

مقایسه عملکرد برنامه ریزی تولید معدن فسفات اسفوردی با استفاده از روش های برنامه ریزی خطی و پویا

احمد رضا صیادی^{۱*}، نادر فتحیان پور^۲، امین اله موسوی^۳

۱- استادیار دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن: savadi@modares.ac.ir

۲- دانشیار دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی معدن: fathian@cc.ac.ir

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی معدن، دانشگاه تربیت مدرس: mousavi_mine@yahoo.com

چکیده

هدف اصلی برنامه ریزی تولید، تعیین زمان بندی برنامه استخراج کانسنگ و باطله در یک دوره زمانی مشخص است به گونه ای که اهداف و محدودیت های مختلف همانند سود بیشینه و کنترل عیار، به طور همزمان ارضا شود. اگرچه روش های مختلفی برای برنامه ریزی تولید در معادن ارائه شده است، اما بسیاری از این روش ها در شرایطی که محدودیت ویژه ای وجود دارد قابلیت کاربرد خود را از دست می دهند. در این تحقیق به منظور برنامه ریزی تولید در شرایطی که محدودیت عناصر مزاحم وجود دارد از دو فن برنامه ریزی خطی صفر و یک و برنامه ریزی پویا استفاده کردیم. بکارگیری این الگوریتم ها برای معدن فسفات اسفوردی یزد که بیشترین محدودیت مجاز کلر را دارد، بیانگر نتایج قابل قبول حاصل از روش برنامه ریزی خطی در رسیدن به اهداف بیشینه سازی سود و رعایت میزان کلر است و برتری آن را در این مورد نشان می دهد.

کلمات کلیدی: برنامه ریزی تولید، برنامه ریزی خطی، برنامه ریزی پویا، عناصر مزاحم

۱- مقدمه

برنامه ریزی تولید معادن روباز ارائه زمان بندی استخراج بلوک هایی از ماده معدنی و باطله است که از شرایط اولیه ذخیره به محدوده کلاواک نهایی ختم می شود. از جمله اهداف اصلی، پاسخ به این سؤال است که چه بخش هایی از ذخیره و باطله در چه دوره زمانی معدنکاری شود به گونه ای که اهداف و محدودیت های مختلف همانند سود بیشینه و کنترل عیار، به طور همزمان ارضا شود. از مهم ترین مشکلات فرایند برنامه ریزی تولید از یک سو تعدد عوامل مؤثری است که باید مورد نظر قرار گیرد و از دیگر سو فراوانی تعداد ترکیبات ممکن برای استخراج قسمت های مختلف یک کانسار است که امکان استخراج در یک دوره برنامه ریزی تولید را دارند [۱]. تاکنون روش های مختلفی برای حل مسئله برنامه ریزی تولید ارائه گردیده است. روش های سعی و خطا اولین روش های مورد استفاده اند. اگر چه این روش ها ساده اند، اما امکان کنترل همه حالت ها در طول یک دوره برنامه ریزی وجود ندارد [۲]. روش دیگری که امروزه برای دستیابی به جواب بهینه در امر برنامه ریزی تولید کاربرد فراوانی یافته است روش برنامه ریزی پویا می باشد. در سال ۱۹۷۴ برای اولین بار برنامه ریزی پویا را برای حل مسئله زمان بندی معادن رو باز به کار گرفت. [۳]. هرچند این روش جواب بهینه را به دست می دهد اما با بالا رفتن ابعاد معدن و اضافه شدن پاره ای از محدودیت های خاص ممکن است جواب بهینه حاصل نشود. امروزه استفاده از سیستم های هوشمند برای تهیه زمان بندی تولید در معادن رو به گسترش است [۴]-[۶]-[۲]. این روش ها مسئله پیچیدگی عملیات معدنکاری را تا حدی مرتفع نموده اند اما عدم دستیابی به جواب بهینه از مشکلات این روش ها می باشد. روش های ابتکاری از جمله دیگر روش هایی است که برخی محققان ارائه کرده اند [۷]-[۹]. این روش ها عمدتاً به صورت ترکیبی برای افزایش سرعت محاسبات به کار می روند. از سال ۱۹۶۰ چندین روش برای برنامه ریزی تولید معادن بر اساس ترکیبی از روش های مختلف تحقیق در عملیات ارائه گردید. از بین فنون مختلف تحقیق در عملیات برای زمان بندی تولید معادن روباز، برنامه ریزی خطی، توجه تعداد زیادی از مهندسان معدن را به خود جلب کرده است. یک شاخه از روش برنامه ریزی خطی، برنامه ریزی عدد صحیح صفر و یک است که در آن هر متغیر فقط ارزش ۰ و یا ۱ دارد. یکی از معایب اصلی استفاده از این روش ها این است که می بایست تعداد محدودیت ها

کم باشد بنابراین روش های تحقیق در عملیات اغلب برای برنامه ریزی تولید کوتاه مدت به کار برده می شوند [۱۰]. در این تحقیق به منظور برنامه ریزی تولید در شرایط معدن اسفوردی که محدودیت کلر وجود دارد از برنامه ریزی خطی صفر و یک و برنامه ریزی پویا استفاده نمودیم. در این معدن که مهم ترین معدن تولید کننده فسفات در کشور شناخته می شود، کانه عمدتاً از نوع فلوئورآپاتیت است ولیکن در برخی مناطق کلر جانشین فلوئور شده و به کلروآپاتیت تغییر یافته است. از آنجا که یکی از مصارف عمده کنسانتره فسفات در صنایع شیمیایی و به طور خاص تهیه اسید فسفریک است و این فرایند به میزان ناخالصی کلر در کنسانتره بسیار حساس است (حداکثر مقدار مجاز کلر در محصول کنسانتره کمتر از ۶۶۰ ppm)، بنابراین کنترل عیار کلر در کنسانتره حاصل از کانسنگ معدن یکی از چالش های مهم در بهره برداری این معدن به حساب می آید [۱۱].

در هر دو روش، الگوسازی به گونه ای انجام گرفته است که محدودیت حداکثر میزان مجاز کلر به بهترین نحو رعایت گردد. در نهایت نتایج هر دو روش بر مبنای رعایت سقف میزان کلر مقایسه و پیشنهادهایی برای بهبود مراحل استخراج ارائه گردیده است.

۲- برنامه ریزی خطی

برنامه ریزی خطی، روشی ریاضی برای جستجو و انتخاب بهترین برنامه از میان مجموعه راه های ممکن است. از آنجا که تمامی روابط ریاضی موجود در این روش از نوع درجه یک هستند، روش خطی نامیده می شود. برنامه ریزی خطی، بهینه سازی (حداکثر یا حداقل کردن) متغیر وابسته ای است که به صورت خطی با مجموعه ای از متغیرهای مستقل مرتبط می شود و با در نظر گرفتن تعدادی محدودیت خطی تشکیل یافته از متغیرهای مستقل، انجام می پذیرد. متغیرهای مستقل، متغیرهایی هستند که مقدارشان را تصمیم گیرنده (یا توسط مدل بعد از حل) تعیین می کند و مقدار متغیرهای وابسته را که ستاده روش هستند، تعیین می کنند. ما متغیرهای مستقل را در برنامه ریزی خطی متغیرهای تصمیم می شناسیم که مقدارشان نامشخص است و تصمیم گیرنده باید مقدار این متغیرها را بعد از حل روش بدست آورد. هر روش برنامه ریزی خطی از سه قسمت تشکیل می شود:

این روش قبل از گسترش عرضی، درخت گسترش عمقی می‌یابد. همچنین عرض کلی با حذف جواب‌های غیر عادی کاهش می‌یابد. اگر مواد موجود در پله K که در پوش یک m واقع شده است با $R(k,m)$ نشان داده شود، هدف از برنامه‌ریزی پیدا کردن مرحله‌ای برای استخراج مواد $R(k,m)$ است به گونه‌ای که شرایط زیر برآورده گردد:

- برای $k > m$ مواد $R(k,m)$ نمی‌تواند قبل از اینکه $R(k-1,m)$ به طور کامل استخراج شده، استخراج شود مگر اینکه $R(k-1,m) = 0$ باشد.
- به ازای $m > 1$ ، $R(k,m)$ نمی‌تواند قبل از اینکه $R(k,m-1)$ به طور کامل استخراج شده باشد استخراج شود مگر اینکه $R(k,m-1) = 0$ باشد یا اینکه پوش یک‌های m و $m-1$ دارای اتصال فضایی نباشند [۱۳].

۴- برنامه‌ریزی تولید بهینه معدن فسفات اسفوردی

معدن فسفات اسفوردی در حدود ۳۵ کیلومتری شمال شرقی شهرستان بافق در استان یزد در طول ۵۵ درجه و ۳۸ دقیقه و عرض ۳۱ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی واقع شده است. شکل ۱ نشان دهنده موقعیت جغرافیایی این معدن است. فسفات اسفوردی مهم‌ترین معدن تولیدکننده فسفات در کشور است. طبق مطالعات قبلی انجام گرفته، نوع کانه این کانسار عمدتاً از نوع فلونوروپاتیت است ولیکن در برخی مناطق کلر جانشین فلونور شده و به کلروپاتیت تغییر یافته است. مصرف عمده کنسانتره فسفات در صنایع شیمیایی معدنی، عمدتاً برای تهیه اسید فسفریک و همچنین تهیه کود شیمیایی فسفات در بخش کشاورزی است. از آنجا که فناوری فعلی فرایند تهیه اسید فسفریک نسبت به میزان ناخالصی کلر موجود در کنسانتره بسیار حساس و آسیب پذیر است، بنابراین بیشترین حد مجاز کلر در مواد اولیه نباید بیش از ۶۶۰ ppm باشد و این در حالی است که عیار متوسط کلر در بخش‌هایی از معدن به ۱۶۱۰ ppm می‌رسد [۱۱]. ظرفیت استخراج این معدن سالانه به میزان ۳۶۰ هزار تن در نظر گرفته شده است. این معدن در حال حاضر با ظرفیت تولید حدود ۳۶۰ هزار تن در سال بهره‌برداری می‌شود.

۱- تابع هدف: تابعی است ریاضی که از متغیرهای تصمیم تشکیل یافته است و بیانگر هدف مدل می‌باشد. این تابع نشان دهنده خواسته‌های تصمیم گیرنده مانند زیاد کردن سود یا کم کردن هزینه است.

۲- محدودیت: عبارت است از یک معادله یا نامعادله متشکل از متغیرهای تصمیم که محدودیت‌های مدل (یا تصمیم گیرنده) را برای دستیابی به اهداف روش بیان می‌کند.

۳- وضعیت متغیرهای تصمیم: متغیرهای تصمیم با توجه به مصداق تعیین شده برای آن‌ها عمدتاً یا به صورت غیرمنفی و یا به صورت آزاد در علامت هستند.

شکل کلی روش برنامه‌ریزی خطی به صورت زیر است:

$$\text{Max (Min) } Z$$

که در آن

متغیرهای تصمیم: x_j ($j=1, \dots, n$)

مقدار تابع هدف: Z

ضرایب متغیرهای تصمیم در تابع هدف: c_1, c_2, \dots, c_n

ضرایب متغیرهای تصمیم در محدودیت‌ها: $a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{mj}$

مقادیر ثابت: b_1, b_2, \dots, b_m

تعداد متغیرهای تصمیم: n

تعداد محدودیت‌ها: m

برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، روش برنامه‌ریزی خطی با شرط عدد صحیح بودن متغیرها است. مدلی که در آن متغیرهای عدد صحیح محدود به انتخاب مقادیر صفر و یک هستند، روش برنامه‌ریزی خطی صفر و یک نام دارد [۱۲].

۳- برنامه‌ریزی پویا

در این الگوریتم محدودیت‌ها و اهداف متغیرهای ورودی هستند که این متغیرها تابعی از ویژگی‌های بلوک‌ها می‌باشند. به منظور پیدا کردن جواب بهینه، الگوریتم، معدن را به واحدهای اولیه به نام اتم تقسیم می‌کند و از طریق آن‌ها درختی از جواب‌های احتمالی ساخته می‌شود. در این درخت، گره‌ها توصیف کننده وضعیت معدن در یک دوره زمانی معین‌اند و گمان‌ها گره‌ها را به یکدیگر وصل می‌کنند. پس از آن الگوریتم با استفاده از برنامه‌ریزی پویا جواب بهینه را به دست می‌آورد. برای کاهش ابعاد درخت‌ها از روش عمق نخستین استفاده می‌گردد. بر اساس

$$Z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n (\leq, =, \geq) b_1$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n (\leq, =, \geq) b_2$$

$$\vdots$$

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n (\leq, =, \geq) b_m$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0$$

شکل (۲): مراحل ساخت یک مدل بلوکی با استفاده از روش زمین-آمار [۱۵]

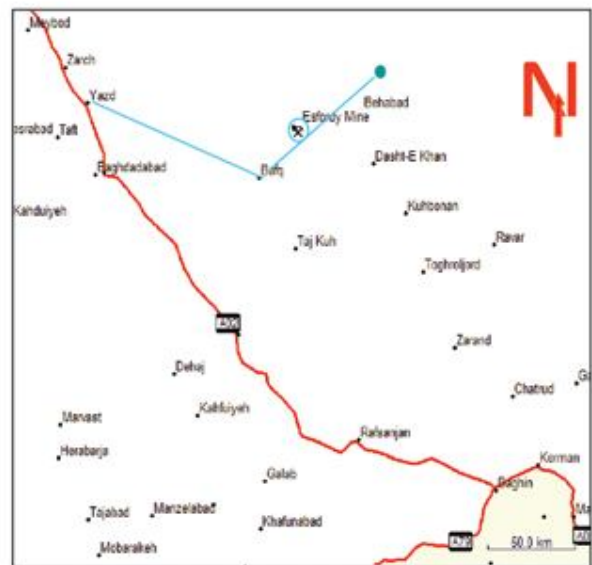
برای تخمین نهایی عیار فسفات و کلر در محدوده فضای تخمین باید ابعاد بهینه بلوکها را تعیین کنیم. با توجه به شرایط استخراج، شکل ماده معدنی، پیوستگی سه بعدی ماده معدنی، محدودیت‌های استخراجی و طراحی معدن و در عین حال مقدار کمینه واریانس تخمین، ابعاد مناسب بلوک‌های مورد تخمین برابر ۵*۱۰*۱۰ متر انتخاب شده است. از آنجا که میانگین تقریبی از توده کانسار برای کل منطقه در دست نیست، از تخمین زمین‌آمار سه بعدی، از کریجینگ معمولی استفاده نمودیم.

۴-۲- حد نهایی معدن روباز

پس از تهیه الگوی بلوکی عیاری، باید ارزش اقتصادی بلوک‌ها محاسبه گردند. بدین منظور از اطلاعات جدول ۱ استفاده گردیده است. ارزش اقتصادی هر بلوک (BEV) بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$BEV = \begin{cases} (-c_m) & z \leq z_c \\ (prz - c_o - c_p) & z > z_c \end{cases} \quad (1)$$

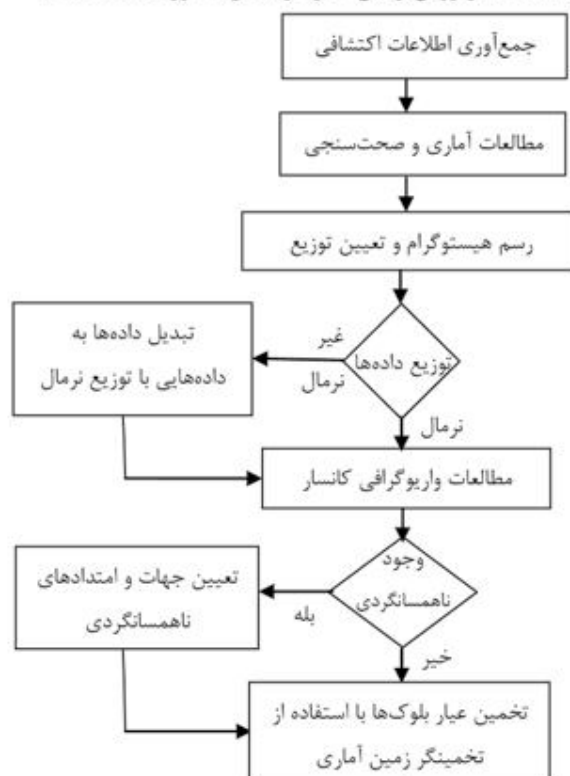
که در آن c_m هزینه واحد باطله برداری، c_o هزینه واحد استخراج ماده معدنی، c_p هزینه واحد کانه آرایی، p قیمت ماده معدنی، r حاصلضرب بازبایی‌های مراحل مختلف، z عیار بلوک و z_c عیار حد معدن می‌باشد. عیار حد معدن بر مبنای اطلاعات مندرج در



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی معدن

۴-۱- بلوک‌بندی و تخمین سه بعدی فسفات و کلر

برای تهیه یک برنامه زمان‌بندی، در ابتدا به یک الگوی بلوکی از کانسار نیاز داریم. در هنگام ایجاد الگوی بلوکی بکارگیری یک روش مناسب برای تخمین عیار ضروری است. در بین روش‌های رایج تخمین، روش زمین‌آمار کریجینگ تخمینی با تضمین به حداقل رساندن خطا انجام می‌دهد [۱۴]. از این رو در این تحقیق برای تخمین عیار کلر و فسفات از تخمین گر کریجینگ استفاده کردیم. مراحل ساخت یک مدل بلوکی با استفاده از روش زمین‌آمار در شکل ۲ آورده شده است.



جدول (۲): شاخص‌های محدوده نهایی معدن

شاخص	میزان
تناژ ماده معدنی (Mton)	۱۳/۷۶
سود (MS)	۵۷۷
نسبت باطله برداری	۱/۰۹
عیار کلر (g/ton)	۷۰۹/۸۷

۳-۴- مدل‌سازی برنامه‌ریزی عدد صحیح استخراج

الگوسازی برنامه‌ریزی عدد صحیح برای استخراج ماده معدنی و باطله به صورت جداگانه انجام شده است. تمامی کدهای مربوط به برنامه‌ریزی خطی در نرم افزار MATLAB نوشته شده است.

۳-۴-۱- بلوک‌های ماده معدنی

برای تهیه برنامه‌ریزی تولید معدن اسفوردی، روشی خطی ارائه شده است. تابع هدف مدل با رویکرد افزایش عیار فسفات، رعایت بیشترین حد مجاز کلر، تأمین خوراک مورد نیاز کارخانه و کمینه‌سازی هزینه حمل و نقل به روش بهینه‌سازی خطی باینری عدد صحیح تعیین گردیده است.

تابع هدف:

$$Max: Z = \sum_{i=1}^{Nb} [\mu_1 (g_{bi}^{p2o5} - G_{c.o.g}^{p2o5}) - \mu_2 (\sqrt{p_{bi} - P_{ore-pile}} - \mu_3 (g_{bi}^{cl} - G_{permit}^{cl})^2 - \mu_4 \cdot Elev_{bi}] x_{bi}$$

که در آن:

 b_i : اندیس موقعیت بلوک کانسنگ i ام Nb : تعداد کل بلوک‌های کانسنگ با قابلیت کاندیدا شدن برای استخراج p_{bi} : موقعیت مکانی (سه بعدی) بلوک i $P_{ore-pile}$: موقعیت مکانی (سه بعدی) دپوی کانسنگ $G_{c.o.g}^{p2o5}$: عیار حد اقتصادی مرز کانسنگ و باطله G_{permit}^{cl} : حداکثر عیار کلر مجاز در کانسنگ ترکیبی x_{bi} : متغیر باینری عدد صحیح انتخابی در مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح

صحیح

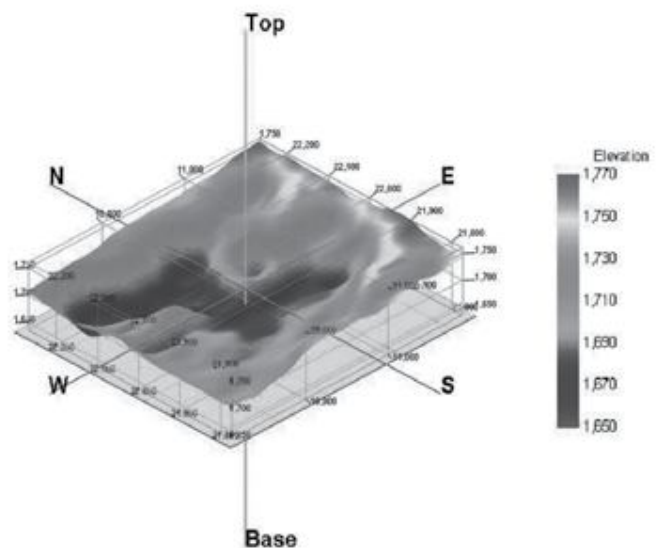
جدول ۱ و نیز عیار حد مورد استفاده در معدن به میزان ۶ درصد برای فسفات در نظر گرفته شده است.

پس از آن محدوده نهایی معدن با استفاده از نرم‌افزار NPVs+MFO بهینه گردید. نرم افزار NPVs+MFO که از محصولات شرکت Earthwork است، قادر است کاواک نهایی لرچ و گروسمن (LG) یک معدن روباز را بر اساس مجموعه‌ای از اطلاعات فنی و اقتصادی بیابد [۱۳]. محدوده به دست آمده مبنای برنامه‌ریزی با استفاده از هر دو روش برنامه‌ریزی است.

جدول (۱): شاخص‌های فنی و اقتصادی معدن فسفات اسفوردی

شاخص	مقدار (ریال)	شاخص	مقدار
قیمت کنسانتره	۲۰۶۰۰۰۰	بازیابی استخراج	٪۹۰
هزینه واحد استخراج	۱۶۰۰۰	بازیابی فراوری	٪۶۰
هزینه واحد فراوری	۳۶۰۰۰	ترقیق	٪۱۰

در شکل ۳ نمایی از محدوده نهایی معدن نشان داده شده است. این محدوده نمایانگر وضعیت معدن در پایان عمر معدن می‌باشد. همچنین شاخص‌های مهم محدوده نهایی معدن در جدول ۲ آورده شده است.



شکل (۳): محدوده نهایی معدن

محدودیت‌ها:

$$\sum_{i=1}^{Nb} x_{bi} = n$$

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{Nb} g_{bi}^{p2o5} \cdot x_{bi} \geq G_{c.o.g}^{p2o5}$$

$$\forall x_{bi} \in Nb \Rightarrow x_{bi} \geq 0 \ \& \ x_{bi} \leq 1 \ \& \ x_{bi} = Int.$$

n = تعداد بلوک‌های لازم برای تأمین خوراک کارخانه در دوره مربوطه

۴-۳-۲- بلوک‌های باطله

تابع هدف:

$$Max : Z = \sum_{i=1}^{Nwb} [\mu_1 pref.Fact_{bi} * (-\mu_2 \sqrt{p_{bi} - P_{waste-pile}} - \mu_3.Elev_{bi})] x_{bi}$$

که در آن

Nwb : تعداد بلوک‌های باطله مستعد به منظور باطله‌برداری

$pref.Fact_{bi}$: فاکتور اولویت باطله‌برداری بلوک i ام

محدودیت‌ها:

$$\sum_{i=1}^{Nwb} x_{bi} = n_w$$

$$\forall x_{bi} \in Nwb \Rightarrow x_{bi} \geq 0 \ \& \ x_{bi} \leq 1 \ \& \ x_{bi} = Int.$$

n_w = تعداد بلوک‌های باطله لازم برای باطله‌برداری و رسیدن به نسبت باطله‌برداری کلی معدن

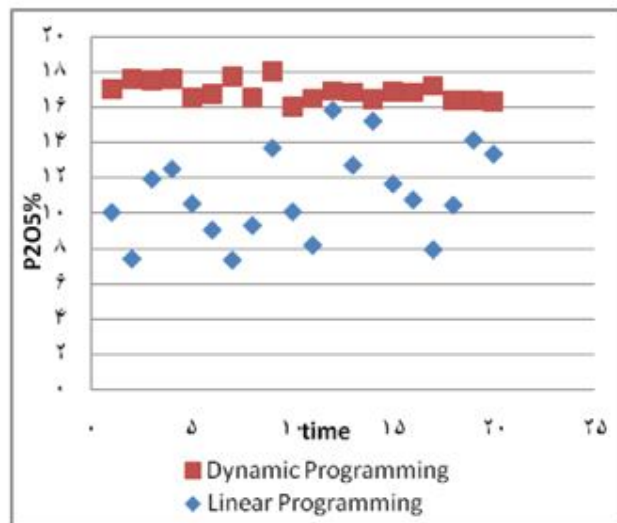
با افزودن ضرایب لاگرانژ به روش خطی انتخاب بلوک‌های ماده معدنی و باطله، برنامه‌ریزی استخراج انتخابی معدن فسفات اسفوردی با توجه به توپوگرافی فعلی معدن از افق ۱۷۴۵ تا افق ۱۶۳۵ متری، به صورت دوره‌های سه ماهه با مشخص بودن میانگین عیار فسفات و کلر در هر دوره، تهیه گردید.

۴-۴- برنامه‌ریزی پویا

از آنجا که مبنای نرم افزار NPV+MFO برای برنامه‌ریزی تولید روش برنامه‌ریزی پویا می‌باشد، در این تحقیق از این نرم‌افزار استفاده شده است. هرچند در این نرم‌افزار، امکان اعمال محدودیت حداکثر مقدار مجاز برای عناصر همراه وجود دارد، اما نتایج حاصل از به کارگیری آن نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن انباشتگاه، امکان رعایت حد مجاز کلر وجود ندارد چرا که هدف اصلی در این نرم افزار بیشینه‌سازی ارزش خالص فعلی و رعایت محدودیت‌های تولیدی است. در صورتی که هدف اصلی رعایت محدودیت کلر باشد، انحراف از ظرفیت‌های تولید در

برخی دوره‌ها بیش از حد می‌شود. با در نظر گرفتن محدودیت‌های تولیدی و نیز میزان مجاز کلر، برنامه‌ریزی کوتاه مدت معدن اسفوردی برای دوره‌های سه ماهه با استفاده از این نرم افزار تهیه گردید.

در هر دو روش برنامه‌ریزی برای دوره‌های سه ماهه میزان ماده معدنی و باطله‌ای که باید برداشت گردد به همراه میزان متوسط عیار فسفات و کلر تعیین می‌گردد. نتایج مربوط به بیست دوره (دوره‌های سه ماهه) برای متوسط میزان کلر و فسفات در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. همانگونه که در شکل ۴ پیداست متوسط عیار فسفات در این بیست دوره، در روش برنامه‌ریزی پویا بیشتر و این به معنی بیشتر بودن سود است. از منظر سود این بیشتر بودن عیار فسفات، امتیاز خوبی است؛ چرا که در سال‌های اولیه میزان سود برای برگشت هر چه زودتر سرمایه، باید بالا باشد. اما از آنجا که کارخانه به میزان کلر بسیار حساس است هدف اصلی، کنترل میزان کلر می‌باشد.

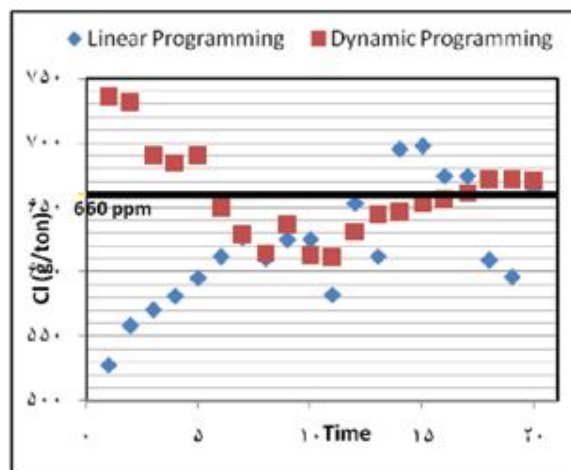


شکل ۴: متوسط میزان عیار فسفات برای دوره‌های سه ماهه با استفاده از روش‌های برنامه‌ریزی خطی (LP) و برنامه‌ریزی پویا (DP)

صورت گیرد به گونه‌ای که میزان متوسط کلر در کاواک نهایی کمتر از سقف مجاز گردد.

۶- مراجع

- [1]. Schuzhang, H.; 1996; "Computerbased optimization of open pit mining sequences", Journal of industry mining, pp. 125-133.
- [2]. Samanta, B & Bhattacharjee, A & Ganguli, R; 2005; " A genetic algorithms approach for grade control planning in a bauxite deposit", Application of computers and operations research in the mineral industry, Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1537 4499.
- [3]. Hustrulid, W & kuchta, M; 1998; "Open pit mine planning and design", 2-nd edition, London, Taylor and Francis group.
- [4]. Darwen, P; 2001; "Genetic algorithms and risk assessment to maximise NPV with robust open-pit scheduling", 4th Biennial Conference on Strategic mine planning, Western Australia, pp 26-28.
- [5]. Askari-Nasab, H & Frimpong, S & Awuah-Offei, K; 2005; "Intelligent optimal production scheduling estimator", Application of computers and operations research in the mineral, Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1537 4499.
- [6]. KUMRAL, M; 2004; "Genetic algorithms for optimization of a mine system under uncertainty", Production Planning & Control, Vol. 15, No. 1, 34-41.
- [7]. Ramazan S; 2007; "The new fundamental tree algorithm for production scheduling of open pit mines", European Journal of Operational Research, 177, 1153-1166.
- [8]. Caccetta, L & Hill, S; 2003; "An application of branch and cut to open pit mine scheduling", Journal of Global Optimization (27), pp. 349-365.
- [9]. Mukalay, M & Ilunga, S & Kamulete, M; 2005; "Aplication of Lagrange polynomial theory to surface mine optimization", Application of computers and operations research in the mineral industry, Taylor & Francis Group, London, ISBN 04 1537 4499.
- [10]. Ramazan, S & Dimitrakopoulos, R; 2003; "Production scheduling optimisation in nickel laterite deposit: MIP and LP applications and infeasibility in the presence of ore body variability", Mine planning and equipment selection, kalagoorlie, wa.
- [۱۱] - فتحیان پور، نادر، ۱۳۸۴، "گزارش فاز ۲ طرح امکان‌سنجی استخراج انتخابی در مجتمع فسفات، مطالعه و شناسائی روند تغییرات کلر در محدوده معدن اسفوردی"



شکل ۵: متوسط میزان کلر برای دوره‌های سه ماهه با استفاده از روش‌های LP و DP

شکل ۵ نتایج متوسط میزان کلر را در دوره‌های سه ماهه برای پنج سال اول استخراج معدن نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل پیداست در هر دو روش انحراف از حد مجاز (۶۶۰ ppm) وجود دارد، اما در روش برنامه‌ریزی پویا تعداد این انحراف‌ها زیاد است. در هر دو روش طی چند دوره عیار کلر بیش از حد مجاز است؛ زیرا متوسط عیار کلر در کاواک نهایی که مبنای برنامه‌ریزی هر دو روش است بیش از میزان مجاز می‌باشد. بنابراین الزاماً در چند دوره با انحراف عیار از حد مجاز مواجه می‌شویم. اما برنامه‌ریزی خطی به گونه‌ای بلوک‌ها را ترکیب می‌کند که تعداد انحراف‌ها ضمن رعایت دیگر محدودیت‌ها، کاهش یابد.

۵- نتایج

برنامه‌ریزی تولید معدن اسفوردی با استفاده از فنون برنامه‌ریزی خطی و برنامه‌ریزی پویا به صورت جداگانه انجام گرفت. در هر دو روش حداقل نمودن انحراف متوسط عیارهای کانه استخراجی، از مقادیر عیار از پیش تعیین شده به عنوان هدف در نظر گرفته شد. نتایج نشان می‌دهد که روش برنامه‌ریزی خطی در رعایت کردن بیشترین کلر مجاز به میزان ۶۶۰ ppm عملکرد بهتری دارد و در دوره‌های کمتری شاهد انحراف از میزان مجاز کلر هستیم. اما از آنجا که در کاواک نهایی معدن که مبنای هر دو برنامه‌ریزی بوده است عیار متوسط کلر بیش از میزان مجاز می‌باشد به ناچار برخی دوره‌ها انحراف از میزان مجاز دارند. بنابراین پیشنهاد می‌گردد که بهینه‌سازی در مورد کاواک نهایی

[۱۲]- مهرگان: پژوهش عملیاتی، ۱۳۷۸، "برنامه ریزی خطی و کاربردهای آن، نشر صالحان"

[13]. Earthworks NPV Scheduler manual; 2001; Version 3.4.

[14]. Georges. V; 2005; "Grade control classification of ore and waste: A critical review of estimation and simulation based procedures", Mathematical Geology, Vol. 37, No. 5.

[۱۵]- موسوی، امین اله، ۱۳۸۸، "بهینه سازی محدوده نهایی

معدن با استفاده از روش هوشمند شبکه عصبی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس