نشریه علمی مهندسی معدن
Journal of Mining Engineering (JME)
دوره ۱۶، شماره ۵۳، زمستان ۱۴۰۰، صفحه ۵۱ تا ۶۳
Vol 16, No 53, 2022, pp 51-63

مقاله پژوهشی

کنترل رقیق شدگی خارجی در معدن روباز مس سونگون

ناصر بدخشان[۱]، کورش شهریار[۲*]

۱. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، naserbadakhshan@aut.ac.ir
۲. استاد گروه استخراج و مکانیک سنگ دانشگاه صنعتی امیرکبیر، k.shahriar@aut.ac.ir

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۱۸ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۰۸)

چکیده

پدیده رقیق‌شدگی یکی از پیامدهای نامطلوب معدنکاری است که در اثر مخلوط شدن ناخواسته باطله و ماده‌معدنی ایجاد می‌شود. از آثار نامطلوب رقیق‌شدگی می‌توان به افزایش هزینه‌های استخراج، حمل‌ونقل، فرآوری، افزایش عیارحد معدن و تخریب محیط‌زیست اشاره کرد. کنترل رقیق‌شدگی و اثرات نامطلوب آن نیاز به شناسایی عوامل ایجادکننده رقیق‌شدگی دارد. بررسی‌های میدانی انجام شده از معدن مس سونگون که به روش روباز استخراج می‌شود، نشان می‌دهد که عواملی مانند نفوذ دایک‌های عقیم، تماس بلوک‌های باطله و ماده معدنی در مرزها، خطاهای نمونه‌برداری و خطاهای مورفی (خطای انسانی)، فاکتورهای موثر بر ایجاد رقیق‌شدگی‌اند. در این تحقیق برای تخمین میزان رقیق‌شدگی خارجی (رقیق‌شدگی ناشی از دایک‌ها) معدن مس سونگون، از مدل‌سازی زمین‌آماری (کریجینگ شاخص) استفاده شده است. میزان رقیق‌شدگی خارجی معدن (۱۱/۳ درصد) محاسبه شد. مقدار رقیق‌شدگی خارجی نسبت به حداکثر تخمین اولیه رقیق‌شدگی در معادن روباز با ذخایر توده‌ای، بیشتر به نظر می‌رسید اما با توجه به وجود دایک‌ها این عدد معقول است. برای کاهش رقیق‌شدگی خارجی ناشی از نفوذ دایک‌ها پیشنهاد استفاده از دستگاه ایکس آر اف مدل ۷۰۰۰ داده شد. داده‌های آماری موجود قبل و حین استفاده از دستگاه ایکس آر اف نشان داد که هنگام استفاده از دستگاه، عیار میانگین روزانه به دست آمده (واقعی) نزدیکی بیشتری با عیار پیش‌بینی شده دارد و از میزان رقیق‌شدگی خارجی ناشی از دایک‌ها در حین عملیات کاسته شده است.

کلمات کلیدی

رقیق‌شدگی خارجی، معدنکاری روباز، اندازه‌گیری رقیق‌شدگی، کنترل رقیق‌شدگی، معدن مس سونگون، دستگاه ایکس آر اف مدل ۷۰۰۰.

* نویسنده مسئول مکاتبات.

۱- مقدمه

رقیق‌شدگی[1] اشاره به مواد کم‌عیار (که عیار آن کمتر از عیارحد است) یا مقدار زاید (عیار صفر) دارد که در طول عملیات معدنکاری از کانه جداسازی نشده و به همراه کانه استخراج‌شده و کیفیت مواد استخراج‌شده را کاهش می‌دهد. این مواد باطله با کانه مخلوط شده و به کارخانه فرآوری فرستاده می‌شود [۱]. رقیق‌شدگی در معادن روباز بر اساس ویژگی‌های ذخایر، جنبه‌های عملیاتی و عیارحد اقتصادی مختلف، متفاوت است. به عنوان مثال شکل ذخایر، ارتفاع پله، اندازه تجهیزات و شرایط و نحوه انفجار بر میزان رقیق‌شدگی در معادن روباز تاثیر خواهد داشت. رقیق‌شدگی در معدنکاری یکی از مهم‌ترین عوامل موثر بر اقتصاد پروژه‌های معدنکاری است. رقیق‌شدگی یکی از چالش‌های پیش روی معدنکاران و شاید از قدیمی‌ترین آن‌هاست. به‌طور کلی به جای تعیین مقدار رقیق‌شدگی (صرف نظر از اینکه مقدار رقیق‌شدگی چقدر است)، مفروضات عمومی در مورد رقیق‌شدگی وجود دارد که معمولا به دلیل بودجه ناکافی، زمان ناکافی برای مطالعات و همچنین عدم توجه کافی از سوی مدیران به تاثیر رقیق‌شدگی بر روی اقتصاد پروژه معدنکاری است. به جای محاسبه رقیق‌شدگی در مطالعات معدنکاری روباز، معمول است که یک رقیق‌شدگی عمومی مانند ۵ درصد برای ذخایر توده‌ای (بزرگ) و ۱۰ درصد برای ذخایر صفحه‌ای (لایه‌ای) شکل استفاده شود [۲]. در حالی که این ارقام احتمالا نقطه شروع خوبی در مراحل اولیه مطالعات معدنی باشد اما اندازه واقعی رقیق‌شدگی را برای ارزیابی اقتصادی پروژه، مشخص نمی‌کند. در این مقاله برای اندازه‌گیری و تخمین میزان رقیق‌شدگی معدن سونگون، از مدل‌سازی زمین‌آماری (کریجینگ شاخص[2]) استفاده شده است. میزان رقیق‌شدگی خارجی ناشی از نفوذ دایک‌های عقیم معدن محاسبه شد. مقدار رقیق‌شدگی خارجی نسبت به حداکثر تخمین اولیه رقیق‌شدگی در معادن روباز که به‌صورت توده‌ای است، بیشتر است اما با توجه به وجود دایک‌ها این عدد معقول به نظر می‌رسد. همچنین برای کنترل و کاهش رقیق‌شدگی خارجی ناشی از نفوذ دایک‌ها، پیشنهاد استفاده از دستگاه فلورسانس اشعه ایکس داده شد که مهم‌ترین مزیت استفاده از این دستگاه علاوه بر قابل اجرا و عملی بودن، نحوه انجام آنالیز و مشخص کردن عیار مناطق مختلف در جبهه‌کار است که بررسی عیار به صورت سریع (در دو ثانیه) و دقیق صورت می‌گیرد.

۲- انواع رقیق‌شدگی بر اساس تجربه‌کاری در معدن مس سونگون

تخمین رقیق‌شدگی قبل از معدنکاری اصلی، کاری بسیار سخت است و نیاز به طراحی و قضاوت مهندسی خوب دارد. اطلاعات معدن مجاور یا معادن با شرایط مشابه اغلب ارزش چندانی ندارد. بنابرین قبل از تخمین رقیق‌شدگی باید مولفه‌های اصلی آن مورد توجه قرار گیرد. برای استخراج و فرآوری مواد باطله که به صورت ناخواسته مخلوط می‌شود، هزینه صرف می‌شود در حالی که هیچ ارزشی ندارد و می‌تواند سنگ با ارزش را به کم ارزش یا باطله تبدیل کند. رقیق‌شدگی به طور خیلی ساده کاهش عیار معدن در حین استخراج تعریف می‌شود. البته چندین فرض در این تعریف دخیل‌اند، فرض می‌شود که ناظران معدن از موقعیت، شکل و عیار سایت‌های انفجار مفروض اطلاعات کافی دارند، همچنین اپراتورهای ماشین‌آلات نیز ماهرند و ماده معدنی و باطله را به خوبی می‌شناسند. تقسیم‌بندی‌های متعددی برای رقیق‌شدگی شامل رقیق‌شدگی اولیه و ثانویه، رقیق‌شدگی عمدی و غیرعمدی، داخلی و خارجی و رقیق‌شدگی برنامه‌ریزی شده و خارج از برنامه‌ریزی [۳] وجود دارد. با توجه به تجربه‌کاری در معدن سونگون پنج گروه رقیق‌شدگی ارایه شده است که معدنکاران با آن مواجه‌اند که به معرفی کامل انواع رقیق‌شدگی پرداخته شده است.

۲-۱- رقیق‌شدگی خارجی یا مماسی

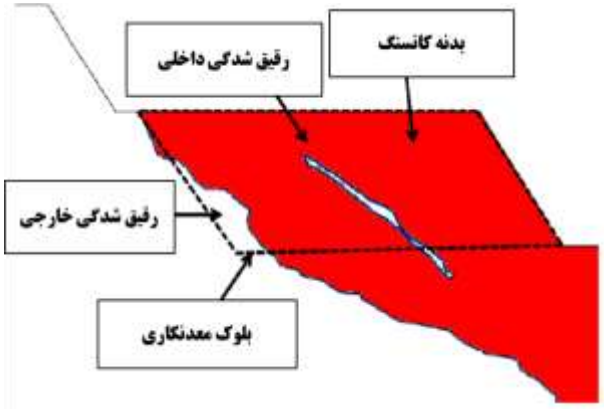
رقیق‌شدگی خارجی یا رقیق‌شدگی مماسی[3]، به باطله اطراف کانسنگ مربوط می‌شود که همراه با بلوک معدنی استخراج می‌شود. رقیق‌شدگی خارجی بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، شکل کانسار، روش‌های حفاری و انفجار، مقیاس عملیات و اندازه تجهیزات متفاوت است. این نوع رقیق‌شدگی را می‌توان با استفاده از تجهیزات و روش‌های معدنکاری مناسب کنترل کرد [۲]. در این تحقیق رقیق‌شدگی ناشی از نفوذ دایک‌های عقیم نیز جزو رقیق‌شدگی خارجی محسوب می‌شود که مهم‌ترین عامل رقیق‌شدگی در معدن محسوب می‌شود.

۲-۲- رقیق‌شدگی داخلی

رقیق‌شدگی داخلی[4]، اشاره به مواد باطله‌ای دارد که باید با ماده معدنی استخراج شود و جداسازی آن در حین معدنکاری بسیار سخت است. به عبارت دیگر رقیق‌شدگی داخلی به علت انکلوزیون‌های باطله و یا لنزهای کوچک کم عیار کانسنگ درون

1-Dilution
2-Indicator Kriging
3-External dilution
4-Internal dilution

توده معدنی رخ می‌دهد. شکل ۱ یک بلوک معدنی را در پله معدن روباز همراه با دو نوع رقیق‌شدگی داخلی و خارجی نشان می‌دهد [۲].



شکل ۱- دو نوع رقیق‌شدگی خارجی و داخلی در معادن روباز [۴].

رقیق‌شدگی خارجی و داخلی با اشاره به یک بلوک معدنکاری اتفاق می‌افتد [۲].

۲-۳- رقیق‌شدگی مورفی

رقیق‌شدگی مورفی[1] با خطاهای انسانی ایجاد می‌شود. رقیق‌شدگی مورفی اغلب علت اصلی مشکلات رقیق‌شدگی است. به عنوان مثال، در یک معدن فلزات قیمتی مقایسه عیار معدن و کارخانه نشان داد که عیار کارخانه خیلی کمتر از عیار مورد انتظار است. یک زمین‌شناس مشاهده کرد که چندین تراک ماده معدنی مسیر کوتاه انباشتگاه باطله را در پیش گرفتند در حالی که بارهای باطله تراز پایینی به کارخانه فرآوری حمل شدند. در موردی دیگر، یک سرکارگر خیلی علاقه‌مند انفجار، قصد بهبود خردایش سنگ را داشت که نتیجه‌اش اختلاط شدید باطله با ماده معدنی بود. به طور واضح، راه‌های مختلفی برای معرفی رقیق‌شدگی مورفی وجود دارد. ریشه رقیق‌شدگی مورفی عمدتا انسان است. در بیشتر موارد، رقیق‌شدگی در اثر فقدان توجه از جانب مدیر یا ناظران یا فقدان تاکید روی اهمیت عیار اتفاق می‌افتد. در نتیجه، رقیق‌شدگی مورفی آسان‌ترین شکل رقیق‌شدگی برای تشخیص است ولی چون با انسان سروکار دارد، می‌تواند یکی از سخت‌ترین نوع برای اصلاح باشد [۳].

۲-۴- رقیق‌شدگی ناشی از خطاهای نمونه‌برداری

برخی چهارمین شکل رقیق‌شدگی را به خطاهای نمونه‌برداری حین معدنکاری نسبت می‌دهند. برای جلوگیری از احتمال رقیق‌شدگی ماده معدنی با خطاهای نمونه‌برداری، لازم است دقت و صحت نمونه‌برداری از سایت‌های انفجاری با گرفتن نمونه‌های تکراری بررسی شوند [۳].

۲-۵- رقیق‌شدگی ناشی از ریسه‌گذاری

ریسه‌ها در لبه پله‌ها به دلیل ایمنی افراد و ماشین‌آلات در هنگام شب و هوای مه آلود جا گذاشته می‌شود (شکل ۲). با توجه به حجم قابل توجه ریسه‌ها، در صورتی که جنس ریسه‌ها از قبل و طبق برنامه مشخص نباشد، پتانسیل رقیق‌شدگی و هدر رفت ماده معدنی بالا خواهد بود. در شکل ۲ انواع رقیق‌شدگی به صورت خلاصه همراه با روش‌های کنترل عمومی نشان داده شده است.

شکل ۲- نمایش ریسه ایمنی ایجاد شده با ماده معدنی در لبه پله.

۳- مطالعات انجام شده در زمینه رقیق‌شدگی

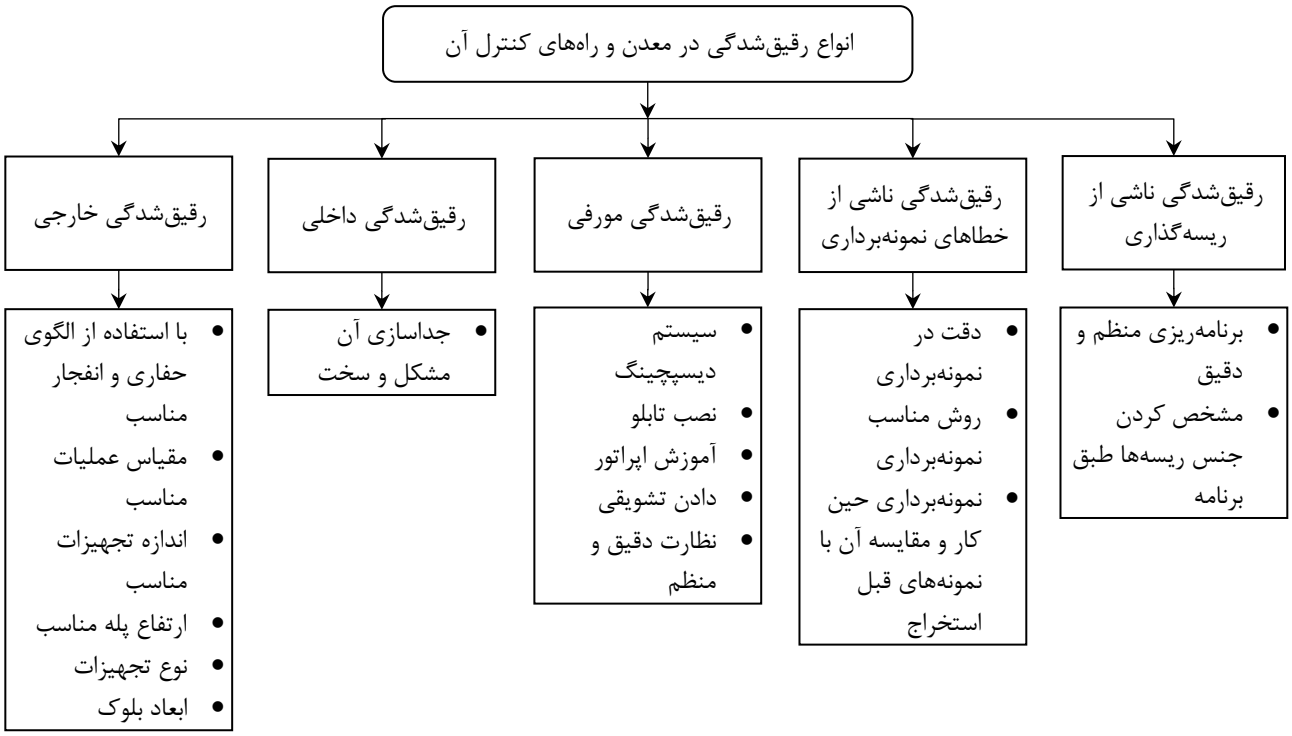
در جدول ۱ برخی از مهم‌ترین تحقیقاتی که در زمینه پیش‌بینی، اندازه‌گیری و کنترل و کاهش رقیق‌شدگی انجام شده است همراه با ویژگی و نوع مدل بیان شده است.

۴- شرح روش پیشنهادی برای اندازه‌گیری رقیق‌شدگی

پس از تعیین محدوده توده معدنی و ساخت مدل سه‌بعدی آن، توده به بلوک‌های کوچک تفکیک شد و عیار این بلوک‌ها با استفاده از عیار نمونه‌های مغزه‌ای آنالیز شده و با به کارگیری روش‌های تخمین عیار (مانند کریجینگ)، تخمین زده شد. عیار بدست آمده در این حالت بدون در نظر گرفتن رقیق‌شدگی و اختلاط با رگه‌های درون توده بود. بنابرین با تخمین میزان رقیق‌شدگی در هر بلوک با روشی که در ادامه تشریح خواهد شد، تخمین دقیق‌تری از عیار بلوک‌ها به دست خواهد آمد. روش پیشنهادی برای تخمین میزان رقیق‌شدگی بر مبنای استفاده از داده‌های سنگ‌شناسی گمانه‌ها به عنوان داده‌های ورودی است. بدین صورت که ابتدا همه گمانه‌ها به بازه‌های یک متری

1-Murphy

تفکیک شدند. سپس به بازه‌های حاوی کانسنگ (مس) کد یک و برای باطله کد صفر اختصاص داده شد [۹].



شکل ۳- انواع رقیق‌شدگی.

جدول ۱- خلاصه سوابق مربوط به رقیق‌شدگی.

ارایه‌دهنده و سال ارایه	ویژگی‌های مدل	نوع مدل
یانگ و همکاران (۱۹۹۰) [۵]	در این تحقیق، یک مدل سه‌بعدی برای پیش‌بینی دپوی حاصل از انفجار و حرکت مرزهای عیاری در معادن روباز ارایه شده است. سایت‌های حفاری به بلوک‌های کوچک سنگی تقسیم می‌شود و حرکت و مکان این بلوک‌ها پیش‌بینی می‌شود که در نهایت شکل دپوی حاصل از انفجار پیش‌بینی می‌شود. توزیع عیاری این بلوک‌های سنگی توزیع عیاری دپوی حاصل از انفجار و حرکت مرزهای کانسنگ را به دست می‌دهد.	تحلیلی
تیلور و فیرت (۲۰۰۳) [۶]	با استفاده از اشیای مغناطیسی کار گذاشته شده در چال‌های خالی قبل از انفجار در گوشه‌های مرزهای کانسنگ، میزان حرکت مرزهای کانسنگ در محیط دوبعدی محاسبه می‌شود و میزان رقیق‌شدگی و افت محاسبه می‌شود.	تحلیلی- تجربی
ابراهیمی (۲۰۱۳) [۲]	اهمیت فاکتور رقیق‌شدگی در معادن روباز را مورد بررسی قرار داده و به تاثیرات اقتصادی و تاثیر آن بر عیار حد کارخانه اشاره شده است و کمی کردن رقیق‌شدگی در طول مرحله مطالعاتی که نیاز به یک ارزیابی اقتصادی خوب از پروژه است، انجام شده است.	---
کامارا و پرونی (۲۰۱۴) [۶]	رقیق‌شدگی با توجه به بازدهی ضعیف عملیات و عدم توانایی تجهیزات برای استخراج هر بلوک به طور کامل با توجه به محدودیت‌های آن وجود دارد. مناطق مشخص شده مواد معدنی که با توجه به ملزومات فرآوری برای استخراج تعیین می‌شوند با توجه به میزان نفوذ دستگاه بارگیری‌کننده در بلوک‌های تماسی، گسترش داده می‌شوند و حجم و عیار بلوک‌های تماسی تغییر داده می‌شود و میزان رقیق‌شدگی در این بلوک‌ها مشخص می‌شود.	تحلیلی

ارایه‌دهنده و سال ارایه	ویژگی‌های مدل	نوع مدل
ایساکس و همکاران (۲۰۱۴) [۷]	یک روش برای مدل‌سازی دپوی پس از انفجار که جابه‌جایی و رقیق‌شدگی داخلی را با استفاده از شبیه‌سازی ذوب تدریجی محاسبه می‌کند، ارایه داده شده است. از نشانگر BMM برای اندازه‌گیری جابه‌جایی استفاده شده است. مدل بلوکی کنترل عیار به ریز بلوک‌هایی تقسیم می‌شود و بعد از انفجار این ریز بلوک‌ها، بلوک‌های کنترل عیار جدید با اندازه مشخص و عیار جدید را می‌سازند که طرح جدید چندضلعی‌های کانسنگ (خطوط حفاری) با تخمین‌های دقیق‌تر از تناژ و عیار هر نوع کانسنگ در دسترس برای معدنکاری را فراهم می‌کند.	تحلیلی- تجربی
زرشناس و سعیدی (۲۰۱۶) [۴]	به بررسی اثرات رقیق‌شدگی بر روی معادن روباز و بررسی ریسک‌های عمده مرتبط با رقیق‌شدگی پرداخته شده است و یک سیستم طبقه‌بندی برای اندازه‌گیری ریسک‌های رقیق‌شدگی برای استفاده اپراتورهای معدن که اثرات رقیق‌شدگی را حداقل کند، ارایه شده است.	---
وخمین و همکاران (۲۰۱۷) [۸]	میزان افت کانسنگ و رقیق‌شدگی در مناطق تماس کانسنگ و سنگ میزبان (باطله) با توجه به پیچیدگی نحوه تماس کانسنگ و باطله تخمین زده شده است. یک الگوریتم برای تعیین مقطع (نیمرخ) تماس ارایه داده شده که ناحیه تماس می‌تواند دارای مقطع مستطیلی، سینوسی، اره‌ای و یا مستقیم باشد. با در نظر گرفتن عدم قطعیت در نوع مقطع تماس، برای انواع مقاطع از طریق محاسبات هندسی میزان افت و رقیق‌شدگی تخمین زده شده است.	تحلیلی

هدف از ساخت داده‌های صفر و یک استفاده از آن‌ها برای تخمین نسبت حجمی باطله‌های درون بلوک‌های توده معدنی است. تخمین میزان نسبت حجمی باطله در بلوک با استفاده از روش کریجینگ انجام می‌شود. برای این کار ابتدا نیاز به تعیین پارامترهای بیضوی جستجو با استفاده از واریوگرام سه‌بعدی است. با توجه به اینکه داده‌های ورودی ترکیبی از اعداد صفر و یک‌اند، بنابرین می‌توان گفت این داده‌ها دارای توزیع دو جمله‌ای؛ دو رخداد صفر (p) و یک (q) هستند. به گونه‌ای که روابط ۱ و ۲ برای آن‌ها برقرار است:

$$p + q = 1 \quad (۱)$$

$$VAR = p(1-q) \quad (۲)$$

که در این رابطه VAR همان واریانس این توزیع است. بنابرین باید انتظار داشت سقف واریوگرام بدست آمده با واریانس توزیع برابر باشد. سپس با استفاده از روش کریجینگ و به کارگیری داده‌های ساخته شده، میزان نسبت حجمی هر بلوک تخمین زده می‌شود. مرحله بعد محاسبه میزان رقیق‌شدگی است، با استفاده از تعریف رقیق‌شدگی می‌توان به رابطه ۳ رسید:

$$D_w = (\rho_w v_w)/(\rho_w v_w + \rho_o v_o) \quad (۳)$$

که در آن:

D_w: عددی بین صفر (در صورتی که رقیق‌شدگی به درصد بیان شود، رابطه در صد ضرب می‌شود).

ρ_o: نسبت جرمی کانسنگ (تن بر متر مکعب).

ρ_w: نسبت جرمی باطله (تن بر متر مکعب).

v_o و v_w: به ترتیب بیانگر نسبت‌های حجمی کانسنگ و باطله در بلوک معدنی هستند که برای آن‌ها رابطه ۴ برقرار است.

$$v_w + v_o = 1 \quad (۴)$$

در نهایت، عیار کل بلوک با در نظر گرفتن نسبت‌های حجمی، دانسیته و عیار مس در مواد کانسنگ و باطله از رابطه ۵ بدست می‌آید:

$$G_T = \left[\frac{m_w G_w + m_o G_o}{m_w + m_o}\right] \quad (۵)$$

$$\rightarrow G_T = G_w D_w + G_o(1 - D_w)$$

که در آن:

G_t: عیار نهایی مس در بلوک پس از اعمال رقیق‌شدگی (درصد).

G_w: عیار مس در بخش باطله بلوک (درصد).

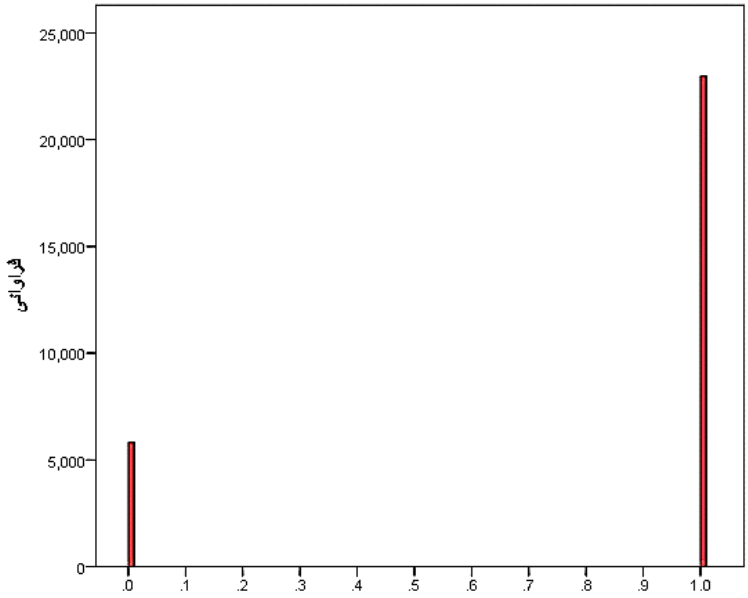
G_o: عیار تخمین بلوک با استفاده از روش کریجینگ (درصد).

۱-۴- منطقه مورد مطالعه

معدن مس سونگون در شمال‌غربی ایران، در استان آذربایجان‌شرقی، شهرستان ورزقان قرار گرفته است. مختصات جغرافیایی آن، ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی است. راه دسترسی به معدن از سمت شهرستان ورزقان است [۱۰].

۴-۲- اطلاعات آماری داده‌ها

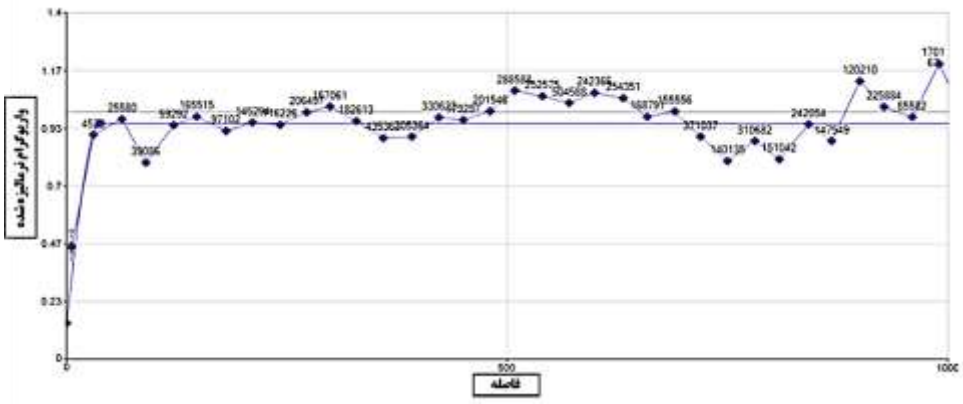
اطلاعات آماری داده‌های ورودی پس از آماده‌سازی آن‌ها در شکل ۴ آورده شده است. هیستوگرام این داده‌ها، نشان‌دهنده وجود تنها دو عدد صفر و یک به ترتیب برای باطله و کانسنگ است.



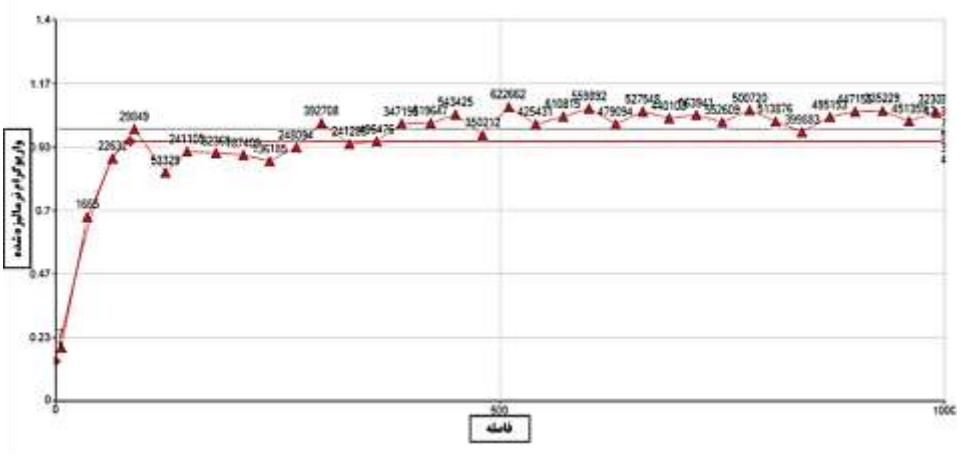
شکل ۴- هیستوگرام فراوانی داده‌های ورودی (صفر و یک).

۴-۳- واریوگرافی

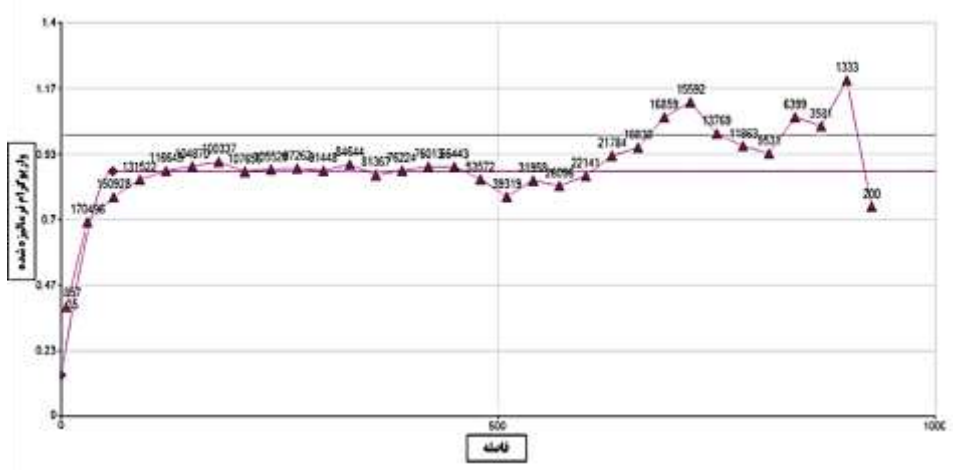
برای تعیین بیضوی ناهمسانگردی واریوگرافی سه‌بعدی روی داده‌ها انجام گرفت (شکل ۵، بخش‌های الف، ب و پ) و طول گام ۳۰ و تلورانس ۱۵ در نظر گرفته شد. مشخصات واریوگرام‌ها در جدول ۲ آورده شده است.



الف



ب



پ

شکل ۵- نمودار واریوگرام‌های ترسیمی داده‌های ورودی؛ الف- واریوگرام در جهت ۵۰ درجه با شیب صفر درجه، ب- واریوگرام در جهت ۱۴۰ درجه با شیب ۱۰ درجه و پ- واریوگرام در جهت ۳۲۰ درجه و شیب ۸۰ درجه.

جدول ۲- پارامترهای زمین‌آماری بدست آمده از واریوگرام‌های ترسیمی.

ردیف	مدل واریوگرام	امتداد	شیب	شعاع تاثیر	اثر قطعه‌ای	سقف
۱	کروی	۵۰	۰	۳۷	۰/۱۴۶	۰/۷۸
۲	کروی	۱۴۰	۱۰	۸۴	۰/۱۴۶	۰/۷۸
۳	کروی	۳۲۰	۸۰	۵۹	۰/۱۴۶	۰/۷۸

۴-۴- محاسبه رقیق‌شدگی

پس از تعیین بیضوی جستجو، میزان نسبت جرمی ماده معدنی برای تمامی بلوک‌ها با استفاده از روش کریجینگ تخمین زده شد. در این تخمین ۱۰۴۸۵۷۶ بلوک تخمین زده شده است. این کمیت باید عددی بین صفر و ۱ باشد. همان‌طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، میزان نسبت حجمی کانسنگ با اطلاعات عیار مس گمانه‌ها مطابقت دارد. به عبارت دیگر در جاهایی که عیار ماده معدنی کمتر از عیار حد است، ضریب نسبت حجمی کاهش یافته و به صفر نزدیک است.

پس از تعیین میزان نسبت حجمی کانسنگ و باطله برای هر بلوک میزان رقیق‌شدگی برای هر بلوک محاسبه شد. دانسیته مواد دارای عیار بالاتر از عیار حد (۰/۱۵ درصد)، ۲/۵۵ و برای مواد دارای عیارکمتر از عیار حد، ۲/۵۷ در نظر گرفته شده است. در جدول ۳، میزان رقیق‌شدگی (D) برای تعدادی از بلوک‌ها

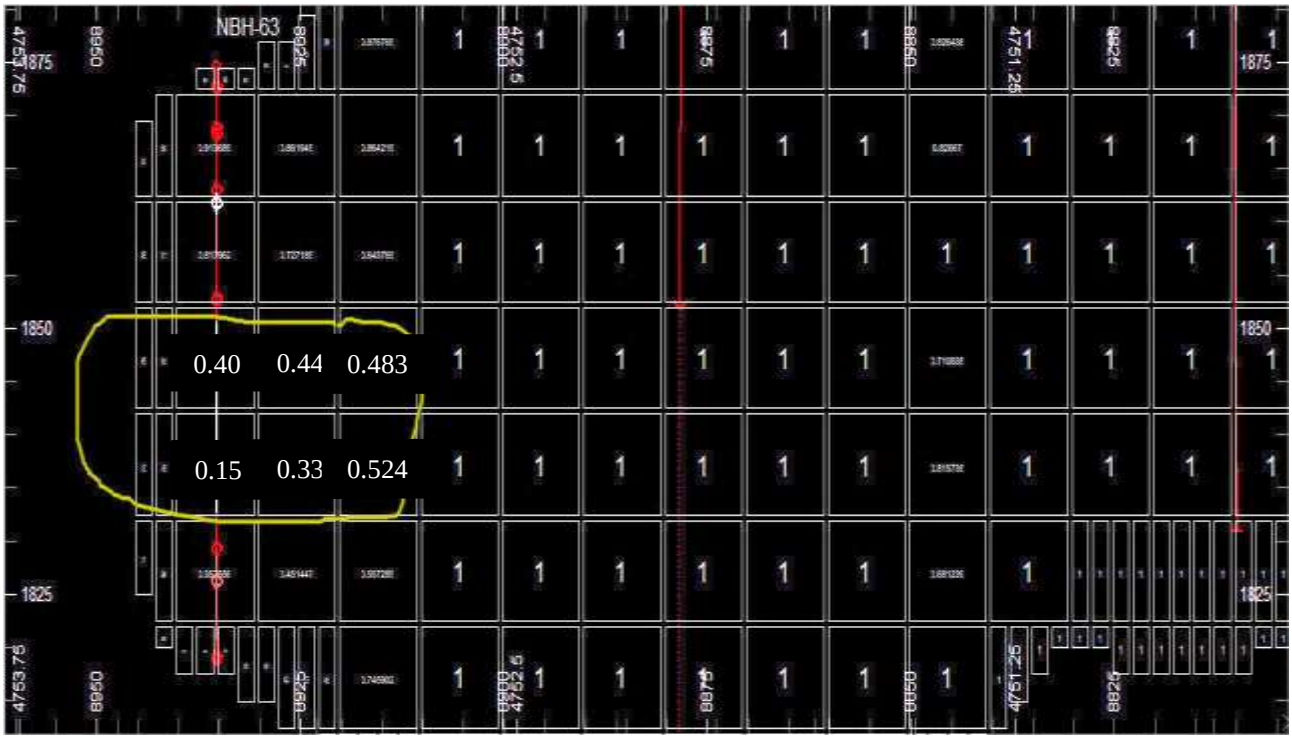
آورده شده است.

پارامترهایی که در جدول ۳ آورده شده عبارتند از: XC مختصات طول مرکز بلوک؛ YC مختصات عرض مرکز بلوک؛ ZC مختصات ارتفاع مرکز بلوک؛ X INC طول بلوک؛ Y INC عرض بلوک؛ Z INC ارتفاع بلوک؛ V_o درصد حجمی کانسنگ بلوک؛ N تعداد داده‌های شرکت کرده در تخمین بلوک و KVAR واریانس تخمین.

در نهایت، با انجام محاسبات مربوط به میزان نسبت باطله به ماده معدنی در هر بلوک، میزان رقیق‌شدگی همه بلوک‌ها به دست آمد. با جمع کردن رقیق‌شدگی تمامی بلوک‌ها و میانگین‌گیری از آن، میزان رقیق‌شدگی کلی برابر با ۱۱/۳۴ درصد محاسبه شد.

۵- شرح روش کنترل رقیق‌شدگی خارجی یا مماسی ناشی از نفوذ دایک‌ها

کنترل رقیق‌شدگی معمولا به گروه کنترل عیار واگذار می‌شود، این کار به این دلیل است که گروه کنترل عیار، نمونه‌گیری‌های لازم برای کنترل رقیق‌شدگی را انجام می‌دهند. عیار هر قسمت باید قبل از بارگیری توسط تکنسین ثبت شود تا بتوان محدوده دایک‌هایی که به توده معدنی نفوذ کرده‌اند را مشخص کرد. اگر امکان آن فراهم شود عیار را در لحظه مشخص کرد، می‌توان رقیق‌شدگی عملی حین کار را روزانه و به طبع آن در بلند مدت به شدت کاهش داد [۱۱].



شکل ۶- نمایش یکی از مقاطع کانسار و کاهش نسبت حجمی کانسنگ در بلوک‌ها به واسطه وجود عیار کمتر از عیارحد در گمانه‌ها (محدوده با رنگ زرد مشخص شده است).

جدول ۳- رقیق‌شدگی (D) برای تعدادی از بلوک‌ها.

XC	YC	ZC	X INC	Y INC	Z INC	Vo	N	KVAR	D
۷۷۹۱/۶۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۶۰/۸۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۷۳۶۷۱۲	۲۰	۰/۷۳۰۸۳۶	۰/۲۵۹۱۳۸۱۶۱
۷۷۹۴/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۶۰/۸۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۷۵۱۸۵۳	۲۰	۰/۶۷۶۵۸۳	۰/۲۴۴۱۵۶۶۸۱
۷۷۹۶/۶۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۶۰/۸۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۷۶۷۹۷۶	۲۰	۰/۶۲۲۹۸۴	۰/۲۲۸۲۱۴۰۱۸
۷۷۹۹/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۶۰/۸۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۷۸۵۰۳	۲۰	۰/۵۷۰۴۴۲	۰/۲۱۱۳۶۲۸
۷۷۹۱/۶۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۶۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۹۷۴۸۴۸	۲۰	۰/۷۰۳۶۲۵	۰/۰۲۴۶۲۹۵۶۲
۷۷۹۴/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۶۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۹۷۳۵۳۳	۲۰	۰/۶۴۹۵۲۱	۰/۰۲۵۹۱۸۶۷۴
۷۷۹۶/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۶۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۹۷۲۲۱۸	۲۰	۰/۵۹۶۰۸۵	۰/۰۲۷۲۰۶۸۷۸

XC	YC	ZC	X INC	Y INC	Z INC	Vo	N	KVAR	D
۷۷۹۹/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۶۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۹۷۰۹۴۲	۲۰	۰/۵۴۳۷۲۴	۰/۰۲۸۴۴۵۷۷۶
۷۷۹۹/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۰/۸۵	۲/۵	۲/۵	۲/۵	۰/۹۶۲۲۱	۲۰	۰/۶۰۳۸۵	۰/۰۳۷۰۱۵۵۵۳
۷۷۹۱/۶۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۹۶۹۲۲۳	۲۰	۰/۷۰۳۶۲۵	۰/۰۳۰۱۴۲۳۸۸
۷۷۹۴/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۹۶۶۷۴۷	۲۰	۰/۶۴۹۵۲۱	۰/۰۳۲۵۶۸۰۶۱
۷۷۹۶/۶۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۹۶۳۹۷۱	۲۰	۰/۵۹۶۰۸۵	۰/۰۳۵۲۸۹۲۲۳
۷۷۹۹/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۹۶۰۸۴۹	۲۰	۰/۵۴۳۷۲۴	۰/۰۳۸۳۵۰۲۲
۷۷۹۱/۶۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۸/۵	۲/۵	۲/۵	۷/۵	۰/۹۰۶۳۰۵	۲۰	۰/۷۳۹۱۳	۰/۰۹۱۸۸۴۲۲
۷۷۹۴/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۶۶۴۵۴۱	۲۰	۰/۶۷۷۷۷۶	۰/۳۳۰۶۸۱۹۴
۷۷۹۶/۶۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۶۷۵۵۲۵	۲۰	۰/۶۲۶۷۲۹	۰/۳۱۹۷۷۸۹۸۲
۷۷۹۹/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۶۸۷۲۷۹	۲۰	۰/۵۷۷۰۱۴	۰/۳۰۸۱۱۷۳۹۴
۷۷۹۱/۶۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۶۵۹۳۴۵	۲۰	۰/۷۰۳۶۲۵	۰/۳۳۵۸۴۱۰۱۲
۷۷۹۴/۱۵	۴۷۸۷/۷۵	۱۸۸۷/۱	۲/۵	۲/۵	۱۰	۰/۶۷۰۴۹۵	۲۰	۰/۶۴۹۵۲۱	۰/۳۲۴۷۷۱۰۹۳

برای کنترل رقیق‌شدگی و عیار حین معدنکاری در جبهه‌کار یک روش قابل اجرا، روش استفاده از دستگاه ایکس آر اف است. مهم‌ترین ویژگی که این روش را به یک روش کارآمد و قابل استفاده در هر معدنی تبدیل می‌کند، نحوه انجام آنالیز و مشخص کردن عیار مناطق مختلف در جبهه‌کار است که بررسی عیار به صورت سریع، دقیق و غیرمخرب[1] انجام می‌گیرد. مهم‌ترین بخش این روش استفاده از دستگاه ایکس آر اف (شکل ۷) است که در زیر معرفی شده است [۱۲].

شکل ۷- آنالیزگر ایکس آر اف [۱۲].

در واقع می‌توان گفت نوعی آزمایشگاه قابل حمل و در دسترس در دستان تکنسین کنترل عیار با نتایج لحظه‌ای وجود دارد (شکل ۸) که کار کنترل عیار مناطق مختلف در جبهه‌کار را با دقت و اطمینان قابل اعتماد انجام می‌دهد.

شکل ۸- انجام آزمایش حین کار در جبهه‌کار.

آنالیزگر جدید ایکس آر اف، در هر مکان و برای انواع کانی‌ها و کانسنگ‌های برجا، آنالیز دقیق و غیرمخرب انجام می‌دهد. همچنین بررسی قابل اطمینان و بدون دشواری عیار در معادن، بدست آوردن نتایج در دو ثانیه را ممکن می‌سازد. از جمله مزایای دستگاه ایکس آر اف دستی برای کنترل رقیق‌شدگی حین معدنکاری در جدول ۴ آورده شده است.

از نتایج بدست آمده می‌توان گفت این روش جهت ارتقا بارگیری و تلفیق بهتر طراحی و تولید و کاهش رقیق‌شدگی عملی حین کار که ناشی از نفوذ دایک‌ها است، بسیار کارآمد است. برای بررسی و مقایسه دو حالت عدم استفاده از دستگاه ایکس آر اف و حالت استفاده از دستگاه، عیار با در نظر گرفتن رقیق‌شدگی از

1-Non-destructive

رابطه ۶ بدست آورده و نتایج با هم مقایسه شد (شکل ۹ و ۱۰).

$$DG = \frac{(O \times G_O) + (W \times G_W)}{(O + W)} \qquad (۶)$$

که در آن:

DG: عیار ارسالی به کارخانه با در نظر گرفتن رقیق‌شدگی.

O: تناژ ماده معدنی استخراج شده در روز.

G_O: میانگین عیار مواد معدنی استخراجی.

W: تناژ باطله استخراج شده در روز.

G_W: میانگین عیار پیش‌بینی باطله استخراجی.

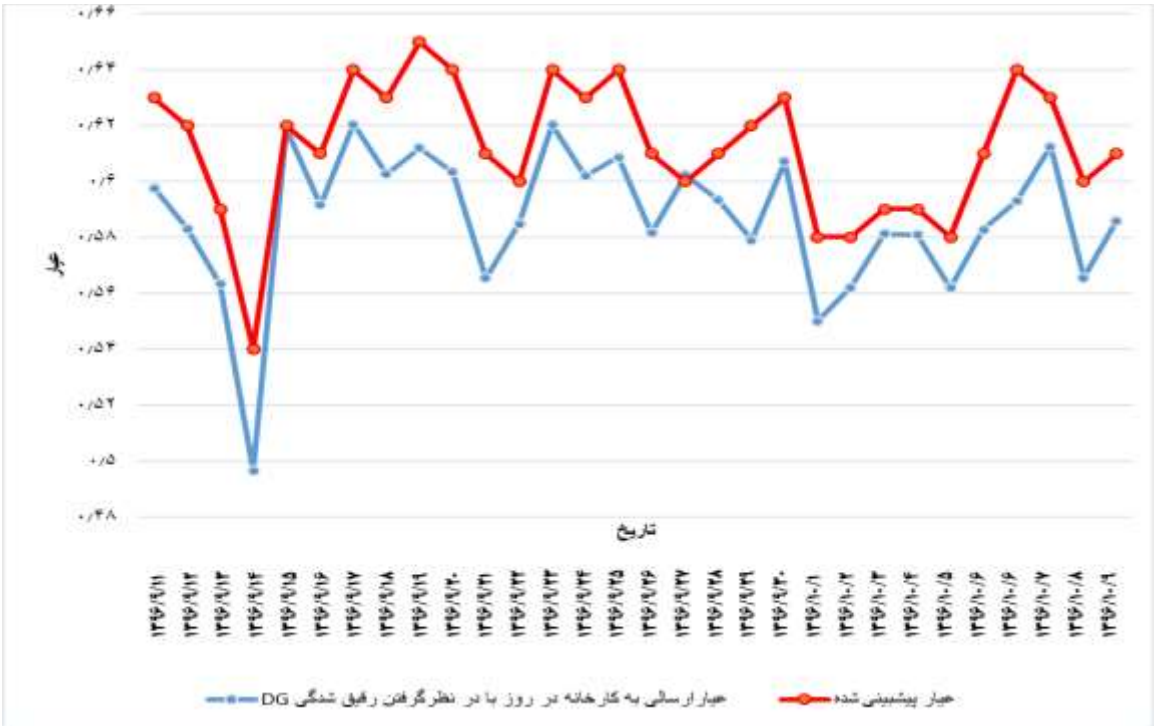
همان‌طور که از نمودارها مشخص است، قبل از اینکه از دستگاه ایکس آر اف استفاده شود، انحراف میانگین عیار ارسالی به کارخانه در روز، نسبت به عیار پیش‌بینی شده در مقایسه با حالتی که از دستگاه ایکس آر اف استفاده می‌شود، خیلی بیشتر است. استفاده از این روش باعث حذف هزینه ناشی از استخراج باطله ناشی از دایک‌ها می‌شود. کاهش این مقدار از هزینه ناشی از رقیق‌شدگی در روز در بلندمدت تاثیر زیادی در اقتصاد بلندمدت پروژه دارد.

۶- نتیجه‌گیری

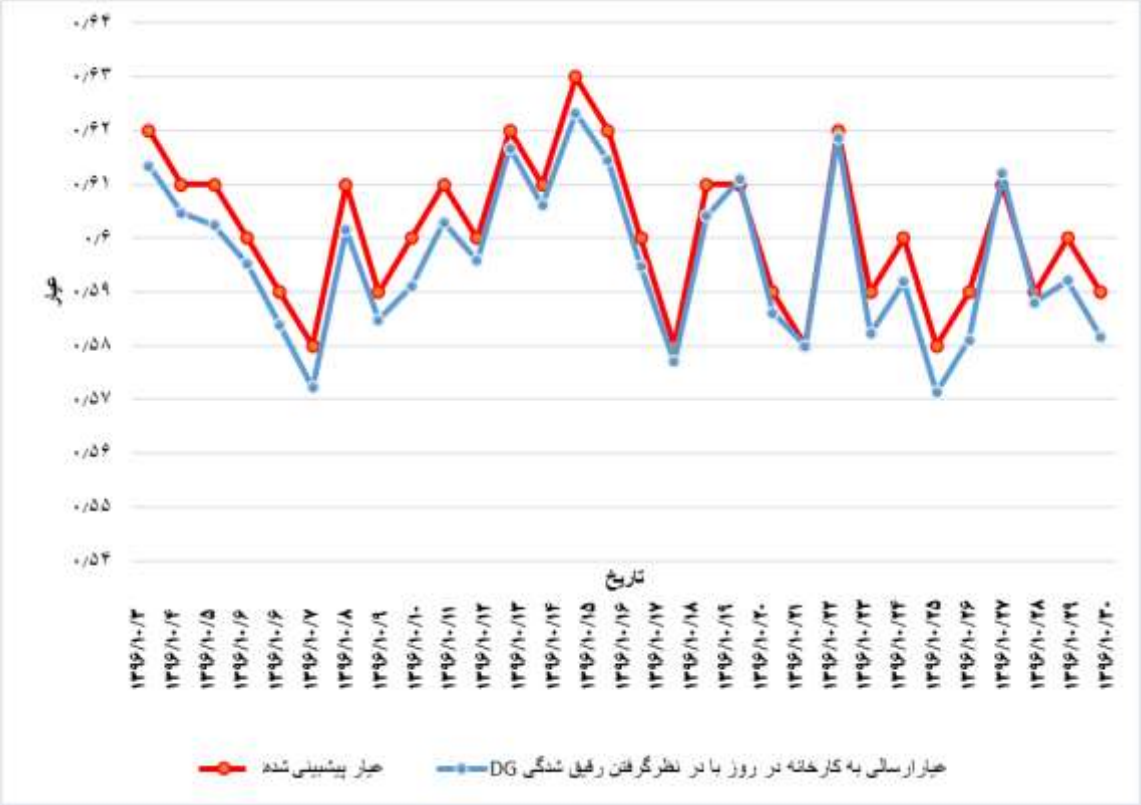
رقیق‌شدگی یکی از از قدیمی‌ترین چالش‌های معدنکاری و فرآوری است که درآمد معدن را صرف یکسری مواد می‌کند که نه تنها ارزش اقتصادی ندارند بلکه کیفیت ماده معدنی را کاهش می‌دهد. در روش معدنکاری روباز عواملی مانند نفوذ دایک‌های عقیم، تماس بلوک‌های باطله و ماده معدنی در مرزها، خطاهای نمونه‌برداری و انسانی مهم‌ترین فاکتورهای موثر بر ایجاد رقیق‌شدگی‌اند. در این مقاله به بررسی چگونگی ایجاد رقیق‌شدگی، اندازه‌گیری آن و نحوه کنترل رقیق‌شدگی خارجی پرداخته شده است. مهم‌ترین نتایج بدست آمده از این تحقیق به شرح زیر است:

جدول ۴- مزایای دستگاه ایکس آر اف دستی برای کنترل رقیق‌شدگی [۱۲].

مزایای دستگاه ایکس آر اف دستی	عدم آماده‌سازی نمونه و اندازه‌گیری مستقیم مواد خام در میدان عملیاتی یا در آزمایشگاه با میز قابل حمل
	مجهز بودن دستگاه به سپر انحصاری برای مقابله با آسیب‌دیدگی در برابر حوادث
	طراحی سبک وزن سبب کاربرد راحت آن در میدان عملیات شده است و محفظه مسافرتی مستحکم آن، حمل و نقل ایمن دستگاه را تضمین می‌کند.
	صفحه نمایش ۵ اینچی با تفکیک‌پذیری بالا و چرخش ۳۶۰ درجه، نتایج را در شرایطی با دید کم به وضوح نشان می‌دهد.
	طراحی ضدآب و ضدغبار تحلیل گر ایکس آر اف باعث شده که بتوان در محیط‌های دشوار مورد استفاده قرار داد
	آشکارسازی و اندازه‌گیری سریع با ارائه نتایج در دو ثانیه
	کاربرد آسان
	آنالیز سریع Ti، V، Cr، Mn، Fe، Co، Ni، Cu، Zn، Ga، Ge، Zr، Nb، Mo، Ru، Rh، Pd، Ag، In، Sn، Sb، Hf، Ta، W، Re، Pt، Au، Pb، Bi، Mg، Al، Si، P و S. در صورت تقاضای مشتری، می‌توان عناصر دیگر را به آسانی به آن افزود.



شکل ۹- مقایسه عیار پیش‌بینی شده با عیار واقعی بدست آمده در روز، قبل استفاده از دستگاه ایکس آر اف.



شکل ۱۰- مقایسه عیار پیش‌بینی شده با عیار واقعی بدست آمده در روز، با استفاده از دستگاه ایکس آر اف.

- تخمین میزان رقیق‌شدگی با استفاده از مدل‌سازی زمین‌آماری (کریجینگ شاخص) که میزان رقیق‌شدگی همه بلوک‌ها بدست آمد. میزان رقیق‌شدگی کلی محاسبه شده برابر ۱۱٫۳۴ درصد بوده که این عدد نسبت به حداکثر تخمین اولیه رقیق‌شدگی در معادن روباز که به صورت توده‌ای است بیشتر به نظر می‌رسد اما با توجه به وجود دایک‌ها این عدد معقول به نظر می‌رسد.
- تقسیم‌بندی جدیدی از عوامل ریشه‌ای رقیق‌شدگی در معادن روباز همچنین تقسیم‌بندی جدید رقیق‌شدگی خارجی به دو حالت رقیق‌شدگی خارجی یا مماسی ناشی از نفوذ دایک‌ها در داخل توده معدنی و رقیق‌شدگی ناشی از بلوک‌های باطله متصل در مرز محدوده نهایی با بلوک ماده معدنی ارایه شده است.
- برای کاهش رقیق‌شدگی خارجی ناشی از نفوذ دایک‌ها پیشنهاد استفاده از دستگاه ایکس آر اف مدل ۷۰۰۰ داده شد. مهم‌ترین مزیت این روش علاوه بر قابل اجرا و عملی بودن روش، نحوه انجام آنالیز و مشخص کردن عیار مناطق مختلف در جبهه‌کار است که بررسی عیار به صورت سریع (در دو ثانیه)، دقیق و غیرمخرب انجام می‌گیرد. با توجه به داده‌های آماری قبل استفاده از دستگاه و حین استفاده از دستگاه نشان می‌دهد که هنگام استفاده از دستگاه عیار میانگین روزانه به دست آمده (واقعی) مطابقت بیشتری با عیار پیش‌بینی شده دارد.

منابع

1. Câmara, Taís Renata, et al. "Controlling operational dilution in open-pit mining." *Mining Technology* 128.1 (2019): 1-8.
2. Ebrahimi, Anoush, and P. Eng. "The importance of dilution factor for open pit mining projects." *Proceedings of the 23rd World Mining Congress*. (2013).
3. Zarshenas, Yaghoub, and Gholamreza Saeedi. "Determination of optimum cutoff grade with considering dilution." *Arabian Journal of Geosciences* 10.7 (2017): 165
4. Yang, R. L., and A. Kavetsky. "A three dimensional model of muckpile formation and grade boundary movement in open pit blasting." *International journal of mining and geological engineering* 8.1 (1990): 13-34.
5. Zarshenas, Yaghoub, and Gholamreza Saeedi. "Risk assessment of dilution in open pit mines." *Arabian Journal of Geosciences* 9.3 (2016): 209.
6. Yang, R. L., and A. Kavetsky. "A three

dimensional model of muckpile formation and grade boundary movement in open pit blasting." International journal of mining and geological engineering 8.1 (1990): 13-34.

7. Câmara, Taís Renata, and Rodrigo de Lemos Peroni. "Quantifying dilution caused by execution efficiency." *REM-International Engineering Journal* 69.4 (2016): 487-490.

8. Isaaks, E. H., R. Barr, and O. Handayani. "Modeling blast movement for grade control." *Proceedings of 9th International Mining Geology Conference. Melbourne: Australasian Institute of Mining and Metallurgy*. 2014.

9. Pakalnis, R. C., R. Poulin, and J. Hadjigeorgiou. "Quantifying the cost of dilution in underground mines." *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*. Vol. 5. No. 33. 1996.

۱۰. عزیزی، ر. اصغری، ا. معصومی فشانی، ح. «مدلسازی زمین آماری میزان ترقیق (مطالعه موردی: کانسار سنگ آهن شماره ۲ گل گهر، سیرجان)». سومین کنفرانس معادن روباز ایران، ۱۳۹۴.

۱۱. افضول، ا. «گزارش کارآموزی معدن مس سونگون». دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی سهند تبریز. ۱۳۹۵

12. A Alarie, Stéphane, and Michel Gamache. "Overview of solution strategies used in truck dispatching systems for open pit mines." *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 16.1 (2002): 59-76.

13. www.skyrayinstuments.com