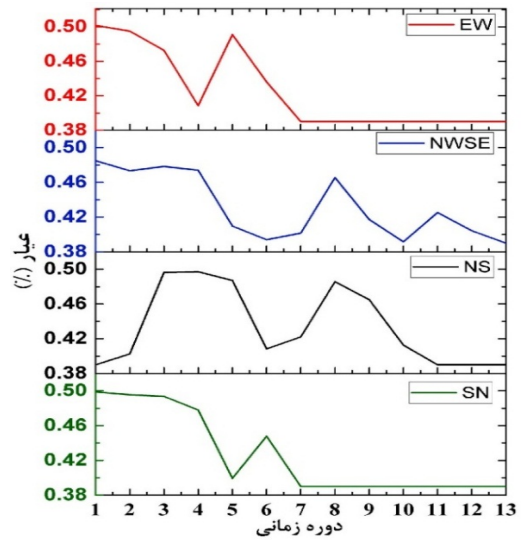
حداکثر مقدار ممکن می‌رساند، چراکه در این سال دهانه‌های واقع در بخش‌های پر عیار و پر تناژ استخراج می‌شوند. بنابراین در حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که تابع هدف مساله برنامه‌ریزی در هر ۴ راستا توسط مدل رعایت شده است. بیشترین مقدار از NPV نیز در راستای SN بوده و برابر با ۱۴۱/۷ میلیون دلار است. توجه به این نکته ضروری است که مدل MILP پیشنهادی در تمام راستاها سعی بر افزایش مقدار NPV دارد. بر این اساس اختلاف میان حداکثر و حداقل NPV محاسبه شده در راستاهای مختلف، مطابق جدول ۱، معادل ۱۶٪ می‌باشد. بنابراین مدل پیشنهادی ضمن آنکه سعی بر افزایش بهره‌وری اقتصادی در هر راستایی دارد توانایی محاسبه بهترین راستا از لحاظ سودآوری را نیز دارد. برای مدل EW روند تغییرات نمودار نقدینگی که شروع استخراج از مناطق پر عیار دارد شبیه به راستای SN بوده و همان‌طور که در جدول ۱ آمده است NPV تقریباً یکسانی با راستای SN دارد.



شکل ۱۱. جریان نقدینگی در ۴ راستای مختلف

یکی از اهداف برنامه‌ریزی، تعیین ظرفیت استخراج سالیانه از تمام واحدهای تولیدی در طول عمر معدن است؛ بنابراین به منظور بررسی تأثیر راستای پیشروی استخراج در زمان‌بندی تولید معدن، در جدول ۴ مقادیر استخراج سالیانه برای دهانه تخلیه شماره ۶۵، مشخص شده در شکل ۸، آمده است. کل تناژ ماده معدنی موجود در این دهانه تخلیه ۱۲۰۱۱۶ تن با متوسط

عیار ۰/۴۶٪ است. در راستای SN این دهانه تخلیه از دوره ۱ وارد فرایند استخراج شده و دارای عمر ۳ سال است و در راستای NS، دوره شروع به استخراج دهانه تخلیه ۸ کرده و تمام مواد معدنی موجود در آن در طی یک دوره استخراج می‌شود. در سایر راستاها نیز مدل به خوبی توانسته است زمان‌بندی تولید مناسبی با توجه به حداکثر طول عمر مجاز فرضی ۵ سال برای دهانه‌های تخلیه را انجام دهد. بدین ترتیب با توجه به آنچه که تشریح شد می‌توان نتیجه گرفت که مدل MILP ارائه شده در این تحقیق ضمن ایجاد یک الگوریتم



شکل ۱۰- عیار تولیدی در تمام راستاهای پیشروی استخراج

جدول ۴- تعداد دهانه‌های فعال در ۴ راستای مختلف

مدل / دوره	EW	NWSE	NS	SN
۱	۱۵	۳۴	۳۴	۱۸
۲	۱۳	۲۶	۲۲	۳۰
۳	۱۳	۳۰	۲۵	۲۹
۴	۲۳	۲۹	۳۳	۲۴
۵	۳۵	۲۳	۲۹	۱۸
۶	۳۲	۱۷	۲۴	۱۷
۷	۲۹	۲۳	۱۹	۱۸
۸	۲۱	۱۹	۱۲	۲۷
۹	۱۴	۱۴	۷	۲۹
۱۰	۱۳	۹	۳	۲۲
۱۱	۸	۴	۳	۱۵
۱۲	۸	۳	۳	۳
۱۳	۵	۴	۴	۱۵

مقدار جریان نقدینگی در طول عمر تابعی از عیار و تناژ استخراجی از دهانه‌های تخلیه است. توجه به ارزش زمانی پول در تابع هدف این مساله که حداکثر سازی NPV است موجب شده است تا مدل سعی بر افزایش مقدار نقدینگی در سال‌های اول کند. شکل ۱۱ مقدار جریان نقدینگی را برای هر ۴ راستا نشان می‌دهد. به جز مدل NS در بقیه راستاها از سال‌های اول تولید با حداکثر سود همراه است و با پیشروی به سال‌های آخر از عمر معدن مقدار درآمد کاهش می‌یابد. در راستای NS نیز مدل در اولین فرصت ممکن که سال ۳ است درآمد را به

معادن است. بدین منظور مدل پیشنهادی بر مبنای الگوریتم شاخه و کران با استفاده از نرم‌افزار CPLEX در ۱۰۹ دهانه تخلیه برای یک معدن با عمر ۱۳ سال استفاده شد. کاربرد هم‌زمان چنین محدودیت‌هایی در کنترل پیشروی استخراج در ۴ راستای SN، NS، EW و NWSE در برنامه‌ریزی تولید نشان داد که نظارت بر عملیات استخراج در مناطق بارزش‌های اقتصادی بالاتر به مراتب راحت‌تر از مناطقی بارزش پایین می‌باشد، چراکه چنین مناطقی به تعداد دهانه‌های تخلیه فعال کمتری برای حداکثر سازی NPV نیاز دارند. بنابراین گستره منطقه تخریب‌شده کمتر و نظارت راحت است. مطابق مدل MILP پیشنهادی در این تحقیق و با توجه به توزیع عیار و تناژ در محدوده معدن، حداکثر مقدار NPV در راستای SN و کمترین مقدار را در راستای NS بدست آمده و حداکثر اختلاف در NPV محاسبه‌شده در راستاهای مختلف ۱۶٪ بدست آمد که خود این عامل نشان داد که مدل به‌خوبی تابع هدف مساله را رعایت می‌کند. به‌طوری‌که با کنترل مناسب از چگونگی فعالیت دهانه‌های تخلیه سعی در حداکثرسازی سود در تمام راستاهای استخراج دارد. موقعیت قرارگیری دهانه‌های تخلیه در محدوده معدن عامل مهم در شروع به استخراج و تأثیر هر دهانه در زمان‌بندی تولید است. نتایج زمان‌بندی تولید برای دهانه تخلیه ۶۵ نشان داد که در راستای SN این دهانه تخلیه در دوره ۱ و با عمر ۳ سال وارد زمان‌بندی تولید شده به‌نحوی‌که در هر سال میزان استخراج از این راستا حدود ۳۳٪ از تناژ آن می‌باشد. این در حالی است که در راستای NS این دهانه تخلیه در دوره ۸ و به‌صورت کامل فقط در ۱ دوره استخراج شد. بنابراین طول عمر دهانه‌های تخلیه نیز تابعی از تناژ و عیار دهانه تخلیه و راستای پیشروی استخراج است. هرچقدر دهانه تخلیه‌ای در دوران اول از عمر معدن وارد فرایند استخراج شود طول عمر آن نیز بیشتر است و با رفتن به اواخر عمر معدن نرخ تولید از دهانه تخلیه به دلیل عمر کم آن افزایش می‌یابد. بنابراین در صورتیکه هدف حداکثر سازی سود باشد، بهتر است شروع استخراج همواره از مناطق بارزش‌های اقتصادی بالاتر همراه باشد.

مراجع

[1] Chitombo, G. P. 2010; "Cave mining: 16 years after Laubscher's 1994 paper 'Cave mining - state of the art'". Mining Technology, Vol. 119(3), 132-141. doi: 10.1179/174328610X12820409992255.

[2] Nezhadshahmohammad, F., Aghababaei, H., & Pourrahimian, Y. 2017; "Conditional draw control system in block-cave production scheduling using mathematical programming", International Journal of

مناسب برای کنترل فعالیت دهانه‌های تخلیه، توانست زمان‌بندی مناسبی برای رسیدن به حداکثر سوددهی معدن انجام دهد. از نکات قابل توجه در جدول ۴ توجه به مقدار تولید از دهانه‌های تخلیه بر اساس زمان شروع به استخراج است. هرچقدر دهانه تخلیه‌ای زودتر وارد فرایند استخراج شود طول عمر آن بیشتر شده و تولید از آن با نرخ‌های کمتری همراه خواهد بود. چنین حرکتی از مواد خردشده در دهانه تخلیه به کاهش رقیق‌شدگی به دلیل سرعت مناسب خروج مواد و کنترل مناسب از جابجایی‌های سطح زمین منجر می‌شود، درحالی‌که با شروع استخراج از دهانه‌های تخلیه در دوران آخر از عمر معدن نرخ تولید از دهانه تخلیه بیشتر شده و این موضوع جابجایی مواد خردشده در هر دهانه تخلیه و دهانه‌های مجاور را بیشتر می‌کند؛ بنابراین بهتر است به‌دلیل سرعت مناسب و کنترل راحت مواد خروجی از دهانه‌های تخلیه شروع استخراج از مناطق با عیارها و تناژهای بالاتر همراه باشد تا بهره‌وری اقتصادی زمان‌بندی تولید بالاتر شود. چنین موضوعی در مسائلی که تابع هدف حداکثر سازی NPV است مهم است.

جدول ۴- زمان‌بندی تولید دهانه تخلیه ۶۵

تناژ تولید (Tonne)				راستا دوره
EW	NWSE	NS	SN	
			۴۰۰۳۸	۱
			۴۰۰۳۸	۲
۴۰۰۳۸			۴۰۰۳۸	۳
۴۰۰۳۸	۶۰۰۵۸			۴
۴۰۰۳۸	۶۰۰۵۸			۵
				۶
				۷
		۱۲۰۱۱۶		۸

۵- نتیجه‌گیری

توسعه روش‌های دقیق در بهینه‌سازی واقعی مسائل زمان‌بندی تولید معادن از ملزومات اساسی در عملیات استخراج است. در این تحقیق یک الگوریتم ریاضی در مدل‌سازی چگونگی شروع و کنترل فعالیت دهانه‌های تخلیه در معادن تخریب بلوکی بر اساس روش MILP ارائه شد. عدم کنترل مناسب از طول مدت فعالیت دهانه‌های تخلیه، زمان شروع به استخراج، زمان بسته شدن و کنترل راستای گسترش استخراج از عوامل بسیار بحرانی در کنترل رقیق‌شدگی، نشست‌های ناخواسته، حفظ ایمنی محیط کار و افزایش بهره‌وری اقتصادی

- [12] Guest, A. R., Van Hout, G. J., & Von Johannides, A. 2000; "An Application of Linear Programming for Block Cave Draw Control", Paper presented at the MassMin, Brisbane, Australia.
- [13] Queyranne, M., Parkinson, A., McCormick, S. T., Diering, T., Malkin, P., & Wolsey, L. 2008; "The Drawpoint Scheduling Approach to Production Planning in a Block Cave Mine", Workshop Operation Research in Mining, Viña del Mar, Chile., 318-357.
- [14] Parkinson, A. 2012; "Essays on Sequence Optimization in Block Cave Mining and Inventory Policies with Two Delivery Sizes", (PhD), The University Of British Columbia, The University Of British Columbia.
- [15] Rahal, D., Smith, M., Van Hout, G., & Von Johannides, A. 2003; "The use of mixed integer linear programming for long-term scheduling in block caving mines", Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries, South African Institute of Mining and Metallurgy, 123-132.
- [16] Rubio, E., Caceres, C., & Scoble, M. 2004; "Towards an integrated approach to block cave planning", Paper presented at the Massmin, Santiago, Chile.
- [17] Smoljanovic, M., Rubio, E., & Morales, N. 2001; "Panel Caving Scheduling Under Precedence Constraints Considering Mining System", Paper presented at the 35th APCOM Symposium, Wollongong, NSW, Australia.
- [18] Nezhadshahmohammad, F., Pourrahimian, Y., & Aghababaei, H. 2018; "Presentation of a multi-index clustering technique for the mathematical programming of block-cave scheduling", International Journal of Mining Science and Technology, Vol. 6. 28, pp. 941-950, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2017.11.005>.
- [19] Caccetta, L. 2007; "Application of Optimisation Techniques in Open Pit Mining", in Handbook of Operations Research in Natural Resources. International Series in Operations Research and Management Science, Springer, Vol. 99, pp. 547-559.
- Mining, Reclamation and Environment, 1-24. doi: 10.1080/174780930.2017.1385155.
- [3] Flores, G. 2014; "Future Challenges and Why Cave Mining Must Change". Paper presented at the Caving Santiago, Chile.
- [4] Rafiee, R., Ataei, M., Khalokakaie, R., Jalali, S., & Sereshki, F. 2015; "Determination and Assessment of Parameters Influencing Rock Mass Cavability in Block Caving Mines Using the Probabilistic Rock Engineering System", Rock Mechanics and Rock Engineering, 48, doi: 10.1007/s00603-014-0614-9.
- [5] Laubscher, D. H. 1994; "Cave mining-the state of the art", The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 273-299.
- [6] Eduardo Rojas, R. M., and Patricio Cavieres. 2001; "Preundercut Caving in El Teniente Mine", Chile Underground Mining Methods - Engineering Fundamentals and International Case Studies, 417-423.
- [7] نژادشاه محمد، فرشاد؛ و فتحی، محمد باقر؛ «ارائه روشی برای کنترل راستای پیشروی استخراج تخریب بلوکی»، ۱۳۹۹، نشریه مهندسی منابع معدنی.
- [8] Rubio, E. 2014; "Block caving strategic mine planning using Risk-Return portfolio optimization". Paper presented at the 3rd International Symposium on Block and Sublevel Caving (Caving 2014), Santiago-Chile.
- [9] Zarate U., E., Pourrahimian, Y., & Boisvert, J. 2020; "Optimizing block caving drawpoints over multiple geostatistical models", International Journal of Mining, Reclamation and Environment, Vol. 34(1), 55-74.
- [10] Khodayari, F., & Pourrahimian, Y. 2019; "Long-term production scheduling optimization and 3D material mixing analysis for block caving mines", Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section A: Mining Technology. doi: 10.1080/25726668.2018.1563742.
- [11] Rahal, D. 2008; "Draw Control in Block Caving Using Mixed Integer Linear Programming", (PhD), The University of Queensland.

¹ Laubscher

² Net Present Value

³ Mining precedence

⁴ Zarate

⁵ Rahal

⁶ Guast

⁷ Queyranne

⁸ Parkinson

⁹ Integer programming

¹⁰ Mixed Integer programming

¹¹ Rubio

¹² Smoljanovic

¹³ Mixed Integer Linear Programming

¹⁴ El-Teniente