

## تحلیل حساسیت عوامل مؤثر بر مدل‌سازی کانسار مس سونگون

احمدرضا صیادی<sup>۱\*</sup>، مهرداد حیدری<sup>۲</sup> و ابراهیم اژدری شبستری<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>استادیار بخش مهندسی معدن - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup>عضو هیئت علمی دانشگاه قزوین

<sup>۳</sup>دانش آموخته کارشناسی ارشد بخش مهندسی معدن - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت ۸۶/۱/۲۵، تاریخ دریافت اصلاح شده ۸۷/۷/۱۷، تاریخ تصویب ۸۷/۹/۱۰)

### چکیده

مدل‌سازی هندسی و عیاری ذخایر معدنی، بخش مهمی از فرآیند طراحی معدن است. در این ارتباط دو دسته چالش عمده قابل بررسی است. دسته اول مربوط به تئوری و الگوریتم ساخت نرم‌افزار و دسته دوم مرتبط با قضاوت‌های مهندسی و کاربری نرم‌افزار بوده که اغلب از شرایطی نظیر هندسه پیچیده و مرزهای نامعلوم کانسار ناشی می‌شوند. در این تحقیق به دسته دوم پرداخته و پارامترهای متعددی که بر مدل نهایی تأثیرگذار هستند ارزیابی شده‌اند. برخی از پارامترها نظیر پارامترهای ساخت مدل بلوکی و چگونگی ساخت قاب‌های سیمی به نرم‌افزار و روش مدل‌سازی اختصاص دارند. برخی دیگر صرف‌نظر از نرم‌افزار مدل‌سازی، حالت عمومی داشته و بین تمام روش‌های مدل‌سازی مشترک هستند، همانند فاصله جستجو و تعداد حداقل نمونه‌ها. چگونگی و میزان تأثیر این پارامترها روی مدل کانسار مس پورفیری سونگون ارزیابی شده است و مهم‌ترین متغیرها مربوط به پارامترهای جستجو (فاصله جستجو، تعداد حداقل نمونه‌ها و جستجوی هشت قسمتی) تعیین شده‌اند. شاخص ارزیابی، میزان محتوی فلزی کانسار است.

**واژه‌های کلیدی:** مدل هندسی، مدل عیاری، چالش‌های مدل‌سازی، پارامترهای جستجو، پارامترهای وارپوگرام، مس

پورفیری سونگون

### مقدمه

مدل هندسی، مدل عیاری جای می‌گیرد که مشخصاتی نظیر عیار، میزان بازیابی، هزینه فرآوری، تخلخل، نفوذپذیری و موارد دیگری را دربر دارد.

از شرایط خاص دیگر، دسترسی نداشتن به اطلاعات فراوان است [۲]. این ویژگی باعث می‌شود تا از روش‌های درون‌یابی فضایی برای تخمین اطلاعات نقاط مجهول استفاده شود [۳].

برای مدل‌سازی کانسارها می‌توان از انواع الگوریتم دوبعدی و یا سه‌بعدی استفاده کرد. مدل‌سازی دوبعدی شامل یک شبکه‌بندی مربعی یا مستطیلی و به عبارت دیگر مش‌بندی در فضای مورد نظر است، این شبکه در واقع، رویه‌ای را تشکیل می‌دهد. مقادیر Q (ارزش مورد نظر) به مراکز مش نسبت داده می‌شود. این مقادیر خصوصیتی همچون ارتفاع، عیار، ضخامت را شامل می‌شوند. استفاده از مدل‌های دو بعدی برای مدل‌سازی کانسارهای لایه‌ای و باریک با وسعت زیاد و همچنین ساختارهای برشی و گسل‌خورده ارجحیت دارد. در مدل سه‌بعدی، ارزش‌ها (Q) به مراکز بلوک‌ها تخصیص داده می‌شوند. هر بلوک ابعاد و مختصات منحصر به فردی در

مدل‌سازی کانسار یکی از مقدمات اصلی برآورد ذخیره و طراحی معدن است. بدین منظور یک تصویر دو یا سه‌بعدی از شکل و وضعیت یک کانسار، نحوه قرارگیری آن در فضا و همچنین چگونگی توزیع عیار و سایر خواص مواد در سطح یا حجم مربوطه تعیین می‌شود.

روش‌های متعددی برای مدل‌سازی کانسارها ارائه شده‌اند که برخی از آنها در شرایطی کارآمدتر هستند. بعضی مناسب ذخایر لایه‌ای و ساده، تعدادی مناسب ذخایر توده‌ای و یکنواخت و برخی نیز با شرایط پیچیده تناسب بیشتری دارند.

تلاش‌هایی نیز برای ساخت مدل ذخایر معدنی به کمک سیستم‌های CAD انجام گرفته است [۱] ولی تمام آنها نواقصی داشته‌اند. دلایل این موضوع مربوط به پیچیدگی هندسه و توپولوژی، مرزهای نامشخص، عدم تجانس و ناهمسانگردی پیچیده مواد و خواص آنها است. از این رو نیاز بوده تا روش‌ها و مدل‌های ویژه‌ای ارائه شود [۲]. این مدل‌ها اغلب دو مدل هندسی و عیاری (خواص) را در برمی‌گیرند. در مدل هندسی مشخصات مرزی، توپوگرافی و مورفولوژی کانسار مدل می‌شود و در باطن

دسته‌های مربوط به تئوری ساخت نرم‌افزار و گروهی شامل قضاوت‌های مهندسی و کاربری نرم‌افزارهای مدل‌سازی است. در این تحقیق به چالش‌های دسته دوم پرداخته و تأثیر قضاوت‌های مهندسی کاربران بر مدل‌سازی کانسار مس سونگون تحقیق شده است.

برای مدل‌سازی کانسار ذکر شده از نرم‌افزار DATAMINE استفاده شده و حساسیت پارامترهای عمومی و پارامترهای خاص این نرم‌افزار نسبت به مدل کانسار تحلیل شده است. آنچه که در این رابطه اهمیت بیشتری دارد، یافتن درجه حساسیت مدل نسبت به این پارامترها است. دسته‌بندی این عوامل بر اساس حساسیت آنها می‌تواند کمک بسیاری در مدل‌سازی کانسار کند. پارامترهایی که حساسیت بیشتری دارند، توجه بیشتری را به خود اختصاص خواهند داد و در تعیین یا تعریف آنها دقت بیشتری به عمل خواهد آمد. گروه‌های اصلی بررسی شده عبارتند از [۵]:

- پارامترهای مرتبط با نمونه‌ها و داده‌های پایه؛
  - پارامترهای هندسی مدل؛
  - پارامترهای مربوط به واربیوگرام؛
  - پارامترهای مربوط به جستجوی نمونه؛
  - پارامترهای تخمین؛
- نتایج این تحقیق زمینه را برای بهره‌گیری بهینه از نرم‌افزارهای مدل‌سازی کانسارها و جلوگیری از خطاهای احتمالی فراهم می‌کند.

### روش تحقیق

کانسار مس سونگون به شکل پورفیری بوده و در این تحقیق به دلیل شرایط خاص کانسار از مدل بلوکی برای مدل‌سازی کانسار استفاده شده است.

پارامترها را می‌توان بر حسب عام و خاص بودن دسته‌بندی کرد، برای مثال ابعاد بلوک، جدا از روش و نرم‌افزار به کار رفته، پارامتر عام است و پارامتری نظیر تعداد نقاط گسستگی بلوک و نیز پارامترهای مربوط به شیوه ساخت مدل هندسی جزو پارامترهای خاص هستند. می‌توان آن‌ها را در ارتباط با مدل هندسی و یا مدل عیاری کانسار دسته‌بندی کرد. در این تحقیق پارامترها در گروه‌های کوچک‌تری مطالعه شده‌اند، مانند: جستجوی نمونه، واربیوگرافی و تخمین عیار که برخی از این پارامترها مختص نرم‌افزار DATAMINE هستند. تأثیر تغییرات

فضای سه‌بعدی دارد و  $Q$  به یک فضای سه‌بعدی نسبت داده می‌شود، از این رو مدل سه‌بعدی نامیده می‌شود. مدل بلوکی (سه‌بعدی) برای شکل‌های پیچیده کانسار ایده‌آل است [۳].

در ارتباط با مدل‌سازی کانسارها، چالش‌های متعددی نیز وجود دارد [۴]، مواردی همچون:

- شرایط خاص مدل‌سازی زمین‌شناسی، مانند هندسه و توپولوژی پیچیده، مرزهای نامعلوم با تغییرات فضایی پیچیده، استفاده از درون‌یابی فضایی؛
- چالش‌ها و روندهای تکنولوژیکی مانند نوع عملکرد نسبت به هزینه ساخت‌افزار، مفاهیم مدیریت اطلاعات و پایگاه داده‌ها و انتقال اطلاعات؛
- مدل‌سازی هندسی یا تعریف اسکلت مدل مانند مدل‌سازی لایه‌های رسوبی، مدل‌سازی به کمک گمانه‌های اکتشافی، مدل‌سازی عوارض پیچیده؛
- مدل‌سازی عیاری یا تخصیص توزیع ویژگی‌ها که می‌تواند به کمک مش‌های ساخت یافته و یا بی‌شکل انجام گیرد.

شناخت این چالش‌ها و در نظر گرفتن تمهیدات لازم برای کاهش یا مدیریت آنها تا حدی وابسته به قضاوت‌های مهندسی در تعیین پارامترها در هنگام مدل‌سازی و کاربری نرم‌افزارهای مرتبط است. استفاده از دو نرم‌افزار مختلف برای مدل‌سازی یک ذخیره معدنی با شرایط یکسان، جواب‌های مشابه نخواهد داشت. همچنین، مدل‌سازی یک ذخیره معدنی توسط دو گروه متخصص و به کمک یک نرم‌افزار واحد، جواب‌های متفاوتی به دست خواهد داد. به طور کلی پارامترهای مدل‌سازی یا جنبه عمومی و مشترک دارند یا جنبه خاص دارند. پارامترهای عمومی آن دسته از پارامترها هستند که در میان نرم‌افزارهای مرسوم مدل‌سازی، مشترک هستند؛ مانند مقدار توان در روش عکس توان فاصله، فاصله جستجو، تعداد حداقل و حداکثر نمونه مورد استفاده در بیضوی جستجو برای تخمین. پارامترهایی نظیر تعداد نقاط گسستگی، روش مثلث‌بندی و پارامترهای مربوط به آن، چگونگی تأثیر ضریب طول نمونه، نحوه جستجوی نمونه و نحوه بلوک‌بندی را می‌توان جزو پارامترهای خاص در نظر گرفت.

به طوری که اشاره شد چالش‌های ذکر شده را از نظر ماهیت می‌توان به دو دسته کلی تقسیم‌بندی کرد.

نزدیک بوده و فرض شده است که داده‌ها توزیع طبیعی دارند تا بتوان از معادلات کریجینگ با صحت کافی استفاده کرد [۶]. در این تحقیق این فرض به چالش کشیده شده و توزیع نرمال داده‌ها با فرض توزیع لگاریتم طبیعی آنها مقایسه شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، نحوه توزیع داده‌ها، تأثیر قابل توجهی بر مدل دارد. در این مورد با فرض توزیع لگاریتمی نمونه‌ها، عیار متوسط و در نتیجه میزان محتوی فلزی ۲۶/۴ و ۲۹/۵ درصد به ترتیب در بخش‌های سوپرژن و هیپوژن افزایش یافته است. اما فرض شرایط نرمال یا لگاریتم طبیعی را وضعیت داده‌ها مشخص می‌کند و نمی‌توان ناآگاهانه از این دو حالت استفاده کرد. موضوعی که می‌توان به آن اشاره کرد، کاربرد اشتباه این دو حالت است که حتی می‌تواند کانسار را از حالت اقتصادی خارج کرده یا بر عکس کانسار غیر اقتصادی را اقتصادی جلوه دهد. آنچه که در این قسمت بررسی شده است تنها برای نشان دادن تأثیر این پارامتر بر مدل است.

### اطلاعات سنگ‌شناسی

در تمام مدل‌های مورد بررسی، شرایط سنگ‌شناسی بر داده‌ها اعمال شده و از داده‌های واقع در زون اسکارن و دایک‌ها برای تخمین استفاده نشده است. این بخش از تحقیق، حالت دیگری را نیز در نظر گرفته و اطلاعات سنگ‌شناسی زون‌های اسکارن و دایک در مدل در نظر گرفته شده است. ارزیابی انجام شده نشان می‌دهد که این تغییرات تأثیر بسیاری بر مدل (بخصوص در دو بخش سوپرژن و لیچ) دارد. به طوری که مقدار محتوی فلزی در زون لیچ، سوپرژن و هیپوژن به ترتیب ۴۵/۶۷، ۱۶/۴۸ و ۲/۸ درصد افزایش می‌یابد. استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی به کمک یک متخصص زمین‌شناس انجام می‌گیرد و نمی‌توان بدون مشورت متخصصان زمین‌شناس به طور دلخواه از این اطلاعات استفاده کرد یا آنها را نادیده گرفت. در این حالت چون از نمونه‌های بیشتری برای تخمین استفاده شده است محدوده تخمین خورده بزرگ‌تر شده و یا به عبارتی تعداد بلوک‌های با ارزش بزرگ‌تر از صفر بیشتر شده است در نتیجه افزایش تناژ و کاهش عیار برای زون‌های اصلی کانسار رخ داده که در نهایت افزایش محتوی فلزی را در پی داشته است.

پارامترها بر تناژ ذخیره، عیار و محتوی فلزی بررسی شده است اما در این مقاله به ارائه تغییرات محتوی فلزی اکتفا می‌شود. تغییرات پارامترها و محتوی فلزی به صورت نسبی و درصد بیان شده است تا شرایط بهتری برای تحلیل برآورده شود. به عنوان مثال اگر مقدار فاصله جستجو در جهت X (برای مدل مبنا) ۱۰۰ متر باشد، به میزان ۵۰ درصد در جهات کاهش و افزایش این پارامتر یعنی از ۵۰ متر تا ۱۵۰ متر بررسی شده است و به استثنای مدل مبنا، ۱۰ مدل دیگر ساخته شده که گام تغییرات هر یک به میزان ۱۰ درصد است. در برخی از پارامترها که مقادیر به صورت عدد صحیح است برای حداکثر تغییرات نسبت (حداکثر) ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شده و فاصله بین آنها به طور مساوی تقسیم شده است. به عنوان مثال حداقل نمونه برای تخمین برای مدل مبنا ۵ نمونه بوده، پنج مدل دیگر با حداقل نمونه ۶، ۷ ... و ۱۰ عدد بررسی شده که حداکثر تغییرات (نسبت ۱۰۰٪) به آخرین مدل بررسی شده تخصیص داده شده است و تغییرات برای مدل‌های بین آنها به صورت خطی تقسیم شده است. به عبارتی گام تغییرات (معادل افزایش یک نمونه) ۲۰ درصد است.

### مطالعه موردی روی پارامترهای مؤثر بر مدل‌سازی کانسار مس سونگون

کانسار مس سونگون از نوع پورفیری بوده و به سه بخش اصلی لیچ، سوپرژن و هیپوژن تقسیم شده است. از این رو در بررسی پارامترها، این تأثیرات به طور جداگانه روی سه بخش اعمال شده است.

### پارامترهای مرتبط با نمونه‌ها و داده‌های پایه

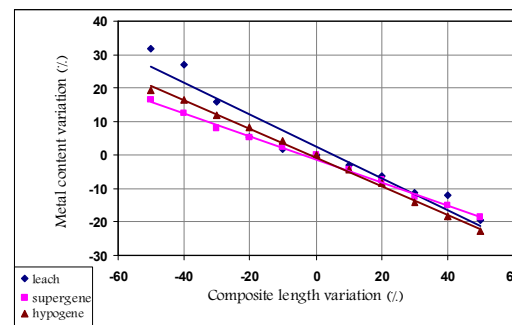
در این بخش، پارامترهای مربوط به نمونه‌های استفاده شده برای تخمین عیار مانند نحوه توزیع عیار نمونه‌های حاصل از مغزه‌های اکتشافی، در نظر گرفتن موقعیت نمونه‌ها از نظر سنگ‌شناسی و طول ساخت ترکیب نمونه‌ها (طول کامپوزیت) بررسی شده‌اند.

### توزیع داده‌ها

با توجه به مطالعات پیشین و تحلیل آماری انجام شده روی داده‌ها، در تمام گزینه‌های مورد بررسی (مدل‌های مبنا)، توزیع داده‌ها با شرایطی به توزیع نرمال

## طول کامپوزیت

در این قسمت، اثر تغییر طول کامپوزیت بر مدل بررسی شده است. طول کامپوزیت برای مدل مینا، ۶/۲۵ متر (نصف طول پله) است. در حالی که مقدار آن از ۳/۱۲۵ تا ۹/۳۷۵ متر برای ارزیابی تغییر داده شده است. نتایج به دست آمده (شکل ۱) افزایش تناژ هنگام کاهش طول کامپوزیت و رابطه عکس آن یعنی کاهش تناژ هنگام افزایش طول کامپوزیت را نشان می دهد. این موضوع به این علت است که با افزایش طول کامپوزیت تعداد کل نمونه های ورودی برای تخمین عیار کاهش می یابد و از طرفی چون شرایط جستجو و تخمین ثابت مانده اند این شرایط در برخی نقاط برآورده نشده و تخمین انجام نمی گیرد. نتیجه دیگری که در مدل زون های سوپرژن و هیپوژن به دست آمده، افزایش عیار متوسط با افزایش طول کامپوزیت و بر عکس کاهش عیار متوسط با کاهش طول کامپوزیت است. دلیل این موضوع نیز همان دلیل قبلی است، چون تنها در مناطق پر عیار به اندازه کافی نمونه وجود داشته است تا شرایط جستجو و تخمین برقرار شود، از اینرو به همراه کاهش تناژ، افزایش عیار متوسط حاصل شده است. در شرایط مدل سازی ذکر شده وجود رابطه خطی با شیب منفی بین تابع (تغییرات محتوی فلزی) و متغیر (تغییرات طول کامپوزیت) دیده می شود. برازش خط مربوط به نقاط حاصله برای بخش های مختلف کانسار در جدول (۱) آورده شده است.



شکل ۱: تأثیر طول کامپوزیت بر محتوی فلزی کانسار.

جدول ۱: رگرسیون داده های حاصل از تغییر طول کامپوزیت.

بخش	ضریب همبستگی	معادله رگرسیون
لیچ	$R^2 = ۰/۹۳۶۷$	$Y = -0.4743 X - 2.7089$
سوپرژن	$R^2 = ۰/۹۹۶۵$	$Y = -0.3441 X - 1.26$
هیپوژن	$R^2 = ۰/۹۹۷۴$	$Y = -0.4272 X - 0.6852$

## پارامترهای هندسی مدل

در این قسمت، پارامترهای بسیاری برای ارزیابی وجود دارند، اما به دلایلی همچون دسترسی نداشتن به اطلاعات کافی و نیز الگوریتم های مختلف برای ساخت مدل هندسی، فقط پارامترهای مربوط به اندازه بلوک ها (ارتفاع بلوک و ابعاد کلی بلوک) بررسی شده اند. از آنجا که همبستگی قوی بین نقاط حاصله وجود نداشته است، نمی توان درباره چگونگی روند تغییرات مدل اظهار نظر کرد و فقط می توان اشاره کرد که نتایج، نشان از تأثیر کم این پارامتر بر مدل این کانسار دارد. همچنین تأثیر تعداد سلول های فرعی بر میزان محتوی فلزی ناچیز است و دلیل این موضوع به ساختار کانسار سونگون برمی گردد. در اینجا تأثیر تغییر ابعاد بلوک ها، فقط بر میزان محتوی فلزی مد نظر بوده است. ولی این تغییرات می تواند تأثیر زیادی بر مدل استخراجی و پیت بهینه داشته باشد. در عمل ارتفاع بلوک ها اغلب متأثر از تجهیزات معدنی به کار گرفته شده و خصوصیات مقاومتی سنگ است. همچنین ابعاد بلوک ها نسبت به محدوده مدل سازی نباید به حدی کوچک باشند که زمان محاسبات طولانی و حجم فایل مدل، بیش از حد معمول بزرگ شود و از طرفی ابعاد بلوک در صفحه پلان، (افق) نباید بیش از نصف فاصله شبکه گمانه زنی باشد. در غیر این صورت عیار بلوک ها، عیار متوسط چندین بلوک کوچک تر خواهد بود که می تواند طراحی های بعدی پیت را با مشکل مواجه کند.

## پارامترهای مربوط به واریوگرام

در این قسمت به دلیل نیافتن رابطه فضایی نمونه های موجود در زون لیچ از بررسی این زون صرف نظر شده است و تنها زون های سوپرژن و هیپوژن مدل شده اند. مدل واریوگرام در نظر گرفته شده برای این دو زون، مدل کروی است. پارامترهای مختلفی در این قسمت قابل بررسی هستند از جمله: دامنه واریوگرام، واریانس فضایی و تصادفی واریوگرام، نوع و ساختار واریوگرام.

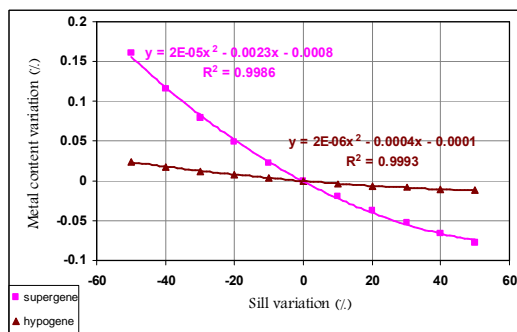
## دامنه واریوگرام

تأثیر دامنه واریوگرام بر مدل در جهات اصلی  $X$ ،  $Y$  و  $Z$  بررسی شده است. با توجه به شکل های (۲) و (۳) مشاهده می شود که حساسیت مدل نسبت به دامنه واریوگرام کم است. اما آنچه که در ارتباط با یافتن دقیق

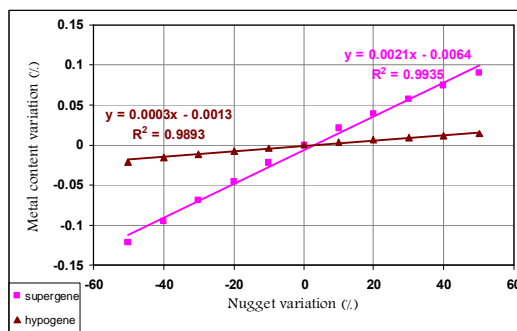
درصد کاهش می‌یابد که بسیار ناچیز است.

### واریانس تصادفی واریوگرام (C<sub>0</sub>)

نتایج تأثیر واریانس تصادفی واریوگرام بر مدل، در شکل (۵) آورده شده است. نمودارهای به دست آمده (شکل ۵) ارتباط قوی بین متغیر و تابع را نشان می‌دهند. می‌توان این ارتباط را خطی فرض کرد و می‌توان از درجه ۲ نیز استفاده کرد، زیرا آهنگ تغییرات محتوی فلزی با کاهش واریانس تصادفی رو به افزایش است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش واریانس تصادفی، میزان محتوی فلزی افزایش یافته و کاهش واریانس تصادفی کاهش محتوی فلزی را در پی دارد. به عنوان مثال در بخش سوپرزن با ۲۰ درصد افزایش واریانس تصادفی، مقدار محتوی فلزی به میزان ۰/۰۴ درصد افزایش می‌یابد که این افزایش بسیار محدود تلقی می‌شود.



شکل ۴: تأثیر تغییر واریانس فضایی واریوگرام بر محتوی فلزی.

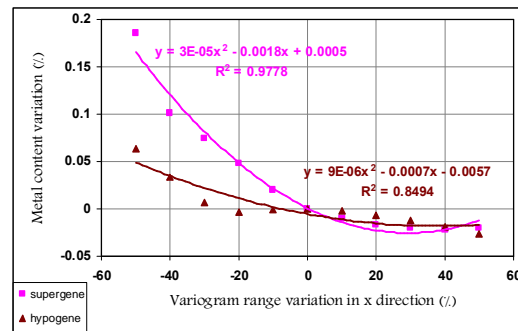


شکل ۵: تأثیر واریانس تصادفی واریوگرام بر محتوی فلزی.

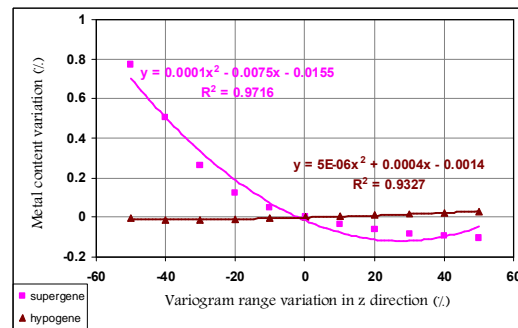
### نوع واریوگرام

واریوگرام برازش شده بر مدل مینا نوع کروی است. تأثیر دو نوع دیگر واریوگرام یعنی نمایی و گوسی بر مدل بررسی شده و نتایج آن در شکل (۶) آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، حساسیت مدل نسبت به این

دامنه واریوگرام یا ارتباط فضایی مهم است، به دست آوردن دامنه تأثیر یا فاصله جستجو از روی دامنه واریوگرام است [۷]. در نتیجه ضروری است از تخصص و تجربه کافی در این زمینه بهره برد. آنچه که در این بخش بررسی شده است تأثیر دامنه واریوگرام بدون تغییر فاصله جستجو بوده و در همه مدل‌ها دامنه جستجو مطابق با مدل مینا است.



شکل ۲: تأثیر دامنه واریوگرام در امتداد X بر محتوی فلزی.



شکل ۳: تأثیر دامنه واریوگرام در امتداد Z بر محتوی فلزی.

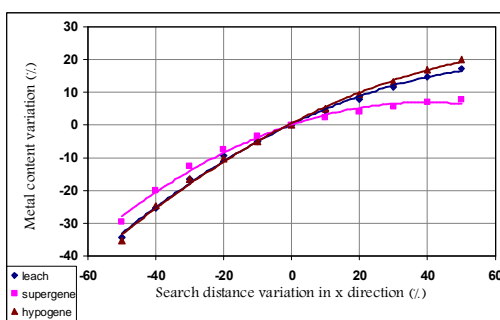
### واریانس فضایی واریوگرام (C)

نتایج تأثیر واریانس فضایی واریوگرام بر مدل در شکل (۴) آورده شده است. به دلایلی از جمله عدم تخمین بسیاری از بلوک‌ها به دلیل ساختار ماتریس‌های حل کریجینگ، در تمام جهات از یک واریانس فضایی استفاده شده است. نمودارهای حاصله وجود رابطه توانی با درجه ۲ را بین تغییرات واریانس فضایی و درصد تغییرات محتوی فلزی نشان می‌دهند. کاهش مقدار واریانس فضایی افزایش عیار و در نتیجه افزایش محتوی فلزی، اما به مقدار بسیار کم را در پی داشته و افزایش آن کاهش محتوی فلزی را به همراه دارد. با کاهش مقدار واریانس فضایی، آهنگ تغییرات محتوی فلزی با سرعت بیشتری افزایش می‌یابد. به عنوان مثال در بخش سوپرزن با ۲۰ درصد افزایش واریانس فضایی، مقدار محتوی فلزی به میزان ۰/۰۳۷

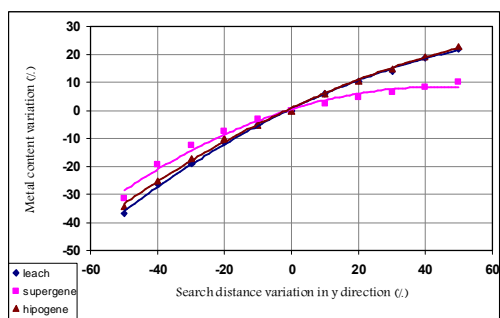
از جمله ابعاد بیضوی جستجو، تعداد حداقل و حداکثر نمونه برای تخمین، تعداد بخش‌های شرط شده و حداقل نمونه هر بخش در جستجوی هشت قسمتی و شکل هندسی محدوده جستجو.

### ابعاد بیضوی جستجو

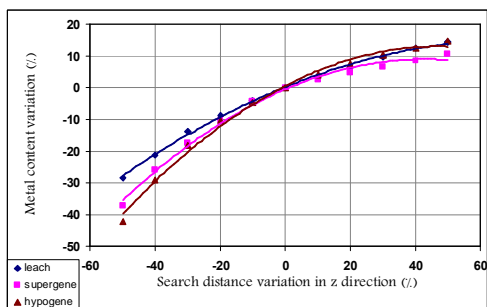
تأثیر فاصله جستجو بر مدل در سه جهت اصلی بررسی شده است. همان‌طور که از شکل‌های (۷) تا (۹) پیدا است با افزایش فاصله جستجو در امتداد یکی از محورها یا تمام آنها مقدار محتوی فلزی افزایش یافته و با کاهش تغییرات مقدار آن کاهش می‌یابد.



شکل ۷: تأثیر تغییر المان X بیضوی جستجو بر محتوی فلزی.



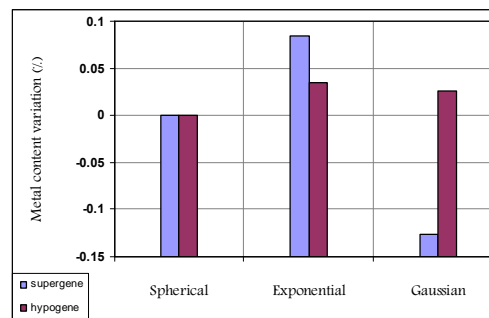
شکل ۸: تأثیر تغییر المان Y بیضوی جستجو بر محتوی فلزی.



شکل ۹: تأثیر تغییر المان Z بیضوی جستجو بر محتوی فلزی.

به عنوان مثال در زون هیپوژن با افزایش ۲۰ درصدی فاصله جستجو در جهت X، مقدار محتوی فلزی به میزان ۱۰ درصد افزایش یافته است. نکته قابل ملاحظه این است

پارامتر بسیار پایین است. در کل، مدل نمایی برازش بهتری داشته و محتوی فلزی به دست آمده در مدل آن نیز بیشتر است.



شکل ۶: تأثیر تغییر نوع واریوگرام بر محتوی فلزی کانسار.

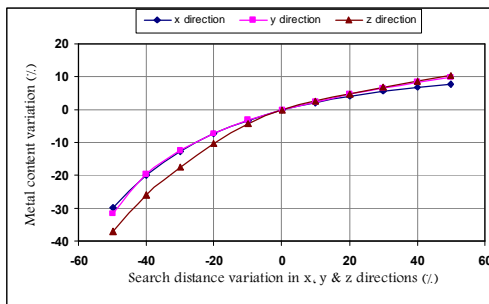
### ساختار واریوگرام

واریوگرام به کار برده شده در مدل مینا، نوع تک ساختار است. برای بررسی تأثیر ساختار واریوگرام فرض شده است که واریوگرام دو ساختار دارد. نتایج، تأثیر ناچیز این پارامتر را بر مدل نشان می‌دهند، اما همین اثر در بخش سوپرژن چند برابر زون هیپوژن است و این پارامتر می‌تواند در کانسارهای دیگر از حساسیت و اهمیت بیشتری بهره‌مند باشد. در اینجا باید به چند نکته اشاره کرد. اول آنکه تأثیر تغییر پارامترهای واریوگرام بر محتوی فلزی کانسار مس سونگون بسیار ناچیز است. نکته دوم اینکه تمام پارامترهای واریوگرام به طور مجزا بررسی شده‌اند و از تأثیر آنها بر پارامترهای جستجو صرف‌نظر شده است که این موضوع خالی از اشکال نیست، زیرا منشأ تفسیر بیشتر پارامترها در دسته‌های دیگر، همین پارامترها هستند و باید برای درستی آنها کار زیادی انجام گیرد. نکته دیگر این است که زون سوپرژن حساسیت بیشتری را نسبت به پارامترهای این بخش دارد و دلیل آن کوچک و پر عیار بودن این بخش و همچنین بزرگ‌تر بودن واریانس عیار نمونه‌ها (۰/۳) نسبت به بخش هیپوژن (۰/۱) است. به دلیل ساختار خاص کانسار مس پورفیری سونگون، پراکندگی عیار، به طور تقریبی یکنواخت بوده و واریانس عیار پایین است که این شرایط موجب تأثیر کم دامنه واریوگرام و پارامترهای دیگر واریوگرام بر مدل این کانسار می‌شود.

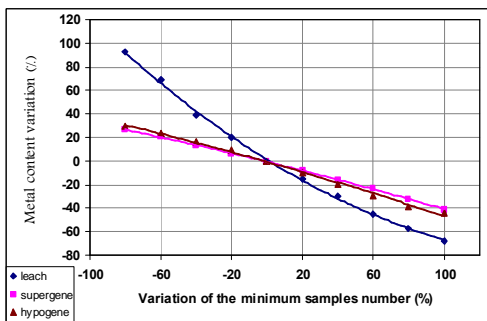
### پارامترهای مربوط به جستجوی نمونه

پارامترهای مختلفی در این ارتباط قابل بررسی هستند

برای مدل مبنا ۵ عدد [۶] در نظر گرفته شده و برای مدل‌های دیگر از ۱ تا ۱۰ عدد متغیر بوده است. نتایج این بررسی در شکل (۱۱) آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، در بخش لیچ حساسیت بیشتری نسبت به این پارامتر وجود دارد. به عنوان مثال به ازای افزایش ۲۵ درصدی تعداد حداقل نمونه‌ها، محتوی فلزی به میزان ۲۰ درصد دچار افت می‌شود. همچنین شیب نمودار با شدت بیشتری نزول می‌کند و زودتر به حد نهایی تغییرات می‌رسد. این موضوع به دلیل وجود نمونه‌های کمتر و تراکم کم آنها در این بخش است. همچنین تعداد حداقل نمونه‌ها در این بخش در مدل مورد استفاده در گزارش امکان‌سنجی، کانسار ۳ است [۶] که در این تحقیق ۵ در نظر گرفته شده است و همین موضوع سبب خروج از شرایط مطلوب این پارامتر در زون لیچ می‌شود. در مجموع، وجود یک رابطه درجه دوم (با ضریب معکوس) بین میزان محتوی فلزی (تابع) و تعداد حداقل نمونه (متغیر) در محدوده مورد بررسی به چشم می‌خورد. بنابراین می‌توان با داشتن معادله خط مربوط به آن با صحت و دقت مناسبی میزان محتوی فلزی را برای حالات مختلف تقریب زد. مشخصات برازش خط مربوط به نقاط حاصله برای بخش‌های مختلف کانسار در جدول (۳) آورده شده است.



شکل ۱۰: تأثیر فاصله جستجو در هر سه امتداد (سوپرژن).



شکل ۱۱: تأثیر تغییر تعداد حداقل نمونه بر میزان محتوی فلزی.

که آهنگ کاهش تغییرات صعودی و آهنگ افزایش تغییرات نزولی است و این بدین دلیل است که با بزرگ‌تر شدن محدوده جستجو، نمونه‌های واقع در محدوده بیشتر شده، اما تنها از نمونه‌های نزدیک استفاده می‌شود و تنها کمی محدوده کلی تخمین بزرگ‌تر می‌شود که افزایش تناژ و کاهش عیار را در پی دارد، با کاهش محدوده جستجو، تعداد نمونه‌های یافته شده در مناطق کم‌تراکم کم‌تر از تعداد لازم برای تخمین شده و از تخمین بلوک صرف‌نظر می‌شود که این موضوع موجب کاهش تناژ ذخیره می‌شود. مشخصات برازش خط مربوط به نقاط حاصله برای بخش‌های مختلف کانسار در جدول (۲) آورده شده است.

جدول ۲: رگرسیون داده‌های حاصل از تغییر دامنه جستجو.

بخش	ضریب همبستگی	معادله رگرسیون
امتداد X	لیچ	$Y = -0.003 X^2 + 0.497 X + 0.252$ $R^2 = 0.997$
	سوپرژن	$Y = -0.004 X^2 + 0.343 X + 0.101$ $R^2 = 0.992$
	هیپوژن	$Y = -0.003 X^2 + 0.528 X + 0.555$ $R^2 = 0.997$
امتداد Y	لیچ	$Y = -0.003 X^2 + 0.573 X + 0.514$ $R^2 = 0.999$
	سوپرژن	$Y = -0.004 X^2 + 0.367 X + 0.35$ $R^2 = 0.985$
	هیپوژن	$Y = -0.003 X^2 + 0.555 X + 0.858$ $R^2 = 0.998$
امتداد Z	لیچ	$Y = -0.003 X^2 + 0.416 X + 0.181$ $R^2 = 0.998$
	سوپرژن	$Y = -0.005 X^2 + 0.441 X - 0.489$ $R^2 = 0.994$
هیپوژن	$Y = -0.006 X^2 + 0.528 X + 0.576$ $R^2 = 0.994$	

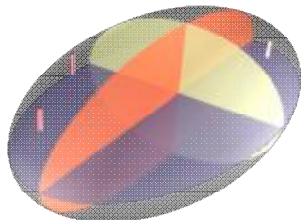
مقایسه همزمان نتایج تأثیر دامنه جستجو در سه امتداد (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که تغییرات فاصله جستجو در جهات X و Y تأثیر یکسانی بر میزان محتوی فلزی داشته، اما جهت Z رفتار متفاوتی دارد. در امتداد مذکور، کاهش فاصله جستجو در زون‌های سوپرژن و هیپوژن تأثیر بیشتری بر میزان محتوی فلزی گذاشته است. از دلایل این موضوع می‌توان به کوچک‌تر بودن شعاع تأثیر در امتداد Z و همچنین افزایش تعداد نمونه‌ها در این جهت اشاره کرد.

### تعداد حداقل نمونه برای تخمین

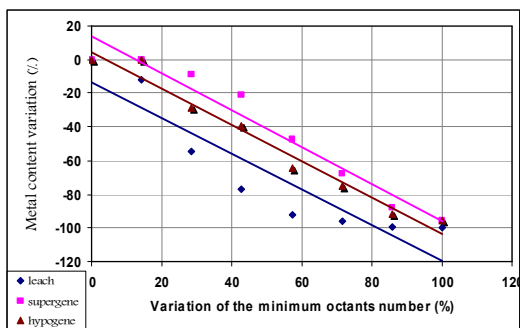
در این بررسی، حداقل نمونه داخل بیضی جستجو



جستجو، از میزان محتوی فلزی کاسته شده است. به عنوان مثال در بخش هیپوزن با افزایش ۵۰ درصدی این پارامتر مقدار محتوی فلزی به میزان ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. دلیل موضوع این است که در بسیاری از بلوک‌ها شرایط جستجو برآورده نشده و تخمین نیز صورت نمی‌گیرد. تأثیر تغییرات این پارامتر در بخش لیچ همانند تأثیر تغییرات حداقل نمونه است و در هر دو حالت شیب نمودار با شدت بیشتری نزول می‌کند و زودتر به حد نهایی تغییرات می‌رسد که این موضوع ناشی از تراکم کم نمونه‌ها در این بخش است. مشخصات برازش خط مربوط به نقاط حاصله برای بخش‌های مختلف کانسار در جدول (۴) آورده شده است. آنچه که در عمل باید به کار بسته شود این است که از مقادیر بالاتر از ۴ برای پارامتر مذکور در شرایط کاملاً خاص که تراکم داده زیاد است یا ابعاد بیضوی جستجو نسبت به فاصله بین نمونه‌ها بزرگ است، استفاده شود. کاربرد این شرط برای تعیین قطعی ذخیره است.



شکل ۱۲: نمای هشت قسمتی بیضوی جستجو.



شکل ۱۳: تأثیر تغییر تعداد بخش‌های مشروط در جستجوی هشت قسمتی بر محتوی فلزی کانسار.

### حداقل نمونه مشروط در جستجوی هشت قسمتی

همان‌طور که در قسمت قبل توضیح داده شد، استفاده از شرایط جستجوی هشت قسمتی، بیضوی جستجو را به هشت جزء تقسیم می‌کند. حال برای تعیین تعداد حداقل نمونه قرار گرفته در هر جزء، از این پارامتر استفاده می‌شود. اگر شرایط جستجو مهیا باشد، تخمین انجام می‌گیرد. در غیر این صورت از تخمین صرف‌نظر شده و

جدول ۳: رگرسیون داده‌های حاصل از تغییر حداقل نمونه.

بخش	ضریب همبستگی	معادله رگرسیون
لیچ	$R^2 = 0.999$	$Y = 0.003 X^2 - 0.931 X + 1.227$
سوپرزن	$R^2 = 0.999$	$Y = -0.0004 X^2 - 0.367 X - 0.471$
هیپوزن	$R^2 = 0.999$	$Y = -0.0004 X^2 - 0.423 X - 0.644$

### تعداد حداکثر نمونه برای تخمین

این پارامتر تعداد ماکزیمم نمونه به کار رفته در تخمین را مشخص می‌کند. در صورت وجود تعداد نمونه بیشتر در محدوده جستجو فقط از نزدیک‌ترین آنها استفاده شده است و از تأثیر نمونه‌های اضافی صرف‌نظر می‌شود. در این بررسی حداکثر نمونه داخل بیضوی جستجو برای مدل مبنا در زون لیچ ۱۶ و در زون‌های سوپرزن و هیپوزن ۲۰ عدد در نظر گرفته شده است. طول گام تغییرات ۲ نمونه است که برای بخش لیچ معادل ۱۲/۵٪ و برای دو بخش دیگر معادل ۱۰٪ می‌باشد و ۵- تا ۵+ گام بررسی شده است. نتایج به دست آمده، عدم وجود رابطه منطقی بین داده‌ها را نشان می‌دهد. این پارامتر تأثیری روی تناژ ندارد، تأثیر جزئی بر عیار برخی بلوک‌ها می‌گذارد و تنها با افزایش غیر متعارف تعداد حداکثر نمونه‌ها، حجم و زمان محاسبات بیشتر می‌شود که این موضوع مطلوب کاربران نیست.

### تعداد بخش شرط شده در جستجوی هشت قسمتی

این پارامتر برای جستجوی مشروط و تخمین قطعی ذخیره استفاده می‌شود. با به کارگیری این شرط، بیضوی جستجو به هشت جزء تقسیم شده (شکل ۱۲) و بر اساس مقدار این پارامتر، تعداد بخش‌های شرط شده مشخص می‌شود. اگر مقدار این پارامتر برابر ۲ تعیین شود، تخمین در صورتی انجام می‌شود که حداقل دو جزء از بیضوی جستجو، دارای حداقل نمونه باشد. نتایج تأثیر استفاده از شرط جستجوی هشت قسمتی در شکل (۱۳) آورده شده است. برای مدل مبنا، وجود حداقل یک نمونه در یک بخش شرط شده است و برای موارد دیگر به ترتیب مقدار این پارامتر افزایش یافته است. حداقل نمونه در هر بخش ۱ عدد در نظر گرفته شده است. ارقام مجاز برای این شرط، از ۱ تا ۸ است که درصدی متناظر به آنها نسبت داده شده است.

نتایج نشان از تأثیر قابل توجه این پارامتر بر مدل دارد. با افزایش تعداد بخش‌های استفاده شده در شرایط



فلزی زون‌های لیچ، سوپرژن و هیپوژن در حالت انتساب محدوده جستجو به شکل مکعب مستطیل به ترتیب ۲۹/۵۴، ۱۲/۹۱ و ۲۸/۷۶ درصد نسبت به گزینه دیگر افزایش می‌یابد.

جدول ۵: رگرسیون داده‌های حاصل از تغییر حداقل نمونه در بخش‌های جستجو.

بخش (زون)	ضریب همبستگی	معادله رگرسیون
لیچ	$R^2 = 0.998$	$Y = -0.81 X + 1.27$
سوپرژن	$R^2 = 0.923$	$Y = -0.865 X + 9.74$
هیپوژن	$R^2 = 0.865$	$Y = -0.663 X + 9.69$

### پارامترهای تخمین

پارامترهای قابل بررسی در این بخش عبارتند از: تعداد نقاط تقسیم، اندازه فواصل تقسیم، کلید تخمین عیار بلوک‌ها (سه پارامتر مذکور مختص نرم‌افزار DATAMINE است و ممکن است در نرم‌افزارهای دیگر متفاوت باشند و یا وجود نداشته باشند) روش تخمین، ضریب طول نمونه و توان در روش عکس فاصله.

### تعداد نقاط تقسیم

برای بررسی تأثیر این پارامتر بر مدل، تعداد نقاط گسستگی در مدل‌های مختلف تغییر داده شده است. مدل مبنا ۳ نقطه تقسیم در جهت Z و ۵ نقطه تقسیم در جهت X و Y دارد. تأثیر این پارامتر بر مدل ناچیز بوده و حساسیت مدل نسبت به این پارامتر کم است. نکته‌ای که باید اشاره کرد این است که افزایش تعداد این نقاط بیش از ۴ عدد به طور تقریبی، تأثیری بر مدل ندارد و فقط زمان انجام محاسبات را بیشتر می‌کند.

### اندازه فواصل تقسیم

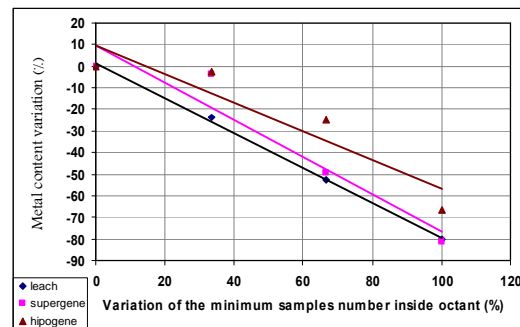
این روش نیز همانند نقاط تقسیم عمل کرده و تنها تفاوت آنها در چیدمان این نقاط است. روش نقاط تقسیم بر تعداد نقاط تأکید دارد و در تمام بلوک‌ها صرف‌نظر از ابعاد آنها تعداد نقاط ذکر شده را به کار می‌گیرد. روش فواصل تقسیم بر اندازه فاصله بین نقاط تأکید دارد و فاصله بین نقاط در تمام شرایط حفظ می‌شود. این پارامتر نیز تأثیر کمی بر مدل دارد و طول فاصله تقسیم نباید کوچک‌تر از حدی شود که زمان انجام محاسبات طولانی شود.

ارزش صفر تعلق می‌گیرد. این پارامتر مکمل پارامتر بررسی شده در قسمت قبل است که برای تعیین قطعی ذخیره استفاده می‌شوند.

جدول ۴: رگرسیون داده‌های حاصل از تغییر تعداد بخش‌های مشروط در جستجو.

بخش (زون)	ضریب همبستگی	معادله رگرسیون
لیچ	$R^2 = 0.853$	$Y = -1.064 X - 13.13$
سوپرژن	$R^2 = 0.955$	$Y = -1.093 X - 13.54$
هیپوژن	$R^2 = 0.972$	$Y = -1.077 X - 4.45$

تغییرات این پارامتر از ۱ تا ۴ در نظر گرفته شده و نتایج در شکل (۱۴) آورده شده است. بررسی به عمل آمده نشان می‌دهد که با افزایش این پارامتر، مقدار تناژ دچار کاهش چشم‌گیر شده و در بخش‌های سوپرژن و هیپوژن که بخش‌های اصلی این کانسار هستند، عیار متوسط افزایش یافته، اما در نهایت میزان محتوی فلزی با آهنگ افزایشی نسبت به این تغییرات کاهش یافته است. به عنوان مثال در بخش سوپرژن به ازای افزایش حداقل نمونه از ۲ عدد به ۳ عدد، مقدار محتوی فلزی به میزان ۴۵ درصد کاهش می‌یابد. مشخصات برآزش خط مربوط به نقاط حاصله برای بخش‌های مختلف کانسار در جدول (۵) آورده شده است.



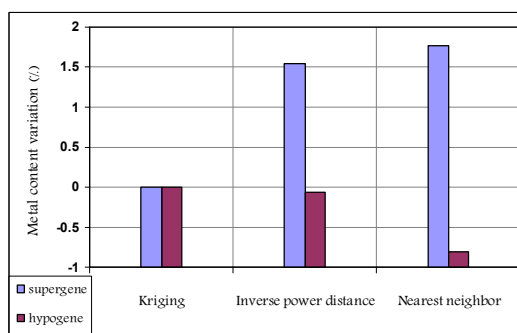
شکل ۱۴: تأثیر تغییر حداقل نمونه در جستجوی هشت قسمتی بر محتوی فلزی کانسار.

### شکل هندسی محدوده جستجو

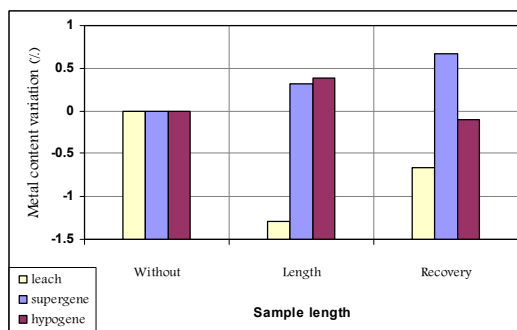
این پارامتر شکل هندسی محدوده جستجو را مشخص می‌کند. در این باره دو گزینه محدوده جستجو به شکل مکعب مستطیل و محدوده بیضوی وجود دارد. در هندسه جستجوی مکعبی، محدوده تخمین خورده نهایی بزرگ‌تر می‌شود. این موضوع باعث افزایش تناژ کلی ذخیره و کاهش عیار متوسط می‌شود. به عنوان مثال میزان محتوی

### کلید تخمین عیار بلوک‌ها

نمونه‌ها و بررسی مشخصه‌های آماری آنها است که در صورت وجود تعداد نمونه کافی در کانسار مورد مطالعه و رضایت بخشی از بررسی‌ها، روش‌های زمین‌آماری و تخمین کریجینگ و در موارد حساس‌تر، شبیه‌سازی زمین‌آماری استفاده می‌شود. در مواردی که ارتباط کافی بین نمونه‌ها وجود ندارد، مثلاً اکثر کانسارهای طلا، از روش عکس فاصله استفاده می‌شود.



شکل ۱۶: تأثیر روش تخمین بر محتوی فلزی کانسار.

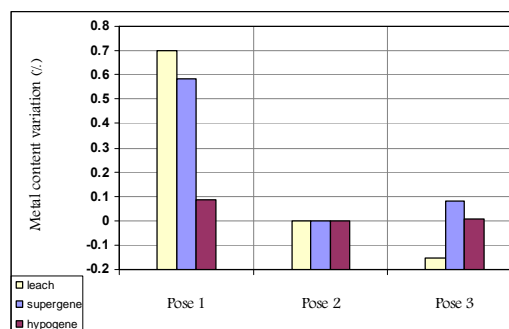


شکل ۱۷: تأثیر استفاده از طول نمونه بر محتوی فلزی کانسار.

### ضریب طول نمونه

این پارامتر برای این هدف در نظر گرفته شده است که در صورت نیاز، طول نمونه در تخمین تأثیرگذار باشد. در مدل مبنا این پارامتر بدون تأثیر است و در اینجا دو گزینه دیگر نیز بررسی شده است. در گزینه اول طول حفاری و در گزینه دوم طول بازیافتی حفاری (طول مغزه) برای این پارامتر در نظر گرفته شده است (شکل ۱۷). تغییر این پارامتر، تأثیر کمی بر مدل داشته که این موضوع بیشتر به دلیل درصد مغزه‌گیری بالا است. در مواردی که ماده معدنی نرم بوده و در حین حفاری شسته می‌شود نباید مقدار طول نمونه به این پارامتر نسبت داده شود چرا که این کار از همان ابتدا اشتباه است، بخصوص در مواردی که از نمونه‌های زون‌های دیگر نیز برای تخمین استفاده شود.

این پارامتر سه حالت را شامل می‌شود. در حالت اول هر بلوک به طور جداگانه تخمین زده می‌شود و به طور پیش‌فرض، ضریب کریجینگ برای تمام بلوک‌ها حساب می‌شود. در حالت دوم، کل مدل بلوکی به شکل یک ماتریس سه‌بعدی در نظر گرفته شده و نقاط تقسیم بلوک‌های مادر تخمین زده شده و از روی این نقاط عیار بلوک‌ها تعیین می‌شود. حالت سوم این پارامتر، مشابه حالت دوم بوده، اما برای محاسبه عیار بلوک فقط از نقاط واقع در زون مربوط به آن استفاده می‌شود. برای مدل مبنا از حالت دوم استفاده شده و نتایج این بررسی در شکل ۱۵ آورده شده است. تأثیر این پارامتر نیز بر مدل ناچیز است اما نکته مهم آن است که ترکیب همزمان این پارامترها معنا و تأثیر واقعی خود را نشان می‌دهند. در عمل باید ترکیبی از این پارامترها به کار برده شود که حین دستیابی به دقت مناسب، زمان انجام محاسبات نیز طولانی نباشد. می‌توان در مراحل اولیه مدل‌سازی، از تعداد نقاط گسستگی کمتر و حالت‌های دوم و سوم این کلید استفاده کرد تا مدل‌های ابتدایی با سرعت بیشتری ساخته شوند، اما در ساخت مدل نهایی از دقت بیشتری استفاده کرد.



شکل ۱۵: تأثیر تغییر کلید تخمین بر محتوی فلزی کانسار.

### روش تخمین

این پارامتر برای تعیین روش تخمین به کار می‌رود. از جمله روش نزدیک‌ترین نقاط، عکس توان فاصله و تخمین کریجینگ است. در مدل مبنا، تخمین به روش کریجینگ معمولی بوده است. نتایج (شکل ۱۶) نشان می‌دهد که در کانسار مورد مطالعه (با اطلاعات موجود) روش تخمین تأثیر زیادی بر میزان محتوی فلزی و عیار متوسط ندارد. این موضوع به دلیل پراکندگی یکنواخت عیار و پایین بودن عیار در کانسار مس سونگون است. اما آنچه که در عمل به کار بسته می‌شود، یافتن ارتباط فضایی بین

متوسط نمودار تجربی نقاط حاصل از نتایج است. به عبارت دیگر حساسیت بر حسب اندازه گرادین متوسط نمودارهای مربوط به پارامترها سنجیده شده است.

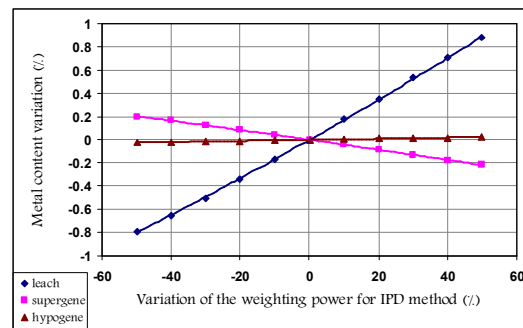
برخی از پارامترها روند مشخصی ندارند، مانند ابعاد بلوک یا ارتفاع بلوک و برخی دیگر را نمی توان به این روش دسته بندی کرد. به عنوان مثال پارامتر "روش تخمین" و یا "کلید تخمین بلوک" را نمی توان به شکل تغییرات نسبی بر حسب درصد بیان کرد، به همین دلیل حداکثر تأثیر آنها بر محتوی فلزی به عنوان ملاک در نظر گرفته شده است. در جدول (۷) پارامترهای بحرانی با توجه به اثر مستقیم یا معکوس آنها بر محتوی فلزی دسته بندی شده اند. در جدول (۸) نیز پارامترها بر حسب عام یا خاص (وابستگی به یک نرم افزار خاص) بودن تقسیم بندی شده اند. برخی از این پارامترها در ارتباط با پارامترهای دیگر معنای واقعی خود را پیدا می کنند. برای مثال تعداد نقاط گسستگی در کنار "کلید تخمین عیار" تأثیر واقعی خود را خواهد داشت و قضاوت در مورد آن به طور مجزا خالی از اشکال نیست. مثال دیگر دامنه واریوگرام است که ارتباط فضایی و فاصله تأثیر را مشخص می کند، در نتایج حاصل شده فقط مقدار دامنه واریوگرام متغیر بوده است؛ در حالی که اثر واقعی آن بر فاصله جستجو است. به هر حال این تحقیق می تواند دید بهتری را نسبت به مدل سازی و پارامترهای آن برای مهندسان و کاربران نرم افزارهای مدل سازی کانسار ایجاد کند.

### نتیجه گیری

- مدل سازی کانسار از مسائل پیچیده و بغرنج است و کلیه طراحی های فنی و ارزیابی های اقتصادی معادن به این مرحله وابسته هستند.
- چالش های متعددی درباره تئوری، روش و الگوریتم مدل سازی مورد استفاده در نرم افزارهای مدل سازی و همچنین قضاوت های مهندسی کاربر وجود دارد. این تحقیق امکان ارزیابی تأثیر پارامترهای مدل سازی قابل تنظیم توسط کاربر را فراهم می کند.
- در کانسارهای بدون مرزبندی مشخص مانند مس پورفیری که محدوده کانسار وابسته به پارامترهای جستجو است، تأثیر پارامترهای این گروه بر مدل کانسار بیش از دسته های دیگر است؛ به طوری که می توان پارامتر بحرانی را "ابعاد بیضوی جستجو"

### توان در روش عکس فاصله

در این بخش تأثیر توان استفاده شده در روش عکس فاصله بر مدل بررسی شده است. توان به کار رفته در مدل مینا ۲ است. طول گام تغییرات توان ۱۰٪ گرفته شده که معادل ۰/۲ می شود و -۵ تا +۵ گام بررسی شده است (شکل ۱۸). نتایج از تأثیر بیشتر این پارامتر روی زون های لیچ و سوپرژن خبر می دهد و دلیل آن می تواند تراکم کم تر داده ها در امتداد Z و همچنین پراکندگی بیشتر عیار (واریانس بزرگ تر) در این دو زون نسبت به زون هیپوژن باشد. آنچه که معلوم است، روند خطی تأثیر این پارامتر بر عیار متوسط و در نتیجه محتوی فلزی است. به دلیل تفاوت شرایط در بخش های مختلف این کانسار، نتایج تأثیر تغییر مقدار توان در زون های مختلف نیز متفاوت است.



شکل ۱۸: تأثیر توان در روش عکس فاصله بر محتوی فلزی.

### جمع بندی

از میان دسته های بررسی شده، دو دسته پارامترهای مربوط به جستجوی نمونه و پارامترهای مرتبط با نمونه ها و داده های پایه در مدل سازی کانسار مس سونگون اهمیت ویژه ای دارند. و دسته های دیگر در رتبه های پایین تر قرار می گیرند. خارج از این دسته بندی می توان پارامترها را بر اساس میزان تأثیرشان بر محتوی فلزی به صورت زیر (جدول ۶) مرتب کرد.

شکل (۱۹)، تأثیر تغییرات ۳۰ و ۵۰ درصدی مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار بر محتوی فلزی بخش سوپرژن را در یک نمودار سه بعدی نشان می دهد و در شکل ۲۰ تأثیر این پارامترها بر محتوی فلزی بخش سوپرژن در یک نمودار آورده شده است. تمامی پارامترهای آورده شده در نمودار شکل (۲۰) به غیر از پارامتر "نحوه توزیع داده ها" علاوه بر تأثیر روی عیار تخمینی بلوک ها بر هندسه کانسار نیز اثر می گذارند. مبنای مرتب سازی پارامترها، شیب

جدول ۶: لیست مرتب شده پارامترها بر اساس نقش بحرانی آنها بر مدل کانسار مس سوگون.

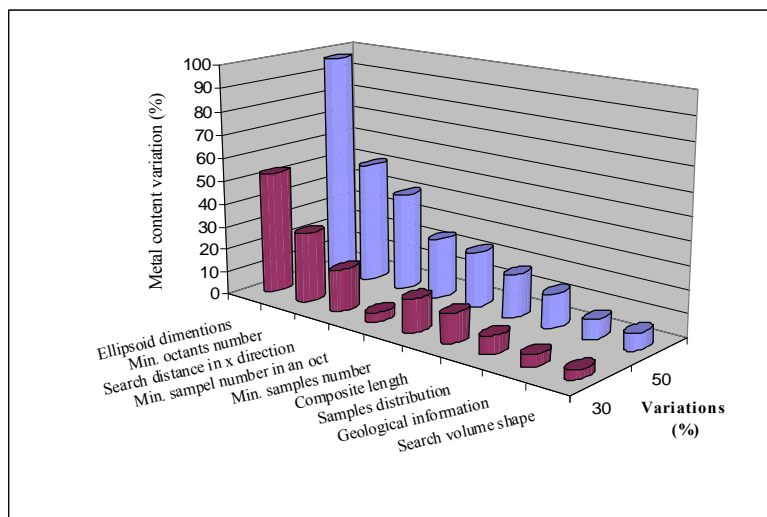
پارامترهای کم اهمیتیت	پارامترهای پر اهمیتیت
۱۹- واریانس فضایی واریوگرام	۱- ابعاد بیضوی جستجو
۲۰- واریانس تصادفی واریوگرام	۲- حداقل بخش‌های استفاده شده در جستجوی هشت قسمتی
۲۱- نوع واریوگرام	۳- فاصله جستجو در هر یک از جهات X, Y و Z
۲۲- تعداد نقاط گسستگی یا اندازه فواصل آنها	۴- حداقل نمونه استفاده شده در هر جزء بیضوی جستجو
	۵- تعداد حداقل نمونه برای تخمین
	۶- طول کامپوزیت
	۷- نحوه توزیع داده‌ها
	۸- اطلاعات سنگ‌شناسی (در دو زون لیج و سوپرژن)
	۹- شکل هندسی محدوده جستجو
	۱۰- روش تخمین
	۱۱- ارتفاع بلوک و ابعاد بلوک
	۱۲- ضریب طول نمونه
	۱۳- کلید تخمین عیار بلوک‌ها
	۱۴- دامنه واریوگرام، به خصوص امتداد Z
	۱۵- تعداد ساختار واریوگرام
	۱۶- تعداد حداکثر نمونه در
	۱۷- توان در روش عکس فاصله
	۱۸- دامنه واریوگرام در امتداد X و Y

جدول ۷: نحوه یا جهت تأثیر پارامترهای بحرانی بر محتوی فلزی.

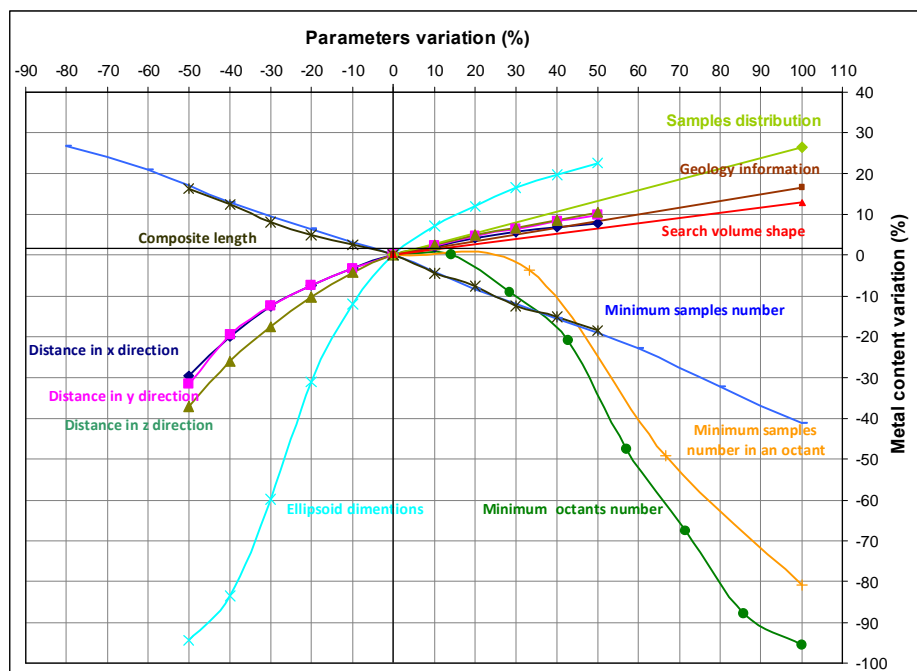
تأثیر مستقیم بر محتوی فلزی	تأثیر معکوس بر محتوی فلزی
ابعاد بیضوی جستجو	حداقل بخش‌های استفاده شده در جستجوی هشت قسمتی
فاصله جستجو در هر یک از جهات X, Y و Z	حداقل نمونه استفاده شده در هر جزء بیضوی جستجو
نحوه توزیع داده‌ها	تعداد حداقل نمونه برای تخمین
اطلاعات سنگ‌شناسی	طول کامپوزیت
شکل هندسی محدوده جستجو	

جدول ۸: دسته‌بندی پارامترها در قالب پارامترهای عام و خاص.

پارامترهای عمومی در نرم‌افزارها	پارامترهای خاص در نرم‌افزار
- ابعاد بیضوی جستجو	- حداقل بخش استفاده شده در جستجوی هشت قسمتی
- تعداد حداقل نمونه برای تخمین	- حداقل نمونه استفاده شده در هر جزء بیضوی جستجو
- طول کامپوزیت	- کلید تخمین (PARENT)
- اطلاعات سنگ‌شناسی	- تعداد نقاط گسستگی یا اندازه فواصل آنها
- روش تخمین	- شکل هندسی محدوده جستجو
- ارتفاع بلوک و ابعاد بلوک	- ضریب طول نمونه
- نحوه توزیع داده‌ها	
	- دامنه واریوگرام
	- تعداد ساختار واریوگرام
	- تعداد حداکثر نمونه در تخمین
	- توان در روش عکس فاصله
	- واریانس فضایی و تصادفی واریوگرام
	- نوع واریوگرام



شکل ۱۹: نمایش شماتیک مؤثرترین پارامترها بر محتوی فلزی.



شکل ۲۰: مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار بر محتوی فلزی (بخش سوپرژن).

همچون "تعداد حداقل نمونه برای تخمین" رابطه معکوس با میزان محتوی فلزی دارند.

### تقدیر و تشکر

انجام این تحقیق با یاری مدیریت و کارشناسان طرح مس سونگون و همچنین شرکت مهندسی معدن پردازش به ویژه جناب آقای مهندس کیوانیان انجام گرفته است. بدین وسیله از آنها تشکر و قدردانی به عمل می‌آورد.

معرفی کرد. با توسعه روش‌ها و الگوریتم‌های نوین انتظار می‌رود قابلیت بر طرف کردن این چالش فراهم شود.

- در کانسارهای با مرزبندی مشخص نظیر ذخایر لایه‌ای و یا رگه‌ای، نتایج ارائه شده ممکن است صادق نبوده و نیاز به بررسی بیشتری داشته باشد.

- نحوه تأثیر این پارامترها بر محتوی فلزی مشابه نبوده، برخی از آنها نظیر "ابعاد بیضوی جستجو" رابطه مستقیمی با میزان محتوی فلزی داشته و برخی دیگر

### مراجع

- 1 - Kelk, B. and Challen, K. (1992). "Experiments with a CAD system for spatial modelling of geoscientific data." *Proceedings of the 2nd International Colloquium*, Wurzburg, Germany, Vol. 122, PP. 145-153.
- 2 - Xu, C. and Dowd, P. A. (2003). "Optimal construction and visualisation of geological structures." *Computers & Geosciences*, Vol. 29, PP. 761-773, Pergamon/Elsevier, New York.
- 3 - Sides, E. J. (1997). "Geological modelling of mineral deposits for prediction in mining." *Geol Rundsch*, Vol. 86, PP. 342-353, Springer-Verlag .
- 4 - Keith Turner, A. (2005). "Challenges and trends for geological modelling and visualization." *Bull Eng Geol Env*, Vol. 65, PP. 109-127, Springer-Verlag.
- 5 - Ajdari Shabestari, E. (2007). *Sensitivity analysis of effective parameters on Sungun cooper deposit modeling*, Ming Eng. MSc Thesis, Tarbiat Modarres University, PP. 37-77.
- 6 - Olang consulting engineering company, (2006), Feasibility and modeling of Sungun cooper deposit report.
- 7 - Hassani Pak, A. A. (1998). *Geostatistics*, Tehran University Publication No. 2389, PP. 95-107.